

# Balıkesir Üniversitesi FBE Dergisi

ISSN : 1301-7985  
e-İSSN : 2536-5142

Balıkesir Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Cilt:23 Sayı:2 Temmuz 2021

JOURNAL OF BALIKESIR UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Volume : 23 Number : 2 July 2021

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ | Cilt : 23 Sayı : 2 Temmuz 2021

Balıkesir  
Üniversitesi  
FBE  
Dergisi



Yazışma Adresi:  
BAUN FBE Dergisi, Balıkesir Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü, 10145 Çağış / Balıkesir  
Telefon : (266) 612 10 77

<http://fbed.balikesir.edu.tr>  
[fbedergi@balikesir.edu.tr](mailto:fbedergi@balikesir.edu.tr)

Balıkesir  
Üniversitesi  
FBE  
Dergisi

[fbedergi@balikesir.edu.tr](mailto:fbedergi@balikesir.edu.tr)



**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ**

Cilt 23 **Sayı** 2 Temmuz 2021

ISSN 1301-7985  
eISSN 2536-5142



Journal of Balıkesir University  
Institute of Science and Technology

Volume 23 Number 2 July 2021

ISSN 1301-7985  
eISSN 2536-5142

# BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 23 SAYI: 2

Temmuz 2021

ISSN 1301-7985  
eISSN 2536-5142

---

**Sahibi Balıkesir Üniversitesi Adına** Prof. Dr. İltar KUŞ  
Balıkesir Üniversitesi Rektörü

---

## Editörler

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR	Balıkesir Üniversitesi
Prof. Dr. Hüseyin KÜÇÜKÖZER	Balıkesir Üniversitesi
Doç. Dr. Nuray GEDİK	Balıkesir Üniversitesi
Doç. Dr. Fırat EVİRGEN	Balıkesir Üniversitesi

---

## Yayın Kurulu

Prof. Dr. M. Sedat KABDAŞLI	İstanbul Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Serdar KALE	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Prof. Dr. Ramazan KÖSE	Dumlupınar Üniversitesi
Prof. Dr. Hatice TORCU KOÇ	Balıkesir Üniversitesi
Prof. Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Osman SAĞDIÇ	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Mustafa TAVASLI	Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. İlyas UYGUR	Düzce Üniversitesi
Prof. Dr. Kemal YÜRÜMEZOĞLU	Dokuz Eylül Üniversitesi
Prof. Dr. Metin DEMİRTAŞ	Balıkesir Üniversitesi
Doç. Dr. Yasemin İNCE	Balıkesir Üniversitesi

---

---

**Yazışma Adresi:** Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çağış Yerleşkesi  
10145, Balıkesir

Tel: (0266) 612 10 77 Faks: (0266) 612 10 78

Elektronik Posta: [fbedergi@balikesir.edu.tr](mailto:fbedergi@balikesir.edu.tr)

İnternet Adresi: <http://fbed.balikesir.edu.tr>

# BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 23 SAYI: 2

Temmuz 2021

ISSN 1301-7985  
eISSN 2536-5142

---

## AMAÇ VE KAPSAM

Balıkesir Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Dergisinin amacı; Fen bilimleri, Mühendislik bilimleri ve Fen-Matematik Eğitimi alanlarında yapılan özgün araştırma makaleleri, kısa makaleleri, derlemeleri bu alanlarda saygın akademik bir kaynak oluşturmak amacıyla yayımlamaktır.

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, bilimsel ve hakemli bir dergi olup 1999 yılından bu yana yılda iki kez (ocak ve temmuz aylarında) düzenli olarak yayımlanmaktadır. Derginin yazım dili Türkçe ve İngilizcedir.

---

## YAYIM İZİNİ

Bireysel kullanım dışında, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi'nde yayımlanan makaleler ve bu makalelerde yer alan şekiller ve tablolar yazılı izin olmaksızın çoğaltılamaz. Bilimsel makalelerde akademik usullere uygun atıf yapılmak sureti ile alıntı yapılabilir.

---

## YAZILARIN BİLİMSEL VE HUKUKİ SORUMLULUĞU

Yayımlanan yazıların bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazarlarına aittir. Editör, Yardımcı Editörler ve Yayın Kurulu üyeleri dergideki hatalardan veya kullanımından kaynaklanan sonuçlardan dolayı sorumluluk kabul etmez.

---

**Yazışma Adresi:** Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çağış Yerleşkesi  
10145, Balıkesir

Tel: (0266) 612 10 77 Faks: (0266) 612 10 78

Elektronik Posta: fbedergi@balikesir.edu.tr

İnternet Adresi: <http://fbed.balikesir.edu.tr>

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Plastik termofom prosesinin adaptif yanıt yüzey yöntemi ile eniylenmesi: Şahlan Plastik firmasında uygulaması**

Optimization of plastic thermoform process with adaptive response surface methodology: a case study at Sahlan Plastic Co.

377-388

**Aslan Deniz KARAOĞLAN, Gözde ALICI, Gamze DÜZGÜN, Sibel Gyunay SALI**

**Manyetokalorik etki gösteren La<sub>0.67</sub>Ba<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> perovskit manganit bileşiğinin manyetik soğutma teknolojisinde kullanılabilirliğinin incelenmesi**

Examination of the usability of La<sub>0.67</sub>Ba<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub> perovskite manganite compound with magnetocaloric effect in magnetic cooling technology

389-401

**Yusuf SAMANCIOĞLU**

**AZ31B-H24 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin incelenmesi**

Investigation of weldability of AZ31b-H24 magnesium alloy by friction welding method

402-413

**Sare ÇELİK, Ali ORAL, Alper GÜNDOĞMUŞ**

**NIOSH ve REBA yöntemleri kullanılarak ergonomik risk analizi vaka çalışması**

A case study of ergonomic risk analysis using NIOSH and REBA methods

414-433

**Serhat AYDIN**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Düşük hızlı ve küçük güçlü rüzgar türbinleri için kalıcı mıknatıslı senkron generatör tasarımı**

Design of permanent magnet synchronous generator for low speed and small power wind turbines 434-454

**Oktay KARAKAYA, Batın DEMİRCAN, Murat Erhan BALCI**

**Abiyotik yüzeylerde termofilik *Anoxybacillus rupiensis* DSM 17127T suşunun biyofilm oluşumu ve polistiren yüzeyler üzerindeki biyofilm yapısının giderimi**

Biofilm formation of the thermophilic *Anoxybacillus rupiensis* strain DSM 17127T on abiotic surfaces and removal of its biofilm structure on polystyrene surfaces 455-470

**Tuğba KILIÇ, Başar KARACA, Arzu ÇÖLERİ CİHAN**

**Bisiklet paylaşım istasyonlarının belirlenmesi: CBS tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımı**

Determination of bicycle sharing stations: GIS-based multi-criteria decision making approach 471-489

**Elif ALKILINÇ, Şehnaz CENANİ, Gülen ÇAĞDAŞ**

**Fractional approach for multi-dimensional wave-like equations with variable coefficient using an efficient method**

Değişken katsayılı çok boyutlu dalga benzeri denklemler için kesirli yaklaşım üzerine etkili bir metot 490-514

**Fatma Berna BENLİ**

**Yükseköğretim sınıflarında iç ortam sıcaklığı ve bağıl nem düzeyinin analizi: Balıkesir Üniversitesi Örneği**

Analysis of indoor temperature and relative humidity level in higher education classes: Balıkesir University Example 515-528

**Yusuf YILDIZ**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff denkleminin analitik çözümleri**

Analytical solutions of Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff equation 529-538

**Güldem YILDIZ, Çiğdem TÜRKMEN**

**The effect of the new opacities on the stellar models**

Yeni opaklıkların yıldız modellerine etkisi 539-542

**Gülay İNLEK**

**Lif takviyeli pirinç kabuğu külü ikameli beyaz çimentolu harçların bazı mekanik özelliklerinin incelenmesi**

Investigation of some mechanical properties of fiber-reinforced rice husk ash substituted white cement mortars 543-559

**Yurdakul AYGÖRMEZ**

**Bitki örneklerinden seçici gallik asit ayrılması için gallik asit baskılanmış polimerlerin hazırlanması**

Preparation of gallic acid imprinted polymers for selective gallic acid separation from plant samples 560-576

**Tülden İNANAN**

**Standart olmayan sonlu fark metodu ile dağılımlı mertebeden SVIR modelinin nümerik analizi**

Numerical analysis of distributed order SVIR model by nonstandard finite difference method 577-591

**Mehmet KOCABIYIK, Mevlüde YAKIT ONGUN,  
İlkem TURHAN ÇETİNKAYA**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Modal behaviour investigation of spur gears with lumped parameter and finite element methods**

Alın dişlilerin yığılı parametre ve sonlu elemanlar yöntemiyle modal davranışının incelenmesi 592-607

**Ali TATAR, Mertol TÜFEKÇİ**

**Uniqueness theorems for some classes of nonlinear fractional differential equations in the Riemann-Liouville sense**

Riemann-Liouville tip kesirli türevli lineer olmayan denklemlerin bazı sınıfları için teklik teoremleri 608-619

**Müfit ŞAN**

**Buluş yoluyla öğrenme ve anlamlı öğrenme yaklaşımlarına dayalı bir öğretim etkinliği; kimyasal denge tepkimeleri ve stokiyometri ilişkisi**

A teaching activity based on discovery learning and meaningful learning approaches: the relationship between stochiometry and chemical equilibrium reactions 620-644

**Soner ERGÜL**

**Kapalı idealler üzerinde asal gamma halkasının kesirler halkası**

Quotient rings of prime gamma ring on the closed ideals 645-652

**Ahmet GENÇ**

**$G_3$ 'te  $\Delta^{\parallel}x_i = \lambda_i x_i$  şartını sağlayan küresel çarpım yüzeyleri**

Spherical product surfaces satisfying  $\Delta^{\parallel}x_i = \lambda_i x_i$  in  $G_3$  653-672

**Bengü BAYRAM, Özgün BİÇGİN**



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**The modified trial equation method to the (2+1)-dimensional Broer-Kaup-Kupershmidt equation and Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov equation**

(2+1)-boyutlu Broer-Kaup-Kupershmidt denklemi ve Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov denklemine modifiye edilmiş deneme denklem metodu 673-684

**Seyma TULUCE DEMIRAY , Serife DUMAN**

**Cibacron Blue F3GA ile modifiye polimerik mikroküreler ile RuBisCO adsorpsiyonu**

RuBisCO adsorption via polymeric microbeads modified with Cibacron Blue F3GA 685-702

**Bilgen OSMAN, Asuman CANSEV**

**İnşaat projelerindeki riskler ve bu riskleri azaltmak için inşaat sektöründe kullanılan sigortalar üzerine bir araştırma**

A research on risks in construction projects and insurances used to mitigate those risks in the construction industry 703-715

**Çağla KÜÇÜKERDEN, Gürkan Emre GÜRCANLI, Senem BİLİR MAHÇİÇEK**

**Defining phylogenetic relationship between the genera Opopanax and Crenosciadium using nuclear and chloroplast DNA sequence data**

Opopanax ve Crenosciadium cinsleri arasındaki filogenetik ilişkinin çekirdek ve kloroplast DNA dizisi verilerinin kullanılarak belirlenmesi 716-731

**Taner ÖZCAN, Özlem ÇETİN, Mustafa ÇELİK, Fatih ALBAYRAK**

**Fractional approach for model of network access control using efficient method**

Etkili yöntem kullanan ağ erişim kontrolü modeli için kesirli yaklaşım 732-747

**Esin İLHAN**

**İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Son deneysel veriler ışığında CMSSM**

CMSSM in the light of the recent experimental data 748-759

**Yaşar HİÇYILMAZ**

**Determinants of passenger loyalty for high speed rail system in Turkey**

Türkiyedeki yüksek hızlı tren sisteminde yolcu sadakatinin belirleyicileri 760-781

**Güzin AKYILDIZ ALÇURA, Gülhayat Gölbaşı ŞİMŞEK,  
Sümeyye Şeyma KUŞAKCI GÜNDOĞAR,  
Sami Cankat TANRIVERDİ, Mustafa GÜRİSOY**

**Siber saldırı tespiti için makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarının incelenmesi**

Investigation of performance of machine learning methods for cyber-attack detection 782-791

**Fatih DEMİR**

**Performance comparison of artificial bee colony algorithm based approaches for retinal vessel segmentation**

Retinal damar segmentasyonuna yönelik yapay arı koloni algoritması tabanlı yaklaşımların performans mukayesesi 792-807

**Mehmet Celalettin CİHAN, Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA,  
Hakan DURAN**

**İnşaat mühendislerinin kariyer planlamaları üzerine bir araştırma**

A research on the career planning of civil engineers 808-818

**Fehmi ÇİVİCİ**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Confirmation of the experimentally measured cooling time of Polyethylene Terephthalate (PET) melt by ANSYS and FORTRAN**

Polietilen Teraftalat (PET) eriyiğinin deneysel olarak ölçülen soğutma süresinin ANSYS ve FORTRAN tarafından doğrulanması 819-830

**Bilal DEMİREL, Mustafa DANACI, Fatih AKKURT, Ali YARAŞ**

**Örüntüler konusunda 7.sınıf öğrencilerinin karşılaştıkları zorlukların incelenmesi**

Investigation of difficulties encountered by 7th grade students in learning of pattern subject 831-849

**Burcu KOCAMAZ, Nazlı Yıldız İKİKARDEŞ**

**Approximation in Weighted Orlicz Spaces with a generating Young function that might be non-convex**

Konveks olması gerekmeyen genelleştirilmiş Young fonksiyonu ile üretilen Ağırlıklı Orlicz Uzaylarında yaklaşım 850-866

**Ali DOĞU, Yunus Emre YILDIRIR**

**When some complement of a certain submodule is a summand**

Belirli alt modüllerinin tümleyeni toplanan olan modüller 867-872

**Yeliz KARA**

**Aza-18-crown-6 modifiye karbon nanotüplerin sentezi, karakterizasyonu ve adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesi**

Synthesis and characterization determination aza-18-crown-6 modified carbon nanotubes and determination of adsorption capacity 873-887

**Baki ÇİÇEK**

# Plastik termoform prosesinin adaptif yanıt yüzey yöntemi ile eniyilenmesi: Şahlan Plastik firmasında uygulaması

Aslan Deniz KARAOĞLAN<sup>1,\*</sup>, Gözde ALICI<sup>1</sup>, Gamze DÜZGÜN<sup>1</sup>,  
Sibel Gyunay SALI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 10145, Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Şahlan Plastik Süt Ürünleri Gıda Maddeleri Amb. San. ve Tic.Ltd.Şti., Balıkesir OSB, Balıkesir, Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 22.04.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 07.07.2020

## Öz

Bu çalışmada, plastik termoform süreci eniyilenmesi üzerine çalışılmıştır. Bu amaçla Balıkesir OSB’de faaliyet gösteren Şahlan Plastik firmasının termoform bardak şekillendirme süreci adaptif yanıt yüzey yöntemi (AYYY) kullanılarak eniyilenmiştir. Bu yöntem kontrol edilebilen değişkenleri ve kontrol edilemeyen değişkenleri birlikte dikkate alarak eniyileme yapan bir yöntemdir. Çalışmanın uygulama aşamasında, 200 ml’lik beyaz ayran bardağı üretimi ele alınmıştır. Makine bölge sıcaklıkları (4 farklı bölge), kalıp hızı, giriş suyu sıcaklığı, ortam sıcaklığı, bobin soğuma saati girdilerine karşılık gözlenen bardak ağırlıkları için 48 adet gözlem değeri alınmıştır. Ağırlık ile ağırlık üzerinde etkili bu faktörler arasındaki ilişki regresyon denklemi ile modellenmiştir. Modelin kullanılabilir olup olmadığını belirlemek için, belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ve ANOVA analizi sonuçlarına bakılmıştır. Ardından, anlamlı bulunan bu model için 5 gr bardak ağırlığını veren eniyilenmiş üretim süreç parametreleri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Plastik termoform prosesi, regresyon, adaptif yanıt yüzey yöntemi, eniyileme.

\* Aslan Deniz KARAOĞLAN, deniz@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-3292-5919>

Gözde ALICI, gghfalici@hotmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1693-7055>

Gamze DÜZGÜN, gamzeeduuzguun@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0525-8679>

Sibel Gyunay SALI, sibelsali@sahlanplastik.com, <http://orcid.org/0000-0003-0154-0554>

## Optimization of plastic thermoform process with adaptive response surface methodology: a case study at Sahlan Plastic Co.

### Abstract

*In this study, optimization of plastic thermoforming process is considered. For this purpose, thermoform cup forming process of Sahlan Plastic Company operating in Balıkesir Industrial Zone was optimized by using Adaptive Response Surface Methodology (ARSM). This method is an optimization method by dealing with controllable variables and uncontrollable variables together. During the application phase of the study, the production of 200 ml white buttermilk glasses was discussed. Zone temperatures (4 different zones), mold speed, inlet water temperature, ambient temperature, coil cooling time are used as the factors, while the cup weights were measured as the output (response) and 48 observation values were taken. The relationship between weight and these factors affecting the weight is modeled with the regression equation. To determine whether the model is significant, the results for the coefficient of determination ( $R^2$ ) and ANOVA analysis were examined. Then, for this model - which is found to be significant - the optimized production process parameters were determined, giving the weight of 5 g.*

**Keywords:** Plastic thermoforming process, regression, adaptive response surface methodology, optimization.

### 1.Giriş

Günümüzde plastik ürünler hemen hemen her alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Extrüderden çıkan plastik levhaların, istenilen kalınlık ölçülerini sağlayacak şekilde termoform prosesi ile şekillendirilmesiyle, müşteri ihtiyaçlarına uygun plastik ürünler elde edilir. Termoform yumuşama noktasına kadar ısıtılan plastik levhaya ısı ve basınçla şekil verme sistemidir [1, 2].

Plastik ürünlerin imalatında firenin, çevresel etkinin ve maliyetlerin düşürülmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar konuyu; kalıp tasarım parametrelerinin, ürün tasarım parametrelerinin veya proses parametrelerinin eniyilenmesi (optimizasyonu) gibi pek çok farklı boyutta ele almıştır. Tang ve ark. [3] çarpılmayı azaltmak için plastik enjeksiyon kalıbının tasarımında Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Deformasyondan kaynaklı fireyi en aza indirebilmek amacıyla, eriyik sıcaklığı, doldurma süresi, paketlenme basıncı ve paketlenme süresi faktörlerinin optimum değerini araştırmışlardır. Karataş ve ark. [4] silindir sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon akış hızı ve kalıp sıcaklığı değişkenlerini ele almış ve yapay sinir ağları ile optimizasyon gerçekleştirmişlerdir. Akyurek ve ark. [5] yeni termoplastik ürünlerin devreye alınma sürecinde yapay sinir ağlarının kullanımı üzerine çalışmışlardır. Volkan ve ark. [6] plastik enjeksiyon prosesinde üründeki çarpılmayı azaltmak amacıyla Taguchi yöntemini kullanmışlar ve uygun kalıp tasarımı yapabilmek amacıyla ürün tasarımı, giriş sayısı, giriş ölçüleri, yolluk tasarımı faktörlerinin eniyilenmesi üzerine çalışmışlardır. Chy ve ark. [7] plastik termoform prosesinde, plastik levha sıcaklığını kontrol etme üzerine çalışmıştır. O'Connor ve ark. [8] termoform şekil verme prosesi eniyilenmesi üzerine çalışmış ve sürtünme, ısı transferi gibi parametreleri dikkate

almışlardır. Erdogan ve Eksi [9] termoform prosesinde polipropilen (PP) ve polistiren (PS) plastik levhalar için et kalınlığı dağılımı üzerine çalışmıştır. Kumar ve ark. [10] malzeme karakteristiğinin ve kalıp parametrelerinin ince polipropilen levhaların termoform süreci üzerindeki etkisini incelemiştir. Ghobadnam ve ark. [11] yüksek etkili polistiren levhaların termoform süreci üzerine çalışmışlar ve levhaların kalınlık dağılımını gözlemlemiştir. Oktariani ve ark. [12] plastik levha şekillendirme süreci eniyilenmesi için süreç üzerinde etkili katman sayısı, sıcaklık, süre ve basınç faktörlerinin eniyilenmiş değerlerini bulmak amacıyla bulanık mantıktan yararlanmışlardır. Leite ve ark. [13] vakum termoforming süreci üzerine çalışmışlar ve polistiren (PS) hammaddesiyle üretilen plastik ürünlerin boyutsal ve geometrik hatalarını kesirli tam faktöriyel tasarım kullanarak enküçüklemeye çalışmışlardır. Landsecker ve Bonten [14] simülasyondan yararlanarak ısı iletken plastik malzemelerin termoform süreci üzerine çalışmıştır. Dobah ve ark. [15] keten takviyeli polipropilen kompozit malzemelerin termoform süreci üzerine çalışmıştır. Sıcaklık, kalma süresi, basınç ve fabrikasyon alanına ait parametrelere karşılık keten/PP laminatların mekanik ve estetik performansında nem emilimini incelemiştir.

Bu çalışmada ise gıda sektörünün ihtiyaçları doğrultusunda plastik ürünler üreten bir firmada, kalıplama yöntemi olarak basınçlı termoform kullanan ayran bardağı üretim süreci ele alınmıştır. Amaç, istenilen ürün ağırlığını elde edebilmek amacıyla, termoform bardak şekillendirme makinesinin bilgisayar kontrollü üretim parametrelerinin; adaptif yanıt yüzey yöntemi (AYYY) [16] kullanarak optimize edilmesi ve istenilen ağırlıkta ve kalitede ürün üretiminin gerçekleştirilmesidir. Literatürde plastik termoform plastik şekil verme süreç parametrelerinin eniyilenmesi amacıyla AYYY kullanan bir çalışmaya rastlanmamıştır ve bu yönüyle çalışma yenilik içermektedir. Ayrıca çalışmada kullanılan faktör kombinasyonu da daha önceden denenmemiştir ve çalışmanın diğer bir yenilikçi yönüdür. Çalışmanın motivasyonu; 200 ml'lik beyaz ayran bardağının basınçlı plastik termoform süreci ile üretiminde, 5 gr ağırlığında bardaklar üretebilmek için hangi süreç parametrelerinin dikkate alınması gerektiği ve bunların hedef değer üzerindeki etkileri üzerine sektörel bilgi birikimine katkı sağlamaktır.

## 2.Yöntem

### 2.1 Regresyonla modelleme ve yanıt yüzey yöntemi

Deney tasarımı yöntemleri, girdiler ile çıktılar arasındaki matematiksel ilişkiyi belirlemeyi ve bu ilişkiyi kullanarak istenilen hedef çıktı değerini sağlayan girdi parametrelerinin değerlerini bulmayı amaçlar. Yaygın olarak kullanılan deney tasarımı yöntemleri yanıt yüzey yöntemi (YYY), faktöriyel tasarım ve Taguchi yöntemidir. Taguchi yöntemi sinyal/gürültü (S/N) oranı adı verilen ve kontrol edilebilen değişkenlerin çıktı üzerindeki etkisini, kontrol edilemeyen değişkenlerin çıktı üzerine olan etkisine oranlayarak kararlı sistemler tasarlamak için faktör değerlerini arayan bir yöntemdir. Taguchi yönteminde seçilen faktörler nicel olabileceği gibi nitel değişkenlerde olabilir, faktör seviyelerinin eşit olmasına gerek yoktur ve çok az sayıda deney gerektirir. Bunlar Taguchi yönteminin avantajları olmakla birlikte, dezavantajı eniyilenmiş sonucu değil eniyilenmiş sonuca yakın bir değer vermesidir. Bir diğer yaygın kullanılan deney tasarımı yöntemi ise faktöriyel tasarım yöntemidir. Bu yöntemde de faktörler nicel veya nitel olabilir ancak faktörler sadece 2 seviyeli olabilir. Taguchi yönteminin tersine faktöriyel tasarımda girdiler ile çıktılar arasındaki ilişki

matematiksel olarak regresyon denklemi ile modellenebilir. Regresyon denkleminin lineer regresyon olması gerekir, doğrusal olmayan ilişkileri modellemek ve eniyilemek için uygun bir yöntem değildir. YYY'de ise sadece nicel değişkenler için modelleme yapılabilir. Diğer iki yönteme göre çok daha fazla deney sonucuna ihtiyaç duymakla birlikte, doğrusal olmayan ilişkiler içeren sistemleri modellemekte ve eniyilemekte etkili bir araçtır. YYY'nin matematiksel formülü Denklem (1)'de verildiği gibidir [16-21]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

Burada  $Y$  çıktıyı,  $X_i$  girdi değişkenlerini (faktörler),  $X_i X_j$  çarpımları değişkenler arasındaki etkileşimleri;  $\beta$  katsayıları model parametrelerini,  $\varepsilon$  ise hata terimini göstermektedir. Regresyon denkleminin içermesi gerektiği terimlere karar verildikten sonra (lineer, lineer+karesel, lineer+etkileşim terimleri, veya tam karesel)  $\beta$  katsayılarının hesaplanması gerekir. Minitab deney tasarımı modülü (DOE) ile yapılan analizlerde regresyon denkleminin hangi terimlere sahip olması gerektiği kullanıcıya sorulmaktadır. Buna cevap verebilmek için, eniyileme yapılacak sistemin mekanizması hakkında bilgi sahibi olmak faydalı olacaktır. Aşağıda Denklem (2)'de  $\beta$  katsayılarının nasıl hesaplandığı gösterilmektedir:

$$\beta = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad (2)$$

Burada  $Y$  çıktı vektörünü,  $X$  girdi matrisini,  $\beta$  model parametrelerini gösteren vektörü temsil etmektedir. YYY'nin üzerine geliştirilen ve çok sayıda kontrol edilemeyen değişkenlerinde üretim sistemini etkilediği problemler için önerilen AYYY'de ise; ele alınan bu regresyon denkleminin girdi matrisi, kontrol edilebilen değişkenlerin yanında kontrol edilemeyen değişkenleri de içermektedir.  $Y$  vektörü, gözlenen çıktı değerlerinin yer aldığı bir sütun vektördür.  $X$  ise bir matristir.  $X$  matrisinin 1. sütunu sabit terimi ( $\beta_0$ )'ı temsil etmek üzere 1'ler sütunundan oluşmaktadır.  $X$  matrisinin diğer sütunları ise Denklem (1)'de verilen sırada faktör değerlerinden oluşur. Bu çalışmada ele alınan problemi çözmek amacıyla izleyen Bölümde görüleceği üzere 48 gözlem değeri alınmıştır. Dolayısıyla  $X$  matrisi 48 satırdan oluşur. Denklemde verilen  $T$  transpoz alma işlemini ifade etmektedir [17-20]. Regresyon denklemi bulunduktan sonra iki tane önemli analiz yapılması gerekir. Bunlar: (i) Belirleme Katsayısı ( $R^2$ ) hesaplamak, (ii) Varyans Analizi (ANOVA).  $R^2$  matematiksel denklemde yer alan  $X$  parametrelerinin  $Y$ 'deki değişimi açıklamak için yeterli olup olmadığını test etmek için kullanılır.  $R^2$  değeri 1 (%100)'e yakınsa parametre sayısı yeterlidir.  $R^2$  düşük ise veri toplama aşamasına dönerek, yeni  $X$  değişkenlerine ait veri toplamak ve sonrasında regresyon denklemini bu yeni faktörleri de dâhil ederek yeniden kurmak gerekir.  $R^2$ 'nin denklemi aşağıda Denklem (3)'te verildiği gibidir:

$$R^2 = \frac{\beta^T X^T Y - n \bar{Y}^2}{Y^T Y - n \bar{Y}^2} \quad (3)$$

$R^2$  kabul edilebilir bir değer olarak bulunduysa, sıradaki işlem ANOVA'dır. ANOVA ile F-testi yardımıyla modelin anlamsız olduğunu iddia eden  $H_0$  hipotezine karşı, modelin anlamlı olduğunu iddia eden  $H_1$  hipotezi test edilir. Bu amaçla gözlem değerlerinden hesaplanan  $F$  değeri ile istatistiksel tablolardan serbestlik derecelerine göre ( $m$ : modeldeki  $\beta$  katsayılarının sayısı,  $N$ : gözlem sayısı) bulunabilecek  $F$ -kritik değeri kıyaslanır. Eğer  $F > F$ -kritik ise  $H_1$  kabul edilir ve model anlamlı demektir. Bir

diğer yol ise P değeri yaklaşımıdır. %95 güven düzeyinde (*I. tip hata olasılığı* =  $\alpha = \%5 = 0,05$ ), hesaplanan P değeri  $< 0,05$  ise model anlamlı demektir. ANOVA tablosu aşağıda Tablo 1’de verildiği gibidir [17]:

Tablo 1. ANOVA tablosu.

Değişimin kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F
Regresyonla Açıklanan (işletim)	$m-1$	$KT_{İşletim}$	$KO_{İşletim} = KT_{İşletim} / (m-1)$	$F = KO_{İşletim} / KO_{Hata}$
Regresyonla Açıklanamayan (Hata)	$N-m$	$KT_{Hata}$	$KO_{Hata} = KT_{Hata} / (N-m)$	

ANOVA sonunda modelin anlamlı bulunması, elde edilen regresyon denkleminin eniyileme amacıyla kullanılabileceğini gösterir. Bu çalışmada “*Minitab Response Optimizer*” modülü kullanılarak regresyon denkleminin temsil ettiği yanıt yüzeyi üzerinde arama yapılmıştır. Arama algoritması olarak Minitab “*Gradient Search*” metodunu kullanmaktadır. AYYY ile optimizasyon yaparken öncelikle optimizasyon yapılacak zaman kesitinde, regresyon denkleminde yer alan kontrol edilemeyen değişkenlerin değerleri bulunarak regresyon denkleminde yerine konur. Böylelikle denklem eskiden kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen değişkenleri aynı anda içeriyorken, artık sadece kontrol edilebilen değişkenlerden oluşur. Bu yeni denkleme daha sonra “*Gradient Search*” uygulanarak istenilen hedef çıktı değerini veren faktör değerleri hesaplanır.

## 2.2 Ele alınan üretim sistemi

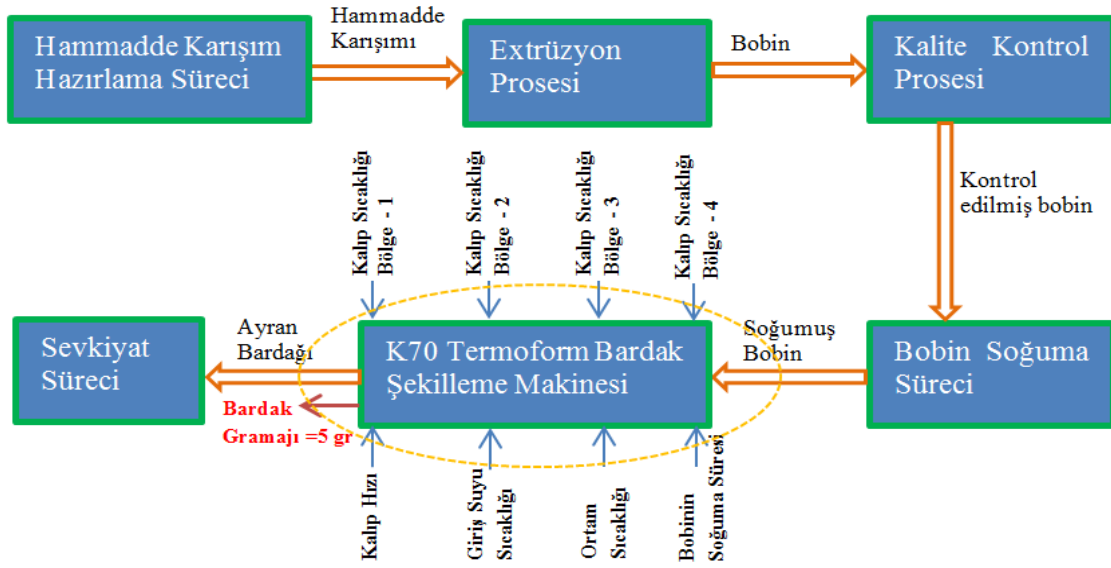
Bu çalışma Balıkesir Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren Şahlan Plastik (Şahlan Plastik Süt Ürünleri Gıda Maddeleri Ambalaj San. ve Tic. Ltd. Şti.) firmasında gerçekleştirilmiştir. Şahlan plastik, plastik sanayinde faaliyet gösteren bir işletme olup kuruluş amacına uygun olarak polipropilen (PP) ve polistiren (PS) hammaddeleri kullanarak gıda ürünleri için ambalaj üretimi yapmaktadır. İşletmenin ana ürün gruplarını ayran bardağı, yoğurt kabı ve tatlı kâsesi oluşturmaktadır. Ayran bardağı ve yoğurt kabı üretiminde ana hammadde olarak PP kullanılırken, tatlı kâsesinde PS kullanılmaktadır. Bu çalışmada süt ürünleri gıda ambalajlanmasında kullanılan PP hammaddesinden imal edilmiş ayran bardağının üretim süreci ele alınmış ve ekstrüzyon prosesi sonunda üretilen PP plastik levhalar kullanılarak bilgisayar kontrollü termoform makinesi ile gerçekleştirilen beyaz ayran bardağı üretim süreci optimize edilmeye çalışılmıştır.

Şahlan Plastik’te üretim süreci, plastik levha üretimi ile başlar. Bu amaçla gerekli hammaddelerin belirlenmiş reçetelere göre karışımları hazırlanır. Bu karışım ekstrüder hattından geçip bobin haline gelir. Bobin kalite kontrolden geçer ve barkodlanıp depolanır. Bobinin termoform makinesine (sıcak şekil verme makinesi) takılmadan önce belirli bir süre soğuması gerekir. Yeterince soğumadan takılan bobin iyi şekil alamazsa fire oluşmasına sebep olur. Bu yüzden bobinin yeterince soğuması önemli bir detaydır ancak bu ortam sıcaklığından etkilendiği için süreye ait net bir alt sınır vermek zordur. Seri imalat koşulları ve termin tarihi kısıtları altında bobinlerin soğuma süresi önemli bir zaman kısıtını da beraberinde getirmektedir. Bobinin çok uzun süre soğutma amacıyla kenarda bekletilmesi ise; termin süresi kısıtları ve müşteri talepleri göz önüne alındığında önemli bir üretim kısıtıdır. Sonrasında bobinler, termoform makinesine yerleştirilir. Büyük boyutta, ince etli ve hafif levhalar termoform işlemi için uygundur. Termoform ısıtma ve şekillendirme olmak üzere iki adımdan oluşur. Plakanın istenilen



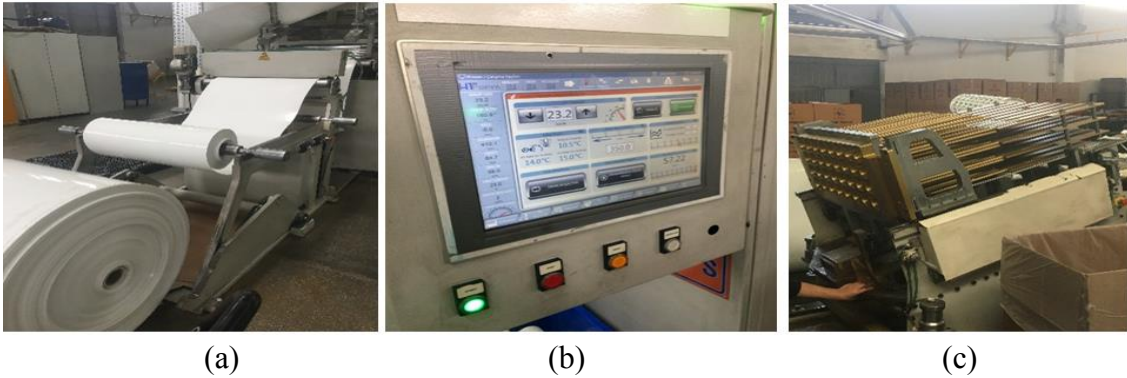
seviyede yumuşatılması için gerekli ısıtma süresi polimere, levha kalınlığına ve plastiğin rengine bağlıdır. Isıtılan plaka konkav kalıp (dişi) içerisine veya pozitif kalıp (erkek) boşluğu içerisine yerleştirilerek çoğunlukla vakumlu termoform, basınçlı termoform ve mekanik termoform yöntemlerinden biri ile plastik ürüne şekil verme işlemi yapılır [2].

Bu çalışmada ele alınan şekilleme makinesi K70 termoform bardak şekilleme makinesi'dir. Bu makine basınç ve sıcaklık etkisiyle çalışır (basınçlı termoform yöntemi) ve otomatik dizicileri mevcuttur. Kullanıcı ekranı üzerinden üretim parametrelerinin değerlerini ayarlamak ve takip etmek mümkündür. Üretim sürecinin kaba iş akışı aşağıda Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ayran bardağı üretim süreci.

K70 termoform bardak şekilleme makinesine ait görseller Şekil 2'de verilmiştir. Bobin termoform sürecine alındığında Şekil 2(a)'da görüldüğü gibi makineye bağlanır ve ardından hız ve sıcaklık ayarları yapılır. Makinenin üretim parametreleri Şekil 2(b)'de görülen ekran üzerinden yapılır.



Şekil 2. K70 termoform bardak şekilleme makinesine ait görseller.

Optimize edilecek bu ayarların detayları makalenin bir sonraki bölümü olan uygulama bölümünde verilecektir. Bardaklar Şekil 2(c)'de görüldüğü gibi, 8 sıra ve 4 sütun

halinde makineden çıkar. Ayran bardağının homojen olması, bardak ağzında deformasyon olmaması ile gramajların eşit ve istenilen değerde olması önemli kalite karakteristikleridir. Bu çalışmada homojenliği düzgün olan ve bardak ağzında deformasyon olmayan ürün numuneleri arasından seçilen örneklem kullanılarak; diğer önemli bir kalite karakteristiği olan 5 gr ağırlığında bardak üretimi gerçekleştirebilmek için termoform proses parametrelerinin ne olması gerektiği araştırılmıştır. Bu amaçla 200 ml'lik beyaz bardak üzerinde çalışılmış ve farklı şekillendirme parametre değerleri için seri imalat devam ederken veri toplanarak izleyen bölümdeki AYYY ile eniyilenme çalışması gerçekleştirilmiştir. Uygulama bölümünde seçilen parametre aralığı, seçilen numunelerin homojenliğinin uygun ve bardak ağzı deformasyonun olmadığı uygun çözüm uzayını (feasible region) oluşturmaktadır.

### 3. Uygulama

Bu çalışmada 5 gr ağırlığında 200 ml'lik beyaz ayran bardağı üretebilmek amacıyla, PP beyaz plastik levhaların bilgisayar kontrollü termoform prosesi ile şekillendirilme süreç parametrelerinin eniyilenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışma boyunca ölçülmüş ve süreç üzerinde etkili kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörler ve gözlem boyunca bunlara ait kaydedilen enküçük ve enbüyük değerler aşağıda Tablo 2'de verildiği gibidir:

Tablo 2. Ürün gramajı üzerinde etkili faktörler.

Faktör Adı	Kısaltma	Birimi	Değişken Tipi	Min.	Maks.
Üst Kalıp Sıcaklığı–Bölge 1	$X_1$	°C	Kontrol Edilebilen	440	452
Üst Kalıp Sıcaklığı–Bölge 2	$X_2$	°C	Kontrol Edilebilen	427	443
Üst Kalıp Sıcaklığı–Bölge 3	$X_3$	°C	Kontrol Edilebilen	430	445
Üst Kalıp Sıcaklığı–Bölge 4	$X_4$	°C	Kontrol Edilebilen	442	454
Kalıp Hızı	$X_5$	adet/dk	Kontrol Edilebilen	22,7	23,4
Giriş Suyu Sıcaklığı	$X_6$	°C	Kontrol Edilebilen	10,4	13,5
Ortam Sıcaklığı	$X_7$	°C	Kontrol Edilemeyen	13	26
Bobin Soğuma Süresi	$X_8$	saat	Kontrol Edilebilen	7	24

Standart deney tasarımı ile modelleme ve eniyileme sürecinde, faktörler ve seviyeleri belirlendikten sonra ortogonal dizilere dayalı deney tasarımı yapılarak gözlenecek faktör değerlerinin kombinasyonlarının önceden belirlenmesi gerekir. Ardından kontrollü olarak her bir deney kombinasyonu için çıktı değeri ölçülür. Ancak çalışma üretimin devam ettiği sürekli akış özelliğinde bir sistemde gerçekleştirilmiş olup, üretimin akışının bozulmaması için girdi değerleri ve buna karşılık gözlenen çıktı değeri üretim devam ederken ölçülmüş ve anlık olarak kaydedilmiştir. Bu amaçla üretim sisteminden 48 farklı değişken kombinasyonuna ait gözlem değerleri ( $Y_i$ ) alınmıştır.

Tablo 3. Termoform makinesinden alınan gözlem değerleri.

Gözlem No	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$Y_i$	$\hat{Y}_i$
1	440	430	431	443	23,1	11,2	23	14	5,03	5,0533
2	440	430	431	443	23,1	11,2	23	14	5,06	5,0533
3	440	430	431	443	23,1	11,2	23	14	5,07	5,0533
4	440	427	430	443	23,3	11,2	23,3	14	5,11	5,1167
5	440	427	430	443	23,3	11,2	23,3	14	5,11	5,1167
6	440	427	430	443	23,3	11,2	23,3	14	5,13	5,1167
7	442	432	433	445	23,3	10,8	22	15	5,11	5,1567
8	442	432	433	445	23,3	10,8	22	15	5,18	5,1567
9	442	432	433	445	23,3	10,8	22	15	5,18	5,1567
10	442	432	433	445	23,1	11,1	23	14	5,18	5,2600
11	442	432	433	445	23,1	11,1	23	14	5,3	5,2600
12	442	432	433	445	23,1	11,1	23	14	5,3	5,2600
13	442	432	433	445	23,1	11,1	22	14	5,06	5,0600
14	442	432	433	445	23,1	11,1	22	14	5,06	5,0600
15	442	432	433	445	23,1	11,1	22	14	5,06	5,0600
16	440	430	435	445	23,2	10,5	25	24	5,06	5,1033
17	440	430	435	445	23,2	10,5	25	24	5,12	5,1033
18	440	430	435	445	23,2	10,5	25	24	5,13	5,1033
19	444	434	435	447	23,2	10,8	22	15	5,07	5,0767
20	444	434	435	447	23,2	10,8	22	15	5,08	5,0767
21	444	434	435	447	23,2	10,8	22	15	5,08	5,0767
22	440	430	435	445	23,2	10,5	25	24	5,06	5,1033
23	440	430	435	445	23,2	10,5	25	24	5,12	5,1033
24	440	430	435	445	23,2	10,5	25	24	5,13	5,1033
25	444	434	435	447	23,2	10,8	22	15	5,07	5,0767
26	444	434	435	447	23,2	10,8	22	15	5,08	5,0767
27	444	434	435	447	23,2	10,8	22	15	5,08	5,0767
28	444	434	435	447	22,9	11,1	24	14	5,23	5,2333
29	444	434	435	447	22,9	11,1	24	14	5,23	5,2333
30	444	434	435	447	22,9	11,1	24	14	5,24	5,2333
31	442	437	437	447	23	10,4	25	24	5,08	5,0833
32	442	437	437	447	23	10,4	25	24	5,08	5,0833
33	442	437	437	447	23	10,4	25	24	5,09	5,0833
34	442	432	437	442	22,8	10,7	26	24	5,03	5,0367
35	442	432	437	442	22,8	10,7	26	24	5,04	5,0367
36	442	432	437	442	22,8	10,7	26	24	5,04	5,0367
37	446	436	437	449	22,8	11	20	14	5,22	5,2267
38	446	436	437	449	22,8	11	20	14	5,22	5,2267
39	446	436	437	449	22,8	11	20	14	5,24	5,2267
40	446	436	437	449	22,8	10,9	21	14	5,19	5,2033
41	446	436	437	449	22,8	10,9	21	14	5,21	5,2033
42	446	436	437	449	22,8	10,9	21	14	5,21	5,2033
43	444	427	439	449	22,7	10,6	24	24	5,03	5,0400
44	444	427	439	449	22,7	10,6	24	24	5,04	5,0400
45	444	427	439	449	22,7	10,6	24	24	5,05	5,0400
46	452	443	445	454	23,4	13,5	13	7	5,25	5,2667
47	452	443	445	454	23,4	13,5	13	7	5,27	5,2667
48	452	443	445	454	23,4	13,5	13	7	5,28	5,2667

Tablo 3’de verilen gözlem değerleri kullanılarak faktörler ile yanıt (bardak gramajı) arasındaki matematiksel ilişkiyi gösteren regresyon denklemi ve bu denklem kullanılarak tahmin edilen gramaj değerleri ( $\hat{Y}_i$ : *beklenen değer*) Minitab istatistiksel analiz programı yardımıyla hesaplanmıştır. Tabloda gözlenen çıktı değerleri ölçüm aletinin hassasiyetinden dolayı 2 haneli olarak ölçülebilmektedir. Minitab yardımıyla tahmin edilen çıktı değerleri ise daha net bir karşılaştırma sunabilmek amacıyla 4 haneli olarak okuyucuya sunulmuştur. Minitab ile hesaplanan regresyon denklemi Denklem (4)’te verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} \text{Ağırlık } (\hat{Y}) = & -15961.2237650965 + 34.6423636994751X_1 + \\ & 31.6854347993203X_2 + 14.1884118844497X_3 - 44.0732366151581X_4 + \\ & 606.343105982473X_5 + 184.378321572743X_6 + 0.2X_7 - \\ & 0.173282532310004X_8 - 0.0713501553338619X_1X_2 - \\ & 0.029758097920351X_1X_3 + 0.0993663211921783X_1X_4 - \\ & 1.35564022393639X_1X_5 - \\ & 0.408396834617511X_1X_6 \end{aligned} \quad (4)$$

Regresyon denklemlerinin Minitab ile hesaplanan  $R^2$  değerleri incelendiğinde  $R^2=0,93,30$  (Tablo 3’te verilen 48 adet gözlem değeri için hesaplanan  $R^2$ ),  $R^2_{Prediction}=0,86,42$  (Minitab’ın kendi içinde yaptığı simülasyonla hesapladığı ve Tablo 3’te yer almayan değerler için beklenen en düşük tahmin performansı),  $R^2_{Adjusted}=0,90,74$  (regresyon denklemine ait katsayılar için yapılan hipotez testlerine göre, güven aralığı geniş olan – başka bir deyişle güvenilir olmayan – parametreler denklemden çıkarılırsa hesaplanacak olan  $R^2$  değeri) olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi  $R^2$  değerleri kabul edilebilir olup matematiksel modelde yer alan bu 8 tane faktörün, bardak ağırlığındaki değişimi modellemede yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Minitab ile %95 (*I. tip hata olasılığı* =  $\alpha = 0,05 = 0,05$ ) güven düzeyinde hesaplanan ANOVA analiz sonuçları aşağıda Tablo 4’te verildiği gibidir.

Tablo 4. ANOVA sonuçları.

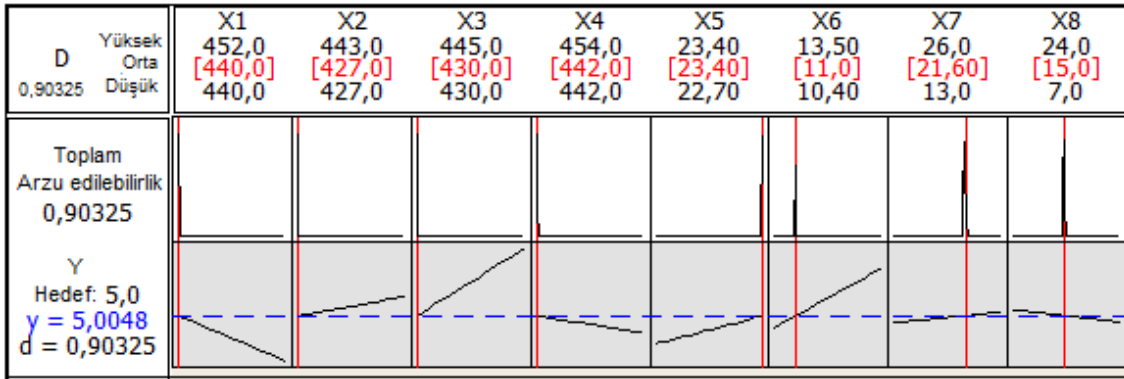
Değişimin kaynağı	Serbestlik Derecesi	KT	KO	F	P
Regresyonla Açıklanan	13	0,296181	0,022783	36,4	0,000
Regresyonla Açıklanamayan (Hata)	34	0,021267	0,000625		

Tablo 4’e göre  $P=0,000$  değeri  $\alpha = 0,05$  değerinden küçük olduğu için (veya hesaplanan F değeri, istatistiksel F-Tablosundan bakılan kritik değer olan  $F_{\alpha,m-1,N-m} = F_{0,05,13,34} = 2,0207$  değerinden büyük olduğu için)  $H_1$  hipotezi (model anlamlıdır) kabul edilir. Dolayısıyla bu model eniyileme amacıyla kullanılabilir. Bu amaçla “Minitab Response Optimizer” modülünden yararlanılmıştır.

Tablo 2’den de görülebileceği gibi matematiksel modelde yer alan 8 faktörden ilk 6 tanesi termoform makinesi ayarları ile ilgilidir ve operatör tarafından istenilen değere ayarlanabilen (kontrol edilebilen) değişkenlerdir. Bobin soğuma süresi ( $X_8$ ) aynı şekilde kontrol edilebilen bir değişkendir. Ancak ortam sıcaklığının da belirli bir düzeyde ürün kalitesi üzerinde etkisi olduğu geçmiş tecrübelerden bilinmektedir. Bu nedenle modelde ortam sıcaklığı ( $X_7$ )’de yer almaktadır. Ancak  $X_7$  kontrol edilemeyen değişkendir.

Dolayısıyla bu çalışmada literatürde önerilen standart YYY çözümü yerine, ele alınan problemi çözmek amacıyla Karaoğlan ve Çelik tarafından önerilen AYYY (adaptive RSM) kullanılmıştır [16]. Bu yöntem 3 aşamalı olarak uygulanmaktadır. 1. Aşamada: kontrol edilebilen ve edilemeyen değişkenleri birlikte içerecek şekilde matematiksel model kurulmaktadır; 2. Aşamada: eniyileme yapılacak zaman kesitinde ölçülen kontrol edilemeyen değişken değerleri modelde yerine konarak, sadece kontrol edilebilen değişkenlerden oluşan model elde edilmektedir. 3. Aşamada: yeni elde edilen ve sadece kontrol edilebilen değişkenlerden oluşan model kullanılarak eniyileme tamamlanmaktadır. Mevcut yöntemlerden farkı ise kontrol edilemeyen değişkenlerin değerlerindeki anlık her değişim için optimum sonuç kendisini sürekli yenilemektedir. Dolayısıyla yöntem, kontrol edilemeyen değişkenlerin (bu çalışmada ortam sıcaklığı değişkeni) etkili olduğu üretim sistemlerinde, tek bir optimum yerine sürekli değişen çevresel koşullar altında o anki ortam koşullarına uygun optimum sonuç bulmaya yaramaktadır [16, 19, 20].

Bu çalışmada eniyileme yapılacak parti için kontrol edilemeyen değişken olan ortam sıcaklığı ( $X_7$ ) 21,6 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca ( $X_8$ ) 15 saattir soğumakta olan bir bobin kullanılmıştır ve “Minitab Response Optimizer” modülüne bu değer manuel olarak girildikten sonra, bardak gramajı 5 gr olacak şekilde yanıt değişkeninin eniyilenmesi başlatılmış ve Şekil 3 elde edilmiştir.



Şekil 3. “Minitab Response Optimizer” eniyileme grafiği.

Bu sonuçlara göre ortam sıcaklığı ( $X_7$ ) 21,6 °C iken ve 15 saattir soğumakta olan bobin kullanıldığında ( $X_8$ ); termoform makinesi sırasıyla 4 Bölge sıcaklıkları olan  $X_1=440$ ,  $X_2=427$ ,  $X_3=430$ ,  $X_4=442$  °C olarak ayarlanıp, kalıp hızı  $X_5=23,4$  adet/dk, giriş suyu sıcaklığı  $X_6=11$  °C değerine ayarlanarak 200 ml’lik beyaz ayran bardağının ağırlığı hedef değer olan 5.0048 gr olarak elde edilmiştir.

#### 4. Sonuç ve öneriler

Bu çalışma, Şahlan Plastik firmasının termoform bardak şekillendirme süreç parametreleri AYYY kullanılarak optimize edilmiştir. Çok sayıda süreç parametresi içeren ve çevresel koşullardan da etkilenen bu sürecin, seri imalat devam ederken deneme yanılmalarla eniyilenmeye çalışılması, hem zaman hem de maliyet açısından zor bir problemidir. Bu amaçla bu çalışmada regresyonla modelleme ve eniyileme üzerine çalışılmıştır. AYYY kontrol edilebilen değişkenleri ve kontrol edilemeyen değişkenleri birlikte dikkate alan bir yöntem olup, plastik termoform prosesi için daha

önceden uygulanmamıştır. Bu amaçla 200 ml'lik beyaz ayran bardağının basınçlı plastik termoform süreci ile üretimi ele alınmış ve 5 gr ağırlığında bardaklar üretebilmek için hangi süreç parametrelerinin dikkate alınması gerektiği araştırılmıştır. Süreç parametrelerinin hedef değer üzerindeki etkileri dikkate alınarak eniyileme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda hedef değere ulaşılmıştır. Bu çalışma benzer sürece sahip firmalara, süreçlerini optimize edebilmeleri amacıyla bir yöntem önerisi sunmaktadır. Gelecek çalışmalarda farklı tip ürünler ve farklı renk levhalar kullanılarak çalışma tekrar edilecek ve sonuçlar genişletilecektir.

## Teşekkür

Çalışmaya katkılarından dolayı Şahlan Plastik Süt Ürünleri Gıda Maddeleri Ambalaj San. ve Tic. Ltd. Şti. (Balıkesir – Türkiye) sahibi Ömer VURAL'a ve firma çalışanlarına teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] Florian, J., **Practical thermoforming principles and applications**, 2nd Edition, CRC Press, NY, USA, (1988).
- [2] Plastikciyiz.biz.<https://www.plastikciyiz.biz/bilgi-kutuphanesi/teknik-bilgi-kutuphanesi/436/plastik-termoform-prosesi> (20.04.2020)
- [3] Tang, S. H., Tan, Y. J., Sapuan, S. M., Sulaiman, S., Ismail, N. ve Samin, R., The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage, **Journal of Materials Processing Technology**, 182, 1-3, 418-426, (2007).
- [4] Karataş, Ç., Sözen, A., Arcaklıoğlu, E. ve Ergüney, S., Modelling of yield length in the mould of commercial plastics using artificial neural networks, **Materials and Design**, 28, 1, 278-286, (2007).
- [5] Akyurek, A., Kece, A., Aksoy, A. ve Ozturk, N., Termoplastik ürünlerin yeni ürün devreye alma sürecinde bir yapay zeka yaklaşımı, **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi dergisi**, 14, 1, (2009).
- [6] Volkan, E., Belevi, M. ve Koçhan, C., Taguchi metodu ile plastik enjeksiyon parçalarda çarpılmanın en aza indirilmesi, **DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 12, 2, 17-29, (2010).
- [7] Chy, M. M. I., Boulet, B. ve Haidar, A., A model predictive controller of plastic sheet temperature for a thermoforming process, **Proceedings of the American Control Conference**, 4410-4415, (2011).
- [8] O'Connor, C. P. J., Martin, P. J., Sweeney, J., Menary, G., Caton-Rose, P. ve Spencer, P. E., Simulation of the plug-assisted thermoforming of polypropylene using a large strain thermally coupled constitutive model, **Journal of Materials Processing Technology**, 213, 9, 1588-1600, (2013).
- [9] Erdoğan, E. S. ve Ekşi, O., Prediction of wall thickness distribution in simple thermoforming moulds, **Strojnski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering**, 60, 3, 195-202, (2014).
- [10] Kumar, P. S., Kumar, G. K., Kommoji, S., Banerjee, R. ve Ghosh, A. K., The effect of material characteristics and mould parameters on the thermoforming of thick polypropylene sheets, **Journal of Plastic Film & Sheeting**, 30, 2, 162-180, (2014).

- [11] Ghobadnam, M., Mosaddegh, P., Rejani, M. R., Amirabadi, H. ve Ghaei, A., Numerical and experimental analysis of HIPS sheets in thermoforming process, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 76, 5-8, 1079-1089, (2015).
- [12] Oktariani, E., Istikowati, R., Tomo, H. S. S., Rizal R. ve Pratama, Y., Multi response optimization of sheet forming of kenaf-polypropylene composites using grey based fuzzy algorithm, **3rd International Conference on Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)**, Article number: UNSP 03000 , Surakarta, Indonesia, (2017).
- [13] Leite, W. O., Rubio, J. C. C., Mata, F., Hanafi, I., Carrasco, A., Dimensional and geometrical errors in vacuum thermoforming products: an approach to modeling and optimization by multiple response optimization, **Measurement Science Review**, 18, 3, 113-122, (2018).
- [14] Landsecker, K. ve Bonten, C., Thermoforming simulation of heat conductive plastic materials using the K-BKZ model, **Proceedings of PPS-34: The 34th International Conference of the Polymer Processing Society - Conference Papers**, 2065, Article Number: UNSP 030049, (2019).
- [15] Dobah, Y., Zampetakis, I., Ward, C. ve Scarpa, F., Thermoformability characterisation of Flax reinforced polypropylene composite materials, **Composites Part B – Engineering**, 184, Article Number: 107727, (2020).
- [16] Karaoglan A. D. ve Celik N., A new painting process for vessel radiators of transformer: wet-on-wet (WOW), **Journal of Applied Statistics**, 43, 2, 370-386, (2016).
- [17] Montgomery, D. C., **Design and analysis of experiments**, 8th ed. John Wiley & Sons, Inc., NJ, USA, (2013).
- [18] Mason, R. L., Gunst, R. F. ve Hess, J. L., **Statistical design and analysis of experiments**, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., NJ, USA, (2003).
- [19] Karaoglan, A. D., Demir, M. M. ve Çarkacı, M. M., Yonga levha üretim süreçlerinde pres süresinin enküçüklenmesi, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 24, 4, 658-664, (2017).
- [20] Karaoglan, A. D. ve Meric, A. Nikel kaplama prosesinde verimli olarak kullanılan nikel oranının yanıt yüzey yöntemi ile eniyilenmesi. **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 25, 4, 507-512, (2019).
- [21] Krishnaiah, K. ve Shahabudeen, P., **Applied Design of Experiments and Taguchi Methods**, *PHI Learning*, New Delhi, India, (2012).

# Manyetokalorik etki gösteren $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ perovskit manganit bileşiğinin manyetik soğutma teknolojisinde kullanılabilirliğinin incelenmesi

Yusuf SAMANCIOĞLU\*

\*Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler Ve Teknikler Bölümü, Optisyenlik Programı, 48700 Marmaris, Muğla

Geliş Tarihi (Received Date): 02.10.2020  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 16.12.2020

## Öz

Perovskit manganit yapılı bileşikler yüksek manyetokalorik etki (MKE) ve devesa manyetodirenç (DMD) etkileri göstermeleri nedeniyle son yıllarda oldukça yaygın olarak çalışılan malzemelerdir.  $\text{ABO}_3$  formundaki perovskit manganit bileşikleri, ideal durumda iken antiiferromanyetik ve yalıtkan özellik sergilerken, A-bölgesine yapılan +1 ve/veya +2 değerlikli element katkısı ile ferromanyetik ve iletken özellik göstermektedir. Perovskit manganit bileşikler elektriksel ve manyetik özelliklerini katkılama ile değiştirilebilir ve yığın olarak kolayca üretilerek şekillendirilebilir olmasının yanında, gösterdikleri yüksek MKE nedeniyle yeni tip soğutucu elemanı olarak manyetik soğutma (MS) sistemlerinde etkin olarak kullanılacak yeni tip malzeme olma özelliği taşımaktadır. Bu çalışmada, alaşımlar yerine daha ucuza mal edilen ve şekillendirilmesi kolay olan perovskit manganit bileşiği ele alınmıştır. İdeal durumdaki  $\text{LaMnO}_3$  perovskit manganit bileşiğinde La eksiltiyle yerine %33 (1/3) oranında Ba katkılanmıştır. Ba katkılanan  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiği sol-jel metodu kullanılarak üretilmiş ve yığın olarak elde edilmiştir. Daha sonra örnek  $1000^\circ\text{C}$ 'de 24 saat ısıtılma tabi tutulmuş, yapısal ve manyetik özellikleri incelenmiştir. Perovskit manganit bileşiğin X-ışınları kırınım deseni üzerinden yapılan arıtım sonucunda bileşiğin kübik yapıda olduğu tespit edilmiş ve  $\text{Pm}3\text{m}$  uzay grubuna ait olduğu bulunmuştur. SEM analizlerinden tane boyutunun 100-200 nm aralığında değiştiği gözlenmiştir. Sıcaklığa bağlı yapılan mıknatıslanma ölçümlerinden  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  perovskit manganit bileşiğinin Curie geçiş sıcaklık ( $T_C$ ) değeri 341 K, 1 T manyetik alan altında hesaplanan manyetik entropi ( $-\Delta S_M$ ) değeri 0.87 J/kg/K ve manyetik soğutucu malzeme olarak kullanılabilirliğini gösteren göreceli soğutma gücü (RCP) değeri 38 J/kg olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Manyetokalorik etki, perovskit manganit, manyetik soğutma.

\* Yusuf SAMANCIOĞLU, ysamancioglu@mu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3540-5011>



# Examination of the usability of $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$ perovskite manganite compound with magnetocaloric effect in magnetic cooling technology

## Abstract

*Perovskite manganite structures are widely studied materials in recent years because of their high magnetocaloric effect (MCE) and colossal magnetoresistance effect (CMR). While it is an ideal structure,  $\text{ABO}_3$  perovskite manganite compounds show antiferromagnetic and insulating property. When in ideal condition, they show ferromagnetic and conductive properties with the addition of +1 and / or +2 valence elements to the A-region. Perovskite manganite compounds can be changed with additives for their electrical and magnetic properties and can be easily produced and shaped in bulk, as well as being a new type of material to be used effectively in magnetic cooling (MS) systems as a new type of cooling element due to their high MCE. In this study, instead of alloys, the perovskite manganite compound, which is cheaper and easy to shape, is discussed. In the ideal condition,  $\text{LaMnO}_3$  perovskite manganite compound was replaced by Ba with 33% (1/3), by reducing La. The Ba doped  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  compound was produced using the sol-gel method and was obtained in bulk. Then, the sample was heat treated at  $1000^\circ\text{C}$  for 24 hours and its structural and magnetic properties were examined. The perovskite manganite compound was purified on the X-ray diffraction pattern, and it was found that the compound has a cubic structure and belongs to the  $\text{Pm}\bar{3}\text{m}$  space group. It was observed from SEM analysis that the particle size varied between 100-200 nm. From temperature-dependent magnetization measurements, the Curie transition temperature ( $T_C$ ) value of  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  perovskite manganite compound is 341 K, the magnetic entropy ( $-\Delta S_M$ ) value calculated under 1 T magnetic field is 0.87 J/kg/K and the relative cooling power showing its usability as a relative cooling power (RCP) value calculated the value as 38 J/kg.*

**Keywords:** Magnetocaloric effect, perovskite manganite, magnetic cooling.

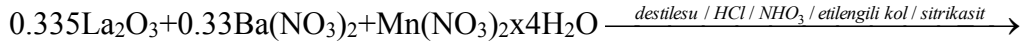
## 1.Giriş

Günümüz soğutma sistemlerinde yaygın olarak gaz çevrimli soğutucular kullanılmaktadır. Bu gaz çevrimli soğutucu sistemleri hem enerji verimliliği hem de çevrecilik ve dayanıklılık açısından manyetik soğutma sistemleri ile kıyaslandığında çeşitli avantaj ve dezavantajları sağlamaktadır. Enerji verimliliği göz önüne alındığında ise manyetik soğutucularda %50'ye varan kazançlar sağlanabilmektedir. Bilimsel deney düzeneklerinde çok düşük sıcaklıklara ulaşmak için geçmişten günümüze kadar kullanılan manyetokalorik etki gösteren malzemelerin (manyetik soğutucuların), günümüzde ise oda sıcaklığı civarında çalışır hale getirme çalışmaları devam etmektedir. Ülkemizde yeni uygulanmaya başlayan Montreal protokolü ile ozon tabakasına zarar verici etkileri bulunan soğutucu sıvı (HFC) veya gazların (CFC ve HCFC) kullanımını kısıtlamaya ve bunların yerini alacak çeşitli (yeni) akışkanlar kullanılmaya başlamıştır. Çevre duyarlılığı yüksek olan daha çevreci ve daha az enerji gereksinimi olan yeni nesil soğutucu tasarımları ve soğutma gücü yüksek malzemeler

üretilmeye çalışılmaktadır. Perovskit manganitli bileşikler kullanılarak yapılan çalışmalarla oda sıcaklığı civarında düşük, manyetik alan değişimlerinde ise yüksek manyetokalorik etki (MKE) gösteren yeni nesil soğutucularda kullanılacak yeni tip malzemelerin üretilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca bu malzemelerin manyetik alana duyarlı olması nedeniyle sanayi, bilişim ve savunma gibi farklı alanlarda da kullanım alanları bulunmaktadır [1-3, 19].

## 2. Malzeme ve yöntem

Bu çalışmada yer alan  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  perovskit bileşiği sol-jel metodu kullanılarak üretilmiştir. Sol-jel yöntemi için gerekli safsızlığa sahip sarf malzemeler, %99.9  $\text{La}_2\text{O}_3$  (Sigma-Aldrich), %98.5  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (Merck), %99  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  (Merck), %99.9  $\text{H}_2\text{O}_2$ , %37 HCl (Merck),  $\text{NH}_3$  (Merck), %99.5  $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  (etilenglikol) (Merck),  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{xH}_2\text{O}$  (sitrik asit) (Merck), 600 ml beher, porselen kroze, alimuna kayıktan oluşmaktadır. Sol-jel yöntemi, metal-oksit çözeltileri veya metal tuzları, nitratlar, hidroksitler ve oksitler gibi inorganik bileşiklerin belirli oranlarda su ve asitle birleştirilerek çözelti haline getirilmesi ve bu çözeltinin ısıtıcı manyetik karıştırıcıda belirli sıcaklıklarda karıştırılması aşamalarını içermektedir. Hedeflenen bileşiğin elde edilmesi için kurulan denklem;



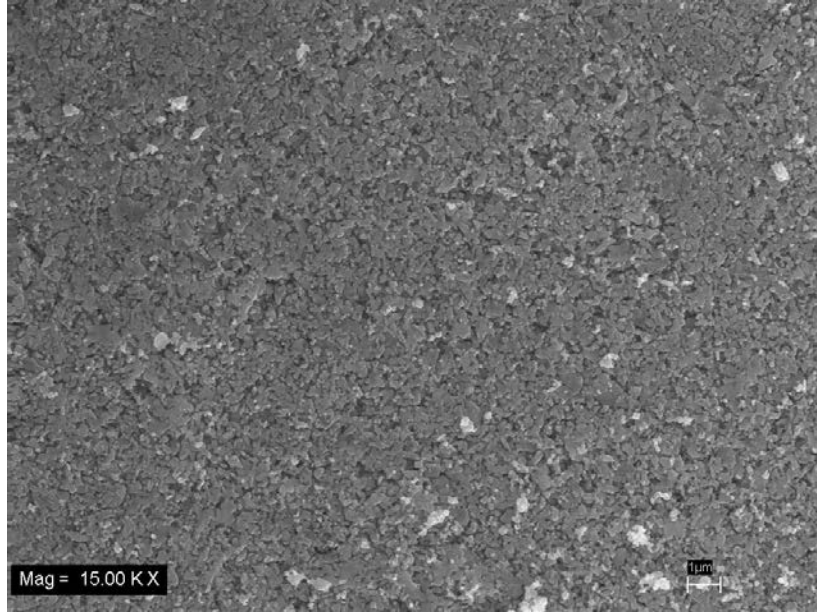
→  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  + Organik Ürünler (yakma işleminden sonra yapıdan uzaklaşır.) şeklindedir. Bileşik içindeki oksijen harici metallerin toplam mol sayısı bulunup, mol sayısının 10 katı kadar sitrik asit ve etilen glikol eklenmiştir. Burada sitrik asit şerhatlayıcı ( kıvam arttırıcı ), etilen glikol jelleştirici ajan olarak kullanılmıştır.

Karışma sürecinde, çözelti içerisinde birbirini izleyen bir dizi kimyasal reaksiyon ve taneciklerin sahip olduğu yüzey yüklerinin elektro kimyasal etkileşimleri ile bir ağ meydana gelmesi (jelleşme) ve bu ağın büyüyerek sistem içerisindeki bütün noktalara ulaşarak jel oluşturması bu tekniğin temelini oluşturur. Bu çalışmada, sol-jel yöntemi ile bileşikler üretmek için, suda kolay çözünen nitrat tuzları veya nitrik asitte çözünebilen oksit bileşikleri kullanılmıştır. 6 gram bileşik hazırlamak için kimyasal tepkimeler göz önünde bulundurularak, başlangıç malzemelerin miktarları (gram/mol oranları) belirlenmiştir. Tüm bileşikler çözelti haline getirilip karıştırıldıktan sonra sitrik asit ve etilen glikol çözeltiye ilave edilerek elde edilen son karışım ısıtıcı manyetik karıştırıcının üzerine konulur. Isıtılarak manyetik karıştırma işlemi 350 °C'de gerçekleştirilmiştir ve çözelti içerisindeki su ve asitlerin buharlaşması sağlanmıştır. Aynı zamanda, oluşan jelimsi çökeltinin kurummasına kadar ısıtma işlemine devam edilmiş ve 600 °C'de yakma işlemi sonunda bileşikler öğütülerek homojen hale getirilmiştir. Son olarak malzemeye şekil vermek için 1 gram toz bileşik hidrolik preste 3-4 bar basınç altında preslenerek 13 mm çapında 2 mm kalınlığında tablet (yığın) olarak elde edilmiştir. Elde edilen tabletler, programlanabilir fırın yardımıyla 1000 °C'de 24 saat boyunca ısıtma işlemi uygulanmış ve bileşiklerin hazırlama süreci tamamlanmıştır [3-7, 18].

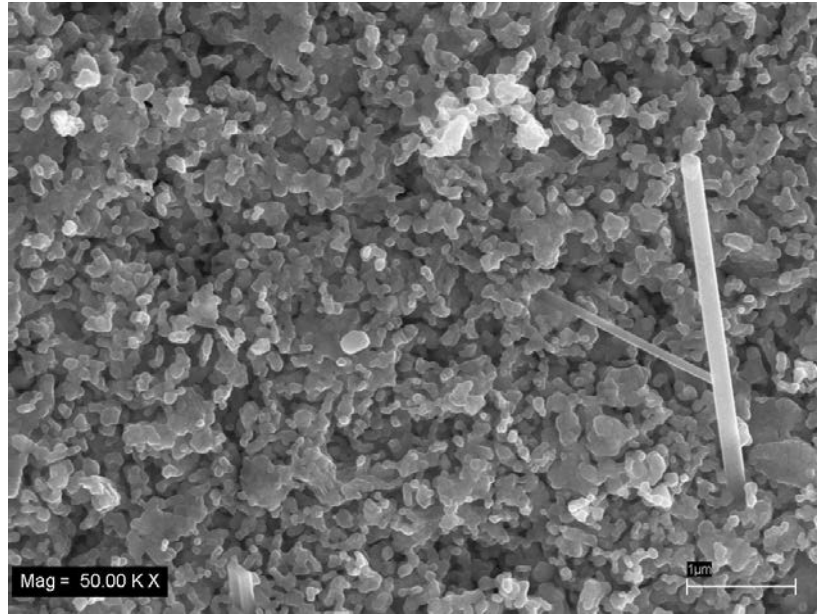
### 3.Araştırma sonuçları

#### 3.1 SEM-EDS analizleri

Sol-jel yöntemi kullanılarak üretilen ve 1000 °C'de 24 saat ısıtım işlemi gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğinin (yığın örnek) 15000 büyütmede alınmış taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda homojen bir dağılımın olduğu gözlenmiştir. Taneler arası boşlukların olmadığı nanoboyutlu tanelerin biraraya gelerek öbek halinde durduğu ve bu tanelerin belirli bölgeleri olduğu görülmektedir. Tane boyutlarının belirlenebilmesi için daha yüksek büyütmeyle çıkılmış ve Şekil 2'de 50000 büyütmede alınan SEM görüntüsünden tane boyutlarının 100-200 nm arasında değiştiği tespit edilmiştir.

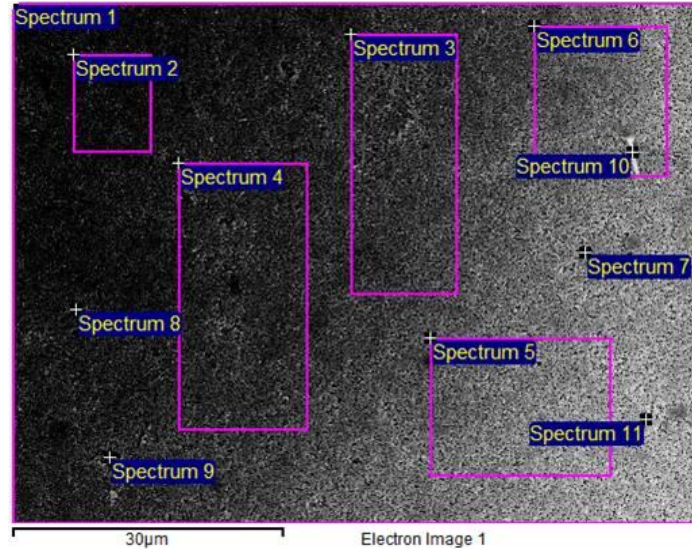


Şekil 1. 1000 °C'de 24 saat ısıtım işlemi gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğinin 15000 büyütmede SEM görüntüsü.



Şekil 2. 1000 °C'de 24 saat ısıtım işlemi gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğinin 50000 büyütmede SEM görüntüsü.

Şekil 3’de  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  yığın bileşiğinin 100 kez büyütülmüş SEM görüntüsü üzerinde onbir farklı bölgeden alındığını gösteren alanların yer aldığı enerji yayılım spektrometresi (EDS) görüntüsü verilmiştir. Bu onbir farklı bölgeden alınan nokta ve alan tarama sonuçları kullanılarak elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak hedeflenen bileşik konsantrasyonunun sağlandığı ve üretilmek istenen bileşik kompozisyon değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Tüm EDS nokta ve alan taramalarının ortalaması alındığında  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğinin başarılı bir şekilde sol-jel yöntemi kullanılarak üretildiği EDS analizlerinden kanıtlamıştır.



Şekil 3. 1000 °C’de 24 saat ısıl işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğine ait 100 büyütmede çekilen EDS görüntüsü.

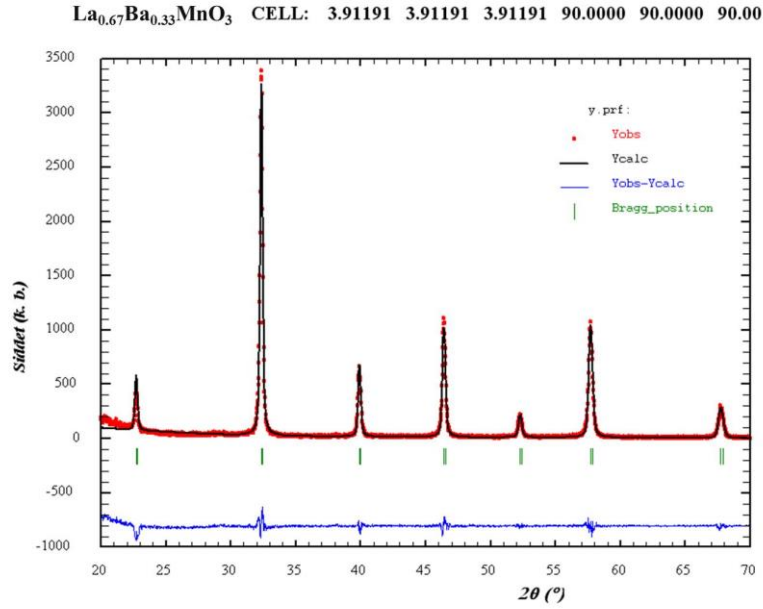
Tablo 1. 1000 °C’de 24 saat ısıl işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğine ait EDS analizi

<b>Alan 1</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{Mn}_{0.95}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 2</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.35}\text{Mn}_{0.95}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 3</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.35}\text{Mn}_{0.98}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 4</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.36}\text{Mn}_{0.96}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 5</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{Mn}_{0.95}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 6</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{Mn}_{0.95}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 7</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{Mn}_{0.95}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 8</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.30}\text{Mn}_{0.95}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 9</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{Mn}_{0.93}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 10</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.36}\text{Mn}_{0.93}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Alan 11</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.35}\text{Mn}_{0.89}\text{O}_{3+\delta}$
<b>Ortalama</b>	$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{Mn}_{0.95}\text{O}_{3+\delta}$

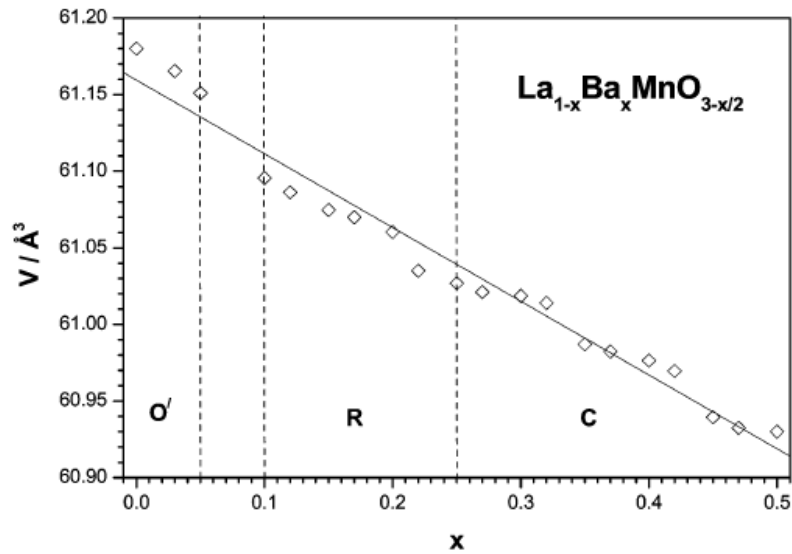
### 3.2. X-ışını analizleri

1000 °C’de 24 saat ısıl işleme tabi tutularak kristal yapının oluşması sağlanan  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  perovskit manganit bileşiği tek fazlı olarak elde edilmiştir. Bu durum XRD kırınım deseniyle ortaya konulmuştur. 1000 °C’de 24 saat ısıl işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğinin, kristal yapısının belirlenmesi, örgü parametreleri ve birim hücre hacminin hesaplanabilmesi için FULLPROF programı kullanılarak arıtım yapılmıştır. Şekil 4. (a)’da XRD deseninde siyah noktalı data deneysel elde edilen veriyi, kırmızı noktalı data FULLPROF programı arıtım sonucu deneysel veriye oturan eğriyi, altta yer alan mavi çizgili data ise deneysel veri ile arıtım sonucunun birbirine ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. ( FULLPROF arıtım parametreleri  $\chi^2$ : 1.79,

$R_F:0.86$ ,  $R_{Bragg}:1.05$ ,  $R_{wp}:32.4$ ,  $R_{ep}:24.1$  bulunmuştur.) Yapılan arıtım sonucunda  $La_{0.67}Ba_{0.33}MnO_3$  yığın bileşiğinin  $Pm3m$  uzay grubuna ait kübik yapıda olduğu bulunmuştur. Bileşiğin örgü parametreleri  $a=b=c=3.91191$  Å olarak bulunmuştur. Bileşiğin birim hücre hacmi ise  $V=59.864$  Å<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır [8]. Şekil 4. (b)'de Trukhanov'un yayınladığı makalede Ba katkı miktarına bağlı  $La_{1-x}Ba_xMnO_{3-x/2}$  perovskit manganit bileşiği için kristal yapının değişimini grafik şeklinde vermiştir. Grafikten de anlaşılacağı gibi x; katkı miktarı 0.25'den büyük olduğu durumda perovskit bileşiğin kristal yapısının kübik yapıya doğru geçtiği gözlenmektedir [12]. Bu çalışmada üretimi gerçekleştirilen perovskit bileşiğin kristal yapısı ve örgü parametreleri literatürle uyum içindedir [21-24].



(a)

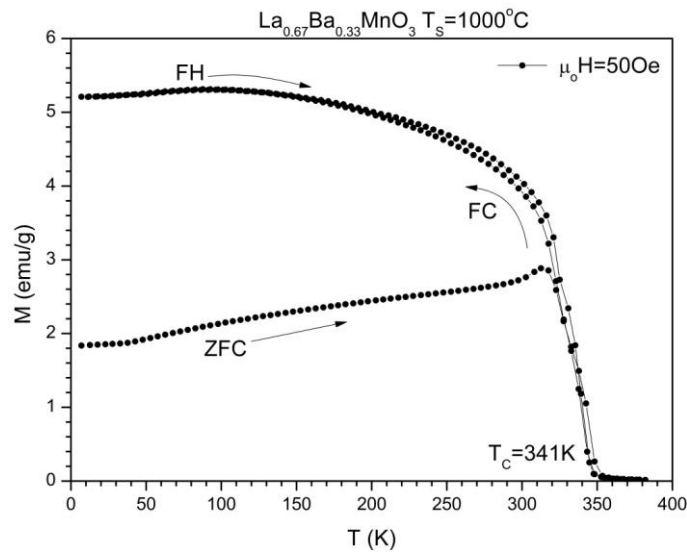


(b)

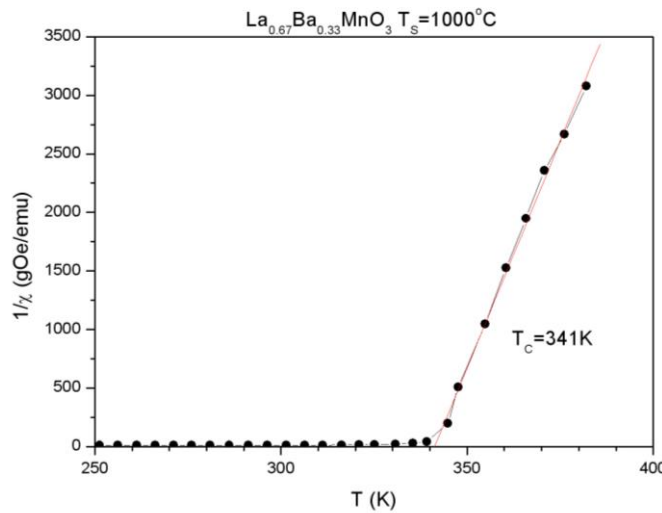
Şekil 4. (a) 1000 °C'de 24 saat ısıtım işlemi gören  $La_{0.67}Ba_{0.33}MnO_3$  bileşiğinin Fullprof XRD arıtım deseni. (b)  $La_{0.67}Ca_{0.33}MnO_3$  bileşiği için O'; ortorombik, R; rombohedral, C; kübik yapıyı temsil etmektedir.

### 3.3. Mıknatıslanma ölçümleri

Sol-jel yöntemi kullanılarak elde edilen 1000 °C’de 24 saat ısıl işlem sonucu yığın olarak üretilen  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğinin manyetik özelliklerini belirlemek için manyetik özellik ölçüm sistemi (MPMS) kullanılmış, sıcaklığa karşı mıknatıslanma ölçümleri (M-T), alanlı ve alansız soğutmalarda,  $5\text{K} \leq T \leq 380\text{K}$  sıcaklık aralığında yapılmıştır. Ölçümler esnasında, bileşik önce sıfır alan altında soğutulmuş (ZFC) ve 50 Oe dış alan uygulanarak oda sıcaklığına kadar ısıtma esnasında mıknatıslanma ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra, bileşik 50 Oe alan altında (alan kaldırılmadan) tekrar düşük sıcaklıklara soğutulmuş (alan altında soğutma, FC) ve aynı alan altında oda sıcaklığına doğru ısıtılırken (alan altında ısıtma, FH) mıknatıslanma ölçümleri tamamlanmıştır. Şekil 5’te  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  yığın bileşiği için mıknatıslanma eğrileri gösterilmiştir. Şekil 6’da 1000 °C’de ısıl işlem gören bileşiğin FC eğrisi alınarak, alanganlığın tersi yardımıyla ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçiş sıcaklığı olan Curie sıcaklığı ( $T_C$ )  $T_C=341\text{K}$  olarak bulunmuştur [8-11].

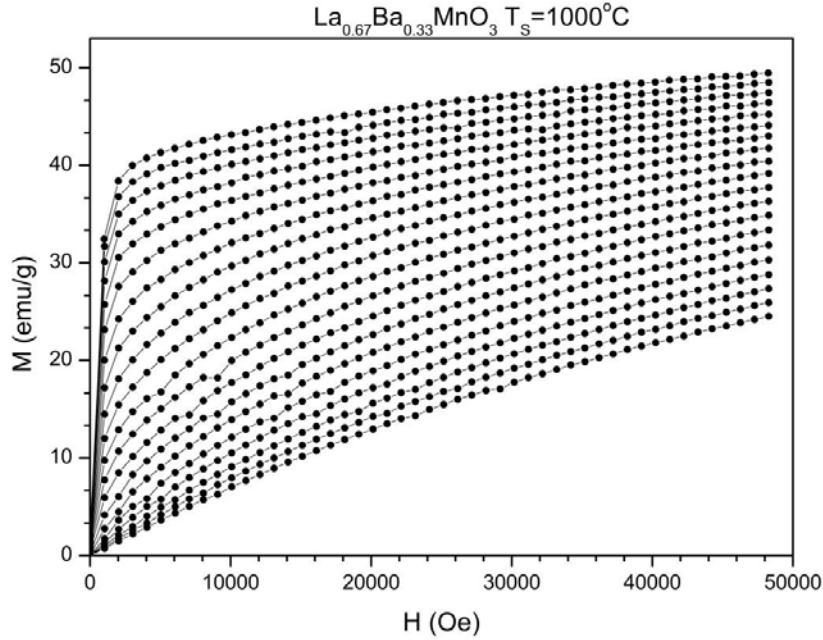


Şekil 5. 1000 °C’de 24 saat ısıl işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğine ait alanlı ve alansız soğutma eğrileri.



Şekil 6. 1000 °C’de 24 saat ısıl işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğine ait  $1/\chi$  eğrisinin fit edilmiş hali.

1000 °C’de 24 saat ısıtım işlem gören yığın  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğın manyetik alana karşılık gelen mıknatıslanma ölçümleri 0-5 T dış manyetik alan altında  $T_C$  sıcaklığının 20 derece altında ve üstündeki sıcaklıklarda, 3 K ( $\Delta T$ ) sıcaklık aralıklarıyla yapılmıştır. Şekil 7’de 1000 °C’de ısıtım işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  örneğinin alan bağımlı mıknatıslanma eğrileri (M-H) görülmektedir. Örneğe ait mıknatıslanma eğrilerinden sıcaklığın artmasıyla, ferromanyetik durumdan paramanyetik duruma geçişin gerçekleştiği görülmektedir. Curie geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda artan alan değerleriyle birlikte doğrusal mıknatıslanma eğrileri gözlenmiştir. Bu durum paramanyetik davranışı göstermektedir[11-13].



Şekil 7. 1000 °C’de ısıtım işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğine ait 0-5T alan altında alınan M-H eğrileri.

### 3.4. Manyetik entropi değişiminin ( $-\Delta S_M$ ) hesaplanması

Bir malzemenin entropisindeki değişimi hesaplayabilmek için iki farklı yöntem kullanılabilir. Bunlarda biri doğrudan diğeri ise dolaylı ölçüm tekniğidir. Doğrudan ölçüm tekniği, uygulanan dış manyetik alana bağlı olarak sıcaklık değerinin belirlenmesine dayanmaktadır. Bu ölçümün temel prensibi, ölçülecek malzemenin ısıtım olarak yalıtılmasıdır. Manyetik alan, ilk ( $H_i$ ) değerinden son ( $H_s$ ) değerine çıkarılır ve malzemenin sıcaklığındaki değişim değerine bakılır. Adyabatik sıcaklık değişimi, ilk ( $T_i$ ) ve son ( $T_s$ ) sıcaklık değerleri için denklem (1)’deki gibi yazılır.

$$\Delta T_{ad}(T_i, H_s - H_i) = T_s - T_i \quad (1)$$

Dolaylı ölçüm tekniği ise deneysel olarak malzemeye uygulanan manyetik alan verileri ile elde edilen mıknatıslanma ( $M_H$ ) değerleri kullanılarak manyetik entropi ( $\Delta S_M$ ) hesaplanabilmektedir. 1993 yılında McMichael  $\Delta S_M$ ’in nümerik olarak hesaplanabilmesi için denklem (2) eşitliğini temel alarak türettiği toplam ifadesine çevirerek (3) denkleminde yer alan formülü geliştirmiştir.

$$\Delta S_M(T)_{H,P} = \int_{H_1}^{H_2} (\partial M(T, H) / \partial T)_{H,P} dH \quad (2)$$

$$|\Delta S_M| = \sum_i \frac{1}{T_{i+1} - T_i} (M_i - M_{i+1}) \Delta H_i \quad (3)$$

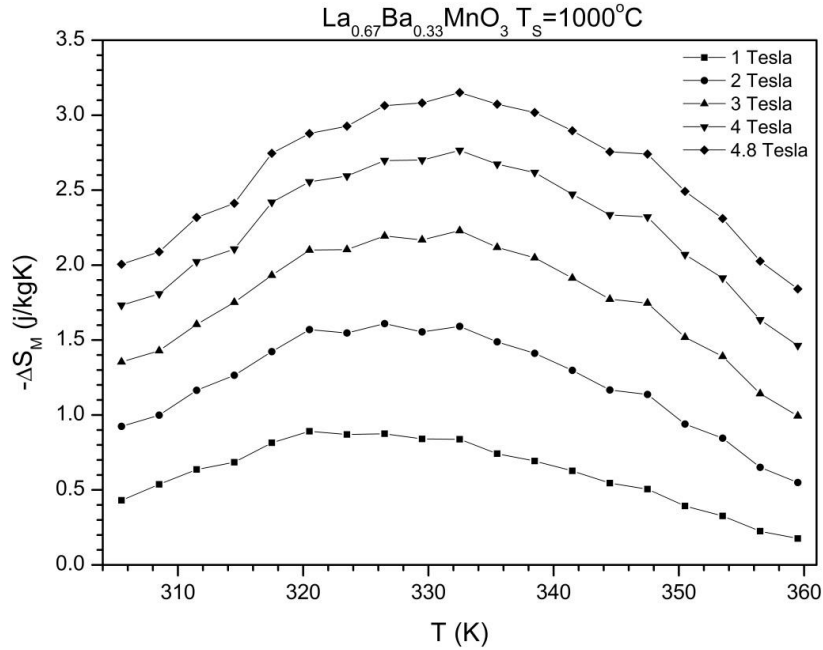
Bu eşitlikten faydalanarak  $\Delta S_M$  değerini hesaplamak için, izotermal olarak yalıtılmış durumdaki manyetik malzemeye farklı sıcaklık değerlerinde manyetik alan (H) uygulanır ve manyetik malzemenin mıknatıslanma (M) değerleri elde edilir. Buradan M-H grafiğine ulaşılır. Yukarıda bahsedilen (3) formülü, tüm toplamı integral hesabına çevirip, M-H grafikleri üzerinde uygulanırsa  $\Delta S_M$ 'i hesaplamak mümkün olur [5-9,14-17].

Şekil 8'de 1000 °C'de 24 saat ısı işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğinin, beş farklı alan değeri için hesaplanan manyetik entropi değişimleri verilmiştir. Artan alan değerine karşılık eğrilerin doğrusal olarak arttığı gözlenmektedir. Fakat düşük alan değerlerinde yüksek entropi değişimi gözlenmemiştir. Curie sıcaklığı civarlarında yayvan bir entropi değişimi görülmektedir. MKE'nin niteliğinin belirlenmesindeki en önemli etken manyetik entropi değişimidir. Manyetik entropi değişimine ( $\Delta S_M$ ) bağlı olarak tanımlanan adyabatik sıcaklık değişimi ( $\Delta T_{ad}$ ), görelî soğutma gücü (RCP) ve soğutma kapasitesi (q) parametreleri bileşiğin MKE'sini tanımlamada kullanılmaktadır. Soğutma kapasitesi, malzemenin soğutma döngüsü içinde ne kadar ısı transfer edebileceğini gösteren parametre olarak tanımlanır. Bu ifadenin formülü denklem (4)'de yer almaktadır.

$$q = \int_{T_{ik}}^{T_{son}} \Delta S_M(T)_{\Delta H} dT \quad (4)$$

Görelî soğutma gücü (RCP) denklem (5)'de yer alan formül ile ifade edilir.

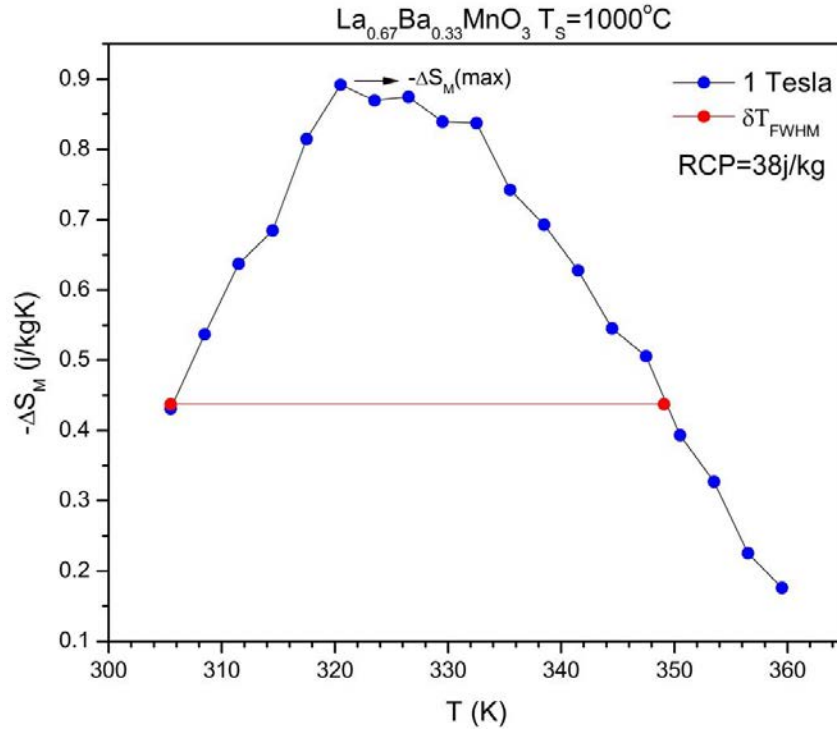
$$RCP = \Delta S_M(\max) \delta T_{FWHM} \quad (5)$$



Şekil 8. Beş farklı alan değişimi için [0-1T, 0-2T, 0-3T, 0-4T, 0-4.8T hesaplanan ] 1000 °C'de ısı işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  yığın bileşiğine ait manyetik entropi değişimi.



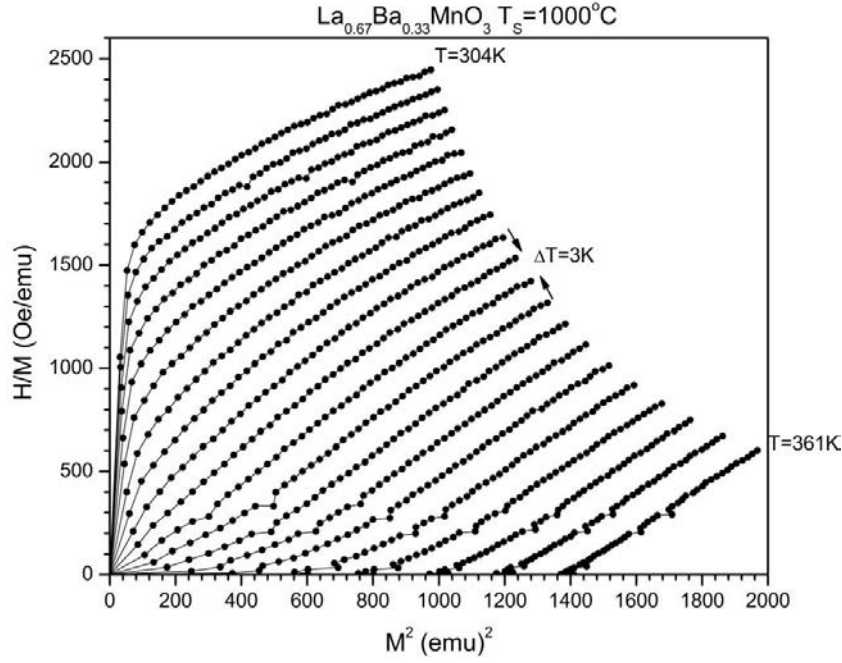
Manyetik entropinin sıcaklıkla yayvan bir değişim gösterip, manyetik faz geçiş sıcaklığında yüksek bir maksimum değeri alması durumunda RCP değeri yüksek değerler alır. Böylece elde edilen bileşik manyetik soğutma teknolojilerinde kullanılabilir aday malzeme olur. Şekil 9'da yer alan 1 T alan değerindeki entropi değişiminden hesaplanan RCP değerini göstermektedir.  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  yığın bileşiği için 1 T entropi değişiminden hesaplanan göreceli soğutma gücü 38 J/kg olarak bulunmuştur. Aynı malzeme için literatürde yer alan (1 T manyetik alan altında) RCP değerlerinden çok küçüktür Tablo 2'de bu değerler yer almaktadır [10, 18, 20].



Şekil 9. 1000 °C'de ısı işlem gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  yığın bileşiğine ait 1 T manyetik alan altındaki RCP değeri hesabı.

Tablo 2.  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiminin RCP literatür değerleri.

Bileşik	$-\Delta S_M(\text{J/kgK})$	$\Delta H(\text{T})$	RCP (J/kg)	$T_C(\text{K})$	Referans
$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$	0.87	1	38	341	çalışma
$\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$	1.48	5	161	292	[10]
$\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_3$	2.70	1	68	337	[20]
$\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_{2.98}$	2.60	1	65	312	[20]
$\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_{2.95}$	2.55	1	69	300	[20]
$\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_{2.92}$	1.80	1	90	275	[20]
$\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_{2.9}$	1.70	1	94	268	[18]



Şekil 10. 1000 °C’de ısıtılma işlemi gören  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  bileşiğine ait Arrot eğrileri.

Manyetik faz geçişlerinin birinci mi yoksa ikinci dereceden mi olduğunu belirlemek ilk defa 1964 yılında Banerjee tarafından ortaya konmuştur. 1000 °C’de 24 saat ısıtılma işlemi gören bileşiğin 341 K’de manyetik faz geçişine sahip olduğu sıcaklığa karşı mıknatıslanma ölçümünden bulunmuştur. Banerjee kriteri kullanılarak malzemenin  $H/M-M^2$  karşı olan (Arrot grafiği) grafiği çizilmiştir. Birinci dereceden bir faz dönüşümü olması için manyetik faz dönüşümünün haricinde birde yapısal olarak bir fazdan başka bir faza geçişin gözlenmesi gerekmektedir ve Arrot grafiğinin eğimleri negatif olmalıdır. İkinci dereceden faz dönüşümünde ise sadece manyetik faz dönüşümü gerçekleşmektedir. Şekil 10’da yer alan örneğe ait Arrot grafiğinden görüldüğü üzere tüm eğrilerin eğimi pozitiftir ve bu yüzden manyetik faz dönüşümü ikinci derecedendir [22].

#### 4. Tartışma ve sonuçlar

Sol-jel yöntemi kullanılarak üretilen  $\text{La}_{0.67}\text{Ba}_{0.33}\text{MnO}_3$  perovskit manganit bileşiğinin yapısal analizlerinden (SEM-EDS analizlerinden) üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği ve bileşiğin homojen dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Bileşiği oluşturan tanelerin nano boyutta olduğu ve homojen bir dağılım sergilediği SEM görüntülerinden tespit edilmiştir. X-ışınları kırınım deseninde herhangi bir safsızlığa rastlanmaması EDS sonuçlarını desteklemektedir. Ayrıca yapılan FULLPROF analizinden bileşiğin tek bir faz barındırdığı ve kübik simetriye sahip olduğu bulunmuştur. Arrot eğrilerinden bileşiğin ikinci dereceden bir geçiş gösterdiği bulunmuştur. Bu durum Curie geçiş sıcaklığı civarında manyetik faz dönüşümü yanında ayrıca yapısal bir geçişin olmaması kristal örgünün sabit kalması yaygın bir entropi geçişini göstermektedir.

Bileşiğin manyetik soğutma teknolojilerinde soğutucu elemanı olarak kullanımını belirleyecek olan manyetik ölçümler alınmış ve bileşiğin Curie geçiş sıcaklık değeri oda

sıcaklığı (300 K) değerinden az da olsa yüksek çıktığı gözlenmiştir. Sıcaklık bağımlı miknatislanma ölçümleri (M-T) sonucunda  $T_C=341$  K bulunmuştur. Sabit sıcaklık altında yapılan alan bağımlı ölçümler (M-H) sonucunda manyetik entropi değişim ( $-\Delta S_M$ ) grafiği çizilmiştir. Entropi değişiminin 341 K civarlarında yayvan bir geçiş göstermesi bu bileşiğin manyetik soğutmada kullanılabilir bir malzeme olduğunu göstermektedir. Fakat oda sıcaklığından daha yüksek bir değerde Curie geçiş sıcaklığı göstermesi bileşiğin oda sıcaklığı civarlarında verimli bir performan sergilemesini mümkün kılmamaktadır. Şekil 8’de yer alan grafikte Curie geçiş sıcaklığının etrafında maksimum değerler gözlenmektedir. Bu malzemenin entropi değişimleri sırasında sıkı paketli bir yapıda olduğunu (SEM analizlerinden) ve kristal enerjisinin yüksek olmasından kaynaklı ferromanyatizmanın temel kaynağı olan Zener’in çiftli değiş-tokuş mekanizmasındaki relaksasyon değerlerinin yeterli cevabı vermemesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir [23]. 1 T alandan 5 T alana kadar çizilen entropi değişim grafiğinden yararlanarak görelî soğutma gücü (RCP) değerleri hesaplanmıştır. Manyetik alan artışına karşılık gelen manyetik entropi değişim değerleride yükselmektedir. Fakat asıl istenen bu tür malzemelerde düşük alan değerlerinde yüksek entropi değişimlerini göstermesidir. Ancak sol-jel yöntemi kullanılarak üretilen  $La_{0.67}Ba_{0.33}MnO_3$  perovskit manganit bileşiği, yapılan hesaplamalarla literatürde yer alan değerlerden daha düşük soğutma gücüne sahip olduğu bulunmuştur.

### Kaynaklar

- [1] Debye, P., Einige Bemerkungen zur Magnetisierung bei tiefer Temperatur, **Annalen der Physik**, 81, 1154, (1926).
- [2] Brück E., Developments in magnetocaloric refrigeration, **Journal of Physics D:Applied Physics**, 38, 23, 380--391, (2005).
- [3] Giauque, W.F., A Thermodynamic Treatment of Certain Magnetic Effects. A Proposed Method to Produce Temperatures Considerably below 1o absolute, **Journal of the American Chemical Society**, 49, 1864, (1927).
- [4] Koubaa Rouhou W.C., Koubaa M., Cheikhrouhou A., Structural, magnetotransport, and magnetocaloric properties of  $La_{0.7}Sr_{0.3-x}Ag_xMnO_3$  perovskite manganites, **Journal of Alloys and Compounds**, 453, 1, 42-48, (2006).
- [5] Jonker, G.H., Ferromagnetic Material, **Physica**, 22, 707, (1956).
- [6] Jonker, G.H., Van Santen, J.H., Ferromagnetic Compounds of Manganese with Perovskite Structure, **Physica**, 16, 337-349, (1950).
- [7] Ju, H.L., Nam, Y.S., Lee, J.E., Shin, H.S., Anomalous Magnetic Properties and Magnetic Phase Diagram of  $La_{1-x}Ba_xMnO_3$ . **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 219, 1-8, (2000).
- [8] Samancioğlu, Y., Manganit tabanlı perovskit yapıdaki bileşiklerin ince film ve yığın malzeme olarak üretilmesi, yapısal, elektriksel ve manyetik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, (2014).
- [9] Mitchell, J.F., Argyriou, D.N. and Jorgensen, J.D., Colossal Magnetoresistive Oxides, **Gordon & Breach Science Publishers**, 189, (2000).
- [10] Morelli, D.T., Mance, A.M., Mantese J.V., Micheli, A.L., Magnetocaloric Properties of Doped Lanthanum Manganite Films, **Journal of Applied Physics**, 79, 373, (1996).

- [11] Samancıoğlu Y., Coşkun A., Magnetic properties of A- and B-site cation doped  $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{MnO}_3$  manganites, **Journal of Alloys and Compounds**, 507, 2, 380-385, (2010).
- [12] Trukhanov, S.V., Magnetic and Magnetotransport Properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_{3-x/2}$  Perovskite Manganites. **Journal of Materials Chemistry**, 13, 347-352, (2003).
- [13] Samancıoğlu Y., Coşkun A., Magnetic properties of A- and B-site cation doped  $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{MnO}_3$  manganites, **Journal of Alloys and Compounds**, 507, 2, 380-385, (2010).
- [14] Pecharsky, V.K. ve Gschneidner, Jr.K.A., Phase Relationships and Crystallography in the Pseudobinary System  $\text{Gd}_5\text{Si}_4\text{Gd}_5\text{Ge}_4$ , **Journal of Alloys and Compounds**, 260, 98, (1997).
- [15] Taşarkuyu E., Coşkun a., Irmak A.E., Aktürk S., Ünlü G., Samancıoğlu Y., Yücel A., Sarıkürkçü C., Aksoy S., Acet M., Effect of high temperature sintering on the structural and the magnetic properties of  $\text{La}_{1.4}\text{Ca}_{1.6}\text{Mn}_2\text{O}_7$ , **Journal of Alloys and Compounds**, 509, 9, 3717-3722, (2011).
- [16] Pecharsky, V.K. ve Gschneidner, Jr. K.A., Effect of Alloying on the Giant Magnetocaloric Effect of  $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$ . **Journal of Magnetism and Magnetic Material**, 70, 179, (1997).
- [17] Pecharsky, V. K. ve Gschneidner, Jr.K.A., **Advances in Cryogenic Engineering**, edited by p.Kittel 43, 1729, (1998).
- [18] Phan, M.H. and Yu, S.C., Review of the Magnetocaloric Effect in Manganite Materials, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 285, 199-203, (2007)
- [19] Warburg, E., Magnetische Untersuchungen. **Annalen der Physik**, 13, 141-164, (1881).
- [20] Zhong, W., Cheng, W., Au, C.T., Du, Y.W., Dependence of Magnetocaloric Effect on Oxygen Stoichiometry in Polycrystalline  $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_{3-\delta}$ , **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 261, 238-243, (2003).
- [21] Belenky, L.J., Ke, X., Rzchowski M., Eom, C.B., Epitaxial  $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  superlattices , **Journal of Applied Physics**, 97, (2005).
- [22] Banerjee, B.K. On a Generalised Approach to First and Second Order Magnetic Transitions, **Physics Letters**, 12: 16-17, (1964).
- [23] Zener, C., Interaction Between the d-shells in the Transition Metals II. Ferromagnetic Compounds of Manganese with the Perovskite Structure, **Physical Review**, 82, 403-405, (1951)
- [24] Trukhanov, S.V. Magnetic and Magnetotransport Properties of  $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_{3-x/2}$  Perovskite Manganites, **Journal of Materials Chemistry**, 13, 347-352, (2003).

# AZ31B-H24 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin incelenmesi

Sare ÇELİK, Ali ORAL\*, Alper GÜNDOĞMUŞ

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü- Balıkesir, Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 25.04.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 17.06.2020

## Öz

Magnezyum ve alaşımları, hafifliği ve yüksek spesifik mukavemeti nedeni ile endüstride kullanımı oldukça yaygın olan metal olup otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki mühendislik uygulamalarında ön plana çıkmıştır. Magnezyum alaşımının yanıcı ve düşük ergime sıcaklığına sahip olması bu alaşımların ergitme yöntemleriyle kaynaklı birleştirilmesinde sorunlar oluşturmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı, düşük işlem sıcaklığı, iyi mekanik özellikler sağlaması gibi avantajları nedeni ile magnezyum alaşımlarına uygulanabilir bir birleştirme metodudur. Çalışmada, AZ31B-H24 magnezyum alaşım levhalarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği incelenmiştir. Çalışmada, sürtünme karıştırma kaynak parametreleri olarak 1000, 1400 dev/dak dönme hızları; 16, 25, 40, 50 mm/dak ilerleme hızları ve 15, 20 mm omuz çapları seçilerek bu parametrelerde kaynaklama işlemi yapılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan parçaların mekanik özellik tespiti için çekme ve mikro sertlik ölçme testleri uygulanmış, mikro yapı incelemeleri için kaynaklı yapının optik görüntüleri incelenmiş ve XRD analizleri yapılmıştır. Çekme deneyi sonucunda, kaynaklı bağlantıların mukavemeti ana malzemeye göre %75,88'lik bir kaynak dayanım değeri sağlamıştır.

**Anahtar kelimeler:** AZ31B-H24, sürtünme karıştırma kaynağı, mekanik özellikler, mikro yapı.

Sare ÇELİK, scelik@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-8240-5447>

\* Ali ORAL, alioral@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-9144-3821>

Alper GÜNDOĞMUŞ, alpergundogmus@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-3922-4354>

## Investigation of weldability of AZ31b-H24 magnesium alloy by friction welding method

### Abstract

*Properties of magnesium alloy such as its flammability and low melting temperature create problems in combining these alloys by melting methods. Friction stir welding is a joining method that can be applied to magnesium alloys due to its advantages such as low operating temperature and providing good mechanical properties. In this study, the weldability of AZ31B-H24 magnesium alloy sheets by friction stir welding method were investigated. As friction stir welding parameters, rotational speeds of 1000, 1300 RPM, feed rates of 16, 25, 40, 50 mm/min, and shoulder diameter of 15,20 mm were selected and welding was performed based on these parameters. Tensile and microhardness measurement tests were applied to determine the mechanical properties of the parts that friction stir welding was applied, optical images of the welded structure were examined and XRD analyzes were conducted for microstructure examinations. As a result of the tensile test, it turned out that the strength of the welded joints provided a weld strength value of %75.88 compared to the main material.*

**Keywords:** AZ31B-H24, friction stir welding, mechanical properties, micro structure.

### 1. Giriş

Magnezyum, hafifliği, yüksek özgül ısı kapasitesi ve yüksek ses absorpsiyonu nedeni ile endüstride kullanımı oldukça yaygın olan bir metaldir. Otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda magnezyum metalinin, 1.74 g/cm<sup>3</sup> olan düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları açısından en hafif yapısal metal olarak ön plana çıktığı görülmektedir. Alüminyumdan % 36, çelikten ise % 78 oranında daha hafif olan magnezyum alaşımlarının kullanımı, her yıl yaklaşık %15 artış göstermekte ve otomobil endüstrisinde magnezyum kullanımının 30.000 ton/yıl değerinden 130.000 ton/yıl değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu artış, ağırlık tasarrufunun çok daha önemli olduğu uzay/uçak uygulamalarındaki potansiyeli de işaret ettiği anlaşılmıştır.

Endüstriyel uygulamalarda hafif malzeme kullanımı ile birlikte yapılan araştırmalar magnezyum alaşımlarının kaynaklı bağlantıları ve özelliklerinin incelenmesi üzerine odaklanmıştır. Magnezyum alaşımının yanıcı özelliğe sahip olması bu alaşımların ergitme yöntemleriyle kaynaklı birleştirilmesinde sorunlar teşkil etmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), düşük işlem sıcaklığı, iyi mekanik özellikler sağlaması, zehirli gaz ve buhar oluşturmaması, kaynak sarf malzemelerine ihtiyaç duyulmaması gibi birçok avantajları olan bir yöntemdir. Bahsedilen özellikler arasındaki düşük işlem sıcaklığı, magnezyum alaşımı gibi düşük ergime sıcaklığına sahip hassas malzemelerde SKK'nın uygulanabilir bir metot olmasını sağlamıştır. SKK'nın 1991 yılında patenti alınmış ve öncelikle alüminyum alaşımlarının kaynağı için kullanılmıştır [1-4]. Yıllar içinde; alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır ve çelik malzemelerin birleştirilmesinde iyi kaynak kaliteleri sağlamıştır. Son zamanlarda da farklı malzeme çiftlerinin birleştirilmesi ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır [5-8]. Farklı Magnezyum alaşımlarına sürtünme karıştırma kaynak uygulamaları yapılarak mekanik özellikler ve içyapıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. A.Razal Rose ve arkadaşları, kaynak hızının

AZ61A Mg alaşımının sürtünme karıştırma kaynağına etkilerini incelemiştir. Kaynak hızının, karıştırma bölgesinde, tane boyutu sertlik ve çekme dayanımı üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [9]. S. Rajakumar ve arkadaşları, AZ61A Mg alaşımını hem SKK hem de tungsten inert gas kaynağı ile birleştirmişler ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. SKK da, çekme dayanımında %12, akma dayanımında %18 daha iyi değerler elde etmişlerdir. Bunun nedeni olarak işlem sıcaklığının düşük olmasından dolayı  $Al_{12}Mg_{17}$  partiküllerinin termal dengesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [10]. S.Ugunder ve arkadaşları, AZ31B Mg alaşımında SKK parametrelerinin mekanik özelliklere etkilerin araştırmışlardır. Deneysel çalışmanın yanında ANOVA ile Taguchi yöntemini kullanarak optimizasyon yapmışlardır. Sonuç olarak en etkili kaynak parametrelerinin sırasıyla, dönme hızı, ilerleme hızı ve takım profili olduğunu bildirmişlerdir [11]. Wenya Li ve arkadaşları, sabit omuzlu karıştırıcı uç kullanarak AZ31B Mg alaşımını farklı parametrelerle SKK uygulamışlar ve düzgün, parlak kaynak yüzeyleri elde etmişlerdir. Takım dönme hızı arttırdıkça tane boyutunun arttığını, çekme gerilmesi artarken kırılmadaki akma gerilmesi ve uzamanın azaldığını ifade etmişlerdir. 1500 dev/dak takım dönme hızında yüksek bağlantı kalitesi elde etmişlerdir [12]. Bhukya Srinivasa Naik ve diğerleri, AZ31B-H24 Mg alaşımını çeşitli bindirme konfigürasyonlarında SKK ile bindirme kaynağı ile birleştirerek artık gerilmeleri ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Bu amaçla -40 °C, oda sıcaklığı (25 °C) ve 180 °C de kesme testi uygulamışlardır. En yüksek kesme dayanımını bütün sıcaklıklar için 1000 dev/dak dönüş hızı ve 20 mm/s ilerleme hızlarında elde etmişlerdir [13]. Sevvil P ve Jaiganesh V, sürtünme karıştırma bindirme kaynaklı AZ31B Mg alaşımlarında, işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkilerini incelemişler ve maksimum 183 MPa çekme dayanımı, 101MPa akma dayanımına ulaşmışlardır [14].

Ancak otomotiv ve uçak sanayinde kullanımı yaygınlaşan AZ31B-H24 magnezyum alaşımlarında, farklı işlem parametre kombinasyonları ile sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır ve yüksek dayanım değerlerine ulaşılabilmesi için halen çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmanın amacı da, AZ31B-H24 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak probu devir sayısı, ilerleme hızı ve takım omuz çapı parametrelerinin kaynaklı bağlantılarındaki mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesidir.

## 2. Materyal ve metod

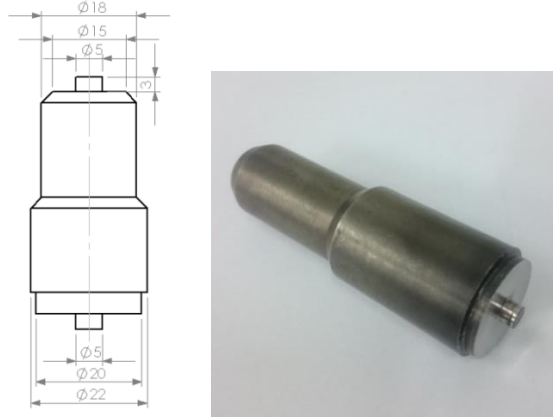
Bu çalışmada, AZ31 B-H24 magnezyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Haddeme yöntemi ile üretilmiş ve kalınlığı 3,2 mm olan Magnezyum AZ31 B-H24 levhalar 150 mmx100 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan AZ31B-H24 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 1 de verilmiş olup, sertliği 76 HV, maksimum çekme dayanım değeri 258 MPa, akma dayanımı 174 MPa ve yüzde uzaması % 15' dir.

Tablo 1. Magnezyum AZ31 B-H24 alaşımının kimyasal bileşimi

AZ31B-H24	Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Temper
% Ağırlık	3.2	0.42	1.03	0.0190	0.0008	0.0006	0.0020	H24

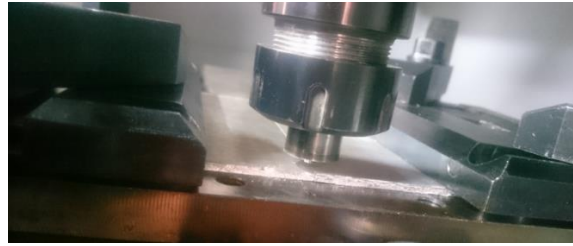
SKK takımı olarak, silindirik profile sahip, DIN 1.3343 yüksek hız çeliğinden üretilmiş takım kullanılmıştır. Takım yekpare olup iki taraflı omuz ve pim profiline sahiptir. Bir

tarafı 5 mm pim çapı, 15 mm omuz çapı, diğer tarafı 5 mm pim çapı, 20 mm omuz çapında silindirik pim profiline sahiptir. Şekil 1 de kullanılan takımın teknik resmi ve görüntüsü verilmiştir. Üretimi yapılan karıştırıcı uca ısıtılarak 62 HRC sertlik kazandırılmıştır. SKK işlemi için Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi CNC Tezgahları Laboratuvarındaki LER VQ-75 marka CNC dik freze kullanılmıştır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan karıştırıcı teknik resmi ve görüntüsü.

SKK kaynağı yapılacak levhalar, CNC dik işlem merkezine iş bağlama kalıbı ile Şekil 2 de görüldüğü gibi alın yüzeyleri birbirine temas edecek şekilde tasarlanmış iş bağlama kalıbından yararlanılmıştır. Parçalar, giyotin makas ile kesildikten sonra SKK işlemi sırasında temas edecek olan levhaların alın yüzeylerinin tam temas sağlanması için frezelenmiştir. Parametrelerin belirlenmesinde öncelikli olarak literatür araştırması yapılmış olup, daha sonra yapılan ön denemeler sonucunda kaynak parametreleri Tablo 2 de verildiği gibi belirlenmiştir. SKK, malzemenin haddeme yönüne dik olarak gerçekleştirilmiştir. Yeterli ısının sağlanabilmesi için omuz çapı ile orantılı olarak kaynak başlangıcında bekleme süresi uygulanmıştır. Literatüre uygun olarak omuz çapı pim uzunluğundan 0.1 mm fazla malzemeye batırılmıştır.



Şekil 2. Levhaların bağlama kalıbı ile tezgaha sabitlenmesi.

Tablo 2. Sürtünme karıştırma kaynak parametreleri.

Deney No	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Omuz Çapı (mm)
1	1000	25	15
2	1400	40	15
3	1400	50	15
4	1000	40	20
5	1000	50	20
6	1000	15	15
7	1400	25	20
8	1400	15	20



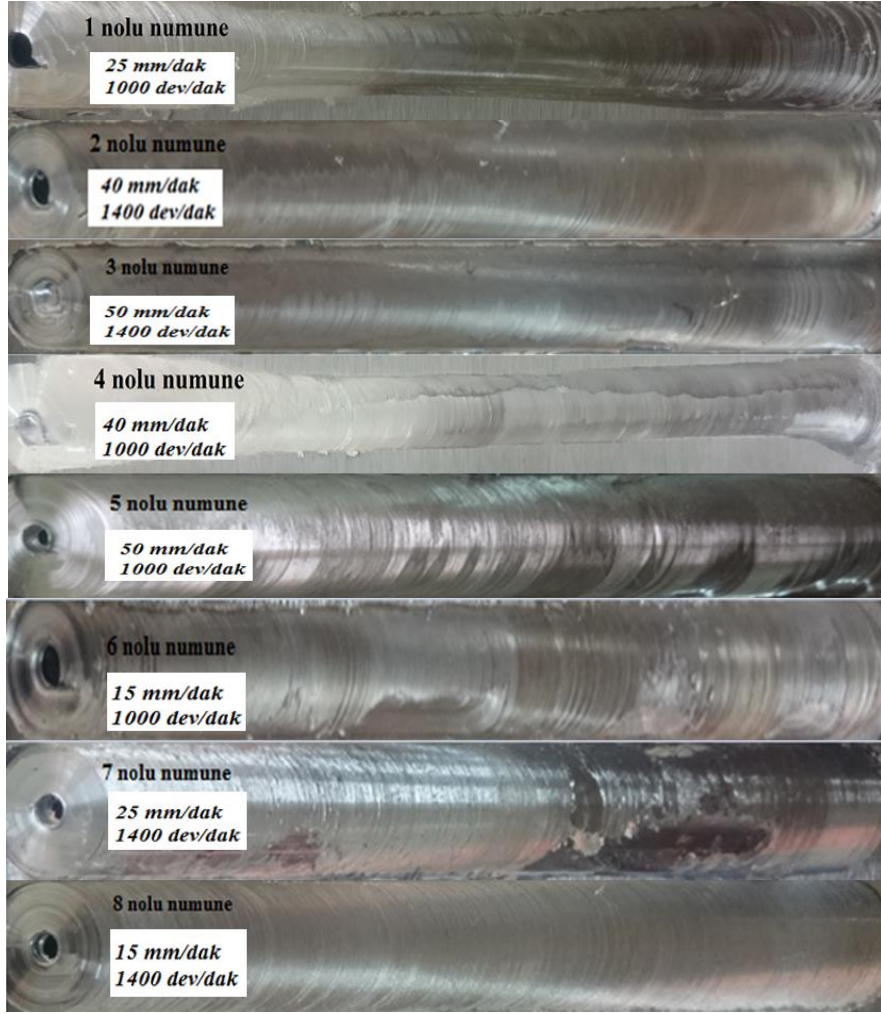
SKK işleminden sonra kaynaklı numunelerin makro kontrolleri gözle yapılmıştır. Elde edilen kaynaklı parçalar, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak 3'er adet çekme test numuneleri ve mikro yapı incelemeleri için numuneler çıkartılmıştır. Kaynak yapılan numunelerin kaynak başlangıcı ve bitiminden itibaren ilk ve son 25 mm'lik kısımları incelemeye dâhil edilmemiştir. Çekme testleri, "Zwick / Roell" marka çekme test cihazında, "Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi" laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çekme cihazının kapasitesi 10 kN olup ve deneyler 2 mm/dak çekme hızı ile yapılmıştır. Kaynak yapılan levhaların sertlik ölçümleri için Metkon MH-6 Vickers mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için kaynak kesitine dik olacak şekilde alınan numunelerin orta ekseninde mikrosertlik ölçümleri yapılarak, bölgeler arasındaki sertlik değişimi incelenmiştir. Sertlik ölçümlerinde, 2 kg yük, 1 mm aralıklarla 10 s uygulanmıştır.

SKK yapılan levhaların kaynak bölgesindeki meydana gelen yapı değişimi ve kaynağa etki eden parametrelerin yapıdaki etkisini belirlemek amacıyla mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla; kaynak yönüne dik olarak kaynak bölgesinden 25x10 mm boyutlarında alınan numuneler, bakalıte alınarak sırası ile 180-1200 gridlik zımpara ile parlatma zımparalama işlemi yapılmıştır. Sonrasında ise 3 ve 1 mikrometrelik tane boyutuna sahip alümina solisyon ile parlatılmıştır. Parlatma işlemine tabi tutulan bu numuneler 4,2 gr picric asit 10 ml su, 70 ml Etanol, 10 ml asetik asit çözeltisi hazırlanarak dağlanmıştır. Optik mikroskop incelemeleri LEICA Metal Mikroskobu ile yapılmıştır. Sıcaklığın etkisi ile oluşabilecek intermetalik fazların belirlenebilmesi amacı ile Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 3. Deneysel sonuçlar ve tartışma

SKK yapılmış AZ31B-H24 numunelere makro seviyede görsel olarak bakıldığında genel olarak oldukça düzgün birleştirmelerin olduğu görülmüştür. Şekil 3 'de kaynak dikişinin farklı parametrelerdeki kaynaklı parçaların makro görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak yüzey kalitelerinin değiştiği görülmektedir. Kaynak probu devir sayısı ve ilerlemeye bağlı olarak kaynaklı yüzeylerde boşluk ve çatlakların olduğu, hatalı bölgelerin ortaya çıktığı söylenebilir.

Farklı deney parametreleri ile SKK yapılmış numunelerden standartlara göre hazırlanmış olan çekme numuneleri Şekil 4 de görülmektedir. Deneyler sonrası ortalama çekme dayanım sonuçları Tablo 3 de, çekme testi sonrası kopan kaynaklı parçalar ise Şekil 5 'te verilmiştir.



Şekil 3. Farklı parametrelerdeki kaynaklı parçaların makro görüntüsü.



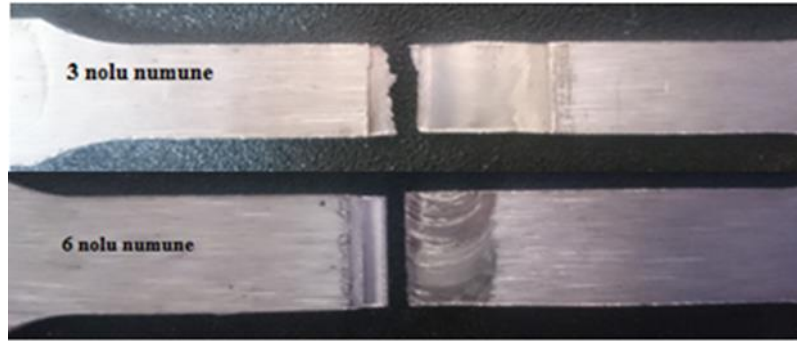
Şekil 4. Kaynaklı parçadan çıkartılan test numuneleri.

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, en yüksek 195,77 MPa çekme dayanım değeri 1400 d/d devir sayısı, 50 mm/dak ilerleme hızı ve 15 mm lik omuz çapı ile 3 nolu numunede; en düşük çekme dayanım değerinin ise 116,86 MPa çekme dayanımı değeri 1000 d/d devir sayısı, 15 mm/dak ilerleme hızı ve 15 mm lik omuz çapı ile 6 nolu numunede olduğu görülmektedir. En yüksek dayanım değeri ile ana malzemeye göre 75,88 lik kaynak performansı elde edilmiştir. Devir sayısı 1000 dev/dak dan 1400

dev/dak ya çıktığında dayanım değeri artmıştır ancak ilerleme hızına bağlı değişimlere bakıldığında ise ilerleme hızının artması dayanım değerini düşürmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağında devir sayısının artırılması takım ile kaynaklanacak malzeme arasındaki sürtünmeyi arttıracığından ısı girdisini arttırmaktadır. İlerleme hızı arttığında ise takım ile parça arasındaki temas süresi azalacağından malzemeye olan ısı girişi azalacaktır. Dolayısıyla devir sayısı ile ısı girdisi doğru orantılı, ilerleme hızı ile ters orantılıdır. Omuz çapının etkisine bakıldığında ise omuz çapının artması parça ile temas yüzeyini arttırdığından ısı girdisi artmaktadır. Devir sayısının ve omuz çapının birlikte fazla artması, ilerlemenin belli bir değerin altına inmesi ile gereğinden fazla ısı girdisi nedeni ile kaynak bölgesinde sert ve gevrek yapılarından dolayı birleştirmelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen intermetalik bileşiklerin oluşmasından dolayı dayanımda tekrar düşmelerin olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. Magnezyum AZ31B- H24 SKK yapılmış numunelerin çekme deney sonuçları.

Numune No	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme (mm/dak)	Omuz Çapı (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Mukavemet Performansı (%)
Ana Malzeme	—	—	—	258	15	—
1	1000	25	15	151,66	4	58,7829
2	1400	40	15	177,77	2	68,9031
3	1400	50	15	195,77	3	75,8798
4	1000	40	20	161,77	1.5	62,7015
5	1000	50	20	176,78	2	68,5193
6	1000	15	15	116,86	1	45,2945
7	1400	25	20	179,86	1	69,7131
8	1400	15	20	189,25	2	73,3527

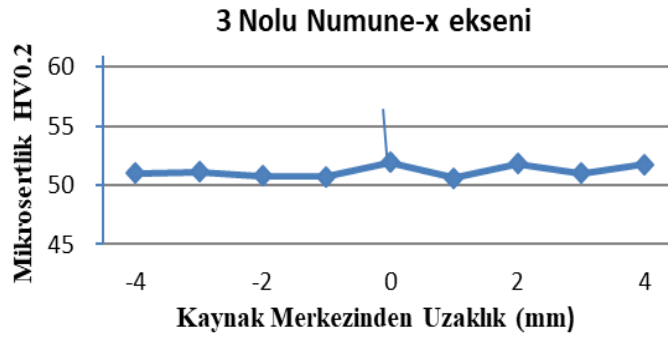


Şekil 5. 3 ve 6 nolu numunelerin kopma bölgeleri.

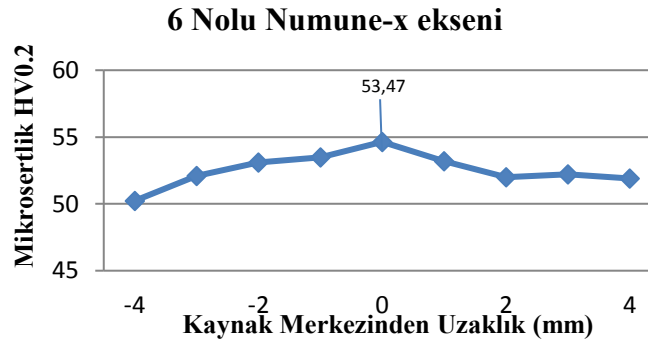
Çekme testleri sonrası kırılma bölgeleri incelendiğinde ise şekil 5 de görüldüğü gibi kopmalar kaynak bölgesi dışında ısıdan etkilenen bölgede gevrek kırılma şeklinde gerçekleşmiştir. Bu bilindiği gibi magnezyumun hegzagonal kristal kafes yapısına ve çapraz kayma oluşumuna bağlıdır [15].

Kaynaklı parçaların Vickers mikro sertliği kaynağın enine kesitinin orta kısmından bir hat boyunca ölçülmüştür. Çekme testleri sonucunda en yüksek ve en düşük dayanıma sahip kaynaklı numunelerin sertlik ölçüm grafikleri Şekil 6 ve Şekil 7 'de verilmiştir. Yapılan sertlik ölçümlerinde en yüksek değerler karıştırma bölgesinden alınmış ve 3

nolu deney numunesinin en yüksek sertlik değeri 51,92 HV ve 6 nolu deney numunesinin maksimum sertlik değeri ise 53,47 HV olarak ölçülmüştür. Ana metalin ortalama mikro sertliği 53 HV dir. Kaynaklı bölgeden ölçülen sertlik değerleri kullanılan kaynak parametreleri ile ilişkilidir. Ancak sertlik değerlerinin kaynak parametrelerinin değişiminden pek etkilenmediği ve ana malzeme ile kaynaklı bölgede sertlik değerleri arasında önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Yüksek takım dönme hızında karıştırılan malzemenin üst yüzeyinde aşırı türbülansa ve ince taneli homojen bir karışım bölgesine neden olabileceği, bu durumda sertlik artışı yaratmayacağı söylenebilir [8,16]. 6 nolu numunede ilerlemenin çok düşük olması nedeni ile ısı girdisi artışına bağlı olarak intermetalik bileşiklerin meydana gelmesi ve daha yüksek sertliğe sahip bölgelerin oluşabileceği düşünülmüştür.



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. 3 nolu numune mikro sertlik grafiği.

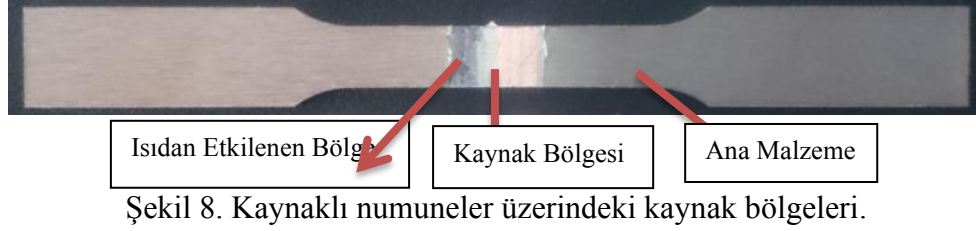


Şekil 7. 6 nolu numune mikro sertlik grafiği.

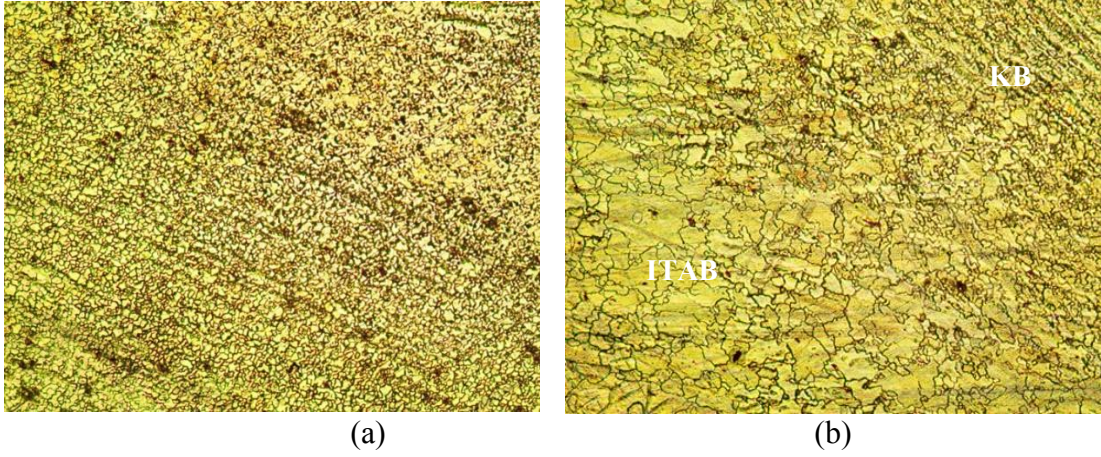
Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış AZ31B-H24 kaynaklı parçaların mikro yapıları incelenmiştir. Optik mikroskop ile mikro yapı görüntülerinin alındığı bölgeler Şekil 8’de verilmiştir. Dayanım değeri en yüksek ve en düşük olan kaynaklı parçaların numunelerinden alınan mikro yapı görüntüleri ise Şekil 9-11’de gösterilmektedir.

Kaynaklı parçaların mikro yapıları incelendiğinde, karışım (kaynak) bölgesi, ısı etkisi altındaki bölge (ITAB) ve ana malzemeden oluşan bölgeler ayırt edilmektedir. Şekil 9 ’daki 3 nolu numunenin kaynak bölgesinde, kaynak sırasında oluşan sürtünme ısısı ve plastik deformasyon ile yeniden kristalleşmiş ince taneler yoğunlukla görülmektedir. Plastik akış kaynaklı bölgeler de düzgün tane dağılımı gözlenmiştir. Ana malzemeye yakın olan ITAB’ın mikro yapı ve mekanik özellikleri ısı ile değiştiği tane irileşmesi olduğu fakat herhangi bir plastik deformasyona maruz kalmadığı görülmektedir. Ayrıca

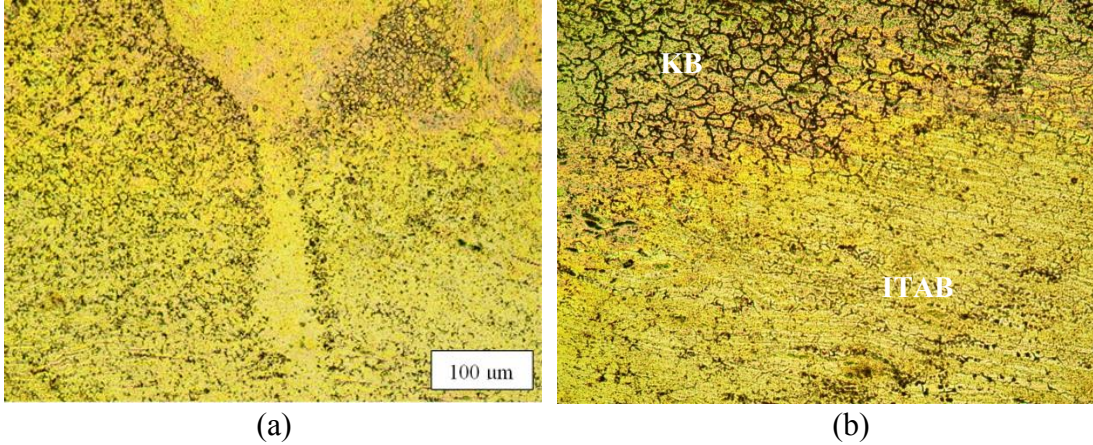
ısı girdisinin artmasıyla intermetalik fazların oluşabileceği düşünülmektedir. Dayanım değeri düşük olan 6 nolu numunenin mikro yapı görüntüleri incelendiğinde, kaynak bölgesinin homojen olmayan bir karışım bölgesinden oluştuğu görülmektedir. SKK yapılan numunelerin kaynaklı birleştirme bölgesinin mikro yapı incelemesi literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür [8,16].



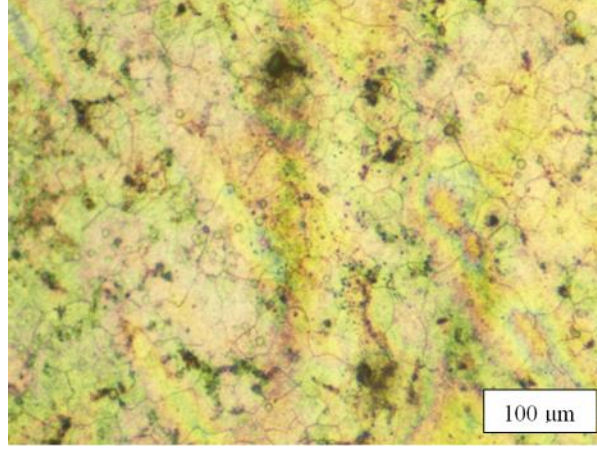
Şekil 8. Kaynaklı numuneler üzerindeki kaynak bölgeleri.



Şekil 9. 3 nolu numunenin kaynak bölgesi mikroyapısı a) kaynak bölgeleri b) ısı etkisi altındaki bölge (100X).

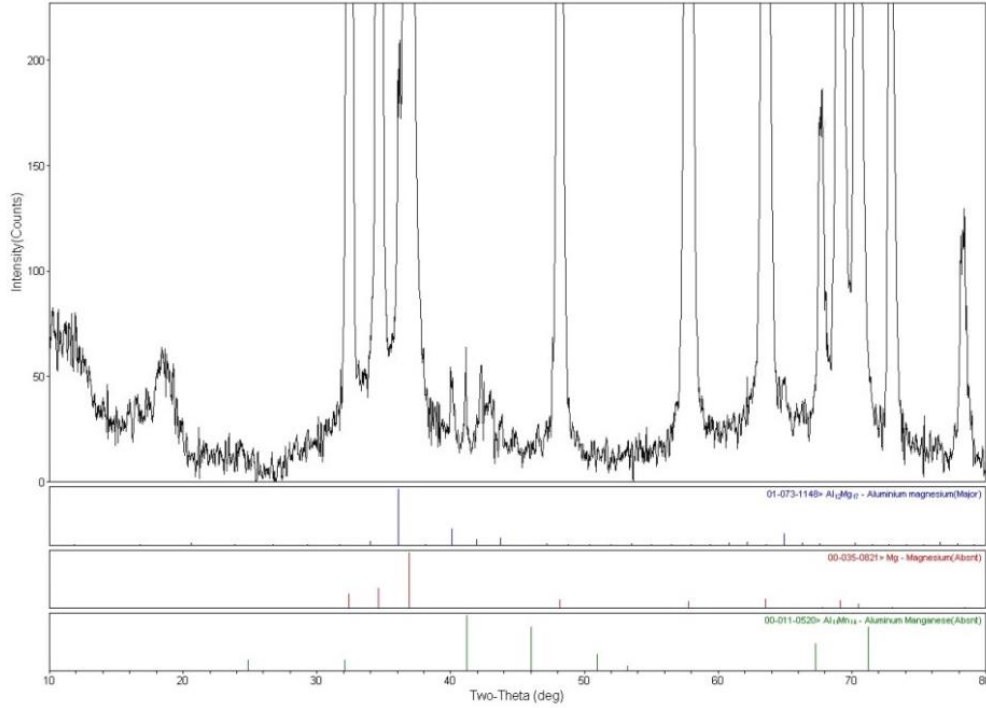


Şekil 10. 6 nolu kaynaklı numunenin mikroyapısı a) kaynak bölgeleri b) ısı etkisi altındaki bölge (100X).



Şekil 11. Ana malzemenin (AZ1B-H24) mikroyapısı.

Kaynak bölgesinde düşünülen intermetalik fazların belirlenmesi için yapılan XRD analiz incelemeleri ile doğrulanmıştır (Şekil 12). Görüldüğü gibi kaynaklı bölgede ( $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_{11}Mn_{14}$ ) intermetalik fazları oluşmuştur. Isı girdisine bağlı olarak intermetalik fazların oluşumu ve miktarlarının malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilerinin olduğu bilinmektedir. Kaynaklı numunelerin dayanım değerlerinin yüksek olmasını, intermetalik fazların oluştuğu, ancak kırılmalık yaratacak boyuta ulaşmadığı şeklinde değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar literatür ile de uyumludur [10,17]



Şekil 12. Karışım bölgesine ait XRD analizi.

#### 4. Sonuçlar

AZ31B-H24, Mg alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirilme parametrelerinin değerlendirildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Ergitme kaynak yöntemleriyle oldukça zor kaynaklanan Mg alaşımlarından, AZ31B-H24 Mg alaşımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde kaynaklandığı görülmüştür. Optimize edilmiş işlem parametre değerleri için mikroyapı incelemeleri, kaynak bölgesinde ince bir şekilde bölünmüş ve tanelerin parçalanması düzgün bir şekilde gerçekleşmiştir. Plastik akış kaynaklı bölgeler de düzgün tane dağılımı gözlenmiştir. Düşük devir sayısında ve yüksek ilerleme hızlarında parçada iyi bir kaynaklanma sağlanamamıştır. Isı girdisi, devir sayısı ve omuz çapı ile doğru, kaynak hızı ile ters orantılıdır. Isı girdisi gereğinden fazla olduğunda, intermetalik fazların oluşumu söz konusu olmaktadır. Kaynak bölgesinde sıcaklık etkisi ile oluşan  $Al_{12}Mg_{17}$  ve  $Al_{11}Mn_{14}$  fazların oluştuğu ve bu fazların kırılkan yapısı sebebiyle çekme dayanımının azalmasına, sertliğinin ise artmasına sebep olmuştur. Isı girdisinin azalması ise yetersiz karışım ve kaynak bölgesinde boşluklara neden olmakta bu da kaynaklı parçanın dayanımını düşürmektedir. Yapılan çalışmada, en yüksek çekme dayanım değeri 1400 dev/dak dönme hızı, 50 mm/dak ilerleme hızı ve 15 mm lik omuz çapı ile 3 nolu numunede 195,77 MPa olarak elde edilmiştir. Ana malzemeye göre 75,88 lik bir kaynak performansı elde edilmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Scialpi, A., De Filippis, L.A.C. and Cavaliere, P., Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy, **Materials and Design**, 28, 1124–1129, (2007).
- [2] Elangovan, K. and Balasubramanian, V., Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, **Materials and Design**, 29, 362–373, (2008).
- [3] Cebeci, T. ve Şahin, S., Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen AA1050 ve AA5754-H111 alüminyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, **CBÜ Soma MYO Teknik Bilimler Dergisi**, 2, 14, (2010).
- [4] Heidarzadeh, A., Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A. and Nazari, E., Tensile behavior of friction stir welded AA6061-T4 aluminum alloy joints, **Materials and Design**, 37, 166–173, (2012).
- [5] Saeid, T., Abdollah-zadeh, A. and Sazgari, B., Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum–copper lap joints made by friction stir welding, **Journal of Alloys and Compounds**, 490, 652–655, (2010).
- [6] Xue, P., Ni, D.R., Wang, D. B., Xiao, L. and Ma, Z.Y., Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al–Cu joints, **Materials Science and Engineering A**, 528, 4683–4689, (2011).
- [7] Abdollah-Zadeh, A., Saeid, T. and Sazgari, B., Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints, **Journal of Alloys and Compounds**, 460, 535–538, (2008).
- [8] Çakır, R., AA1050/Cu Malzeme çiftinin birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerinin etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2013).
- [9] Rose, A. R., Manisekar, K. and Balasubramanian, V., Influences of welding speed on tensile properties of friction stir welded AZ61A magnesium alloy, **Journal of Materials Engineering and Performance**, 21, 2, 257-265, (2012).

- [10] Rajakumar, S., Balasubramanian, V. and Razalrose, A., Friction stir and pulsed current gas metal arc welding of AZ61A magnesium alloy: A comparative study, **Material and Design**, 49, 267-278, (2013).
- [11] Ugender, S., Influence of tool pin profile and rotational speed on the formation of friction stir welding zone in AZ31 magnesium alloy, **Journal of Magnesium and Alloys**, 6, 2, 205-213, (2018).
- [12] Li, W., Niu, PL., Yan, SR., Patel, V., Wen, Q, Improving microstructural and tensile properties of AZ31B magnesium alloy joints by stationary shoulder friction stir welding, **Journal of Manufacturing Processes**, 37, 159-167, (2019).
- [13] Naik, B. S., Cao, X., Wanjara, P., Friedman, J. and Chen, D., Residual stresses and tensile properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy in lap configuration, **Metallurgical and Materials Transactions B**, 46, 4, 1626–1637, (2015).
- [14] Sevvel, P., Jaiganesh, V., Characterization of mechanical properties and microstructural analysis of friction stir welded AZ31B Mg alloy through optimized process parameters, **Procedia Engineering**, (2014).
- [15] Ericsson, M., Jin, L.Z., Sandström, R., Fatigue properties of friction stir overlap welds, **International Journal of Fatigue**, 29, 57-68, (2007).
- [16] Toktaş, A., Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin AA 6063 alüminyum alaşımına uygulanması ve kaynak parametrelerinin malzeme iç yapısı ile mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2006).
- [17] Sunil, B., Reddy, R., Mounika, G.P.K., Sree, A.S.N., Navya, P., Pinneswari, P. R., Ambica, I., Babu, R.A., Amarnadh, P., Joining of AZ31 and AZ91 Mg alloys by friction stir welding, **Journal of Magnesium and Alloys**, 3, 330–334, (2015).



# NIOSH ve REBA yöntemleri kullanılarak ergonomik risk analizi vaka çalışması

Serhat AYDIN\*

Milli Savunma Üniversitesi Hava Harp Okulu, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yeşilyurt, İstanbul

Geliş Tarihi (Received Date): 15.06.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 06.01.2021

## Öz

Bu çalışmada perakende sektöründe et ve tavuk ürünleri satışı yapan bir firmada, çalışanların elle kaldırma işlemlerini gerçekleştirdiği sipariş hazırlama iş istasyonunda ve müşterilere hizmetin sunulduğu reyon iş istasyonundaki çalışma duruşları gözlenmiştir. Bu kapsamda, çalışanların elle kaldırma işlemi için NIOSH kaldırma denklemi modeli, reyon kısmındaki çalışma duruşları için ise REBA yöntemi kullanılmıştır. Her iki iş istasyonunda yapılan analiz sonucunda, bu bölgelerdeki çalışmaların risk seviyelerinin yüksek olduğu belirlenmiş ve iyileştirmeye ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır. Sipariş hazırlama alanında gerçekleştirilen analizde, kaldırmanın başladığı paletin yükseltilebilir bir transpalet ile değiştirilmesi gerektiği ancak bu işlemin tek başına yeterli olmayacağı, ayrıca taşınan kasaların ağırlıklarının 20 kg'dan 15 kg'a düşürülmesi gerektiği önerisi firmaya sunulmuştur. Reyon alanında gerçekleştirilen çalışma öncesinde REBA puanı ilk başta 9 olarak hesaplanmış, bu istasyonda gerçekleştirilen iyileştirmeler sonucunda ise REBA puanı 3'e düşürülmüştür. Nihai olarak çalışma ortamında kaldırma işlemi için işletmeye öneri getirilmiş, çalışma pozisyonu için ise çeşitli iyileştirmeler sağlanarak ergonomik riskler azaltılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Ergonomi, ergonomik risk analizi, NIOSH, REBA.

## A case study of ergonomic risk analysis using NIOSH and REBA methods

### Abstract

In this study, working positions are observed in a company that sells meat and chicken products in the retail sector, in the order preparation workstation where employees perform manual lifting operations and in the workstation where the customers are

\* Serhat AYDIN, saydin3@hho.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0861-8297>

*served. In this context, the NIOSH lifting equation model is used for manual lifting of employees, and the REBA method is used for working postures in the section. As a result of the analysis made at both workstations, it is determined that the risk levels of the studies in these regions are high and there is a need for improvement. In the analysis carried out in the order preparation area, the company is presented with the suggestion that the pallet truck that the lifting started should be replaced with an upgradable pallet truck, but this process alone will not be sufficient, and the weight of the transported crates should be reduced from 20 kg to 15 kg. The REBA score is initially calculated as 9 in the rayon section, and after the improvements made here, the REBA score was reduced to 3. Finally, a proposal is made to the enterprise for the lifting process in the working environment, and ergonomic risks are decreased by providing various improvements for the working position.*

**Keywords:** Ergonomics, ergonomic risk analysis, NIOSH, REBA.

## 1. Giriş

Ergonomi kelimesinin kökeni Yunanca “Ergon (iş)” ve “Nomos (Hukuk)” kelimelerinden meydana gelmektedir. Uluslararası Ergonomi Derneği tarafından ergonomi “Bir sisteme ait olan elemanların ve insanların arasındaki etkileşimin anlaşılması ve teori, prensipler, veriler ve yöntemleri tasarıma uygulayan meslek ile ilgili bilimsel disiplindir” [1] ifadesi ile tanımlanmıştır. Ergonominin diğer bir önemli tanımı ise; insanların anatomik özelliklerini ve fizyolojik olarak sergileyebildikleri limitlerini göz önünde tutarak, iş ortamındaki çeşitli faktörlere bağlı oluşabilecek psikolojik stresler karşısında, sistem verimliliği ve insan-makine-çevre uyumunun temel kurallarını ortaya koyan, çok disiplinli bir araştırma alanıdır [2]. Ergonomi; teknik bilimler, sosyal bilimler, tıbbi bilimler, psikososyal bilimler gibi birçok disiplin ile paralel olarak çalışan uygulamaya dayalı bir bilim dalı olması çok disiplinli bir yapıya sahip olmasının sonucudur.

Çalışanlar işyeri ortamıyla etkileşim içerisinde. Endüstrinin ve teknolojinin çok hızlı bir şekilde gelişmesi, insan ve makine etkileşiminin her geçen gün arttığı günümüzde, birçok meslek hastalığı ve iş kazalarına karşı çalışanların korunması kavramı çok önemli bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışanların gün içerisinde oldukça fazla zaman harcadıkları iş yerlerindeki çalışma koşullarında sağlıklarına olumsuz etki yapan faktörlerin belirlenmesi ve bunlara yönelik önlem alınması hususu ergonomi kavramını ön plana çıkarmaktadır. Ayrıca iş performansı konusunda yapılan çalışmalara paralel olarak, çalışanların iş memnuniyetlerinin artması iş performansına olumlu yönde etki yapması, çalışma ortamlarının ergonomik faktörlere göre tasarlanması ve olumsuz faktörlerin bertaraf edilmesi ergonominin önemini ön plana çıkaran diğer bir unsurdur.

Ergonomi biliminin amaçlarından bir diğeri de çalışanın çalışma duruşunu incelemek, hatalı duruşları tespit edip gerekli düzenlemeleri ve gerekli iyileştirmeleri sağlayarak sistemin verimliliğini artırmaktır [3]. Çalışanların, çalışma ortamlarındaki kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının meydana gelmesine neden olan, çalışanın maruziyetini ve değişimini incelemek amacıyla literatürdeki yöntemler şu başlıklar altında toplanabilir; i) Kişisel Anket Yöntemleri, ii) Sistematik Gözleme Dayalı Yöntemler, iii) Direkt Ölçüm Yöntemleri [4]. Bu yöntemler değerlendirildiğinde Direkt Ölçüm Yöntemleri en güvenilir yöntem gurubudur ancak maliyetlerinin çok yüksek olması bu yöntemlerin

uygulanabilirlik oranını azaltmaktadır. Kişisel Anket Yöntemlerinin uygulanması maliyet olarak avantaj sağlasa da anketlerdeki verilerin her zaman ankete katılanlar tarafından dikkatli şekilde doldurulmaması nedeniyle güvenilirliği düşük seviyededir. Sistemik Gözleme Dayalı Yöntemler, daha önce bahsedilen iki yönteme oranla daha dengeleyici bir yöntem olarak araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Sistemik Gözleme Dayalı Yöntemler, Basit Gözleme Dayalı Yöntemler ve Gelişmiş Gözleme Dayalı Yöntemler olarak iki ayrı başlıkta toplanabilir. Gelişmiş Gözleme Dayalı Yöntemler video çekimine dayalı yöntemler olarak geliştirilmiş yöntemler olup özel yazılımlarla uygulamaları gerçekleştirilir. Basit Gözleme Dayalı Yöntemler şu şekildedir; El ile taşıma değerlendirme çizelgeleri-MAC [5], Anahtar Gösterge Yöntemi- KIM [6], Elleçleme ile İlgili Risk Faktörlerinin Tanım Kâğıdı- FIFARIM [7], Üst Ekstremitte Tekrarlı Görevleri İçin Değerlendirme Aracı -ART [8], Risk Filtresi ve Risk Değerlendirme Çalışma Sayfası [9], Ergonomik Tehlikelerin Tanımlanmasına Yönelik Kontrol Listesi- PLIBEL [10], Keyserling Kontrol Listesi [11], Amerika Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü Yük Kaldırma Endeksi- NIOSH [12], Psikofizik Tablolar [13], Zorlanma İndeksi- SI [14], Ovako Çalışma Duruşları Analiz Sistemi - OWAS [15], Hızlı Üst Uzuv Değerlendirmesi -RULA [16], Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi- OCRA [17], Mesleki Tekrarlamalı Hareketler Kontrol Listesi- OCRA Checklist [18], SOBANE Gözlem Rehberi [19], Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi- REBA [20], Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi -QEC [21], Üst Vücut Yüklenmesi Analizi- LUBA [22]. Bu çalışmada bahse konu yöntemlerden NIOSH ve REBA yöntemleri ele alınacaktır.

NIOSH, ABD Sağlık ve İnsan Hizmetleri Departmanı'ndaki Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezlerinin bir parçasıdır ve iş sağlığı ve güvenliği alanında yeni bilgiler geliştirmek ve bu bilgileri uygulamaya aktarmaktan sorumludur. NIOSH ilk olarak 1981 yılında "Lifting equation- (Kaldırma denklemi)" ismiyle yük kaldırma işi ile ilgili bir rehber yayınlamıştır. Daha sonra "Manuel kaldırma görevlerinin tasarımı ve değerlendirilmesi için yenilenmiş NIOSH denklemi" 1991 yılında Ann Arbor Michigan'da yapılan "İşle İlgili Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarının Önlenmesi için Ulusal Strateji Geliştirme" konferansında literatüre kazandırılmıştır.

NIOSH denklemi yönteminin amacı yükleri kaldırma ve taşıma esnasındaki çalışanların maruz kaldığı ergonomik riskleri tanımlamaktır. Bu yöntem, çalışma ortamında yüklerin kaldırılmasındaki kabul edilebilir sınırlamaların belirlenmesinde kullanılmaktadır. NIOSH yöntemi sadece kaldırma ile ilgili işleri ele alır çekme, itme ve taşıma işlerinde kullanılmaya uygun değildir. Yöntem sadece, iki elle gerçekleştirilen kaldırma işlerini değerlendirir. NIOSH yönteminin dezavantajı tek elle gerçekleştirilen yük kaldırma işlemlerinde, zeminin uygun olmadığı durumlarda, 8 saati geçen çalışma sürelerine, yükün ağırlık merkezinin sürekli değiştiği durumlara ve kaldırma hareketinin hızlı bir şekilde gerçekleştirildiği faaliyetlerde kullanılması durumunda güvenilir sonuç vermemesidir [23].

REBA yöntemi, değerlendirilen iş göreviyle ilişkili biyomekanik ve kas iskelet sistemi riskleri için kas-iskelet sisteminin hem üst hem de alt kısımlarını değerlendirmek için sistematik bir süreç olarak McAtamney ve Hignett [20] tarafından bir araç olarak önerilmiştir. Önerilen bu yöntemin geliştirilmesindeki temel hedefler şu şekildedir; farklı görevlerde kas-iskelet risklerine duyarlı basit bir postüral analiz sistemi sağlamak; duruşlara ve hareket düzlemlerine atıfta bulunarak bireysel olarak değerlendirmek için bedeni segmentlere ayırmak; statik, dinamik, hızlı değişen veya kararsız duruşların

neden olduğu kas aktivitesi için bir puanlama sistemi sağlamak; yüklerin taşınmasında kuplajı önemli bir değişken olarak değerlendirmek; acil durum göstergesi ile bir eylem seviyesi çıkışı vermek; minimum zaman, çaba ve ekipman gerektiren kullanıcı dostu bir değerlendirme aracı sağlamaktır. REBA yönteminin en büyük avantajı, yöntemin uygulanabilirliğinin oldukça kolay olmasıdır. Yöntemin dezavantajı ise, farklı işler için gerçekleştirilen çalışmalar için inceleme süresi ve inceleme aralıklarının belirsiz olmasıdır [24]. REBA yönteminde analiz edilmek istenen bir çalışma duruşu veya hareketin neden olduğu risk sayısal olarak ifade edilir. Gözlemci, çalışanın hareketlerini ve duruşlarını inceleyerek analiz etmek için hazırlanmalıdır. REBA yöntemi, vücudun sağ ve sol tarafı aynı anda değerlendirilir ve değerlendirme zamanı oldukça kısadır. REBA yöntemi değerlendirme yaptığı anda çalışanın gövdesinde, boynunda, bacaklarında, üst kollarında, alt kollarında ve bileklerinde ortaya çıkan esneme ve fleksiyon ile bu duruşlar esnasında çalışanın maruz kaldığı yüklere bağlı olarak 1 ile 15 arasında değişen bir puan belirlenmektedir [25].

Perakende sektörü Türkiye'nin hızlı değişime uğrayan ve hızlı büyüyen sektörlerinden biridir. KPMG Türkiye, "Sektörel Bakış 2020 – Perakende Raporu'na göre 2019'da sektör büyüklüğü 1,1 milyar TL olarak belirlenmiştir [26]. İş hacmindeki bu artış, bu alanda çalışanların maruz kaldığı ergonomik risklerinde çeşitli araştırmalarla detaylı olarak incelenmesine ihtiyaç doğurmaktadır. Perakende sektöründe çalışanların çalışma şartlarının iyileştirilmesi işletmelerin daha verimli hizmet üretmesine neden olmasından dolayı bu çalışmada, İstanbul Avrupa bölgesinde faaliyet gösteren et ve tavuk ürünleri satan Çakırlar Et ve Tavuk Pazarı işletmesinde çalışma ortamındaki ergonomik risk analizi konusunda çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında çalışanların elle kaldırma işleri NIOSH denklemine göre incelenmiş, reyon kısmındaki çalışanların duruş pozisyonları ise REBA yöntemi ile analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda çalışma alanlarındaki çalışma risk seviyelerinin yüksek olduğu noktalar belirlenmiş, firmaya çeşitli öneriler sunulmuş ve ergonomik iyileştirmeler sağlanmıştır. Bu çalışma kapsamında önerilen iyileştirmeler, bu sektörde faaliyet gösteren benzer işletmelerin çalışanlarının karşılaştıkları problemlere alınacak önlemler için yardımcı bir yayın olacaktır.

Makalenin geri kalan bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde NIOSH ve REBA yöntemlerine ait literatür araştırmasına yer verilmiştir. Bölüm 3'te çalışmada kullanılan yöntemlere ait adımlar tanımlanmıştır. Bölüm 4'te gerçekleştirilen uygulama detaylı olarak anlatılmış olup, son bölümde sonuç ve tartışma kısmına yer verilmiştir.

## 2. Literatür araştırması

Çalışmanın bu kısmında, NIOSH ve REBA yöntemlerine ait gerçekleştirilmiş olan çalışmalara yer verilmiştir. Yöntemlerin farklı alanlarındaki uygulamaları dikkate alınarak gerekli inceleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürde son dönemde gerçekleştirilen çalışmalar dikkate alınmıştır.

Sevene vd. [27] gerçekleştirdikleri çalışmalarında yaşlı erişkinlerde cinsiyete bağlı kavrama gücündeki farklılıkları NIOSH denklemini kullanarak araştırmışlardır. Meepradit vd. [28] NIOSH kaldırma denklemini değişkenlerini yatay konum, dikey konum, dikey hareket mesafesi, asimetrik, kaldırma sıklığı ve kuplaj sınıflandırmasını kullanarak kas-iskelet sistemi bozukluk risklerini azaltmaya yönelik çalışma

gerçekleştirmişlerdir. Ranavalo vd. [29] çalışma işlemleri esnasındaki mekanik kaldırma enerji tüketimini NIOSH kaldırma denklemini kullanarak incelemiştir. Duran ve Yeşilova [30] gerçekleştirdikleri çalışmalarında manuel yüklenme istasyonunda ergonomik iyileştirme sağlamak amacıyla NIOSH kaldırma denkleminde faydalanarak melez bir model önermişlerdir. Coşkun vd. [31] bir kompresör işletmesinde yer alan iş istasyonlarında ergonomik risk analizlerinin değerlendirilmesi için NIOSH yönteminden yararlanmışlardır.

Mork ve Choi [25] bir kimya laboratuvarında gerçekleştirdikleri çalışmalarında numune hazırlama işi görevlerinin ergonomik risk değerlendirmelerinin gerçekleştirilmesinde REBA yönteminden faydalanmışlardır. Atıcı vd. [32] REBA metodunu kullanarak çalışanlarda gerginliğe neden olan duruşların ergonomik analizi çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bartnicka [33] cerrahi koğuştta çalışma koşullarının bilgisine dayalı ergonomik değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalarında REBA yöntemini kullanmıştır. Son [34] gerçekleştirdiği çalışmasında, 119 Acil tıp teknisyenlerinin hasta kaldırma sırasındaki vücut pozisyonlarının değerlendirmesinde REBA yönteminin kullanıldığı melez bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Nagaraj vd. [35] gerçekleştirdikleri çalışmalarında ayakta dikiş makinası kullanan kişilerin ergonomik çalışma koşullarının incelenmesinde REBA yöntemini de içeren melez bir yaklaşım önermişlerdir. Kong vd. [36] çeşitli tarımsal görevler için geliştirilen ergonomik risk analizi değerlendirmelerinde REBA yöntemi kullanmış ve diğer yöntemlerle kıyaslamalarına yer verilmiştir. Kulkarni ve Devalkar [37] inşaat sektöründe çalışan kişilerin çalışma pozisyonlarındaki ergonomik risklerin incelenmesinde REBA yönteminden faydalanmışlardır. Cremasco vd. [38] ormancılıkta kas-iskelet sistemi hastalıkları için risk değerlendirmesi problemi REBA yöntemini de içeren bir model ile ele almışlardır.

Ayrıca, literatürde et ve tavuk ürünler perakende sektöründe faaliyet gösteren işletmeler üzerinde yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Özay ve Doğanbatır [39] gerçekleştirdikleri çalışmada Türkiye’de süpermarketler zinciri bulunan bir firmanın şubelerinden birinin kasap, şarküteri, depo ve manav reyonlarında ve temizlik işlerinde çalışanların elle kaldırma işleri ve çalışma duruş pozisyonlarını REBA, NIOSH ve SNOOK tablolarını kullanarak incelemiştir. Deryaoğlu vd. [40] çalışmalarında perakende sektöründe faaliyet gösteren bir firmadaki et taşıma sürecinde karşılaştıkları kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını incelemiştir. Bu çalışmada tüm vücut değerlendirme yöntemlerinden olan OWAS, QEC ve ManTRA yöntemleri kullanılmıştır. Ghasemi vd. [41] kasaplardaki Zorlanma indeksi- SI ve ACGIH-HAL yöntemlerini beraber kullanarak kasaplardaki çok yaygın olarak rastlanan karpal tünel sendromunu incelemişler ve çeşitli önerilerde bulunmuşlardır.

### 3. Yöntem

Bu çalışma kapsamında et ve tavuk ürünleri satışı yapan firmada et ve tavuk ürünlerinin kasalardan alınarak dağıtımı yapılacak olan ürün siparişlerinin hazırlandığı aşamadaki kaldırma işlemleri NIOSH kaldırma denklemi modeli ile, müşterilerden siparişin alındığı ve hazırlandığı reyon alanındaki çalışma pozisyonlarının incelenmesi için ise REBA yöntemi kullanılmıştır. Yöntemlerle ilgili detaylı açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

### 3.1. NIOSH kaldırma denklemi yöntemi

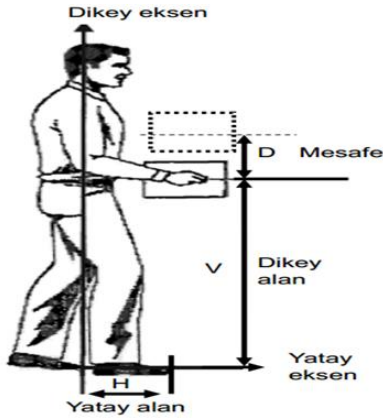
Bu metot AnnArborMichigan’da yapılan “İşle İlgili Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarının Önlenmesi için Ulusal Strateji Geliştirme” konferansında 1991 yılında literatüre kazandırılmıştır ve “Tavsiye Edilen Ağırlık Sınırı (RWL)” denklemini önermiştir. Bu eşitlik şu şekildedir;

$$RWL = LC \times HM \times VM \times DM \times AM \times FM \times CM \quad (1)$$

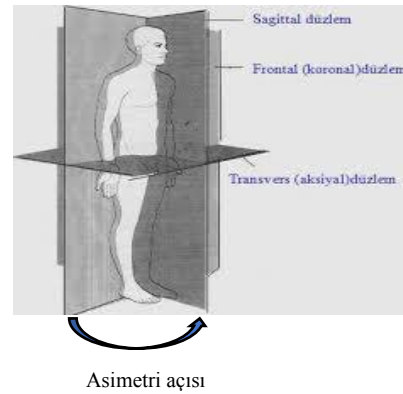
Bu eşitlikteki parametreler şu şekildedir; *LC*: Yük katsayısı, *HM*: Kaldırma sırasında vücut ve yük arasındaki yatay mesafe, *VM*: Kaldırma esnasında ellerin yerden yüksekliği, *DM*: Kaldırma başlangıcı ve bitişi arasında yükün kat ettiği dikey mesafe, *AM*: Ağırlık döndürme açısı, *FM*: Ağırlık kaldırma frekansı, *CM*: Ağırlık kavrama durumu. NIOSH kaldırma denklemi yöntemi çeşitli kısıtlar içermektedir. Bu kısıtlar şu şekildedir; sadece kaldırma işlemleri için kullanılır, en fazla 8 saatlik çalışma saati üzerinden hesap yapar, ağırlık merkezine sahip ekipmanlar gereklidir ve sadece iki elle kaldırma işlemleri üzerine uygulanabilir.

Burada *LC* (yük sabiti) değeri NIOSH kaldırma denklemi yöntemine göre 23 kg olarak alınacaktır.

*HM*, elin orta noktası ile omurga eksenindeki yatay mesafeye bağlıdır. *HM* değeri Tablo 1’e göre belirlenir ve tanımlanan *H* yüksekliğinin alınması gereken mesafe Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Alan gösterimi [42].



Şekil 2. Asimetri açısı gösterimi.

*VM*, yükü tutma noktasının tabana olan mesafesine bağlı faktördür. Şekil 1’de bu mesafenin gösterimi *V* olarak yapılmış ve hesaplama tablosu Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yatay çarpan tablosu.

$H \leq 25 \text{ cm}$	$HM = 1$
$25 < H \leq 63 \text{ cm}$	$HM = 25/H$
$H > 63 \text{ cm}$	$HM = 0$

Tablo 2. Dikey çarpan tablosu.

$V \leq 175 \text{ cm}$	$VM = 1 - (0,003 \times  V - 75 )$
$V > 175 \text{ cm}$	$VM = 0$

*DM*, kaldırmanın başladığı ve bittiği nokta arasındaki yükseklik farkı *D*’ye bağlı faktördür ve Şekil 1’de gösterilmiştir. Yükseklik ne kadar fazla ise mesafe çarpanının

değeri o derecede küçük olacaktır. Bu faktör için kullanılacak olan değerler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Mesafe çarpanı tablosu.

$D \leq 25\text{cm}$	DM= 1
$25 < D \leq 175\text{ cm}$	DM= 0,82+ (4,5/D)
$D > 175\text{ cm}$	DM= 0

Tablo 4. Asimetri çarpanı tablosu.

$A \leq 135\text{cm}$	AM= 1-(0,0032 x A)
$A > 135\text{ cm}$	AM= 0

AM, kaldırma hareketinin başlangıcında veya bitiminde vücudun sagittal düzleme göre pozisyonunu belirten açıya asimetri açısı (A) denir. Şekil 2'de bu açı gösterilmiş olup, Tablo 4'te bu açıya göre asimetri çarpanının alacağı değer gösterilmiştir.

FM, dakikada kaç defa kaldırma işlemi yapıldığına ve kaldırma mesafesine bağlı faktördür. Tekrarlama çarpanı hesabı Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Tekrarlama sayısı çarpanı.

Dakikada kaldırma sayısı	Çalışma süresi					
	< 1 saat		1 saat <	< 2 saat	2 saat >	< 8 saat
	V<75	V>75	V<75	V>75	V<75	V>75
<0,2	1	1	0,95	0,95	0,85	0,85
0,5	0,97	0,94	0,92	0,92	0,81	0,81
1	0,94	0,94	0,88	0,88	0,75	0,75
2	0,91	0,91	0,84	0,84	0,65	0,65
3	0,88	0,88	0,79	0,79	0,55	0,55
4	0,84	0,84	0,72	0,72	0,45	0,45
5	0,80	0,80	0,60	0,60	0,35	0,35
8	0,60	0,60	0,35	0,35	0,18	0,18
9	0,52	0,52	0,30	0,30	0,00	0,15
10	0,45	0,45	0,26	0,26	0,00	0,13

CM, taşınacak olan yükün ne kadar kolay ve iyi tutabildiğine bağlı bir faktördür ve Tablo 6'ya göre belirlenir.

Tablo 6. Tutma faktörü tablosu.

Tutma olanağı	V<75 cm	V>75 cm
İyi	1	1
Orta	0,95	1
Kötü	0,90	0,90

Tüm bu parametreler bağlı olarak gerçekleştirilen "Tavsiye Edilen Ağırlık Sınırı" hesabından sonra, kaldırma indeksi hesaplanır. Kaldırma indeksinin 1'den büyük olduğu durumlarda bel ağrılarının önemli derecede arttığı görülmektedir. Bu nedenle iş süreçlerinin kaldırma indeksinin 1'den daha az olacak şekilde planlaması gerekmektedir.  $1 < \text{Kaldırma indeksi} < 3$  olması durumunda işin tehlikeli ve ergonomik olarak iyileştirme yapılması gerektiği,  $\text{Kaldırma indeksi} > 3$  olduğu durumlarda ise işin çok tehlikeli olduğu ve acil olarak iyileştirmelerin gerçekleştirilmesi gerektiği önerilmektedir. Kaldırma indeksi eşitliği aşağıda gösterilmiştir.

Kaldırma indeksi=Kaldırılan ağırlık / Tavsiye edilen ağırlık (2)

### 3.2. REBA yöntemi

REBA (Rapid Entire Body Assessment- Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme), McAtamney ve Hignett [20] tarafından tüm vücudun çalışma ortamı ile ilgili bozukluklarını ve buradaki riskleri öngörmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. REBA yöntemi, tüm vücudun hem dinamik hem de statik duruşlarda analiz edilmesine olanak tanıyan pratik ve etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, çalışma duruşu esnasında vücut pozisyonlarının risk analizini gerçekleştiren bir yöntemdir ve riski sayısal olarak ifade eder.

REBA ile bir çalışma duruşunda bacaklarda, gövdede, boyunda, alt-üst kollarda ve bileklerde meydana gelen bükülme/esneme ve bu duruşlar sırasında işçinin maruz kaldığı kuvvet/yüklere bağlı olarak 1-15 arasında değişen bir puan elde edilmektedir. Bu yöntemde A ve B olarak iki ayrı grup oluşturulur. A grubu bacak, boyun ve gövdeyi içerirken, B grubu gövde ve bacakların her birinin ayrı ayrı puanlarını içermektedir. A grubuna ait puanlama Ek-1'de gösterilmiştir. Grup A puanlaması bacak, gövde ve boyunun duruş/hareketlerine göre hesaplanmaktadır.

Gövde puanı hesaplanırken gövdenin 20°'ye kadar, 20° ile 60° arasında ve 60°'den fazla fleksiyon durumları gözlenmektedir. Tabloya göre fleksiyon açısına bağlı olarak puan hesaplaması yapılmaktadır. Yatay düzlem ekseninde gövdede yanlara fleksiyon var ise 1 puan gövde puanına eklenmektedir. Boynun puanı hesabı; fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerinin 0°- 20° arasında olması durumunda 1 puan, 20°'den daha fazla olması durumunda 2 puan verilmektedir. Şayet yana doğru dönme veya eğilme hareketi oluşmuşsa 1 puan boyun puanına eklenerek puan hesabı yapılmaktadır. Bacak için puan hesaplamaları iki taraflı ve tek taraflı ağırlık taşımaya göre değişiklik göstermektedir. Dizlerde fleksiyon varsa puan değişimi sütunundan duruma göre 1 veya 2 puan bacak puanına eklenmektedir. Dizlerde 30° ve 60° arası fleksiyon oluşmuşsa 1 puan, 60°'den yüksek fleksiyon oluşmuşsa 2 puan ilave edilir. Elde edilen boyun, gövde ve bacak puanları Ek-3'te gösterilen A grubu puan tablosunda işaretlenerek nihai A grubu puanına ulaşılmaktadır. Hesaplanan bu puana Ek-3'te sunulan kuvvet/yük puanı eklenerek A puanı elde edilmektedir.

B grubuna ait puanlama Ek-2'de gösterilmiştir. Grup B puanlaması üst kol, alt kol ve bileklerden oluşmaktadır. Üst kol puanı hesaplanırken fleksiyon ve ekstansiyon hareketlerine puanlama yapılır 0°- 20° arasında ise 1 puan, 20° ile 45° arasında fleksiyon varsa 2 puan verilmektedir. 45°- 90° arasında fleksiyonlar 3 puan, 90°'den daha büyük fleksiyonlar 4 puan almaktadır. Eğer kol dönmüş veya kolda abdüksiyon varsa ise 1 puan eklenir. Omuz yükseltilmiş durumdaysa ise 1 puan eklenir ve eğer hareket yerçekimi desteği ile yapılıyorsa 1 puan çıkarılır. Alt kollardaki fleksiyon hareketi 60°- 100° arası ve 60°'den küçük veya 100°'den daha büyük olmasına göre puanlanmaktadır. Bilek, 15°'den az ya da 15°'den daha fazla olan bükülmeler 1 ya da 2 puan olarak hesaplanmaktadır. Bilekte yatayda dönme olmuşsa 1 puan, puan değişimi sütunundan eklenmektedir. Üst kol, alt kol ve bileklerin puanları Ek-3'te gösterilen B grubu puanı tablosundan işaretlenerek B grubu puanı elde edilir. B grubu puanına Ek-3 de sunulan kavrama Puanı Tablosundan elde edilen kavrama puanı eklenerek nihai B puanına ulaşılmaktadır.

Elde edilen A ve B grubu puanları Ek-4'te sunulan C grubu puan tablosunda bileştirilir ve bu değere Ek-4'te sunulmuş olan aktivite puan tablosundaki değer eklenerek nihai REBA puanı hesaplanır. REBA yöntemiyle bulunan nihai risk puanı neticesinde risk



seviyesi belirlenir. Belirlenen seviyeye göre gerekli iyileştirmeler önerilir. Tablo 7’de risk seviyeleri tablosu gösterilmiştir.

Tablo 7. Risk seviyeleri tablosu.

Derece	REBA puanı	Risk seviyesi	Önlem
0	1	İhmal edilebilir	Gerekli değil
1	2-3	Düşük	Gerekli olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Yakın zamanda gerekli
4	11-15	Çok yüksek	Hemen gerekli

#### 4. Uygulama

Çalışmanın bu bölümünde, İstanbul Avrupa yakasında bulunan 2 kat olarak 150 m<sup>2</sup> bir alanda et ve tavuk ürünlerinin hem soğuk hava depolarında depolanması hem de satış faaliyeti gerçekleştiren Çakırlar Et ve Tavuk Pazarı işletmesinde incelemelerde bulunulmuştur. Firmanın çalışma saatleri 08.00-21.00 olmak üzere çalışanları iki vardiya olacak şekilde çalışma faaliyeti sürdürmektedirler. Firma İstanbul Avrupa bölgesinde toplamda 45 lokantaya et dağıtımını gerçekleştirmektedir. Ayrıca gün içerisinde 250-300 arasında firmaya gelen müşterisi bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında iki farklı alan incelenmiştir. İlk alan et ve tavuk ürünlerinin hem lokantalara dağıtımına hazırlandığı hem de reyon kısmında satışa sunulmak üzere hazırlandığı depolama alanı, ikinci alan ise müşterilere direkt satışa sunulduğu reyon kısmıdır. Bu alanlar incelenerek firmaya gerekli iyileştirme önerileri sunulmuştur.

##### 4.1. Depolama alanı

Bu çalışma alanında sabah saatlerinde işletme lokantalara dağıtılacak olan ve reyona çıkarılacak olan etlerin hazırlığı yapılır. Soğuk hava depolarında bekletilen ürünler depolama alanında kesme doğrama tahtasına çıkarılarak bu alanda siparişlere göre ayrıştırma gerçekleştirilir. Günlük ortalama 45 kasa et ve tavuk ürünü çıkartılmakta ve bu kasaların ağırlıkları ortalama 20 kg’dır. Bu alanda gerçekleştirilen işlem Şekil 3’te gösterilmiştir. Bu işlem her sabah saatinde 2 saat, öğleden sonra ise 1 saat olacak günde toplamda 3 saat olarak gerçekleşmektedir.



Şekil 3. Soğuk hava deposundan alınan ürünler.

Çalışma alanında siparişleri hazırlayacak olan çalışanın, çalışma alanının yan tarafında paletlerden tezgâha taşınacak malzemeler bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında

malzemelerin soğuk hava deposundan paletlere yüklenmesi ile ilgili çalışma alanı dikkate alınmamıştır, çünkü soğuk hava deposundaki malzemeler paletlere direk olarak transpalet vasıtası ile alınmakta herhangi bir kaldırma veya indirme işlemi fiziksel olarak gerçekleştirilmemektedir. Bu nedenle çalışmada sadece, paletlerden alınan ürünlerin tezgâha kaldırılması işlemi için çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki ele alınan metrik ölçüler şu şekildedir; paletin yerden yüksekliği 15 cm'dir. Yükün taşındığı tezgâh 95 cm yüksekliğinde olup, çalışanın yükü kaldırmak için 45°lik asimetrik açısı işlemi gerçekleştirilmektedir. Yükün yatay mesafesi 20 cm'dir. Çalışan 3 saatlik çalışma süresi içerisinde 45 kasa yükü kaldırması nedeniyle tekrar sayısı dakika 0,25'tir. Bu veriler ışığında gerçekleştirilen çalışma kapsamında NIOSH parametreleri Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Sipariş ve reyon sunumu hazırlanma için kaldırma indeksi hesabı.

Parametre		Öneri öncesi hesaplama	Öneri sonrası hesaplama
Yük sabiti	LC	23	23
Yatay çarpan	HM	1	1
Dikey çarpan	VM	0,82	0,94
Mesafe çarpanı	DM	0,87	1
Asimetri çarpanı	AM	0,85	0,85
Tekrarlama faktörü	FM	0,81	0,81
Tutma faktörü	CM	1	1
Tavsiye edilen ağırlık sınırı	RWL	11,29	16,63
Kaldırma indeksi	Kİ	1,77	0,90

Öneri öncesi hesaplanan kaldırma indeksinin 1,77 çıkması nedeniyle işin tehlikeli ve ergonomik olarak iyileştirme yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, işletmeye basit bir öneri getirilmiş ve ürünlerin paletlerden kaldırılma işlemlerinin gerçekleştirildiği alana yüksekliği ayarlanabilir bir transpalet tedarik edilmesi ve paletlerin üzerindeki ürünleri kaldırmak yerine, yüksekliği ayarlanabilir bir transpalet ile ürünlerin tezgâh seviyesine getirilmesi önerilmiştir. Bu durumda ürünler ile tezgâh yüksekliği aynı seviye getirilebileceği için mesafe (*D*) sıfır değerine düşürülecek ve *DM* değeri 1 olarak hesaplanacaktır. Transpalet üzerindeki her bir kasa (ürün), tezgâha sadece asimetrik çarpan etkisi (*AM*) ile yerleştirilebilecektir. Kasalar transpalet üzerinde üst üste 4'er adet olacak şekilde durabilmektedir. Örnek olarak en üstteki kasa öncelikle tezgâh ile aynı seviyeye getirilecek ve tezgâha taşınacaktır. Bir sonraki kaldırılacak olan kasa tezgâh seviyesinden 15 cm aşağı pozisyonda bulunacaktır, yine transpaletin yükseltilmesi özelliğinden faydalanarak bu kasa tezgâh ile aynı seviyeye getirilebilecektir. Bu nedenle öncelikle transpalet yüksekliği ayarlanabilir bir modelle ile (Şekil 4) değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak, bu durum yeterli olmayacaktır. Çünkü transpaletin yüksekliği *VM* değeri ile alakalıdır ve bu nedenle bu değeri en iyileyecek olan *V* değeri 75 olarak belirlense bile hesaplamalar sonucunda kaldırma indeksi 1 değerinden büyük hesaplanacaktır. Çalışanın asimetrik çarpanı işletmenin mimari tasarımı nedeniyle değiştirilememektedir, değiştirilse bile ciddi bir maliyet oluşturacaktır. Bu durumda çalışanın kaldırdığı yükün azaltılması kaçınılmaz olacaktır. Yükün azaltılması tekrarlamaya faktörüne etki edeceği unutulmamalıdır ki, günlük olarak 20 kg'lık 45 adet kasa kaldırılmaktadır yani 900 kg et ve tavuk ürünü kaldırılmaktadır. Taşınan kasalar Balıkesir'deki üretim çiftliğinden İstanbul'a nakliye firması ile taşınmakta ve burada soğuk hava deposunda depolanmaktadır. İşletmenin kaldırma

alanında ergonomik iyileştirme yapmak amacıyla, üretim çiftliği ile gerekli koordinenin sağlanıp taşınacak yükün 15 kg'lık yükler halinde sevk edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durumda yükün (kasaların) kaldırma tekrarlanma sayısı 45'ten 60'a çıkacaktır ancak bu işlem *FM* değerinde herhangi bir artışa neden olmayacaktır. Bu alandaki çalışma süresi 3 saati geçmemesi nedeniyle fizyolojik yorulmaya çok büyük bir etkisi olmayacaktır. Çünkü bu alandaki fizyolojik yorgunluk değerindeki ölçüt, kaldırma tekrarı ile alakalıdır. Tablo 5 incelendiğinde tekrar sayısı 60'a çıkarsa bile *FM* değerinin 0,81 ile sınırlı kaldığı açıkça görülmektedir, ayrıca hesaplamalar yapılırken dakikada kaldırma değeri 0,5 üst limit alınarak hesaplama yapılmıştır ki bu değer gerçekte  $60/180=0,33$ 'tür. Tablo 5'teki dakikada kaldırma sayısı değerlerinde 0,33 olmaması nedeniyle bu değer 0,5 alınarak üst limitten hesaplama yapılmıştır. Yapılan bu hesaplamalar ile nihai olarak kaldırma indeksinin 0,90 değerine düşeceği, bu durumun çalışanın sağlığı için gerekli olduğu işletmeye öneri sonuç raporu olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Yüksekliği ayarlanabilir transpalet örneği.

#### 4.2. Reyon alanı

Bu çalışma alanında ürünlerin sergilendiği ve müşterilerin işletmeye gelerek verdikleri siparişlerin reyondan alınarak hazırlanması süresindeki duruş pozisyonu incelenmiştir. Çalışma alanındaki reyonun boyutları şu şekildedir; 500 cm\*90 cm\*20 cm. Çalışanlar reyondan gün içerisinde ortalama 250 kişiye ortalama 300 farklı ürün için reyondan ürün alarak siparişi hazırlamaktadır. Ürünlerin reyondan alınması esnasında çalışma pozisyonu Şekil 5'te gösterilmiştir. Çalışmanın bu kısmında, işletme çalışanın çalışma duruşu REBA yöntemine göre gözlenmiştir. Gözlem sonucuna göre oluşturulan REBA puanı Tablo 9'da gösterilmiştir.



Şekil 5. Ürünlerin reyondan alınması esnasında çalışma pozisyonu.

Tablo 9. REBA analiz tablosu.

	Reyon kısmı	
	İyileştirme öncesi	İyileştirme sonrası
Gövde	5	2
Boyun	3	2
Bacaklar	2	1
Tablo A	8	3
Yük/kuvvet puanı	0	0
<b>A Puanı</b>	<b>8</b>	<b>3</b>
Üst kol	4	2
Alt kol	2	1
Bilek	2	2
Tablo B	5	2
Kavrama puanı	0	0
<b>B Puanı</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>C Puanı</b>	<b>8</b>	<b>2</b>
Aktivite puanı	1	1
REBA puanı	<b>9</b>	<b>3</b>

İyileştirme öncesi elde edilen REBA puanı 9 olması nedeniyle risk seviyesinin yüksek olduğu ve yakın zamanda önlem alınması gerekliliği tespit edilmiştir. Bu kapsamda işletmeye gerekli iyileştirme önerileri sağlanmıştır. Bu kapsamda, firmada çalışan iki reyon görevlisinin boyları reyona kıyasla yeterli yükseklikte olmaması nedeniyle zemine 10 cm yüksekliğinde ahşap palet yerleştirilmiştir. Yapılan ikinci bir iyileştirme önerisi de mevcut tezgâhın derinliği 90 cm'den kesilerek 80 cm 'e düşürülmüştür (Şekil 6). Bu şekilde çalışanın reyona ulaşımı kolaylaştırılmıştır. Ancak yapılan bu iyileştirme ile mevcut risk tamamıyla ortadan kaldırılamamıştır. Tezgâhın mevcut derinliği, çalışanın en öndeki ürünlere ulaşması için engel oluşturmaya devam etmektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen iyileştirme işlemine ek olarak ilave iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, firma çalışanlarına ilk giren son çıkar prensibi anlatılmış, reyonun en önündeki ürünlerin en az kullanılan ürünlerden oluşması gerektiği ayrıca bu alana koyulan ürünlerin firmaya en son gelen ürünlerden oluşması gerekliliği aktarılmıştır. Böylece bu alandaki ürünlerin kullanım sıklığı azaltılmış, sadece sabah reyona ürünler dizilmiş ve akşam reyondan kaldırılmak için toplama işlemi gerçekleştirilmiştir ve çalışanın bu alandaki hareket sıklığı azaltılmıştır. Ayrıca ilave bir iyileştirme olarak, uzunluğu fazla olan etlerin reyona dikine yerleştirilmesi gerekliliği işletme ile paylaşılmıştır (Şekil 7). Önerilen bu iyileştirme ile uzunluğu fazla olan etlerin reyon başındaki ucundan ulaşılacak şekilde reyona yerleştirilmesi çalışanın eğilme açısını azaltmıştır. Son bir iyileştirme olarak reyonun en alt (en uzak) alanındaki ulaşımı zor olan etlerin yüksekliğinin artırılması amacıyla, etlerin altına kıyma sarma aparatları yerleştirilmiş ve çalışan bu bölgeye uzandığında etlerin daha yüksekte durması nedeniyle ulaşımı kolaylaştırılmıştır ve çalışanın eğilme açısı azaltılmıştır (Şekil 8). Önerilen bu iyileştirmeler sayesinde reyonunun en uzak noktasından alınan ürünler için gün içerisinde gerçekleştirilen işlemin sıklığı 2'ye düşürülmüştür. Ürünlere daha kolay ulaşım sağlamak için reyonda görevli personelin yerden yüksekliği artırılmış ve önündeki tezgâhın derinliği azaltılarak reyona ulaşım kolaylaştırılmıştır. Ayrıca çalışanın reyonun en uzak noktasındaki ürünlere ulaşımında kolaylık sağlanması için bu alandaki ürünlerin yüksekliği 7 cm artırılmıştır.

Gerçekleştirilen bu iyileştirmeler sonucunda çalışanın REBA puanı 3 hesaplanarak risk seviyesi “düşük” önem seviyesine düşürülmüştür.



Şekil 5. Ahşap palet zemin.



Şekil 6. Kesilen tezgâh.



Şekil 7. Ürünlerin dikine yerleştirilmesi.



Şekil 8. Ürünlerin yüksekliğinin artırılması.

## 5. Sonuç

Ergonomi biliminin temel prensiplerinden bir tanesi makro bakış açısı ile mikro analizle yaparak, yine mikro iyileştirmeler ile makro faydalar elde etmektir. Bu çalışma kapsamında et ve tavuk ürünleri perakende sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede çalışma ortamı öncelikle geniş bir bakış açısıyla incelenmiş ve mikro seviyede iyileştirmeler ve öneriler ile makro fayda sağlayacak alanlar tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz sonucunda ürünlerin kasalardan alınarak iş istasyonundaki çalışanların NIOSH kaldırma denklemi yöntemine göre kaldırma işlemleri değerlendirilmiş ve kaldırma indeksinin 1,77 çıkması sonucunda işin tehlikeli ve ergonomik olarak iyileştirme yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle hem ürünlerin kaldırıldığı alanda hem de kaldırma ağırlığında iyileştirme önerilerek, bu iyileştirmelerin uygulanması sonucunda kaldırma indeksinin 0,90 değerine düşerek işin güvenli olarak tanımlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. İşletmeye gerekli sonuç önerisi rapor olarak sunulmuştur.

İkinci bir analiz ise çalışanların reyon kısmındaki çalışma duruşu ile ilgili gerçekleştirilmiştir. Reyon kısmında çalışanların siparişi reyondan alırken ki duruşları

REBA yöntemine göre incelenmiş ve REBA puanı 9 olarak bulunmuştur. Bu kapsamda, işletmeye gerekli iyileştirmeler önerilmiş ve işletme tarafından bu iyileştirmeler uygulanmıştır. Bu kapsamda, zemin yüksekliği 10 cm daha artırılmış ve reyon tezgahının derinliği 10 cm kısaltılmıştır. Ayrıca reyonun en alt kısmında soğuk hava deposuna en önce gelen etler, yani satışı en son yapılacak ürünlerin yerleştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca uzunlamasına olan ürünlerin reyona dikine yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiş, en öndeki ürünlere ulaşma zorunluluğu olması durumu da göz önüne alınarak bu bölgedeki ürünlerin yüksekliği artırılması amacıyla, ürünlerin altına kıyma sarma paketi koyularak erişim kolaylığı sağlanmıştır. Gerçekleştirilen bu iyileştirme sonucunda REBA risk puanı 3 olarak hesaplanmış ve işin risk seviyesi “düşük” olarak belirlenmiştir.

Türkiye’de perakende sektöründe faaliyet gösteren birçok işletme bulunmaktadır. İleriki dönemde bu sektörde faaliyet gösteren işletmelerde gerçekleştirilecek çalışmalarda bu makalede kullanılan yöntemler ve analizlerden faydalanabileceği değerlendirilmektedir.

### Kaynaklar

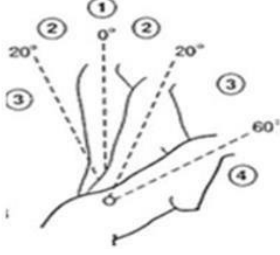
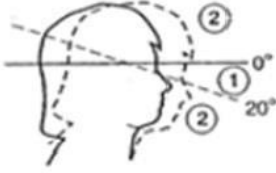
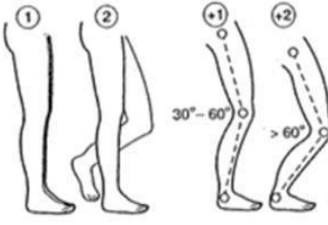
- [1] <https://iea.cc/what-is-ergonomics/>, (20.03.2020).
- [2] Erkan, N., Ergonomi, **Milli Produktivite Merkezi Yayınları**, Ankara, (2003).
- [3] Akay, D., Dağdeviren M. ve Kurt, M., Çalışma Duruşlarının Ergonomik Analizi, **Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 18, 3, 73-84, (2003).
- [4] Atasoy Mert, E., Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir çanta imalat atölyesinde uygulanması, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, T.C. ÇALIŞMA ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara, (2014)
- [5] Monnington S., Quarrie C., Pinder A., ve Morris L., **Development of Manual Handling Assessment Charts (MAC) for health and safety inspectors**. In: McCabe T, ed. Contemporary Ergonomics, Taylor and Francis, 3–8, London, (2003).
- [6] Klussmann A., Steinberg U., Liebers F., Gebhardt H., Rieger MA., The key indicator method for manual handling operations (KIM-MHO) - evaluation of a new method for the assessment of working conditions within a cross-sectional study, **BMC Musculoskeletal Disord**, 25,11, 272, (2010).
- [7] [https://emploi.belgique.be/sites/de\\_fault/files/content/publications](https://emploi.belgique.be/sites/de_fault/files/content/publications), (20.03.2020).
- [8] Ferreira, J., M. Gray, L. Hunter, M. Birtles and D. Riley, **Development of an assessment tool for repetitive tasks of the upper limbs (ART)**, HSE Research Report RR707, Sudbury: HSE Books (2009).
- [9] Graves, R.J., Way, K., Riley,D., Lawton, C.,ve Morris,L., Development of risk filter and risk assessment worksheets for HSE guidance-Upper Limb Disorders in the Workplace 2002, **Applied Ergonomics**, 35, 5, 475-484, (2004).
- [10] Kemmlert, K., A method assigned for the identification of ergonomics hazards: PLIBEL’, **Applied Ergonomics**, 26, 3, 199-211, (1995).
- [11] Keyserling, W. M., Stetson, D. S., Silverstein, B. A. ve Brouwer, M. L., A checklist for evaluating ergonomic risk factors associated with upper extremity cumulative trauma disorders, **Ergonomics**, 36, 807-831, (1993).

- [12] Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A. ve Fine, L. J., Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks, **Ergonomics**, 36, 3, 749-776, (1993).
- [13] Snook, S. H. ve Ciriello, V. M., The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces, **Ergonomics**, 34, 9, 1197-1213, (1991).
- [14] Moore J. S ve Garg, A., The strain index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders, **American Industrial Hygiene Association Journal**, 56, 5, 443-458, (1995).
- [15] Louhevaara V. ve Suurnäkki, T., **OWAS: A method for the evaluation of postural load during work**, Institute of Occupational Health. Centre for Occupational Safety, Helsinki, (1992).
- [16] McAtamney L. ve Corlett, E. N., RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, **Applied Ergonomics**, 24, 2, 91-99, (1993).
- [17] Colombini, D. ve Grieco, A., An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs, **Ergonomics**, 41, 9, 1261-1289, (1998).
- [18] Occhipinti, E. ve Colombini, D., **The occupational repetitive action (OCRA) methods: OCRA index and OCRA checklist**, in N. Stanton, A. Hedge, K. Brookhuis, E. Salas and H. Hendrick (eds.) *Handbook of human factors and ergonomics methods*, CRC Press, 15:1-14, Boca Raton, (2005).
- [19] <https://emploi.belgique.be/fr/publications/troubles-musculosquelettiques-serie-strategie-sobane>, (20.03.2020)
- [20] McAtamney, L. ve Hignett, S., REBA: A rapid entire body assessment method for investigating work related musculoskeletal disorders, **Proceedings, Ergonomics Society of Australia, Adelaide Conference**, 45-51, Glenelg, (1995).
- [21] Li G. ve Buckle P., Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks with emphasis on posture-based methods, **Ergonomics**, 42, 5, 674-695, (1999).
- [22] Kee, D. ve Karwowski, W., LUBA: an assessment technique for postural loading on the upper body based on joint motion discomfort and maximum holding time, **Applied Ergonomics**, 32, 357-366, (2001).
- [23] Yavuzkan, G., Kaya, K., Yağız, M., Erdem, M., ve Acar, I., Ergonomi risk analizleri yazılımlaştırılması ergonomi-iş sağlığı güvenliği risk haritalandırılması, **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 3(3), 603-614, (2015).
- [24] Okan, S. Ü. ve Kaya, A., Orman fidanlıklarında fidan replikaj işlerinde çalışma duruşlarının REBA yöntemi ile analizi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 3, 157-163, (2015).
- [25] Mork, M. A. ve Choi, S. D., An ergonomic assessment of sample preparation job tasks in a chemical laboratory, **Journal of Chemical Health and Safety**, 22, 4, 23-32, (2015).
- [26] <https://home.kpmg/tr/tr/home/gorusler/2020/01/sektorel-bakis-2020-perakende.html>, (18.12.2020)
- [27] Sevene, T.G., Harris, J.B.C., Climstein, M., Adams, K.J., ve DeBeliso, M., Hand grip strength and gender: allometric normalization in older adults and implications for the NIOSH lifting equation, **Journal of Lifestyle Medicine**, 7, 2, 63-68, (2017)
- [28] Meepradit, P., Sunee, N. ve Chantrasa, R., The application of NIOSH lifting equation to prevent musculoskeletal disorder risks, **Journal of Biosciences and Medicines**, 3, 39-44, (2015).

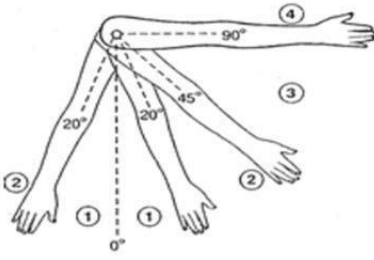
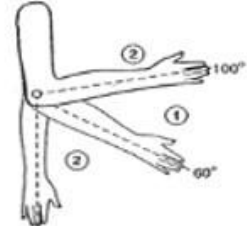
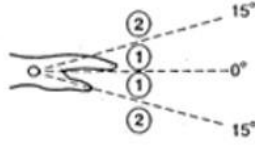
- [29] Ranavolo, A., Varrecchia, T., Rinaldi, M., Silvetti, A., Serrao, M., Conforto, S. ve Draicchio, F., Mechanical lifting energy consumption in work activities designed by means of the revised NIOSH lifting equation, **Industrial Health**, 55, 5, 444-454, (2017).
- [30] Duran F.M. ve Yeşilova T., An ergonomic improvement at a manually loading station, **Journal of Engineering Sciences and Design**, 3, 3, 507-510, (2015).
- [31] Coşkun M., Sağiroğlu H. ve Erginel N., İş istasyonlarının ergonomik riskinin NIOSH yöntem ile belirlenmesi, **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 3, 3, 365-370, (2015).
- [32] Atıcı H., Gönen D. ve Oral A., Ergonomic analysis of postures causing strain on employees with REBA method, **Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 3, 3, 239-244, (2015).
- [33] Bartnicka, J., Knowledge-based ergonomic assessment of working conditions in surgical ward - A case study, **Safety Science**, 71, 178-188, (2015).
- [34] Son, J.W., Evaluation of 119 emergency medical technicians' work related musculoskeletal disorders risk with regard to patient lifting procedures, **The Korean Journal of Emergency Medical Services**, 23, 1, 101-112, (2019).
- [35] Sakthi Nagaraj, T., Jeyapaul, R., Mathiyazhagan, K., Evaluation of ergonomic working conditions among standing sewing machine operators in Sri Lanka, **International Journal of Industrial Ergonomics**, 70, 70-83, (2019).
- [36] Kong, Y.-K., Lee, S.Y., Lee, K.S. ve Kim, D.M., Comparisons of ergonomic evaluation tools (ALLA, RULA, REBA and OWAS) for farm work, **International Journal Occupational Safety Ergonomics**, 24, 2, 218-223, (2017).
- [37] Kulkarni, V. ve Devalkar, R., Postural analysis of building construction workers using ergonomics, **International Journal of Construction Management**, 19, 6, 1-8, (2018).
- [38] Cremasco, M.M., Giustetto, A., Caffaro, F., Colantino, A., Cavallo, E. ve Grigolato, S., Risk assessment for musculoskeletal disorders in forestry: a comparison between RULA and REBA in the manual feeding of a Wood-chipper, **International Journal Environment and Public Health**, 16, 793-809, (2019).
- [39] Ensari Özay, M. ve Doğanbatır, Ç. Ş. Perakende Sektöründe bir Süpermarkette REBA, NIOSH ve Snook Tabloları Yöntemlerini Kullanarak Ergonomik Risk Analizi Vaka Çalışması, **Journal of Engineering Sciences and Design**, 6, 3, 448-459, (2018).
- [40] Deryaoğlu, P., Atıcı Ulusu, H., ve Gündüz, T. Et taşıma sürecinde karşılaşılan kas iskelet sistemi rahatsızlığı risklerinin incelenmesi, **Pamukkale University Journal of Engineering Sciences**, 25, 4, (2019).
- [41] Ghasemi, F., Gholamizadeh, K., Doosti-Irani, A., & Ramin, R. Comparison of Strain Index (SI) and ACGIH-HAL in Assessing the Risk of Upper Extremities Disorders and Prediction of Carpal Tunnel Syndrome in Butchers, **Iranian Journal of Ergonomics**, 6, 4, 1-8, (2019).
- [42] Sağiroğlu, H., Coşkun, M.B., Erginel, N., İş istasyonlarının ergonomik riskinin NIOSH yöntemi ile belirlenmesi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi**, 3, 3, 365-370, (2015)
- [43] Hignett, S., McAtamney, L., Rapid Entire Body Assessment (REBA), **Applied Ergonomics**, 31, 201-205, (2000).



A grubuna ait puanlama [43].

Gövde				
	Hareket	Puan	Puan değişimi	
	Dik Duruş	1		Eğer bükme ya da yana doğru dönme hareketi de varsa puana +1 ekle
	0°-20° fleksiyon 0°-20° ekstansiyon	2		
	20°-60° fleksiyon >20° ekstansiyon	3		
	>60° fleksiyon	4		
Boyun				
	0°-20° fleksiyon	1	Eğer bükme ya da yana doğru dönme hareketi de varsa puana +1 ekle	
	>20° fleksiyon veya ekstansiyon	2		
Bacak				
	Ağırlık iki bacak üstünde, yürüme ya da oturma durumunda	1	Eğer dizlerde 30°-60° arası fleksiyon varsa puana +1. Eğer >60° fleksiyon varsa puana +2 ekle ( ayakta durma durumunda)	
	Ağırlık tek bacak üstünde, dengesiz durumda	2		

## B grubuna ait puanlama [43].

Üst kollar			
Hareket	Puan	Puan değişimi	
	0°-20° fleksiyon 0°-20° ekstansiyon	1	Eğer kol dönmüş veya dışarı çekilmişse +1
	>20° ekstansiyon 20°-45° fleksiyon	2	
	45°-90° fleksiyon	3	Omuz yükseltilmiş durumunda ise +1  Eğer hareket yer çekimi desteği ile yapılıyorsa -1
Alt kollar			
	60°-100° fleksiyon	1	İlave yok
	<60° fleksiyon >100° fleksiyon	2	
Bilekler			
	0°-15° fleksiyon 0°-15° ekstansiyon	1	Bilek dönmüş durumda +1
	>15° fleksiyon veya ekstansiyon	2	

A grubu puan tablosu [43].

		Boyun											
		1				2				3			
		Bacaklar				Bacaklar				Bacaklar			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Gövde	1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Kuvvet/ yük puan tablosu [43]

Yük/Kuvvet	Puan	Puan değişimi
< 5 kg.	0	Ani veya hızlı kuvvet artışı +1
5-10 kg.	1	
< 10 kg.	2	

B grubu puan tablosu [43]

		Alt kol					
		1			2		
		Bilekler			Bilekler		
		1	2	3	1	2	3
Üst Kol	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	6
	4	4	5	5	4	5	5
	5	6	7	8	7	8	8
	6	6	7	8	8	9	9

Kavrama puanı tablosu [43].

Derece	Açıklama	Puan
İyi	İyi bir tutma kolu ve orta şiddette kavrama gücü	0
Uygun	El tutuşu uygun fakat ideal değil veya vücudun başka bir bölgesi ile kavrama uygun	1
Kötü	El tutuşu uygun olmamasına rağmen mümkün	2
Uygun Değil	Zor ve güvenli olmayan tutuş, tutma kolu yok. Vücudun başka bir bölgesi kullanılarak kavrama mümkün değil	3

C grubu puan tablosu [43].

		A Puanı											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
B Puanı	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
	2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
	3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
	4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
	5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Aktivite puan tablosu [43].

Aktivite	Puan
Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (örn: 1 dk'dan uzun süre tutma)	+1
Kısa aralıklarla tekrar eden işler (örn: 1 dk'da 4'ten fazla tekrar eden iş, yürüme hariç) Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışıyorsa	

# Düşük hızlı ve küçük güçlü rüzgar türbinleri için kalıcı mıknatıslı senkron generatör tasarımı

Oktay KARAKAYA<sup>1,2,\*</sup>, Batın DEMİRCAN<sup>2</sup>, Murat Erhan BALCI<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Bigadiç, Balıkesir

<sup>2</sup>İŞBİR Elektrik San. A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Bölümü, Altıeylül, Balıkesir

<sup>3</sup>Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 08.07.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.02.2021

## Öz

Bu makalede, küçük güçlü düşük hızlı rüzgar türbinleri için radyal akılı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin (KMSG'lerin) tasarımı ile Ansys Maxwell yazılım ortamında modellenmesi ve performans analizi üzerine örnek bir çalışma sunulmuştur. Bu örnek çalışmada, öncelikle analitik ifadeler kullanılarak; hedeflenen anma değerlerine sahip bir KMSG tasarımı yapılmıştır. Devamında, Ansys Maxwell yazılım ortamında iki boyutlu modelleme yaklaşımıyla, tasarımın, yüklenme oranı değişimine bağlı olarak gerilim etkin değeri, gerilim toplam harmonik bozulma değeri, akım etkin değeri ve verim performans parametrelerinin değişimi, ayrıca milin dönme hızının değişimine bağlı olarak bu dört performans parametresinin yanı sıra üretilen azami aktif güç değerinin değişimi analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kalıcı mıknatıslı senkron generatör, rüzgar türbini, tasarım, SEY analizi.

## Design of permanent magnet synchronous generator for low speed and small power wind turbines

### Abstract

In this paper, an exemplary study on the design of radial flux permanent magnet synchronous generators (PMSGs) for small power-low speed wind turbines and its

\*Oktay KARAKAYA, karakaya@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-3871-1724>

Batın DEMİRCAN, batindemircan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0765-458X>

Murat Erhan BALCI, mbalci@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8418-8917>

*modelling and performance analysis in Ansys Maxwell software is presented. In this exemplary study, firstly, the design is obtained by using analytical expressions. Subsequently, the two-dimensional model of the design is provided in Ansys Maxwell software. Thus, the variation of the voltage effective value, voltage total harmonic distortion value, current effective value and efficiency parameters of the same design depending on the loading ratio, and the variation of these four parameters and maximum output active power depending on the speed are evaluated.*

**Keywords:** Permanent magnet synchronous generator, wind turbine, design, FEM analysis.

## 1. Giriş

Günümüzde, yenilenebilir enerji temelli elektrik üretim birimleri, şebeke besleme noktasına uzak tüketicilerin elektrik ihtiyacının çevreci ve maliyet verimli bir şekilde karşılanması bakımından önemli bir seçenek haline gelmiştir [1-3]. Bununla birlikte, şebeke bağlantı noktasından uzak yerlerdeki küçük tüketicilerin beslenmesi amacıyla kurulan yenilenebilir enerji üretim birimleri; genellikle rüzgar türbinleri, fotovoltaik enerji üretim birimleri ve küçük su türbinleri olarak planlanmaktadır [4-7]. Ayrıca, bu yenilenebilir enerji temelli üretim birimlerinin, yine aynı amaçla; melez [8, 9] ve dizel generatör destekli [10, 11] kullanımına ilişkin sistemler literatürde çalışılmıştır.

Rüzgar türbini topolojileri, sabit hızlı, sınırlı değişken hızlı ve değişken hızlı olmak üzere üç ana sınıfa ayrılabilir [12-14]. Değişken hızlı rüzgar türbinleri, generatör milinin türbine bağlantı tipine göre; çok kademeli dişli kutulu, tek kademeli dişli kutulu ve dişli kutusuz (doğrudan sürüşlü) olmak üzere üç alt sınıfa sahiptir [12, 13]. Ayrıca, değişken hızlı rüzgar türbinleri, sahip oldukları güç dönüştürücünün boyutuna göre kısmi ve tam boyutlandırılmış güç dönüştürücülü rüzgar türbinleri olarak literatürde anılmaktadır [14].

Rüzgar türbinlerinde (RT) yaygın olarak kullanılan generatör tipleri: (i) sabit hızlı RT'ler için sincap kafesli asenkron generatör (SKAG), (ii) sınırlı değişken hızlı RT'ler için bilezikli asenkron generatör (BAG), (iii) çok kademeli dişli kutulu değişken hızlı RT'ler için SKAG, çift beslemeli asenkron generatör (ÇBAG), geleneksel elektriksel uyartımlı senkron generatör (ESG) ve kalıcı mıknatıslı senkron generatör (KMSG), (iv) tek kademeli dişli kutulu değişken hızlı RT'ler için ÇBAG ve KMSG ile (v) doğrudan sürüşlü değişken hızlı RT'ler için ESG ve KMSG'dir. Sınırlı değişken hızlı RT'lerde; BAG'ların rotor sargı uçlarına bağlı güç elektroniği devresiyle rotor direnç ayarı yapılarak senkron hızın azami  $\pm\%10$ 'u kadar değişim aralığında hız ayarlanabilirken, ÇBAG bulunan değişken hızlı RT'lerde; generatörün rotor sargı uçlarıyla şebeke arasına bağlı kısmi (türbin gücünün  $\%30$ 'u kadar anma güçte) boyutlandırılmış güç dönüştürücü devresiyle senkron hızın  $\pm\%30$ 'u kadar aralıkta hız ayarı yapılabilir. SKAG, ESG ve KMSG bulunan değişken hızlı RT'lerde ise; generatörün terminalleri ile şebeke arasına bağlı tam boyutlandırılmış güç dönüştürücüyle tam hız ayarı gerçekleştirilebilir [12, 13].

Doğrudan sürüşlü değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan ESG ve KMSG arasında yapılan karşılaştırmadan, aynı güç değeri için KMSG'nin daha hafif, daha küçük hacimde, daha düşük maliyetli ve daha yüksek enerji verimliliğine sahip olduğu ifade edilebilir. Tek kademeli dişli kutulu değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan ÇBAG ve KMSG arasında yapılan karşılaştırma ise; aynı güç değeri için yine KMSG'nin daha

hafif, daha küçük hacimli ve daha yüksek enerji verimliliğine sahip seçenek olmakla birlikte maliyetinin de daha yüksek olduğunu göstermektedir [12].

Bütün bu avantajlar neticesinde, KMSG'ler, literatürde yapılan çalışmalarda, küçük güçlü tüketiciler ve mikro şebekelerin ihtiyacını karşılamak için tasarlanan düşük hızlı doğrudan sürürlü rüzgar türbinlerinde yaygın olarak tercih edilmiştir [15-19].

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makineler (KMSM'ler) üretilen akının doğrultusuna göre radyal, aksel ve çapraz akılı olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Bununla birlikte, diğer iki tipe göre daha basit yapıda, daha güvenilir ve üretimleri daha pratik olması sebebiyle radyal akılı KMSM'ler, gerek motor gerekse generatör olarak daha fazla tercih edilmektedir [20-22]. Ayrıca, KMSM'lerin, mıknatısın rotor yüzeyindeki konumuna göre yüzeye montajlı ve rotor içine yerleştirilmiş mıknatıslı tipleri [22], rotorun statorun içinde veya dışında konumlandırılması bakımından iç rotorlu ve dış rotorlu tipleri [23] mevcuttur.

Elektrik makine tasarımındaki genel durumda olduğu gibi KMSG tasarımı için de hassasiyeti sebebiyle, literatürde en önde gelen tasarım aracı, sonlu elemanlar yöntemi veya sonlu elemanlar yöntemi temelli çözüm yapan paket yazılımlardır. Ancak, aşırı hesap yüküne sahip olması ve dolayısıyla uzun analiz süreleri gerektirmesi, sonlu elemanlar yönteminin (SEY) önemli bir dezavantajıdır [24, 25]. Bu dezavantaj sebebiyle, literatürdeki çalışmalarda, genellikle, tasarımın tümüyle SEY temelli analizlerle gerçekleştirilmesinden kaçınılmıştır. Manyetik eşdeğer devre [26, 27] veya kapalı form analitik ifadelerle [25, 28, 29] tasarımların ön boyutlandırılmaları yapılmış, devamında ise; bu boyutlandırılmaların teyit edilmesi ve iyileştirilmesi SEY analizleriyle gerçekleştirilmiştir.

Bu makalede, düşük hızlı ve küçük güçlü rüzgar türbinleri için radyal akılı KMSG tasarımı ve Ansys Maxwell yazılım ortamında tasarımın doğrulanması ile performans analizi üzerine örnek bir çalışma sunulmuştur. Bu örnek çalışmada, öncelikle analitik ifadeler kullanılarak; hedeflenen anma değerlerine sahip bir KMSG tasarımı yapılmıştır. Devamında, bu tasarımın iki boyutlu modeli Ansys Maxwell [30] yazılımında oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak, tasarımın; yüklenme oranı değişimine bağlı olarak gerilim etkin değeri, gerilim toplam harmonik bozulma değeri, akım etkin değeri ile verim performans parametrelerinin değişimi, ayrıca hız değişimine bağlı olarak bir önceki analizde dikkate alınan dört performans parametresinin yanı sıra üretilen azami aktif güç değerinin değişimi analiz edilmiştir.

## 2. Tasarım ve modelleme

Bu kısımda, tasarımın elde edilmesinde kullanılan analitik ifadeler sunulmuş ve tasarımın Ansys Maxwell yazılım ortamında oluşturulan 2 boyutlu modeli tanıtılmıştır. Çalışma kapsamında anma (plaka) değerleri; 5 kW, 200 devir/dakika (dev./dak.), 400 V ve  $\eta = 91\%$  olan bir KMSG'nin tasarımı hedeflenmiştir.

### 2.1. Analitik ifadelerle tasarımın elde edilmesi

KMSG'nin tasarımında, literatürde yaygın olarak bilinen analitik ifadelerle dayalı boyutlandırma yöntemlerinden biri olan ve kaynak [31]'de sunulan yöntem dikkate alınmıştır. Bu yöntemle göre sırasıyla; (i) rotor boyutları ve stator-rotor arası hava aralığı,

(ii) stator sargılarına ilişkin parametreler, (iii) stator oyuğunun boyutları ile (iv) stator/rotor boyunduruk genişliği, mıknatısın boyutları ve stator boyutları hesaplanır.

Bu sıralamaya göre; ilk olarak rotor boyutları ve stator-rotor arası hava aralığının belirlenmesi safhasında;

- Hedeflenen generatör tasarımının nominal güç değeri ( $P$ ), verim ( $\eta$ ) ve saniye başına ölçülen nominal devir ( $n$ ) parametreleri dikkate alınarak, generatör şaftına uygulanacak nominal tork değeri ( $T$ );

$$T = \frac{P/\eta}{2.\pi.n} \quad (1)$$

- Tasarımda izin verilen teğetsel gerilme değeri ( $\sigma_{Ftan}$ ) ve  $T$  parametrelerine göre, rotorun hacmi ( $V_r$ );

$$V_r = \frac{T}{2.\sigma_{Ftan}} \quad (2)$$

- Nominal frekans ( $f$ ) ve  $n$  cinsinden, kutup çifti sayısı ( $p$ );

$$p = \frac{f}{n} \quad (3)$$

- $p$ 'ye bağlı olarak  $\chi$  boyutsal oranı;

$$\chi = \frac{\pi.\sqrt{p}}{4.p} \quad (4)$$

- $\chi$  ve  $V_r$ 'ye bağlı olarak rotor çapı ( $D_r$ );

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4.V_r}{\pi.\chi}} \quad (5)$$

- $\chi$  ve  $D_r$  cinsinden çekirdeğin eşdeğer uzunluğu ( $l'$ );

$$l' = \chi.D_r \quad (6)$$

- $p$ 'nin bir fonksiyonu olan stator ile rotor arasındaki hava aralığının uzunluğu ( $\delta$ );

$$\delta = \frac{0,18+0,006.P^{0,4}}{1000} \quad (7)$$

- $D_r$  ve  $\delta$  cinsinden, stator iç çapı ( $D_s$ );

$$D_s = D_r + 2.\delta \quad (8)$$

- $l$  ve  $\delta$  değerlerinden, rotor nüvesinin net uzunluğu ( $l$ );

$$l = l' - 2.\delta \quad (9)$$

hesaplanır.



İkinci tasarım adımı olarak, stator sargılarına ilişkin parametrelerin belirlenmesi safhasında;

- Generatör faz sayısı ( $m$ ) ile seçilen kutup- faz başına oyuk sayısı ( $q \geq 1$ ) dikkate alınarak, stator oyuk sayısı ( $Q$ );

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot m \cdot q \quad (10)$$

- $D_s$  ve  $Q$  parametrelerine göre, stator oyuk adımı ( $\tau_u$ ) ve stator kutup adımı ( $\tau_p$ );

$$\tau_u = \pi \frac{D_s}{Q} \quad (11)$$

$$\tau_p = \pi \frac{D_s}{2 \cdot p} \quad (12)$$

- Tipik olarak 0.8 ile 1.05 Tesla aralığında seçilen, hava boşluğundaki temel frekans akı yoğunluğunun tepe değeri ( $B_{1peak}$ ) ve mıknatısların rotor yüzeyinde kapladığı alanın rotor yüzey alanına oranı ( $\alpha_{PM}$ ) cinsinden, mıknatıslar tarafından üretilen akı yoğunluğunun maksimum değeri ( $B_{max}$ );

$$B_{max} = \frac{\pi \cdot B_{1peak}}{4 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \alpha_{PM}}{2}\right)} \quad (13)$$

- $m$ ,  $Q$ ,  $p$  ve sarım adımına ( $w_{\tau p}$ ) bağlı olarak, sargı faktörü ( $k_w$ );

$$k_w = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot w_{\tau p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{m \cdot z}\right)}{\frac{Q}{m \cdot p} \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q}\right)} \quad (14)$$

- $B_{max}$ ,  $\tau_p$ ,  $l'$ ,  $\alpha_{PM}$ , makinanın nominal açısal hızı ( $\omega$ ), stator faz sargı uçlarında boşta çalışma şartlarında indüklenmesi istenen gerilim değeri ( $E_{PM}$ ) ve sargı faktörü ( $k_w$ ) parametrelerine bağlı olarak, faz başına sarım sayısı ( $N$ );

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{PM}}{\omega \cdot B_{max} \cdot k_w \cdot l' \cdot \tau_p \cdot \alpha_{PM}} \quad (15)$$

- $N$ ,  $m$ ,  $Q$  ve sarımdaki paralel kol sayısına ( $a$ ) göre oyuk başına sarım sayısı ( $z_Q$ );

$$z_Q = 2 \cdot a \cdot m \frac{N}{Q} \quad (16)$$

hesaplanır.

Bu tasarım safhasının sonunda, iki katmanlı sarımlarda oyuktaki iletken sayısının çift sayı olması gerekliliğine dikkat edilmelidir. Buna göre, revize edilmiş iletken sayısına ( $z_{Qs}$ ) göre  $B_{max}$  Denklem (17) ile yeniden hesaplanmalıdır:

$$B_{max} = \frac{z_Q}{z_{Qs}} B_{max} \quad (17)$$

Üçüncü tasarım adımı olarak, stator oyuklarının boyutlandırılması safhasında;

- Tipik olarak 1.6 ile 2 Tesla arasında seçilen statordaki dış akı yoğunluğu ( $B_{dapp}$ ), nüve paketleme faktörü ( $k_{Fe}$ ) ve daha önceki adımlarda belirlenen diğer tasarım parametreleri ( $\tau_u$ ,  $l'$ ,  $l$ ,  $B_{max}$ ) cinsinden, stator dış genişliği ( $b_d$ );

$$b_d = \frac{l' \cdot \tau_u \cdot B_{max}}{k_{Fe} \cdot l \cdot B_{dapp}} \quad (18)$$

- $m$ ,  $P$ , generatörün hedeflenen güç faktörü ( $\cos\varphi$ ) ve faz-nötr anma gerilimi ( $U_{sph}$ ) değerlerine göre, anma akımı ( $I_s$ );

$$I_s = \frac{P}{m \cdot U_{sph} \cdot \cos\varphi} \quad (19)$$

- Tipik olarak 4 ile 8 A / mm<sup>2</sup> arasında seçilen sargı iletkeni akım yoğunluğu ( $J_s$ ),  $I_s$  ve  $a'$  ya bağlı olarak, bir iletkenin oyukta kapladığı alan ( $S_{cs}$ ) ve çapı ( $D_{cs}$ );

$$S_{cs} = \frac{I_s}{a \cdot J_s} \quad (20)$$

$$D_{cs} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cs}}{\pi}} \quad (21)$$

- $z_Q$ ,  $S_{cs}$  ve stator yuvasına ait doldurma faktörü ( $k_{cus}$ ) parametrelerinden, oyuktaki iletkenlerin kapladığı toplam alan ( $S_{cus}$ );

$$S_{cus} = \frac{z_Q \cdot S_{cs}}{k_{cus}} \quad (22)$$

- Şekil 1'de verilen oyuk yapısı için, tasarımcı tarafından seçilen; oyuk açıklığı ( $b_1$ ), oyuk izolasyon malzemesinin kalınlığı ( $h_3$ ,  $h_6$ ), oyuk kama kalınlığı ( $h_2$ ) sargı katmanları arasındaki yalıtkanın kalınlığı ( $h$ ), oyuk ağzı dış kalınlığı ( $h_1$ ) ve oyuk yapı yüksekliği ( $h_5$ ) parametreleri yanı sıra  $b_d$ ,  $Q$  ve  $D_s$  parametrelerine bağlı olarak,  $b_4$ ,  $b_{4c}$ ,  $b_{5c}$  ve  $b_5$  boyutları;

$$b_4 = \frac{\pi[D_s + 2(h_1 + h_2)]}{Q} - b_d \quad (23)$$

$$b_{4c} = b_4 + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_3}{Q} - 2h_6 \quad (24)$$

$$b_{5c} = b_{4c} + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_5}{Q} \quad (25)$$

$$b_5 = b_{5c} + 2 \cdot h_6 \quad (26)$$

hesaplanır.

Stator oyuk boyutlandırma adımı, Denklem (22) ve (27)'den hesaplanan  $S_{cus}$  değerleri eşit olana kadar  $h_5$  parametresi güncellenir;

$$S_{cus} = \left( \frac{b_{4c} + b_{5c}}{2} \right) h_5 + \frac{\pi}{8} b_{5c}^2 \quad (27)$$

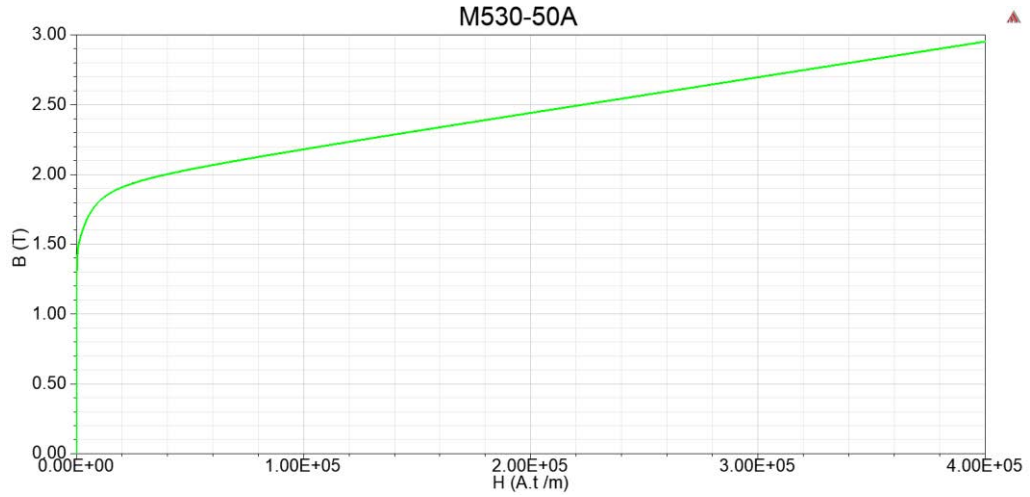


- $B_{max}$ ,  $\delta_e$  ve havanın manyetik geçirgenliği ( $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m$ ) değerlerinden, hava boşluğunun manyetik gerilimi ( $U_{m\delta e}$ );

$$U_{m\delta e} = \frac{B_{max}}{\mu_0} \delta_e \quad (34)$$

- Nüve malzemesinin B-H eğrisinde (Şekil 2) maksimum akı yoğunluğuna karşılık gelen manyetik alan şiddeti ( $H_d$ ),  $h_3$  ve  $h_5$  parametreleri cinsinden, stator dışındaki manyetik gerilimi ( $U_{mds}$ );

$$U_{mds} = H_d(h_3 + h_5) \quad (35)$$



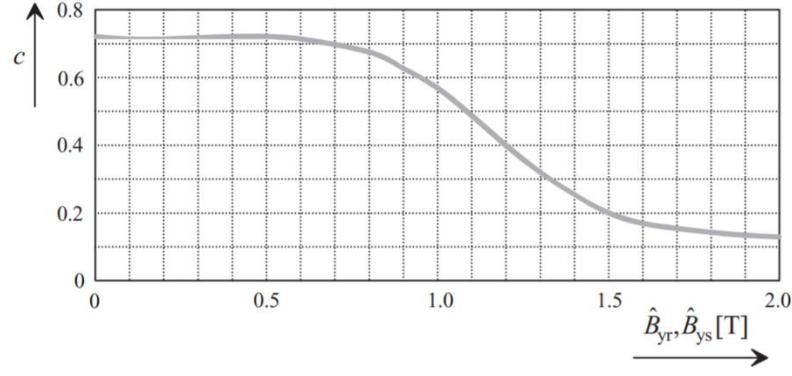
Şekil 2. Stator ve rotor sac malzemesinin BH eğrisi

- Ortalama stator boyunduruk çapı ( $D_{ys}$ );

$$D_{ys} = D_s + 2(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_6) + h_{ys} \quad (36)$$

- $D_{ys}$ ,  $p$ , çekirdek malzemesinin B-H eğrisinden stator boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna (1.5 ile 1.7 T) karşılık gelen manyetik alan şiddeti değeri ( $H_{ymaxs}$ ) ve Şekil 3'de verilen  $c$ - $B_y$  eğrisinden stator boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna karşılık gelen katsayıya ( $c_s$ ) bağlı olarak, stator boyunduruğundaki manyetik gerilim ( $U_{mys}$ );

$$U_{mys} = c_s \cdot H_{ymaxs} \frac{\pi \cdot D_{ys}}{2p} \quad (37)$$



Şekil 3. Boyunduruk manyetik gerilimini belirlemek için kullanılan c katsayısı ile boyunduruk maksimum akı yoğunluğu arasındaki ilişki [31].

- $U_{m\delta e}$ ,  $U_{mds}$ ,  $U_{mys}$ ,  $D_r$ ,  $h_{yr}$ ,  $p$ , mıknatısın akı yoğunluğu ( $B_{PM}$ ), çekirdek malzemesinin B-H eğrisinden rotor boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna (1.5 ile 1.7 T) karşılık gelen manyetik alan şiddeti değeri ( $H_{ymaxr}$ ), mıknatısın manyetik alan şiddeti ( $H_c$ ) ve Şekil 3'deki eğride rotor boyunduruğundaki maksimum akı yoğunluğuna karşılık gelen katsayı ( $c_r$ ) değerlerinden, mıknatısın kalınlığı ( $h_{PM}$ );

$$h_{PM} = \frac{U_{m\delta e} + U_{mds} + \frac{U_{mys} + \frac{\pi \cdot c_r \cdot H_{ymaxr} (D_r - h_{yr})}{4p}}{2}}{H_c - \frac{H_c}{B_r} B_{PM} + \frac{\pi \cdot c_r \cdot H_{ymaxr}}{2p}} \quad (38)$$

- $\alpha_{PM}$  ve  $\tau_p$ 'nin çarpımından, mıknatısın genişliği ( $w_{PM}$ );

$$w_{PM} = \alpha_{PM} \cdot \tau_p \quad (39)$$

- $D_r$ ,  $h_{PM}$  ve  $h_{yr}$  değerlerinden, rotor boyunduruğunun ortalama çapı ( $D_{yr}$ );

$$D_{yr} = D_r + 2 \cdot h_{PM} - h_{yr} \quad (40)$$

- $D_{ys}$  ve  $h_{ys}$  parametrelerinin toplamından, stator dış çapı ( $D_{se}$ );

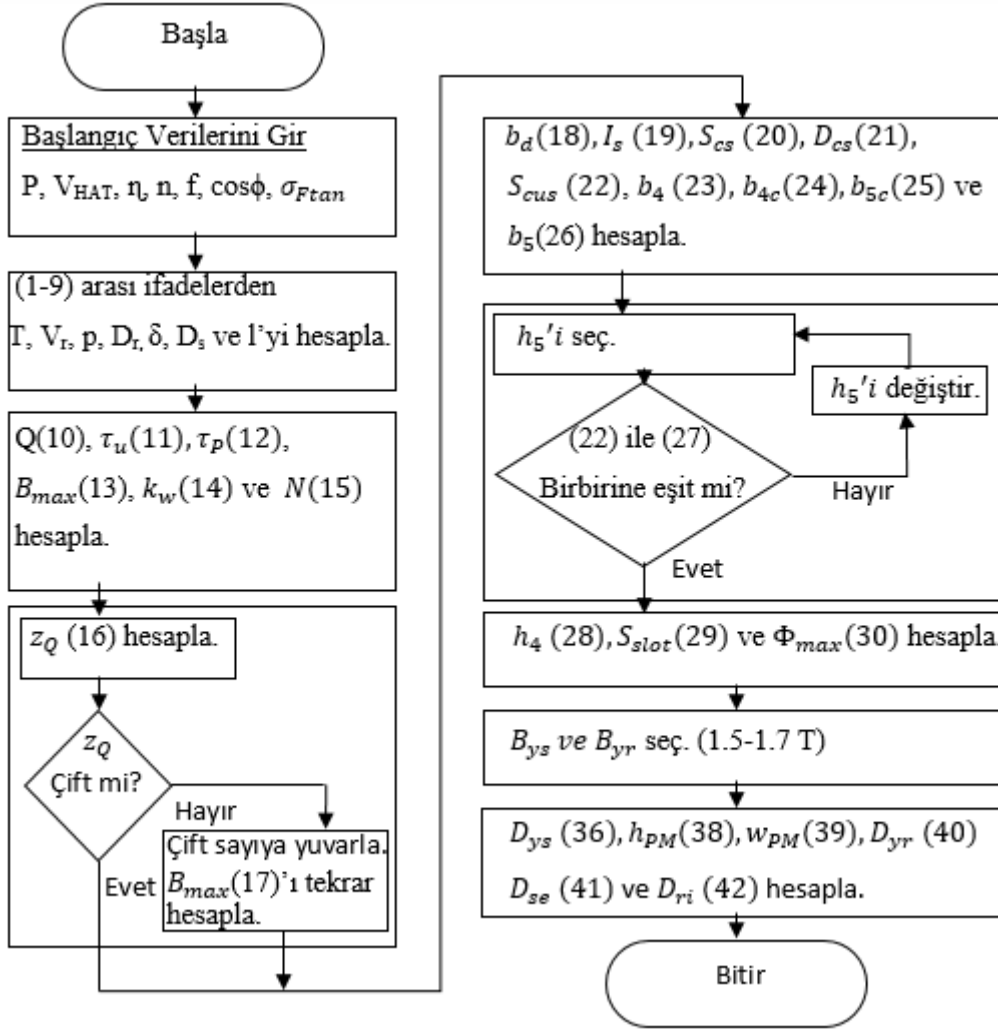
$$D_{se} = D_{ys} + h_{ys} \quad (41)$$

- $D_{yr}$  ve  $h_{yr}$  parametrelerinin farkından, rotor iç çapı ( $D_{ri}$ );

$$D_{ri} = D_{yr} - h_{yr} \quad (42)$$

bulunur.

Buraya kadar özetlenen, tasarıma ilişkin hesaplamaların akış diyagramı Şekil 4'de sunulmuştur.



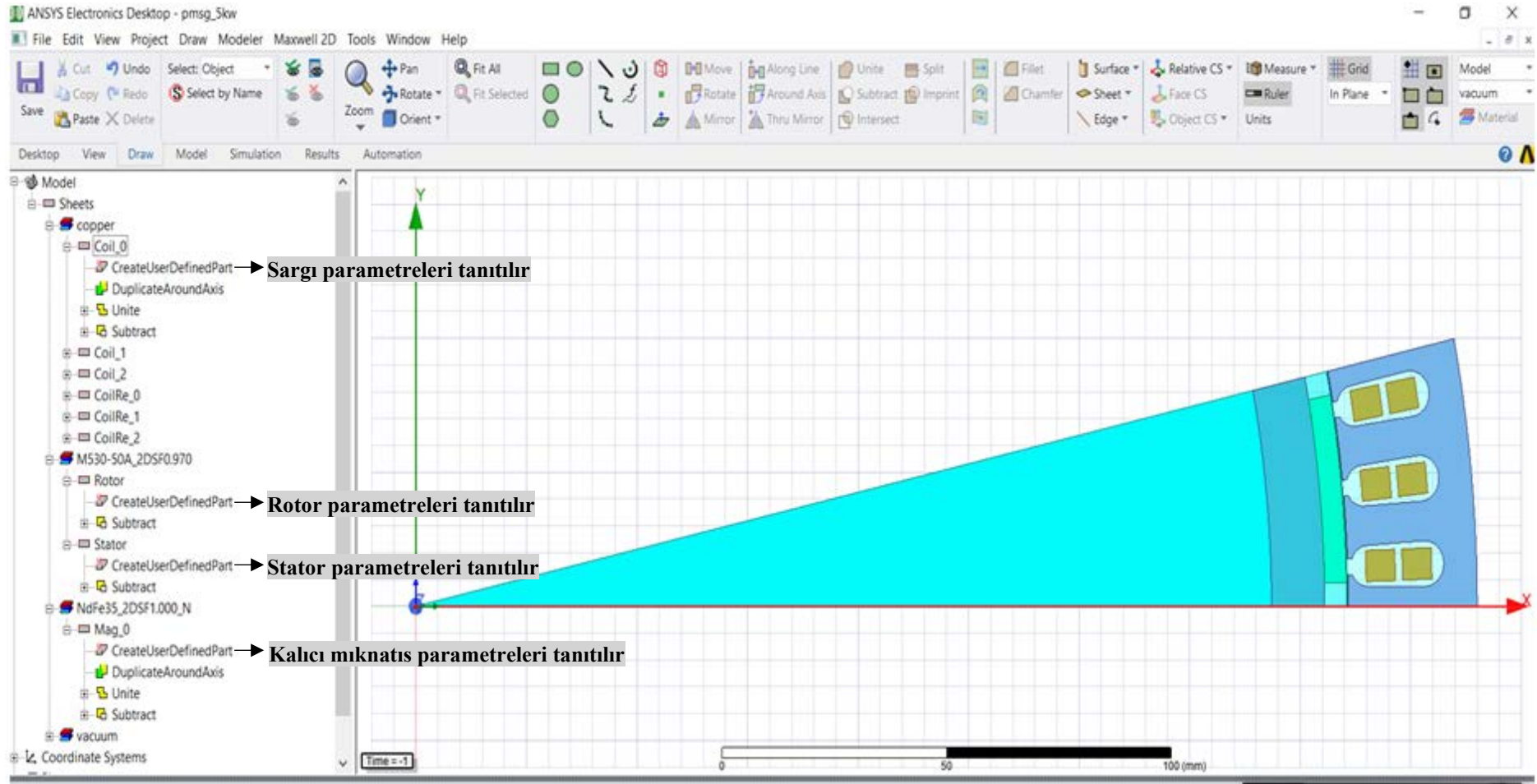
Şekil 4. Analitik hesaplamalar için akış şeması.

## 2.2. Tasarımın Ansys Maxwell ortamında 2 boyutlu modellenmesi

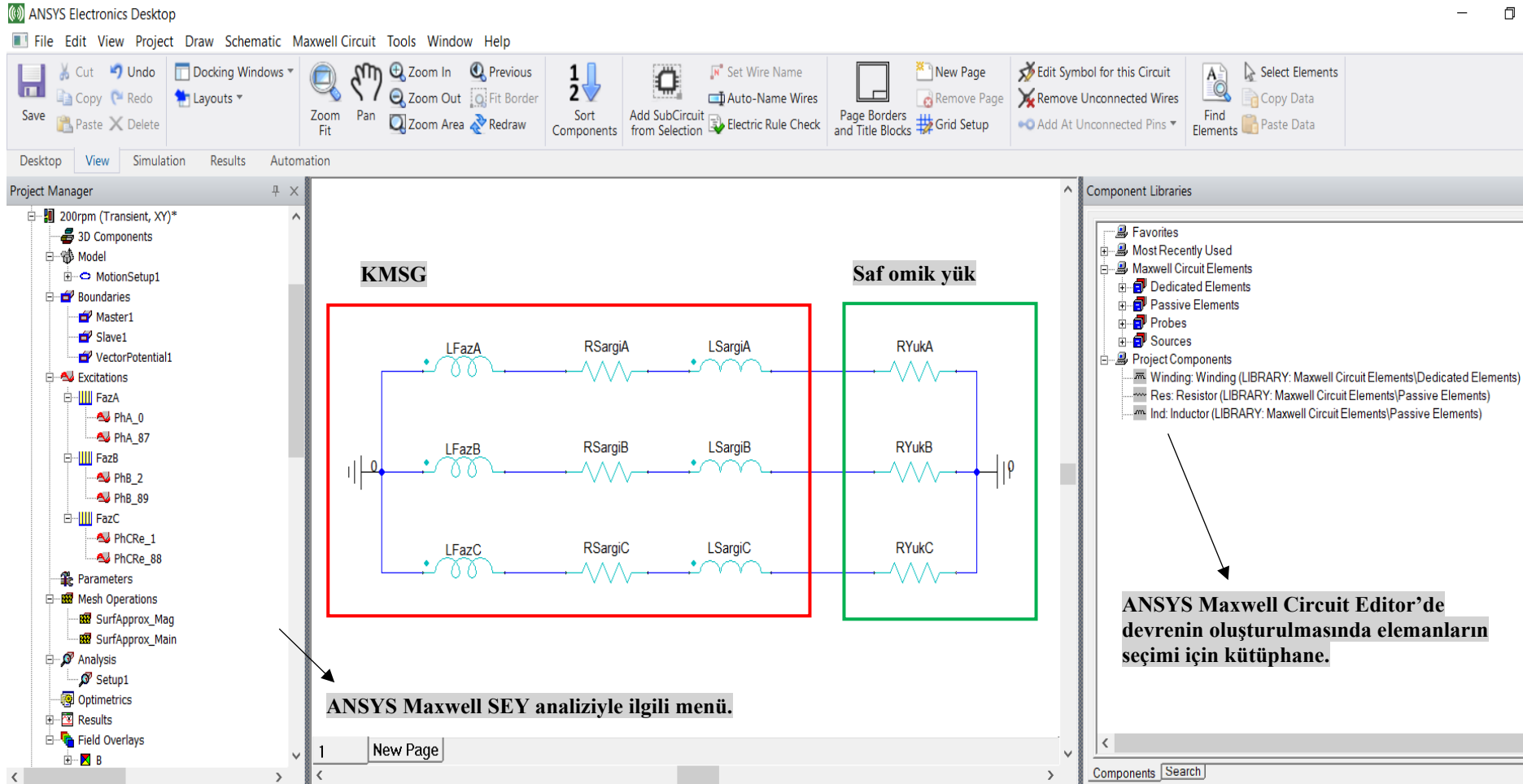
Çalışmanın bu aşamasında, “Ansys Maxwell” yazılımına, sırasıyla;

- Stator ile rotorun dış çapı, iç çapı ve uzunluğu,
- Stator oyuk boyutları, sargı ile ilgili parametreler ve malzemeler (stator nüvesi (M530-50A), sargı (bakır)),
- Rotor bünyesinde bulunan mıknatıs boyutları ile malzemeler (rotor nüvesi (M530-50A), mıknatıs (NdFe35)),
- Anma gücü, anma gerilimi, anma hızı ve çalışma sıcaklığı gibi, makine parametreleri girilerek, tasarım yazılıma tanıtılmıştır (Şekil 5).

Tasarlanan KMSG'nin kutup sayısı 30, stator oluk sayısı 90 ve mıknatıs kalınlığı 5 mm olup ürünün ticarileşmesi sebebiyle, diğer tasarım parametreleri bu çalışmada verilmeyecektir. Daha sonra, ANSYS Maxwell Circuit Editor aracılığıyla, KMSG'nin 2 boyutlu (2B) modeline harici devre olarak dengeli saf omik yük bağlanarak yükte test gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Yük değeri yaklaşık 24  $\Omega$ 'dur.



Şekil 5. Ansys Maxwell yazılımı 2 boyutlu model.

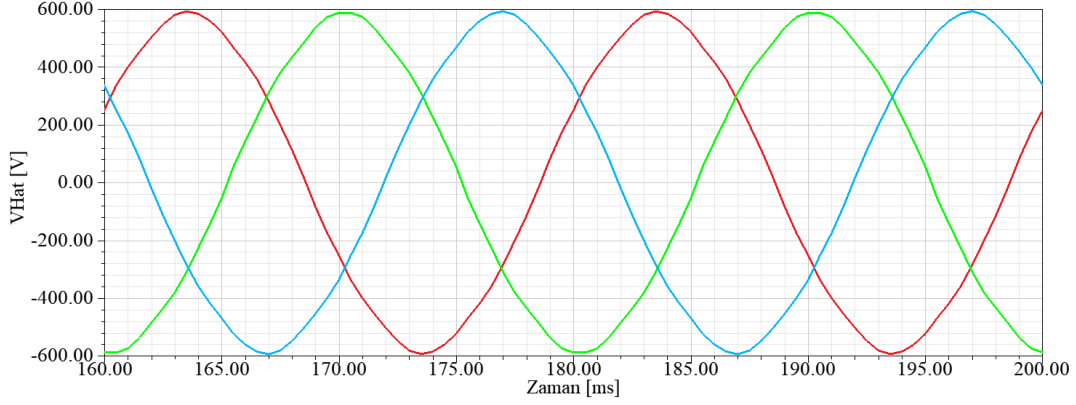


Şekil 6. ANSYS Maxwell Circuit Editor'de yüklenme testi için oluşturulan devre.

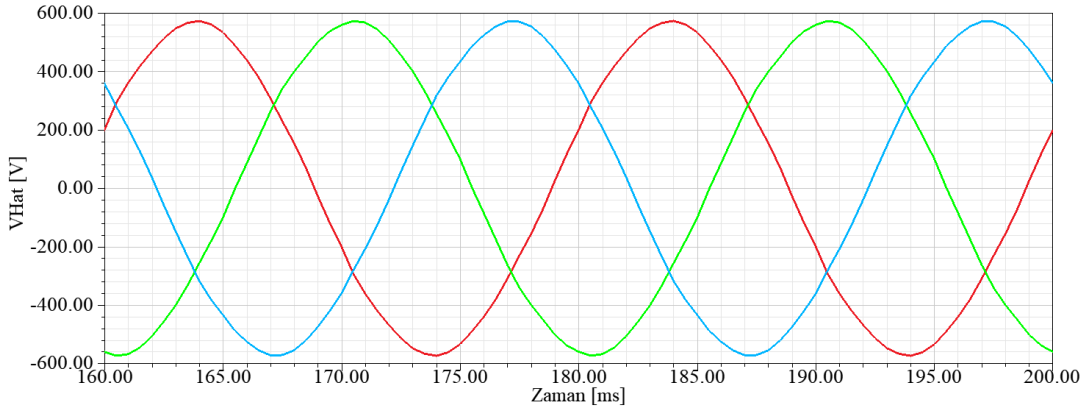


### 3. Analiz sonuçları

KMSG tasarımı Ansys Maxwell yazılımıyla, anma hızı (200 dev./dak.) boşa ve anma yükte (5000 W) çalışma durumları için benzetim yapılmış ve generatör terminalinde gözlemlenen hat gerilimlerine ait dalga şekilleri sırasıyla Şekil 7 ve 8'de verilmiştir.



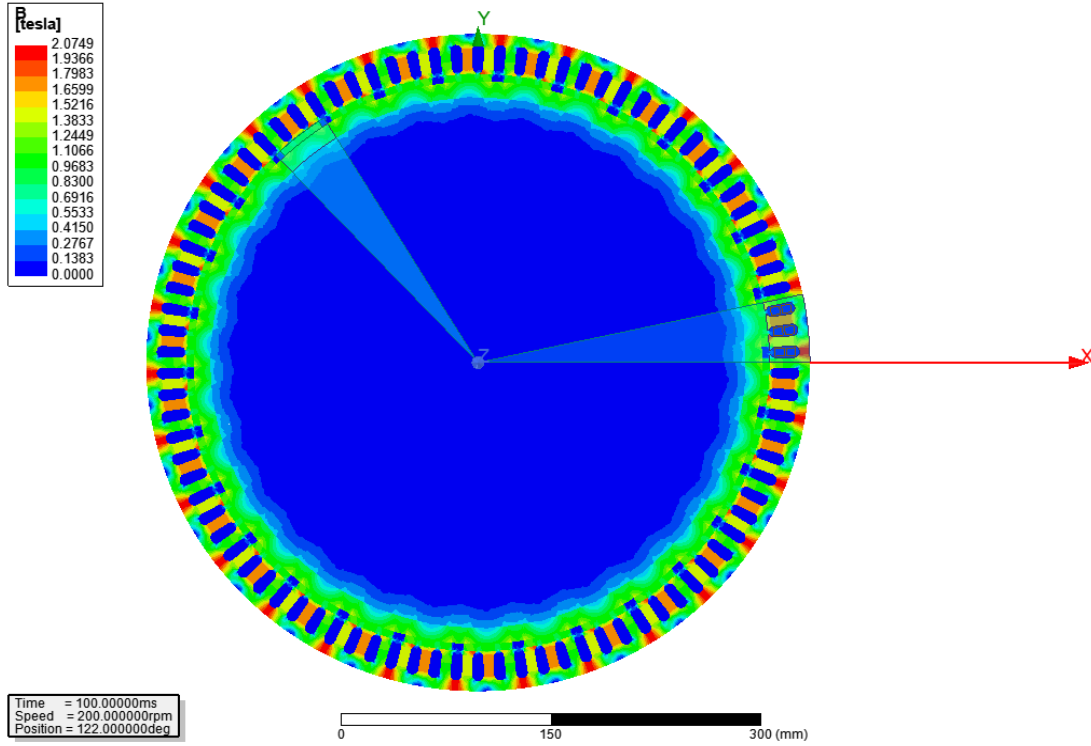
Şekil 7. Anma hızı ve boşa çalışma durumunda hat gerilimlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 8. Anma hızı ve anma yüklenme çalışma durumunda hat gerilimlerinin zamana göre değişimi.

Bu şekillerden, tasarlanan generatörün her iki çalışma durumunda, terminal hat gerilimlerinin dengeli ve sinüzoidal dalga formlarına sahip olduğu, ayrıca gerilimlerin tepe değerlerinin yaklaşık olarak; boşa çalışma durumunda 583 V ve anma yükte çalışma durumunda 568 V olduğu görülmektedir.

Tasarımda anma yüklenme şartlarında,  $t=100\text{ms}$  anında manyetik akı yoğunluğunun dağılımı Şekil 9'da verilmiştir. Bu şekilden, anlık manyetik akı yoğunluğunun; hava boşluğunda 1 Tesla, mıknatlara karşılık gelen stator dişlerinde 1.75 Tesla ve stator boyunduruğunda 2.07 Tesla civarlarında olduğu ifade edilebilir.



Şekil 9.  $t=100$  ms anında gözlemlenen manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

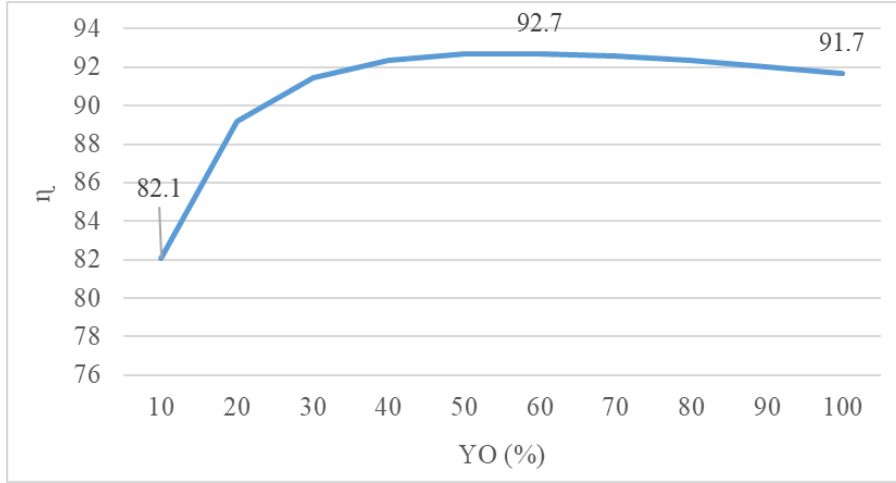
Yüklenme oranının, KMSG'nin performansına etkisini incelemek amacıyla; %10 ile %100 arasında %10'luk artışlarla yüklenme oranlarında ( $YO$ ); verim ( $\eta$ ), hat gerilimi etkin değeri ( $V_{Hat}$ ), toplam gerilim harmonik bozulma değeri ( $THD_v$ ) ve akım etkin değeri ( $I_{Faz}$ ) hesaplanmıştır. Elde edilen  $\eta$ - $YO$ ,  $V_{Hat}$ - $YO$ ,  $THD_v$ - $YO$  ve  $I_{Faz}$ - $YO$  eğrileri sırasıyla Şekil 10, 11, 12 ve 13'de sunulmuştur.

Şekil 10'dan  $\eta$ 'nin;  $YO$ 'nun %10 değeri için %82.1 olduğu, %10-%60  $YO$  aralığında artış gösterdiği ve maksimum değeri olan %92.7'ye ulaştığı, son olarak %60-%100  $YO$  aralığında azaldığı ve generatörün anma yükünde ( $YO$ =%100) %91.7 değerini aldığı görülmektedir.

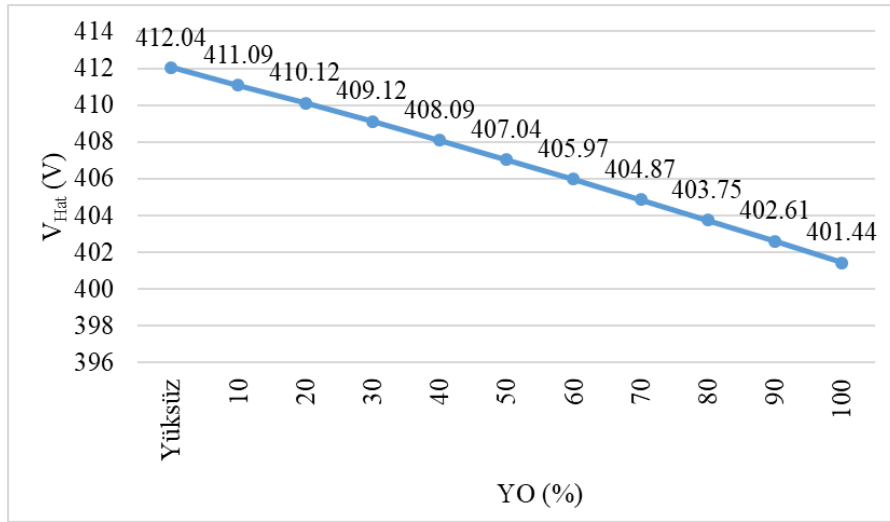
Şekil 11'den generatörün boşa çalışma ( $YO$ =%0), yarı yüklenme ( $YO$ =%50) ve anma yüklenme ( $YO$ =%100) durumlarında,  $V_{Hat}$  değerlerinin sırasıyla 412.04 V, 407.04 V ve 401.44 V olduğu,  $V_{Hat}$ 'in  $YO$  ile doğrusal olarak azaldığı ve generatörün gerilim regülasyon oranının %2.6 civarında olduğu ifade edilebilir.

Şekil 12 generatörün boşa çalışma durumunda  $THD_v$ 'nin en yüksek değerde (%1.79) olduğunu, ayrıca  $YO$  artışıyla bu indisin azaldığını göstermektedir. Bu şekil, tasarlanan KMSG'nin terminal geriliminin IEEE Standard 519-2014 [32]'de tanımlanan sınır değer olan %8'in altında  $THD_v$ 'ye sahip olduğunu açıkça işaret etmektedir.

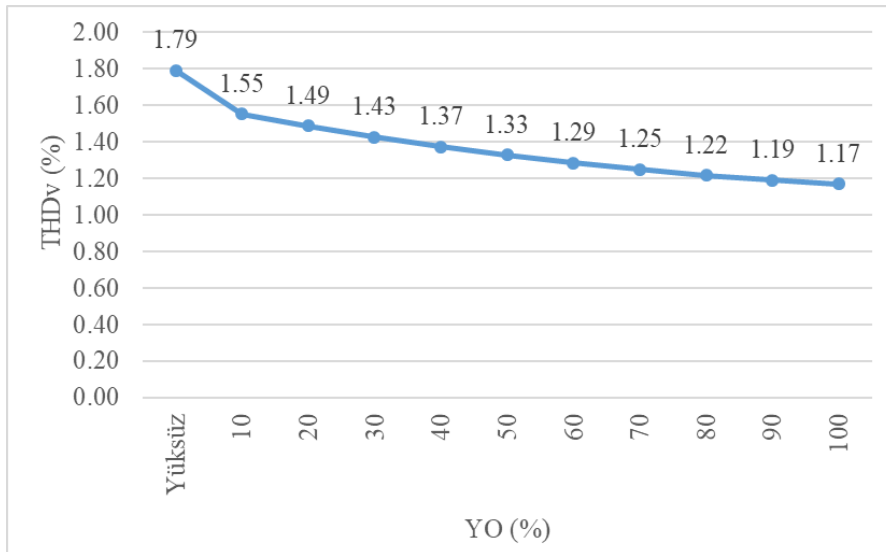
Şekil 13'den  $YO$  artışı ile  $I_{Faz}$ 'ın doğrusal olarak arttığı,  $I_{Faz}$  değerinin yarı ve anma yüklenme durumlarında sırasıyla; 4.1 A ve 8.2 A olduğu görülmektedir.



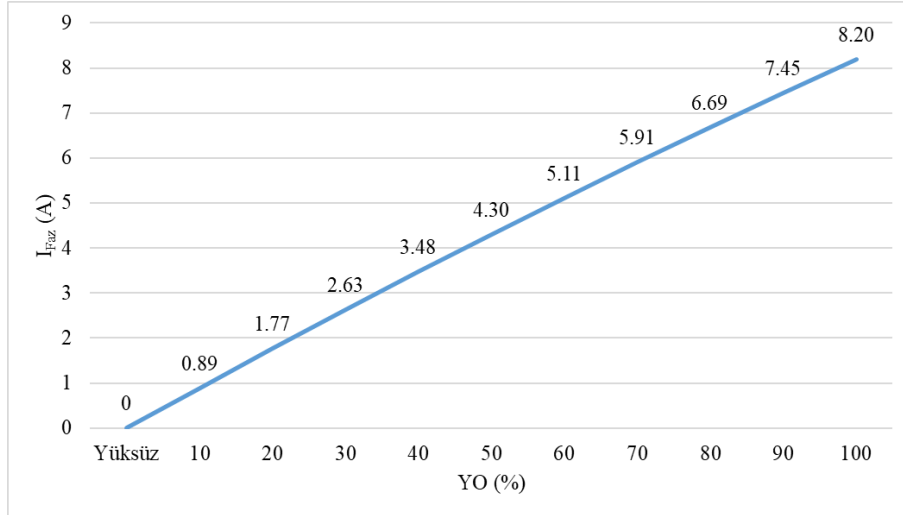
Şekil 10.  $\eta$ -YO eğrisi.



Şekil 11.  $V_{\text{Hat}}$ -YO eğrisi.

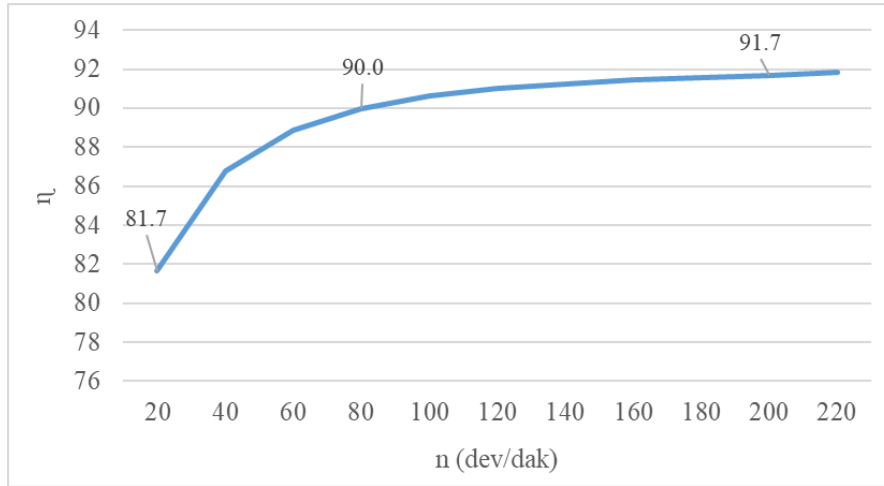


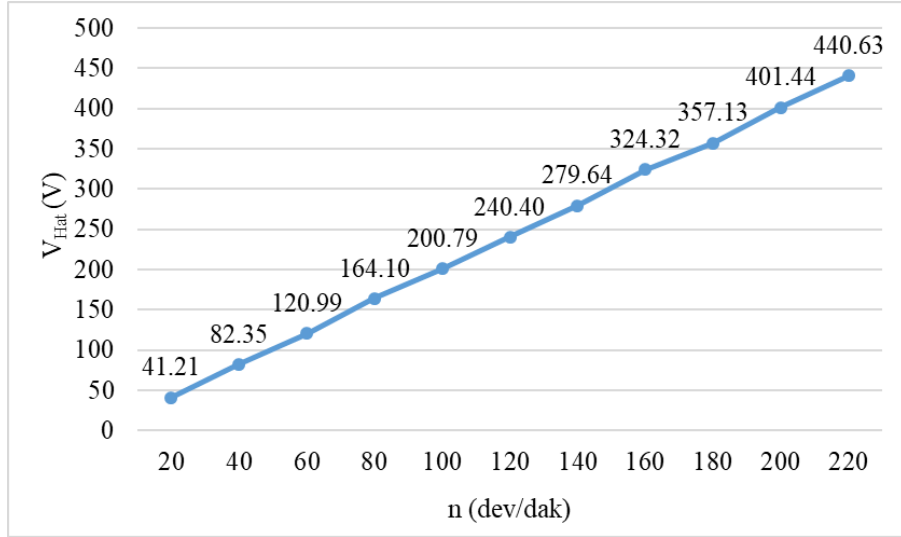
Şekil 12. THD<sub>v</sub>-YO eğrisi.

Şekil 13.  $I_{Faz}$ -YO eğrisi.

Dakikadaki devir sayısı cinsinden milin dönme hızının ( $n$ ) KMSG'nin performansına etkisini incelemek amacıyla;  $n$ ; 20 dev./dak. ile 220 dev./dak. arasında 20 dev./dak.'lık adımlarla arttırılmış ve  $\eta$ -  $n$ ,  $V_{Hat}$ - $n$ ,  $THD_V$ -  $n$ ,  $I_{Faz}$ -  $n$  ve aktif güç ( $P$ )-  $n$  eğrileri sırasıyla Şekil 14, 15, 16, 17 ve 18'de sunulmuştur.

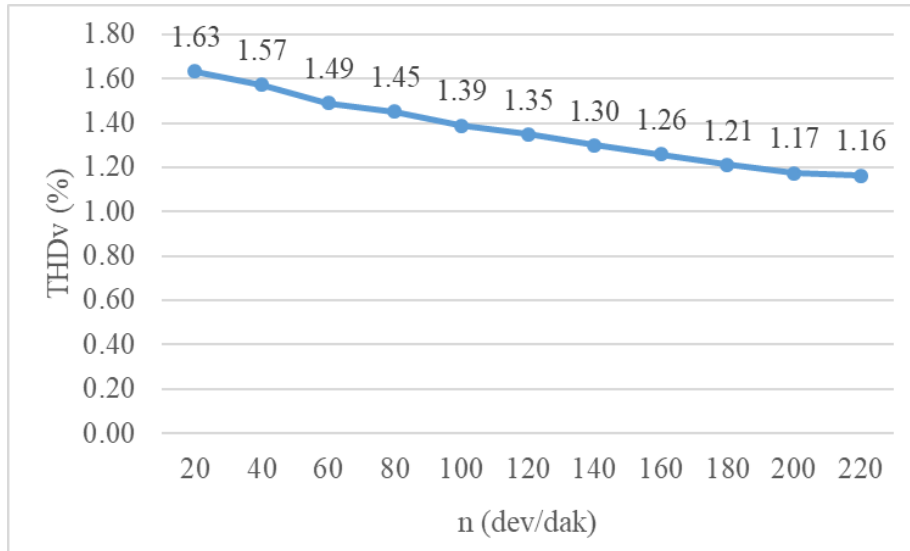
Şekil 14'den  $\eta$ 'nin; 20 dev./dak. ile 80 dev./dak. hız aralığında dikkate değer bir artış göstererek %81.7'den %90'a yükseldiği, geri kalan hız aralığında ise daha küçük bir artışla yaklaşık olarak %91.7'ye ulaştığı ifade edilebilir.

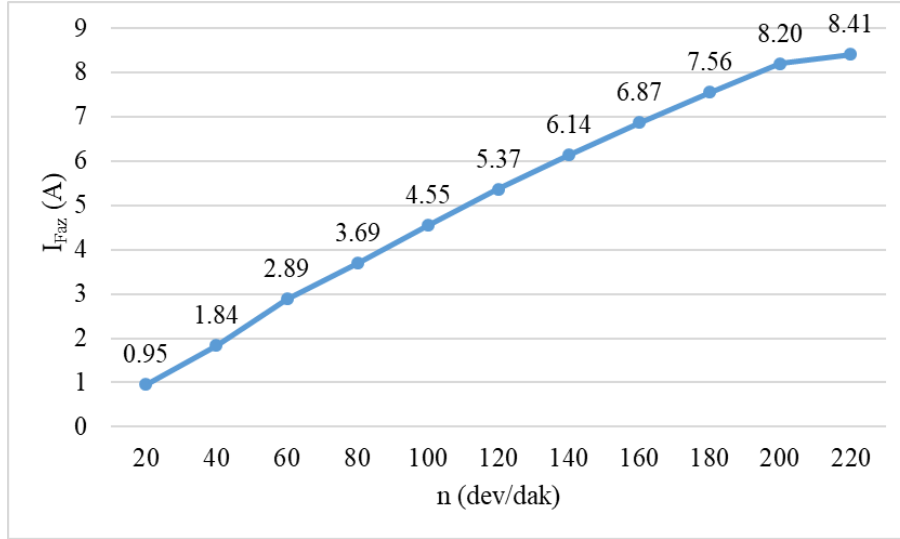
Şekil 14.  $\eta$ -  $n$  eğrisi.

Şekil 15.  $V_{\text{Hat}}-n$  eğrisi.

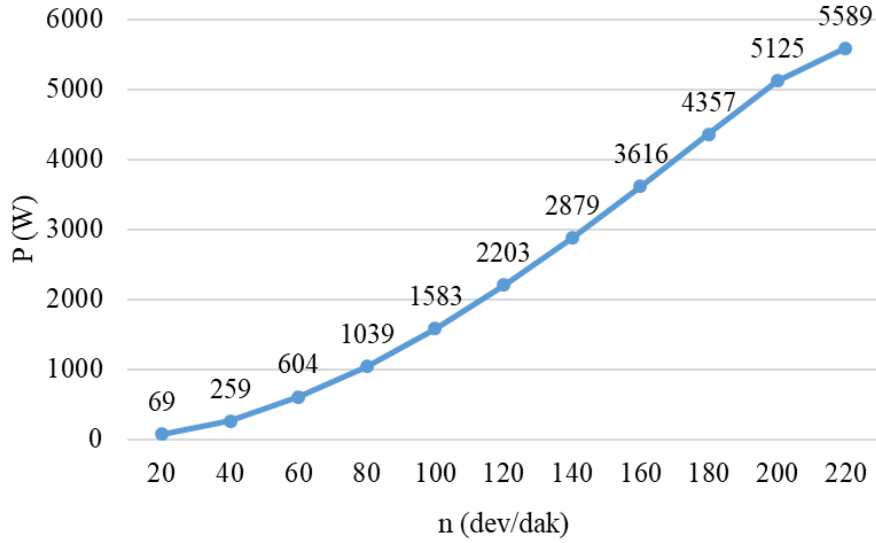
Şekil 15 ise  $V_{\text{Hat}}$ 'ın  $n$  ile doğrusal olarak artarak; çok düşük hız ( $n=20$  dev./dak.) için 41.21 V, anma hızın yarısı ( $n=100$  dev./dak.) için 200.79 V, anma hız ( $n=200$  dev./dak.) için 401.44 V ve  $n=220$  dev./dak. için 440.63 V değerlerini aldığını göstermektedir.

Şekil 16'dan generatör 20 dev./dak. hızla döndürüldüğünde  $THD_V$ 'nin en yüksek değere (%1.63) sahip olduğu ve hızın artışıyla  $THD_V$ 'nin eksponansiyel şekilde azaldığı görülmektedir. Anma hızında ise  $THD_V$  %1.17 değerindedir. Bu eğriden, tasarlanan KMSG'nin terminal geriliminin tüm hız değerlerinde, IEEE Standard 519-2014'de tanımlanan sınır değerinin altında  $THD_V$ 'ye sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 16:  $THD_V-n$  eğrisi.

Şekil 17:  $I_{Faz}$ -  $n$  eğrisi.

Şekil 17 ise  $I_{Faz}$ 'ın  $n$  ile doğrusal olarak artarak; çok düşük hız ( $n=20$  dev./dak.) için 0.95 A, anma hızın yarısı ( $n=100$  dev./dak.) için 4.55 A, anma hızı ( $n=200$  dev./dak) için 8.20 A ve  $n=220$  dev./dak. için 8.41 A değerlerini aldığı göstermektedir.

Şekil 18:  $P$ -  $n$  değişim eğrisi.

Şekil 18'den  $n=20$  dev./dak. için 69 W,  $n=100$  dev./dak. için 1583 W,  $n=200$  dev./dak. için 5125 W ve  $n=220$  dev./dak. için 5589 W değerlerinin gözlemlendiği dolayısıyla  $P$ 'nin anma hızın yarısından sonra kayda değer bir şekilde arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

Doğrudan sürürlü bir başka deyişle dişli kutusuz değişken hızlı rüzgar türbinleri, şebekeden uzakta küçük güçlü tüketicilerin, düşük rüzgar hızlarında, verimli ve mekanik

bakım gereksinimi düşük bir şekilde elektrik ihtiyacının karşılanması için yaygın olarak tercih edilen bir yenilenebilir enerji temelli üretim yöntemidir.

Bu makalede, düşük hızlı ve küçük güçlü rüzgar türbinleri için radyal akılı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin (KMSG'lerin) tasarımı ile Ansys Maxwell yazılım ortamında modellenmesi ve performans analizi üzerine örnek bir çalışma sunulmuştur. Çalışmanın KMSG tasarım kısmında, sonlu elemanlar yöntemi temelli analizlerin uzun sürmesi sebebiyle, analitik yöntemle makinenin boyutları ve parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra, bu boyutlar ve parametreler, Ansys Maxwell yazılımına tanıtılarak 2 boyutlu model oluşturulmuştur. Son olarak; aynı yazılım kullanılarak, tasarlanan KMSG'nin performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Ansys Maxwell yazılımıyla yapılan performans analizlerinden, tasarımın analitik modelleme aşamasında hedeflenen makine anma değerlerine ulaştığı, ayrıca tasarımı gerçekleştirilen KMSG'nin; IEEE 519-2014 standardında tanımlı toplam gerilim harmonik bozulma sınırlamasına uyduğu, yüksek verim değerlerinde çalıştığı (%92), gerilim regülasyon değerinin düşük seviyede olduğu (%2.6) ve anma devrinin %50'sinden büyük devirlerde anma gücüyle kıyaslandığında kayda değer güçler üretmeye başladığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda, daha büyük güçler için çeşitli algoritmalar kullanılarak, optimal KMSG tasarımının yapılması planlanmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma, İŞBİR Elektrik San. A.Ş. Ar-Ge biriminde gerçekleştirilmiştir.

## Kısaltmalar

<i>KMSG</i>	: Kalıcı mıknatıslı senkron generatör
<i>SEY</i>	: Sonlu elemanlar yöntemi
<i>KMSM</i>	: Kalıcı mıknatıslı senkron makine
<i>THD</i>	: Toplam harmonik distorsiyon
<i>RT</i>	: Rüzgar türbini
<i>YO</i>	: Yüklenme oranı
<i>SKAG</i>	: Sincap kafesli asenkron generatör
<i>BAG</i>	: Bilezikli asenkron generatör
<i>ÇBAG</i>	: Çift beslemeli asenkron generatör
<i>ESG</i>	: Elektriksel uyartımlı senkron generatör

## Kaynaklar

- [1] Brent, A. C. ve Kruger, W. J., Systems analyses and the sustainable transfer of renewable energy technologies: A focus on remote areas of Africa, **Renewable Energy**, 34(7), 1774-1781, (2009).
- [2] Chauhan, A. ve Saini, R. P., Techno-economic optimization based approach for energy management of a stand-alone integrated renewable energy system for remote areas of India, **Energy**, 94, 138-156, (2016).

- [3] Boute, A., Off-grid renewable energy in remote Arctic areas: An analysis of the Russian Far East, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 59, 1029-1037, (2016).
- [4] Izadyar, N., Ong, H. C., Chong, W. T. ve Leong, K. Y., Resource assessment of the renewable energy potential for a remote area: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 62, 908-923, (2016).
- [5] Shukla, R. D. ve Tripathi, R. K., Isolated wind power supply system using double-fed induction generator for remote areas, **Energy Conversion and Management**, 96, 473-489, (2015).
- [6] Nafeh, E. S. A., Design and economic analysis of a stand-alone PV system to electrify a remote area household in Egypt, **The Open Renewable Energy Journal**, 2, 33-37, (2009).
- [7] Ranjitkar, G., Huang, J. ve Tung, T., Application of micro-hydropower technology for remote regions, **2006 IEEE EIC Climate Change Conference**, IEEE, 1-10, (2006).
- [8] Bekele, G. ve Tadesse, G., Feasibility study of small hydro/PV/wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia, **Applied Energy**, 97, 5-15, (2012).
- [9] Khatib, T., Mohamed, A. ve Sopian, K., Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia, **Energy and Buildings**, 47, 321-331, (2012).
- [10] Lal, D. K., Dash, B. B. ve Akella, A. K., Optimization of PV/wind/micro-hydro/diesel hybrid power system in HOMER for the study area, **International Journal on Electrical Engineering and Informatics**, 3(3), 307, (2011).
- [11] Saheb-Koussa, D., Haddadi, M. ve Belhamel, M., Economic and technical study of a hybrid system (wind-photovoltaic-diesel) for rural electrification in Algeria, **Applied Energy**, 86(7-8), 1024-1030, (2009).
- [12] Li, H. ve Chen, Z., Overview of different wind generator systems and their comparisons, **IET Renewable Power Generation**, 2(2), 123-138, (2008).
- [13] Cheng, M. ve Zhu, Y., The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review, **Energy Conversion and Management**, 88, 332-347, (2014).
- [14] Bhutto, D. K., Ansari, J. A., Bukhari, S. S. H. ve Chachar, F. A., Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review, **In 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies**, 1-6, Sukkur, Pakistan, (2019).
- [15] Bisenieks, L., Vinnikov, D. ve Galkin, I., New converter for interfacing PMSG based small-scale wind turbine with residential power network, **In 2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE)**, IEEE, 354-359, (2011).
- [16] Madescu, G., Mot, M., Biriescu, M., Greconici, M. ve Koch, C., Low speed PM generator for direct-drive wind applications, **In 2011 IEEE EUROCON-International Conference on Computer as a Tool**, IEEE, 1-4, (2011).
- [17] Alam, H. S., Irasari, P. ve Dewi, D. K., Analytical and numerical deflection study on the structure of 10 kW low speed permanent magnet generator, **Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology**, 3(2), 87-94, (2012).



- [18] Orlando, N. A., Liserre, M., Mastromauro, R. A. ve Dell'Aquila, A., A Survey of control issues in PMSG-based small wind-turbine Systems, **IEEE transactions on Industrial Informatics**, 9(3), 1211-1221, (2013).
- [19] Tazi, K., Abbou, M.F. ve Abdi, F., Performance analysis of micro-grid designs with local PMSG wind turbines, **Energy Systems**, 1-33, (2019).
- [20] Chen, A., Nilssen, R. ve Nysveen, A., Performance comparisons among radial-flux, multistage axial-flux, and three-phase transverse-flux PM machines for downhole applications, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 46(2), 779-789, (2010).
- [21] Ahsanullah, K., Dutta, R. ve Rahman, M. F., Review of PM generator designs for direct-drive wind turbines, **In 2012 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**, IEEE, 1-6, (2012).
- [22] Dorrell, D. G., Hsieh, M. F., Popescu, M., Evans, L., Staton, D. A. ve Grout, V., A review of the design issues and techniques for radial-flux brushless surface and internal rare-earth permanent-magnet motors, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 58(9), 3741-3757, (2010).
- [23] Arafat, M. Y., Murshed, M., Hasan, M. M. ve Razzak, M. A., Design aspects and performance analysis of inner and outer rotor permanent magnet alternator for direct driven low-speed wind turbine, **In 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)**, IEEE, 604-609, (2016).
- [24] Yilmaz, M. ve Krein, P. T., Capabilities of finite element analysis and magnetic equivalent circuits for electrical machine analysis and design, **In 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference**, IEEE, 4027-4033, (2008).
- [25] Kim, J. H. ve Sarlioglu, B., Closed-form method for multi-stage axial flux permanent magnet machine: design and analysis, **Electric Power Components and Systems**, 45(7), 785-797, (2017).
- [26] Elosegui, I., Martinez-Iturralde, M., Rico, A. G., Florez, J., Echeverría, J. M. ve Fontan, L., Analytical design of synchronous permanent magnet motor/generators, **In 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 1165-1170, (2007).
- [27] Amuhaya, L. L. ve Kamper, M. J., Design analysis of a hybrid-PM synchronous generator for wind energy applications, **In 2015 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)**, IEEE, 163-167, (2015).
- [28] Faqih, M. R., Sutedjo, S. ve Wahjono, E., Design and fabrication of a radial flux permanent magnet synchronous generator, **In 2019 International Electronics Symposium (IES)**, IEEE, 644-649, (2019).
- [29] Wang, T. ve Wang, Q., Optimization design of a permanent magnet synchronous generator for a potential energy recovery system, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 27(4), 856-863, (2012).
- [30] A. N. S. Y. S. Maxwell, Low frequency electromagnetic field simulation, <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>, (18.05.2020).
- [31] Pyrhonen, J., Jokinen, T. ve Hrabovcova, V., **Design of rotating electrical machines**, John Wiley & Sons, (2013).
- [32] IEEE 519, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, **IEEE Standard**, (2014).

# Abiyotik yüzeylerde termofilik *Anoxybacillus rупiensis* DSM 17127<sup>T</sup> suşunun biyofilm oluşumu ve polistiren yüzeyler üzerindeki biyofilm yapısının giderimi

Tuğba KILIÇ<sup>1,\*</sup>, Başar KARACA<sup>2</sup>, Arzu ÇÖLERİ CİHAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Tıbbi Laboratuvar Teknikleri Programı, 06830, Gölbaşı, Ankara

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, 06100, Tandoğan, Ankara

Geliş Tarihi (Received Date): 30.07.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.02.2021

## Öz

Bu çalışmanın amacı, *Anoxybacillus rупiensis* DSM 17127<sup>T</sup>'nin endüstride kullanılmakta olan abiyotik yüzeyler üzerinde biyofilm oluşumunu incelemek ve polistiren yüzeyler üzerinde oluşan biyofilm yapısının sanitasyon ajanları ile giderimini sağlamaktır. Bakterinin genomik DNA (gDNA)'sı ve biyofilm matriksi yapısında bulunan ekstraselüler DNA (eDNA)'sı spektrofotometrik analiz ve agaroz jel görüntülemesi ile tespit edilmiştir. Polistiren yüzeylerde biyofilm oluşumu ve biyofilm yapısının giderimi kristal viyole bağlanma yöntemi ile belirlenmiştir. Bakterinin ideal planktonik gelişimi için optimum sıcaklık, pH ve tuzluluk istekleri sırasıyla 55 °C, 8.0, % 1 ve ideal biyofilm üretimi için 60 °C, 8.0, % 0 olarak saptanmıştır. gDNA'nın (27.6 kb) molekül ağırlığının, eDNA'dan (20.9 kb) daha büyük olduğu belirlenmiştir. gDNA ve eDNA saflaştırıldıktan sonra DNaz I, RNaz A ve proteinaz K ile muamele edilmiştir. gDNA sadece DNaz I ile tamamen parçalanmıştır. Saflaştırılmış haldeki eDNA ise, üç enzime de direnç göstermiştir. Ancak, olgun biyofilmlerin DNaz I enzimi ile muamelesi sonucunda biyomasta 2 saat içerisinde % 80 oranında azalma gözlenmiştir. Bakterinin polikarbonat, polipropilen, polivinil klorür, paslanmaz çelik, polistiren ve cam yüzeylerinde biyofilm oluşturduğu gözlenmiş olup, en ideal yüzey polikarbonat (5.69 log kob/cm<sup>2</sup>) olarak belirlenmiştir. Biyofilm giderimi çalışmalarında, protein parçalayıcı sanitasyon ajanlarının polisakkarit parçalayıcı ajanlardan daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, bakterinin eDNA'sının olgun biyofilm matriksinin bütünlüğü ve sağlamlığı adına önemli bir yapısal rol oynadığı belirlenmiştir. Ayrıca, bakterinin abiyotik yüzeylerde biyofilm oluşturma yeteneğine sahip olduğu görülmüştür. *A. rупiensis*'in biyofilminin giderimi için süt

\* Tuğba KILIÇ, tugbakilic@gazi.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-5474-0288>

Başar KARACA, karaca@ankara.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-6943-8965>

Arzu ÇÖLERİ CİHAN, acihan@science.ankara.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-7289-6251>

endüstrisinde kullanımı olan seçilmiş sanitasyon ajanlarının önemli ölçüde etki sağladığı saptanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Abiyotik yüzeyler, *Anoxybacillus rupiensis*, biyofilm giderimi, sanitasyon ajanları.

## Biofilm formation of the thermophilic *Anoxybacillus rupiensis* strain DSM 17127<sup>T</sup> on abiotic surfaces and removal of its biofilm structure on polystyrene surfaces

### Abstract

The aim of this study was to examine the biofilm formation of *Anoxybacillus rupiensis* DSM 17127<sup>T</sup> on abiotic surfaces used in the industry and to remove the biofilm structure formed on polystyrene surfaces with sanitation agents. The genomic DNA (gDNA) and the extracellular DNA (eDNA) in the biofilm matrix structure of the bacteria were determined by spectrophotometric analysis and agarose gel imaging. For the biofilm formation on abiotic surfaces and the removal of the biofilm structure formed on polystyrene surfaces, crystal violet binding assay was applied. The optimum temperature, pH, and salinity for the growth and biofilm formation of the bacteria were 55 °C, 8.0, 1 % and, 60 °C, 8.0, 0 %, respectively. The molecular weight of gDNA (27.6 kb) was determined to be larger than eDNA (20.9 kb). gDNA and eDNA were partially purified and treated with DNase I, RNase A and proteinase K. The purified gDNA was completely disrupted only by DNase I, and the purified eDNA was resistant to all three enzymes. As a result of the treatment of biofilm containing eDNA with DNase I, it was observed that the eDNA was sensitive to DNase I and the biofilm mass decreased by 80 % within 2 hours. The bacterium was observed to form biofilms on polycarbonate, polypropylene, polyvinyl chloride, stainless steel, polystyrene and glass surfaces, and the most ideal surface determined as polycarbonate (5.69 log cfu/cm<sup>2</sup>). In the biofilm removal studies, protein degrading sanitation agents were found to be more effective than polysaccharide degrading agents. In conclusion, it was determined that the eDNA of the bacteria plays an important structural role in the integrity and robustness of the mature biofilm matrix. In addition, it was showed that the bacterium is capable of forming biofilms on abiotic surfaces. Dairy industrial sanitation agents had a significant effect on the removal of the biofilm mass of *Anoxybacillus rupiensis*.

**Keywords:** Abiotic surfaces, *Anoxybacillus rupiensis*, biofilm removal, sanitation agents.

### 1. Giriş

*Anoxybacillus* türlerinin birçoğu ilk kez Pikuta vd. [1] tarafından tanımlanmıştır. *Anoxybacillus rupiensis* DSM 17127<sup>T</sup> (AJ879076) ise ilk kez Derekoa vd. [2] tarafından sıcak su kaynağından izole edilmiştir. Diğer bir çalışmada, Jabeen vd. [3] tarafından sıcak su kaynağından *A. rupiensis* JF82 ve JF83 izole edilmiştir. *A. rupiensis* Ir3 ise toprak

örneklerinden izole edilmiştir [4]. Ayrıca, *Anoxybacillus* cinsinin diğer türleri çamur, gübre, jeotermal toprak, süt ve jelatin örneklerinden izole edilmiştir [1, 5, 6].

Biyofilmler, süt işleme tesislerinde son ürünlerdeki bakteriyel kontaminasyonun temel kaynağı olmaktadır [7]. *Anoxybacillus flavithermus*, süt tozlarından sıklıkla izole edilebilen yaygın bir kontaminantdır. Ayrıca, bu bakterinin biyofilm ve spor oluşumu çok hızlı bir şekilde (6-8 saat) ve eş zamanlı olabilmektedir [5, 8]. Dahası, spor oluşturan termofilik *A. flavithermus*, süt tozu fabrikalarında bulunan evaporatörlerin duvarları veya sprey kurutucuları gibi paslanmaz çelik yüzeylere tutunarak biyofilm oluşturabilmektedir [5]. Gıda endüstrisinde bulunan ekipmanların, su sistemlerinin, soğutma kulelerinin üzerinde biyofilmlerin oluşması gıda bozulmaları ve ekipman arızalanmaları sebebiyle ciddi ekonomik kayıplara neden olabilmektedir [9].

Biyofilmler dirençli fenotipleri sebebiyle çok zor elimine edilmektedir. Ancak, bazı geleneksel temizleme ve dezenfeksiyon rejimleri biyofilm kontrolüne katkı sağlayabilmektedir. Mikrobiyal orijinli enzimler, antimikrobiyal moleküller ve türler arası etkileşimleri sekteye uğratan bazı ajanların kullanımı ile yeni kontrol stratejileri geliştirilebilmektedir. Biyofilm oluşumunun önlenmesi için temel strateji, bakterilerin yüzeylere sıkıca tutunmadan önce yüzeylerin düzenli olarak temizlenmesi ve dezenfekte edilmesidir. Dezenfektanlar, yağ, karbonhidrat ve protein gibi organik kalıntıların varlığında çok etkili olabilmektedir [10]. Sanitasyon uygulamaları, yüzeylerden istenmeyen mikroorganizmaların ve ürünlerin kalıntılarını giderebilmektedir. Bu program dört temel aşama içermektedir ve bu aşamaların kombinasyonları da tercih edilebilmektedir. Bu aşamalar; kimyasal uygulama, mekanik/kinetik uygulama, sıcaklık/termal uygulama kullanımları ve temas süresidir. Kimyasal uygulamalar, temizleme ve dezenfeksiyon fazları için önemlidir. Temizleme fazında kimyasallar bakteriyel kontaminasyonu yok etmekte ve bakterilerin yüzeylere tutunmalarını azaltmaktadır. Dezenfeksiyon fazında kullanılan kimyasallar temizleme işleminden sonra geri kalan mikroorganizmaların yükünü azaltmaktadır [11]. Enzimatik içeriği olan deterjanların kullanımı, “yeşil kimyasallar”, gıda endüstrisinde biyofilm probleminin üstesinden gelmek için kullanılmaktadır [10]. Enzimatik giderim mekanizmaları, hücre zarının bileşenlerinin parçalanması ile hücre lizisini, yüzeye tutunan hücre bileşenlerinin ve çoğalarak tutunan hücrelerin salgıladığı hücre dışı matriksin parçalanmasını, hücre içi iletişimin kesilmesini (quorum sensing) ve çevresel maddelerin parçalanmasını kapsamaktadır [12]. Hücre dışı matriksi parçalayan enzimlerin antimikrobiyal etkisi biyofilmin mekanik stabilitesinin azalmasına neden olabilmektedir. Örneğin, proteazlar, ticari olarak kontakt lenslerden proteinlerin giderimi için kullanılmaktadır. Amilazlar ise, sıvı deterjanların formülasyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Lizozimler, doğal antibakteriyel enzimlerdir. Selülaz, kağıt, tekstil ve gıda endüstrisinde biyofilmlerin önlenmesi ve giderilmesi için enzimatik solüsyonların bileşenleri olarak kullanılabilir [13].

Termofilik basillerin çeşitli yüzeylere tutunarak üretebildikleri biyofilm karakteristiklerinin anlaşılması, spor üreten bu bakterilerin pek çok endüstriyel süreçte oluşturdukları kontaminasyonu azaltabilmek ve etkili sanitasyon stratejileri geliştirmek adına önem arz etmektedir. Bu amaçla, daha önceki çalışmamızda *A. rупiensis* DSM 17127<sup>T</sup> bakterisinin güçlü biyofilm oluşturabildiği, polistiren ve paslanmaz çelik yüzeylere tutunabildiği bilgisinden hareketle mevcut çalışma tasarlanmıştır [14]. Bu bakterinin özellikle biyofilm yapılarının giderimi hakkında literatürde henüz bir bilgi

bulunmamaktadır. Bu çalışmanın amacı ise, daha önce güçlü bir biyofilm üreticisi olduğu tespit edilen *A. rupiensis*'in endüstride yaygın olarak kullanılmakta olan yüzey materyalleri üzerinde ne düzeyde biyofilm üretebildiğini tespit etmek ve polistiren yüzeyler üzerinde oluşan biyofilm yapısının sanitasyon ajanları ile giderim potansiyelini araştırmaktır. Gram-pozitif bakterilerin biyofilm giderimi için temel hedef bölgeleri, hücre duvarı, sitoplazmik zar, fonksiyonel ve yapısal proteinler, DNA, RNA'lardır [15]. Bu çalışmada bu hedef bölgeleri göz önünde bulundurularak, proteinlere, polisakkartilere, DNA ve RNA'ya etki eden sanitasyon ajanları test edilmiştir.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Bakteri kültürünün ön aktifleştirme şartları

Biyofilm çalışmaları için Ankara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Mikrobiyoloji Araştırma Laboratuvarı kültür koleksiyonunda mevcut olan, daha önce Derekoa vd. [2] tarafından sıcak su kaynağından izole edilmiş, aerobik, gram-pozitif basil, spor oluşturan termofilik *A. rupiensis* DSM 17127<sup>1</sup> (AJ879076) bakterisi seçilmiştir. Ön aktifleştirme için, -80 °C'de gliserol stok kültürlerinde bulunan bakteri, öncelikle NaCl içeren Tryptic Soy Agar (TSA, Merck, Almanya) besiyerinde 55 °C'de 18 saat süresince inkübe edilmiştir. Bu kültürden 3 mL'lik NaCl içeren Tryptic Soy Broth (TSB, Merck, Almanya) besiyerine yoğun bir bulanıklık (OD: 0.5-0.7) elde edilinceye kadar aşılınmış ve kültür süspansiyonu 55 °C'de 18 saat çalkalamalı koşullarda (170 rpm) geliştirilmiştir. Nihai aşamada bu aktif sıvı kültürden alınarak, NaCl ihtiva etmeyen TSB besiyerine inoküle edilmiş ve kültür çalkalamalı koşullarda 55 °C'de 6 saat süresince inkübe edilmiştir. Söz konusu üç basamaklı inokülüm hazırlığı ilgili termofilik basilin sporulasyonu fazını geciktirmek adına önem arz etmektedir. Sporulasyonda ki gecikme faz kontrast mikroskopisindeki incelemeler ile de teyit edilmiştir. Hazırlanan son kültür bütün biyofilm çalışmalarında kullanılmıştır.

### 2.2. Polistiren yüzeylerde kristal viyole ile biyofilm miktarının tayini

Bakterinin U-tabanlı 96 kuyucuklu polistiren mikrotitrasyon plakaların duvarlarında (Lp Italiana) biyofilm oluşturma özelliklerinin incelenmesi için Woodward vd. [16] ve Stepanović vd. [17] tarafından önerilen yöntemler modifiye edilerek uygulanmıştır. Ön aktifleştirme işleminden sonra, kuyulara öncelikle 190'ar µL NaCl içermeyen TSB besiyeri ve 10'ar µL aktif kültür aşılınmıştır. Yalnızca besiyeri ihtiva eden kuyular negatif kontrol grubu olarak tasarlanmıştır. Plakalar 60 °C'de 48 saat süresince statik olarak inkübe edilmiştir. İnkübasyondan sonra, tutunamayan planktonik bakteri hücrelerini uzaklaştırmak için kuyular 2 defa serum fizyolojik (SF, % 0.85 NaCl) ile yıkanmıştır. Plakalar oda sıcaklığında kurutulmuştur. Plaka kuyularında geriye kalan biyofilm matriks yapılarını fikse etmek adına kuyulara 200'er µL % 95'lik metanol (Merck, Almanya) transfer edilmiş ve plakalar 37 °C'de 15 dk bekletildikten sonra kuyular boşaltılmıştır. Daha sonra plakaların her biri oda sıcaklığında 15 dk kurutulmuş metanolün uçması sağlanmıştır. Ardından kuyulara 200'er µL kristal viyole çözeltisi (% 1'lik, Merck, Almanya) eklenmiş ve oda sıcaklığında 30 dk bekletilerek biyofilm matriks yapılarının boyanması sağlanmıştır. Boyama işleminden sonra, kuyular distile su ile boya kalıntısı kalmayacak şekilde dikkatlice yıkanmış, oda koşullarında kurutulmuştur. Ardından, biyofilm tabakasına bağlanan kristal viyole boyasının çözünmesi için kuyulara 200'er µL etanol:aseton (70:30 w/w) (Merck, Almanya) çözeltisi ilave edilerek, plakalar 30 dk oda sıcaklığında inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda çözünen kristal viyole OD595nm'de Eliza okuyucusunda (BioTek Elisa reader, µQuant, Biotek Inc., Amerika)

okutulmuştur. Yukarıda anlatılan tüm basamaklar negatif kontrol grubuna da uygulanmıştır. Çalışma 3 tekrarlı olacak şekilde tasarlanmıştır.

### **2.3. Bakterinin planktonik gelişimi ve biyofilm oluşumu üzerine çevre şartlarının etkilerinin belirlenmesi**

Bakterinin planktonik gelişimi ve biyofilm oluşumu için 96 kuyulu polistiren mikrotitrasyon plakalarda optimum pH (4.0-11.0), tuz (% 0.0-5.0) ve sıcaklık (50-65 °C) gereksinimlerinin belirlenmesi için ön aktifleştirme sonrası, toplam hacim 200 µL olacak şekilde, kuyulara 190 µL TSB besiyeri ve 10 µL aktif kültür aşılacaktır. Plakalar, 0., 6., 18., 24. ve 48. saatler de Eliza okuyucusunda her parametre için üç tekrarlı olacak şekilde OD595nm'de okutulmuştur. Negatif kontrol olarak sadece optimum koşullara ayarlanmış inokulum içermeyen TSB besiyeri kullanılmıştır. Bakterinin planktonik gelişimi için gerekli optimum pH, tuz ve sıcaklık değerlerinin belirlenmesinin ardından, optimum biyofilm gelişimi için gerekli pH, tuz ve sıcaklık değerleri, 48. saat sonunda kristal viyole boyama uygulaması sonucunda belirlenmiştir. Bu kısımdan sonra gerçekleştirilen tüm deneyler, bakterinin biyofilm oluşumu için ihtiyaç duyduğu optimum pH, tuz ve sıcaklık değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### **2.4. Hücre dışı DNA içeriğinin tayini**

Biyofilmin hücre dışı polimerik madde (EPS) bileşenlerinden olan hücre dışı DNA (eDNA) içeriğinin tayini için ön aktifleştirme işlemi sonrası, son aktif kültürden TSA besiyerine 200 µL ekim yapılarak 18 saat süresince inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda TSA besiyeri yüzeyinde gelişen koloniler hasat edilmiştir. Bu içerik daha sonra 2 mL SF içerisinde vortekslenerek süspanse edilmiştir. SF ile çözülen biyofilm örneği, daha sonra 13.000 rpm'de 4 °C'de 7 dk boyunca santrifüj edilmiştir. Üst faz başka bir mikrofüj tüpüne alınarak 0.22 µm por çapına sahip membran filtrelerden (Sartorius, Fransa) geçirilerek tamamen hücrelerden arındırılmıştır. Elde edilen filtrat eDNA tayininde kullanılmıştır. Pelet kısmı ise, genomik DNA (gDNA) izolasyonu için muhafaza edilmiştir. eDNA izolasyonu için öncelikle filtre edilen üst faza, 750 µL kloroform-izoamil alkol (24:1) eklenmiştir. 12.000 rpm'de 5 dk santrifüj edilmiş ve üst faz yeni bir mikrofüj tüpüne alınmıştır. Üst faz üzerine 750 µL fenol-kloroform-izoamil alkol (25:24:1) (Sigma-Aldrich, Amerika) eklenerek tekrar 12.000 rpm'de 5 dk santrifüj edilmiştir. Üst fazın üzerine hacminin 0.6'sı (yaklaşık 350 µL) kadar izopropanol (Merck, Almanya) eklenmiştir. Bu içerik -20 °C'de 20 dk bekletilmiş ve tekrar 12.000 rpm'de 5 dk santrifüj edilmiştir. Üst sıvı dökülmüş, çökelti üstüne 350 µL % 70'lik soğuk etanol (Merck, Almanya) eklenmiştir. Tekrar 12.000 rpm'de 5 dk santrifüj edilmiştir. eDNA içeren pelet oda sıcaklığında kurutulmuştur. Kurutulduktan sonra 30 µL Tris-EDTA (TE) tamponu ile çözümlenerek üzerine 5 mg/mL'lik RNaz A'dan (Sigma R6513) 4 µL eklenmiş ve 37 °C'de 45 dk bekletilmiştir [18]. eDNA konsantrasyonu (ng/µL) ve saflığı için 260/280 ve 260/230 oranları nanodrop cihazı (Thermo Scientific NanoDrop Lite, Amerika) ile ölçülmüştür. Daha sonra, örnekler 1.5 µL etidyum bromür (Sigma E-8751) içeren % 1.5'lük agaroz (Sigma A9539) jel elektroforezinde 120 V'da 1 saat yürütülmüş ve UV translüminatör (Vilber Lourmat, Marne-la-Vallee, Fransa) ile görüntülenmiştir. eDNA örneklerinin moleküler ağırlıkları, Quantum-Capp software görüntüleme sistemi yardımıyla kilobaz (kb) cinsinden hesaplanmıştır.

### **2.5 Bakterinin genomik DNA izolasyonu**

Genomik DNA (gDNA) izolasyonu, gram pozitif bakterilerin izolasyonu için uygun DNA izolasyon kiti (Genomik DNA purifikasyon kiti, Thermo K0512, Amerika) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. gDNA izolasyonundan sonra, örnekler 5 mg/mL RNaz

A enziminden 4 µL eklenmiştir. Daha sonra, 37 °C’de 30 dk inkübe edilerek RNA’lar uzaklaştırılmıştır. Ardından, 300 µL % 100’lük soğuk etanol (Merck, Almanya) eklenerek, -20 °C’de 1 gece bekletildikten sonra 13.000 rpm’de 7 dk santrifüj edilmiştir. Üst kısım uzaklaştırıldıktan sonra, üzerine 300 µL %70’lik soğuk etanol eklenmiş ve 13.000 rpm’de 7 dk santrifüj edilmiştir. Tekrar üst kısım uzaklaştırılarak, gDNA içeren pelletler oda sıcaklığında kurutulmuştur. Örnekler, kurutma işleminden sonra 50 µL TE tampon ile çözülmüştür. gDNA konsantrasyonu (ng/µL) ve saflığı için 260/280 ve 260/230 oranları nanodrop cihazı ile ölçülmüştür. Daha sonra, örnekler 1.5 µL etidyum bromür içeren % 1.5’luk agaroz jel elektroforezinde 120 V’da 1 saat yürütülmüş ve UV translüminatör ile görüntülenmiştir. gDNA örneklerinin moleküler ağırlıkları, Quantum-Capp software görüntüleme sistemi yardımıyla kb cinsinden hesaplanmıştır.

### **2.6. Kısmi olarak saflaştırılmış gDNA ve eDNA’nın DNaz I, RNaz A ve proteinaz K enzimleri ile muamelesi**

Bu çalışmada, öncelikle izole edilen gDNA ve eDNA’ların konsantrasyonları 200 ng/mL olacak şekilde ayarlanmış olup, ardından DNaz I (Sigma DN25, ABD), RNaz A (Sigma R6513, ABD) ve proteinaz K (Sigma P2308, ABD) enzimleri ile muamele edilmişlerdir. Mikrotitre plakalara 10’ar µL DNA eklendikten sonra, DNaz I (1.45, 1.70, 2.50 ve 3.0 mg/mL), RNaz A (0.90 mg/mL) ve proteinaz K (0.85 mg/mL) enzimleri ilave edilerek 37 °C’de 1 saat inkübe edilmiştir. Enzim eklenmemiş örnekler, pozitif kontrol olarak kullanılmıştır. Enzimler ile muamele edilen ve edilmeyen DNA örnekleri, % 1.5’luk agaroz jelde 120 V’da 1 saat yürütüldükten sonra UV translüminatör ile görüntülenmiştir.

### **2.7. eDNA’nın *A. rubeus* biyofilmlerindeki rolünün araştırılması**

Bu uygulama, Grande vd. [19] tarafından önerilen yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Plakalara, toplam hacim 100 µL olacak şekilde, optimum koşullarda hazırlanan TSB besiyerinden 95 µL ve ön aktiveleme sonucu elde edilen son aktif kültürden 5 µL eklenerek, biyofilm örnekleme için plakalar 40 saat (olgun biyofilm) inkübasyona bırakılmıştır. Daha sonra, kuyular boşaltılarak, planktonik fazdaki bakteri hücrelerini uzaklaştırmak amacıyla iki defa SF ile yıkanmıştır. Biyofilm örneklerinin üzerine, 100 µL DNaz I enzimi (100 µg/mL; Sigma DN25, ABD) 2, 4, 8 ve 12 saat parametrelerinde eklenmiş ve 37 °C’de inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda kuyular boşaltılarak, enzim kalıntılarını gidermek için 2 kez SF ile yıkanmıştır. Ardından kristal viyole boyama deneyi uygulanarak biyofilmlere bağlanan boya miktarı Eliza’da spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. Pozitif kontrol olarak biyofilm örneklerinin üzerine DNaz I’in yerine DNaz I’in tamponu olan SF eklenmiştir.

### **2.8. Abiyotik yüzeyler üzerinde biyofilm oluşumunun belirlenmesi**

Bu çalışmada, polikarbonat, polipropilen, polistiren, polivinil klorür, paslanmaz çelik (R: 14 mm) ve cam (2.6 cm×2.0 cm×0.1 cm) gibi 6 farklı abiyotik yüzey kullanılmıştır. Bütün yüzeyler, besiyeri ortamına transfer edilmeden önce üzerlerindeki organik kalıntıları uzaklaştırmak için % 70 etanolde yıkanmış olup, daha sonra yüzeyler distile su ile iyice durulanarak paketlenmiş ve otoklavda (121 °C’de, 15 dk) sterilize edilmiştir. Çalışmada öncelikle hücre kültürü çalışmalarında kullanılan 6 kuyulu plaka kuyularına steril hale getirilmiş yüzeyler transfer edilmiştir. Daha sonra, kuyulara toplam hacim 4.5 mL olacak şekilde, içeriği optimize edilmiş 3.5’er mL TSB besiyeri ve biyofilm oluşumu için ön aktiveleme işleminden elde edilen son aktif kültürden 1’er mL eklenerek, plakalar 60 °C’de 48 saat süresince inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda yüzeyler aseptik koşullar altında kuyulardan uzaklaştırılmış ve planktonik hücrelerin uzaklaşması için SF ile yıkanmıştır. Yıkama işleminden sonra yüzeyler, 4.5 mL SF ve 10 gr cam boncuk (R: 3mm) içeren tüplere alınarak, yüzeylere öncelikle steril plastik öze ile kazıma

işlemi uygulanmış ve bu işlemten sonra biyofilm süspansiyonları maksimum hızda 2 dk boyunca vortekslenmiştir. Nihai noktada elde edilen biyofilm süspansiyonlarından koloni oluşturan birimi (kob/cm<sup>2</sup>) hesaplamak için, MI (Medium I) agar besiyerine damla plak yöntemi [20] ile ekim yapılmış ve petri ler 18 saat inkübe edilmiştir. Cam boncuk ile vorteksleme işlemi, Giaouris ve Nychas [21] tarafından tanımlanmış metod modifiye edilerek uygulanmıştır. Kullanılan 14 mm çaplı kuponların her iki dairesel yüzey alanı toplam 3.08 cm<sup>2</sup> olarak, cam yüzeyin alanı ise 10.4 cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Birim alana (cm<sup>2</sup>) düşen koloni oluşturan birimin hesaplanması için, toplam koloni oluşturan birim sayısı, yüzey alanına (kob/cm<sup>2</sup>) bölünmüştür. Belirlenen bu değerin logaritması alınarak sonuç log kob/cm<sup>2</sup> cinsinden hesaplanmıştır. Aynı örneğe ait iki kuponun iki paralelli çalışılmasıyla tüm yüzey için hesaplanan ortalama koloni sayısı belirlenmiştir. Negatif kontrol grupları olarak yalnızca besiyeri ve uygun yüzeyi ihtiva eden kuyular tasarlanmıştır.

### 2.9. Polistiren yüzeylerde oluşan biyofilm yapısının sanitasyon ajanları ile kontrolü

Polistiren yüzeylerde geliştirilen biyofilm yapısının giderimi için polisakkarit ve protein parçalayıcı, antimikrobiyal, pro-oksidadant, yeter sayı algılama (quorum-sensing) inhibisyon ajanlarını içeren 15 farklı sanitasyon ajanı kullanılmıştır. Bu ajanlar;  $\alpha$ -amilaz (Sigma A-4551, ABD), selülaz (Sigma C-1184, ABD), sodyum metaperiyodat (SM) (Sigma 71859, ABD), lizozim (Sigma L-7651, ABD), triklorasetik asit (TCA) (Sigma 27242, ABD), alkalın proteaz (AP) (Sigma P-4860, ABD), proteaz (Sigma P-3111, ABD), subtilizin (Sigma P-5380, ABD), tripsin (Sigma T-2600000, ABD), sodyum dodesil sülfat (SDS) (Sigma L-5750, ABD), nisin (Sigma N-5764, ABD), potasyum-monopersülfat (PM) (Sigma 228036, ABD), sodyum-tiyosülfat (ST) (Sigma 72049, ABD), 2(5H)-furanon (Sigma 283754, ABD) ve triklosan (Sigma LRAA-1072)'dir. Ajanların etkili dozlarının tespit edilmesinde Tablo 1'de atıf yapılan makalelerdeki miktar, sıcaklık ve süre parametreleri doğrudan kullanılmış veya daha etkili sonuçlar elde edilebilmesi için bazı ajanlarda koşullar yeniden belirlenmiştir. Biyofilm örneği, her bir kimyasal ve enzim ajanı ile tek başına muamele edilmiş olup, sadece PM ve ST ajanı kombine olarak uygulanmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan sanitasyon ajanları.

Ajanlar	Miktar	Sıcaklık	Süre	Referans
<b>Polisakkarit parçalayıcı ajanlar</b>				
$\alpha$ -Amilaz	% 1	37 °C	30 dk	[22]
Selülaz	% 1.66	37 °C	30 dk	[22]
Sodyum metaperiyodat	10 mM	22 °C	60 dk	[23]
Lizozim	% 2	37 °C	60 dk	[23]
TCA	% 10	100 °C	15 dk	[23]
<b>Protein parçalayıcı ajanlar</b>				
Alkalın proteaz	0.1 U/g	37 °C	60 dk	[22]
Proteaz	0.1 U/g	37 °C	60 dk	[22]
Subtilizin	% 1	37 °C	30 dk	[22]
Tripsin	% 3	37 °C	3 saat	[23]
SDS	% 3	100 °C	10 dk	[23]
<b>Antimikrobiyal ajan</b>				
Nisin	2 mg/ml	37 °C	24 saat	[23]
<b>Pro-oksidadant ajanlar</b>				
Potasyum-monopersülfat	2 mg/ml	22 °C	30 dk	[23]
Sodyum-tiyosülfat	1 mg/ml	22 °C	5 dk	
<b>Quorum-sensing inhibisyon ajanları</b>				
2(5H)-Furanon	1 mg/ml	22 °C	60 dk	[24]
Triklosan	2 mg/ml	22 °C	60 dk	[25]



Giderim çalışmaları için mikrotitrasyon plakalarına, toplam hacim 100 µL olacak şekilde, TSB besiyerinden 95 µL ve son aktif kültürden 5 µL eklenerek, 60 °C'de 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda, kuyulardaki besiyerleri boşaltılmış ve bağlanmayan hücreler ile hücre kalıntılarını gidermek için kuyular iki defa SF ile yıkanmıştır. Daha sonra, kuyulara tutunan biyofilmler ajanlar ile muamele edilmiştir. Daha sonra, kuyular boşaltılmış ve bu sefer ajanların kalıntılarını gidermek için 2 defa SF ile yıkanmıştır. Ardından, biyofilmlerin miktarını belirlemek üzere kristal viyole deneyi uygulanmış ve biyofilmlere bağlanan boya miktarı Eliza'da spektrofotometrik (OD595nm) olarak ölçülmüştür. Uygulanan temizleme rejiminin başarısı, bakterilere uygulanan her ajan için % giderim oranı cinsinden hesaplanmıştır. Sanitasyon ajanlarının *A. rubeus* DSM 17127<sup>T</sup> biyofilmleri üzerindeki etkinliğini değerlendirmek için aşağıdaki yüzde azalma formülü kullanılmıştır [26].

$$\text{Yüzde azalma (\%)} = [(C-B) - (T-B)] / [(C-B)] \times 100$$

B = Blank (biyofilm yok, enzim yok, besiyeri var)

C = Kontrol (biyofilm var, enzim yok)

T = Örnek (biyofilm var, enzim var)

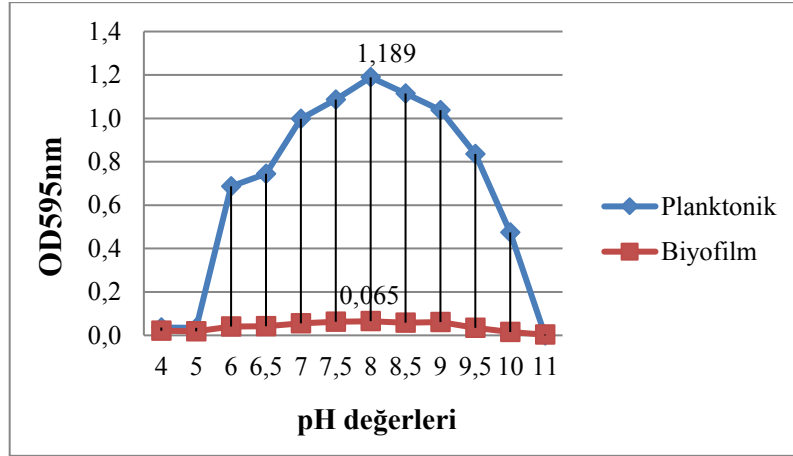
### 2.10. İstatistik analizler

Elde edilen sonuçların SPSS 17.0 istatistik program (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) ile değerlendirilmesinde, değerlerin ortalamaları arasındaki farkı anlamlandırmak için tek yönlü varyans analizleri (ANOVA) ile bu analizlerin ileri aşamaları olan ve her bir grubu ikili olarak karşılaştırmak için ise, Tukey ve Dunnet testleri uygulanmıştır.  $p < 0.05$  olasılık düzeyleri istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.

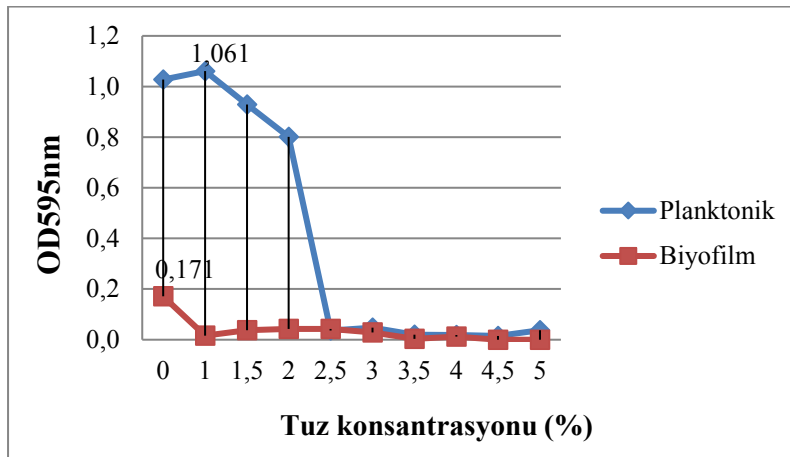
## 3. Sonuçlar ve tartışma

*Anoxybacillus* türlerinin çoğu termofilik olup, TSB-6 bakterisi hariç, gelişimleri için sıcaklık aralığı 30-75°C arasında değişmektedir. Türlerin birçoğu 50-65 °C arasında ise optimum gelişim göstermektedir. *Anoxybacillus amylolyticus* türü hariç, *Anoxybacillus* türleri alkalifilik veya alkalitolerant'dır ve türlerin çoğu nötral pH'da gelişim gösterebilmektedir [5, 27]. Bu çalışmada bakterinin planktonik gelişimi için gereksinim duyduğu optimum pH, tuz ve sıcaklık gereksinimleri 0, 6, 18, 24 ve 48. saatlerde OD595nm'de ölçülmüştür. Ardından, biyofilm gelişimi için gereken pH, tuz ve sıcaklık değerleri aynı plakanın, 48. saat sonunda kristal viyole bağlanma yönteminin uygulanmasıyla belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bakterinin planktonik gelişimi ve biyofilm oluşumu için gerekli optimum sıcaklık, pH ve tuzluluk değerleri TSB besiyerinde sırasıyla 55 °C (OD 0.980 ± 0.07), 8.0 (OD 1.189 ± 0.03), % 1.0 (OD 1.061 ± 0.03) ve 60 °C (OD 0.344 ± 0.02), 8.0 (OD 0.065 ± 0.02), % 0.0 (OD 0.171 ± 0.05) olarak tespit edilmiştir. Metabolik aktiviteleri için gerekli olan çevresel faktörlerden sadece pH değerleri, biyofilm oluşumu ideal değerler ile aynı bulunmuş olup, bakteri her iki durumda da alkali ortamı tercih etmiştir. Her ne kadar planktonik gelişimi için pH 5.5 ve 10.5 arası uygunsa da, biyofilm üretimi daha dar bir aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 1). Ayrıca, bakteri planktonik gelişim için sadece % 0.0-2.0 aralığındaki tuz konsantrasyonlarını tolere edebilmiş ve sadece % 1.0 oranında NaCl'ye gereksinim duymuş olup, ideal biyofilm üretimi için tuz ihtiva etmeyen düşük ozmolariteli ortamı tercih etmiştir (Şekil 2). Optimum sıcaklık isteğine bakıldığında ise, planktonik gelişimi için 55 °C, biyofilm oluşumu için ise 60 °C'yi tercih etmiştir (Şekil 3). Bununla birlikte, bakteri 50 ile 65 °C arasında hem gelişebilmiş, hem de biyofilm üretebilmiştir. Derekova

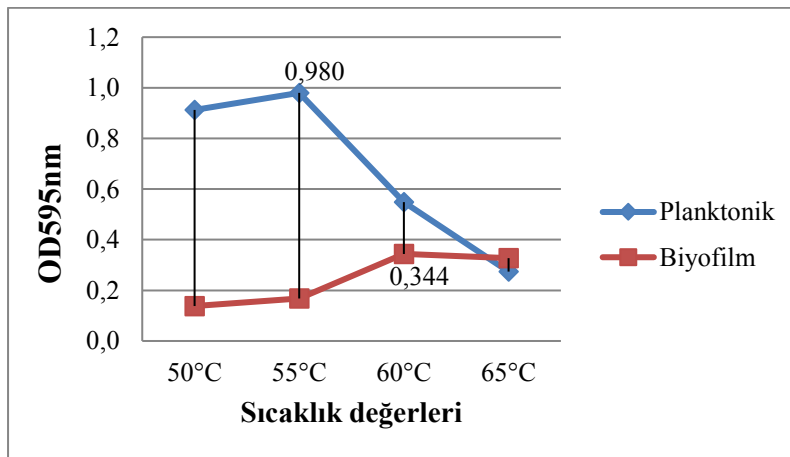
vd. [2] tarafından PY besiyerinde *A. rufipes* DSM 17127<sup>T</sup>'nin optimum gelişimi için gerekli sıcaklık 55 °C ve pH değeri ise 6.0-6.5 olarak belirlenmiştir. Cihan vd. [28] tarafından ise, bu bakterinin MI besiyerinde optimum gelişimi için gerekli sıcaklık 55 °C, pH 6.0-6.5 ve tuzluluk değerleri % 0.5 olarak bulunmuştur.



Şekil 1. Bakterinin planktonik gelişimi ve biyofilm oluşumu için ideal pH değerleri.



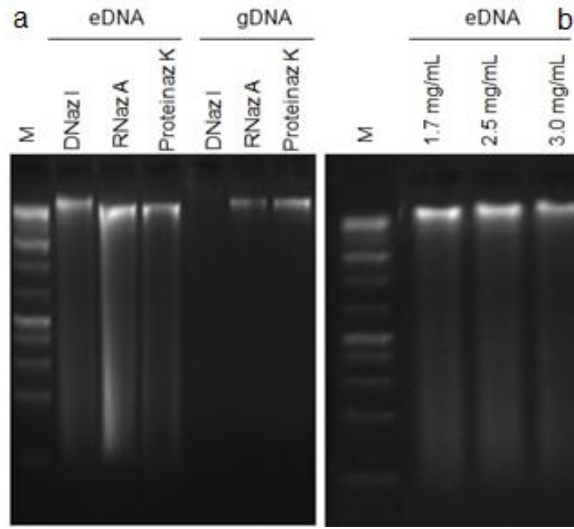
Şekil 2. Bakterinin planktonik gelişimi ve biyofilm oluşumu için ideal tuz değerleri.



Şekil 3. Bakterinin planktonik gelişimi ve biyofilm oluşumu için ideal sıcaklık değerleri.

eDNA ve gDNA'nın DNA konsantrasyonları (ng/ $\mu$ L) ve saflıklarını belirlemek için 260/280 ile 260/230 oranları nanodrop cihazı ile ölçülmüş olup, eDNA'nın varlığı agaroz jel elektroforezi ile tespit edilmiştir (Şekil 4). Elde edilen sonuçlara göre, gDNA'nın konsantrasyonu 1101.2 ng/ $\mu$ L, moleküler ağırlığı ise 27.6 kb olarak bulunmuştur. eDNA'nın konsantrasyonu ise, 766.8 ng/ $\mu$ L olup, moleküler ağırlığı 20.9 kb olarak bulunmuştur. Agaroz jel görüntülerinde de eDNA'nın, gDNA'dan farklı molekül ağırlıklarına sahip oldukları gözlenmiştir. Bakterinin gDNA'sının, eDNA'sından daha büyük olduğu görülmüştür.

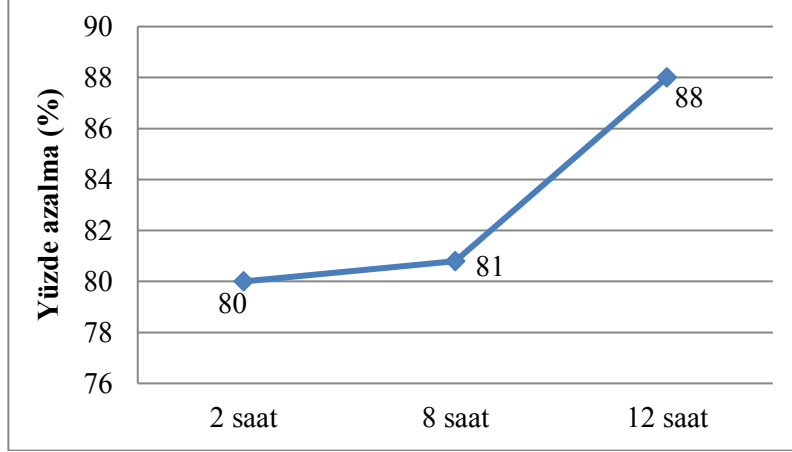
gDNA ve eDNA saflaştırıldıktan sonra üç enzim ile muamele edilmiştir. Sonuçlara göre, gDNA sadece DNaz I (1.45 mg/mL) ile tamamen parçalanmıştır. Bunu aksine, eDNA, DNaz I, RNaz A, ve proteinaz K enzimlerine direnç göstermiştir (Şekil 4a). Dahası, saf eDNA'lar, DNA, RNA ve proteinlere etki eden bu üç enzimle parçalanamamıştır. eDNA'nın DNaz I direncinin daha detaylı incelenebilmesi amacı ile, DNaz I'in konsantrasyonu 1.7, 2.5 ve 3.0 mg/mL olacak şekilde artırılmıştır. DNaz I konsantrasyonunun artırılmasına rağmen sonuçta bir değişiklik gözlenmemiştir. Saf eDNA'nın DNaz I enzimine dirençli olması dikkate değer bir bulgu olup artan enzim konsantrasyonlarına bağlı olarak da agaroz jelde kayma görülmesi de (shift) söz konusu olmuştur. Bu durumun ilave araştırmalarla aydınlatılması gerekmektedir (Şekil 4b). Gerek spektrofotometrik olarak, gerekse agaroz jel elektroforezi ile tespit edilen *A. rubeus* eDNA'sının birer DNA molekülü olarak varlıkları kesinleştirilmiştir.



Şekil 4. (a) gDNA ve eDNA'nın DNaz I (1.45 mg/mL), RNaz A (0.90 mg/mL), ve proteinaz K (0.85 mg/mL) ile muamelesi sonrası elde edilen agaroz jel görüntüleri. (b) eDNA'nın farklı konsantrasyonlarda DNaz I (1.7, 2.5, ve 3.0 mg/mL) enzimi ile muamele edilmesi. Markör (M), Thermo, Gene Ruler 1 kb Plus DNA Ladder, 75-20000 bp.

Biyofilm yapılarının 2., 8., ve 12. saatler de DNaz I ile muamelesi sonucu biyomastaki yüzde (%) azalma değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, eDNA'nın biyofilm yapısı içerisindeyken DNaz I enzimine duyarlı olduğu, ve enzim uygulamasının biyofilm kütlelerinde önemli bir oranda azalmaya sebep olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda enzimin 2 saat içerisinde etkisini gösterdiği gözlenmiştir. Dahası, enzim muamelesi biyofilm yapısını zayıflatmış ve biyofilme yaklaşık olarak % 80 oranında giderim sağlamıştır. Bu sonuç ile birlikte, bakterinin eDNA'sının olgun biyofilm matriksinin bütünlüğü ve sağlamlığı adına önemli bir yapısal rol oynadığı anlaşılmış ve

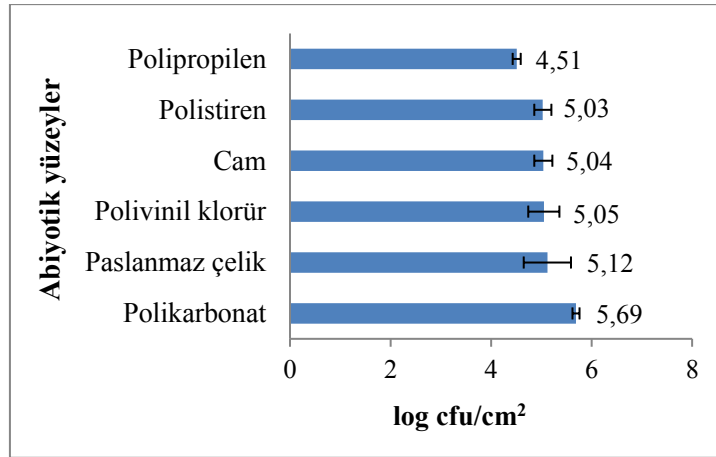
giderim çalışmalarında DNaz I enziminin kullanılabileceği belirlenmiştir. Son yıllardaki çalışmalarda eDNA'nın çoğu bakteri türlerinin biyofilmlerinin yapısı ve fonksiyonunda büyük bir rol oynadığı gösterilmiştir. DNaz I, eDNA'yı parçalamaktadır. Dahası, DNaz I adhezin gibi fonksiyon gören hücre yüzeyindeki nükleik asitleri parçalayabilmekte, böylece biyofilm üretimi için elzem olan hücre tutunması engellemektedir [13].



Şekil 5. Olgun biyofilmin DNaz I ile muamelesi sonrası biyofilm miktarındaki azalma.

Saflaştırılan eDNA'nın DNaz I'e direnci, saflaştırma aşamasında kullanılan kimyasal muamelelerden sonra karbonhidrat ve protein bileşenlerinin bulunmaması ile eDNA'nın yeniden düzenlenerek ilave katlanmalarla daha sıkı bir katlanma özelliği kazanmış olması ve yoğun bir üç boyutlu yapı oluşturması ile enzimin hedef DNA'ya erişememesi olasılığı ile açıklanabilir. Daha önce yapılan çalışmalarda olgun biyofilmler üzerine DNaz I'in etki ettiği ve etmediği sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmaların bir çoğu, DNaz I'in çoğu mezofilik bakteri ve mantarların biyofilm gelişimlerini engelleyebildiğini ve dağıtabildiğini göstermiştir [29, 30, 31, 32, 33]. Diğer taraftan, mezofilik bakterilerin biyofilmlerinin eDNA içeriğinin DNaz I'e dirençli olduğunu gösteren pek çok çalışma mevcuttur [19, 34, 35]. Ancak, şu ana kadar literatürde eDNA saflaştırıldıktan sonra DNaz I direncinin kazanıldığına dair herhangi bir sonuç bulunamamıştır. Bu, termofilik bir bakteride izole edilen eDNA'nın termostabilitesi ile bağlantılı olabilir.

Paslanmaz çelik yüzeyler üzerinde termofilik basillerin biyofilm oluşumu üzerine bazı çalışmalar mevcuttur [8, 36]. Termofilik *A. flavithermus* ve *Geobacillus* paslanmaz çelik yüzeyler üzerine tutunabilir ve biyofilm oluşturabilmektedir [37]. Sadiq vd. [38] tarafından süt tozu içeren ortamda paslanmaz çelik kuponlar üzerinde *A. flavithermus*'un hücre sayısı  $5.3 \log \text{ kob/cm}^2$  olarak bulunmuştur. Ancak, bu hücre sayısının TSB besiyeri (yaklaşık  $2.2 \log \text{ kob/cm}^2$ ) ile karşılaştırıldığında azaldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, bakterinin polikarbonat, polipropilen, polivinil klorür, paslanmaz çelik, polistiren ve cam tabiatında olan 6 farklı abiyotik yüzeyde oluşturdukları biyofilmdeki koloni sayımlarının hücre yüzey alanlarına bölünmesiyle elde edilen oranlar ( $\log \text{ kob/cm}^2$ ) belirlenmiştir (Şekil 6). Elde edilen sonuçlara göre, bakterinin 6 yüzeye de tutunduğu gözlenmiş olup, hidrofobik ve düşük yüzey enerjili bir materyal olan polikarbonat ( $5.69 \log \text{ kob/cm}^2$ ) hücre tutunması için en ideal abiyotik yüzey olarak belirlenmiştir. Ayrıca, hidrofilik, pürüzsüz ve pozitif yüzey yüküne sahip paslanmaz çelik ( $5.12 \log \text{ kob/cm}^2$ ) ise, tutunma için ikinci en uygun yüzey olarak saptanmıştır. Bakteri ile yüzeyler üzerinde oluşturdukları biyofilm oranları arasındaki korelasyon istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ( $p < 0.05$ ).

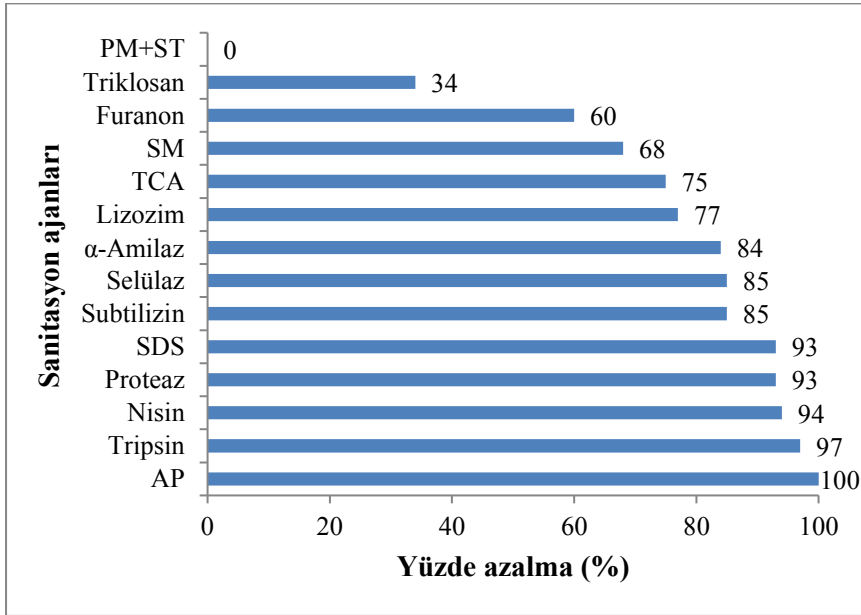


Şekil 6. Bakterinin farklı abiyotik yüzeylerde oluşturduğu biyofilmlerdeki koloni sayılarının yüzey alanına oranları.

Biyofilm kontrolü için temel olarak proteazları ve polisakkariti hidroliz eden enzimler kullanılabilir [9]. Proteolitik enzimler, biyofilm ile ilişkili proteinleri depolimerize etmektedir [39]. Bu çalışmada en etkin bileşenin alkalin proteaz (% 100) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7). Enzimatik muameleye tabi tutulan biyofilmin matriks proteinlerinin alkalin proteaz ve subtilizin gibi serin proteazlarca etkin bir şekilde yıkıma uğradığı görülmüştür. Her ikisi de endopeptidazdır ve proteinlerin peptit bağlarını yıkar ve serin proteazların aktif bölgelerindeki nükleofilik aminoasitler olarak görev yaparlar [40]. Bir çalışmada, purafect olarak adlandırılan bir subtilizin türeği ile paslanmaz çelik kuponların yüzeyleri üzerinde oluşan *A. flavithermus* B12-C<sup>m</sup> biyofilmlerinin % 100 giderilmesinde başarı sağlanamamış; ancak canlılığın azaldığı saptanmıştır [22]. Loïselle ve Anderson [39] tarafından cam yüzeyler üzerinde oluşan *Pseudomonas aeruginosa* biyofilmi kısmi olarak selülaz ile giderilmiştir. Molobela vd. [41] tarafından *Pseudomonas fluorescens* biyofilmleri üzerinde ticari proteaz ve amilazların etkisi değerlendirilmiş ve proteazların amilazlardan daha etkili olduğunu bulmuşlardır. Bizim çalışmamızda da, *A. rufiensis* biyofilmleri üzerinde proteazın amilazdan daha etkili olduğu gözlenmiştir. SDS, süt ve süt ürünlerinin işlendiği gıda çevrelerinde sanitasyon ajanı olarak kullanılmaktadır. Parkar vd. [23] tarafından SDS'in paslanmaz çelik yüzeyi üzerindeki *A. flavithermus* B12-C<sup>m</sup> biyofilmini % 80 oranında azalttığı ve sadece sporların hayatta kaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise, polistiren mikrotitrasyon plakalar üzerinde oluşan *A. rufiensis* biyofilm kütlelerinin SDS ile % 93 oranında azaldığı görülmüştür. Chen ve Stewart [42] tarafından *P. aeruginosa* ve *Klebsiella pneumoniae* bakterilerine uygulanan lizozim ile canlı hücre sayısında % 87 azalma olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada, *A. rufiensis* biyofilmleri üzerinde lizozimin etkisi % 77 oranında saptanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, pro-oksidan ajanı PM+ST (% 0) ve yeter sayı algılama (quorum-sensing) inhibisyon ajanı triklosan (% 34) dışında diğer ajanların bu bakterinin biyofilm yapısının giderimi için kayda değer derecede etki sağladığı gözlenmiştir. Yüzde giderim oranlarına bakıldığında, biyofilm kütlelerinin gideriminde protein parçalayıcı sanitasyon ajanlarının polisakkarit parçalayıcı ajanlardan daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir. Protein parçalayıcı ajanların etkisinin yüzde oranı sırasıyla; AP (% 100), tripsin (% 97), proteaz (% 93), SDS (% 93), subtilizin (% 85)'dir. Polisakkarit parçalayıcı ajanların etkisinin yüzde oranı ise sırasıyla; selülaz (% 85),  $\alpha$ -amilaz (% 84), lizozim (% 77), TCA (% 75), SM (% 68)'dir. Gram-pozitif *A. rufiensis* bakterisinin biyofilm kontrolü için antimikrobiyal ajan nisinin (% 94) önemli bir etkiye sahip olduğu

belirlenmiştir. Quorum-sensing inhibisyon ajanları olarak kullanılan 2(5H)-furanonun (% 60) triklosana (% 34) oranla daha çok etki sağladığı gözlenmiştir. Triklosan ayrıca antimikrobiyal ajan olarak da kullanılmaktadır.



Şekil 7. Biyofilmin sanitasyon ajanları ile muamelesi sonucunda biyofilm miktarındaki azalma yüzdeleri.

Sonuç olarak bu çalışmada, *A. rupiensis* biyofilmleri üzerinde sanitasyon ajanlarının etkisi gözlemlenmiş ve polistiren yüzeylerden başarıyla termofilik biyofilmlerin yok edilmesi sağlanmıştır. Bu bulguların pek çok endüstriyel süreçte sorun teşkil eden termofilik basil biyofilmlerinin kontrolünde kullanılarak sorunların çözümüne odaklı yaklaşımların sağlanacağı ön görülmektedir. Dahası, polistiren mikrotitrasyon plakalarında küçük hacimde yürütülen bu çalışmalar sonucunda, *A. rupiensis*'in biyofilm kütlelerinin, kullanılan ajanlardan hangisi uygulandığında en çok giderilebileceğine dair net veriler elde edilmiştir. Ayrıca, çalışmada endüstride sıklıkla kullanılan abiyotik yüzeyler üzerinde, termofilik basil *A. rupiensis*'in biyofilm oluşturma yeteneğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda ileriki çalışmalarda termofilik basil biyofilmlerinin abiyotik yüzeyler üzerinden giderimi için enzim-deterjan veya enzim-surfaktan gibi sanitasyon rejim kombinasyonları belirlenerek sinerjistik etkilerinin test edilmesi önerilmektedir.

### Teşekkür

Bu makale, Prof. Dr. Arzu ÇÖLERİ CİHAN danışmanlığında Tuğba KILIÇ'ın doktora tez çalışmasının bir bölümünü içermekte olup, finansal olarak Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir. Proje No: 14B0430003.

### Kaynaklar

- [1] Pikuta, E., Lysenko, A., Chuvilskaya, N., Mendrock, U., Hippe, H., Suzina, N., Nikitin, D., Osipov, G. ve Laurinavichius, K., *Anoxybacillus pushchinensis* gen. nov., sp. nov., a novel anaerobic, alkaliphilic, moderately thermophilic bacterium from manure, and description of *Anoxybacillus flavitherms* comb. nov.,

- International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, 50, 6, 2109-2117, (2000).
- [2] Derekova, A., Sjöholm, C., Mandeva, R. ve Kambourova, M., *Anoxybacillus rupiensis* sp. nov., a novel thermophilic bacterium isolated from Rupi basin (Bulgaria), **Extremophiles**, 11, 4, 577-583, (2007).
- [3] Jabeen, F., Muneer, B. ve Qazi, J. I., Characterization of thermophilic bacteria *Anoxybacillus rupiensis* and cultivation in agroindustrial wastes isolated from hot spring in Chakwal, Pakistan, **Pakistan Journal of Zoology**, 51, 4, 1243-1250, (2019).
- [4] Al-Jailawi, M. H., Mahdi, S. M. ve Fadil, A. M., Thermophilic bacteria isolated from hydrocarbon contaminated soils in Iraq, **International Journal of Biotechnology, Photon**, 111, 275-283, (2013).
- [5] Goh, K. M., Kahar, U. M., Chai, Y. Y., Chong, C. S., Chai, K. P., Ranjani, V., Illias, R. M. ve Chan, K., Recent discoveries and applications of *Anoxybacillus*, **Applied Microbiology and Biotechnology**, 97, 4, 1475-1488, (2013).
- [6] Cihan, A. C. ve Yildiz, E. D., General characteristics, taxonomic studies and biotechnological importance of the genus *Anoxybacillus*, **Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series C Biology**, 25, 1-2, 56-82, (2016).
- [7] Burgess, S. A., Lindsay, D. ve Flint, S. H., Thermophilic bacilli and their importance in dairy processing, **International Journal of Food Microbiology**, 144, 2, 215-225, (2010).
- [8] Burgess, S. A., Brooks, J. D., Rakonjac, J., Walker, K. M. ve Flint, S. H., The formation of spores in biofilms of *Anoxybacillus flavithermus*, **Journal of Applied Microbiology**, 107, 3, 1012-1018, (2009).
- [9] Meyer, B., Approaches to prevention, removal and killing of biofilms, **International Biodeterioration and Biodegradation**, 51, 4, 249-253, (2003).
- [10] Simões, M., Simões, L. C. ve Vieira, M. J., A review of current and emergent biofilm control strategies, **LWT-Food Science and Technology**, 43, 4, 573-583, (2010).
- [11] Gibson, H., Taylor, J. H., Hall, K. E. ve Holah, J. T., Effectiveness of cleaning techniques used in the food industry in terms of the removal of bacterial biofilms, **Journal of Applied Microbiology**, 87, 1, 41-48, (1999).
- [12] Torres, C. E., Negro, C., Fuente, E. ve Blanco, A., Enzymatic approaches in paper industry for pulp refining and biofilm control, **Applied Microbiology and Biotechnology**, 96, 2, 327-344, (2012).
- [13] Cordeiro, A. L. ve Werner, C., Enzymes for antifouling strategies, **Journal of Adhesion Science and Technology**, 25, 17, 2317-2344, (2011).
- [14] Cihan, A. C., Karaca, B., Ozel, B. P. ve Kilic, T., Determination of the biofilm production capacities and characteristics of members belonging to Bacillaceae family, **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, 33, 6, 118, (2017).
- [15] Bridier, A., Briandet, R., Thomas, V. ve Dubois-Brissonnet, F., Resistance of bacterial biofilms to disinfectants: a review, **Biofouling**, 27, 9, 1017-1032, (2011).
- [16] Woodward, M. J., Sojka, M., Sprigings, K. A. ve Humphrey, T. J., The role of SEF14 and SEF17 fimbriae in the adherence of *Salmonella enterica* serotype Enteritidis to inanimate surfaces, **Journal of Medical Microbiology**, 49, 5, 481-487, (2000).

- [17] Stepanović, S., Vuković, D., Dakić, I., Savić, B. ve Švabić-Vlahović, M., A modified microtiter-plate test for quantification of staphylococcal biofilm formation, **Journal of Microbiological Methods**, 40, 2, 175-179, (2000).
- [18] Wilson, K., Preparation of genomic DNA from bacteria, **Current Protocols in Molecular Biology**, 56, 1, 2-4, (2001).
- [19] Grande, R., Di Giulio, M., Bessa, L. J., Di Campli, E., Baffoni, M., Guarnieri, S. ve Cellini, L., Extracellular DNA in *Helicobacter pylori* biofilm: a backstairs rumour, **Journal of Applied Microbiology**, 110, 2, 490-498, (2010).
- [20] Herigstad, B., Hamilton, M. ve Heersink, J., How to optimize the drop plate method for enumerating bacteria, **Journal of Microbiological Methods**, 44, 2, 121-129, (2001).
- [21] Giaouris, E. ve Nychas, G. J., The adherence of *Salmonella* Enteritidis PT4 to stainless steel: the importance of the air-liquid interface and nutrient availability, **Food Microbiology**, 23, 8, 747-752, (2006).
- [22] Parkar, S., Flint, S. ve Brooks, J. D., Evaluation of the effect of cleaning regimes on biofilms of thermophilic bacilli on stainless steel, **Journal of Applied Microbiology**, 96, 1, 110-116, (2004).
- [23] Parkar, S., Flint, S. ve Brooks, J., Physiology of biofilms of thermophilic bacilli-potential consequences for cleaning, **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, 30, 9, 553-560, (2003).
- [24] Ponnusamy, K., Paul, D., Kim, Y. S. ve Kweon, J. H., 2 (5H)-Furanone: a prospective strategy for biofouling-control in membrane biofilm bacteria by quorum sensing inhibition, **Brazilian Journal of Microbiology**, 41, 1, 227-234, (2010).
- [25] Tabak, M., Scher, K., Hartog, E., Romling, U., Matthews, K. R., Chikindas, M. L. ve Yaron, S., Effect of triclosan on *Salmonella typhimurium* at different growth stages and in biofilms, **FEMS Microbiology Letters**, 267, 2, 200-206, (2007).
- [26] Pitts, B., Hamilton, M. A., Zelver, N. ve Stewart, P. S., A microtiter-plate screening method for biofilm disinfection and removal, **Journal of Microbiological Methods**, 54, 2, 269-276, (2003).
- [27] Margaryan, A., Shahinyan, G., Hovhannisyan, P., Panosyan, H., Birkeland, N. K. ve Trchounian, A., *Geobacillus* and *Anoxybacillus* spp. from terrestrial geothermal springs worldwide: Diversity and biotechnological applications, In D. Egamberdieva, N. Birkeland, H. Panosyan, ve W. Li (Ed.), **Extremophiles in eurasian ecosystems: ecology, diversity, and applications**, pp. 119-166, (2018).
- [28] Cihan, A. C., Cokmus, C., Koc, M. ve Ozcan, B., *Anoxybacillus calidus* sp. nov., a thermophilic bacterium isolated from soil near a thermal power plant, **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, 64, 1, 211-219, (2014).
- [29] Whitchurch, C. B., Tolker-Nielsen, T., Ragas, P. C. ve Mattick, J. S., Extracellular DNA required for bacterial biofilm formation, **Science**, 295, 5559, 1487-1487, (2002).
- [30] Tetz, G. V., Artemenko, N. K. ve Tetz, V. V., Effect of DNase and antibiotics on biofilm characteristics, **Antimicrobial Agents and Chemotherapy**, 53, 3, 1204-1209, (2009).
- [31] Nijland, R., Hall, M. J. ve Burgess, J. G., Dispersal of biofilms by secreted, matrix degrading, bacterial DNase, **PloS One**, 5, 12, e15668, (2010).
- [32] Harmsen, M., Lappann, M., Knochel, S. ve Molin, S., Role of extracellular DNA during biofilm formation by *Listeria monocytogenes*, **Applied and Environmental Microbiology**, 76, 7, 2271-2279, (2010).



- [33] Martins, M., Uppuluri, P., Thomas, D. P., Cleary, I. A., Henriques, M., Lopez-Ribot, J. L. ve Oliveira, R., Presence of extracellular DNA in the *Candida albicans* biofilm matrix and its contribution to biofilms, **Mycopathologia**, 169, 5, 323-331, (2010).
- [34] Lappann, M., Claus, H., Van Alen, T., Harmsen, M., Elias, J., Molin, S. ve Vogel, U., A dual role of extracellular DNA during biofilm formation of *Neisseria meningitides*, **Molecular Microbiology**, 75, 6, 1355-1371, (2010).
- [35] Shields, R. C., Mokhtar, N., Ford, M., Hall, M. J., Burgess, J.G., ElBadawey, M. R. ve Jakubovics, N. S., Efficacy of a marine bacterial nuclease against biofilm forming microorganisms isolated from chronic rhinosinusitis, **PLoS One**, 8, 2, e55339, (2013).
- [36] Flint, S., Palmer, J., Bloemen, K., Brooks, J. ve Crawford, R., The growth of *Bacillus stearothermophilus* on stainless steel, **Journal of Applied Microbiology**, 90, 2, 151-157, (2001).
- [37] Somerton, B., Flint, S., Palmer, J., Brooks, J. ve Lindsay, D., Preconditioning with cations increases the attachment of *Anoxybacillus flavithermus* and *Geobacillus* species to stainless steel, **Applied and Environmental Microbiology**, 79, 13, 4186-4190, (2013).
- [38] Sadiq, F. A., Flint, S., Yuan, L., Li, Y., Liu, T. ve He, G., Propensity for biofilm formation by aerobic mesophilic and thermophilic spore forming bacteria isolated from Chinese milk powders, **International Journal of Food Microbiology**, 262, 89-98, (2017).
- [39] Loiselle, M. ve Anderson, K. W., The use of cellulase in inhibiting biofilm formation from organisms commonly found on medical implants, **Biofouling**, 19, 2, 77-85, (2003).
- [40] Hedstrom, L., Serine protease mechanism and specificity, **Chemical Reviews**, 102, 12, 4501-4524, (2002).
- [41] Molobela, I. P., Cloete, T. E. ve Beukes, M., Protease and amylase enzymes for biofilm removal and degradation of extracellular polymeric substances (EPS) produced by *Pseudomonas fluorescens* bacteria, **African Journal of Microbiology Research**, 4, 14, 1515-1524, (2010).
- [42] Chen, X. ve Stewart, P. S., Biofilm removal caused by chemical treatments, **Water Research**, 34, 17, 4229-4233, (2000).

# Bisiklet paylaşım istasyonlarının belirlenmesi: CBS tabanlı çok kriterli karar verme yaklaşımı

Elif ALKILINÇ<sup>1,\*</sup>, Şehnaz CENANİ<sup>2</sup>, Gülen ÇAĞDAŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fak. Mimarlık Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir

<sup>2</sup>İstanbul Medipol Üniversitesi Güzel Sanatlar Tasarım ve Mimarlık Fak. Mimarlık Böl., Kavacık yerleşkesi, İstanbul

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi Mimarlık Fak. Mimarlık Böl., Taşkışla kampüsü, İstanbul

Geliş Tarihi (Received Date): 17.08.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 13.01.2021

## Öz

Dünya genelinde bisiklet kullanımını artırmak için bisiklet paylaşım sistemleri uygulanmaktadır. Bisiklet paylaşım istasyonlarına olan potansiyel talep ve istasyonların yerlerinin uygun şekilde seçilmesi, bu sistemlerin başarısını yüksek derecede etkilemektedir. Genç nüfusun fazla ve bisiklet kullanımı açısından mesafelerin elverişli olduğu üniversite kampüsleri çalışmanın alanını belirlemektedir. Bu çalışmada, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsünde bisiklet rotalarının ve paylaşım istasyonlarının en uygun şekilde belirlenmesi için coğrafi bilgi sistemi (CBS) tabanlı çok kriterli bir karar verme sistemi önerilmektedir. Bu kapsamda öncelikle, coğrafi bilgi sistemlerinden yararlanılarak kampüsteki bisiklet rotaları belirlenmiştir. Sonrasında ise CBS ve kullanımı oldukça yaygın çok kriterli bir karar verme yöntemi olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) birlikte kullanılarak kampüsteki öğrenci ve personelin kullanımına en uygun bisiklet paylaşım istasyonlarının belirlenmesine çalışılmıştır. Önerilen bisiklet paylaşım sistemiyle çevresel ve sosyal açılardan kampüsün daha verimli bir ortama dönüştürülmesi, öğrenci ve personele de fiziksel ve ruhsal açılardan daha sağlıklı bir ortam sunulması hedeflenmiştir. Çağış kampüsünde yapılan çalışma kapsamında, kullanılan yöntemin en uygun bisiklet paylaşım istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi noktasında verimlilik sağladığı ve kampüs içerisinde daha dinamik ve çevre dostu bir ulaşım imkanı oluşturduğu düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Bisiklet paylaşım istasyonları, kampüs bisiklet paylaşımı, CBS, AHP.

\* Elif ALKILINÇ, elif.alkilinc@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-9260-6039>  
Şehnaz CENANİ, sdurmazoglu@medipol.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-8111-586X>  
Gülen ÇAĞDAŞ, cagdas@itu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-8853-4207>

## Determination of bicycle sharing stations: GIS-based multi-criteria decision making approach

### Abstract

*Bicycle sharing systems are implemented to increase the use of bicycles worldwide. The potential demand for bicycle sharing stations and the appropriate selection of the locations of the stations profoundly affect the success of these systems. University campuses with a high young population and convenient distances for bicycle use, determine the sphere of the study. In this study, a geographic information system (GIS) based multi-criteria decision-making system is proposed to determine the bicycle routes and sharing stations in Balıkesir University Cagis Campus in the most appropriate way. In this context, primarily, cycling routes in the campus are determined by using geographic information systems. Afterwards, GIS and Analytical Hierarchy Process (AHP), which is a widely used multi-criteria decision-making method, is used together to determine the most appropriate bike sharing stations for the use of students and staff on campus. With the recommended bike sharing system, it is aimed to transform the campus into a more efficient atmosphere in environmental and social terms, and to provide a healthier environment for students and staff in terms of physical and mental aspects. Within the scope of the study carried out on the Cagis Campus, it is thought that the method used provides efficiency in determining the locations of the most proper bike sharing stations and constitutes a more dynamic and environmentally friendly transportation opportunity within the campus.*

**Keywords:** *Bike sharing stations, campus bike sharing, GIS, AHP.*

### 1. Giriş

Kentlerdeki yoğunlaşmanın sonucunda ortaya çıkan çevre ve yaşam kalitesindeki olumsuzluklarla başa çıkabilmek için, son yıllarda gelişen modern bilgi teknolojileriyle birlikte kentlerin daha akıllı ve verimli olması üzerine çalışmalar artmaktadır. Benevolo v.d. [1] çalışmalarında kentlerin hem fırsat hem de hastalık mekanları olduğunu söylemektedir. Kentlerin, trafik, kirlilik ve atık üretiminin diğer yaşam alanlarından çok daha fazla olduğunu, bu nedenle hastalık ürettiklerini vurgulamaktadırlar. Kentsel alanda yaşam kalitesini artırmak için teknolojiyi kullanan “akıllı kent” kavramı ise hem çevresel kaliteyi iyileştiren hem de vatandaşlara daha iyi hizmetler sunan bir kentsel strateji olarak kabul edilmektedir. Akıllı kent kavramı, çevre, günlük yaşam, kamu güvenliği, şehir hizmetleri gibi geniş bir alanda ele alınmaktadır. Kentsel alanlarda yaşam kalitesini artırmayı hedefleyen akıllı kentlerin önemli bir boyutu da “akıllı mobilite / hareketlilik” kavramıdır [1-2]. Birçok çalışma mevcut kentlerin çoğundaki ulaşım sisteminin sürdürülemez olduğunu, hatta gelecek nesiller için bir tehdit oluşturduğunu göstermektedir [3]. Bu nedenle ortaya çıkan akıllı mobilite, kentin çevresel etkisini azaltmayı ve vatandaşlara daha iyi bir kent yaşamı sunmayı amaçlamaktadır. Akıllı mobilite, kentin en önemli özelliklerinden biri olan hareketliliğin ortaya çıkardığı trafik, kirlilik, zaman ve maliyet kaybı gibi olumsuz etkileri ortadan kaldırmaya odaklandığından akıllı kentlerin en umut verici konularından biridir [1].

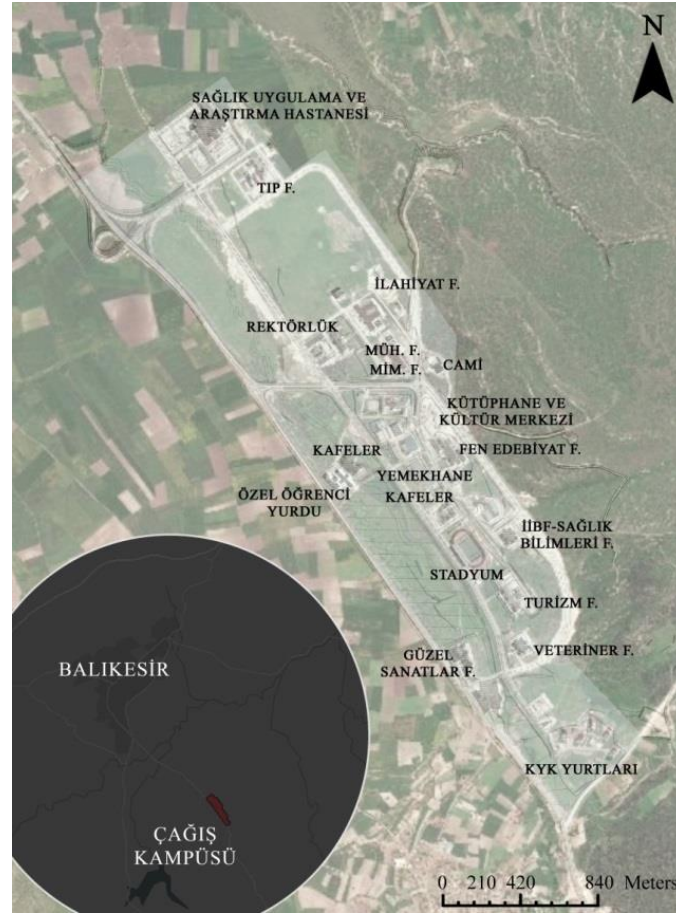
Literatürde en önemli akıllı mobilite hedefleri, kirliliğin, trafik sıkışıklığının ve gürültü kirliliğinin azaltılması, güvenlik artışı, işe (okula) gidip gelme hızının iyileştirilmesi, ulaşım maliyetlerinin düşürülmesi olarak altı kategoride toplanmıştır [1, 4]. Bu noktada, belirtilen hedeflerin hemen hepsini sağlayan bisikletin kent içi ulaşımında kullanımını artırmaya yönelik çalışmalar dünya genelinde artmaktadır. Bu noktada, Bamwesigye ve Hlavackova [3], akıllı mobilitenin bisiklet ve bu ulaşım türünün cinsiyete göre kullanımı gibi yönlerini Hollanda ve Almanya; Kenya ve Uganda ülkelerinde karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Makarova v.d. [5] ise akıllı şehirlerdeki bisiklet taşımacılığını artırmaya yönelik, fiziksel gereksinimlerin azaltılarak kullanıcı sayısını artırmayı hedefleyen bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Yeşil, sürdürülebilir, ucuz, çevre dostu ve sağlıklı yaşam tarzını teşvik eden bisikletin akıllı mobiliteyi destekleyen bir ulaşım türü olarak tüm dünyada popülaritesi artmaktadır [5]. Bisiklet kullanımı konusundaki teşvik ve uygulamalar birçok üniversite kampüsünde de kendini göstermektedir. Çevresel, toplumsal ve bireysel ölçekte faydaları olan bisiklet kullanımı için kampüs içlerinde de bisiklet rotaları oluşturulmakta, bisiklet paylaşım sistemleri kurulmaktadır. Bisikletlere ücretsiz veya uygun fiyatlı erişim sağlanabilen bisiklet paylaşım sistemleri, kampüs içi yolculuklar için otomobil kullanımını ve böylece trafik sıkışıklığını ve gürültü / hava kirliliğini azaltmak için kullanılmaktadır. Bu sistemler yenilikçi bir ulaşım metodu olarak görülmekte, akıllı kentlerin bir parçası haline gelmektedir [6]. En eski bisiklet paylaşım sistemi 1965 yılında Amsterdam, Hollanda'da uygulanmıştır (Beyaz bisiklet planı) [6]. O zamandan sonra da, sistemler gelişerek ve değişerek çeşitli uygulamaları sunulmuştur [7]. Bu bisiklet paylaşım sistemlerinin daha büyük bir bisiklet kullanıcısı popülasyonu yaratması, sera gazlarının azaltılması ve halk sağlığının iyileştirilmesi üzerinde derin etkileri olmuştur [8].

Balıkesir özelinde de topoğrafya ve kent içi mesafeler bisiklet için oldukça uygun olmasına rağmen, bisiklet kullanımı çok yaygın değildir. Balıkesir kent merkezindeki bu durum ile birlikte, kentten 17 km. uzaklıkta olan Balıkesir Üniversitesi Çağış kampüsünde (Şekil 1) daha da az bisiklet kullanımı görülmektedir. Bunun başlıca nedenlerinden bazıları, kent merkezine uzaklık dolayısıyla kişisel bisikletlerle kampüse ulaşımın zor olması, kampüs içinde bisiklete bir tamirat gerektiğinde bir bakım alanının olmaması olarak sayılabilir. Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsünde bisiklet paylaşım sisteminin getireceği aşağıdaki avantajlar çalışmanın ana motivasyonunu oluşturmaktadır:

- Bisikletin kampüs içi ulaşımı gibi kısa mesafeli yolculuklar için uygun olması,
- Bisiklet sürmenin seyahatten keyif alınmasına ve kullanıcıların (öğrencilerin ve personelin) fiziksel ve ruhsal sağlığına katkıda bulunabileceğinin öngörülmesi,
- Kampüsteki otopark sorununun azalması ve böylece yoğun bir şekilde park etmiş araç görüntüsünün ve araç park yeri bulamama sorunlarının azalması, dolayısıyla binaların önünde bulunan açık alanların otopark yerine daha verimli ve sosyal bir şekilde kullanımının mümkün olması,
- Toplu etkileşimi sağlamak adına, farklı fakülteler arasında personel ve öğrenci iletişiminin artmasına katkı sağlaması,
- Ekolojik açıdan gürültü ve kirliliğin azalması, yeşil alanlara daha fazla yer verilebilmesi ve kampüsün yaşam kalitesinin artırılması ile birlikte, kampüsün daha yaşanır ve canlı hale gelmesi [9].

Çalışmada, Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsünde, bisiklet rotaları belirlenerek, uygun bisiklet paylaşım istasyonları yerlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Böylece kurulabilecek olan bisiklet paylaşım sistemi ile birlikte kişisel bisiklete ihtiyaç olmadan, öğrenciler ve üniversite personeli kampüs içinde ulaşım aracı olarak bisiklet kullanabileceklerdir. Bisikletin kampüsteki ana ulaşım aracına dönüşmesiyle, kampüs içi ulaşımı daha elverişli ve keyifli hale getirip, daha canlı bir kampüs hayatı oluşmasına katkıda bulunması hedeflenmektedir. Bu sayede sürdürülebilir ulaşım yöntemlerinin kullanımının desteklenerek, karbon emisyon salınımının azaltılması, günümüzde akıllı kentler ile ilgili yapılan çalışmaların ana hedeflerinden olan yaşanabilirliğin (livability) ve yaşam kalitesinin (quality of life) paylaşımli bisiklet sisteminin oluşturulması ile artırılması da çalışmanın ana hedefleri arasındadır.



Şekil 1. Çağış Kampüsü konumu [10].

Bu hedef doğrultusunda, çalışma kapsamında ilk olarak muhtemel bisiklet rotaları oluşturulmuş ve farklı verilerin işlenmesini gerektiren bisiklet paylaşım istasyonları yer seçimi için, metodolojik olarak coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve çok kriterli karar verme yöntemleri birlikte kullanılmışlardır. Bu noktada, CBS sayısal verilerin haritalar yardımıyla görsel hale getirilmesinde yardımcı olmak için kullanılırken; çok kriterli karar verme yöntemleri ise değerlendiricilere nitel verilerin hakim olduğu karar verme işlemlerinde yardımcı olmak için 1960'lerden beri geliştirilerek kullanılmaktadır [11].

Çalışmanın izleyen bölümünde konu ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiş, üçüncü bölümde ise bisiklet rotaları ve paylaşım istasyonlarının belirlenmesinde kullanılacak olan yöntem ve metodolojiden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, kampüs

içinde bisiklet rotalarının ve bisiklet paylaşım istasyonları için en uygun yerlerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen analizler, değerlendirmeler ve bunlar sonrasında ulaşılan sonuçlar ele alınacak, son bölümde ise sonuçlar kısaca tartışılacaktır.

## 2. Literatür incelemesi

Bisiklet kullanımını teşvik amaçlı kurulan ve son yıllarda oldukça artan bisiklet paylaşım sistemlerinin başarısı için, belirlenen rotalar ve istasyon noktaları oldukça önem arz etmektedir ve ilgili konulardaki literatür de gittikçe genişlemektedir [6].

Bisiklet rotalarının belirlenmesi noktasında ele alınan kriterlere göre CBS'nin sıklıkla kullanıldığını görmekteyiz. Chan ve Suja [9], Singapur Ulusal Üniversitesinde uygun bisiklet yollarının tasarlanmasına yönelik CBS tabanlı çok kriterli bir karar verme yaklaşımı sunmuşlardır. Yılmaz ve Gerçek [12], İstanbul metropoliten alanında toplu taşıma sistemi ile bütünleşik bir bisiklet ağının gerçekleştirilmesi için CBS ve AHP yöntemlerini kullanan bir model önermişlerdir. Mosallanejad, Azadedel ve Dalirpour [13], Tahran'ın doğusunda yer alan bir bölgede bisiklet yollarını geliştirmek için, bazı kriterleri AHP ile değerlendirmişler ve alana ait kriter katmanlarını birleştirerek görsel hale getirmek için de CBS kullanmışlardır.

Uygun bisiklet rotalarının belirlenmesinin ardından bisiklet kullanımını teşvik eden bisiklet paylaşım sistemleri önemli hale gelmektedir. "Free-floating" veya "dock-less" sistemler [14-15] hariç, her bisiklet paylaşım sistemi, bisikletlerin kilitli olduğu belirli istasyonlara ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemlerde yolcular, herhangi bir istasyondaki mevcut bisikletleri kiralayabilir ve park yeri olan diğer herhangi bir istasyona iade edebilirler [7]. Bisiklet paylaşım sistemlerinin başarısı için en önemli unsurlardan biri bu istasyon noktalarının uygun konumlara yerleştirilmesidir. İstasyonların erişilebilirliği ya da istasyondaki bisikletlerin kullanılabilirliği kullanıcıların memnuniyetini etkilemekte, dolayısıyla bu sistemlerin başarısını ortaya koymaktadır [16]. İstasyon konumları, nüfusun, faaliyetlerin ve toplu taşıma ağının yakınlığı ile ilgili olmalı ve bisiklet gezileri için, uygun istasyonlar arası mesafelere sahip bir ağın yapılandırılmasına izin vermelidir [17].

Birçok çalışma, bisiklet paylaşım istasyonlarının yerlerini belirlemek için CBS tarafından sunulan mekansal analiz olanaklarından yararlanmakta ve karar noktasında çok kriterli bir karar verme yönteminden faydalanmaktadır. García-Palomares, Gutiérrez ve Latorre [17] çalışmalarında, konum belirleme modellerini kullanarak istasyonları tespit edip, istasyon kapasitesini belirlemek ve istasyonlara olan talebin özelliklerini tanımlamak için CBS tabanlı bir yöntem önermektedirler. Kabak v.d. [7], İzmir Karşıyaka'daki bisiklet paylaşım istasyonlarının mevcut durumunu değerlendirmek ve gelecekteki istasyon alanlarını mevcut istasyonlarla karşılaştırarak öneri yapmak için, birbiriyle çelişen on iki kriteri ele alarak, farklı çok kriterli karar verme yöntemlerini (AHP ve MOORA), CBS ile birleştirmiştir. Erbaş v.d. [18], çalışmalarında Ankara'da elektrikli araç şarj istasyonlarının yer seçimini ele almak için bir coğrafi bilgi sistemi (CBS) tabanlı MCDA yaklaşımı uygulamışlardır.

Çok kriterli karar verme teknikleri, karar vericilerin karmaşık karar sorunlarını bilimsel ve analitik bir çerçevede çözmelerine yardımcı olmaya çalışmaktadırlar. AHP, ANP, PROMETHEE, DEMATEL, TOPSIS, MOORA ve COPRAS gibi birçok çok kriterli

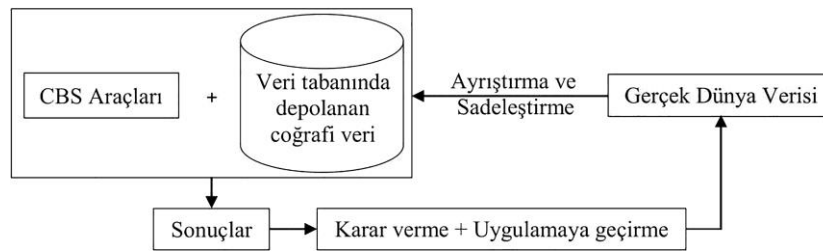
karar verme tekniği bulunmaktadır. Bu metotlardan AHP özellikle kriterlerin ağırlıklandırılması noktasında sıklıkla kullanılmaktadır. Saaty'nin 1980'de [19] ortaya koyduğu analitik hiyerarşi süreci (AHP) yöntemi, CBS ile birlikte uygulandığında, bir problemi organize etmek ve alternatifleri görsel olarak göstermek için değerli bir araç olarak kullanılmaktadır [20]. Bu çalışmada da Balıkesir Üniversitesi Çağış kampüsünde, en uygun bisiklet paylaşım istasyonlarının tespit edilmesi için AHP ve CBS yöntemleri birlikte kullanılmıştır.

### 3. Yöntem

Bisiklet paylaşım istasyonu yer seçiminde iki problem vardır. İlki, bisiklet talebine yansıyan çevredeki insan faaliyetlerinin mekansal bilgileri ile ilgilidir. Bunun için, çevrenin ve istasyon ağ yapısının önerileceği ortamın coğrafi bilgileri gereklidir ve çalışmada CBS yöntemlerinden yararlanılmıştır. İkincisi, çevre niteliklerinin bisiklet paylaşım sistemleri arasındaki önemi veya etkisi eşit derecede değildir [7]. Çalışma kapsamında ilk olarak kampüs içinde bisiklet kullanımını etkileyecek kriterler belirlenmiş, bu kriterler ile ilgili gerekli veriler toplanmıştır. Belirlenen kriterlerin ağırlıklandırılması çok kriterli bir karar verme yöntemi olan AHP ile gerçekleştirilerek, istasyonların yerleştirilmesindeki etkileri farklılaştırılmıştır. Sonrasında ise yine CBS yardımıyla bu kriterler ayrı ayrı görsel hale getirilerek haritaları oluşturulmuş ve bu haritalar birleştirilerek bisiklet paylaşım istasyonları için bir uygunluk haritası elde edilmiştir. Bu harita üzerinde en uygun yerlere alternatif istasyon noktaları yerleştirilmiş ve bu noktaların objektif bir değerlendirmesini yapabilmek için yine AHP yöntemi kullanılmıştır.

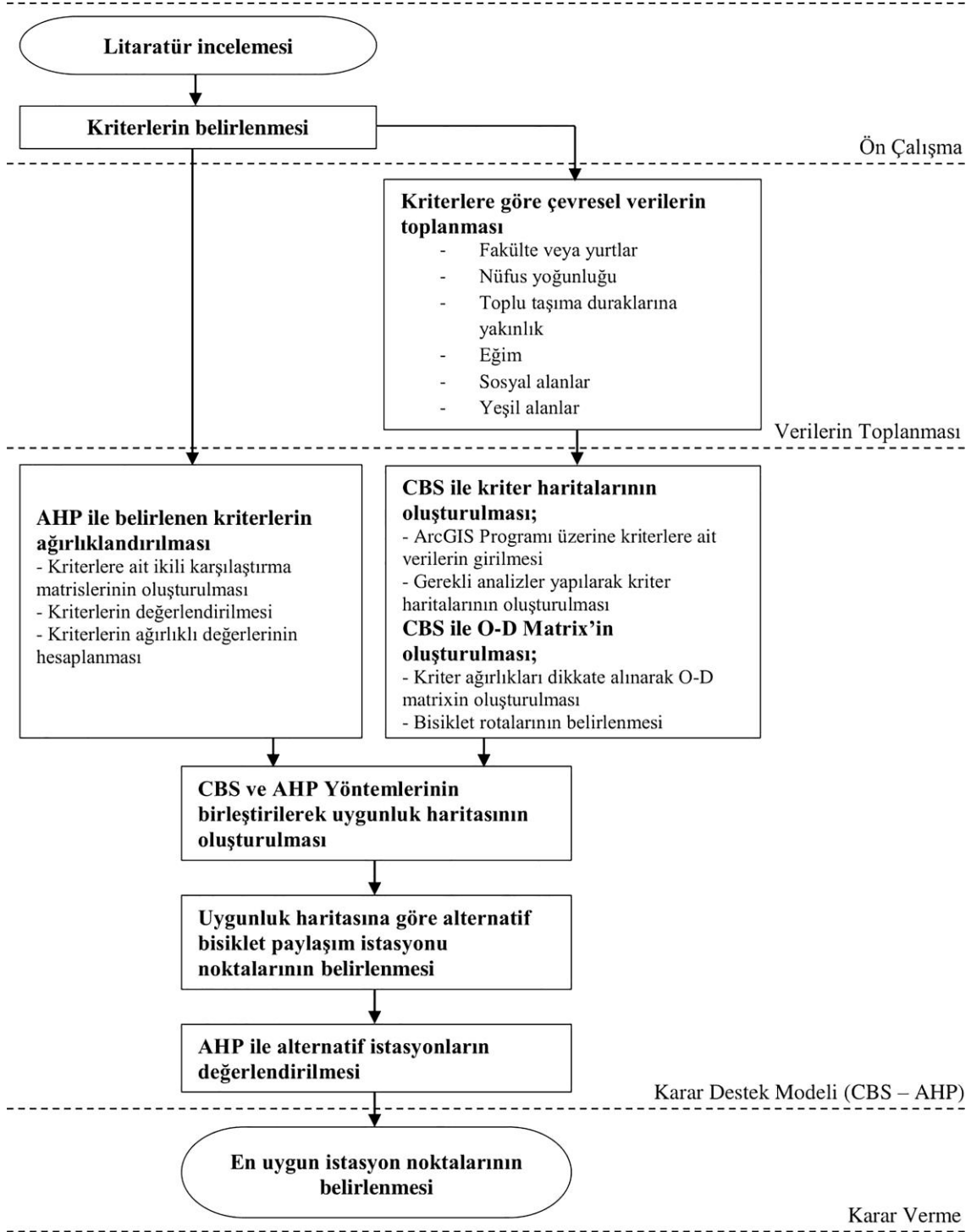
AHP, Saaty tarafından 1970'lerde, karmaşık karar problemlerinde öncelikleri belirlemek amacıyla geliştirilmiş pratik çok kriterli bir karar verme tekniğidir. Dokuzlu karşılaştırma cetvelini kullanan AHP, soyut verileri de dikkate alan, kriter, alt kriter ve alternatifler hiyerarşisi olarak tanımlanmaktadır [21].

CBS, sadece olayları, etkinlikleri veya nesnelere tespit etmek değil, aynı zamanda konum kavramını da kullanarak bu olayların, etkinliklerin veya nesnelere nerede gerçekleştiğini de dikkate alan özel bir "bilgi sistemleri" sınıfıdır. Bilgi sistemleri genel olarak, bilgiyi organize edip saklayarak, bilgileri sentezlemeye ve yönetmeye yardım eden sistemlerdir [22]. Verilerin ham hali sadece doğrudan görülebilen bilgileri verirken, bu verilerin bilgi sistemleri ile işlenmesi yeni çıkarımlar yapma imkanı sunar. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ise bunu dünyanın yüzeyini ele alan konum verisi ile gerçekleştirmektedir. Dolayısı ile, CBS ile dünya yüzeyindeki konumlarla ilgili verileri elde etmek, depolamak, analiz etmek ve görüntülemek mümkün hale gelmektedir. Bu sayede gerçek dünyada kullanılacak işlenmiş veriler elde edilebilmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. CBS ile verilerin işleme süreci [23].

CBS üzerinde, raster veya vektör olarak girilen her veri türü için ayrı bir katman oluşturulmaktadır. Katmanlar, tanımladıkları nesnelere göre şekil ve bilgi bakımından farklılık gösterebilmektedirler [7]. Kullanılan metodolojinin aşamaları Şekil 3'te sunulmuştur. Bu aşamalar ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak anlatılacaktır.



Şekil 3. Kullanılan metodolojinin aşamaları.

Balıkesir Üniversitesinde toplam 11 fakülte lisans yüksek lisans ve doktora düzeyinde eğitim vermektedir. Bu fakültelerden Necatibey Eğitim Fakültesi kampüs içerisinde değil, kent merkezinde olduğu için çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Çağış



kampüsü içerisinde bulunan fakültelerde birinci ve ikinci öğretim olmak üzere lisans düzeyinde toplam 15.985 öğrenci öğrenim görmektedir. Çağış Kampüsü içerisindeki fakülteler genellikle birbirinden bağımsız, doğrusal bir hat üzerine yerleşmiş durumdadırlar. Kampüs içerisinde Kredi ve Yurtlar Kurumu'na (KYK) bağlı yurtlar ve bir özel yurt bulunmaktadır. Bu yurtlarda kalan öğrenciler, kent merkezine ulaşımın zorluğundan dolayı günlük ihtiyaçlarını çoğunlukla kampüs içerisinden karşılamaktadırlar. Özellikle bu yurtlarda kalan öğrencilerin sunulacak olan bisiklet yolları ve bisiklet paylaşım istasyonlarının ana kullanıcıları olacağı varsayılmaktadır.

İlk olarak ilgili literatür incelenerek, Çağış Kampüsünde bisiklet rotaları ve paylaşım istasyonlarının belirlenmesinde etkili olan değerlendirme kriterleri (Tablo 1) belirlenmiştir [7, 24]. Kriterler belirlenirken Çağış kampüsünün öznelikleri ve bisiklet kullanımının gerektirdiği nitelikler birlikte ele alınmıştır. Değerlendirme kriterleri; kullanıcılar, ulaşım ağı ve kampüs içi yaşam olmak üzere bisiklet hareketliliğinin farklı yönlerine odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında belirlenen kriterler Tablo 1'de ifade edilmiştir:

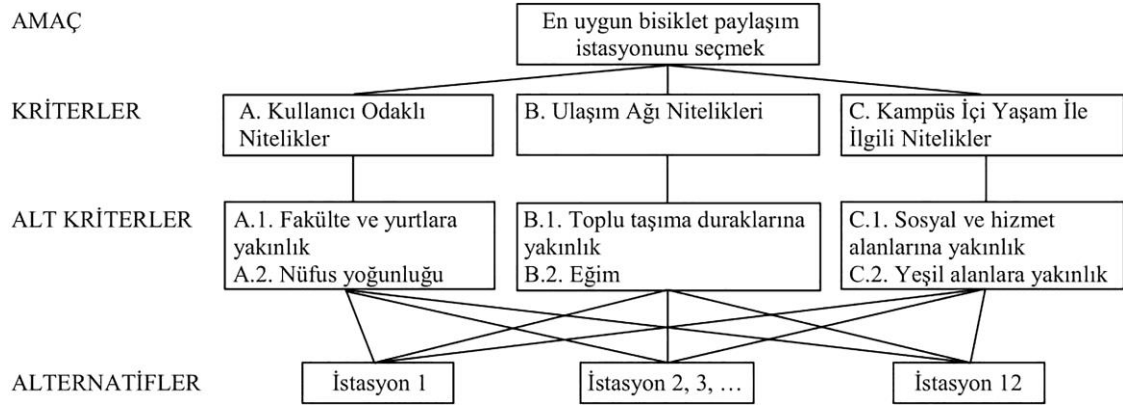
Tablo 1. Kampüste bisiklet kullanımı ile ilgili belirlenen kriterler.

Kriterler	Açıklaması
<b>A. Kullanıcı Odaklı Nitelikler</b>	
A.1. Fakülte ve yurtlara yakınlık	Kampüsteki fakülte ve yurtlar bisiklet paylaşım sisteminin ana kullanıcılarını oluşturacaktır.
A.2. Nüfus yoğunluğu	İnsan yoğunluğunun fazla olduğu alanlar için daha fazla istasyon gerekecektir. 1000 kişiye en az bir tane istasyon gerekmektedir [24].
<b>B. Ulaşım Ağı Nitelikleri</b>	
B.1. Toplu taşıma duraklarına yakınlık	Bisikletin de bir toplu taşıma aracı olarak kullanılması adına toplu taşıma durakları ile bütünleşmesi önemli görülmektedir.
B.2. Eğim	Bisiklet kullanımı için %4'e kadar olan eğimler problem oluşturmazken; %4 - %8 arası bisiklet kullanımını zorlaştırmakta; %8 üstü eğimler ise bisiklet kullanımına imkan vermemektedir [24].
<b>C. Kampüs İçi Yaşam İle İlgili Nitelikler</b>	
C.1. Sosyal ve hizmet alanlarına yakınlık	Öğrencilerin ve personelin sosyal ve hizmet alanlarına ulaşımında kullanabilmeleri sağlanmalıdır.
C.2. Yeşil alanlara yakınlık	Bisiklet sürerken hem keyif alma hem de gölge sağlama açısından yeşil alanlara yakın olması önemli görülmektedir.

Kriterlerin belirlenmesinin ardından, en uygun bisiklet paylaşım istasyonu yeri seçiminde bu kriterlerin ağırlıkları aynı olmayacağı için, AHP yöntemiyle kriter ağırlıkları belirlenmiştir.

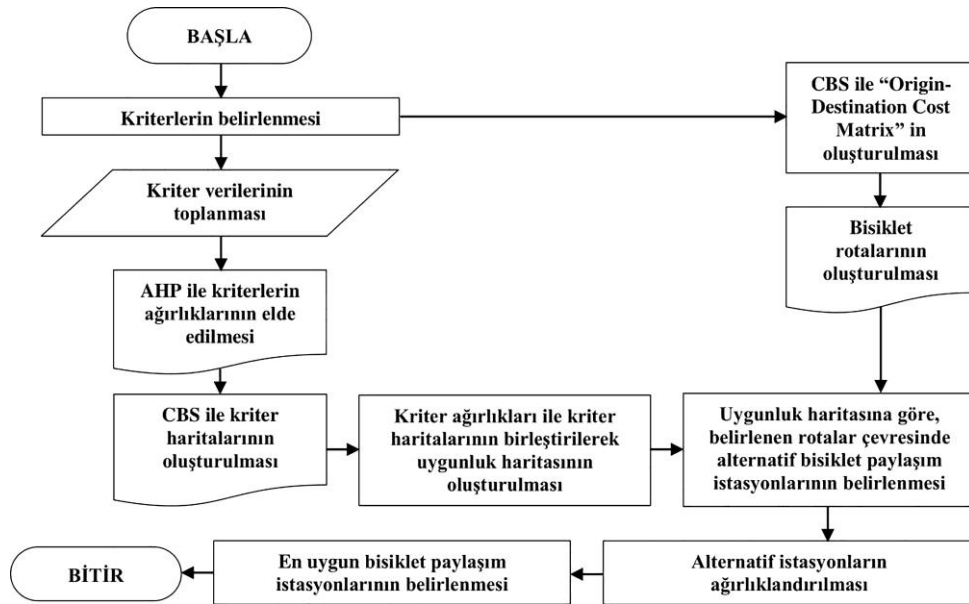
AHP tekniği tarafından belirlenen kriter ağırlıkları, CBS yardımıyla bisiklet paylaşım istasyonu yerlerinin uygunluk haritasını oluşturmak için kullanılmıştır. Bu çalışmada ArcGIS Pro programı, bisiklet paylaşım istasyonu yeri seçim probleminin çevresel verilerini dikkate almak için kullanılmıştır. ArcGIS Pro programında ilk olarak kullanıcıların akışına göre başlangıç ve varış noktaları belirlenerek O-D matrisi oluşturulmuştur. Çalışmada, öğrenci, öğretim üyesi ve personelin kendi buldukları binalar ve yurt binaları "başlangıç noktaları (origin)", üniversite kullanıcılarına hizmet veren alanlar ise "varış noktaları (destination)" olarak kabul edilmiştir. Bu matris ile elde edilen "desire line" diyagramı, yolculuk başlangıç noktasını ve seyahat arzusunun hedeflerini birbirine bağlayan düz çizgilerden oluşmaktadır ve buradaki hatların farklılıkları, göreceli seyahat arzusu miktarlarını göstermektedir [9]. Bu diyagram ile birlikte kullanım yoğunluğu olan hatlar tespit edilerek bisiklet rotaları belirlenmiştir.

Toplanan kriter verileri de ArcGIS Pro programına girilerek kriter haritaları oluşturulmuş ve görsel hale getirilmiştir. Bu aşamadan sonra, AHP ile karar verilen kriter ağırlıklarına göre uygunluk haritası oluşturulmuş ve bu haritaya göre alternatif bisiklet paylaşım istasyonları belirlenmiştir. Belirlenen alternatif istasyon noktaları AHP ile değerlendirilerek, en uygun noktalar tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan karar verme sürecindeki AHP hiyerarşisi Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Bisiklet istasyonlarının ağırlıklandırılmasında kullanılan kriterler hiyerarşisi.

AHP yöntemi CBS ile birlikte birçok alanda etkili bir karar verme yaklaşımı olarak kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmada ise bir bisiklet paylaşım sistemi oluşturmak için bu yöntemlerin bir arada kullanılabileceği, kullanıcı ve çevre verilerinin de dahil olduğu karmaşık karar verme problemlerine verimli bir çözüm sunacağı öngörülmektedir. Bisiklet paylaşım istasyonlarının belirlenmesinde kullanılan karar destek modelinin çalışma prensibini gösteren akış şeması Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Karar destek modelinin akış şeması.

Gerçekleştirilen çalışmanın uygulanması halinde, ekolojik açıdan gürültü ve hava kirliliğini azaltacağı ve fiziksel olarak daha aktif, sağlıklı ve keyifli bir kampüs yaşamı sunacağı düşünülmektedir. Yöntemin kent içi farklı alanlarda da uygulanması ile

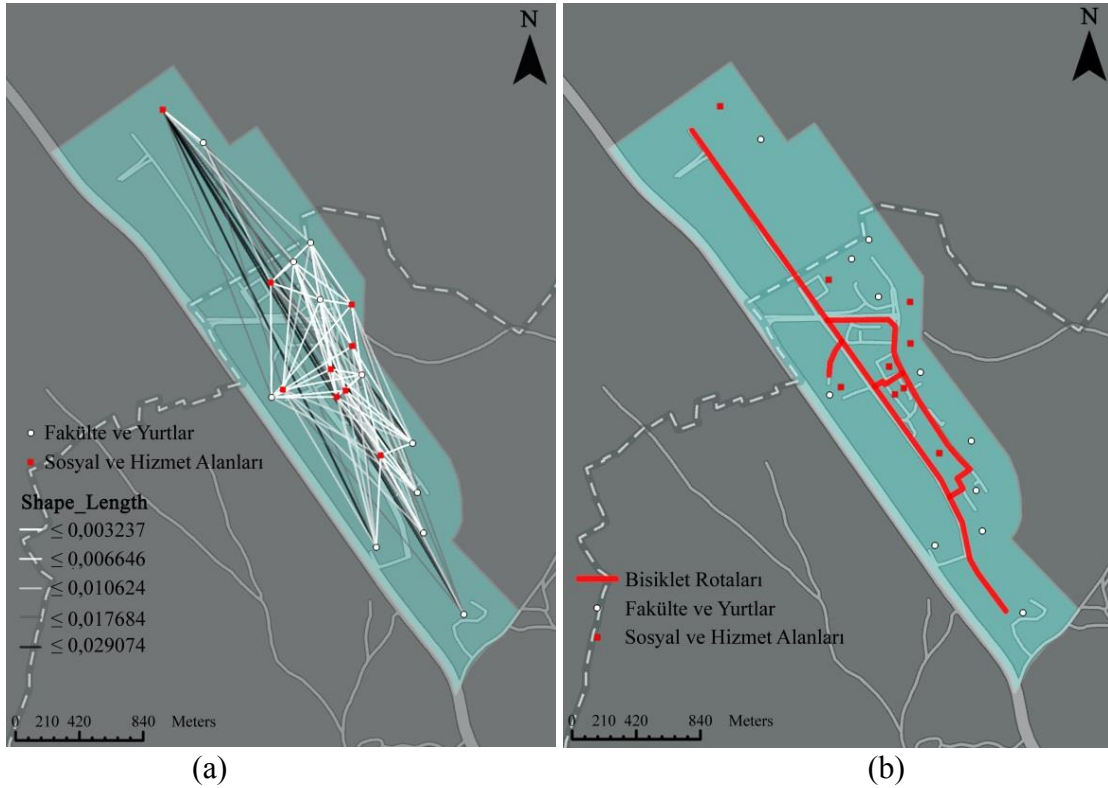
verimli bir şekilde kullanılan bisiklet paylaşım sistemleri oluşturularak, kentlilerin yaşam kalitesi üzerinde olumlu etki göstereceği düşünülmektedir.

#### 4. Yöntemin uygulanması

Bu bölümde, sunulan yöntemin Balıkesir Üniversitesi Çağış Kampüsü özelinde uygulanışı ele alınacaktır. Öncelikle bisiklet rotalarının oluşturulması, sonrasında ise bisiklet paylaşım istasyonları için en uygun yerlerin belirlenmesi problemlerinin ele alınışı ve sonuçları, gerçekleştirilen CBS analizleri ve çok kriterli karar verme yöntemiyle yapılan değerlendirmeler aşamalandırılarak anlatılacaktır. Kampüs içinde güvenli bisiklet kullanımını mümkün kılmak için ilk olarak bisiklet rotalarının oluşturulması gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. Bisiklet rotalarının oluşturulması

İlk olarak kampüsteki öğrenci ve personelin akışına göre kampüsün kullanımı ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Kampüs içinde fakülte ve yurtlar “başlangıç noktası”; yemekhane, kafeteryalar, spor alanları, cami, hastane ve rektörlük binası gibi sosyal ve hizmet alanları ise “varış noktası” olarak belirlenerek, ArcGIS Pro programı üzerinde işaretlenmiştir. Çalışmanın, kampüsün önümüzdeki yıllardaki kullanımına uygun olması adına yeni yapılmakta olan Kütüphane ve Kültür Merkezi Binası, İlahiyat Fakültesi Binası gibi inşaat halinde olan yapılar bitmiş olarak kabul edilerek dikkate alınmıştır. Belirlenen başlangıç ve bitiş noktaları arasında “Origin-Destination Cost Matrix” kullanılarak mesafeye göre O-D Matrisi Şekil 6’daki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 6. (a) Mesafeye göre oluşturulan O-D Matrisi; (b) Oluşturulan bisiklet yolları.

Şekil 6 (a)'da sunulan matristeki daha açık renkle belirtilen çizgiler 300 m.'ye kadar olan mesafeleri ifade etmektedir. 300 m. den az olan yerlere yaya ulaşımı mümkün olduğu için daha çok koyu renkle ifade edilen çizgiler dikkate alınarak Şekil 6 (b)'deki kampüs içindeki bisiklet rotaları oluşturulmuştur.

Matris üzerindeki yoğunlaşan bölgelere rotaların ulaşımının sağlanmasına ve 300 m. den fazla yürüyüş mesafesi oluşturulmamaya çalışılarak kampüsün bisiklet rotaları belirlenmiştir. Bu noktada, haritaya da bakıldığında siyah çizgilerle ifade edilen yurt ve hastane arasında bir ana yatay hat oluşturulmuş, sonrasında ise sosyal ve eğitim alanlarının yoğunlaştığı ikinci bir yatay hat oluşturulmuştur. Bu iki hat üzerinde eğim az olup, kampüs içindeki bisiklet kullanımının ana yolları olacağı düşünülmektedir. Belirlenen iki yatay hattı birleştirmek için ise eğimin daha az olduğu bağlantılar tercih edilmeye çalışılarak matrisin yoğunlaştığı yerlerde dikey bağlantılar belirlenmiştir. Oluşturulan bisiklet yollarında eğim Balıkesir Üniversitesi Yapı İşleri Daire Başkanlığından temin edilmiş olan haritalar üzerinden incelenmiştir. Uygun bağlantı rotaları olarak görülen Mühendislik ve Mimarlık Fakültelerinin yanından geçen yolda eğimin en fazla %6.21; yemekhanenin yanındaki yolda %7.83; Turizm Fakültesinin yanındaki yolda ise %8.07 olduğu tespit edilmiştir. Kampüs içerisinde belirlenen bütün rota içerisinde yalnızca Turizm Fakültesinin yanındaki yolda eğim %8'i geçmektedir. Ancak bu yola alternatif yolların uzakta olması nedeniyle yaya olarak ulaşım zor olacağı için, bu yol da bisiklet rotası olarak kabul edilmiştir.

Khadem'in yaptığı gibi bazı çalışmalarda O-D matrisi, bazı hesaplamalarla birlikte bisiklet paylaşım istasyonlarının yerlerini belirlemede de kullanılmıştır [25]. Ancak bu çalışmada yalnızca bisiklet rotalarını oluşturmak için gerekli hareket akışını belirlemede kullanılmıştır. Kampüs içerisindeki hareket akışı çok karmaşık olmadığından tahmin edilebilir bir matris elde edildiği görülmektedir. Yöntem kent içi gibi daha karmaşık bölgelerde kullanıldığında, rotaların oluşturulmasına daha fazla katkı sağlayacaktır. Rotaların oluşturulmasının ardından, bisiklet paylaşım istasyonları alternatiflerinin belirlenmesi için uygunluk haritası oluşturulması aşamasına geçilmiştir. Bu uygunluk haritasını oluşturmak için öncelikli olarak kullanılacak olan kriterlerin ayrı ayrı haritalarının oluşturulması gerekmektedir.

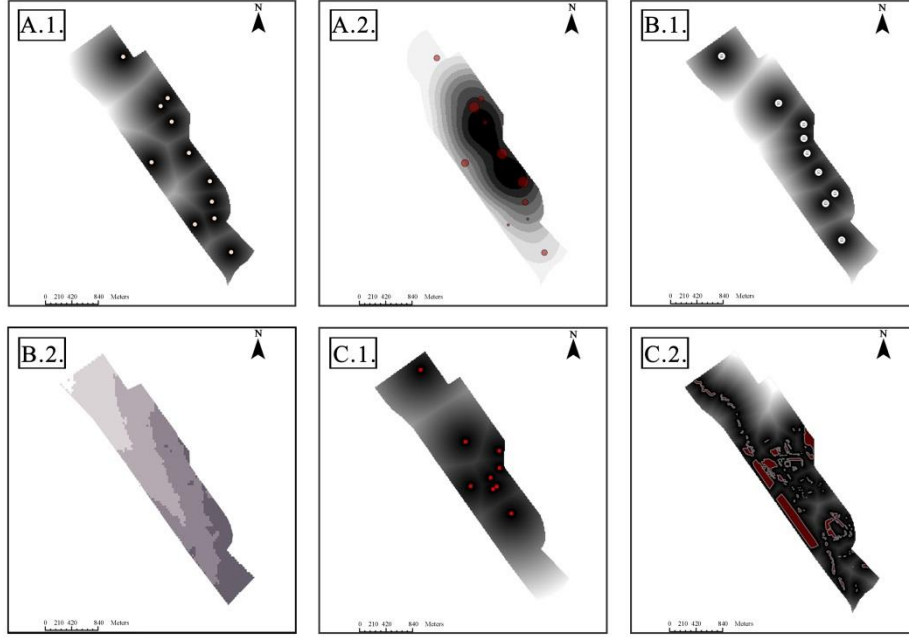
#### 4.2. Kriter haritalarının oluşturulması

Kriter haritalarının oluşturulması için ilk olarak belirlenen altı adet kritere ait elde edilen veriler ArcGIS Pro Programında haritalar üzerine işlenmiştir. Sonrasında bu işlenen verilere Tablo 2'deki analizler uygulanmıştır.

Tablo 2. Kriterlerin veri kaynakları ve uygulanan analiz yöntemleri.

Kriter	Kriter Açıklaması	Veri	Veri Kaynağı	Analiz Yöntemi
A.1.	Fakülte ve yurtlara yakınlık	Fakülte ve yurtlar	Üniversite İmar Haritası	Euclidian Distance
A.2.	Nüfus yoğunluğu	Fakülte ve yurtların toplam öğrenci ve personel sayıları	Balıkesir Üniversitesi 2018-2019 Faaliyet Raporu	Kernel Density
B.1.	Toplu taşıma duraklarına yakınlık	Toplu taşıma durakları	Baltus Mobil Uygulama	Euclidian Distance
B.2.	Eğim	Eğim	ALOS World 3D - 30m (AW3D30)	Slope
C.1.	Sosyal ve hizmet alanlarına yakınlık	Sosyal ve hizmet alanları	Üniversite İmar Haritası	Euclidian Distance
C.2.	Yeşil alanlara yakınlık	Yeşil alanlar	Google Earth Pro	Euclidian Distance

Bu analizler sonucunda elde edilen kriter haritaları Şekil 7’de sunulmuştur. Böylece sayısal verilerin coğrafik olarak görselleştirilmesi ve daha anlaşılır hale gelmesi sağlanmıştır.



Şekil 7. Her bir kriterine göre oluşturulan harita katmanları.

Şekildeki kriter haritaları incelenerek belirlenen kriterlere göre kampüs içerisinde nerelerde yoğunlaşmalar olduğu açıkça görülebilmektedir. Dolayısıyla bisiklet paylaşım istasyonlarının yerleştirilmesi bağlamında, kriter bazında uygun alanlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin bisiklet paylaşım istasyonlarının sosyal ve hizmet alanlarına yakın olması isteniyorsa Şekil 7’deki C.1. haritasında koyu olarak gösterilen alanlara öncelik verilmelidir. Ancak kriterlerin tamamını en uygun şekilde ele alan istasyonları belirleyebilmek için, ayrı ayrı elde edilen bu haritaların, bir sonraki bölümde anlatıldığı üzere belirlenen kriter ağırlıklarına göre, ArcGIS Pro programında birleştirilerek uygunluk haritasının oluşturulması gerekmektedir.

#### 4.3. Kriterlerin ağırlıklandırılması

Bisiklet paylaşım modellerinde belirlenen kriterler aynı önem derecesine ya da sistemin kullanılmasında aynı etkiye sahip olmamaktadırlar [7]. Çalışmada, kriter ağırlıklandırılmaları “SuperDecisions” [26] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SuperDecisions, AHP (Analytic Hierarchical Process) ve ANP (Analytic Network Process) yöntemlerini uygulama imkanı sunan bir karar destek yazılımıdır. Bu çalışmada SuperDecisions yazılımı aracılığıyla çok kriterli bir karar verme tekniği olan AHP yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, belirlenen kriterler yazılım üzerinde tanımlanmış ve kriterler hiyerarşisi oluşturulmuştur. Bu aşamadan sonra belirlenen kriterlerin ağırlıklarının hesaplanması için, 1’den 9’a kadar çift yönlü olarak değer verilebilen ikili karşılaştırmaların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Örneğin A.1. (fakülte ve yurtlara yakınlık) ve A.2. (nüfus yoğunluğu) kriterleri bisiklet paylaşım istasyonlarının yerleştirilmesindeki önemi karşılaştırılarak, A.1. yönünde 2 değeri verilirse, A.1.’in A.2.’den daha önemli olduğunu, ancak önemlilik derecesinin çok güçlü olmadığını ifade etmektedir. Ancak seçilen değer 9 olursa, A.1.’in A.2.’ye göre çok daha fazla önemli

olduğu sonucuna varılabilir. Yazılım üzerinden bütün kriterlere ait ikili karşılaştırmalar gerçekleştirilerek, ağırlıklandırılmış kriter değerleri Tablo 3'te verildiği gibi elde edilmiştir.

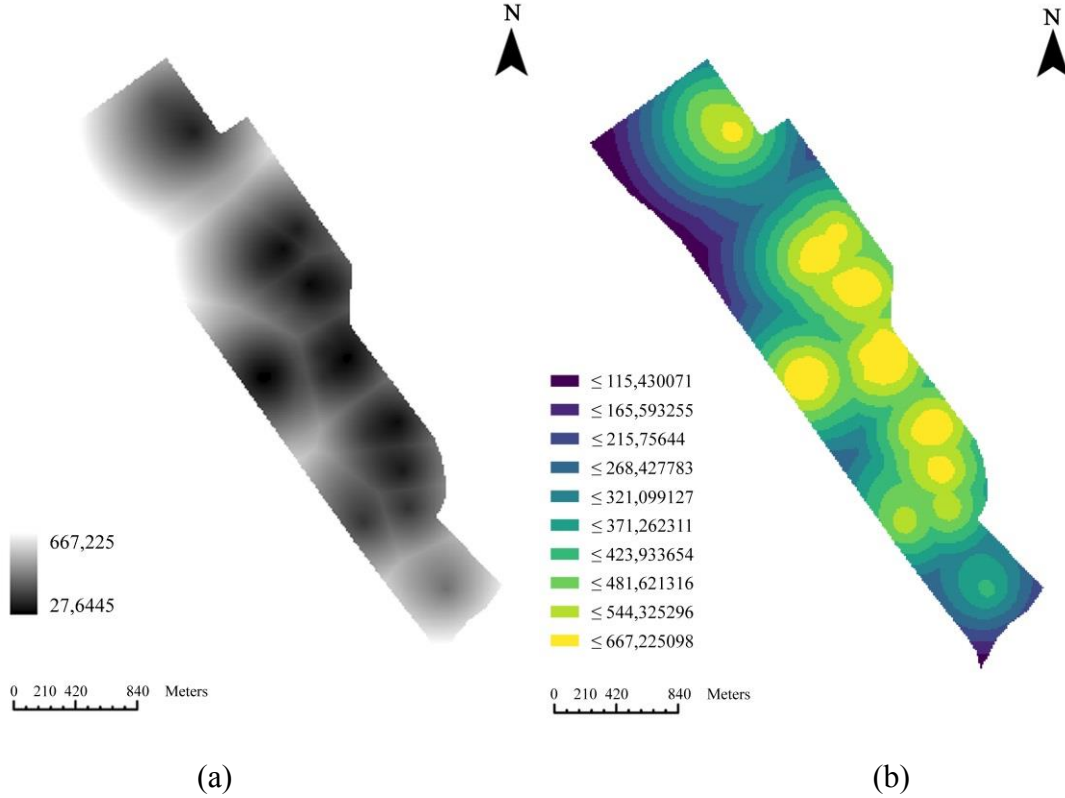
Tablo 3. Değerlendirme sonucunda belirlenen kriter ağırlıkları.

Kriter	Ağırlıklandırılmamış Değerler	Ağırlıklandırılmış Değerler
<b>A. Kullanıcı Odaklı Nitelikler</b>		
A.1. Fakülte ve yurtlara yakınlık	0.750000	0.505358
A.2. Nüfus yoğunluğu	0.250000	0.168453
<b>B. Ulaşım Ağı Nitelikleri</b>		
B.1. Toplu taşıma duraklarına yakınlık	0.125000	0.012582
B.2. Eğim	0.875000	0.088072
<b>C. Kampüs İçi Yaşam ile İlgili Nitelikler</b>		
C.1. Sosyal ve hizmet alanlarına yakınlık	0.888889	0.200476
C.2. Yeşil alanlara yakınlık	0.111111	0.025060

Kriterlerin ağırlıklandırılmasının ardından bu ağırlıkları doğrultusunda, yapılmış olan kriter haritalarının birleştirilerek bisiklet paylaşım istasyonları yerleri için uygunluk haritasının oluşturulması gerekmektedir.

#### 4.4. Uygunluk haritasının oluşturulması

Kriterlerin ağırlıklandırılmış değerleri kullanılarak, ArcGIS Pro programında kriter haritaları birleştirilmiş ve Şekil 8'deki uygunluk haritası oluşturulmuştur. İlk olarak elde edilen Şekil 8 (a)'daki normalize edilmiş harita üzerine sınıflandırma işlemi uygulanarak, uygunluk derecesine göre sınıflara ayrılmış bölgeler elde edilmiştir (Şekil 8 (b)).

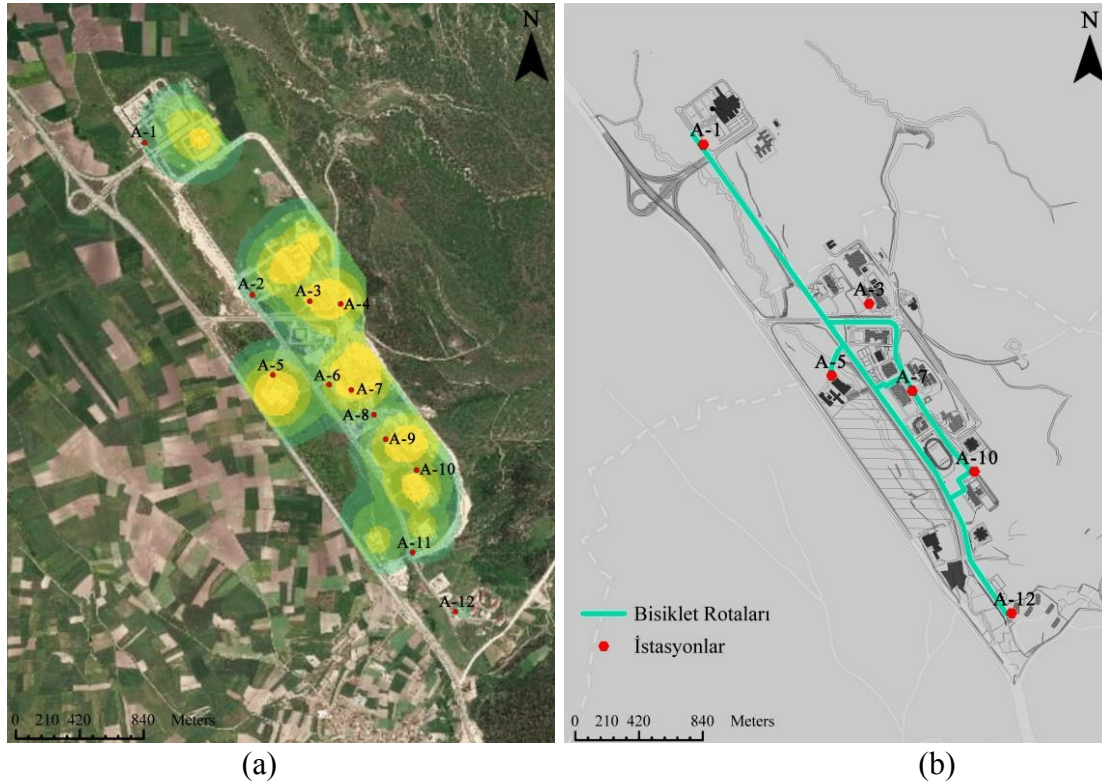


Şekil 8. (a) Normalize edilmiş uygunluk haritası; (b) Sınıflandırılmış uygunluk haritası.

Ortaya çıkan haritada bisiklet paylaşım istasyonları için potansiyel alanlar maviden sarıya doğru daha uygun olacak şekilde görülmektedir. A.1. (fakülte ve yurtlara yakınlık) kriterinin katsayısı daha fazla olduğu için, fakülte ve yurtlara yakın alanların bisiklet paylaşım istasyonlarının yeri noktasında daha fazla potansiyel sahibi olduğu anlaşılmaktadır. Uygunluk haritası oluşturulduktan sonra, bu haritaya göre uygun olan noktalara alternatif istasyon noktalarının yerleştirilmesi gerekmektedir.

#### 4.5. Bisiklet paylaşım istasyonu alternatiflerinin belirlenmesi

Uygunluk haritası ile ortaya çıkan bisiklet paylaşım istasyonu için en uygun ilk dört sınıf (Şekil 8 (b)) üzerinde bisiklet paylaşım istasyonu alternatifleri yerleştirilmiştir. Tüm fakülte, yurtlar, sosyal ve hizmet alanlarına ulaşımı sağlayacak şekilde toplam 12 adet bisiklet paylaşım istasyonu alternatifi Şekil 9 (a)'da görüldüğü gibi belirlenmiştir.



Şekil 9. (a) Uygunluk haritasına yerleştirilen alternatif bisiklet paylaşım istasyonları; (b) Değerlendirmeler sonucunda belirlenen bisiklet rotası ve paylaşım istasyonları.

Belirlenen istasyonlar arası 300 m. mesafe olması normal olarak kabul edilmiştir. Literatüre bakıldığında, daha az mesafe istasyon fazlalığı oluşmasına sebep olurken, daha fazla mesafe ise, 300 m.'den sonra yürüme isteğinin azalmasından dolayı, istasyonlara ulaşımı zorlaştıracağı için olumsuz olarak görülmektedir [24]. Buradan hareketle, olası bisiklet istasyonları alternatif yerleri için, başlangıç ve varış noktalarından en fazla 300 m'lik bir yürüyüş mesafesi seçilmiştir. Şekil 8 (b)'ye bakacak olursak, eğitim ve araştırma hastanesi ve tıp fakültesinin ve KYK yurtlarının buldukları bölgeler, mesafeler dolayısıyla diğer kısımlardan biraz ayrılmış durumdadır. Alternatifler, hastane ve yurtlar bölgesine birer tane olacak şekilde, diğer alanlara ise uygun alanlar göz önünde bulundurularak dengeli bir şekilde dağıtılmaya çalışılmıştır. Alternatiflerin yerleştirilmesi çoğunlukla toplu taşıma durakları yanları ya da otopark alanları düşünülerek gerçekleştirilmiştir. Böylece istasyon noktalarının

halihazırda ulaşımda kullanılmakta olan alanlara entegre edilmesiyle daha etkili kullanılması hedeflenmiştir.

#### 4.6. Alternatiflerin ağırlıklandırılması

12 Adet bisiklet paylaşım istasyonu alternatifleri belirlendikten sonra, yine SuperDecisions yazılımı üzerinden çok kriterli karar verme yöntemi olan AHP ile ağırlıklandırılmaları gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, alternatifler model hiyerarşisine eklenerek ilişkili olduğu kriterler programa tanıtılmıştır. Daha sonra ise, her bir kriterle göre alternatif istasyonların ikili karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmeler ilgili kriter altında hangi alternatifin ne kadar daha uygun olduğu yine çift yönlü 9'lu karşılaştırma cetveline göre seçilerek gerçekleştirilmiştir. Alternatiflere ait tek tek kriter bazında ve toplam ortaya çıkan sonuç değerler Tablo 4'te ifade edilmiştir.

Tablo 4. Alternatiflerin kriterlere göre ve sonuç değerleri.

	Kriterler						Sonuç Değerler
	A.1. (0.505358)	A.2. (0.168453)	B.1. (0.012582)	B.2. (0.088072)	C.1. (0.200476)	C.2. (0.025060)	
A-1	0.034828	0.032900	0.123017	0.119920	0.039897	0.035529	0.307635
A-2	0.019531	0.020631	0.128494	0.119920	0.045448	0.058471	0.251596
A-3	0.125193	0.198168	0.049309	0.119920	0.071763	0.099453	0.869158
A-4	0.070838	0.078895	0.130792	0.067132	0.089607	0.146307	0.545548
A-5	0.151593	0.065931	0.018794	0.033732	0.105650	0.102044	0.799110
A-6	0.034256	0.027030	0.028120	0.023642	0.179539	0.063538	0.431310
A-7	0.103781	0.170487	0.082553	0.115186	0.248806	0.050104	1.000000
A-8	0.065656	0.065364	0.132495	0.062398	0.105256	0.031336	0.510438
A-9	0.035370	0.033761	0.044531	0.035440	0.063489	0.031336	0.284051
A-10	0.148786	0.161197	0.144457	0.057069	0.022452	0.289516	0.842909
A-11	0.058529	0.050964	0.034738	0.122820	0.014938	0.067172	0.377011
A-12	0.151639	0.094673	0.082701	0.122820	0.013155	0.025195	0.750647

Tabloda da görüldüğü üzere, yemekhane önündeki A7 istasyonu en uygun alternatif olarak tespit edilmiştir. Kampüsün en sosyal, merkez olarak değerlendirilebilecek noktası burası olduğundan ağırlıklandırma sonuçlarının gerçek verilerle örtüştüğü söylenebilmektedir.

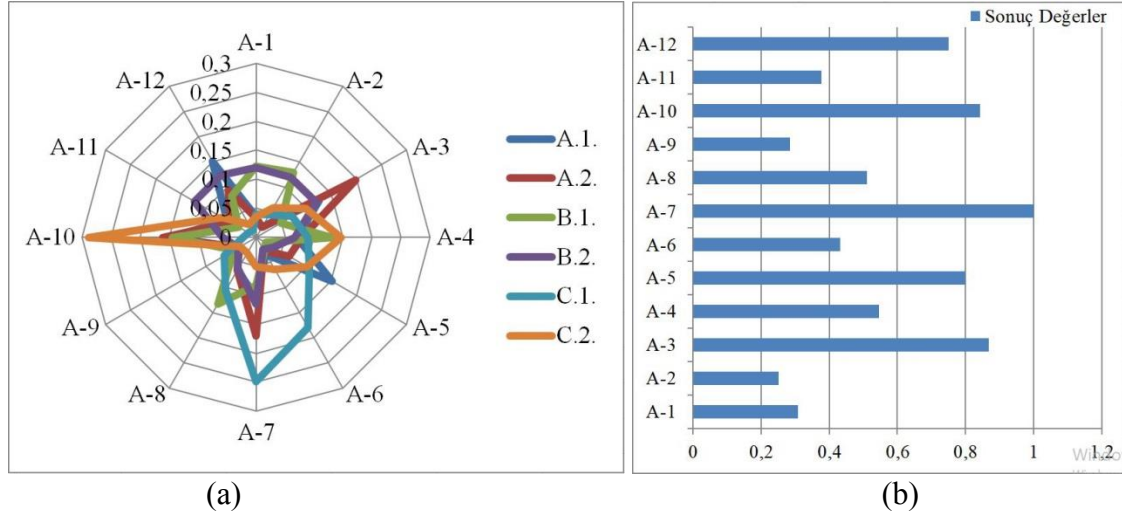
#### 4.7. Bulgular

Çalışma kapsamında, öncelikli olarak bisiklet rotaları oluşturulmuş, sonrasında ise belirlenen kriter ağırlıklarına göre uygunluk haritası oluşturularak alternatif bisiklet paylaşım istasyon noktaları belirlenmiştir. Yine bu belirlenen kriterlere göre alternatiflerin değerlendirmeleri gerçekleştirilmiş ve değerlendirme sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre oluşan grafikler de Şekil 10'da sunulmuştur.

Tablo 4'ü incelediğimizde, kriter ağırlıklarının, alternatiflerin değerlerini de oldukça etkilediği görülmektedir. Örneğin; A-4 alternatifi “toplu taşıma duraklarına yakınlık (B.1.)” ve “yeşil alanlara yakınlık (C.2.)” kriterlerine göre yüksek değerler almış olsa da o kriterlerin ağırlıkları daha düşük olduğu için sonuç değeri 0.5'lerde kalmıştır. Ya da A-12 alternatifi birçok kriterle göre düşük değer almış olsa da ağırlığı fazla olan “fakülte ve yurtlara yakınlık (A.1.)” kriterinden yüksek değer aldığı için, sonuç değeri 0.7'nin üstüne çıkabilmiştir. Bu noktada, 0.505358 ile en yüksek ağırlığı olan A.1. (fakülte ve yurtlara yakınlık) kriterinin, sonuç değerlerde daha etkili olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 10'da görüldüğü üzere değerlendirme sonucunda, potansiyel istasyon noktalarından sonuç değeri 0.7'nin üstünde olanlar uygulanacak olan istasyonlar olarak ele alınmıştır. Bu noktalar; A-3, A-5, A-7, A-10, A-12 istasyonlarıdır. Şekil 10 (a)'ya bakacak olursak, seçilen bu istasyonlardan; A-3, A.2. (nüfus yoğunluğu) kriterinde; A-5, A.1. (fakülte ve yurtlara yakınlık) kriterinde; A-7, C.1. (sosyal ve hizmet alanlarına yakınlık) kriterinde; A-10, C.2. (yeşil alanlara yakınlık) kriterinde; A-12 alternatifi ise, C.1. (sosyal ve hizmet alanlarına yakınlık) kriterinde iyi olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 10. (a) Alternatiflerin kriterlere göre ağırlıkları; (b) Alternatiflerin toplam ağırlıkları.

Değerlendirme sonucunda elde edilen beş potansiyel istasyon noktası incelendiğinde, Şekil 9 (b)'de de ifade edildiği şekilde kampüs içerisinde dengeli bir dağılım olduğu söylenebilir. Sadece, A-1 alternatifinin olduğu tıp fakültesi ve eğitim ve araştırma hastanesi bölgesinde bir istasyon yerleşmemiş olarak görülmektedir. Bu noktada, kampüs içerisinde bisiklet kullanımının bütünlüğünün sağlanması ve 1000 kişi için en az bir tane istasyon bulunması gerekliliği koşulunu sağlaması adına A-1 alternatifi de önerilen istasyon noktalarına eklenmiş ve sonuçta elde edilen rota ve istasyon noktalarını gösteren harita Şekil 9 (b)'de sunulmuştur.

Bisiklet kullanımı motorlu taşıtlara göre belirli koşullara daha fazla bağımlıdır ve özellikle uygulaması yapılan bisiklet paylaşım istasyonlarının konumu, sistemin verimli kullanılabilmesi adına önemlidir. Bu nedenle çalışmada yapılan bisiklet kullanımı için uygun kriterlere göre bu istasyonların yerleşiminin yapılması sistemin kullanımının sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen bisiklet paylaşım istasyonları incelendiğinde kampüs içerisinde genel olarak kampüsün önemli noktalarında oldukları görülmektedir. Bu anlamda kullanılan yöntemin bisiklet rotaları ve bisiklet paylaşım istasyonlarının belirlenmesi noktasında verimli olduğu söylenebilmektedir. Genç nüfus yoğunluğu fazla olan kampüste böyle elverişli bir sistemin kurulması sayesinde kampüsün araç hakimiyetinden kurtulmasının mümkün olabileceği düşünülmektedir. Çalışmada kampüs içerisinde çok karmaşık bir yapı olmadığından sonuçlar tahmin edilebilir ölçekte ancak, daha karmaşık yapıda olan kent içi alanlarda bu yöntem kullanıldığında, oluşabilecek karmaşık kriter ağlarına rasyonel sonuçlar ortaya çıkarılması anlamında daha da verimli olabilecektir. Böylece bisiklet paylaşım istasyonlarının daha etkili kullanılması sağlanarak, bisiklet kullanımı

yaygınlaştırılacak, daha sağlıklı ve ekolojik açıdan daha yaşanabilir bir ortam sağlanabilecektir.

## 5. Sonuçlar ve tartışma

Bisiklet paylaşım sistemlerinin sağlık, ekonomi ve çevre için sağladığı avantajlar dolayısıyla, özellikle daha enerjik bir yapıda olan üniversite kampüslerinde, çok fazla uygulanmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, Balıkesir Üniversitesi, Çağış Kampüsünde araç hakimiyetini azaltacak bir bisiklet paylaşım sistemi kurulması için gerekli bisiklet rotaları ve uygun bulunan bisiklet paylaşım istasyon noktaları tespit edilerek sunulmuştur.

Bisiklet paylaşım sistemleri çevre dostu sistemler olarak görülmektedir, ancak sürekli kullanımını sağlamak için kullanıcı memnuniyeti önem arz etmektedir. Bu memnuniyet noktasında, bisiklet güzergahı ve kullanıcıların buldukları ve gidecekleri yerlerde paylaşım istasyonlarının bulunması önemli hale gelmektedir. Aktif bir ulaşım aracı olarak bisikletin yer bulabilmesi için, bisiklet altyapısına ayrılan sınırlı kaynakların verimli bir şekilde kullanılabilmesi noktasında daha fazla potansiyelli olan alanları objektif olarak ortaya çıkaran yöntemler gerekmektedir [27]. Bu çalışmada en fazla potansiyelli olan alanları tespit etmek için CBS, yer tercihlerini objektif olarak gerçekleştirebilmek için de çok kriterli karar verme yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bu iki yöntemin birleşimi birçok çalışmada farklı şekillerde denenmiş ve bisiklet paylaşım istasyonlarının yer seçimi konusunda verimli bulunmuştur [7, 12, 13, 18]. Bu kapsamda, öncelikle Çağış Kampüsünde öğrenci ve personel kullanımını gösteren O-D matrisi oluşturularak bisiklet rotaları belirlenmiştir. Daha sonra ise bisiklet kullanımı için üç ana kriter ve toplam altı alt kriterden oluşan kriterler hiyerarşisi belirlenmiş ve bu kriterlerin ağırlıkları SuperDecisions yazılımı ile elde edilmiştir. CBS yardımı ile kriter haritaları oluşturulduktan sonra belirlenen kriter ağırlıklarına göre uygunluk haritası oluşturulmuştur. Bu harita üzerinde en uygun yerlere alternatif bisiklet paylaşım istasyonları yerleştirilmiştir. Son olarak bu alternatifler SuperDecisions yazılımında AHP yöntemi ile değerlendirilerek en uygun 5 bisiklet paylaşım istasyonu tespit edilmiştir. Kampüsün hastane ve Tıp Fakültesi bölgesinde hiç istasyon olmaması dolayısıyla, bisiklet kullanımında kampüs bütünlüğünü korumak ve sistemi daha etkili bir hale getirmek adına, bahsi geçen bölge üzerinde bir istasyon daha bu değerlendirme sonucuna eklenmiş ve toplam 6 istasyon noktası elde edilmiştir. Kullanılan yöntemin bisiklet paylaşım sistemini oluşturmada verimli olduğu ve uygulanması halinde kampüsün çevresel ve fiziksel yaşamına olumlu etki edeceği düşünülmektedir.

Benzer bir çalışma gerçekleştiren Kabak v.d. [7] de CBS ve çok kriterli karar verme yaklaşımlarını bir arada kullanarak, hem mevcut bisiklet paylaşım istasyonları için bir değerlendirme hem de ek bisiklet paylaşım istasyonları için alternatif yerler önermektedirler. Çalışma sonucunda önerilen lokasyonların, mevcuttaki istasyonlara göre daha fazla potansiyel sahibi oldukları tespit edilmiştir. Kampüste gerçekleştirilen bu çalışmada da yöntemin mevcut bisiklet paylaşım istasyonlarının analizini yapmanın yanında, yeni bir bisiklet paylaşım sistemi önerisini mümkün kıldığı görülmektedir. Kullanılan yöntem ile, belirlenen kriterler çerçevesinde, bisiklet paylaşım istasyonlarının en verimli olabilecek noktalara yerleştirilmesi mümkün olmaktadır. Böylece kampüs içerisinde mevcut olan kısa mesafeli yolculuklarda sürdürülebilir ulaşım yöntemlerinden olan bisikletin kullanımı yaygınlaştırılarak, daha temiz ve araç

trafiği ve sorunlarından uzaklaştırılmış bir kampüse dönüşmesi ve dolayısıyla kampüs kullanıcılarının yaşam kalitesinin artmasına katkı sağlaması öngörülmektedir. Bu rota ve istasyonlarla entegre bir bisiklet paylaşım sistemi uygulaması geliştirilerek kampüs içinde daha etkin bir bisiklet kullanımı sağlanması ise sonraki çalışmalarda gerçekleştirilebilecektir. Bunun yanında, kriterlerde gerekli güncellemeler yapılarak, yöntemin farklı alanlarda veya farklı araçların (elektrikli bisiklet, scooter vb.) istasyonlarıyla ilgili uygulamalarda kullanılması mümkün olabilecektir.

## Kaynaklar

- [1] Benevolo, C., Dameri, R., P. ve D'Auria, B., **Smart mobility in smart city**, In: Empowering Organizations, Springer, (2016).
- [2] Lee, J. H., Phaal, R. ve Lee, S. H., An integrated service-device-technology roadmap for smart city development, **Technological Forecasting and Social Change**, 80, 2, 286-306, (2013).
- [3] Bamwesigye, D. ve Hlavackova, P., Analysis of sustainable transport for smart cities, **Sustainability**, 11, 7, (2019).
- [4] Cerutti, P. S., Martins, R. D., Macke, J. ve Sarate, J. A. R., "Green, but not as green as that": An analysis of a Brazilian bike-sharing system, **Journal of Cleaner Production**, 217, 185-193, (2019).
- [5] Makarova, I., Shubenkova, K., Vadim Mavrin, V., Boyko, A. ve Katunin, A., Development of sustainable transport in smart cities, **Proceedings: IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)**, 1-6, Modena, (2017)
- [6] Lin, J. R. ve Yang, T. H., Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints, **Transportation Research Part E**, 47, 284-294, (2011).
- [7] Kabak, M., Erbas, M., Çetinkaya, C. ve Özceylan, E., A GIS-based MCDM approach for the evaluation of bike-share stations, **Journal of Cleaner Production**, 201, 49-60, (2018).
- [8] DeMaio, P., Bike-sharing: history, impacts, models of provision, and future, **Journal of Public Transportation**, 12, 4, (2009).
- [9] Chan, W. T. ve Suja, T., A multi-criteria approach in designing bicycle tracks, **In: Map Asia Conference**, (2003).
- [10] <https://www.google.com/maps>, (01.06.2020).
- [11] Erbolat Taşabat, S., Cinemre, N. ve Şen, S., Financial performance evaluation of Turkish deposit banks by application of different weighting techniques in multi-criteria decision making methods, **Social Sciences Research Journal**, 4, 2, 96-110, (2015).
- [12] Çol Yılmaz, D. ve Gerçek, H., Prioritization of integrated bicycle network clusters in Istanbul using analytic hierarchy process, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 20, 6, 215-224, (2014).
- [13] Mosallanejad, M., Azadedel, Y. ve Dalirpour, S., Improving bicycle path in urban area using AHP and GIS, **International Journal of Fundamental Arts and Architecture**, 1, 1, 1-7, (2015).
- [14] Pal, A. ve Zhang, Y., Free-floating bike sharing: Solving real-life large-scale static rebalancing problems, **Transportation Research Part C**, 80, 92-116, (2017).

- [15] Choudhary, K. D., Altaf Taher Shah, A. T. ve Kasture A. B., A suggestive implementation on study of an iot-based dock-less bicycle sharing venture, **International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences**, 6, 5, (2018).
- [16] Namiot, D. ve Sneps-Snepe, M., On bikes in smart cities, **Automatic Control and Computer Sciences**, 53, 1, 63-71, (2019).
- [17] García-Palomares, J. C., Gutiérrez, J. ve Latorre, M., Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach, **Applied Geography**, 35, 235-246, (2012).
- [18] Erbaş, M., Kabak, M., Özceylan, E. ve Çetinkaya, C., Optimal siting of electric vehicle charging stations: a GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis, **Energy**, 163, 1017-1031, (2018).
- [19] Saaty, T. L., **The Analytic Hierarchy Process**, New York: McGraw Hill, (1980).
- [20] Saplıoğlu, M. ve Aydın, M. M., Choosing safe and suitable bicycle routes to integrate cycling and public transport systems, **Journal of Transport & Health**, 10, 236-252, (2018).
- [21] Saaty, T. L., The analytic hierarchy and analytic network processes: applications to decisions under risk, **European Journal of Pure and Applied Mathematics**, 1, 1, 122-196, (2008).
- [22] Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., ve Rhind, D. W., **Geographic Information Systems and Science**, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, New York NY, (2005).
- [23] Bernhardsen, T., **Geographic information systems: an introduction**, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, New York NY, (2002).
- [24] Jahanshahi, D., Minaei, M., Kharazmi, O. A. ve Minaei, F., Evaluation and relocating bicycle sharing stations in mashhad city using multi-criteria analysis, **International Journal of Transportation Engineering**, 6, 3, 23, (2019).
- [25] Khadem, N. K., Kabir, M. M., Banerjee, S., ve Jeihani, M., Bike station suitability on university campus using origin - destination matrix - a Morgan State University case study. **Urban Science**, 3, 74, (2019).
- [26] <http://www.superdecisions.com>, (01.06.2020).
- [27] Larsen, J., Patterson, Z., ve El-Geneidy, A., Build it. But where? The use of geographic information systems in identifying locations for new cycling infrastructure, **International Journal of Sustainable Transportation**, 7, 299-317, (2013).

# Fractional approach for multi-dimensional wave-like equations with variable coefficient using an efficient method

Fatma Berna BENLİ\*

Erciyes University, Faculty of Education, Kayseri, Turkey

Geliş Tarihi (Received Date): 17.09.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 11.12.2020

## Abstract

*In this paper, we study multi-dimensional wave-like equations with variable coefficients within the frame of the fractional calculus using fractional natural decomposition method (FNDM). The considered algorithm is an elegant combination of natural transform and decomposition scheme. Five different cases are considered to illustrate and validate the competence of the projected technique in the present framework. The behaviours of the obtained results have been captured for diverse fractional order. To present the reliability and exactness of the FNDM, the numerical study has been presented. The achieved consequences illuminate that, the projected technique is very effective to analyse and easy to employ to investigate the nature of fractional nonlinear coupled system exemplifying the real-world problems.*

**Keywords:** *Fractional wave-like equations, Caputo derivative, fractional natural decomposition method.*

## Değişken katsayılı çok boyutlu dalga benzeri denklemler için kesirli yaklaşım üzerine etkili bir metot

## Öz

*Bu çalışmanın temel amacı, fraksiyonel doğal ayrıştırma yöntemini (FNDM) kullanarak kesirli operatör çerçevesinde değişken katsayılı çok boyutlu dalga benzeri denklemleri incelemektir. Değerlendirilen algoritma, doğal dönüşüm ve ayrıştırma şemasının güzel bir kombinasyonudur. Mevcut çerçevede öngörülen tekniğin yeterliliğini göstermek ve doğrulamak için beş farklı durum ele alınmıştır. Elde edilen sonuçların davranışları, çeşitli kesirli sıralar için değerlendirilmiştir. FNDM'nin güvenilirliğini ve kesinliğini göstermek için sayısal çalışma sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, öngörülen tekniğin*

\* Fatma Berna BENLİ, akpinarb@erciyes.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-3421-371X>

*analiz edilmesinin çok etkili olduğunu ve gerçek dünya problemlerini örnekleyen kesirli doğrusal olmayan bağlı sistemin doğasını araştırmak için kullanılmasının kolay olduğunu göstermektedir.*

**Anahtar kelimeler:** *Kesirli dalga benzeri denklemler, Caputo türevi, kesirli doğal ayrıştırma yöntemi.*

## 1. Introduction

The pivotal aim of phenomena is describing using the concept of differentiation and integration is to exemplify the corresponding consequences related to the rate of change in an accurate and interesting manner. Particularly, while analysing processes with variation, changes, chaotic, epidemiology and randomness; these operators are effectively illustrated with supporting tools like software and mathematical algorithms to study the corresponding results. The achieving result of these tools related to nonlinear phenomena is the hot topic in the present era. However, when researchers seeking efficient and methodical tools to study long-range time-based problems, hereditary based models and history related systems, and as they proved classical concept is not suitable and later suggested the novel concept to overcome the limitations, called fractional calculus (FC). The most stimulating leaps in scientific and technological significance are found within FC from the last thirty years.

The models with fractional order enlarge our perceptions of differentiability and amalgamate system memory and non-local properties through distinct class derivatives of FC. These constituents aid to illustrate the diverse problems through various spaces and time scales without segregate the systems into reduced components. The derivatives with fractional order capture or can limn significant features of nonlinear models. Further, the fractional operators are local in nature and which gives by employing integer order operators we can portray the vicissitudes in the neighbourhood of a point but applying non-integer operators one can analyse the variations in a spell [1-6]. These possessions make derivatives with fractional order appropriate to model various phenomena such as signal process, optics, financial models, chaos behaviour, image processing, human diseases and many others [7-25]. The numerical and analytical results for these models play a significant role in illustrating the nature of complex problems. Hyperbolic equations are amongst the most exigent to analyse due to sharp features in their solutions. Recently, many authors investigated many mathematical models exemplifying real world problems with the help of fractional calculus, for instance the mathematical model of HIV-1 infection of CD4+T-cells with conformable fractional operator is investigated in [26], the model arising in falling film problems is numerically studied by authors in [27] using two novel techniques, fractional SIR epidemic model of childhood disease examined with the help of Mittag-Leffler memory in [28], some interesting results integro-differential equation of fractional order ith state dependent delay are derived in [29], nondensely characterized integro-differential equations are studied by authors in [30], the numerical stimulation is presented by researchers in [31] for the coupled fractional Whitham-Broer-Kaup equations describing the propagation shallow water waves, by using Hilfer fractional derivative scholars in [32] derived some stimulating results, by using two different algorithms authors in [33] find the solution for Fokas-Lenells equation, authors in [34] presented the numerical stimulation for the nonlinear equations occurs in ion acoustic waves in plasma with Mittag-Leffler law, and many

research considered FC has tool with its fundamental notions and results to derive some essential and stimulating results [35-36].

The study of wave-like equations is very essential in understanding and capturing the various complex phenomena arisen in connected areas of physics. For instance, the vibrations of acoustic or string waves in a pipe and the velocity of the wave are evaluated by the physical properties of the material through which it propagates. These equations are also employed to study and analyse fluid migration at depth in the crust through fluid-saturated porous media [36], coupling currents in a flat two-layered multi-strand cable having superconductivity [37], elastic waves in soils with non-homogeneous [38] and earthquake stresses [39]. By the aid of single wave-like equation with time-dependent in the flat cables associated with the magnetic field, the gradually decaying long current loops with the additional established effects are illustrated [37]. Here, we hire the time-fractional wave-like equation [40-43]:

$$D_t^\mu v(x, y, z, t) = f(x, y, z)v_{xx} + g(x, y, z)v_{yy} + h(x, y, z)v_{zz}, 1 < \mu \leq 2, \quad (1)$$

$$t > 0,$$

respectively associate with the Neumann boundary conditions and initial conditions

$$\begin{aligned} v_x(0, y, z, t) &= f_1(y, z, t), & v_x(a, y, z, t) &= f_2(y, z, t), \\ v_y(x, 0, z, t) &= g_1(x, z, t), & v_y(x, b, z, t) &= g_2(x, z, t), \\ v_z(x, y, 0, t) &= h_1(x, y, t), & v_z(x, y, c, t) &= h_2(x, y, t), \end{aligned} \quad (2)$$

And

$$v(x, y, z, 0) = \chi(x, y, z), \quad v_t(x, y, z, 0) = \psi(x, y, z). \quad (3)$$

Although the modelling the nonlinear and complex real-world problems is a difficult job, finding the solution for the corresponding systems of equations is very hard in order to analyse the corresponding behaviour. Since we can solve some linear equations without the essence of composite tools but when we want to study highly nonlinear phenomena, we should have an efficient and accurate method to find the solution. There are numerous algorithms in this connection, but each technique has its own equipment and limitations. For instance, some of the essentials of the method to convert nonlinear to linear and partial to ordinary, some schemes requires additional polynomials to evaluate, some methods requires more time for evaluations, few of the has complicated solution procedure and others. In this connection, the Adomian decomposition method (ADM) was proposed by George Adomian in 1984 with the help of Adomian polynomials [44]. Along with the arbitrary external parameter, Adomian polynomials are generalizing to a Maclaurin series and offers rapid convergence in the obtained results. Soon after, it has been widely employed by many physicists and mathematicians to find the solution for numerous classes of models in order to analyse corresponding consequences and capture them with stimulating results. However, scholars always look forward to the development of new tools to examine phenomena with methodical and accurate solution procedure by reducing the computational level.

Some issues and limitations are pointed by authors about ADM related to huge computation and time taken for evaluation and others. Later, Rawashdeh and Maitama nurtured new modified scheme to overcome these limitations, called fractional natural

decomposition method (FNDM) by the help of natural transform [45] with ADM to solve fractional differential equation [46, 47]. From last two years, FNDM is significantly and efficiently employed to the diverse class of real-world models [48-52].

## 2. Preliminaries

In this segment, we presented some basic and essentials notions of FC [1-6].

**Definition 1.** The integral of a function  $f(t) \in C_\delta (\delta \geq -1)$  with respect to fractional Riemann-Liouville is presented as [1-6]

$$J^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \int_0^t (t - \vartheta)^{\mu-1} f(\vartheta) d\vartheta. \tag{4}$$

**Definition 2.** The Caputo fractional derivative of  $f \in C_{-1}^n$  is presented as [1-6]

$$D_t^\alpha f(t) = \begin{cases} \frac{d^n f(t)}{dt^n}, & \alpha = n \in \mathbb{N}, \\ \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \int_0^t (t - \vartheta)^{n-\alpha-1} f^{(n)}(\vartheta) d\vartheta, & n - 1 < \alpha < n, n \in \mathbb{N}. \end{cases} \tag{5}$$

**Definition 3.** For the one-parameter, the Mittag-Leffler type function is presented [54] as

$$E_\alpha(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)}, \quad \alpha > 0, z \in \mathbb{C}. \tag{6}$$

**Definition 4.** For the function  $f(t)$ , the natural transform (NT) is denoted by  $\mathbb{N}[f(t)]$  for  $t \in \mathbb{R}$  and presented with the NT variables  $s$  and  $\omega$  by [55]

$$\mathbb{N}[f(t)] = R(s, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-st} f(\omega t) dt; \quad s, \omega \in (-\infty, \infty).$$

Now, using Heaviside function  $H(t)$  we define the NT as

$$\mathbb{N}[f(t)H(t)] = \mathbb{N}^+[f(t)] = R^+(s, \omega) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(\omega t) dt; \quad s, \omega \in (0, \infty) \text{ and } t \in \mathbb{R}. \tag{7}$$

Further, for  $\omega = 1$ , Equation (7) is reduces to the Laplace transform, for  $s = 1$  and the Equation (7) represents the Sumudu transform.

**Theorem 1 [55]:** The NT  $R_\alpha(s, \omega)$  of the fractional derivative of  $f(t)$  Riemann-Liouville sense is symbolized by  $D^\alpha f(t)$  and defined as

$$\mathbb{N}^+[D^\alpha f(t)] = R_\alpha(s, \omega) = \frac{s^\alpha}{\omega^\alpha} R(s, \omega) - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{s^k}{\omega^{\alpha-k}} [D^{\alpha-k-1} f(t)]_{t=0}, \tag{8}$$

where  $R(s, \omega)$  is NT of  $f(t)$ ,  $\alpha$  is the order and  $n$  be any positive integer. Further  $n - 1 \leq \alpha < n$ .

**Theorem 2 [55]:** The natural transform  $R_\alpha(s, \omega)$  of the fractional derivative in Caputo sense of  $f(t)$  is symbolize by  ${}^c D^\alpha f(t)$  and defined as



$$\mathbb{N}^+[{}^c D^\alpha f(t)] = R_\alpha^c(s, \omega) = \frac{s^\alpha}{\omega^\alpha} R(s, \omega) - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{s^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k f(t)]_{t=0}. \quad (9)$$

### 3. Fundamental solution procedure of the proposed algorithm

In this section, we hired coupled equations to present the basic procedure of the projected scheme with initial conditions

$$D_t^\alpha v(x, t) + Rv(x, t) + Fv(x, t) = h(x, t), \quad (10)$$

and

$$v(x, 0) = g(x), \quad (11)$$

where  $D^\alpha v(x, t)$  signifies the fractional Caputo derivative of  $v(x, t)$ ,  $h(x, t)$  is the source term,  $R$  and  $F$  respectively the linear and nonlinear differential operator. On plugging  $NT$  and by the assist of Theorem 2, then Equation (10) gives

$$\begin{aligned} V(x, s, \omega) &= \frac{v^\alpha}{s^\alpha} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{s^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k v(x, t)]_{t=0} + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[h(x, t)] \\ &- \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[R v(x, t) + Fv(x, t)]. \end{aligned} \quad (12)$$

On employing inverse  $NT$  on Equation (12) to get

$$v(x, t) = H(x, t) - \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[Rv(x, t) + F v(x, t)] \right]. \quad (13)$$

From non-homogeneous terms and given initial condition,  $H(x, t)$  are exists. The infinite series solution is presented as

$$v(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t), \quad F v(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n, \quad (14)$$

where the  $A_n$  is indicating the nonlinear terms of  $Fv(x, t)$ . By using the Equations (13) and (14), we have

$$\sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) = H(x, t) - \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ R \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) \right] + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \right]. \quad (15)$$

By associating two sides of Equation (15), we get

$$\begin{aligned} v_0(x, t) &= H(x, t), \\ v_1(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[Rv_0(x, t)] + A_0 \right], \\ v_2(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[Rv_1(x, t)] + A_1 \right], \end{aligned}$$

⋮

In the same manner, we can achieve the recursive

$$v_{n+1}(x, t) = -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ [Rv_n(x, t)] + A_n \right]. \tag{16}$$

Finally, we define the approximate solutions as

$$v(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t).$$

**4. Solution for wave-like equations having fractional order**

Here, we consider arbitrary order wave-like equations having variable coefficients in ordered to illuminate the exactness and competence of the considered method.

**Example 4.1.** Consider the 1D fractional wave-like equation [17, 35]:

$$D^\mu v(x, t) = \frac{1}{2} x^2 v_{xx}, \quad 1 < \mu \leq 2, \tag{17}$$

associate to initial conditions

$$v(x, 0) = x \text{ and } v_t(x, 0) = x^2. \tag{18}$$

By employing *NT* on Equation (17), we have

$$\mathbb{N}^+ [D_t^\mu v(x, t)] = \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{2} x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right]. \tag{19}$$

The non-linear operator is defined as

$$\frac{s^\mu}{w^\mu} \mathbb{N}^+ [v(x, t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{w^{k-\mu}}{s^{k+1-\mu}} [D^k v]_{t=0} = \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{2} x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right]. \tag{20}$$

By Equations (18) and (20), we get

$$\mathbb{N}^+ [v(x, t)] = x + x^2 t + \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{2} x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right]. \tag{21}$$

On plugging inverse *NT* to Equation (21), we obtain

$$v(x, t) = x + x^2 t + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{2} x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right] \right]. \tag{22}$$

Let  $v(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t)$  be the infinite series solution of  $v(x, t)$ . Now, we rewrite Equation (22) as

$$\sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) = x + x^2 t + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{2} x^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial^2 v_n}{\partial x^2} \right] \right]. \quad (23)$$

On relating Equation (23) with two sides, we get

$$\begin{aligned} v_0(x, t) &= x + x^2 t, & v_1(x, t) &= \frac{x^2 t^{2\mu+1}}{\Gamma[\mu + 2]}, & v_2(x, t) &= \frac{x^2 t^{2\mu+1}}{\Gamma[2\mu + 2]}, \\ v_3(x, t) &= \frac{x^2 t^{3\mu+1}}{\Gamma[3\mu + 2]}, & v_4(x, t) &= \frac{x^2 t^{4\mu+1}}{\Gamma[4\mu + 2]}, & v_5(x, t) &= \frac{x^2 t^{5\mu+1}}{\Gamma[5\mu + 2]}, \\ v_6(x, t) &= \frac{x^2 t^{6\mu+1}}{\Gamma[6\mu + 2]}, & v_7(x, t) &= \frac{x^2 t^{7\mu+1}}{\Gamma[7\mu + 2]}, & v_8(x, t) &= \frac{x^2 t^{8\mu+1}}{\Gamma[8\mu + 2]}, \\ v_9(x, t) &= \frac{x^2 t^{9\mu+1}}{\Gamma[9\mu + 2]}, & & \dots & & \end{aligned}$$

Similarly, the rest of the terms of  $v_n (n \geq 10)$  can be achieved. Then, we establish the series solutions as

$$\begin{aligned} v(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) = v_0(x, t) + v_1(x, t) + v_2(x, t) + v_3(x, t) + \dots \\ &= x + x^2 t + \frac{x^2 t^{2\mu+1}}{\Gamma[\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{2\mu+1}}{\Gamma[2\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{3\mu+1}}{\Gamma[3\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{4\mu+1}}{\Gamma[4\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{5\mu+1}}{\Gamma[5\mu + 2]} \\ &+ \frac{x^2 t^{6\mu+1}}{\Gamma[6\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{7\mu+1}}{\Gamma[7\mu + 2]} + \dots \end{aligned}$$

The exact solution for Equation (17) at  $\mu = 2$  is  $v(x, t) = x + x^2 \sinh(t)$ .

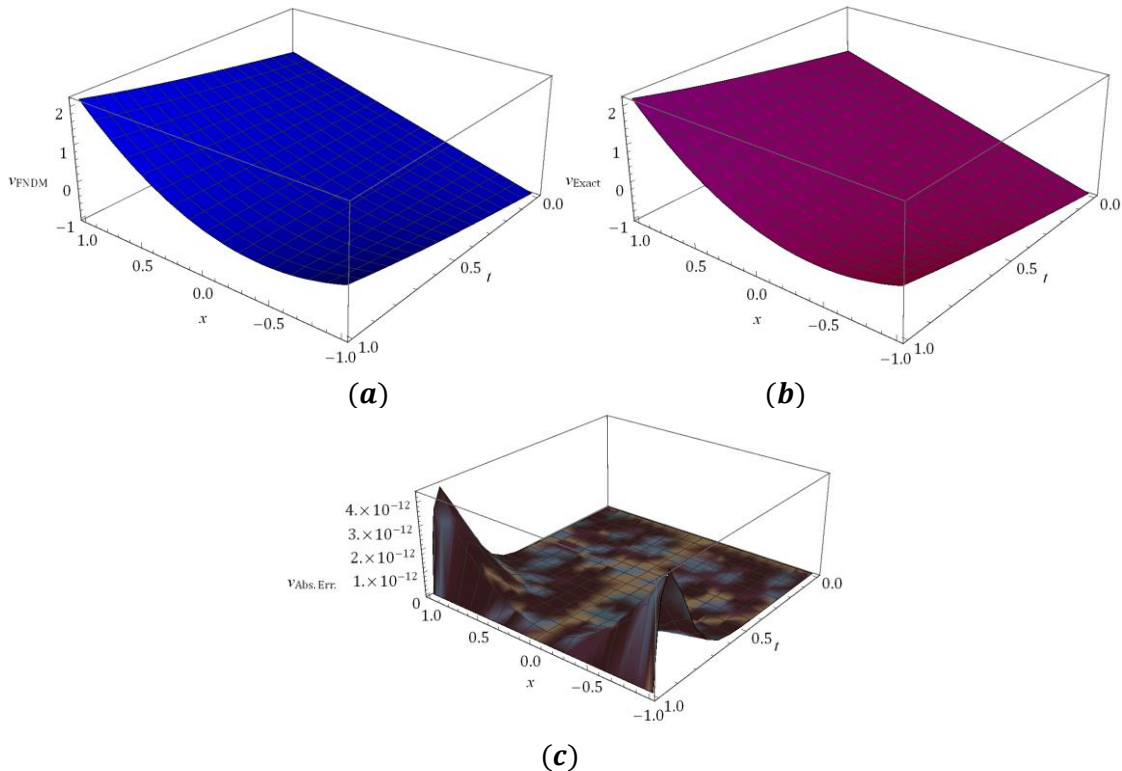


Figure 1. Behaviour of (a) obtained results (b) analytical solution (c)  $v_{Abs.Err.} = |v_{Exact} - v_{FNDM}|$  for Ex. 4.1 at  $\mu = 2$ .

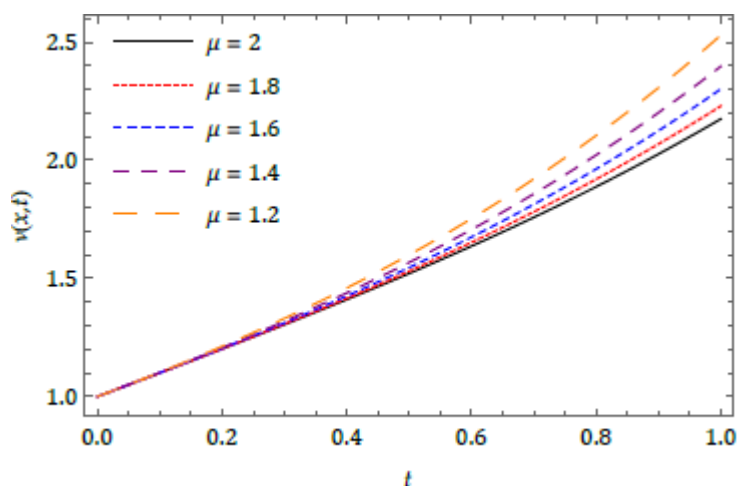


Figure 2. Behaviour of obtained solution for Ex. 4.1 with distinct  $\mu$  at  $x = 1$ .

Table 1. Numerical comparison of different order solution for Ex. 4.1 with diverse  $t$  and  $x$  at  $\mu = 2$ .

$x$	$t$	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(3)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(5)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(7)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(9)} $
0.25	0.25	$6.57391 \times 10^{-13}$	0	0	0
	0.50	$3.37159 \times 10^{-10}$	$1.22818 \times 10^{-15}$	$6.10623 \times 10^{-16}$	$6.17562 \times 10^{-16}$
	0.75	$1.29984 \times 10^{-8}$	$2.39093 \times 10^{-13}$	$5.96190 \times 10^{-14}$	$5.96190 \times 10^{-14}$
	1	$1.73809 \times 10^{-7}$	$1.00849 \times 10^{-11}$	$1.66533 \times 10^{-16}$	$1.38778 \times 10^{-17}$
0.50	0.25	$2.62956 \times 10^{-12}$	0	0	0
	0.50	$1.34864 \times 10^{-9}$	$4.91274 \times 10^{-15}$	$2.44249 \times 10^{-15}$	$2.47025 \times 10^{-15}$
	0.75	$5.19938 \times 10^{-8}$	$9.56374 \times 10^{-13}$	$2.38476 \times 10^{-13}$	$2.38476 \times 10^{-13}$
	1	$6.95236 \times 10^{-7}$	$4.03395 \times 10^{-11}$	$6.66134 \times 10^{-16}$	$5.55112 \times 10^{-17}$
0.75	0.25	$5.91652 \times 10^{-12}$	0	0	0
	0.50	$3.03443 \times 10^{-9}$	$1.10467 \times 10^{-14}$	$5.60663 \times 10^{-15}$	$5.55112 \times 10^{-15}$
	0.75	$1.16986 \times 10^{-7}$	$2.15183 \times 10^{-12}$	$5.36515 \times 10^{-13}$	$5.36460 \times 10^{-13}$
	1	$1.56428 \times 10^{-6}$	$9.07638 \times 10^{-11}$	$1.55431 \times 10^{-15}$	0
1	0.25	$1.05183 \times 10^{-11}$	0	0	0
	0.50	$5.39454 \times 10^{-9}$	$1.96509 \times 10^{-14}$	$9.76996 \times 10^{-15}$	$9.88098 \times 10^{-15}$
	0.75	$2.07975 \times 10^{-7}$	$3.82550 \times 10^{-12}$	$9.53904 \times 10^{-13}$	$9.53904 \times 10^{-13}$
	1	$2.78095 \times 10^{-6}$	$1.61358 \times 10^{-10}$	$2.66454 \times 10^{-15}$	$2.22045 \times 10^{-16}$

**Example 4.2.** Consider the 2D wave-like equation having fractional order:

$$D^\mu v(x, y, t) = \frac{1}{12} (x^2 v_{xx} + y^2 v_{yy}), \quad 1 < \mu \leq 2, \tag{24}$$

associated with

$$v(x, y, 0) = x^4 \text{ and } v_t(x, y, 0) = y^4. \tag{25}$$

By employing *NT* on Equation (24), we have

$$\mathbb{N}^+ [D_t^\mu v(x, y, t)] = \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{12} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right]. \tag{26}$$

The non-linear operator is defined as

$$\frac{s^\mu}{w^\mu} \mathbb{N}^+ [v(x, y, t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{w^{k-\mu}}{s^{k+1-\mu}} [D^k v]_{t=0} = \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{12} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right]. \tag{27}$$

By Equations (25) and (27), we get

$$\mathbb{N}^+ [v(x, y, t)] = x^4 + ty^4 + \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{12} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right]. \tag{28}$$

On applying inverse *NT* to Equation (28), it gives

$$v(x, y, t) = x^4 + ty^4 + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{12} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \right] \right]. \tag{29}$$

Assume that, the infinite series solution for  $v(x, y, t)$  is  $v(x, y, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, t)$ . Now, we rewrite Equation (29) as

$$\sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, t) = x^4 + ty^4 + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{1}{12} \left( x^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial^2 v_n}{\partial x^2} + y^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial^2 v_n}{\partial y^2} \right) \right] \right]. \tag{30}$$

On relating Equation (30) with two sides, we get

$$\begin{aligned} v_0(x, y, t) &= x^4 + ty^4, \quad v_1(x, y, t) = \left( \frac{x^4}{\Gamma[\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[\mu + 2]} \right) t^\mu, \quad v_2(x, y, t) \\ &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[2\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[2\mu + 2]} \right) t^{2\mu}, \\ v_3(x, y, t) &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[3\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[3\mu + 2]} \right) t^{3\mu}, \quad v_4(x, y, t) \\ &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[4\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[4\mu + 2]} \right) t^{4\mu}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v_5(x, y, t) &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[5\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[5\mu + 2]} \right) t^{5\mu}, & v_6(x, y, t) \\
 &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[6\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[6\mu + 2]} \right) t^{6\mu}, \\
 v_7(x, y, t) &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[7\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[7\mu + 2]} \right) t^{7\mu}, & v_8(x, y, t) \\
 &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[8\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[8\mu + 2]} \right) t^{8\mu}, \\
 v_9(x, y, t) &= \left( \frac{x^4}{\Gamma[9\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[9\mu + 2]} \right) t^{9\mu}, & \dots
 \end{aligned}$$

Then, we obtain

$$\begin{aligned}
 v(x, y, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, t) = v_0(x, y, t) + v_1(x, y, t) + v_2(x, y, t) + v_3(x, y, t) + \dots \\
 &= x^4 + ty^4 + \left( \frac{x^4}{\Gamma[\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[\mu + 2]} \right) t^\mu + \left( \frac{x^4}{\Gamma[2\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[2\mu + 2]} \right) t^{2\mu} \\
 &\quad + \left( \frac{x^4}{\Gamma[3\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[3\mu + 2]} \right) t^{3\mu} \\
 &+ \left( \frac{x^4}{\Gamma[4\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[4\mu + 2]} \right) t^{4\mu} + \left( \frac{x^4}{\Gamma[5\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[5\mu + 2]} \right) t^{5\mu} \\
 &\quad + \left( \frac{x^4}{\Gamma[6\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[6\mu + 2]} \right) t^{6\mu} \\
 &+ \left( \frac{x^4}{\Gamma[7\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[7\mu + 2]} \right) t^{7\mu} + \left( \frac{x^4}{\Gamma[8\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[8\mu + 2]} \right) t^{8\mu} \\
 &\quad + \left( \frac{x^4}{\Gamma[9\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[9\mu + 2]} \right) t^{9\mu} + \dots
 \end{aligned}$$

The analytical solution for Equation (24) for  $\mu = 2$  is

$$v(x, y, t) = x^4 \cosh(t) + y^4 \sinh(t).$$

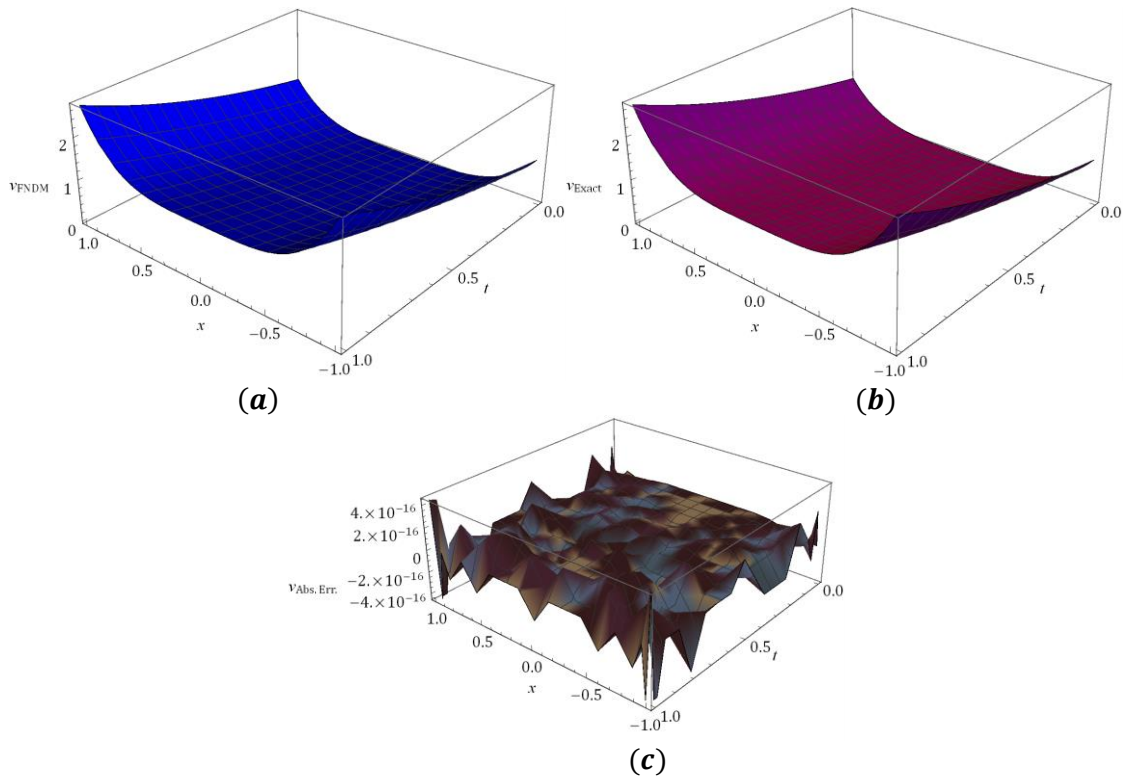


Figure 3. Behaviour of (a) obtained results (b) analytical solution (c)  $v_{Abs.Err.} = |v_{Exact} - v_{FNDM}|$  for Ex. 4.2 at  $\mu = 2$ .

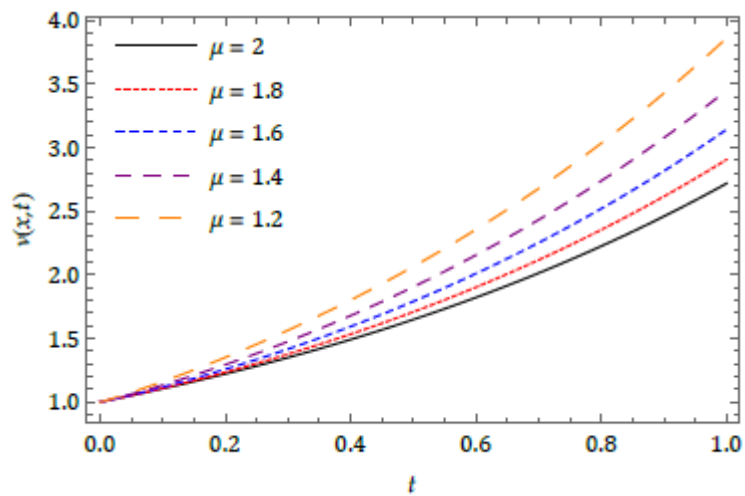


Figure 4. Nature of FNDM results for Ex. 4.2 with distinct  $\mu$  at  $x = 1$ .

**Table 2.** Numerical study for Ex. 4.2 with diverse  $t$  and  $x$  at  $\mu = 2$ .

$x$	$t$	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(3)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(5)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(7)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(9)} $
0.25	0.25	$1.19976 \times 10^{-11}$	0	0	$5.55112 \times 10^{-17}$
	0.50	$5.77404 \times 10^{-9}$	$2.16493 \times 10^{-14}$	$1.11022 \times 10^{-16}$	0
	0.75	$2.17735 \times 10^{-7}$	$4.08451 \times 10^{-12}$	0	0
	1	$2.87891 \times 10^{-6}$	$1.69558 \times 10^{-10}$	$2.88658 \times 10^{-15}$	0
0.50	0.25	$3.41873 \times 10^{-11}$	$5.55112 \times 10^{-17}$	0	0
	0.50	$1.14665 \times 10^{-8}$	$5.15143 \times 10^{-14}$	0	0
	0.75	$3.64134 \times 10^{-7}$	$7.97140 \times 10^{-12}$	$1.11022 \times 10^{-16}$	0
	1	$4.34840 \times 10^{-6}$	$2.92558 \times 10^{-10}$	$5.77316 \times 10^{-15}$	$2.22045 \times 10^{-16}$
0.75	0.25	$1.30343 \times 10^{-10}$	0	0	$1.11022 \times 10^{-16}$
	0.50	$3.61337 \times 10^{-8}$	$1.80966 \times 10^{-13}$	$1.11022 \times 10^{-16}$	$1.11022 \times 10^{-16}$
	0.75	$9.98530 \times 10^{-7}$	$2.48142 \times 10^{-11}$	$4.44089 \times 10^{-16}$	$2.22045 \times 10^{-16}$
	1	$1.07162 \times 10^{-5}$	$8.25556 \times 10^{-10}$	$1.79856 \times 10^{-14}$	$2.22045 \times 10^{-16}$
1	0.25	$3.89223 \times 10^{-10}$	0	0	0
	0.50	$1.02545 \times 10^{-7}$	$5.29798 \times 10^{-13}$	$2.22045 \times 10^{-16}$	0
	0.75	$2.70652 \times 10^{-6}$	$7.01603 \times 10^{-11}$	$4.44089 \times 10^{-16}$	0
	1	$2.78602 \times 10^{-5}$	$2.26055 \times 10^{-9}$	$5.01821 \times 10^{-14}$	$4.44089 \times 10^{-16}$

**Example 4.3.** Consider the 3D fractional wave-like equation:

$$D^\mu v(x, y, z, t) = (x^2 + y^2 + z^2) + \frac{1}{2}(x^2 v_{xx} + y^2 v_{yy} + z^2 v_{zz}), \quad 1 < \mu \leq 2, \quad (31)$$

associated with

$$v(x, y, z, 0) = 0 \text{ and } v_t(x, y, z, 0) = x^2 + y^2 - z^2. \quad (32)$$

By employing *NT* on Equation (31), we have

$$\mathbb{N}^+ [D_t^\mu v(x, y, z, t)] = \mathbb{N}^+ \left[ (x^2 + y^2 + z^2) + \frac{1}{2} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + z^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right]. \quad (33)$$

The non-linear operator is defined as



$$\frac{s^\mu}{w^\mu} \mathbb{N}^+[v] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{w^{k-\mu}}{s^{k+1-\mu}} [D^k v]_{t=0} = \mathbb{N}^+ \left[ (x^2 + y^2 + z^2) + \frac{1}{2} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + z^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right]. \quad (34)$$

By Equations (32) and (34), we get

$$\mathbb{N}^+[v(x, y, z, t)] = (x^2 + y^2 - z^2)t + \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ (x^2 + y^2 + z^2) + \frac{1}{2} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + z^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right]. \quad (35)$$

On applying inverse  $NT$  to Equation (35), it gives

$$v(x, y, z, t) = (x^2 + y^2 - z^2)t + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ (x^2 + y^2 + z^2) + \frac{1}{2} \left( x^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + y^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + z^2 \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right] \right]. \quad (36)$$

The infinite series solution for  $v(x, y, z, t)$  is  $v(x, y, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, z, t)$ . Now, we rewrite Equation (36) as

$$\sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, z, t) = (x^2 + y^2 - z^2)t + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ (x^2 + y^2 + z^2) + \frac{1}{2} \left( x^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial^2 v_n}{\partial x^2} + y^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial^2 v_n}{\partial y^2} + z^2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\partial^2 v_n}{\partial z^2} \right) \right] \right]. \quad (37)$$

On relating Equation (37) with two sides, we get

$$\begin{aligned} v_0(x, y, z, t) &= (x^2 + y^2 - z^2)t, \quad v_1(x, y, z, t) \\ &= (x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^\mu}{\Gamma[\mu + 1]} + (x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{\mu+1}}{\Gamma[\mu + 2]}, \\ v_2(x, y, z, t) &= (x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^{2\mu}}{\Gamma[2\mu + 1]} + (x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{2\mu+1}}{\Gamma[2\mu + 2]}, \\ v_3(x, y, z, t) &= (x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^{3\mu}}{\Gamma[3\mu + 1]} + (x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{3\mu+1}}{\Gamma[3\mu + 2]}, \\ v_4(x, y, z, t) &= (x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^{4\mu}}{\Gamma[4\mu + 1]} + (x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{4\mu+1}}{\Gamma[4\mu + 2]}, \dots \end{aligned}$$

Then, we can obtain

$$\begin{aligned} v(x, y, z, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) \\ &= v_0(x, y, z, t) + v_1(x, y, z, t) + v_2(x, y, z, t) + v_3(x, y, z, t) + \dots \\ &= (x^2 + y^2 - z^2)t + (x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^\mu}{\Gamma[\mu + 1]} + (x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{\mu+1}}{\Gamma[\mu + 2]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+(x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^{2\mu}}{\Gamma[2\mu + 1]} + (x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{2\mu+1}}{\Gamma[2\mu + 2]} + (x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^{3\mu}}{\Gamma[3\mu + 1]} \\
 &+(x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{3\mu+1}}{\Gamma[3\mu + 2]} + (x^2 + y^2 + z^2) \frac{t^{4\mu}}{\Gamma[4\mu + 1]} + (x^2 + y^2 - z^2) \frac{t^{4\mu+1}}{\Gamma[4\mu + 2]} + \dots
 \end{aligned}$$

The analytical solution for Eq. (31) for  $\mu = 2$  is

$$v(x, y, z, t) = (x^2 + y^2)(e^t - 1) + z^2(e^{-t} - 1).$$

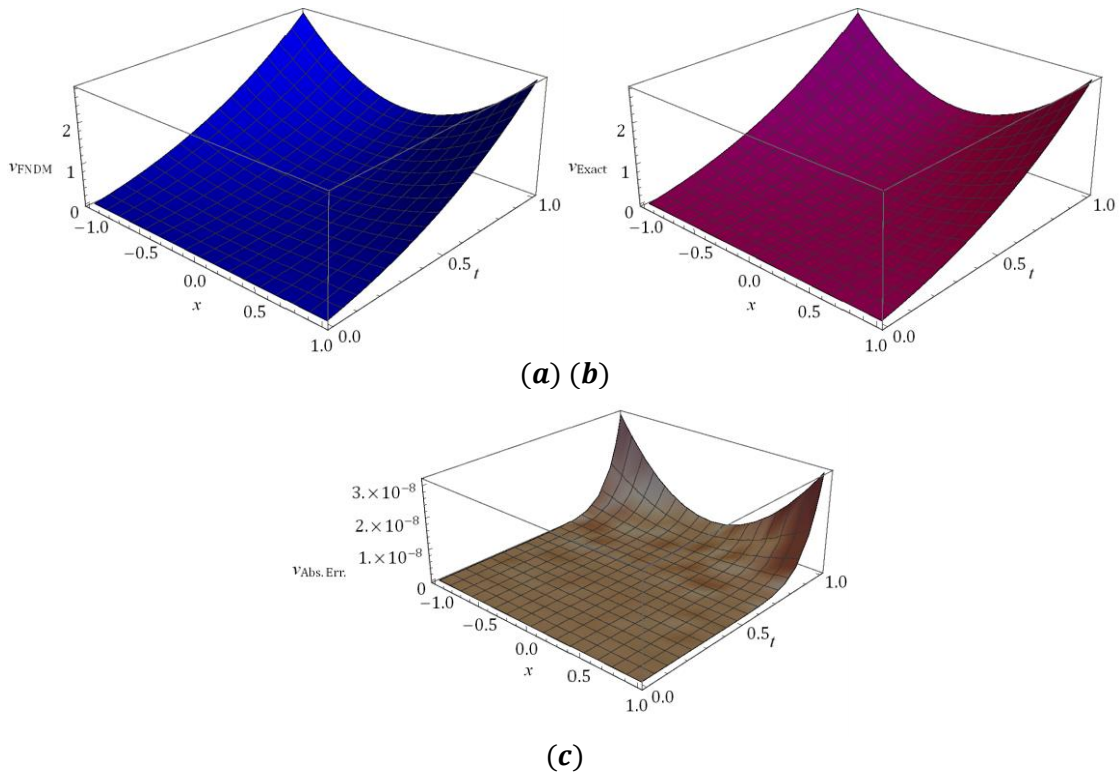


Figure 5. Behaviour of (a) obtained results (b) analytical solution (c)  $v_{Abs.Err.} = |v_{Exact} - v_{FNDM}|$  for Ex. 4.3 at  $\mu = 2$ .

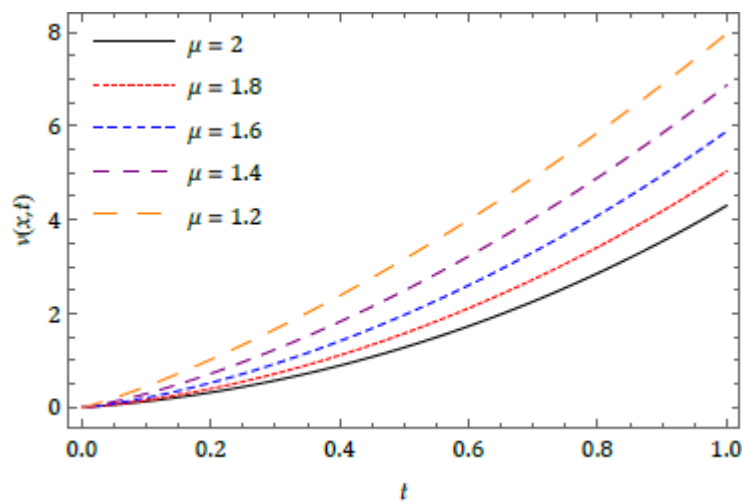


Figure 6. Nature of FNDM results for Ex. 4.3 with distinct  $\mu$  at  $x = 1$ .

Table 3. Numerical study for Ex. 4.3 with diverse  $t$  and  $x$  at  $\mu = 2$ .

$x$	$t$	$\left  v_{Exact} - v_{FNDM}^{(3)} \right $	$\left  v_{Exact} - v_{FNDM}^{(5)} \right $	$\left  v_{Exact} - v_{FNDM}^{(7)} \right $	$\left  v_{Exact} - v_{FNDM}^{(9)} \right $
0.25	0.25	$3.36903 \times 10^{-4}$	$7.00901 \times 10^{-7}$	$7.81737 \times 10^{-10}$	$5.42546 \times 10^{-13}$
	0.50	$5.43243 \times 10^{-3}$	$4.50567 \times 10^{-5}$	$2.00711 \times 10^{-7}$	$5.56867 \times 10^{-10}$
	0.75	$2.78314 \times 10^{-2}$	$5.16656 \times 10^{-4}$	$5.16625 \times 10^{-6}$	$3.22101 \times 10^{-8}$
	1	$8.93872 \times 10^{-2}$	$2.92888 \times 10^{-3}$	$5.18998 \times 10^{-5}$	$5.74275 \times 10^{-7}$
0.50	0.25	$3.69012 \times 10^{-4}$	$7.66822 \times 10^{-7}$	$8.54716 \times 10^{-10}$	$5.92895 \times 10^{-13}$
	0.50	$5.97391 \times 10^{-3}$	$4.94356 \times 10^{-5}$	$2.19938 \times 10^{-7}$	$6.09719 \times 10^{-10}$
	0.75	$3.07259 \times 10^{-2}$	$5.68478 \times 10^{-4}$	$5.67372 \times 10^{-6}$	$3.53313 \times 10^{-8}$
	1	$9.90651 \times 10^{-2}$	$3.23173 \times 10^{-3}$	$5.71236 \times 10^{-5}$	$6.31066 \times 10^{-7}$
0.75	0.25	$4.22528 \times 10^{-4}$	$8.76692 \times 10^{-7}$	$9.76348 \times 10^{-10}$	$6.76939 \times 10^{-13}$
	0.50	$6.87640 \times 10^{-3}$	$5.67337 \times 10^{-5}$	$2.51983 \times 10^{-7}$	$6.97805 \times 10^{-10}$
	0.75	$3.55502 \times 10^{-2}$	$6.54848 \times 10^{-4}$	$6.51951 \times 10^{-6}$	$4.05334 \times 10^{-8}$
	1	$1.15195 \times 10^{-1}$	$3.73646 \times 10^{-3}$	$6.58299 \times 10^{-5}$	$7.25718 \times 10^{-7}$
1	0.25	$4.97450 \times 10^{-4}$	$1.03051 \times 10^{-6}$	$1.14663 \times 10^{-9}$	$7.94511 \times 10^{-13}$
	0.50	$8.13987 \times 10^{-3}$	$6.69511 \times 10^{-5}$	$2.96847 \times 10^{-7}$	$8.21127 \times 10^{-10}$
	0.75	$4.23041 \times 10^{-2}$	$7.75766 \times 10^{-3}$	$7.70361 \times 10^{-6}$	$4.78164 \times 10^{-8}$
	1	$1.37776 \times 10^{-1}$	$7.00901 \times 10^{-7}$	$7.80187 \times 10^{-5}$	$8.58231 \times 10^{-7}$

**Example 4.4.** Consider the 1D nonlinear wave-like equation having fractional order [36]:

$$D^\mu v(x, t) = x^2 \frac{\partial}{\partial x} (v_x v_{xx}) - x^2 (v_{xx})^2 - v, \quad 1 < \mu \leq 2, \quad (38)$$

associated with initial conditions

$$v(x, 0) = 0 \text{ and } v_t(x, 0) = x^2. \quad (39)$$

By employing *NT* on Equation (38), we have

$$\mathbb{N}^+ [D_t^\mu v(x, t)] = \mathbb{N}^+ \left[ x^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) - x^2 \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 - v \right]. \quad (40)$$

The non-linear operator is defined as

$$\frac{s^\mu}{w^\mu} \mathbb{N}^+ [v(x, t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{w^{k-\mu}}{s^{k+1-\mu}} [D^k v]_{t=0} = \mathbb{N}^+ \left[ x^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) - x^2 \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 - v \right]. \quad (41)$$

By Equations (39) and (41), we get

$$\mathbb{N}^+[v(x, t)] = x^2 t + \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ x^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) - x^2 \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 - v \right]. \quad (42)$$

On plugging inverse  $\mathbb{N}T$  to Equation. (42), we obtain

$$v(x, t) = x^2 t + \mathbb{N}^{-1} \left[ x^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) - x^2 \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 - v \right]. \quad (43)$$

Let  $v(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t)$  be the infinite series solution for  $v(x, t)$ . Note that,  $v_x v_{xx} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n$  and  $(v_{xx})^2 = \sum_{n=0}^{\infty} B_n$ , are the Adomian polynomials. Then, Equation (43) becomes

$$\sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) = x^2 t + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ x^2 \frac{\partial}{\partial x} \sum_{n=0}^{\infty} A_n - x^2 \sum_{n=0}^{\infty} B_n - \sum_{n=0}^{\infty} v_n \right] \right]. \quad (44)$$

On relating Equation (44) with two sides, we get

$$\begin{aligned} v_0(x, t) &= x^2 t, & v_1(x, t) &= -\frac{x^2 t^{\mu+1}}{\Gamma[\mu + 2]}, & v_2(x, t) &= \frac{x^2 t^{2\mu+1}}{\Gamma[2\mu + 2]}, \\ v_3(x, t) &= -\frac{x^2 t^{3\mu+1}}{\Gamma[3\mu + 2]}, & v_4(x, t) &= \frac{x^2 t^{4\mu+1}}{\Gamma[4\mu + 2]}, & v_5(x, t) &= -\frac{x^2 t^{5\mu+1}}{\Gamma[5\mu + 2]}, \\ v_6(x, t) &= \frac{x^2 t^{6\mu+1}}{\Gamma[6\mu + 2]}, & v_7(x, t) &= -\frac{x^2 t^{7\mu+1}}{\Gamma[7\mu + 2]}, & v_8(x, t) &= \frac{x^2 t^{8\mu+1}}{\Gamma[8\mu + 2]}, \\ v_9(x, t) &= -\frac{x^2 t^{9\mu+1}}{\Gamma[9\mu + 2]}, & & \dots & & \end{aligned}$$

Similarly, the remaining terms of  $v_n (n \geq 10)$  can be attained. Then, we have

$$\begin{aligned} v(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) = v_0(x, t) + v_1(x, t) + v_2(x, t) + v_3(x, t) + \dots \\ &= x^2 t - \frac{x^2 t^{\mu+1}}{\Gamma[\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{2\mu+1}}{\Gamma[2\mu + 2]} - \frac{x^2 t^{3\mu+1}}{\Gamma[3\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{4\mu+1}}{\Gamma[4\mu + 2]} - \frac{x^2 t^{5\mu+1}}{\Gamma[5\mu + 2]} + \frac{x^2 t^{6\mu+1}}{\Gamma[6\mu + 2]} \\ &\quad - \frac{x^2 t^{7\mu+1}}{\Gamma[7\mu + 2]} + \dots \end{aligned}$$

The analytical solution for Equation (38) at  $\mu = 2$  is  $v(x, t) = x^2 \sin(t)$ .

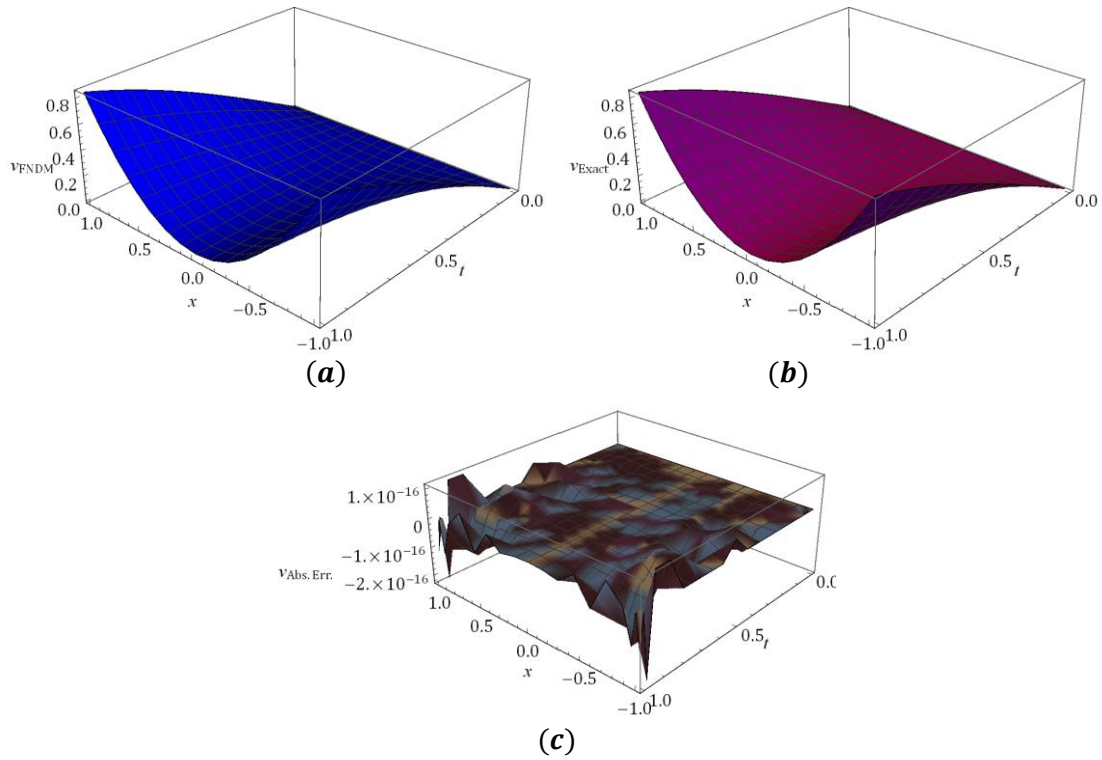


Figure 7. Behaviour of (a) obtained results (b) analytical solution (c)  $v_{Abs.Err.} = |v_{Exact} - v_{FNDM}|$  for Ex. 4.4 at  $\mu = 2$ .

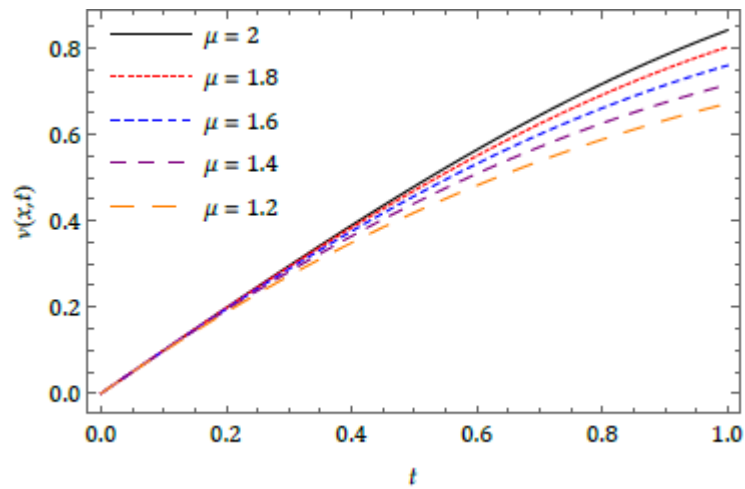


Figure 8. Nature of FNDM results for Ex. 4.4 with distinct  $\mu$  at  $x = 1$ .

Table 4. Numerical study of obtained results for Ex. 4.4 with diverse  $t$  and  $x$  at  $\mu = 2$ .

$x$	$t$	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(3)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(5)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(7)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(9)} $
0.25	0.25	$6.56645 \times 10^{-13}$	0	0	0
	0.50	$3.35630 \times 10^{-10}$	$1.22125 \times 10^{-15}$	0	0
	0.75	$1.28662 \times 10^{-8}$	$2.37810 \times 10^{-13}$	0	0
	1	$1.70677 \times 10^{-7}$	$9.98928 \times 10^{-12}$	$1.73472 \times 10^{-16}$	0
0.50	0.25	$2.62658 \times 10^{-12}$	0	0	0
	0.50	$1.34252 \times 10^{-9}$	$4.88498 \times 10^{-15}$	0	0
	0.75	$5.14647 \times 10^{-8}$	$9.51239 \times 10^{-13}$	0	0
	1	$6.82710 \times 10^{-7}$	$3.99571 \times 10^{-11}$	$6.93889 \times 10^{-16}$	0
0.75	0.25	$5.90983 \times 10^{-12}$	0	$2.77556 \times 10^{-17}$	$2.77556 \times 10^{-17}$
	0.50	$3.02067 \times 10^{-9}$	$1.10467 \times 10^{-14}$	0	$5.55112 \times 10^{-17}$
	0.75	$1.15796 \times 10^{-7}$	$2.14034 \times 10^{-12}$	0	0
	1	$1.53610 \times 10^{-6}$	$8.99035 \times 10^{-11}$	$1.60982 \times 10^{-15}$	0
1	0.25	$1.05063 \times 10^{-11}$	0	0	0
	0.50	$5.37008 \times 10^{-9}$	$1.95399 \times 10^{-14}$	0	0
	0.75	$2.05859 \times 10^{-7}$	$3.80496 \times 10^{-12}$	0	0
	1	$2.73084 \times 10^{-6}$	$1.59828 \times 10^{-10}$	$2.77556 \times 10^{-15}$	0

**Example 4.5.** Consider the 2D nonlinear fractional wave-like equation [36]:

$$D^\mu v(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (v_{xx} v_{yy}) - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (xy v_x v_y) - v, \quad 1 < \mu \leq 2, \quad (45)$$

associated with initial conditions

$$v(x, y, 0) = e^{xy} \text{ and } v_t(x, y, 0) = e^{xy}. \quad (46)$$

By employing  $NT$  on Equation (45), we have

$$\mathbb{N}^+ [D_t^\mu v(x, y, t)] = \mathbb{N}^+ \left[ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( xy \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - v \right]. \quad (47)$$

The non-linear operator is defined as

$$\frac{s^\mu}{w^\mu} \mathbb{N}^+ [v(x, y, t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{w^{k-\mu}}{s^{k+1-\mu}} [D^k v]_{t=0} = \mathbb{N}^+ \left[ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( xy \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - v \right]. \quad (48)$$

By Equations (46) and (48), we get

$$\mathbb{N}^+ [v(x, y, t)] = (1 + t)e^{xy} + \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( xy \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - v \right]. \quad (49)$$

On plugging inverse  $NT$  to Equation (49), we obtain

$$v(x, y, t) = (1 + t)e^{xy} + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left( xy \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - v \right] \right]. \quad (50)$$

Let  $v(x, y, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, t)$  be the infinite series solution of  $v(x, y, t)$ . Note that,  $v_{xx}v_{yy} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n$  and  $v_x v_y = \sum_{n=0}^{\infty} B_n$  are the Adomian polynomials. Then, Equation (51) becomes

$$\sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, t) = (1 + t)e^{xy} + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{w^\mu}{s^\mu} \mathbb{N}^+ \left[ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \sum_{n=0}^{\infty} A_n - \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (xy \sum_{n=0}^{\infty} B_n) - \sum_{n=0}^{\infty} v_n \right] \right]. \quad (52)$$

On relating Equation (52) with two sides, we get

$$\begin{aligned} v_0(x, y, t) &= (1 + t)e^{xy}, \\ v_1(x, y, t) &= - \left( \frac{t^\mu}{\Gamma[\mu + 1]} + \frac{t^{\mu+1}}{\Gamma[\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_2(x, y, t) &= \left( \frac{t^{2\mu}}{\Gamma[2\mu + 1]} + \frac{t^{2\mu+1}}{\Gamma[2\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_3(x, y, t) &= - \left( \frac{t^{3\mu}}{\Gamma[3\mu + 1]} + \frac{t^{3\mu+1}}{\Gamma[3\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_4(x, y, t) &= \left( \frac{t^{4\mu}}{\Gamma[4\mu + 1]} + \frac{t^{4\mu+1}}{\Gamma[4\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_5(x, y, t) &= - \left( \frac{t^{5\mu}}{\Gamma[5\mu + 1]} + \frac{t^{5\mu+1}}{\Gamma[5\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_6(x, y, t) &= \left( \frac{t^{6\mu}}{\Gamma[6\mu + 1]} + \frac{t^{6\mu+1}}{\Gamma[6\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_7(x, y, t) &= - \left( \frac{t^{7\mu}}{\Gamma[7\mu + 1]} + \frac{t^{7\mu+1}}{\Gamma[7\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_8(x, y, t) &= \left( \frac{t^{8\mu}}{\Gamma[8\mu + 1]} + \frac{t^{8\mu+1}}{\Gamma[8\mu + 2]} \right) e^{xy}, \\ v_9(x, y, t) &= - \left( \frac{t^{9\mu}}{\Gamma[9\mu + 1]} + \frac{t^{9\mu+1}}{\Gamma[9\mu + 2]} \right) e^{xy}, \quad \dots \end{aligned}$$

Then, we have

$$\begin{aligned} v(x, y, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, y, t) = v_0(x, y, t) + v_1(x, y, t) + v_2(x, y, t) + v_3(x, y, t) + \dots \\ &= x^4 + ty^4 + \left( \frac{x^4}{\Gamma[\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[\mu + 2]} \right) t^\mu + \left( \frac{x^4}{\Gamma[2\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[2\mu + 2]} \right) t^{2\mu} \\ &\quad + \left( \frac{x^4}{\Gamma[3\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[3\mu + 2]} \right) t^{3\mu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left( \frac{x^4}{\Gamma[4\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[4\mu + 2]} \right) t^{4\mu} + \left( \frac{x^4}{\Gamma[5\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[5\mu + 2]} \right) t^{5\mu} \\
 & \quad + \left( \frac{x^4}{\Gamma[6\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[6\mu + 2]} \right) t^{6\mu} \\
 & + \left( \frac{x^4}{\Gamma[7\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[7\mu + 2]} \right) t^{7\mu} + \left( \frac{x^4}{\Gamma[8\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[8\mu + 2]} \right) t^{8\mu} \\
 & \quad + \left( \frac{x^4}{\Gamma[9\mu + 1]} + \frac{ty^4}{\Gamma[9\mu + 2]} \right) t^{9\mu} + \dots
 \end{aligned}$$

The analytical solution for Equation (45) for  $\mu = 2$  is  $v(x, y, t) = x^4 \cosh(t) + y^4 \sinh(t)$ .

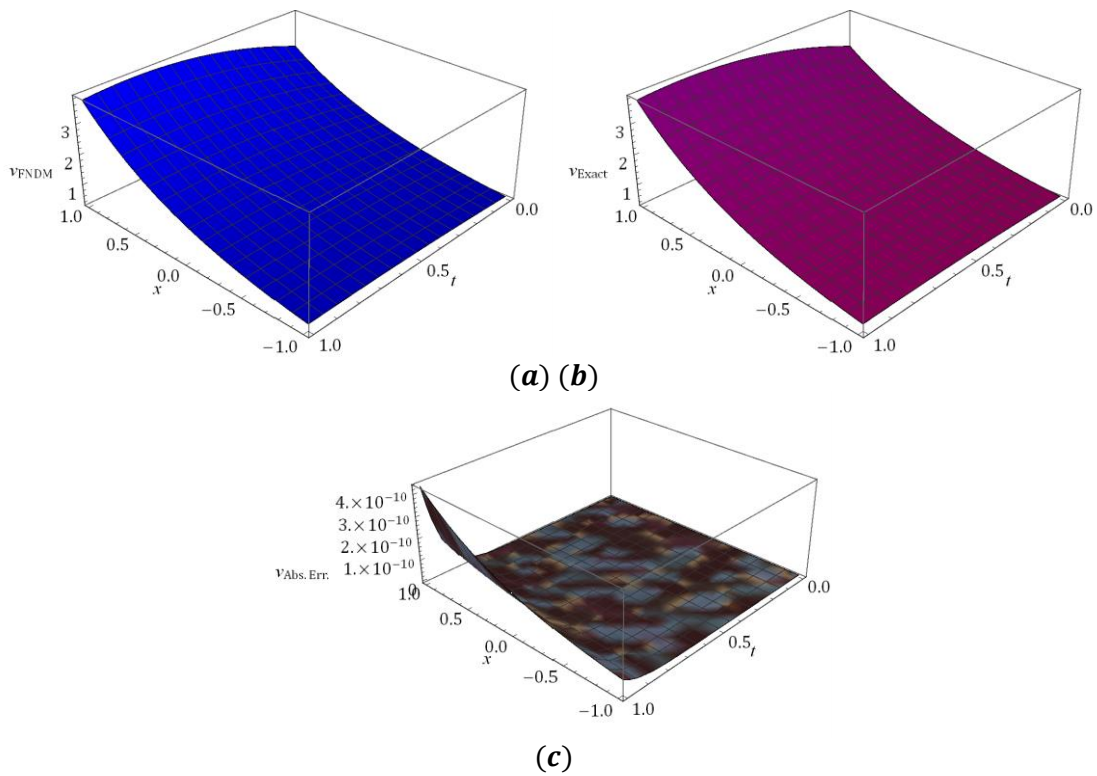


Figure 9. Behaviour of (a) obtained results (b) analytical solution (c)  $v_{Abs.Err.} = |v_{Exact} - v_{FNDM}|$  for Ex. 4.5 at  $\mu = 2$ .



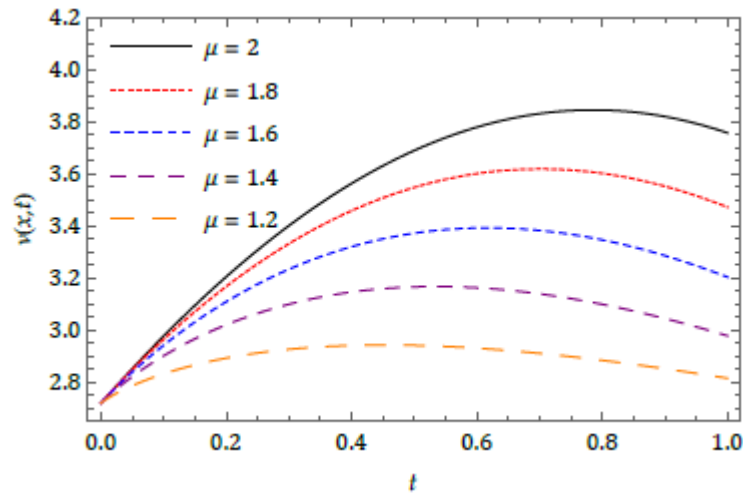


Figure 8. Nature of FNDM results for Ex. 4.5 with distinct  $\mu$  at  $x = 1$ .

Table 5. Numerical analysis for Ex. 4.5 with diverse  $t$  and  $x$  at  $\mu = 2$ .

$x$	$t$	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(3)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(5)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(7)} $	$ v_{Exact} - v_{FNDM}^{(9)} $
0.25	0.25	$4.99082 \times 10^{-10}$	0	$2.22045 \times 10^{-16}$	$2.22045 \times 10^{-16}$
	0.50	$1.30948 \times 10^{-7}$	$6.79012 \times 10^{-13}$	$3.30846 \times 10^{-14}$	$3.30846 \times 10^{-14}$
	0.75	$3.43267 \times 10^{-6}$	$8.95364 \times 10^{-11}$	$4.99401 \times 10^{-12}$	$4.99334 \times 10^{-12}$
	1	$3.50012 \times 10^{-5}$	$2.87118 \times 10^{-9}$	$2.05285 \times 10^{-10}$	$2.05220 \times 10^{-10}$
0.50	0.25	$6.40834 \times 10^{-10}$	$4.44089 \times 10^{-16}$	$8.88178 \times 10^{-16}$	$4.44089 \times 10^{-16}$
	0.50	$1.68141 \times 10^{-7}$	$8.71303 \times 10^{-13}$	$4.17444 \times 10^{-14}$	$4.17444 \times 10^{-14}$
	0.75	$4.40763 \times 10^{-6}$	$1.14967 \times 10^{-10}$	$6.41309 \times 10^{-12}$	$6.41176 \times 10^{-12}$
	1	$4.49424 \times 10^{-5}$	$3.68667 \times 10^{-9}$	$2.63591 \times 10^{-10}$	$2.63508 \times 10^{-10}$
0.75	0.25	$8.22847 \times 10^{-10}$	0	$4.44089 \times 10^{-16}$	$4.44089 \times 10^{-16}$
	0.50	$2.15897 \times 10^{-7}$	$1.11910 \times 10^{-12}$	$5.41789 \times 10^{-14}$	$5.37348 \times 10^{-14}$
	0.75	$5.65952 \times 10^{-6}$	$1.47620 \times 10^{-10}$	$8.23341 \times 10^{-12}$	$8.23208 \times 10^{-12}$
	1	$5.77072 \times 10^{-5}$	$4.73378 \times 10^{-9}$	$3.38458 \times 10^{-10}$	$3.38351 \times 10^{-10}$
1	0.25	$1.05656 \times 10^{-9}$	$4.44089 \times 10^{-16}$	$4.44089 \times 10^{-16}$	$4.44089 \times 10^{-16}$
	0.50	$2.77218 \times 10^{-7}$	$1.43663 \times 10^{-12}$	$6.92779 \times 10^{-14}$	$6.83897 \times 10^{-14}$
	0.75	$7.26696 \times 10^{-6}$	$1.89549 \times 10^{-10}$	$1.05724 \times 10^{-11}$	$1.05707 \times 10^{-11}$
	1	$7.40975 \times 10^{-5}$	$6.07830 \times 10^{-9}$	$4.34588 \times 10^{-10}$	$4.34452 \times 10^{-10}$

### 5. Numerical results and discussion

Here, the multi-dimensional time-fractional linear and nonlinear wave-like equations with variable coefficients have been examined with the aid of FNDM. To illustrate the capability and exactness of the projected procedure, the numerical study presented with a change in the order of the solution for five cases considered and presented in Tables 1-5 in terms of absolute error for change in  $x$  and  $t$ . From the demonstrated results shows for the higher value of order the obtained solution closure to analytical results of the corresponding equations and also authorize the accuracy of FNDM. Moreover, for some cases, the obtained results are identical to the exact one and hence it shows the absolute error is zero. These types of analysis may aid researchers about the reliability and capability of the scheme while investigating complex systems.

As much as important of formulating the problem and finding the solution for the corresponding equations, it is very important to capture nature also. In this connection, we presented the obtained results behaviour for each case related to the exact result to both exemplify exactness and nature of results achieved. For Example 4.1, the response of FNDM results and the absolute surface is cited in Figure 1 with the exact solution. In the same manner, we presented for Example 4.2, 4.3, 4.4 and 4.5 respectively in the Figures 3, 5, 7 and 9. Moreover, by incorporating the concept of the classical derivative by non-integer derivative we get more degree of freedom and aid us to illustrate more hide future of the model related to history and hereditary based results. In regard to this, with respect to different arbitrary order, the response with time is illustrated respectively for Examples 1-5 in Figures 2, 4, 6, 8 and 10. With the assist of tables and figures, we can observe the hired solution procedure is very effective and more accurate to analyse the projected wave-like equations with fractional order. Further, this investigation can capture or limn more behaviour and it can help the researchers to analyse diverse applications of projected problems.

## 6. Conclusion

In the present framework, the multi-dimensional wave-like equations with variable coefficients are effectively and accurately analysed with the assist of FNDM within the frame of fractional calculus. The projected solution procedure assesses the solution for the differential equations without employing any conversion, discretization or perturbation. The plots authorize the reliability of the hired algorithm and the effect of fractional order while we are analysing wave equations. Related to significances available in the literature, the attained results with the projected scheme are more stimulating and interesting. The nature of the obtained results are exemplified with the aid of figures and tables, and also which helps understand the behaviour of the projected models with the specific values. Moreover, we authorize the achieved results to get closure to the analytical solution as the number of iterative terms increases. Lastly, we can say that the illustrated solution procedure accurate and highly systematic and it can be employed to analyse the numerous families of linear and nonlinear equations arisen in science and engineering.

## References

- [1] Liouville, J., Memoire surquelques questions de geometriect de mecanique, etsur un nouveau genre de calcul pour resoudreces questions, **J. Ecole. Polytech.**, 13, 1-69, (1832).
- [2] Riemann, G.F.B., VersuchEinerAllgemeinenAuffassung der Integration und Differentiation, *GesammelteMathematischeWerke*, Leipzig, (1896).
- [3] Caputo, M., *Elasticita e Dissipazione*, Zanichelli, Bologna, (1969).
- [4] Miller, K.S. and Ross, B., *An introduction to fractional calculus and fractional differential equations*, A Wiley, New York, (1993).
- [5] Podlubny, I., *Fractional Differential Equations*, Academic Press, New York, (1999).
- [6] Kilbas, A.A., Srivastava, H.M. and Trujillo, J.J., *Theory and applications of fractional differential equations*, Elsevier, Amsterdam, (2006).

- [7] Baleanu, D., Guvenc, Z.B. and Machado, T.J.A., New trends in nanotechnology and fractional calculus applications, Springer Dordrecht Heidelberg, London New York, (2010).
- [8] Esen, A., Sulaiman, T.A., Bulut, H. and Baskonus, H.M., Optical solitons and other solutions to the conformable space-time fractional Fokas-Lenells equation, **Optik**, 167, 150-156, (2018).
- [9] Prakasha, D. G. and Veerasha, P., Analysis of Lakes pollution model with Mittag-Leffler kernel, **J. Ocean Eng. Sci.**, 1-13, (2020), DOI: 10.1016/j.joes.2020.01.004.
- [10] Baleanu, D., Wu, G.C. and Zeng, S.D., Chaos analysis and asymptotic stability of generalized Caputo fractional differential equations, **Chaos Solitons Fractals**, 102, 99-105, (2017).
- [11] Veerasha, P., Prakasha, D.G. and Baskonus, H.M., New numerical surfaces to the mathematical model of cancer chemotherapy effect in Caputo fractional derivatives, **Chaos**, 29, (013119), (2019), DOI: 10.1063/1.5074099.
- [12] Baskonus, H.M., Sulaiman, T.A. and Bulut, H., On the new wave behavior to the Klein-Gordon-Zakharov equations in plasma physics, **Indian J. Phys.**, 93, (3), 393-399, (2019).
- [13] Veerasha, P. and Prakasha, D.G., Solution for fractional generalized Zakharov equations with Mittag-Leffler function, **Results Eng.**, 5, 1-12, (2020), DOI: 10.1016/j.rineng.2019.100085.
- [14] Prakasha, D.G., Malagi, N.S. and Veerasha, P., New approach for fractional Schrödinger–Boussinesq equations with Mittag-Leffler kernel, **Math. Meth. Appl. Sci.**, (2020), DOI: 10.1002/mma.6635.
- [15] Gao, W., Baskonus, H.M. and Shi, L., New investigation of Bats-Hosts-Reservoir-People coronavirus model and apply to 2019-nCoV system, **Adv. Differ. Equ.**, 391, (2020), DOI: 10.1186/s13662-020-02831-6
- [16] Cattani, C. and Pierro, G., On the fractal geometry of DNA by the binary image analysis, **Bull. Math. Biol.**, 75, (9), 1544-1570, (2013).
- [17] Gao, W., Veerasha, P., Prakasha, D. G. and Baskonus, H.M., Novel dynamical structures of 2019-nCoV with nonlocal operator via powerful computational technique, **Biology**, 9, (5), (2020), DOI: 10.3390/biology9050107.
- [18] Gao, W., Veerasha, P., Baskonus, H.M., Prakasha, D.G. and Kumar, P., A new study of unreported cases of 2019-nCoV epidemic outbreaks, **Chaos Solitons Fractals**, 138, (2020), DOI: 10.1016/j.chaos.2020.109929.
- [19] Cattani, C., Haar wavelet-based technique for sharp jumps classification, **Math. Comput. Model.**, 39, (2-3), 255-278, (2004).
- [20] Gao, W., Yel, G., Baskonus, H.M. and Cattani, C., Complex solitons in the conformable (2+1)-dimensional Ablowitz-Kaup-Newell-Segur equation, **AIMS Math.**, 5, (1), 507–521, (2020).
- [21] Al-Ghafri, K. S. and Rezaadeh, H., Solitons and other solutions of (3+1)-dimensional space–time fractional modified KdV–Zakharov–Kuznetsov equation, **Appl. Math. Nonlinear Sci.**, 4, (2), 289-304, (2019).
- [22] Atangana, A., Fractal-fractional differentiation and integration: connecting fractal calculus and fractional calculus to predict complex system, **Chaos Solitons Fractals**, 102, 396-406, (2017).
- [23] Veerasha, P. and Prakasha, D. G., Novel approach for modified forms of Camassa–Holm and Degasperis–Procesi equations using fractional operator, **Commun. Theor. Phys.** 72, 105002, (2020).

- [24] Dananea, J., Allalia, K. and Hammouch, Z., Mathematical analysis of a fractional differential model of HBV infection with antibody immune response, **Chaos Solitons Fractals**, 136, 109787, (2020).
- [25] Kiran, M.S., et al., A mathematical analysis of ongoing outbreak COVID-19 in India through nonsingular derivative, *Numer. Methods Partial Differ. Equ.*, (2020), DOI: 10.1002/num.22579.
- [26] Ali, K.K., Osman, M.S., Baskonus, H.M., Elazab, N.S. and Ilhan, E., Analytical and numerical study of the HIV-1 infection of CD4+T-cells conformable fractional mathematical model that causes acquired immunodeficiency syndrome (AIDS) with the effect of antiviral drug therapy, **Math. Meth. Appl. Sci.**, (2020), DOI:10.1002/mma.7022, 2021.
- [27] Gao, W., Veerasha, P., Prakasha, D.G. and Baskonus, H.M., New numerical simulation for fractional Benney–Lin equation arising in falling film problems using two novel techniques, **Numer Methods Partial Differ Equ.**, 37, (1), 210-243, (2021).
- [28] Veerasha, P., Prakasha, D.G., Kumar, D., Fractional SIR epidemic model of childhood disease with Mittag-Leffler memory, **Fractional Calculus in Medical and Health Science**, 229-248, (2020).
- [29] Jothimani, K., Valliammal, N. and Ravichandran, C., Existence result for a neutral fractional integro-differential equation with state dependent delay, **J. Appl. Nonlinear Dyn.**, 7, (4), 371-381, (2018).
- [30] Ravichandran, C., Jothimani, K., Baskonus, H.M. and Valliammal, N., New results on nondensely characterized integrodifferential equations with fractional order, **Eur. Phys. J. Plus**, 133, (2018), DOI: 10.1140/epjp/i2018-11966-3.
- [31] Veerasha, P., Prakasha, D.G. and Baskonus, H.M., An efficient technique for coupled fractional Whitham-Broer-Kaup equations describing the propagation of shallow water waves, **Advances in Intelligent Systems and Computing**, 49-75, (2020).
- [32] Subashini, R., Jothimani, K., Nisar, K.S. and Ravichandran, C., New results on nonlocal functional integro-differential equations via Hilfer fractional derivative, **Alexandria Eng. J.**, 59, (5), 2891-2899, (2020).
- [33] Ismael, H.F., Bulut, H. and Baskonus, H.M., Optical soliton solutions to the Fokas–Lenells equation via sine-Gordon expansion method and  $(m + (G'/G))$ -expansion method, **Pramana - J Phys.**, 94, 35, (2020), DOI: 10.1007/s12043-019-1897-x.
- [34] Veerasha, P., Prakasha, D.G., Singh, J., A novel approach for nonlinear equations occurs in ion acoustic waves in plasma with Mittag-Leffler law, **Eng. Comput.**, 37, (6), 1865-1897, (2019).
- [35] Ravichandran, C., Logeswari, K., Panda S.K., Nisar, N.S., On new approach of fractional derivative by Mittag-Leffler kernel to neutral integro-differential systems with impulsive conditions, **Chaos Solitons Fractals**, 139, (2020), DOI: 10.1016/j.chaos.2020.110012.
- [36] Silambarasan, R, et al., Longitudinal strain waves propagating in an infinitely long cylindrical rod composed of generally incompressible materials and it's Jacobi elliptic function solutions, **Math. Comput. Simul.**, 182, 566-602, (2021).
- [37] Merlani, A. L., Natale, G. and Salusti, E., On the theory of pressure and temperature nonlinear waves in compressible fluid-saturated porous rocks, **Geophys. Fluid Dyn.**, 85, 97-128, (1997).

- [38] Akhmetov, A.A., Long current loops as regular solutions of the equation for coupling currents in a flat two-layer superconducting cable, **Cryogenics**, 43, 317-322, (2003).
- [39] Manolis, G.D. and Rangelov, T.V., Non-homogeneous elastic waves in solid: notes on the vector decomposition technique, **Soil Dynam. Earthquake Engrg.**, 26, 952-959, (2016).
- [40] Holliday, J.R., Rundle, J. B., Tiampo, K.F., Klein, W. and Donnellan, A., Modification of the pattern informatics method for forecasting large earthquake events using complex eigenfactors, **Tectonophysics**, 413, 87-91, (2006).
- [41] Momani, S., Analytical approximate solution for fractional heat-like and wave-like equations with variable coefficients using the decomposition method, **Appl. Math. Comput.**, 165, 459-472, (2005).
- [42] Singh, J. and Kumar, D., An application of homotopy perturbation transform method to fractional heat and wave-like equations, **J. Fract. Calc. Appl.**, 4, (2), 290-302, (2013).
- [43] Ozis, T. and Agirseven, D., He's homotopy perturbation method for solving heat-like and wave-like equations with variable coefficients, **Phys. Letters A**, 372, 5944-5950, (2008).
- [44] Wazwaz, A.M. and Gorguis, A., Exact solutions for heat-like and wave-like equations with variable coefficients, **Appl. Math. Comput.**, 149, 15-29, (2004).
- [45] Adomian, G., A new approach to nonlinear partial differential equations, **J. Math. Anal. Appl.**, 102 (1984), 420-434.
- [46] Khan, Z. H. and Khan, W. A., N-Transform-properties and applications, **NUST J. Engg. Sci.**, 1, (1), 127-133, (2008).
- [47] Rawashdeh, M.S., The fractional natural decomposition method: theories and applications, **Math. Meth. Appl. Sci.**, 40, 2362-2376, (2017).
- [48] Rawashdeh, M.S. and Maitama, S., Finding exact solutions of nonlinear PDEs using the natural decomposition method, **Math. Meth. Appl. Sci.**, 40, 223-236, (2017).
- [49] Prakasha, D.G., Veerasha, P. and Rawashdeh, M.S., Numerical solution for (2 + 1)-dimensional time-fractional coupled Burger equations using fractional natural decomposition method, **Math. Meth. Appl. Sci.**, 42, (10), 3409-3427, (2019).
- [50] Veerasha, P., Prakasha, D.G. and Singh, J., Solution for fractional forced KdV equation using fractional natural decomposition method, **AIMS Math.**, 5, (2), 798-810, (2019).
- [51] Rawashdeh, M.S., Solving fractional ordinary differential equations using FNDM, **Thai J. Math.**, 17, (1), 239-251, (2019).
- [52] Prakasha, D.G., Veerasha, P. and Baskonus, H.M., Two novel computational techniques for fractional Gardner and Cahn-Hilliard equations, **Comp. Math. Meth.**, 1, (2), 1-19, (2019), DOI: 10.1002/cmm4.1021.
- [53] Veerasha, P. and Prakasha, D.G. An efficient technique for two-dimensional fractional order biological population model, **Int. J. Model. Simul. Sci. Comput.**, (2050005), 1-17, (2020), DOI: 10.1142/S1793962320500051.
- [54] Mittag-Leffler, G. M., Sur la nouvelle fonction  $E_\alpha(x)$ , **C. R. Acad. Sci. Paris**, 137, 554-558, (1903).
- [55] Loonker, D. and Banerji, P. K., Solution of fractional ordinary differential equations by natural transform, **Int. J. Math. Eng. Sci.**, 12, (2), 1-7, (2013).

# Yükseköğretim sınıflarında iç ortam sıcaklığı ve bağıl nem düzeyinin analizi: Balıkesir Üniversitesi Örneği

Yusuf YILDIZ\*

Balıkesir Üniversitesi Mimarlık Fak. Mimarlık Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 17.09.2020  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.12.2020

## Öz

Sınıflarda, öğrencilerin bilgiyi algılamasına ve işlemesine yardımcı olmak için konfor koşullarının sağlanması önemli bir ihtiyaçtır. Bu nedenle yapı fiziği açısından doğru bina ve mekan tasarımları gerekmektedir. Aksi takdirde eğitim binalarında konforsuz iç mekanlar oluşabilir ve gereksiz enerji tüketimi gerçekleşebilir. Bu çalışma, Balıkesir üniversitesinin doğal olarak havalandırılan beş sınıfında iç ortam sıcaklık ve bağıl nem değerlerini kullanarak ısı konforu değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Kullanım içi ve dışı saatler dahil olmak üzere parametreler iki aylık süre boyunca 15 dakika aralıklarla kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler excel ve spss programları aracılığıyla istatistiksel olarak analiz edilmiş ve uluslararası standartlar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklık değerleri Şubat ayında ısıtma sistemi nedeniyle genellikle 22-25°C aralığında seyretmiştir. Mayıs ayında ise iç ortam sıcaklıkları çoğunlukla 25°C'nin üzerine çıkmıştır. Bağıl nem değerleri her iki ayda da ASHRAE Standardı 62.1-2007'da önerildiği gibi %65 sınır değerini önemli ölçüde aşmamaktadır. Ayrıca sınıflar arasında sıcaklık değişiminin de anlamlı farkların olduğu bulunmuştur ( $p < 0.05$ ).

**Anahtar kelimeler:** Akademik binalar, ısı konfor, iç mekan analizi.

## Analysis of indoor temperature and relative humidity level in higher education classes: Balıkesir University Example

### Abstract

It is an important need that classrooms provide comfortable learning environments to help students perceive and process information. For this reason, correct building and

\* Yusuf YILDIZ, yusifyildiz@gmail.com.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3255-6850>

*space designs are required in terms of building physics. Otherwise, uncomfortable interior spaces and unnecessary energy consumption will occur in educational buildings. This study aims to evaluate thermal comfort by using indoor temperature and relative humidity values in five naturally ventilated classes of Balıkesir University. The parameters, including the hours in and out of use, were recorded at 15-minute intervals over a two-month period. Later, these data were analyzed statistically through Excel and SPSS programs and compared with international standards. According to the results, temperature values were generally in the range of 22-25 °C in February due to the heating system. In May, indoor temperatures mostly exceeded 25°C. Relative humidity values do not significantly exceed the 65% limit value every two months, as recommended in ASHRAE Standard 62.1-2007. It was also found that there are significant differences in temperature change between classes ( $p < 0.05$ ).*

**Keywords:** *Academic buildings, thermal comfort, indoor condition analysis.*

## 1. Giriş

Yükseköğretim tüm ülkeler açısından önemli bir konudur ve nitelikli eğitim için yapı fiziği açısından kaliteli üniversite binaları önem arz etmektedir. Ülkemiz özelinde ise ilk üniversitenin kurulduğu 1933 yılından günümüze kadar üniversite sayılarında sürekli bir artış gözlenmiştir ve 1982 öncesinde toplam üniversite sayısı 19 iken şu an mevcut üniversite sayısı (Devlet + Vakıf + Vakıf MYO) 207'ye ulaşmıştır. Özellikle eğitim binalarında iç ortam ısı konfor koşullarının önemi küçümsenemez. Sınıflar öğrenme sürecinde yüksek konsantrasyona uygun mekanlar olmalıdır. Bu tür binalardaki ısı konforsuzluk hem personel hem de öğrenciler için tatmin edici olmayan ortamlar yaratabilir. İnsanlar zamanlarının yaklaşık %90'ını kapalı alanda geçirdiklerinden, uygun bir iç mekan iklimini sürdürebilmek büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda öğrenciler, günlerinin %70'ini sınıflarda geçirmekte bu durum sınıfları, öğrenciler için evlerinden sonra en önemli ikinci kapalı alan haline getirmektedir [1,2]. İç mekan ısı konfor parametrelerinden olan sıcaklık ve bağıl nem ayrıca öğrencilerin akademik performansını ve üretkenliğini de etkilemektedir. Bu nedenle eğitim binaları için önemli bir tasarım parametresi olarak kabul edilirler [3-5]. Öğrenme performansının yüksek iç hava sıcaklıklarından etkilendiği de bilinmektedir [6]. Gupta ve ark. [7], çalışma performansı üzerindeki olumsuz etkilerin, ısıtmanın olmadığı sezonda 26°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklardan kaynaklandığını ifade etmiştir. Okullarda aktif ısıtma sisteminin bulunmasına rağmen soğutma sistemi genellikle bulunmamaktadır. Pencere ve kapıların elle açılıp kapanmasına dayalı doğal havalandırma, özellikle sınıflarda en uygulanabilir ve çok karşılaşılan serinletme ve havalandırma türüdür [8]. Bu nedenlerle iyi tasarlanmış ve bakımı yapılan, ısı konfor koşullarını sağlayan ve dışarıdan yeterli temiz hava temin eden eğitim binaları, verimli öğrenme süreci ve gelecek nesillerin iyi eğitimi için bir gerekliliktir [9]. Ayrıca, ısı olarak yıl boyunca konforlu bir sınıf tasarlamak artık mimarlar ve inşaat mühendisleri için en önemli kriterlerden biri haline gelmiştir [10,11]. Doğal olarak havalandırılan eğitim binalarındaki ısı koşulları, konfor standartlarını ve adaptasyonu araştırmak için farklı iklimlerde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [12]. Örneğin Mishra ve Ramgopal [13] tropik iklimde, Zaki ve arkadaşları [14] nemli bir subtropikal ve tropikal yağmurlu iklimde, Singh ve arkadaşları [15] kompozit Hindistan ikliminde, Mustapa ve arkadaşları [16] Japonya tropikal ikliminde, Lopez-Perez ve arkadaşları [17] ise Meksika tropikal ıslak ikliminde bulunan doğal havalandırılmalı sınıflarda çalışmalar yapmıştır.

Literatüre bakıldığında ısı konforu değerlendirmek için çeşitli uluslararası standartlar olduğu görülmektedir. En bilinenlerinden bir tanesi EN 15251'dir. Ortak bir ölçüm yöntemini tanımlayan EN 15251 [18] standardı, ısı, görsel ve akustik konforu göz önünde bulundurarak iç ortam kalitesini karşılamak için bina enerji performansını değerlendirme ve tasarlama kriterlerini içermektedir. ASHRAE Standardı 55 [19], ısı çevre faktörleri ile kişisel faktörlerin kombinasyonlarını özelleştirerek, kullanıcı için ısı çevre koşulları hakkında kapsamlı genel yönergeler sağlar. Bir diğer uluslararası standartta, kullanıcının ısıl duygusunu (PMV) ve ısıl memnuniyetsizliğini (PPD) tahmin etmek için yöntemler sunan EN ISO 7730'dur [20]. EN ISO 10551 [10] standardı ise, PMV ve PPD endekslerini değerlendirmek için kullanılacak anket ihtiyacını tanımlar. Daha az bilinen ASHRAE Standardı 62.1 [21] ve Avrupa Standardı CEN CR 1752 [22], binalarda kullanıcı için minimum kabul edilebilir havalandırma oranlarını ve iç hava kalitesini içermektedir.

Bu çalışma, Balıkesir Üniversitesi'nin doğal olarak havalandırılan sınıflarında yürütülen iç mekan sıcaklık ve bağıl nem seviyelerinin şubat ve mayıs aylarında izlenmesinin sonuçlarını bildirmektedir. Bu nedenle, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasındaki 5 farklı sınıfta 2019 yılı şubat ve mayıs aylarındaki sıcaklık ve nem koşulları üzerine yapılan bir araştırmanın bulguları sunulmuştur. Sonuçlar istatistiksel olarak analiz edilmiş ve ilgili standartlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular konforlu ve tek tip olmayan sınıfların uygun şekilde tasarlanmasına yardımcı olabilir.

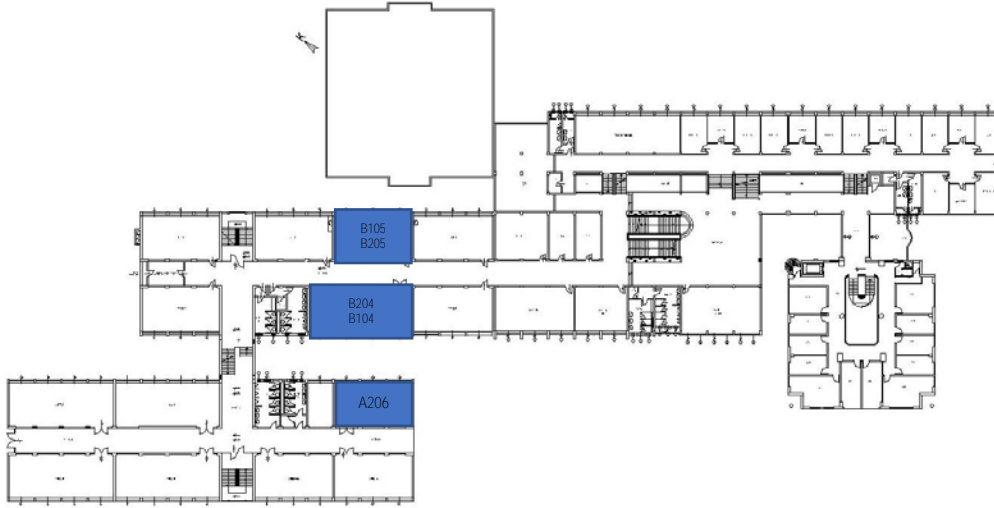
## **2. Yöntem**

Bu çalışma, Balıkesir ilinde bulunan ve 1993 yılında kurulan Balıkesir üniversitesindeki Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi (MMF) dersliklerinde gerçekleştirilmiştir. Balıkesir'in uzun süreli iklimsel verilerine bakıldığında, kışları serin, yazları sıcak ve yarı kurak bir iklime sahip olduğu görülmektedir [23].

Çalışma alanı olan Balıkesir Üniversitesi, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir-Bigadiç karayolunun 17. km'sinde Çağış ve Paşaköy sınırları içinde yer almaktadır. Çalışma amacıyla Mühendislik ve Mimarlık Fakülteleri tarafından birlikte kullanılan binadan 5 adet derslik seçilmiştir. Kış ve yaz dönemini temsilen Şubat-Mayıs aylarında yapılan yerinde ölçümler ile sıcaklık (Temp) ve bağıl nem (RH) değerleri 15 dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Ölçüm yapılan sınıflar merkezi kalorifer sistemi kullanılarak ısıtılmaktadır ve enerji kaynağı doğalgazdır. Bu nedenle sınıflarda sıcaklık ayarı yapılamamaktadır. Sınıflarda soğutma sistemi yoktur. Pencere ve kapıların açılıp kapanmasıyla doğal havalandırma yapılmaktadır.

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, kuzeybatı-güneydoğu doğrultusunda uzanan dikdörtgen şeklindeki bloklardan oluşmaktadır (Şekil 1).





Şekil 1. Müh. ve Mim. Fak. normal kat planı.

Binada, idari ve öğrenci girişi olmak üzere güneybatı yönünde 2 ana giriş bulunmaktadır. Öğrenci alanları, laboratuvarlar, kantin, sınıflar, ofisler vb. dahil olmak üzere çeşitli mekanları barındırmaktadır. Bodrum katta depolar, laboratuvarlar, tesisat merkezi, kantin ve amfi bulunmaktadır. Zemin katta derslik ve laboratuvarlar, akademik ve idari personel odaları ve konferans salonu yer almaktadır. 1. ve 2. katta derslikler, akademik ve idari personel odaları ve seminer odası vardır. 3. katta idari personel odaları, atölyeler ve kütüphane bulunmaktadır. Son olarak 4.5.6. ve 7. katlarda akademik personel odaları devam etmektedir. Farklı blokların farklı kat sayısına sahip olduğu bu binada toplam kapalı alan 20001,25 m<sup>2</sup>'dir. Bu alanın yaklaşık %90'ı ısıtılmakta ve %18'i soğutulmaktadır. Bina yapı elemanlarının toplam ısı geçirgenlik değerleri (W/m<sup>2</sup>K) sırasıyla; U<sub>dış duvar</sub>: 1,28, U<sub>teras çatı</sub>: 3,42, U<sub>iç duvar</sub>:1,84, U<sub>ara kat döşeme</sub>:2,26, U<sub>taban</sub>: 1,01 ve U<sub>pencere</sub>: 2,70'tir.

Ölçüm için seçilen tüm sınıflar benzer özelliklere sahiptir (Şekil 2). Sınıf kapasitesi ve kullanım süreleri değişkenlik göstermektedir ve bu durum Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Çalışılan dersliklerin özellikleri.

Bina	Sınıf	Kat	Pencere sayısı	Pencere alanı (m <sup>2</sup> )	Kapı sayısı	Sınıf alanı (m <sup>2</sup> )	Kişi kapasitesi	Gün boyu kullanım süresi	Yön
MMF	a206	2	1	26,64	1	102	120	09:00 a.m.- 17:00 p.m.	KD
	b104	1	1	26,64	1	100	112		GB
	b204	2	1	26,64	1	100	112		GB
	b105	1	1	19,98	1	81	72		KD
	b205	2	1	19,98	1	81	72		KD



Şekil 2. Ölçüm yapılan ısınlardan örnekler ve ölçüm cihazı.

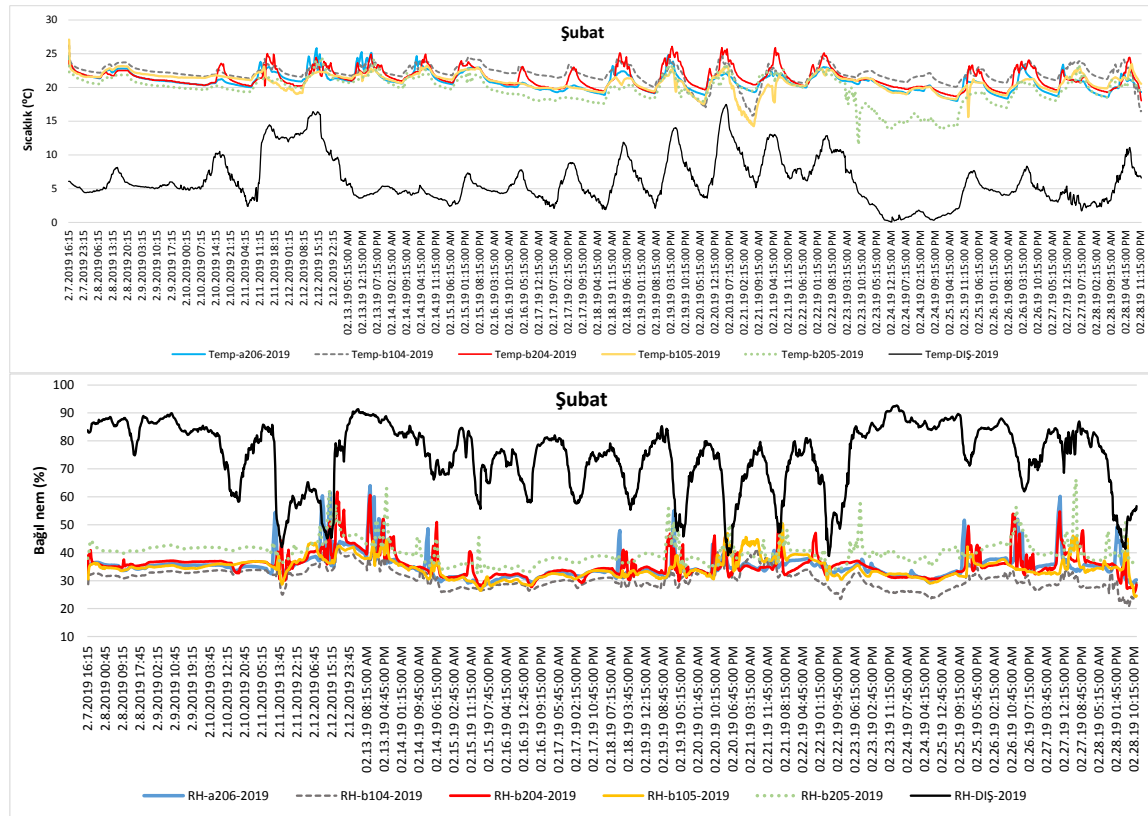
İki parametrenin (RH ve Temp) izlenmesi için Hobo veri kaydedici (Bağıl nem ölçüm aralığı: %15-%95, Doğruluk:  $\pm 3.5$ , Çözünürlük: % 0.07; Sıcaklık ölçüm aralığı:  $-20^{\circ}\text{C} - +70^{\circ}\text{C}$ , Doğruluk :  $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ , Çözünürlük :  $0.024^{\circ}\text{C}$ ) kullanılmıştır (Şekil 2). Ölçümler 15 dakikalık aralıklarla sürekli olarak yapılmıştır. Cihazlar duvarlara yerden yaklaşık 1,5 m yükseklikte, pencerelerden, doğrudan güneş ışığından ve ısıtma cihazlarından uzağa monte edilmiştir. Kayıt cihazı hafızasının dolması sebebiyle bazı zamanlar kısa süreli veri kayıpları yaşanmıştır. Dış hava sıcaklık ve nem ölçümleri yine Hobo veri kaydedici (Bağıl nem ölçüm aralığı: %0-%100, Hassasiyet: %2.5, Çözünürlük: % 0.03; Sıcaklık ölçüm aralığı:  $-40^{\circ}\text{C} - +70^{\circ}\text{C}$ , Hassasiyet:  $0.18^{\circ}\text{C}$ , Çözünürlük:  $0.02^{\circ}\text{C}$ ) ile yapılmıştır.

Ham sıcaklık ve bağıl nem verileri Microsoft Excel 2016'ya girilmiştir ve ardından istatistiksel analizlerin yanı sıra anormallikleri ve eksik değerleri kontrol etmek için SPSS 21 istatistiksel hesaplama yazılımına aktarılmıştır. Ölçülen değerlerde sınıflar arasında anlamlı bir fark olup olmadığı parametrik olmayan Wilcoxon İşaretli Sıralar Testi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu test, ilişkili iki ölçüm setine ait puanlar arasındaki farkın anlamlı olup olmadığını kontrol etmek için kullanılır.

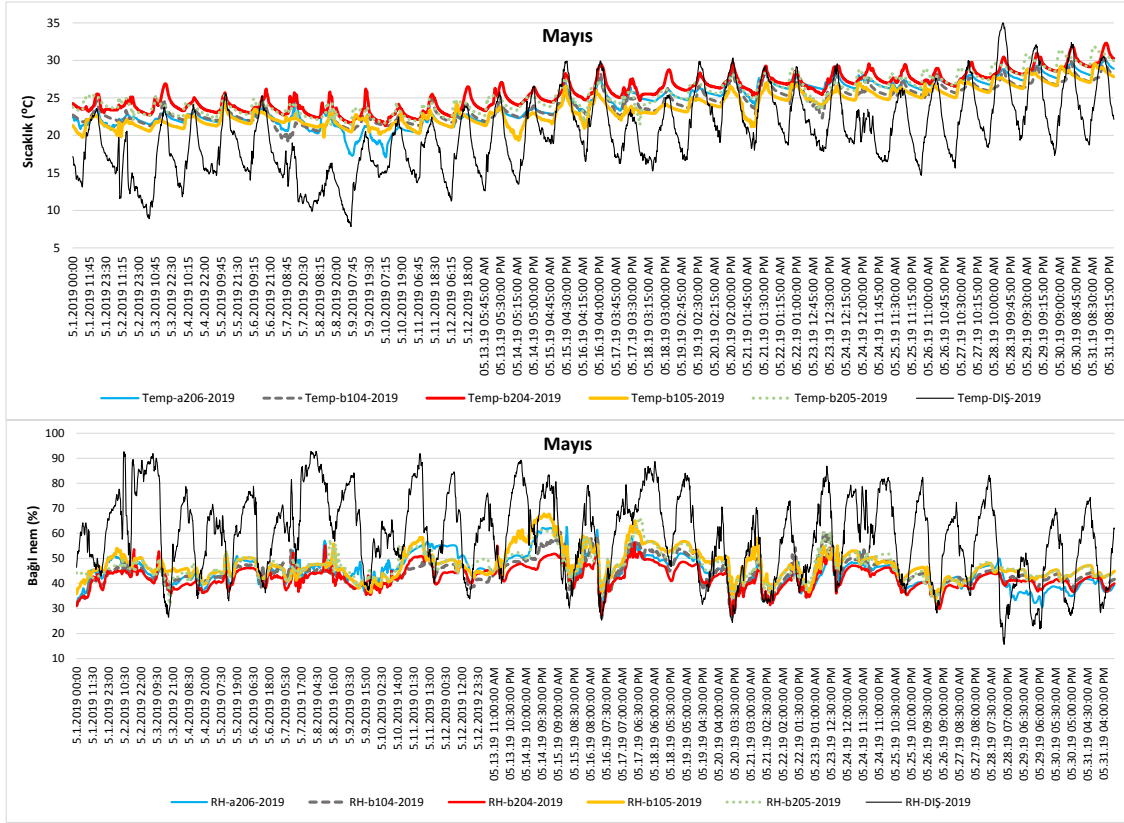
### 3. Bulgular ve tartışma

#### 3.1. Sıcaklık ve bağıl nem değerleri

Sınıflara ve dış ortama ait 2019 yılı Şubat ve Mayıs ayı sıcaklık ve bağıl nemdeki değişim trendi Şekil 3 de gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 2 de sıcaklık ve bağıl nem değerleri için tanımlayıcı istatistiksel parametreler özetlenmiştir. Dış ortam koşulları, odaların yönü, kişi yoğunluğu ve HVAC sistem türü dahil olmak üzere birçok faktörün, sıcaklık ve bağıl nemdeki değişimi etkilediği bilinmektedir [7]. Şubat ayı sıcaklık trendine bakıldığında iç ortam sıcaklıkları çoğunlukla 20-25°C aralığında seyretmektedir. Sıcaklıkların belirli bir aralıkta seyretmesinin nedeni iç ortamın aktif bir sistemle ısıtılmasıdır. Bağıl nem değerleri ise daha fazla değişkenlik göstermektedir. Mayıs ayında ise sınıflarda zaman zaman iç sıcaklık değerlerinin dış sıcaklık değerleri ile çakıştığı, bazen ise 30°C'nin üzerine çıktığı görülmektedir. Bu durum bina dış kabuğunun istenen ısıl direnci her zaman ve yeterli düzeyde sağlayamadığının bir işaretidir. Bağıl nem değerleri ise Şubat ayında olduğu gibi çok fazla değişkenlik göstermektedir.



Şekil 3. Şubat ve mayıs ayı sıcaklık ve bağıl nem trendi.



Şekil 3 (Devam). Şubat ve mayıs ayı sıcaklık ve bağıl nem trendi.

Ölçümlerin yapıldığı periyotta şubat ayı ortalama dış hava sıcaklığı  $6,1^{\circ}\text{C}$  (min:  $0,06$  ve maks:  $17,49^{\circ}\text{C}$ ) dir (Tablo 2). Mayıs ayında ise ortalama dış hava sıcaklığı  $24,62^{\circ}\text{C}$  (min:  $7,85$  ve maks:  $35^{\circ}\text{C}$ ) olarak kaydedilmiştir. a206, b104, b204, b105, b205 nolu sınıflarda gözlemlenen şubat ayı ortalama sıcaklık değerleri sırasıyla  $20,90^{\circ}\text{C}$ ,  $22,05^{\circ}\text{C}$ ,  $21,39^{\circ}\text{C}$ ,  $20,81^{\circ}\text{C}$  ve  $19,73^{\circ}\text{C}$ 'dir. Gözlemlenen maksimum değerler  $25,85^{\circ}\text{C}$ ,  $26,24^{\circ}\text{C}$ ,  $26,10^{\circ}\text{C}$ ,  $27,29^{\circ}\text{C}$  ve  $24,26^{\circ}\text{C}$  iken minimum değerler sırasıyla  $18,01^{\circ}\text{C}$ ,  $15,82^{\circ}\text{C}$ ,  $18,05^{\circ}\text{C}$ ,  $14,24^{\circ}\text{C}$  ve  $11,53^{\circ}\text{C}$ 'dir. Yaz dönemi için sınıflarda aktif soğutma sistemi bulunmamaktadır. Mayıs ayında a206, b104, b204, b105, b205 nolu sınıflarda gözlemlenen ortalama sıcaklık değerleri sırasıyla  $24,45^{\circ}\text{C}$ ,  $24,17^{\circ}\text{C}$ ,  $25,80^{\circ}\text{C}$ ,  $23,70^{\circ}\text{C}$ ,  $25,43^{\circ}\text{C}$ 'dir. Ölçülen maksimum değerler  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $30,30^{\circ}\text{C}$ ,  $32,29^{\circ}\text{C}$ ,  $29,55^{\circ}\text{C}$ ,  $31,88^{\circ}\text{C}$  iken minimum değerler sırasıyla  $17,06^{\circ}\text{C}$ ,  $19,25^{\circ}\text{C}$ ,  $21,28^{\circ}\text{C}$ ,  $19,35^{\circ}\text{C}$ ,  $21,38^{\circ}\text{C}$ 'dir.

Örneklem dönemi boyunca şubat ve mayıs ayı ortalama dış ortam bağıl nem seviyesi  $\%74,8$  ve  $\%59,22$  olarak kaydedilmiştir (şubat min:  $\%38,82$  ve maks:  $\%92,69$ , mayıs min:  $\%15,70$  ve maks:  $\%92,75$ ). a206, b104, b204, b105, b205 nolu sınıflarda şubat ayı ortalama değerleri sırasıyla  $\%35,18$ ,  $\%30,83$ ,  $\%35,67$ ,  $\%34,58$ ,  $\%40,17$ 'dir. Gözlemlenen maksimum nem seviyeleri  $\%63,99$ ,  $\%42,87$ ,  $\%61,76$ ,  $\%50,55$ ,  $\%66,24$  iken minimum seviyeler sırasıyla  $\%27,73$ ,  $\%20,80$ ,  $\%25,91$ ,  $\%24,31$ ,  $\%32,39$ 'dir. Mayıs ayında ölçülen maksimum bağıl nem değerleri ise sırasıyla  $\%62,61$ ,  $\%61,13$ ,  $\%56,35$ ,  $\%67,76$ ,  $\%65,74$  iken minimum değerler  $\%26,95$ ,  $\%25,62$ ,  $\%27,42$ ,  $\%32,63$  ve  $\%31,66$ 'dir.

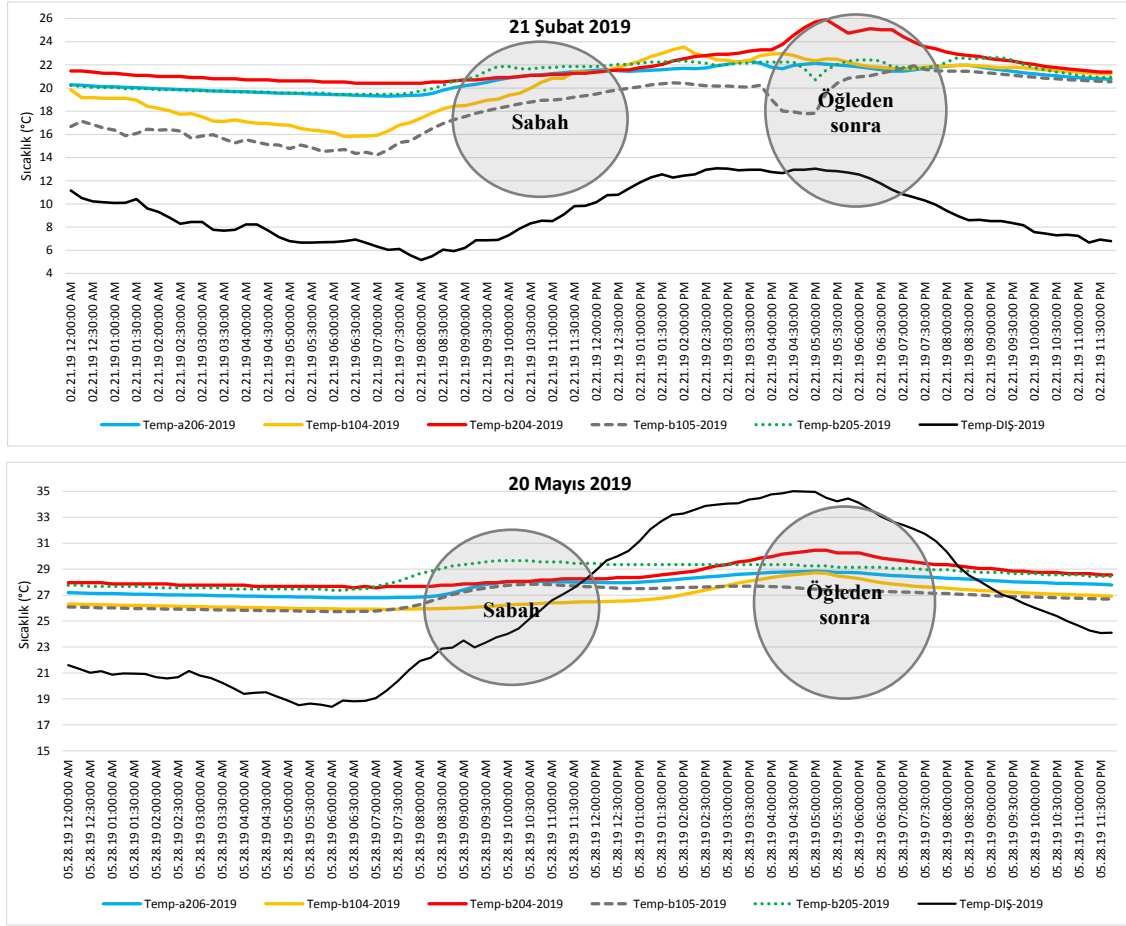
Şubat ayında sıcaklıktaki standart sapma değerlerine bakıldığında b205 nolu sınıfta diğer sınıflara göre daha fazla değişkenlik vardır. b205 nolu sınıf haricindeki diğer sınıflarda ise birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Bağıl nem değerleri açısından

görece en fazla değişkenlik b204 nolu sınıfta gerçekleşmiştir. Mayıs ayında ise sıcaklık değerleri açısından birbirine benzer standart sapma değerleri görülmektedir. Buradaki dikkat çekici nokta sınıflardaki sıcaklıklar dış ortam sıcaklık değişimine yakın derecede değişkenlik göstermiştir. Bu durum iç ortam sıcaklıklarının hızlı bir şekilde dış koşullardan etkilendiğini göstermektedir. Bağıl nem değerleri açısından a206 nolu sınıf için en büyük standart sapma değeri elde edilmiştir.

Tablo 2. Şubat-Mayıs ayı sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ ) ve bağıl nem (%) için tanımlayıcı istatistiksel parametreler.

<b>Şubat ayı sıcaklıkları</b>					
Derslikler	Ortalama	Min.	Max.	Standart sapma	Ölçüm sayısı
<b>a206</b>	20,90	18,01	25,85	1,31	2047
<b>b104</b>	22,05	15,82	26,24	1,29	
<b>b204</b>	21,39	18,05	26,10	1,41	
<b>b105</b>	20,81	14,24	27,09	1,38	
<b>b205</b>	19,73	11,53	24,26	2,02	
<b>Dış</b>	6,1	0,06	17,49	3,47	
<b>Şubat ayı bağıl nem değerleri</b>					
<b>a206</b>	35,18	27,73	63,99	4,42	2047
<b>b104</b>	30,83	20,80	42,87	3,57	
<b>b204</b>	35,67	25,91	61,76	4,43	
<b>b105</b>	34,58	24,31	50,55	3,60	
<b>b205</b>	40,17	32,39	66,24	4,15	
<b>Dış</b>	74,80	38,82	92,69	12,04	
<b>Mayıs ayı sıcaklıkları</b>					
<b>a206</b>	24,45	17,06	30	2,79	2976
<b>b104</b>	24,17	19,25	30,30	2,21	
<b>b204</b>	25,80	21,28	32,29	2,31	
<b>b105</b>	23,70	19,35	29,55	2,30	
<b>b205</b>	25,43	21,38	31,88	2,40	
<b>Dış</b>	24,62	7,85	35	2,87	
<b>Mayıs ayı bağıl nem değerleri</b>					
<b>a206</b>	44,80	26,95	62,61	6,25	2976
<b>b104</b>	44,31	25,62	61,13	5,23	
<b>b204</b>	42,50	27,42	56,35	4,53	
<b>b105</b>	47,43	32,63	67,76	5,88	
<b>b205</b>	46,78	31,66	65,74	5,27	
<b>Dış</b>	59,22	15,70	92,75	16,39	

Sınıflar arasındaki farklılıkları daha iyi analiz edebilmek için şubat ve mayıs ayı en sıcak günlerine ait 24 saatlik ölçüm sonuçları Şekil 4 de verilmiştir.

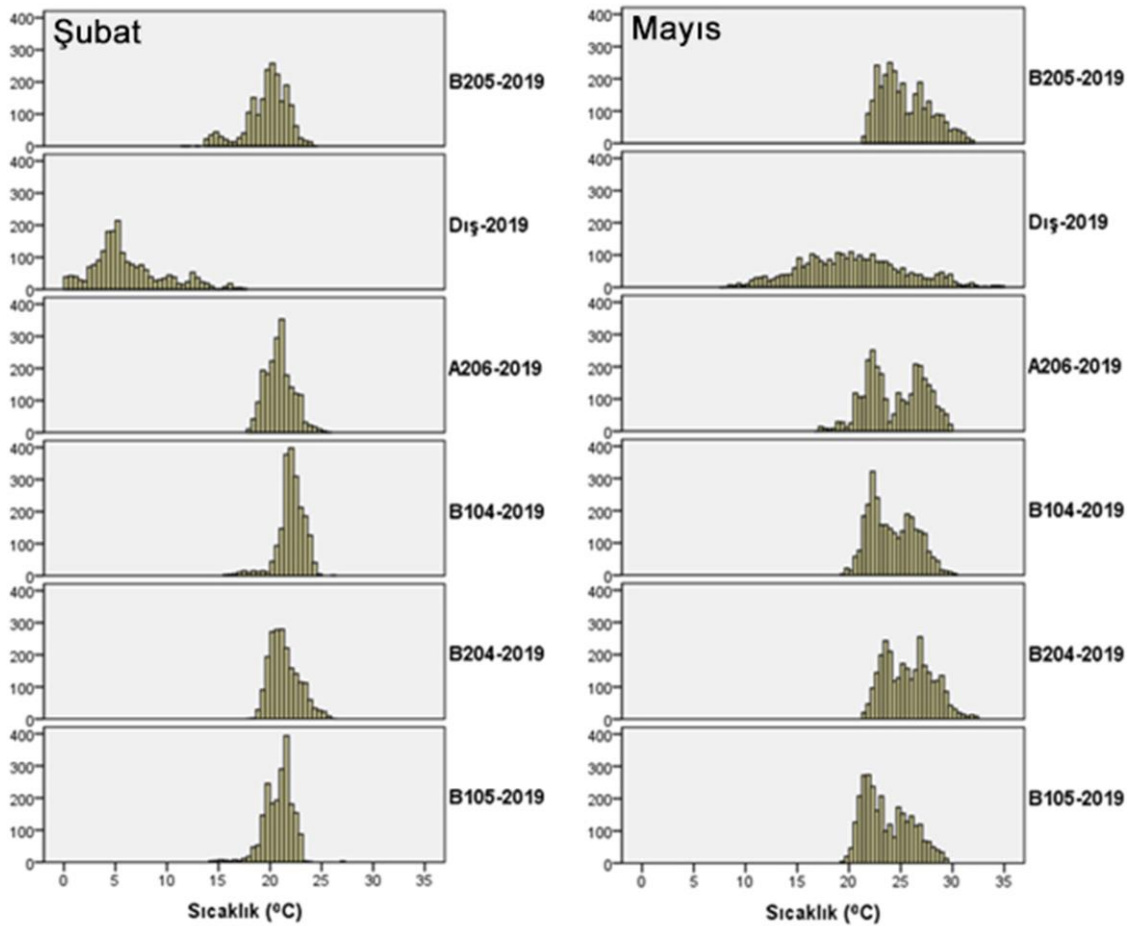


Şekil 4. Sınıfların en sıcak gün için 24 saatlik sıcaklık profili.

b205 ve b105 nolu sınıflar doğuya yöneliminden dolayı sabah saatlerinde direk güneş ışınlarına maruz kalmaktadır. Özellikle b205 nolu sınıfta Şubat ayında sabah saatlerinde güneş ışınları kaynaklı iç ortam sıcaklığındaki artış eğilimi net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca bu saatlerde b205 nolu sınıfta diğer sınıflara göre daha yüksek ortalama sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Fakat aynı yöne bakan ve bir alt katta bulunan b105 nolu sınıfta aynı saatlerde b205 nolu sınıfa göre daha düşük sıcaklıklar ölçülmüştür. Aradaki fark 2°C'nin üzerine çıkmaktadır. Bu iki sınıfın yaklaşık 6m ilerisinde amfi bloğu yer almaktadır. Bu binanın, özellikle 1. kattaki b105 nolu sınıfa ulaşacak gün ışığını önemli ölçüde azalttığı tahmin edilmektedir. Bu durum alt kattaki sınıfta sabah saatlerinde daha düşük sıcaklıkların kaydedilmesini açıklamaktadır. Özellikle yaz aylarında gölgeleme etkisinin iç ortam konforunu pozitif yönde etkileyeceğinin de bir göstergesidir. Bir diğer önemli nokta ise alt kattaki sınıflarda üst kattaki sınıflara göre görece daha düşük iç ortam sıcaklıklarının kaydedilmesidir. Muhtemel sebepleri arasında gölgeleme etkisi ve ısınan havanın yükselmesi prensibi sayılabilir. Bu durum yaz aylarında avantajlı iken kış aylarında ise dezavantaj oluşturmaktadır. Batı yönüne bakan sınıflarda ise güneş ışınlarının öğleden sonra görece yataya yakın açıda gelmesi nedeniyle iç ortama daha fazla nüfuz etmektedir ve bu sınıflarda iç ortam sıcaklıkları daha yüksek seyretmektedir. b204 nolu sınıfta öğleden sonra en yüksek iç ortam sıcaklıkları kaydedilmiştir. Mayıs ayında, akşam ve gece saatlerinde sınıflardaki sıcaklıkların 26-28°C mertebelerinde sabit bir seyir izlediği görülmektedir. Bu durum binanın kullanılmadığı zamanlarda dış hava sıcaklığının düşmesine rağmen iç ortamın yeteri kadar soğuyamadığını göstermektedir. Aynı

zamanda doğal havalandırmanın yetersizliğine işaret etmektedir. Binanın dış hava sıcaklığının düşük olduğu saatlerde doğal havalandırma yoluyla gece soğutması yapılması binanın kullanılmaya başlandığı sabah saatlerinde daha konforlu sınıflar elde edilmesine katkı sağlayabilir.

Histogramlar genel anlamda, verilerin ortalamasını, dağılımını (yayılmasını) ve şeklini (göreceli sıklığını) göstermek için tasarlanmış bir veri dağılım grafikleridir. Histogramlar, tablo veya diğer biçimlerde anlaşılması zor olan büyük miktarda verinin görsel bir görüntüsünü verebilir. Bu nedenle şubat ve mayıs ayı boyunca 15 dakikalık aralıklarla yapılan sıcaklık ölçümlerinden elde edilen veriler ile histogram grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 5 de gösterilmiştir. Her sınıfta farklılıkların olduğu görülmektedir. Genellikle normal dağılım sergilemektedir. Şubat ayına bakıldığında aktif ısıtma dönemi olduğu için sınıflarda sıcaklıklar tek pik noktalı ve sıklıkla 20-22°C arasında gerçekleşmiştir. Dar bir aralıkta sıcaklıkların tekrar etmesinin nedeni sınıfların ısıtılmasıdır. b205 nolu sınıfta çok az sıklıkta olsa da sıcaklıklar 15°C'nin altında seyretmiştir. Mayıs ayında aktif bir soğutma sistemi olmaması nedeniyle çok farklı sıklıkta farklı sıcaklıklar kaydedilmiştir. 25°C'nin üzerindeki sıcaklıklar tüm sınıflarda çoğunlukla ölçülmüştür. Ayrıca 25°C'nin altında ve üzerinde olmak üzere 2 pik noktası görülmektedir.



Şekil 5. Şubat ve mayıs ayı sıcaklık ölçüm verilerinin histogram analizi.

Şubat ve Mayıs ayında ölçülen değerlerde, sınıflar arasında anlamlı bir fark olup olmadığı parametrik olmayan Wilcoxon İşaretili Sıralar Testi kullanılarak

değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Şubat ayında sadece a206 ile b105 sınıfında ölçülen sıcaklıklar arasında anlamlı bir farkın olmadığı bulunmuştur ( $p>0,05$ ). Mayıs ayında ise her sınıfta anlamlı farklılık olduğu tespit edilmiştir ( $p<0,05$ ). Bağıl nem açısından ise anlamlı farklılık olmayan sınıf yoktur.

**3.2. Sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin ASHRAE Standardına göre değerlendirilmesi**  
ASHRAE Standardı 62.1–2007'ye göre, bağıl nem %65'in altında tutulmalıdır [21]. Benzer şekilde, ASHRAE Standardı 55–2010'e göre, ısı konfor için sıcaklıklar 22,5 ile 25,5°C arasında değişebilir [19]. Tablo 3, ölçülen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin yukarıda ifade edilen değerlerden yüzde olarak aşımını göstermektedir.

Tablo 3. Sıcaklık ve bağıl nem değerleri için ASHRAE Standartlarının aşılması (%).

Sınıflar	Şubat		Mayıs	
	Sıcaklık	Bağıl nem	Sıcaklık	Bağıl nem
	<22,5	>25,5	>25,5	>%65
<b>a206</b>	37,1 (Eğitim-öğretim dışı) 1,1 (Eğitim-öğretim zamanları)	0,09	0	41,8 (Eğitim-öğretim zamanları) 0
<b>b104</b>	15,9 (Eğitim-öğretim dışı) 1,2 (Eğitim-öğretim zamanları)	0,09	0	32,3 (Eğitim-öğretim zamanları) 0
<b>b204</b>	27,5 (Eğitim-öğretim dışı) 1,01 (Eğitim-öğretim zamanları)	0,48	0	53,7 (Eğitim-öğretim zamanları) 0
<b>b105</b>	41,1 (Eğitim-öğretim dışı) 1,3 (Eğitim-öğretim zamanları)	0,09	0	25,6 (Eğitim-öğretim zamanları) 1,5
<b>b205</b>	45,4 (Eğitim-öğretim dışı) 1,11 (Eğitim-öğretim zamanları)	0,09	1	42,9 (Eğitim-öğretim zamanları) 0,13

Ölçümler boyunca şubat ayı içinde sınıflarda sıcaklık seviyesi 22,5°C'nin altına %1 mertebelerinde düşmüştür. 22,5 °C'nin altına düştüğü zamanların çoğunlukla eğitim-öğretimin yapılmadığı zamanlar olduğu görülmüştür. Kış döneminde eğitim-öğretim zamanlarında sınıflardaki iç sıcaklıkların 25,5°C'nin üzerine çıkması aktif ısıtma sisteminin çok nadir olsa da ihtiyaçtan daha fazla ısı kapasitede çalıştırıldığı anlamına gelmektedir. Bu durum enerji tüketimini gereksiz şekilde artırabilir. Bağıl nem değerleri ise tüm sınıflarda standardta öngörülen değerler mertebesinde. Mayıs ayına bakıldığında doğal havalandırma b204 nolu sınıfta eğitim-öğretim zamanının %53,7'inde sıcaklıkların 25,5°C'nin üstünde olduğu görülmektedir. a206 ve b205 nolu sınıflarda ise bu oran %40'ın üzerindedir. Mayıs ayı içinde görece en iyi ısı konfor şartlarına sahip sınıflar ise b104 ve b105 nolu sınıflardır. Bir diğer ilginç nokta ise ölçüm yapılan zaman zarfında sınıfların kullanıldığı dönemin sadece %16'sında dışarıdaki sıcaklıklar 25,5°C'nin üzerine çıkmıştır. Bu nedenle sınıflardaki iç



sıcaklıkların dışarıdaki hava sıcaklığından zaman zaman daha yüksek olduğu söylenebilir. Sıcak hava sınıflarda birikmektedir ve dış hava sıcaklığı düşmesine rağmen iç sıcaklıklar düşmemektedir. Sınıflarda doğal havalandırmanın çoğunlukla yetersiz olduğu söylenebilir. Ayrıca bu durum binanın yetersiz yalıtıldığını, pencerelerde kullanılan camların doğru seçilmediği ve bu nedenle dış iklim koşullarının iç mekan ısı koşullarını kolaylıkla etkilediğini göstermektedir. Bağıl nem açısından sınıflarda herhangi bir önemli problem yoktur. Alt kattaki sınıflarda üst kattaki sınıflara göre ısı konforun daha iyi düzeyde olduğu görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Çalışmada, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi binasının doğal havalandırılmalı sınıflarında sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin izlenmesiyle ısı konfor durumunun değerlendirilmesi sunulmuştur. Aynı bina içinde aynı koşullara maruz kalan nerdeyse tüm sınıflarda ölçülen değerlerin istatistiksel olarak anlamlı bir şekilde farklılaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen bulguların analizinden bazı temel sonuçlar çıkarılmıştır:

- Isıl konfor koşullarının dış ortam iklim durumu yanında sınıfların yönelimi ile de ilişkili olduğu görülmüştür. Doğuya bakan sınıflarda sabah saatlerinde batıya bakan sınıflarda ise öğleden sonra iç sıcaklıklarda bir artış gözlenmiştir.
- Güneş ışınlarının iç ortama ulaşmasını güçleştiren faktörlerin varlığına oldukça dikkat edilmelidir. Kış ve yaz durumu için ayrı analizler yapılarak optimum çözümler aranmalıdır.
- Bağıl nem değerleri her iki ayda da ASHRAE Standardı 62.1–2007’da önerildiği gibi %65 sınır değerini önemli ölçüde aşmamaktadır. Sıcaklık değerleri ise şubat ayında gün içinde çoğunlukla 22-25<sup>0</sup>C aralığında seyretmektedir. Çok küçük bir zaman aralığında sıcaklıkların üst eşik değerini geçtiği görülmüştür. Bu durum binada gereksiz enerji tüketiminin olduğunu göstermektedir. Mayıs ayında ise ısı konfor dış ortam sıcaklık değerlerinden etkilenerek, iç ortam sıcaklık değerleri sınıflarda yüksek seyretmiş ve çoğunlukla standartların dışına çıkmıştır.
- Aynı koşullara maruz kalan sınıflarda iç mekan sıcaklıkları anlamlı ölçüde ( $p < 0.05$ ) farklılık göstermektedir.

Öğrencilerin sağlık güvenliğini ve daha iyi öğrenme performansını sağlamak, optimum düzeyde enerji tüketimini ve yeterli ısı konfor seviyesini korumak için bina tasarım aşamasında, özellikle mekansal organizasyon yapılırken oryantasyonun, malzeme seçimi, çevredeki durumun, katlar içindeki yerleşimin, yalıtımın, gece soğutması potansiyelinin gereken şekilde analiz edilerek dikkate alınması tavsiye edilir.

#### Kaynaklar

- [1] Majd, E., McCormack, M., Davis, M., Curriero, F., Berman, J., Connolly, F., Leaf, P., Rule, A., Green, T., Clemons-Erby, D., Gummerson, C. ve Koehler, K., Indoor air quality in inner-city schools and its associations with building characteristics and environmental factors, **Environmental Research**, 170, 83–91, (2019).
- [2] Bakó-Biró, Z., Clements-Croome, D.J., Kochhar, N., Awbi, H.B. ve Williams,

- M.J., Ventilation rates in schools and pupils' performance, **Building and Environment**, 48, 215–223, (2012).
- [3] Che, W.W., Tso, C.Y., Sun, L., Ip, D.Y.K., Lee, H., Chao, C.Y.H. ve Lau, A.K.H., Energy consumption, indoor thermal comfort and air quality in a commercial office with retrofitted heat, ventilation and air conditioning (HVAC) system, **Energy and Buildings**, 201, 202–215, (2019).
- [4] Heracleous, C. ve Michael, A., Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period, **Journal of Building Engineering**, 26, 100917, (2019).
- [5] de Abreu-Harbich, L.V., Chaves, V.L.A. ve Brandstetter, M.C.G.O., Evaluation of strategies that improve the thermal comfort and energy saving of a classroom of an institutional building in a tropical climate, **Building and Environment**, 135, 257–268, (2018).
- [6] Teli, D., Bourikas, L., James, P.A.B. ve Bahaj, A.S., Thermal performance evaluation of school buildings using a children-based adaptive comfort model, **Procedia Environmental Sciences**, 38, 844–851, (2017).
- [7] Gupta Rajat, A.H. C.T. ve John, O'Brien., Improving productivity in the workplace –lessons learnt and insights from the whole life performance plus project, (2018).  
[http://www.bco.org.uk/Research/Publications/Improving\\_Productivity\\_in\\_the\\_Workplace.aspx](http://www.bco.org.uk/Research/Publications/Improving_Productivity_in_the_Workplace.aspx), (05.09.2020).
- [8] Duarte, R., Glória Gomes, M. ve Moret Rodrigues, A., Estimating ventilation rates in a window-aided room using Kalman filtering and considering uncertain measurements of occupancy and CO<sub>2</sub> concentration, **Building and Environment**, 143, 691–700, (2018).
- [9] M. Griffiths ve M. Eftekhari, Control of CO<sub>2</sub> in a naturally ventilated classroom, **Energy and Buildings**, 40, 556–560, (2008).
- [10] Nguyen, A.T., Singh, M.K. ve Reiter, S., An adaptive thermal comfort model for hot humid South-East Asia, **Building and Environment**, 56, 291–300, (2012).
- [11] Corgnati, S.P., Filippi, M. ve Viazzo, S., Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort, **Building and Environment**, 42, 951–959, (2007).
- [12] Sarbu, I. ve Pacurar, C., Experimental and numerical research to assess indoor environment quality and schoolwork performance in university classrooms, **Building and Environment**, 93, 141–154, (2015).
- [13] Mishra, A.K. ve Ramgopal, M., A thermal comfort field study of naturally ventilated classrooms in Kharagpur, India, **Building and Environment**, 92, 396–406, (2015).
- [14] Zaki, S.A., Damiati, S.A., Rijal, H.B., Hagishima, A. ve Abd Razak, A., Adaptive thermal comfort in university classrooms in Malaysia and Japan, **Building and Environment**, 294–306, 122, (2017).
- [15] Singh, M.K., Kumar, S., Ooka, R., Rijal, H.B., Gupta, G. ve Kumar, A., Status of thermal comfort in naturally ventilated classrooms during the summer season in the composite climate of India, **Building and Environment**, 128, 287–304, (2018).
- [16] Mustapa, M.S., Zaki, S.A., Rijal, H.B., Hagishima, A. ve Ali, M.S.M., Thermal comfort and occupant adaptive behaviour in Japanese university buildings with free running and cooling mode offices during summer, **Building and Environment**, 105, 332–342, (2016).

- [17] López-Pérez, L.A., Flores-Prieto, J.J. ve Ríos-Rojas, C., Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate, **Building and Environment**, 150, 181–194, (2019).
- [18] 15251 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, (2007).
- [19] ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy, (2010).
- [20] ISO 7730: Moderate thermal environments - determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, (2005).
- [21] ANSI/ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for acceptable indoor air quality, (2007).
- [22] CEN - CR 1752 Ventilation for buildings - design criteria for the indoor environment, (1998).
- [23] [http://izmir.mgm.gov.tr/FILES/iklim/balikesir\\_iklim.pdf](http://izmir.mgm.gov.tr/FILES/iklim/balikesir_iklim.pdf), (10.08.2020).

# Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff denkleminin analitik çözümleri

Güldem YILDIZ<sup>1,\*</sup>, Çiğdem TÜRKMEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik. Böl., Merkez Yerleşke, Niğde

<sup>2</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Merkez Yerleşke, Niğde

Geliş Tarihi (Received Date): 08.10.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 28.01.2021

## Öz

Kısmi Diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri, kuantum mekanik ve plazma fiziği gibi alanlarda, açığa çıkmamış olayların açıklanmasında fayda sağlamaktadır. Bu çalışmada, lineer olmayan kısmi türevli Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) diferansiyel denkleminin analitik çözümlerini bulmak için Homojen Denge Metodundan yararlanılmıştır. Homojen Denge Metodunun Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff denkleminin uygulanmasıyla elde edilen analitik çözümler literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmış ve literatürde bulunan çözümlerle uyumlu hiperbolik ve trigonometrik tipten fonksiyonlar elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) denklemi, homojen denge metodu.

## Analytical solutions of Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff equation

### Abstract

Analytical solutions of Partial Differential equations are useful in explaining unrevealed events in areas such as quantum mechanics and plasma physics. In this study, the Homogeneous Balance Method is used to find analytical solutions of the nonlinear partial differential Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) differential equation. Analytical solutions obtained by applying the Homogeneous Balance Method to the Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff equation are compared with the results found in the literature, and hyperbolic and trigonometric type functions that are compatible with the solutions in the literature are obtained.

\* Güldem YILDIZ, guldem.yildiz@ohu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-8120-3525>

Çiğdem TÜRKMEN, cigdemturkmen51@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8354-8236>

**Keywords:** Calogero–Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) equation, homogeneous balance method.

## 1. Giriş

Lineer olmayan kısmi türevli diferansiyel denklemlerden; plazma fiziği [1,2], akışkanlar mekaniği [3], fiber optik [4] ve birçok bilim alanında yararlanılmaktadır. Bu denklemlerin çözümlerini elde etmek için nümerik ve analitik metotlar geliştirilmiştir [5]. Bu metotlardan; Varyasyonel İterasyon Metot [6, 7], Homotopi Analiz Metot [8], Homotopi Pertürbasyon Metot [9-11], Adomian Ayrışım Metot [12], Homojen Denge Metot [13-24] ve diğerleri son yirmi yılda literatürde bulunan çalışmalardandır. Lineer olmayan denklemlerin çözümlerine Homojen Denge Metodun kullanımıyla hızlı ve analitik sonuçlara ulaşılmaktadır. Lineer olmayan kısmi türevli Korteweg-de Vries denklemlerinden olan Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) denklemi, farklı çalışmalarla tanıtılmıştır [25-34]. Bu çalışmada, CBS denkleminin analitik çözümlerini elde etmek için yapılan literatür çalışmasında Homojen Denge Metodun bu denkleme uygulanmadığı tespit edilmiştir. Homojen Denge Metodun lineer olmayan denklemlerin analitik çözümlerinin elde edilmesinde uygun bir metot olmasından dolayı CBS denkleminde uygulanmıştır.

Lineer olmayan kısmi türevli CBS denklemi,  $U$  bağımlı değişken,  $x, t$  bağımsız değişkenler olmak üzere;

$$U_{xt} + 2U_y U_{xx} + 4U_x U_{xy} + U_{xxy} = 0, \quad (1)$$

şeklinde dir.

(2+1) boyutlu CBS (1) denklemi, Riemann'ın  $y$  eksenini boyunca yayılan dalga ile  $x$  eksenini boyunca yayılan dalga arasındaki etkileşimi açıklamaktadır [25].

## 2. Homojen denge metodu

Lineer olmayan denklemlerin analitik çözümlerini elde etmek için kullanılan Homojen Denge metodu, [13-24] kaynaklarında incelenmiştir. Bu metot, dengeleme terimi esasına dayanır ve kolay bir algoritması vardır. Homojen Denge metodu ile lineer olmayan bir kısmi türevli diferansiyel denklemin tam çözümü,

$$U(\mu) = \sum_{i=0}^M q_i \varphi^i(\mu), \quad (2)$$

formunda aranır. Burada  $q_i$  ler sabit ve

$$\varphi = \tanh(k\mu), \quad \varphi = \coth(k\mu);$$

fonksiyonları da

$$\varphi' = a\varphi^2 + b\varphi + c \quad \text{ve} \quad \varphi' = k(1 - \varphi^2),$$

denklemlerin çözümleridir. Homojen Denge metot, kısaca aşağıdaki maddeler halinde özetlenebilir;

i. Lineer olmayan bir kısmi türevli diferansiyel denklem

$$F(U, U_t, U_x, U_{tt}, U_{xt}, U_{xx}, \dots) = 0, \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir.  $U = U(x, t)$  bilinmeyen fonksiyon olmak üzere (3) denkleminde

$$U(\mu) = U(x, t), \quad \mu = kx + lt + d, \quad (4)$$

dönüşümü uygulanırsa;

$$P(U, U', U'', \dots) = 0, \quad (5)$$

kapalı formda (5) adi diferansiyel denklemi elde edilir.

ii. (3) numaralı denklemin çözümü ise (2) formunda bulabilmek için  $N$  dengeleme terimine ihtiyaç vardır. Bu metodun işleyişi “dengeleme terimi” olarak adlandırılan ve en yüksek mertebeli lineer terim ile en yüksek dereceli lineer olmayan terim karşılaştırılmasına dayanır. Bu  $N$  dengeleme terimi lineer olmayan herhangi bir adi

diferansiyel denklemde en yüksek mertebeden lineer olan terim  $\frac{d^q u}{d\mu^q}$ , en yüksek

dereceden lineer olmayan terim  $u^p \left( \frac{d^r u}{d\mu^r} \right)^s$  ve  $N$  dengeleme terimi olmak üzere

$$N + q = Nq + s(N + r) \text{ eşitliğinden elde edilir [23].}$$

iii. Dengeleme terimi  $N$  değeri bulunduktan sonra (2) de yerine yazılarak (3) denkleminin çözümü:

$$U(\eta) = \alpha_N (\varphi)^N + \alpha_{N-1} (\varphi)^{N-1} + \dots + \alpha_0 = 0,$$

formunda aranır. Burada  $\varphi$ ,

$$\varphi' = a\varphi^2 + b\varphi + c \text{ veya } \varphi' = k(1 - \varphi^2),$$

denklemlerin çözümüdür ve  $a, b, c$  ve  $k$  sabitler olmak üzere  $U$  ve türevleri alınarak, mathematica gibi programlar yardımıyla, elde edilen sabitler (5) numaralı denklemde yerlerine yazılır.

iv. (5) numaralı denklemde  $U$  ve türevleri yerine yazılırsa, katsayılar  $a_i$ ’lerden oluşan  $\varphi$ ’li cebirsel denklemler elde edilir. Bu cebirsel denklemler düzenlenerek elde edilen  $\varphi$ ’nin katsayıları,

$$P_n(q_m, q_{m-1}, \dots, q_0, k, w, \dots) = 0, \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots, m)$$

şeklindedir. Bulunan cebirsel denklem sistemleri birtakım hesap programları yardımıyla sıfıra eşitlenerek çözümlenir.

v. Elde edilen çözümler (2) çözüm önerisinde yerine yazılarak (5) numaralı denklemin tam çözümüne ulaşılır. (5) denklemi (3) denkleminin dönüşümü olduğu için (3) numaralı denklemin çözümü elde edilmiş olur [13-24].

### 3. Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) denkleminin homojen denge metodu ile analitik çözümleri

Lineer olmayan kısmi türevli Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff (CBS) (1) numaralı denklemine

$$U(x, y, t) = U(\eta), \quad \eta = x + y + \lambda t, \quad (6)$$

dönüşümü uygulanırsa,

$$U''' + 3((U')^2)' + \lambda U'' = 0, \quad (7)$$

(7) denklemi elde edilir.  $c$  integral sabiti olmak üzere, (7) denkleminin integrali alınır

$$U'' + 3(U')^2 + \lambda U' + c = 0, \quad (8)$$

(8) denklemi bulunur. (8) denkleminde  $U' = V$  alınır ve düzenlenirse,

$$V'' + 3V^2 + \lambda V + c = 0; \quad (9)$$

denkleminde elde edilir. (9) denkleminde  $V''$  ile  $V^2$  terimleri arasında dengeleme işlemi yapılırsa, dengeleme terimi  $m + 2 = 2m$ ,  $m = 2$  elde edilir. Bu yüzden çözüm önerisi

$$V(\eta) = a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2; \quad (10)$$

şeklindedir. Burada,

$$\varphi' = k\varphi^2 + l\varphi + m, \quad (11)$$

(11) denklemi ve  $k, l, m$  sabitler olmak üzere;

$$\begin{aligned} V' &= a_1\varphi' = a_1(k\varphi^2 + l\varphi + m), \\ V'' &= 2a_1k\varphi\varphi' + a_1l\varphi' = 2a_1k\varphi(k\varphi^2 + l\varphi + m) + a_1l(k\varphi^2 + l\varphi + m), \\ &= 2a_1k^2\varphi^3 + 2a_1kl\varphi^2 + 2a_1km\varphi + a_1kl\varphi^2 + a_1l^2\varphi + a_1lm, \\ &= 2a_1k^2\varphi^3 + 3a_1kl\varphi^2 + 2a_1km\varphi + a_1l^2\varphi + a_1lm, \end{aligned}$$

$V$ 'nin türevleri bulunur ve (9) denkleminde yerlerine yazılırsa,

$$3a_2^2\varphi^4 + 6a_2a_1\varphi^3 + 6a_2a_0\varphi^2 + 6a_2k^2\varphi^4 + 10a_2kl\varphi^3 + 8a_2km\varphi^2 + 4a_2l^2\varphi^2 + 6a_2lm\varphi + 2a_2m^2 \\ + a_2\varphi^2\lambda + 3a_1^2\varphi^2 + 6a_1a_0\varphi + 2a_2k^2\varphi^3 + 3a_1kl\varphi^2 + 2a_1km\varphi + a_1l^2\varphi \\ + a_1lm + a_1\varphi\lambda + 3a_0^2 + a_0\lambda + c = 0$$

denklemini elde edilir. Burada  $\varphi$  ve kuvvetleri sıfır olmayacağından  $\varphi$  ve kuvvetlerinin katsayılarından oluşan,

$$\begin{aligned} \varphi^4 : 3a_2(a_2 + 2k^2) &= 0, \\ \varphi^3 : 2(3a_2a_1 + 5a_2kl + a_1k^2) &= 0, \\ \varphi^2 : 6a_2a_0 + 8a_2km + 4a_2l^2 + a_2\lambda + 3a_1^2 + 3a_1kl &= 0, \\ \varphi^1 : 6a_2lm + 6a_1a_0 + 2a_1km + a_1l^2 + a_1\lambda &= 0, \\ \varphi^0 : 2a_2m^2 + a_1lm + 3a_0^2 + a_0\lambda + c &= 0, \end{aligned}$$

denklemler elde edilir. Bu denklemler Mathematica yardımıyla çözümlendikten sonra,

$$\begin{aligned} a_2 = -2k^2, a_1 = \frac{12k^2lm}{6a_0 + 2km + l^2 + \lambda}, a_0 = \frac{-8km - l^2 - \lambda}{6}, \\ c = \frac{-16k^2m^2 + 8kl^2m - l^4 + \lambda^2}{12}. \end{aligned} \quad (12)$$

katsayıları elde edilir.

**Durum 1:** (11) denklemini için  $\varphi'$  ve  $\varphi^2$  terimleri arasında dengeleme terimi hesaplanırsa dengeleme teriminin değeri  $m+1 = 2m$ ,  $m=1$  elde edilir. Buradan Ricatti

denkleminin özel çözümü olan  $\varphi = \sum_{i=0}^m b_i \tanh^i \eta$  den çözüm önerisi,

$$\varphi = b_0 + b_1 \tanh(\eta), \quad (13)$$

elde edilir. (13) denklemini (11) denkleminde yerine yazılırsa,

$$-b_1 \tanh(\eta)^2 k - 2b_0 b_0 \tanh(\eta) k - b_1 \tanh(\eta)^2 - b_1 \tanh(\eta) l + b_1 - b_0^2 k - b_0 l - m = 0$$

denklemini elde edilir. Bu denklem düzenlendiğinde,

$$-b_1 (b_1 k + l) [\tanh(\eta)]^2 = 0,$$



$$\begin{aligned} b_1(-2b_0k - l) \tanh(\eta) &= 0, \\ b_1 - b_0^2k - b_0l - m &= 0 \end{aligned}$$

denklem sistemine ulaşılır. Bu denklem sisteminin çözümleri,

$$b_1 = \frac{-1}{k}, \quad b_0 = \frac{-l}{2k}, \quad m = \frac{l^2 - 4}{4k}, \quad (14)$$

şeklindedir. (12) ve (14) denklemleri (10) ve (13) denklemlerinde yazılarak düzenlenirse (9) denklemin çözümü,

$$V = \frac{-12 \tanh(\eta)^2 - \lambda + 8}{6}, \quad (15)$$

şeklindedir ve (15) numaralı denklemde  $U' = V$  alınır ve düzenlenirse, (1) denklemin çözümü,

$$U_1(\eta) = -\frac{1}{6}\eta(4 + \lambda) + 2 \tanh \eta, \quad (16)$$

(16) hiperbolik tip fonksiyon şeklinde elde edilir.

Benzer şekilde aynı işlemler  $\varphi = \sum_{i=0}^m b_i \coth^i \eta$  içinde yapılırsa,

$$V(\eta) = \frac{-12a_1 \coth(\eta)b - \lambda + 8}{6}, \quad (17)$$

denklemini elde edilir. (17) denkleminde  $U' = V$  alınır ve düzenlenirse, (1) denklemin çözümü,

$$U_2(\eta) = -\frac{1}{6}\eta(4 + \lambda) + 2 \coth \eta, \quad (18)$$

şeklinde olur. (16) ve (18) çözümleri; birbirleriyle benzer hiperbolik tip fonksiyonlardır.

**Durum 2:** (11) denkleminde  $k = 1, l = 0$  için  $\varphi' = \varphi^2 + m$  olur ve

$$\varphi(\eta) = \begin{cases} -\sqrt{-m} \tanh(\sqrt{-m}\eta), & m < 0 \\ -\frac{1}{\eta}, & m = 0 \\ \sqrt{m} \tan(\sqrt{m}\eta), & m > 0 \end{cases}$$

çözümleri elde edilir. Buradan da (1) denklemin çözümü,  $m < 0$  için,

$$V(\eta) = \frac{12 \tanh(\sqrt{-m}\eta)^2 m - 8m - \lambda}{6},$$

$U' = V$  alınır ve düzenlenirse,

$$U_3(\eta) = \frac{1}{6} \eta(4m - \lambda) + 2\sqrt{-m} \tanh \sqrt{-m}\eta, \quad (19)$$

$m = 0$  için,

$$V(\eta) = \frac{-\eta^2 \lambda - 12}{6\eta^2},$$

$U' = V$  alınır düzenlenirse,

$$U_4(\eta) = \frac{2}{\eta} - \frac{\eta \lambda}{6}, \quad (20)$$

şeklinde hiperbolik tip çözümler elde edilir ve  $m > 0$  için,

$$V(\eta) = \frac{-12 \tan(\sqrt{m}\eta)^2 m - 8m - \lambda}{6},$$

$U' = V$  alınır ve düzenlenirse,

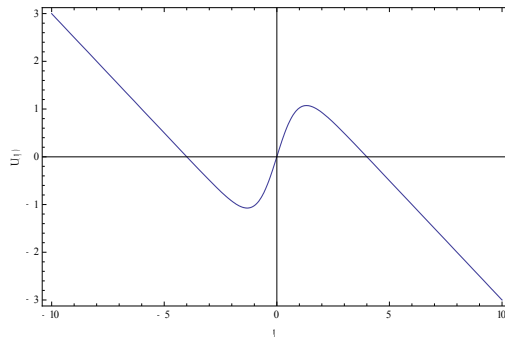
$$U_5(\eta) = \frac{1}{6} \eta(4m - \lambda) - 2\sqrt{m} \tan \sqrt{m}\eta, \quad (21)$$

şeklinde trigonometrik tip çözüm elde edilir.

(19) fonksiyonunun  $m = -1$ ,  $\lambda = 1$  değerleri için

$$U(\eta) = -\frac{5}{6} \eta + 2 \tanh \eta,$$

Çözüm eğrisinin grafiği Şekil 1 de gösterilmiştir.



Şekil 1. CBS denkleminin,  $U(\eta) = -\frac{5}{6} \eta + 2 \tanh \eta$ , çözüm eğrisi.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, lineer olmayan dalga denklemlerinden Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff CBS denkleminde Homojen Denge metodu uygulanmıştır. Bulunan fonksiyonlar ve türevleri CBS denkleminde yerine yazılarak sonuçların doğruluğu tespit edilmiştir. Bu metotla CBS denkleminin hiperbolik ve trigonometrik tipte çözümlerine ulaşılmıştır. Yukarıda ifade edilen bu çözümler [31] kaynağında bulunan çözümlerle uyumludur. Ancak, [31] kaynağında Sine-Gordon Açılım Metodundan faydalanarak kompleks fonksiyon çözümleri de elde edilmiştir. Bu sebeple, lineer olmayan kısmi türevli denklemlerin hiperbolik ve trigonometrik tipte çözümlerini elde etmek için kolay algoritmasından dolayı Homojen Denge metodu tercih edilebilir.

#### Kaynaklar

- [1] Goldston, R. J. ve Rutherford, P. H., **Introduction to Plasma Physics**, CRC Press, (1995).
- [2] Dönmez, O. ve Dağhan, D., Analytic Solutions of the Schamel-KdV Equation by Using Different Methods: Application to a Dusty Space Plasma, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 21, 208-215, (2017).
- [3] Çengel, Y. A. ve Cımbala J. M., **Akışkanlar Mekaniği**, Güven Bilimsel, (2008).
- [4] Anderson, D., Variational approach to nonlinear pulse propagation in fibers, **Physics Letters A**, 27, 3135-3145, (1983).
- [5] Yavuz, M. ve Yokus A., Analytical and numerical approaches to nerve impulse model fractional - order, **Numerical Methods for Partial Differential Equations**, 36(6), 1348-1368, (2020).
- [6] Evirgen, F., Analyze the optimal solutions of optimization problems by means of fractional gradient based system using VIM, **An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)**, 6, 75-83, (2016).
- [7] Evirgen, F. ve Yavuz M., An Alternative Approach for Nonlinear Optimization Problem with Caputo - Fabrizio Derivative, **ITM Web of Conferences** 22, 01009, (2018).
- [8] Yavuz, M. ve Yaşkıran B., Homotopy methods for fractional linear/nonlinear differential equations with a local derivative operator, **Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology**, 20(3) Special Issue, 75-89, (2018).
- [9] Yıldız, G. ve Dağhan D., Solution of the (2+1) Dimensional Breaking Soliton Equation by Using Two Different Methods, **Journal of Engineering Technology and Applied Sciences**, 1, 13-18, (2016).
- [10] Dağhan D., Yavuz H. ve Yıldız G., Lineer Olmayan Kısmi Türevli Denklemlere Homotopi Pertürbasyon Yönteminin Uygulanması, **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 6, 290-301, (2017).
- [11] Yavuz M. ve Ozdemir N., Numerical Inverse Laplace Homotopy Technique for Fractional Heat Equations, **Thermal Science**, 22, 185-194, (2018).
- [12] Yavuz M., Novel solution methods for initial boundary value problems of fractional order with conformable differentiation, **An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications**, 8, 1-7, (2018).

- [13] Wang, M., Zhou, Y., ve Li, Z., Application of a homogeneous balance method to exact solutions of nonlinear equations in mathematical physics, **Physics Letters A**, 216, 67-75, (1996).
- [14] Fan, E. ve Zhang, H., A note on the homogeneous balance method, **Physics Letters A**, 246, 403-406, (1998).
- [15] Fan, E., Two new applications of the homogeneous balance method, **Physics Letters A**, 265, 353-357, (2000).
- [16] Senthilvelan, M., On the extended applications of Homogenous Balance method, **Applied Mathematics and Computation**, 123, 381-388, (2001).
- [17] Zhao, X. ve Tang, D., A new note on a homogeneous balance method, **Physics Letters A**, 297, 59-67, (2002).
- [18] Zhao, X., Wang, Li. ve Sun W., The repeated homogeneous balance method and its applications to nonlinear partial differential equations, **Chaos, Solitons and Fractals**, 28, 448-453, (2006).
- [19] Jie, J., Wu, J. ve Zhang, J., Homogeneous Balance method for an Inhomogeneous KdV equation: Böcklund Transformation and Lax Pair, **International Journal of Nonlinear Science**, 9, 69-71, (2010).
- [20] Abdel Rady, A.S., Osman, E.S., ve Khalfallah, M., The homogeneous balance method and its application to the Benjamin–Bona–Mahoney (BBM) equation, **Applied Mathematics and Computation**, 217, 1385-1390, (2010).
- [21] Zayed, M.E., ve Alurrfi, K.A.E., The Homogeneous Balance method and its applications for nonlinear evolution equations, **Italian Journal of the Applied Mathematics**, 33, 307-318, (2014).
- [22] Yi, W., He, X-D. ve Yang X-F., The homogeneous balance of undetermined coefficients method and its application, **Open Mathematics**, 14, 816-826, (2016).
- [23] Türkmen, Ç., Lineer Olmayan Kısmi Türevli Diferansiyel Denklemlere Kudryashov Metodu ve Homojen Denge Metodunun Uygulanması, **Yüksek Lisans Tezi**, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, (2019).
- [24] Radha, B. ve Duraisamy, C., The homogeneous balance method and applications for finding the exact solutions for nonlinear equations, **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, (2020).
- [25] Yu, S.J., Toda, K.ve Fukuyama T., N-soliton solutions to a (2+1)-dimensional integrable equation, **Journal of Physics A: Mathematical and General**, 31, 10181-10186, (1998).
- [26] Bruzon, M.S., Gandarias, M.L., Muriel, C., Ramirez, J., Saez, S. ve Romero, F.R., The Calogero–Bogoyavlenskii–Schiff equation in 2+1 dimensions, **Theoretical and Mathematical Physics**, 137 (1), 1367-1377, (2003).
- [27] Kobayashi, T. ve Toda K., The Painlevé test and reducibility to the canonical forms for higher-dimensional soliton equations with variable-coefficients, **Symmetry, Integrability and Geometry: Methods and Applications**, 2, 1-10, (2006).
- [28] Peng, Y., New types of localized coherent structures in the Bogoyavlenskii–Schiff equation, **International Journal of Theoretical Physics**, 45 (9), 1779-1783, (2006).
- [29] Wazwaz, A.M., New solutions of distinct physical structures to high-dimensional nonlinear evolution equations, **Applied Mathematics and Computation**, 196, 363-370, (2008).

- [30] Kaplan, M., Bekir, A. ve Akbulut, A., A generalized Kudryashov method to some nonlinear are evolution equations in mathematical physics, **Nonlinear Dynamics**, 85, 2843–2850, (2016).
- [31] Başkonuş, H. M., Sulaiman, T. A. ve Bulut, H., New solitary wave solutions to the (2+1) dimensional Calogero–Bogoyavlenskii–Schiff and the Kadomtsev Petviashvili hierarchy equations, **Indian Journal of Physics**, 91, 1237-1243, (2017).
- [32] Tahami, M. ve Najafi, M., Multi-wave solutions for the generalized (2+1)-dimensional nonlinear evolution equations, **Optik**, 136, 228-236, (2017).
- [33] Salem, S., Kassem, M., Mohamed ve Mabrouk, S. M., Similarity Solution of (2+1)-Dimensional Calogero-Bogoyavlenskii-Schiff Equation Lax Pair, **American Journal of Applied Mathematics**, 7 (5), 137-144, (2019).
- [34] Saleh, R., Kassem, M. ve Mabrouk, S. M., Investigation of breaking dynamics for Riemann waves in shallow water, **Chaos, Solitons and Fractals**, 132, 109571, (2020).

# The effect of the new opacities on the stellar models

Gülay İNLEK\*

Balikesir University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, Cagis Campus, Balikesir

Geliş Tarihi (Received Date): 20.10.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 11.12.2020

## Abstract

*In this study the effect of current opacities on the radii of stars is investigated. For this, the new OPAS opacity tables are adapted in Paczynski programs GOB (Generates the outer boundary), SCH, HB8 and applied to stellar models in the mass range of 0.6-10  $M_{\odot}$ . In this work, the effect of the new opacity tables on the age of the observed real star U Oph is examined. The results are compared with the old opacity tables.*

**Keywords:** Stellar models, metallicity, new opacity tables.

## Yeni opaklıkların yıldız modellerine etkisi

### Öz

*Bu çalışmada güncel opaklıkların yıldızların yarıçapları üzerine etkisi araştırılmıştır. Bunun için yeni OPAS opaklık tabloları, Paczynski programları GOB (Dış sınır şartları oluşturmak), SCH, HB8'e uyarlanmıştır ve 0.6-10  $M_{\odot}$  kütle aralığındaki yıldız modellerine uygulanmıştır. Bu çalışmada, yeni opaklıkların gözlemlenen gerçek yıldız U Oph'un yaşı üzerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar eski opaklık tabloları ile karşılaştırılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Yıldız modelleri, metalik, yeni opaklık tabloları.

### 1. Introduction

It is well known that opacity is quite complicated with all the sources. In stellar interiors, use of frequency averaged opacity is generally adequate such as the Rosseland mean [1]. In the outer layers of the stars the frequency dependence must be considered carefully. In the stellar interiors, main sources of opacity are due to bound-free transitions, free-free absorption and electron scattering [2]. Many researchers worked

\* Gülay İNLEK, inlek@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4884-1437>

on opacity sources and calculations [3,4,5]. Inlek [6] constructed opacity tables for using in stellar modelling in a format particularly applicable to the Paczynski freeware program GOB. Tables are derived from those of Allard [7] and Weiss [8] for lower metal content envelopes.

OPAL and OP codes are known as theoretical methods for calculate opacities [9,4]. Many years ago opacity was identified [10,11,12]. Detailed explains of opacity are made by Inlek et al. [6] and by Inlek[13]. Inlek [13] showed that low metallicity opacities effect stellar radii. Metallicity dependence of envelope inflation in massive stars is studied by Sanyal et al. [14]. They have found that by opacity peaks of iron, helium and hydrogen stellar models develop inflated envelopes. Iron is the end of the fusion reactions in stars. It is known that the amount of iron/other metals determines the death of stars. e.g supernova, hypernova, black hole etc. Recently, Mondet et al. [15] have used OPAS opacity model to calculate Rosseland opacities for temperatures between  $\log T=6(K)$  and  $\log T=7.2(K)$ . They have found that oxygen and iron have major contributions to the total opacity. Meanwhile Co contribution to mixture Rosseland opacity is very small in their calculations. The present work have used OPAS opacity tables of Mondet et al. [15] in Paczynski Codes [16]. We first formatted OPAS tables by using four-point Lagrange interpolation for GOB, SCH and HB8 programs. Detailed description can be found in study of Inlek [6]. HB8 code of Paczynski uses results of SCH for making evolutionary stellar models. Methods have been developed to calculate opacities. We have constructed evolution for real star U Oph and derived age of system with different opacities. Recently Jin et al. [17] computed four sets of evolutionary models with convection and convective overshooting for massive stars over  $10 M_{\odot}$ . They investigated the properties of the convective cores and convective envelopes of massive stars. For the future study on stellar models with over  $10 M_{\odot}$  is planned.

## 2. Results and discussion

In our previous study, the opacity tables are tabulated for different metallicity for Paczynski [16] codes. Their effects on stellar radii are discussed [6]. In the present paper we have used OPAS tables in GOB program. The results of GOB are used by program SCH. The SCH program creates the zero-age main sequence model where nuclear reactions begin where hydrogen in the core turns into helium. The program HB8 uses the output of GOB and SCH. HB8 changes the hydrogen and helium composition according to the regional nuclear reaction rates and time steps and creates an evolved star model. In this study it is derived radii for low-middle mass star models by using old opacity tables of Cox&Stewart and the new OPAS opacity tables. The Table1 includes results for radii. The Cox&Stewart opacity tables include Rosseland mean opacities without allowance for electron conduction.

Table 1. GOB and SCH results for radii using OPAS tables

Parameter	Value						
$M_{\odot}$	0.6	0.8	1	1.2	2.5	5	10
RB(Cox&Stewart)	0.3742	0.4633	0.5524	0.6162	1.0310	1.7319	2.3612
RB(OPAS)	0.3814	0.4638	0.5463	0.6120	1.0394	1.7613	2.3708
ROB(Cox&Stewart)	0.5816	0.6112	0.6408	0.7114	1.1710	1.9760	3.3940
ROB(OPAS)	0.6401	0.6861	0.7321	0.8735	1.7930	2.518	3.5141

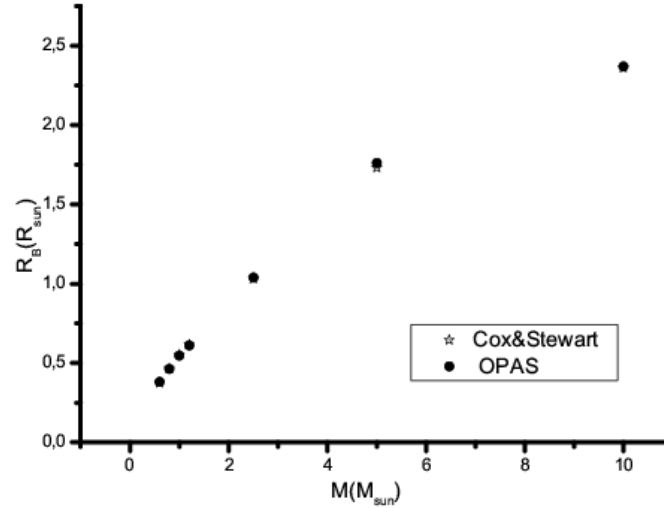


Figure1. Radii of GOB for different stellar models with opacity tables

Many years ago Schwarzschild [2] presented 2.5, 5, and 10 solar mass models at zero age. He also presented 0.6 and 1 solar mass models. In this study 0.6, 0.8, 1, 1.2, 2.5, 5 and 10 solar mass models.  $R_B$ , the base of atmosphere radius of GOB is calculated with old and new tables.  $R_B$  is the output of SCH. It is the boundary radius. Results are presented in Table1. It is clear that new tables give big radii than the old ones. OPAS tables give radii bigger than 2-5% the old tables. The new OPAS tables have greater effect on radius of massive stellar models than low mass models. Figure 1 presents the radii  $R_B$  against mass with different tables. In the Figure2, SCH output radii  $R_{OB}$  are shown. It is clearly seen that the effects of the new tables on  $R_{OB}$  radii are bigger for high mass models. Generally lower metallicity acts like lower opacity. This effect tends to make the star with a lower zero age radius. So this will tend to increase the age of the stars. For the very young stars - like U Oph -hydrogen was used by the first generation of stars and some of it was converted to heavier elements. Hydrogen contents will go down while the metals would increase. We have estimated the age of system U Oph with different opacity tables. The results are presented in Table2. The new tables give the 5-10% increase in the age of system U Oph compared to the old ones. Results of this study are useful for check the derived ages of observed binary stars.

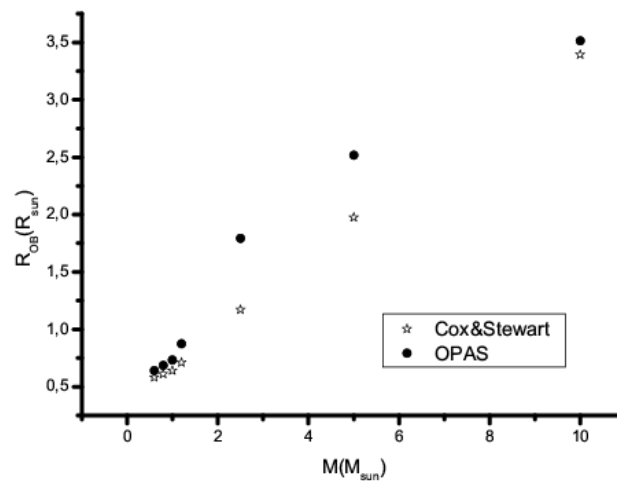


Figure2. Radii of SCH for different stellar models with opacity tables



Table2. Estimated Ages of U Oph with different opacities.

Cox&Stewart	26.145 My
Iglesias	26.895 My
Kurucz	28.615 My
Mondet	29.613 My

## References

- [1] Eddington, S.A., The Internal Constitution of the Stars, **Cambridge University Press**, Cambridge, (1926)
- [2] Schwarzschild, M., Structure and Evolution of the Stars, **Princeton University Press**, New Jersey, (1958).
- [3] Carson, T.R., Analytic formulae for Coulomb dipole transitions, **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**,75, 385-389, (1988).
- [4] Iglesias, C.A., Rogers, F.J., Updated Opal Opacities, **The Astrophysical Journal**, 464, 943-953, ( 1996).
- [5] Peter L. Smith, Claas Heise, Jim R. Esmond, Robert L. Kurucz <https://www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html>, (20.10.2019)
- [6] İnek, G., Opacity tables for using in Paczynski stellar modelling and their effects on stellar evolutions, **Journal of Balikesir University Institute of Science and Technology**, 21(2), 578-589, (2019).
- [7] Allard, F., <https://opalopacity.llnl.gov/existing.html>, (20.10.2020).
- [8] Weiss, A., <https://opalopacity.llnl.gov/existing.html>, (20.10.2020).
- [9] Rogers, F.J.& Iglesias, C. A., Radiative atomic Rosseland mean opacity tables, **The Astrophysical Journal Supplement Series**, 79, 507-568, (1992).
- [10] Cox, A.N., Stewart, J.N., Effects of Bound-Bound Absorption on Stellar Opacities, **Astrophysical Journal**, 67,113, (1962).
- [11] Cox, A.N., Stewart, J.N., Radiative and conductive opacities for eleven Astrophysical mixtures, **The Astrophysical Journal Supplement Series**, 11, 22, (1965).
- [12] Cox, A.N., Stewart, J.N., Rosseland Opacity Tables for Population II Compositions, **The Astrophysical Journal Supplement Series**, 19, 261, (1970).
- [13] İnek, G., Boke, A., Yılmaz, O., Budding, E., Effects of Opacity on Stellar Radii and Their Relevance to Observational Data, **Turkish Journal of Physics**, 32, 65-77, ( 2008).
- [14] Sanyal, D., Langer, N., Szecsi, D., Yoon, S.C. and Grassitelli, L., Metallicity dependence of envelope inflation in massive stars, **Astronomy and Astrophysics**, 597, A71, ( 2017).
- [15] Mondet, G., Blancard, C., Cosse, P., Faussurier,G., Opacity Calculations for Solar Mixtures, **The Astrophysical Journal Supplement Series**, 220, 2, (2015).
- [16] Paczynski,B., **Acta Astronomica**, 2, 20, (1970).
- [17] Jin, J., Zhu, C., Lü, G., Convection and convective overshooting in stars more massive than 10  $M_{\odot}$ , **Publication of the Astronomical Society of Japan**, 817, 116, (2015).

# Lif takviyeli pirinç kabuğu külü ikameli beyaz çimentolu harçların bazı mekanik özelliklerinin incelenmesi

Yurdakul AYGÖRMEZ\*

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fak. İnşaat Müh. Böl., Davutpaşa kampüsü, İstanbul

Geliş Tarihi (Received Date): 22.10.2020  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.12.2020

## Öz

Bu çalışmada Beyaz Çimento (PC CEM I 52.5 R) ile pirinç kabuğu külünün ikamesi (ağırlıkça %5, %15 ve %25 oranında) araştırılmıştır. Bu şekilde CO<sub>2</sub> salınımı azaltılması ve maliyetin düşürülmesi amaçlanırken mekanik özellikler de araştırılmıştır. Ayrıca en yüksek dayanıma sahip %15 oranında pirinç kabuğu külü ikameli çimento harçlarında polivinil alkol (PVA) ve bazalt (B) lifleri hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranında kullanılmıştır. Bu şekilde üretilen 10 serinin 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı sonuçları incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisini görmek için 200, 400 ve 600 °C sıcaklıklar uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası basınç ve eğilme dayanımı ve ağırlık kayıpları bulunurken oluşan görsel durum incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası Mikro Bilgisayarlı Tomografi (Micro-CT) analizleri yapılmıştır. 7 ve 28 günlük sonuçlar incelendiğinde %15 oranında pirinç kabuğu külü ikamesine kadar dayanım artışı görülmüştür. Puzolanik özellik gösteren pirinç kabuğu külü bu oranda kullanılmasıyla çimentolu sistemlerde oluşturduğu fiziko-kimyasal etkisi sebebi ile dayanım özellikleri üzerinde artış oluşturmaktadır. Yüksek SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranına (%81.27) sahip puzolan içeren çimento harcında uzun dönemli dayanım da artış göstermektedir. Kısa dönemde ise doğal puzolanın özgül yüzey alanı (incelik) dayanım açısında birinci derecede etkili olmaktadır. Daha yüksek oranda kullanılmasıyla ise işlenebilirliğin düşmesi mekanik özellikleri azaltmıştır. Liflerin kullanılmasıyla eğilme dayanımında sürekli artış olmuştur. Basınç dayanımı sonuçları ise %1 oranına kadar artış gösterirken daha yüksek oranda kümelenme nedeniyle azalış olmuştur. Yüksek sıcaklıklardan sonra tahribatlar nedeniyle dayanım değerlerinde düşüş oluşmuş fakat kayıplara rağmen çimento harçları stabilitesini korumuştur.

**Anahtar kelimeler:** Beyaz çimento, pirinç kabuğu külü, PVA lifi, bazalt lifi, yüksek sıcaklık, micro-CT.

\* Yurdakul AYGÖRMEZ, aygormez@yildiz.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-7405-2450>

## Investigation of some mechanical properties of fiber-reinforced rice husk ash substituted white cement mortars

### Abstract

*In this study, the substitution of rice husk ash (5%, 15% and 25% by weight) with White Cement (PC CEM I 52.5 R) was investigated. In this way, it is aimed to reduce CO<sub>2</sub> emission and decrease the cost, while the mechanical properties have also been investigated. In addition, polyvinyl alcohol (PVA) and basalt (B) fibers were used at the rate of 0.5%, 1% and 1.5% by volume in the cement mortar with 15% rice husk ash substitution, which has the highest strength. The 7 and 28 days compressive and flexural strength results of 10 series produced in this way were examined. In addition, temperatures of 200, 400 and 600 °C were applied to see the high temperature effect. While determining the compressive and flexural strengths and weight loss after high temperature, the resulting visual situation was examined. In addition, Micro-Computed Tomography (Micro-CT) analyzes were performed before and after high temperature. When the results of 7 and 28 days were examined, an increase in strength was observed up to 15% rice husk ash substitution. The use of pozzolanic rice husk ash at this rate increases the strength properties due to the physico-chemical effect it creates in cement systems. Long-term strength also increases in cement mortar containing pozzolan with high SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio (81.27%). In the short term, the specific surface area (fineness) of the natural pozzolan is primarily effective in terms of strength. With a higher rate of use, the decrease in workability decreased the mechanical properties. There has been a continuous increase in flexural strength with the use of fibers. While the compressive strength results increased by up to 1%, there was a decrease due to higher rate of clustering. After high temperatures, there was a decrease in the strength values due to destructions, but the cement mortar stability was preserved despite the losses.*

**Keywords:** *White cement, rice husk ash, PVA fiber, basalt fiber, high-temperature, micro-CT.*

### 1. Giriş

Beton, dünyadaki her insan için yılda bir metreküpten fazla olmak üzere dünyada en çok üretilen malzemedir [1]. Tipik bir beton, esasen trikalsiyum silikat ve dikalsiyum silikat fazlarından (sırasıyla alit ve belit olarak bilinir) oluşan hidratlı Geleneksel Portland Çimentosuyla (GPÇ) beraber kabaca hacimce %70 agrega içerir [2]. Suya maruz kaldıklarında kalsiyum silikatlar, betondaki basınç dayanımının kaynağı olan kohezif bir faz olan kalsiyum hidroksit ve kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli oluşturur [3-4]. Beyaz Çimento aynı zamanda bir Portland Çimentosudur ve üretim süreci normal (ASTM Tip I veya II) gri çimentoya oldukça benzerdir ve renk hariç, esasen gri çimento ile aynı özelliklere sahiptir. Bu durum, çimentoya gri rengini veren maddeler olan ihmal edilebilir miktarlarda demir oksit (ağırlıkça yüzde 0,5'ten fazla olmayan) ve mangan oksit içeren hammaddelerin dikkatli bir şekilde seçilmesiyle elde edilir. Gerekli alümina içeriğini elde etmek için genellikle boksit (alüminyum oksit) gereklidir. Demir oksit, yanma işleminde bir akı görevi gördüğünden, Beyaz Çimento üretim sürecinde bu işlevi yerine getirmek için bazen sodyum alüminyum florür eklenir. Ayrıca, kömür külü ile kirlenmeyi önlemek için yakma sürecinde pülverize kömürün

yerine genellikle yağ yakıtı kullanılır. Çimento klinkerinin öğütülmesi sürecinde demir kirletmesini önlemek için özel bilyalı değirmenler kullanılmalıdır [5]. Özellikle mimari beton uygulamaları açısından vazgeçilmez sayılan Beyaz Portland Çimentosu, yüksek saflıkta hammaddeden üretildiği için minimum %85 beyazlığa sahiptir. Beyaz çimentonun uygulamaları arasında prekast perde duvarlar ve cephe panelleri, dökme mozaik yüzeyler, sıva, çimento boyası, fayans harcı ve dekoratif beton bulunmaktadır. Renklendirici pigmentler ile başarılı karışımların hazırlanmasını sağlar. Ayrıca uygun formların kullanılmasıyla yüksek incelikte istenilen beton yüzeyler elde edilebilir. Daha yüksek hammadde maliyeti ve üretim prosedürlerindeki değişiklikler, Beyaz Çimentonun fiyatını Geleneksel Portland Çimentosunun fiyatından önemli ölçüde daha yüksek yapmaktadır [6]. Ayrıca çimento kullanımı ile sera gazı emisyonu önemli ölçüde artmaktadır. Bu şekilde oluşan emisyonların önümüzdeki yıllarda artacağı bir gerçektir. Böylelikle küresel ısınma endeksleri de etkilenmektedir. Bu durumda ileride inşaat alanında yoğun beton kullanımı, sürdürülebilirlik ile ilgili adımların atılmasını gerekli kılmaktadır. Sürdürülebilirlik kavramının sağlanması için betonda farklı yan ürünlerin kullanılması önemli bir avantaj sağlar ve çevresel olumsuz etkileri azaltır [7-8].

Yüksek reaktif ve amorf silika içeren pirinç kabuğu külü çimento yerine puzolanik malzeme olarak kullanılma potansiyeli büyük olan yan ürünlerden biri olarak kabul edilmektedir. Pirinç kabuğu külü, pirinç kabuğunun kontrollü sıcaklıklarda yakılmasıyla üretilir ve Portland Çimentosuna benzer veya daha ince partiküller halinde toz haline getirilir. Üretilen küllerin kalitesi pirinç kabuğuna uygulanan öğütme ve çapaklama işlemine bağlıdır. Yıllar boyunca pirinç kabuğu külü, inşaat sektörü de dahil olmak üzere birçok alanda birçok uygulamada kullanılmıştır. Bazı araştırma sonuçları, Portland Çimentosunun kısmi ikamesi olarak %10'a kadar pirinç kabuğu külü kullanılmasının, betonda maksimum mukavemet kazanımına [9-13] ve hidroklorik ve sülfürik asit saldırılarına karşı direnci artırmasına [14-15] yol açtığını ortaya koymuştur. Bu arada, Van ve ark. [16], Portland Çimentosunun pirinç kabuğu külü ile değiştirilme yüzdesi arttıkça, kuruma ve kendiliğinden oluşan büzülme gerilemelerinin yanı sıra karbonatlaşma derinliğinin de arttığını göstermiştir. Çok ince parçacıklara öğütülürse, pirinç kabuğu külü priz süresini kısaltır ve kontrol karışımına kıyasla çimentonun mikro yapısını yoğunlaştırır [17-18].

Bazalt ve Polivinil Alkol (PVA), lif takviyeli beton araştırmalarında kullanılmıştır. Beton ve harç örneklerinde polivinil alkol (PVA) ve bazalt liflerinin etkisi incelendiğinde, mekanik özelliklerde pozitif bir artış ürettikleri görülmüştür [19]. Yapılan çalışmalara göre bazalt, çimento hamuruyla daha iyi bir kimyasal bağ kurar ve çatlama mukavemetini artırırken, PVA daha iyi lif köprüleme kapasitesine sahiptir ve daha iyi çatlak sonrası davranış gösterir [20]. Bazalt lifi, normal dayanımlı betonda hem basınç hem de eğilme dayanımını artırır [21]. Bazalt lifi, lif içeriği ve uzunluğundaki artışla tokluk indeksini, eğilme ve çekme mukavemetini artırırken [22], yüksek mukavemetli betonda basınç mukavemeti önemli ölçüde artırmaz [23]. PVA lifi kullanılması durumunda, lif miktarındaki artışla birlikte basınç dayanımı ve elastisite modülü azalır ancak yarmada çekme dayanımı artar [24]. Noushini, Samali ve Vessalas [25], farklı lif içeriği, uzunluğu ve en-boy oranı olan PVA lif takviyeli betonu araştırmıştır. Sonuçlar, PVA lifinin tokluğu ve eğilme dayanımını artırdığını göstermiştir. Annam [26] ayrıca PVA'nın basınç dayanımını azalttığını ancak yarmada çekme dayanımını artırdığı sonucuna varmıştır.

Farklı doku ve renk özellikleri taşıyan çimentolu kompozitlerin üretiminde ve özellikle mimari beton üretiminde kullanım potansiyeline sahip yüksek dayanımlı Beyaz Çimento'ya yoğun ihtiyaç duyulmaktadır. Portland Çimento yerine ikame malzemelerin kullanıldığı çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak Beyaz Çimento (PC CEM I 52.5 R) kullanılmıştır. Beyaz Çimento kullanımına ek olarak, ikame olarak pirinç kabuğu külü kullanılmış ve maliyet, çevre ve mukavemet açısından optimum karışım araştırılmıştır. Bu sayede çimento teknolojisindeki ilerlemeler ile üretimine başlanan yüksek dayanımlı Beyaz Çimentolu kompozitlerde pirinç kabuğu külünün kullanımı ile mekanik ve durabilite özelliklerinin etkisi araştırılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada pirinç kabuğu külü ağırlıkça üç farklı oranda (%5, %15 ve %25) ikame edilmiştir. Ayrıca en yüksek dayanıma sahip numunede üç farklı oranda (hacimce %0.5, %1 ve %1.5) PVA ve bazalt lifi kullanılmıştır. İlk karışım %100 Beyaz Çimento ile üretilen kontrol karışımı olmak üzere toplam 10 seri hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Aynı zamanda hazırlanan 10 serinin yüksek sıcaklık etkisi karşısında davranışını görmek için 200, 400 ve 600 °C yüksek sıcaklıklar uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık testinden sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ağırlık kaybı sonuçları incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisiyle görsel inceleme ve Micro-CT analizi yapılmıştır.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Malzemeler

Bu çalışmada PC CEM I 52.5 R tipi yüksek performanslı çimento kullanılmıştır. Çimento, Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Özgül ağırlık, başlangıç priz süresi ve bitiş priz süresi sırasıyla 3.06, 100 dakika ve 130 dakikadır. Spesifik yüzey alanı (Blaine) 4600 cm<sup>2</sup>/gr'dır. Çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Beyaz Çimento BÇ kısaltması ile ifade edilmiştir. Pirinç kabuğu külü, Yetiş Çeltik Fabrikası'ndan (Trakya-İpsala) temin edilmiştir. Spesifik yüzey alanı (Blaine) 6710 cm<sup>2</sup>/gr'dır. Pirinç kabuklarının fabrikada özel olarak tasarlanmış fırında 900°C sıcaklıkta yakılmasıyla pirinç kabuğu külü üretilir. Pirinç kabuğu, Türkiye'nin hemen hemen her yerinde üretilen çeltik kabuklarından üretilmektedir. Pirinç kabuğu külünün de kimyasal özellikleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Beyaz Çimentonun kimyasal bileşimi.

Malzeme	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO	K.K.
BÇ	21.60	4.05	0.26	0.35	65.7	1.30	0.35	0.30	3.30	1.60	3.20

Tablo 2. Pirinç Kabuğu Külünün kimyasal bileşimi.

Malzeme	Nem	Kül	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Karbon
Pirinç Kabuğu Külü	0.8	88.0	80.8	0.43	1.94	0.95	0.47	6.58

Tablo 2 incelendiğinde oksit bileşenlerin numunede %84.6 oranında olduğu görülürken numunenin kül içeriği %88'e karşılık gelmektedir. Bu durum 900°C'de yakılma işleminden dolayı silis miktarının bir kısmında kristalleşme oluşmasından kaynaklanmaktadır. Detaylı kül analizi yapılması durumunda yaklaşık %4.0 diğer oksitler, %84.0 silis, %0.8 nem ve %11.2 oranında yanmamış karbon içeriği görülmektedir [27]. Bu çalışmada iki farklı lif (Polivinil alkol ve bazalt) kullanılmıştır. PVA ve B, sırasıyla polivinil alkol ve bazalt liflerinin kısaltmaları olarak kullanılmıştır. Liflerin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, agrega olarak Trakya Limak Çimento Fabrikasından temin edilen standart kum (BS EN 196-1'e uygun) kullanılmıştır.

Tablo 3. Liflerin özellikleri.

Lif Tipi	Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı (MPa)
PVA	8	39	1.30	1620
B	12	20	2.73	4100

## 2.2. Harç üretimi

Karışım hazırlanırken önce kuru karışım hazırlanmıştır. Kuru karışım için bağlayıcı malzemeler ve agregalar karıştırılmıştır. Standart kum/bağlayıcı oranı 2.75:1 olarak belirlenmiştir. Kuru karışım, bir mikser matkap kullanılarak 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Su/bağlayıcı oranı tüm karışımlarda 0,5 sabit oranında kullanılmıştır. Kuru karışıma su ilave edildikten sonra karıştırmaya 3 dakika daha devam edilmiştir. Daha sonra hazırlanan karışım kalıplara yerleştirilmiş ve vibrasyon uygulanmıştır. Harç numuneleri için 40x40x160 mm boyutunda prizma ve 50x50x50 mm boyutunda küp kalıplar kullanılmıştır. Toplam 10 seri hazırlanmış ve ilk seride sadece Beyaz Çimento ve standart kum kullanılmıştır. 2., 3. ve 4. seride sırasıyla pirinç kabuğu külü ağırlıkça %5, %15 ve %25 oranında katılmıştır. Diğer serilerde ise 3. Seriyeye PVA ve B lifleri sırasıyla %0.5, %1 ve %1.5 hacim oranında katılmıştır. Hazırlanan karışımların detayları Tablo 4'te verilmiştir. Dökümden sonra numuneler laboratuvar koşullarında [23±2 °C sıcaklık ve %50±4 bağıl nem] 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra 28 gün suda kür yapılmıştır.

Tablo 4. Numunelerin karıştırma yüzdeleri (%).

Karışım Serileri	Beyaz Çimento	Pirinç Kabuğu Külü	PVA	B
Kontrol (1)	100	0	-	-
PK5 (2)	95	5	-	-
PK15 (3)	85	15	-	-
PK25 (4)	75	25	-	-
0.5PVA (5)	85	15	0.5	-
1PVA (6)	85	15	1	-
1.5PVA (7)	85	15	1.5	-
0.5B (8)	85	15	-	0.5
1B (9)	85	15	-	1
1.5B (10)	85	15	-	1.5

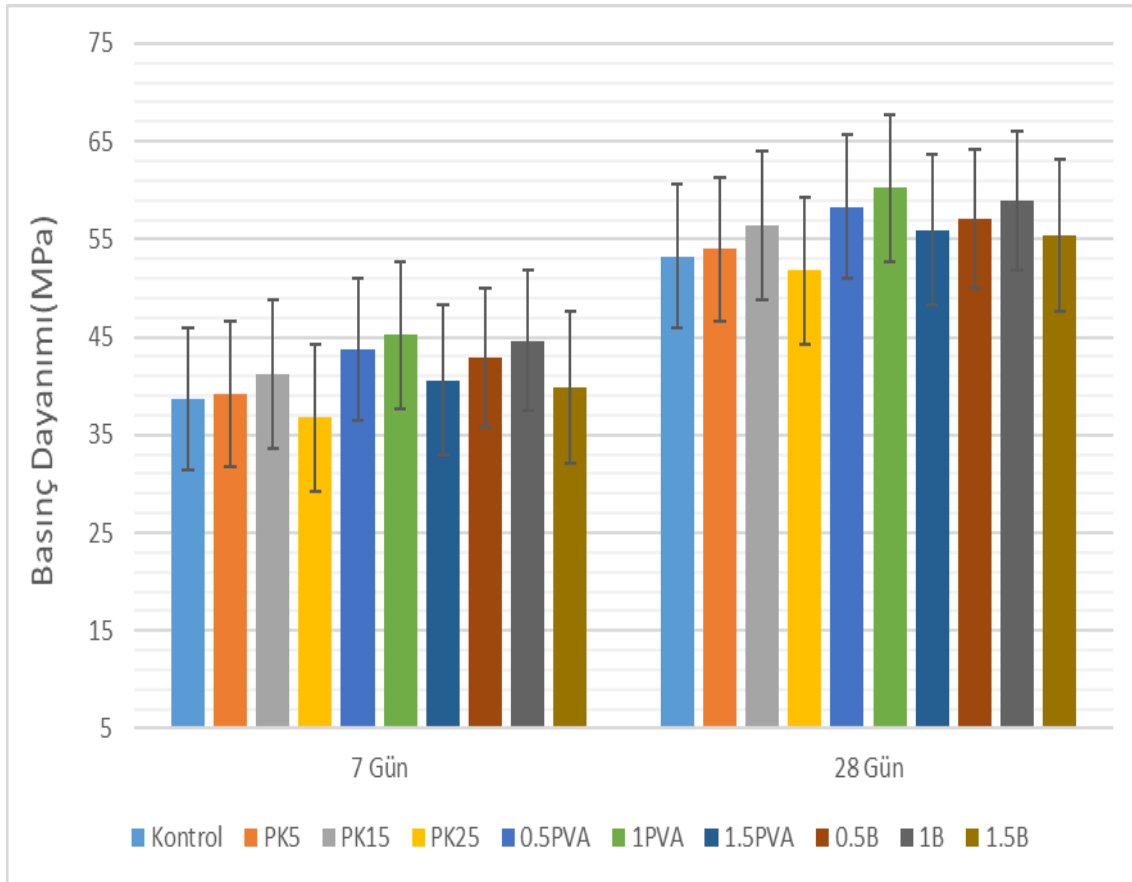
### 2.3. Test yöntemi

Numunelerin ilk olarak 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarına bakılmıştır. Basınç dayanımı için 50x50x50 mm'lik küp numuneler kullanılırken, eğilme dayanımı için 40x40x160 mm'lik prizma numuneleri kullanılmıştır. Basınç dayanımı testi ASTM C 109'e göre [28] yapılırken eğilme dayanımı testi ASTM C 348'e göre [29] yapılmıştır. Her test için üçer numune hazırlanmış olup sonuç için üç numunenin ortalaması alınmıştır. 28 günün sonunda numunelere 200, 400, ve 600 °C sıcaklıklar uygulanmıştır. Numuneler, yüksek sıcaklıktan önce 105°C'de 1 gün tutulmuştur. Yüksek sıcaklık fırınının sıcaklık artış hızı 5°C/dakika olarak ayarlanmıştır. Hedef sıcaklığa ulaştıktan sonra numuneler bu sıcaklıkta 1 saat tutulmuştur. Numuneler test sonrası ani şoktan kurtulmak için bir süre kapağı açık olarak fırında bekletilmiştir. Yüksek sıcaklıktan önce ve sonra numunelerde ağırlık kaybı bulunmuştur. Ayrıca yüksek sıcaklık testinden sonra basınç ve eğilme sonuçları bulunmuştur. Test sonrasında numunelerin görsel incelemesi ve Micro-CT analizi de yapılmıştır.

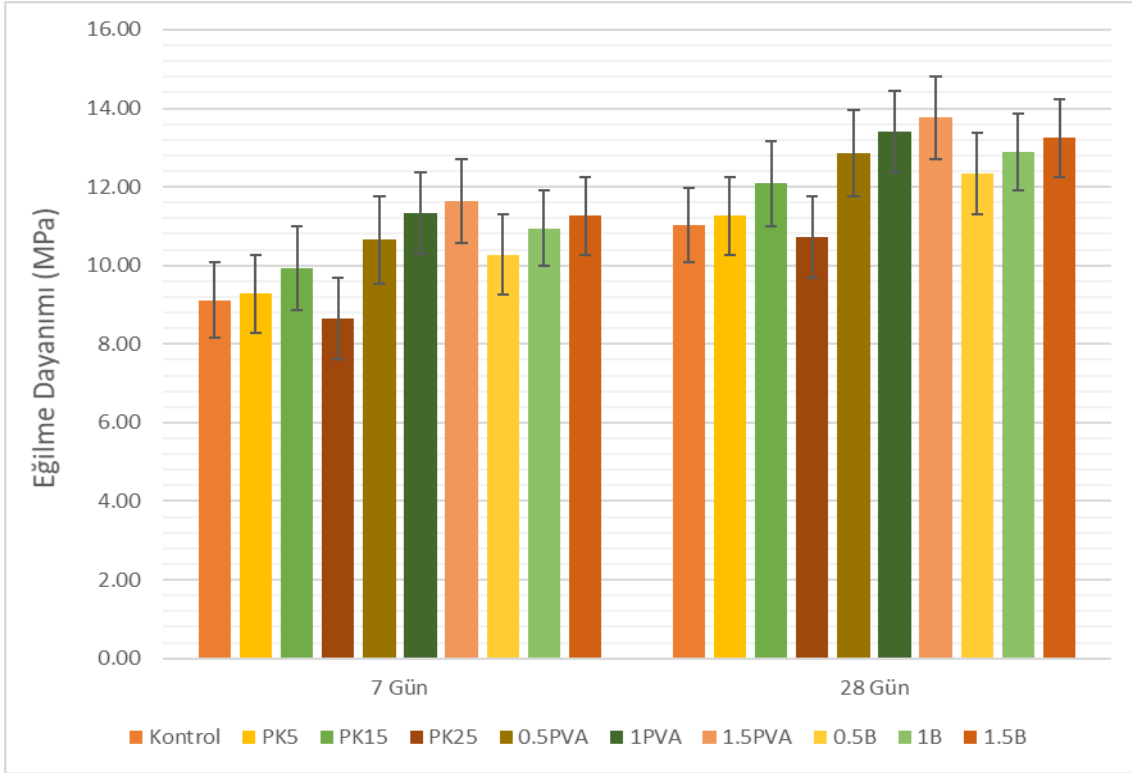
## 3. Sonuçlar ve tartışma

### 3.1. Dayanım Sonuçları

Bu çalışmada hazırlanan 10 serinin 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları Şekil 1-2'de gösterilmektedir. Çalışmada kontrol karışımına göre üç farklı oranda pirinç kabuğu külü kullanılması durumunda %5 ve %15 oranlarında kontrol karışımına göre dayanım artışı görülmüştür.



Şekil 1. Basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 2. Eğilme dayanımı sonuçları.

Bunun nedeni, pirinç kabuğu külünün daha yüksek inceliğinin  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyonu artırarak daha fazla kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) üretilmesini sağlaması ve buna ek olarak daha yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanan ince pirinç kabuğu külü partiküllerinin mikro dolgu olarak hareket ederek ve çimento hamurunun gözenek yapısını güçlendirerek dayanım gelişimine katkı sağlamasıdır [30]. %5 ikame kullanıldığında mevcut olan pirinç kabuğu külü miktarının dayanımı önemli ölçüde artırmak için yeterli olmadığı fark edilmiştir. %5 pirinç kabuğu külü ilavesinden elde edilen mevcut silika, hidrasyon işleminden salınan C-H'nin sadece küçük bir kısmı ile reaksiyona girmiş ve bu nedenle, puzolanik reaksiyondan salınan C-S-H nispeten sınırlı olmuştur [31]. Dayanım, %15 ikame oranında daha yüksek olmuştur. Bu durum, pirinç kabuğu külünden gelen mevcut silikanın puzolanik reaksiyonu ve hidrasyon işleminden elde edilebilen CH miktarı ve ayrıca ince pirinç kabuğu külünden dolayı mikro-dolgu etkisinden kaynaklanmaktadır [32]. Pirinç kabuğu külü, Beyaz Çimentonun %25'i oranında değiştirildiğinde, basınç dayanımı kontrol karışımına göre daha düşük olmuştur. Bu durum artan oranla beraber işlenebilirliğin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca pirinç kabuğu külü ikame seviyesinin artırılması ile dayanımdaki azalma, çimento miktarındaki azalmadan kaynaklanmaktadır ve bunun bir sonucu olarak, hidrasyon işlemi nedeniyle açığa çıkan CH miktarı, ikameden elde edilen mevcut tüm silika ile reaksiyona girmek için yeterli değildir. Pirinç kabuğu ve dolayısıyla silika, inert malzeme olarak hareket ederek dayanım gelişimine katkıda bulunmamaktadır [33]. Lifsiz serilerde 7 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek sonuç 41.23 MPa ile PK15'te elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek sonuç yine PK15'te 56.39 MPa olarak elde edilmiştir. 7 ve 28 günün sonunda en düşük basınç dayanımı sonuçları PK25'te sırasıyla 36.81 MPa ve 51.84 MPa olarak elde edilmiştir. Yine lifsiz serilerde 7 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek sonuç 9.94 MPa ile

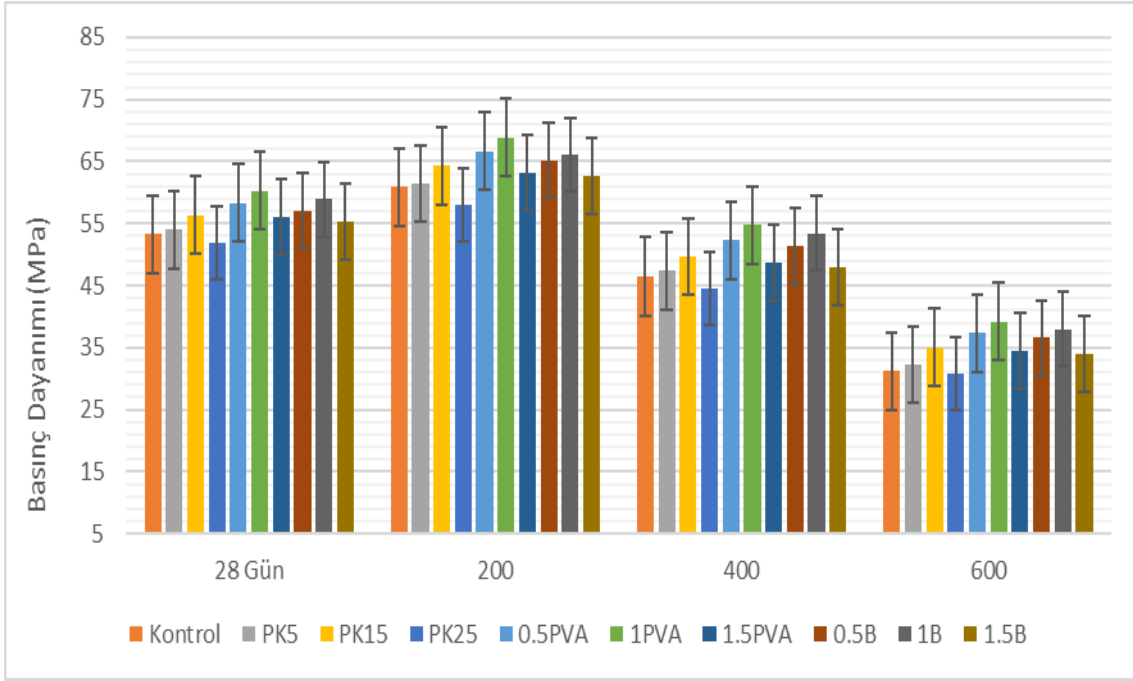


PK15'te elde edilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek sonuç yine PK15'te 12.08 MPa olarak elde edilmiştir. 7 ve 28 günün sonunda en düşük eğilme dayanımı sonuçları PK25'te sırasıyla 8.65 MPa ve 10.72 MPa olarak elde edilmiştir.

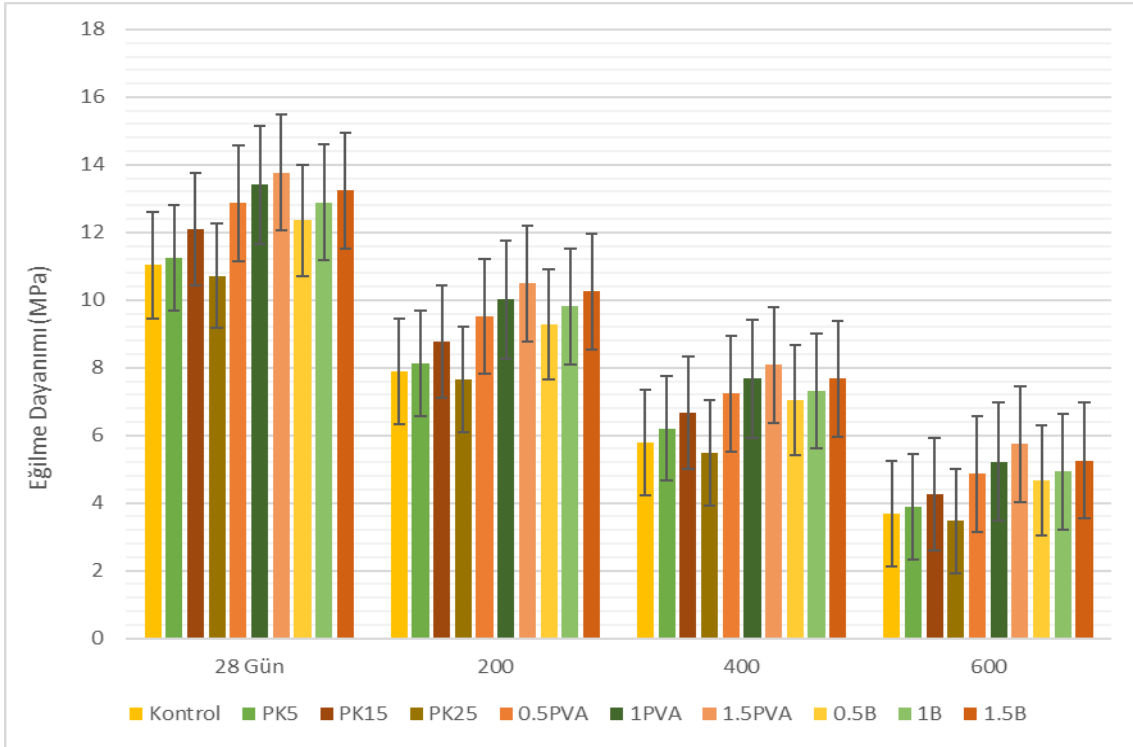
Lif katkı maddesinin basınç dayanımı sonuçlarını %1 oranında kullanılması durumunda arttırdığı, %1.5 oranında kullanılması durumunda ise basınç dayanımı sonuçlarını düşürdüğü görülmüştür. Buradaki basınç dayanımındaki artış, esas olarak liflerin ilerleyen çatlaklarla etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Basınç yükü arttıkça yanal gerilim artar ve böylece çatlaklar ilerlemeye başlar. İlerleyen çatlak, takip ettiği yola dik çekme gerilmeleri ile bir life yaklaşırken matris-lif arayüzünde sıyrılma oluşturur. İlerleyen çatlak arayüze ulaştığında, lif, mevcut lif sıyrılması nedeniyle bir kütleştirme süreciyle karşılaşmıştır. Kütleştirme işlemi sayesinde çatlak ucundaki gerilme konsantrasyonu azaltılır ve çatlağın ilerlemesi engellenir ve hatta yolu değiştirilir. Çatlağın bu şekilde kütleştirilmesi, bloke edilmesi ve daha fazla sapıtılması, harç numunelerinin ilave basınç yüküne dayanmasına ve böylece lif olmayan numunelere kıyasla basınç dayanımının artmasına izin vermiştir. Ayrıca, bu liflerin karışım suyu içinde uygun bir şekilde dağıldığı ve kendilerini daha iyi dağıtabildikleri ve böylece basınç dayanımını artırdıkları düşünülmektedir. Yani, polimerik lifler matris içinde iyi dağıldığından, uygulanan gerilmelerin taşınmasına yardımcı olurlar. Böylece, lifler ve harçlar, lif-matris arayüzündeki gerilme aktarım mekanizmasıyla gelen basınç yükünü dağıtabilir. Diğer bir olasılık da, bu liflerin kompozitlerin plastisitesini artırarak gerilme altında kırılmadan akmalarıdır [34]. PVA ve bazalt liflerinin, sistematik olarak performansı arttırdığı görülmüştür. Lifli malzemelerde kristal fazların ince dağılımı ve homojen yapısı, mekanik özelliklerde iyileşmeyi arttırmıştır.  $P_2O_5$ ,  $TiO_2$  veya  $ZrO_2$  gibi çekirdekleştirici bir ajanın eklenmesi mikro yapıyı güçlendirmiştir. Ayrıca bazalt lifleri, bazaltik kayaların erimesi sırasında kendiliğinden  $Fe_3O_4$  gibi doğal bir çekirdek oluşturucu üreterek önemli bir avantaj sağlamıştır [35]. Sonuçlar incelendiğinde, PVA lifleri, çimento matrisiyle iyi bağlanmaları ve daha yüksek çekme dayanımı özellikleri nedeniyle B liflerinden daha iyi yapısal performans sağladığı görülmüştür. Bu çalışma, PVA liflerinin mukavemeti bazalt liflere göre daha fazla arttırdığı önceki çalışmalarla uyumludur [36-37]. Liflerin kullanım oranı %1.5 olunca basınç dayanımı azalmıştır. Bu azalmanın nedenleri, liflerin düşük yoğunluğu ve kümelenmesidir. Bu, basınç dayanımında bir azalmaya neden olur. Ayrıca kümelenme ile işlenebilirliğin azaldığı gözlenmiştir [38]. Kompozitlere liflerin eklenmesi çatlakların durma yeteneğini, yani çatlama direncini önemli ölçüde artırır ve mikro çatlakların makroskopik seviyesini geciktirir [36]. Çatlak yüzeyini geçen lif sayısındaki artış, çatlak ilerlemesini azalttığı için harcın eğilme dayanımının artmasının en önemli nedenlerinden biridir. Yükleme sırasında, mikro çatlaklar birbirine bağlanır ve daha büyük çatlaklar oluşturur, lifler ise kırılma yüzeyinin her iki tarafını birbirine bağlar ve köprü görevi görür ve pik yükü artırır. Bu durum, pik yükten sonra yük taşıma kapasitesinde bir gelişme ve eğilme tokluğunda bir artış anlamına gelir. Lif içeriği oranı ne kadar yüksekse, çatlama sonrası tepkideki artış o kadar büyük olur. Bu nedenlerle, lif oranı arttıkça, eğilme dayanımı sonuçları artmıştır [39]. Liflerin yüksek elastisite modülü, matris ile daha iyi bir bağlanma derecesi ve çatlak sonrası süneklik sağlamıştır. Bu durum literatür ile uyumludur [40].

### 3.2. Yüksek sıcaklık testi

28 gün sonunda yapılan yüksek sıcaklık testi sonrası basınç ve eğilme dayanımı sonuçları Şekil 3-4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 4. Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı sonuçları.

200°C sıcaklık sonrası basınç dayanımında artış görülmüştür. Bu durumda temel neden C-S-H yapısında bozulma olmayan matriste kuruma büzülmesi oluşmasıdır. Bu büzülme etkisiyle aderansın geliştiği ve etki eden gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Ayrıca van der Waals kuvvetlerinde artışla kılcal gözeneklerin daha yakınlaşması da bu durumu artırır. Dayanım artışını sağlayan diğer durum da hidratlanmamış çimento

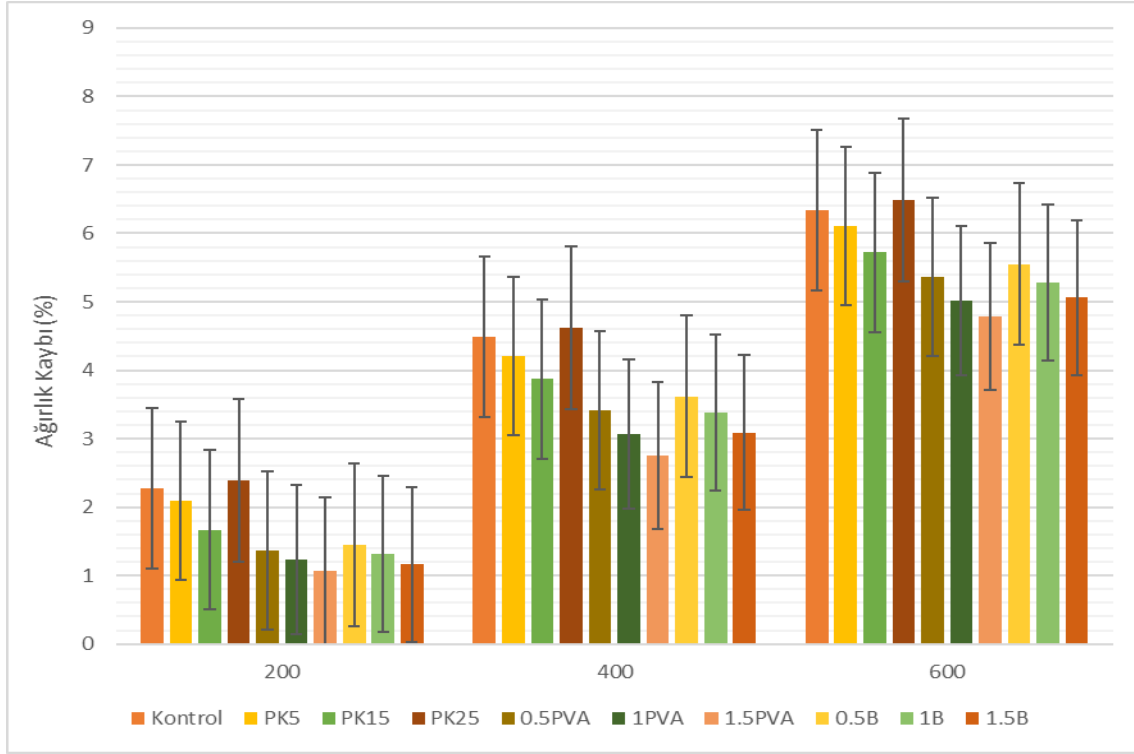
parçacıklarının hidratasyonu ile oluşur. Sıcaklık artışı hidratasyonu hızlandırarak kürün devamına katkı sağlar [41]. Basınç dayanımında oluşan bu duruma karşı eğilme dayanımında sürekli bir azalış görülür. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan harçların eğilme dayanımının basınç dayanımına kıyasla daha fazla etkilendiği görülmüştür. Bu davranış, eğilme deneylerinde oluşan çekme gerilmelerinin basınç gerilmelerine kıyasla kusurları, diğer bir deyişle yüksek sıcaklıklarda oluşan mikro çatlakları daha belirgin göstermesine bağlanabilir [42].

Kılcal gözeneklerde bulunan su 100°C'den sonra dışarı çıkmaya başlar. Hidratlardaki yapısal su ve jelde adsorbe sular 250-300 °C'den sonra buharlaşmaya başlar. Harçta oluşan büzülme bu sıcaklıklardan sonra önemli seviyelerine çıkar. Yapıdan çıkan sular gözeneklerde buhar basıncı oluşumunu tetikler. Ayrıca nem içeriğinin artması da bu durumu artırır. Yine bu sıcaklıklardan itibaren demir ve alümina oksit bileşenlerinde susuzluk başlar. 400°C sıcaklık sonrası Ca(OH)<sub>2</sub>'den CaO'ya dönüşümler artar ve 600°C sonrası C-S-H yapısında tahribatlar oluşur. Hasar mekanizması ile önemli dayanım kayıpları olmuştur [43].

Sonuçlar incelendiğinde yüksek sıcaklık öncesi duruma benzer koşullar oluşmuştur. Sadece Beyaz Çimento kullanılan harç numunesine göre %5 ve %15 oranlarında pirinç kabuğu külü kullanılması durumunda dayanım sonuçları artarken %25 oranda pirinç kabuğu külü kullanılması durumunda sonuçlar daha düşük çıkmıştır. Bu durumda pirinç kabuğu külünün ince taneli olması rol oynamıştır. Bu şekilde yüksek sıcaklık testi öncesi Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyonun artması ile daha fazla kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) üretilmesi test sonrası daha üstün performansı desteklemiştir [30]. %25 oranında işlenebilirliğin düşmesi de sonuçları olumsuz yönde etkilemiştir [33]. Lifsiz serilerde en yüksek basınç dayanımı sonuçları PK15'te 200°C sonrası 64.32 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası sırasıyla 49.71 MPa ve 35.06 MPa olmuştur. PK25'te ise basınç dayanımı sonuçları 200°C sonrası 57.97 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası sırasıyla 44.52 MPa ve 30.84 MPa olmuştur. Yine en yüksek eğilme dayanımı sonuçları PK15'te 200°C sonrası 8.78 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası sırasıyla 6.66 MPa ve 4.25 MPa olmuştur. PK25'te ise eğilme dayanımı sonuçları 200°C sonrası 7.65 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası sırasıyla 5.48 MPa ve 3.47 MPa olmuştur.

Çimentolu kompozit malzemelere lif eklemesindeki ana faktör, eğilme dayanımında daha yüksek sonuçlar elde etmek ve eğilme tokluğunu arttırmaktır [44]. Polimer liflerin kompozit yapıyı güçlendirmek için kullanıldığı ve bu şekilde kullanılan liflerin eğilme dayanımını ve tokluğunu artırdığı kanıtlanmıştır [45-46]. PVA ve bazalt liflerin mekanik bütünlüğü, yüksek sıcaklık etkisi altında belli bir dereceye kadar korunur. Lifli malzemeler, kristal fazları, homojenlikleri ve ince dağılımları nedeniyle mekanik özellikler üzerinde iyi bir etkiye sahiptir [36]. Lif katkı maddesinin eğilme mukavemeti sonuçlarını yüksek sıcaklık sonrası arttırdığı bulunmuştur. Ancak basınç dayanımı sonuçları, %1.5 lif kullanımında bir azalma göstermiştir. Lif katkı oranı arttıkça çimento matrisi ile lifler arasındaki bağların zayıfladığı ve matrisin olumsuz etkilendiği gözlenmiştir [47-48]. Bu durumun gözenek özelliklerini ve işlenebilirliği olumsuz etkilediği bulunmuştur. Bu duruma bağlı olarak basınç dayanımı kaybı olduğu düşünülmektedir. Lifli serilerde en yüksek basınç dayanımı sonucu 1PVA'da olurken en düşük basınç dayanımı sonucu 1.5B'de olmuştur. Lifli serilerde en yüksek eğilme dayanımı sonucu 1.5PVA'da olurken en düşük eğilme dayanımı sonucu 0.5B'de olmuştur. 1PVA'da 200°C sonrası 68.83 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası

sırasıyla 54.76 MPa ve 39.24 MPa olmuştur. 1.5B’de ise basınç dayanımı sonuçları 200°C sonrası 62.59 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası sırasıyla 47.94 MPa ve 33.87 MPa olmuştur. 1.5PVA’da 200°C sonrası 10.49 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası sırasıyla 8.09 MPa ve 5.74 MPa olmuştur. 0.5B’de ise eğilme dayanımı sonuçları 200°C sonrası 9.27 MPa olurken 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrası sırasıyla 7.05 MPa ve 4.67 MPa olmuştur. 28 gün sonunda yapılan yüksek sıcaklık testine göre ağırlık kayıpları Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kayıpları.

Yüksek sıcaklık etkisiyle dehidrasyon ve serbest su buharlaşması oluşur. Bu durum katı matriste hasara yol açar. Bunun yanında çatlaklarda genişleme ve matrislerde gözenek oluşur. Dehidrasyon etkisiyle matris yapısında bulunan nem yüzeye doğru hareket eder. Buna bağlı olarak mikroyapıda oluşan hasarlar ağırlık kaybını artırır. Yüksek sıcaklık etkisiyle öncelikle yapısal su ve serbest su kaybıyla ağırlık kaybı oluşur. Ağırlık kaybı temelde emilmiş, serbest ve kimyasal olarak bağlı suyun kaybindan oluşur. Ağırlık kaybı 500°C’den sonra önemli oranda artış gösterir. Bu ağırlık kaybında serbest suyun ve yoğunlaşmış hidroksil gruplarının buharlaşması rol oynamıştır [49-50]. İnce taneli pirinç kabuğu külünün %15 oranına kadar reaksiyonu artırması ağırlık kaybını azaltmıştır. Daha yüksek oranda ise ağırlık kaybı artmıştır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, lifli numuneler için ağırlık kaybının daha az olduğu bulunmuştur. Böylelikle kullanılan liflerin etkisiyle ağırlık kaybında önemli bir azalma gözlemlenmiştir. 200°C sıcaklık sonrası ağırlık kayıpları %1.07 ile %2.39 arasında olurken 400°C sıcaklık sonrası %2.75 ile %4.62 arasında olmuştur. 600°C sıcaklık sonrası ise ağırlık kayıpları %4.79 ile %6.49 arasında olmuştur.

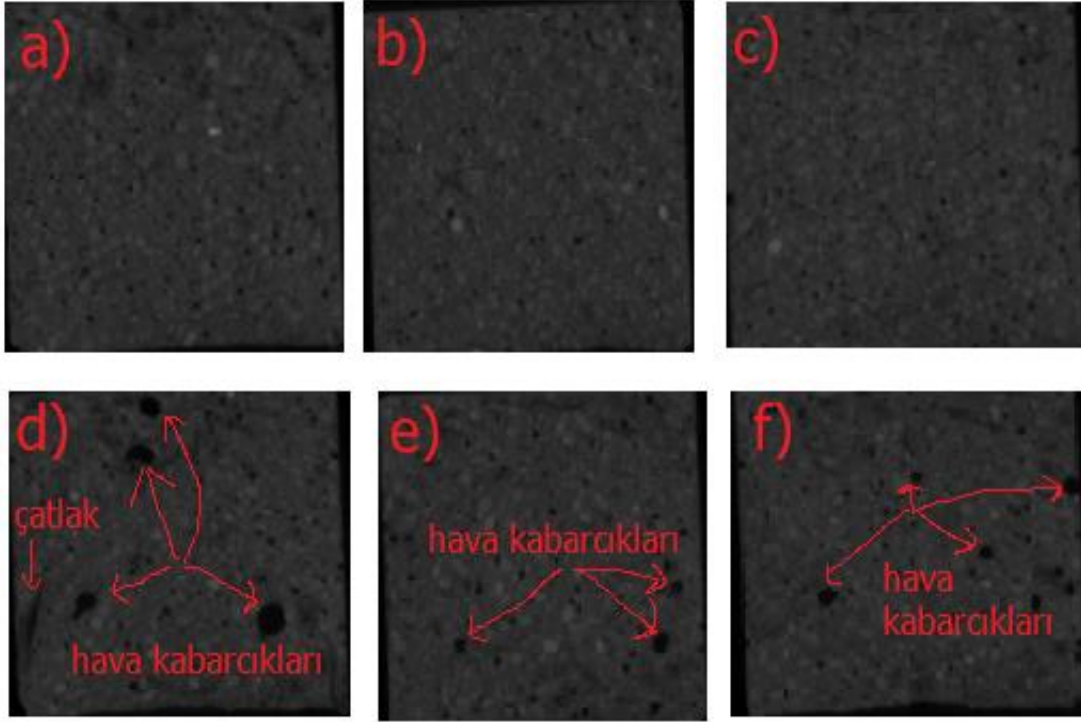
600°C yüksek sıcaklık sonrası numunelerin yüzeyinde olan değişiklikler incelenmiş ve Şekil 6’da gösterilmiştir. Fotoğraftaki 1 numaralı çimento harcı kontrol serisi olup 2, 3 ve 4 numaralı çimento harçları sırasıyla PK5, PK10 ve PK15 serilerini göstermektedir.

5, 6 ve 7 numaralı çimento harçları sırasıyla 0.5PVA, 1PVA ve 1.5PVA serilerini gösterirken 8, 9 ve 10 numaralı çimento harçları sırasıyla 0.5B, 1B ve 1.5B serilerini göstermektedir. Görsel inceleme, numuneler yüksek sıcaklık fırınından çıkarıldıktan 1 saat sonra yapılmıştır. Sıcaklık etkisi sonrası dayanım kayıpları oluşurken buna paralel bir biçimde renk değişimi de olmuştur. Numunelerde pürüzlülük artma eğilimi gösterirken daha kırılğan bir yapı oluşur. Bu durumu oluşturan temel sebep sıcaklıkla beraber C-S-H zincirlerinin zarar görmesidir. Numunelerde çatlakların oluşmasına rağmen stabilitenin korunduğu görülmüştür.



Şekil 6. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin görünümü.

PK15, 1PVA ve 1B çimento harçlarında 28 gün sonunda ve 600°C sıcaklık sonrası Micro-CT görüntüleri Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekil 7, numunelerin temsili bir enine kesit görünümüdür. Kuruma büzülmesinden dolayı numunenin yüzey tarafında küçük çatlaklar gözlenir. Ek olarak, numunedeki sıcaklık gradyanı, çatlak oluşumunun başka bir nedenidir. Özellikle su buharlaşmasının arttığı dönemde numunenin çekirdek bölgesinde dışarıya göre daha düşük bir sıcaklık oluşur. Bu nedenle çekirdek alandaki büzülme dış tabakaya göre daha azdır. Büzülme arasındaki bu uyumsuzluk çatlaklar yaratır. Ayrıca numunenin boyutu ve su içeriği çatlak oluşumunu tetikleyebilir. Micro-CT görüntülerinde parlak renkler, yüksek X-ışını zayıflaması olan çakıl ve ince agrega gibi bileşenleri gösterirken, X-ışını zayıflaması olmayan veya düşük olan bileşenler koyu renklerle (hava boşlukları) gösterilir. İç yapıdaki küçük çatlakların yanı sıra harçların morfolojik yapıları da yuvarlak gözeneklere sahiptir. Çatlak oluşumu açısından, 1PVA ve 1B çimento harçlarında lif etkisiyle daha az çatlak ve hava boşluğu oluşmuştur. PK15’te çatlak oluşumu daha fazla olmuştur [51].



Şekil 7. Micro-CT görüntüleri a) 28 gün sonunda PK15 b) 28 gün sonunda 1PVA c) 28 gün sonunda 1B d) 600°C sonrası PK15 e) 600°C sonrası 1PVA f) 600°C sonrası 1B

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada çimentolu harçların mekanik ve durabilite özellikleri analiz edilerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Pirinç kabuğu külü %15 oranına kadar dayanım sonuçlarında artış sağlamıştır. Özgül yüzey alanının yüksek olması kısa dönemde artış oluştururken yüksek  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  oranına (%81.27) sahip olması uzun vadeli artış oluşturmuştur. Daha yüksek oranda ise işlenebilirliği azaltarak sonuçları düşürmüştür. Sonuçta pirinç kabuğu külünün Beyaz Çimentoyla birlikte kullanım açısından uyumlu bir puzolan olduğu görülmüştür.
- Liflerin %1 oranında kullanılması basınç dayanımı sonuçlarını artırırken daha yüksek oranda kullanılmasıyla kümelenme ve düşük yoğunluk nedeniyle olumsuz etkilemiştir. Eğilme dayanımı sonuçları ise artan lif oranıyla sürekli artmıştır. PVA lifinin bazalt lifine göre daha yüksek çekme mukavemetine sahip olması daha sistematik performans göstermesini sağlamıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisi sonrası basınç dayanımı sonuçlarında 200°C'den sonra kuruma büzülmesi ve aderans gelişmesi nedeniyle artış olurken daha yüksek sıcaklıklarda matris yapısında bozulma nedeniyle azalış olmuştur. Pirinç kabuğu külünün boşlukları doldurması ve puzolanik reaksiyonu artırması yüksek sıcaklık sonrası da etkin olmuştur. Ağırlık kayıpları ise bozulma ile birlikte sürekli bir biçimde artmıştır.

**Kaynaklar**

- [1] Ozturk, A.U., Kaplan, G., A study of some durability properties of mortars with white cement and Portland cement, **Revista Romana de Materiale-Romanian Journal of Materials**, 47(3), 315-321, (2017).
- [2] Jennings, H.M., Bullard, J.W., From electrons to infrastructure: Engineering concrete from the bottom up, **Cement and Concrete Research**, 41(7), 727-735, (2011).
- [3] Bullard, J.W., Jennings, H.M., Livingston, R.A., Nonat, A., Scherer, G.W., Schweitzer, J.S., Scrivener, K.L., Thomas, J.J., Mechanisms of cement hydration, **Cement and Concrete Research**, 41(12), 1208-1223, (2011).
- [4] Horsley, C., Emmert, M.H., Sakulich, A., Influence of alternative fuels on trace element content of ordinary portland cement, **Fuel**, 184, 481-489, (2016).
- [5] Hamad, B.S., Investigations of chemical and physical properties of white cement concrete, **Advanced Cement Based Materials**, 2(4), 161-167, (1995).
- [6] Fawzy, Y.A.G., Hay, A.S.A., Utilization of white cement in concrete mix containing srpc, **Third International Conference, Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering**, 71 – 75, Birmingham, (2015).
- [7] Malhotra, V.M., Introduction: sustainable development and concrete technology, **Concrete International**, 24(7), (2002).
- [8] Naik, T.R., Sustainability of concrete construction, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(2), 98-103, (2008).
- [9] Zerbino, R., Giaccio, G., Batic, O.R., Isaia, G.C., Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash, **Construction and Building Materials**, 36, 796-806, (2012).
- [10] Antiohos, S.K., Papadakis, V.G., Tsimas, S., Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness, **Cement and Concrete Research**, 61, 20-27, (2014).
- [11] Kannan, V., Ganesan, K., Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and Metakaolin, **Construction and Building Materials**, 51, 225-234, (2014).
- [12] Gastaldini, A.L.G., Da Silva, M.P., Zamberlan, F.B., Neto, C.M., Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash, **Construction and Building Materials**, 54, 369-377, (2014).
- [13] Zain, M.F.M., Islam, M.N., Mahmud, F., Jamil, M., Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material, **Construction and Building Materials**, 25(2), 798-805, (2011).
- [14] Chatveera, B., Lertwattanaruk, P., Durability of conventional concretes containing black rice husk ash, **Journal of Environmental Management**, 92(1), 59-66, (2011).
- [15] Chao-Lung, H., Le Anh-Tuan, B., Chun-Tsun, C., Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete, **Construction and Building Materials**, 25(9), 3768-3772, (2011).
- [16] Rößler, C., Bui, D.D., Ludwig, H.M., Rice husk ash as both pozzolanic admixture and internal curing agent in ultra-high performance concrete, **Cement and Concrete Composites**, 53, 270-278, (2014).
- [17] Venkatanarayanan, H.K., Rangaraju, P.R., Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete, **Cement and Concrete Composites**, 55, 348-363, (2015).

- [18] Praveenkumar, T.R., Vijayalakshmi, M.M., Meddah, M.S., Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO<sub>2</sub> nanoparticles and rice husk ash, **Construction and Building Materials**, 217, 343-351, (2019).
- [19] Jalal, A., Shafiq, N., Nikbakht, E., Kumar, R., Zahid, M., Mechanical properties of hybrid basalt-polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced concrete, **Key Engineering Materials**, 744, 3-7, (2017).
- [20] Choi, J.I., & Lee, B.Y., Bonding properties of basalt fiber and strength reduction according to fiber orientation, **Materials**, 8(10), 6719-6727, (2015).
- [21] Fan, F.L., Xu, J.Y., Bai, E.L., He, Q., Experimental study on impact-mechanics properties of basalt fibre reinforced concrete, **Advanced Materials Research**, 168, 1910-1914, (2011).
- [22] Jiang, C., Fan, K., Wu, F., Chen, D., Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete, **Materials & Design**, 58, 187-193, (2014).
- [23] Ayub, T., Shafiq, N., Nuruddin, M.F., Effect of chopped basalt fibers on the mechanical properties and microstructure of high performance fiber reinforced concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2014).
- [24] Hu, W., Yang, X.G., Zhou, J.W., Xing, H.G., Xiang, J., Experimental research on the mechanical properties of PVA fiber reinforced concrete, **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, 5(18), 4563–4567, (2013).
- [25] Noushini, A., Samali, B., Vessalas, K., Flexural toughness and ductility characteristics of polyvinyl-alcohol fibre reinforced concrete (PVA-FRC), **Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, 1110–1121, Toledo, (2013).
- [26] Annam, R., Study of Mechanical Properties of PVA Fiber-Reinforced Concrete With Raman Spectroscopic Analysis, Yüksek Lisans Tezi, Western Kentucky Üniversitesi, Kimya Bölümü Fakültesi, Kentucky, (2015).
- [27] Olgun, Z., Pirinç kabuğu külünden magnezyum silikat üretimi ve üretilen magnezyum silikatların kızartma yağlarının rejenerasyonunda kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2008).
- [28] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, USA, (2016).
- [29] ASTM C348-14, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, USA, (2014).
- [30] Ferraro, R.M., Nanni, A., Effect of off-white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete, **Construction and Building Materials**, 31, 220-225, (2012).
- [31] Tulashie, S.K., Kotoka, F., Mensah, D., Kwablah, A.K., Investigation of the compressive strength of pit sand, and sea sand mortar prisms produced with rice husk ash as additive, **Construction and Building Materials**, 151, 383-387, (2017).
- [32] Sharma, R.K., Effect of substitution of cement with rice husk ash on compressive strength of concrete using plastic fibres and super plasticizer. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 18(7), 2138-2142, (2014).
- [33] Habeeb, G.A., Mahmud, H.B., Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material, **Materials Research**, 13(2), 185-190, (2010).



- [34] Habib, A., Begum, R., Alam, M.M., Mechanical properties of synthetic fibers reinforced mortars, **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 4(4), 923-927, (2013).
- [35] Sim, J., Park, C., Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures, **Composites Part B: Engineering**, 36(6-7), 504-512, (2005).
- [36] Celik, A., Yilmaz, K., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M.M., Aygörmez, Y., Uysal, M., High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers, **Construction and Building Materials**, 187, 1190-1203, (2018).
- [37] Arslan, A.A., Uysal, M., Yılmaz, A., Al-mashhadani, M.M., Canpolat, O., Şahin, F., Aygörmez, Y., Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites, **Construction and Building Materials**, 225, 909-926, (2019).
- [38] Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Sirivivatnanon, V., Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, **Cement and Concrete Composites**, 29(3), 224-229, (2007).
- [39] Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A., Fraternali, F., Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement, **Construction and Building Materials**, 80, 200-209, (2015).
- [40] Al-mashhadani, M.M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M., Erdem, S., Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites, **Construction and Building Materials**, 167, 505-513, (2018).
- [41] Kani, E.N., Allahverdi, A., Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan, **Journal of Materials Science**, 44(12), 3088-3097, (2009).
- [42] Vijai, K., Kumutha, R., Vishnuram, B.G., Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete, **International Journal of Physical Sciences**, 5(9), 1419-1423, (2010).
- [43] Shinde, B.H., Kadam, K.N., , Properties of fly ash based geopolymer mortar with ambient curing, **2nd National Conference of Innovations in Civil Engineering**, 203-206, (2016).
- [44] Shaikh, F.U.A., Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites, **Construction and Building Materials**, 43, 37-49, (2013).
- [45] Xu, F., Deng, X., Peng, C., Zhu, J., Chen, J., Mix design and flexural toughness of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer composites, **Construction and Building Materials**, 150, 179-189, (2017).
- [46] Khan, M.Z.N., Hao, Y., Hao, H., Shaikh, F.U.A., Mechanical properties of ambient cured high strength hybrid steel and synthetic fibers reinforced geopolymer composites, **Cement and Concrete Composites**, 85, 133-152, (2018).
- [47] Mechtcherine, V., de Andrade Silva, F., Müller, S., Jun, P., Toledo Filho, R.D., Coupled strain rate and temperature effects on the tensile behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) with PVA fibers, **Cement and Concrete Research**, 42(11), 1417-1427, (2012).

- [48] Wang, R., Meyer, C., Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene, **Cement and Concrete Composites**, 34(9), 975-981, (2012).
- [49] Heah, C.Y., Kamarudin, H., Al Bakri, A.M., Binhussain, M., Luqman, M., Nizar, I.K., Ruzaidi, C.M., Liew, Y.M., Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers, **Physics Procedia**, 22, 305-311, (2011).
- [50] Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S., Vazquez, T., Alkali-activated fly ash/slag cements: strength behaviour and hydration products, **Cement and Concrete Research**, 30(10), 1625-1632, (2000).
- [51] Aygörmez, Y., Canpolat, O., Al-mashhadani, M.M., Uysal, M., Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites, **Construction and Building Materials**, 235, 117502, (2020).

# Bitki örneklerinden seçici gallik asit ayrılması için gallik asit baskılanmış polimerlerin hazırlanması

Tülden İNANAN\*

Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kimya Teknolojileri Programı, Aksaray

Geliş Tarihi (Received Date): 26.10.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 20.11.2020

## Öz

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan doğal bir antioksidan olan gallik asidin (GA) moleküler baskılama yöntemi kullanılarak hazırlanan polimerlerle (MIP) bitki örneklerinden seçici ayrılması gerçekleştirilmiştir. Emülsiyon polimerizasyonu ile hazırlanan polimerler çeşitli yöntemlerle karakterize edilmiştir. GA adsorpsiyonunun optimizasyon çalışmaları, pH 3,5 ortamında 25°C'de 1,2 mg GA-MIP kullanılarak 60 dk sürenin GA adsorpsiyonu için en uygun koşullar olduğunu göstermiş ve GA adsorpsiyonu adsorpsiyon kinetikleri ve izotermeleri ile incelenmiştir. Çalışılan tüm derişimler için IF değerinin 1'den büyük olması GA-MIP'lerin baskılanmamış polimerlere (GA-NIP) kıyasla daha fazla GA adsorpladığını kanıtlamaktadır. Ayrıca, IF değerinin GA derişimiyle ters orantılı olarak azalması spesifik olmayan etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. MIP'lerin seçiciliğini belirlemek amacıyla GA analogları kullanılarak yarışmalı adsorpsiyon çalışmaları yapılmış ve GA ve analoglarının miktarları yüksek performanslı sıvı kromatografisi ile analiz edilmiştir. Tüm bağıl seçicilik katsayılarının 1'den büyük olması GA-MIP'lerin baskılanmamış polimerlere kıyasla GA'yi tüm analoglarından daha fazla adsorpladığını göstermektedir. Yeşil çay, siyah çay ve karanfil örnekleri ile yapılan gerçek örnek çalışmaları sonucunda en etkin GA adsorpsiyonu ve geri alımının karanfil örnekleriyle elde edildiği belirlenmiştir. HPLC kromatogramları incelendiğinde, GA'nın etkin ve seçici olarak MIP'lerden geri alındığı belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Moleküler baskılama, gallik asit, seçicilik, HPLC.

\* Tülden İNANAN, tkalburcu@aksaray.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-2833-4283>

## Preparation of gallic acid imprinted polymers for selective gallic acid separation from plant samples

### Abstract

*In this study, gallic acid (GA) which is a commonly used natural antioxidant has been separated from plant samples with the polymers (MIP) prepared by using molecular imprinting technique. The polymers produced by emulsion polymerization has been characterized by several methods. Optimization studies for the adsorption of GA has been indicated that pH 3.5 medium at 25°C with using 1,2 mg GA-MIP for 60 min period are optimum conditions for GA adsorption and GA adsorption has been investigated by adsorption kinetics and isotherms. IF values being more than 1 for all working concentrations have demonstrated that GA-MIPs adsorbed more GA in regard to non-imprinted polymers (GA-NIPs). However, decreasing IF values inversely proportional with increasing concentration are due to the non-specific interactions. For the identification of MIPS' selectivity, competitive adsorption studies have been carried out with using GA analogues and amounts of GA and its analogues have been analyzed with high performance liquid chromatography (HPLC). All relative selectivity coefficients greater than 1 have showed that GA-MIPs adsorbed more GA than its analogues as regards to GA-NIPs. As a result of real sample studies with green tea, black tea and clove samples, most efficient GA adsorption and recovery has been achieved with clove samples. It is indicated by analyzing HPLC chromatograms, GA has been recovered effectively and selectively from MIPs.*

**Keywords:** *Molecular imprinting, gallic acid, selectivity, HPLC.*

### 1. Giriş

Gallik asit (GA; 3,4,5-trihidroksibenzoik asit) farmasötik ve biyomedikal endüstrilerinde kullanılan temel doğal biyoaktif bileşenlerden biridir [1]. GA muz, mango, elma, çilek, yaban mersini, turunçgiller gibi meyve ve meyve tohumları; güvercin ağacı (*Hamamelis virginiana*), meşe kabuğu (*Quercus alba*) ve çay yaprakları (hem yeşil, hem siyah) gibi bitkilerde doğal olarak bulunan bir polifenoldür [2-4]. GA, çoklu biyolojik ve farmasötik özellikleri nedeniyle oldukça ilgi çekmekte [5] ve bu nedenle besinlerde, ilaçlarda ve kozmetik ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. GA'nın insan sağlığı üzerine anti-bakteriyel [7], anti-viral [8], mutasyon-direnci sağlayıcı [9,10]; kardiyovasküler hastalıklara karşı koruyucu, anti-inflamatuvar, anti-tümör, serbest radikal sönmüleyici [5, 10-12], anti-oksidan [13-16] ve anti-diyabetik [17-18] etkileri belirlenmiştir. *In vitro* ve *in vivo* çalışmalar GA'nın sağlıklı hücelere zarar vermeksizin meme, akciğer ve prostat kanserlerine karşı güçlü anti-kanser etki gösterdiğini kanıtlamıştır [10, 19-21]. GA'nın bir başka etkisi de astım, alerjik rinit, sinüzit gibi alerjik hastalıklara karşı anti-histaminik özellik göstermesidir [22-24].

Medikal etkilerine ek olarak GA, deri endüstrisinde ve cilt uygulamalarında şelatlayıcı ajan olarak kullanılmaktadır [25]. Ayrıca, anti-mikrobiyal bir ajan olan trimetopim sentezi için kullanılmakta ve serbest radikal sönmüleme gücü nedeniyle gıdalara ve içeceklere koruyucu olarak eklenmektedir [26]. GA farmasötik ve endüstriyel önemi nedeniyle dünya genelinde yıllık 8000 tonluk talebe sahiptir. Geleneksel olarak, tannik

asidin hidrolizi ile GA üretilmekte fakat GA üretimi için yüksek miktarlarda kimyasal gerekmede ve çevresel tehlikelere neden olan toksik atıkların salınmasına neden olmaktadır [27]. GA doğal materyallerde bol miktarda bulunmakta ve birçok bitki ve meyveden ekstrakte edilebilmektedir. Buna rağmen, GA'nın seçici ekstraksiyonu sırasında doğal materyallerin kompleks doğası ve GA'nın yüksek polaritesi nedeniyle çeşitli girişimciler de GA ile birlikte elüe olmaktadır. Bu nedenle, doğal materyallerin sulu ortamlarından GA ayrılması ve belirlenmesi için seçici ve kullanışlı materyallerin geliştirilmesi gerekmektedir [13, 28]. Zhang vd, manyetik nanopartikülleri karboksil fonksiyonlandırarak etkin MIP'ler hazırlamışlar ve nar kabuğundan seçici GA ekstraksiyonu için kullanmışlardır [13]. Pardeshi vd, moleküler baskılanmış mikro- ve nano-partikülleri çöktürme polimerizasyonu ile hazırlamış ve *Embllica officinalis*'ten seçici GA ekstraksiyonu için kullanmışlardır [28]. Hu vd, GA'nın üzüm, elma, şeftali ve portakal gibi meyve sularından seçici GA ekstraksiyonu ve tayini için MIP'leri mezogözenekli manyetik silika üzerinde hazırlamışlardır [29]. Hao vd, manyetik karbon nanotüp temelli yüzey baskılanmış polimerler sentezlemiş ve nar kabuğundan GA'nın hızlı ayrılması ve dedeksiyonu için kullanmışlardır [30]. Zhu vd, non-kovalent baskılama yöntemiyle bir seri MIP hazırlamış ve MIP'lerin tanıma özelliklerini ve seçiciliklerini incelemişlerdir. MIP'ler *Cornus officinalis* ekstraktına uygulanmış ve gerçek örnekteki GA bağlama kapasiteleri ve seçicilikleri HPLC ile incelenmiştir [6]. Asfaram vd, magnetit nanopartiküller ve metal organik yapılarından oluşan kompoziti GA'nın yüzey baskılanması için destek materyali olarak kullanmış ve optimizasyon çalışmalarının ardından idrar, plazma ve su örneklerinden GA'nın ultrasonik destekli mikro-ekstraksiyonunu gerçekleştirmişlerdir [10]. Puoci vd, non-kovalent baskılama yöntemiyle hazırladıkları MIP'leri kullanarak zeytin özütü atık suyundan GA'nın çevre-dostu ayrımını sağlamışlardır [31]. Bhawani vd, çöktürme polimerizasyonu ile GA için MIP'ler sentezlemiş, GA standardı eklenmiş idrar örneklerinden GA ekstraksiyonunu yüksek oranda başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir [2].

MIP'ler, hedef moleküller için önceden tanımlanmış seçiciliğe sahip girintiler bulunduran fonksiyonel katı materyallerdir. Organik çözücüler, ısı, asit, baz ve diğer kimyasal ve fiziksel streslere dayanabilen, istenilen molekülün şeklini tamamlayıcı çapraz bağlı polimerlerdir [2]. MIP'lerin sentez ve kataliz [32], ilaç salınım sistemleri [33], sensörler [34] ve saflaştırma, uzaklaştırma [35] gibi farklı uygulama alanları bulunmaktadır. Bu nedenle, çevresel, biyomedikal ve gıda analizlerinde artan şekilde ilgi kazanmaktadır.

Bu çalışmada, GA baskılanmış polimerler (GA-MIP), AAm monomeri kullanılarak emülsiyon polimerizasyonu yöntemiyle hazırlanmış ve GA adsorpsiyonunun optimizasyonu çözücü, süre, başlangıç derişimi ve sıcaklık gibi parametrelerin incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. GA-MIP'lerin seçiciliğini belirlemek amacıyla, GA'nın analogları olan 4-hidroksibenzoik asit (HB), kafeik asit (KA) ve p-kumarik asit (4-hidroksisinnamik asit, PCA) kullanılarak HPLC analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak, GA-MIP ile yeşil çay, siyah çay ve karanfil ekstraktlarından GA ayrımı çalışılmıştır.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Malzeme

GA, polivinilalkol (PVA), amonyum persülfat (APS) ve metanol (MeOH) merckten; HBA, PCA, AAm ve etilenglikol dimetakrilat (EGDMA) sigmadan; ve KA isolabtan

temin edilmiştir. Kullanılan diğer kimyasalların tümü analitik saflıktadır ve saflaştırmadan kullanılmıştır. Deneylerin tümünde kullanılan su Millipore S.A.S 67120 sistemiyle elde edilmiştir. HPLC analizlerinde kullanılan Zorbax SB-fenil kolon Agilent'tan temin edilmiştir.

## **2.2. GA baskılanmış polimerlerin sentezi ve kalıp uzaklaştırma işlemi**

GA-MIP'lerin emülsiyon polimerizasyonu yöntemiyle hazırlanmasından önce, kalıp molekül GA ile fonksiyonel monomer olan AAm arasında ön-kompleks oluşumu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 3 mmol GA metanol içerisinde çözüldükten sonra 9 mmol AAm ile gece boyu karanlık ortamda karıştırılmıştır. GA ve AAm'nin ve hazırlanan ön-kompleksin UV-spektrofotometresi ile taramaları yapılmıştır. GA-MIP'lerin sentezi için 0,2275 g PVA 25 mL sıcak su içerisinde çözülmüş ve hazırlanan ön-kompleks bu stabilizasyon çözeltisinin içerisine eklenmiştir. Çapraz bağlayıcı ajan olarak 3 mmol EGDMA ve başlatıcı olarak 25 mg APS eklenerek son hacim 70 mL olacak şekilde polimerizasyon çözeltisi hazırlanmıştır. Polimerizasyon çözeltisi 15 dk ultrasonik banyoda sonike edilip ve homojen hale gelmesi için 5 dk karıştırıldıktan sonra çözülmüş oksijenin uzaklaştırılması için çözeltiden 5 dk N<sub>2</sub> gazı geçirilmiştir. Polimerizasyon reaksiyonu 70°C'de 65 rpm hızda çalkalanarak 8 saatte gerçekleştirilmiştir. GA baskılanmamış polimerler (GA-NIP), polimerizasyon çözeltisine GA eklenmeksizin aynı yöntemle hazırlanmıştır.

Polimerizasyon sürecinin sonunda elde edilen GA-MIP ve GA-NIP'ler 30 dk ultrasonik banyoda sonike edilmiştir. Elde edilen polimerler 14.000 rpm'de 15 dk santrifüjlendikten sonra gerekli çözeltiler içerisinde tekrar süspansedilerek yıkamaları yapılmıştır. Kalıbın uzaklaştırılması için GA-MIP'ler 80:20 (MeOH:HAc) ile 4 defa yıkanmıştır. Hem GA-MIP hem de GA-NIP'ler polimerizasyona katılmayan monomer ve çapraz bağlayıcının fazlasının, kalıp uzaklaştırma işleminde kullanılan HAc kalıntılarının uzaklaştırılması için sırayla MeOH ve saf suyla Uv-spektrofotometresinde ihmal edilebilir absorbans gözlenene kadar yıkanmıştır. Yıkamaları tamamlanan GA-MIP ve GA-NIP'ler başlangıç hacimlerinde su içerisinde süspansedilmiş, süspansede haldeki polimerlerin ağırlıkları belirlenerek kullanılmıştır.

## **2.3. GA-MIP ve GA-NIP'lerin karakterizasyonu**

GA ve AAm ile hazırlanan ön-kompleksin ve polimerizasyon sonucu elde edilen GA-MIP ve GA-NIP'lerin FTIR spektrumları Thermo Fisher Nicolet is50 FTIR cihazı ile kaydedilmiştir. GA-MIP ve GA-NIP'lerin parçacık boyut, boy dağılımı ve parçacık zeta potansiyeli analizleri Malvern Zetasizer Nano ZSP cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

## **2.4. GA adsorpsiyonunun optimizasyonu**

GA adsorpsiyonunun optimizasyonu için çözücü, süre, polimer miktarı, başlangıç derişimi ve sıcaklık gibi çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiştir. GA adsorpsiyonuna çözücü etkisi MeOH, MeOH:H<sub>2</sub>O karışımı ve pH'sı NaOH ve HCl ile ayarlanan pH 3,5; 4,0; 4,5 ve 5,0 çözeltileri kullanılarak incelenmiştir. GA adsorpsiyonuna sürenin etkisi 10-90 dk, polimer miktarının etkisi 0,6-2,4 mg GA-MIP ve başlangıç derişiminin etkisi 100-1500 ppm GA çalışılarak belirlenmiştir. Sıcaklık adsorpsiyonu etkileyen önemli parametrelerden biri olduğundan, 5-45°C aralığında çalışılarak sıcaklığın etkisi belirlenmiştir.

Tüm deneyler sonunda adsorpsiyonu çözeltileri 14.000 rpm'de 15 dk santrifüjlendikten sonra üst fazları alınmış, başlangıç çözeltileri ile birlikte Uv-spektrofotometresinde 270

nm’de absorbanları kaydedilmiştir. Standart gallik asit çözeltileri kullanılarak çizilen kalibrasyon denkleminde yararlanılarak gallik asit derişimleri ve buna bağı olarak adsorpsiyon kapasitesi aşığıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

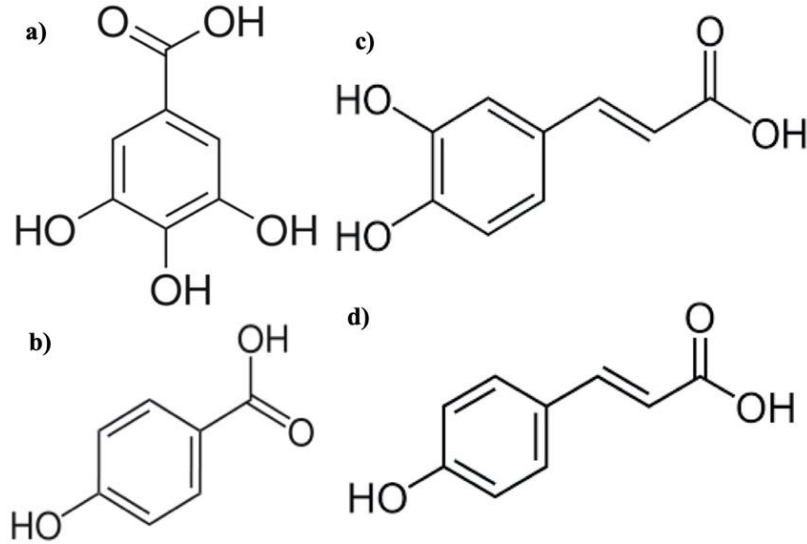
$$Q = (C_0 - C_d) \times V / m \quad (1)$$

Formülde gösterilen  $C_0$  ve  $C_d$  sırayla başlangıç ve denge gallik asit derişimlerini (mg/L),  $V$  adsorpsiyon hacmini (L) ve  $m$  polimer miktarını (g) ifade etmektedir.

Denge süresini kontrol eden adsorpsiyon kinetiklerinden; yalancı-birinci ve yalancı-ikinci mertbe kinetikleri, Elovich eşitliği ve partikül içi difüzyon modeli GA adsorpsiyon hızının tanımlanması amacıyla uygulanmıştır. Adsorpsiyon izotermeleri, denge durumunda adsorban ile adsorplanan arasındaki etkileşimin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu amaçla Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Redushkevich izotermeleri başlangıç derişimi etkisi verileri kullanılarak incelenmiştir.

### 2.6. Seçicilik çalışmaları

GA-MIP’lerin seçiciliğinin belirlenmesi için GA’nın analogları olan HB, KA ve PCA ile yarışmalı adsorpsiyonu çalışmaları yapılmıştır. GA ve analoglarının molekül yapıları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. GA<sup>a</sup>, HB<sup>b</sup>, KA<sup>c</sup> ve PCA<sup>d</sup> yapılarının molekül şekilleri.

GA ve analoglarının nicel analizi için Hu vd’nin çalışmasındaki metot kullanılmıştır [29]. GA, HB, KA ve PCA’nın kromatografik analizleri Agilent 1260 infinity diode array dedektörü içeren Agilent 1290 infinity UHPLC sistemi ile sabit faz olarak Zorbax SB-fenil (150 mm, iç çap:4,6 mm, 5 µm partikül boyutlu, 80Å por çaplı gözenekli silika) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hareketli faz olarak H<sub>2</sub>O içerisinde %0,4’lük HAC (A) ile MeOH içerisinde %0,4’lük HAC (B) karışımı şeklinde doğrusal aşamalı değışim elüsyonu ile kullanılmıştır. 0-30 dk arasında B %20-30 olacak şekilde 0,8 mL/dk akış hızında çalışılmıştır. GA ve HB için 260 nm’de, KA ve PCA için 312 nm’de spektrumlar alınmıştır. Bu koşullarda, GA, HB, KA ve PCA için sırayla Rt süreleri 3,2; 6,7; 9,4 ve 14,9 dk olarak belirlenmiştir.

GA-MIP'lerin seçiciliğini belirlemek amacıyla seçicilik katsayısı ( $K$ ) ve bağıl seçicilik ( $K'$ ) değerleri GA, HB, KA ve PCA için dağılım katsayısı ( $K_d$ ) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Formüllerdeki,  $K_d$  (L/g),  $Q$  (mg/g) ve  $C_e$  (mg/L) birimlerindedir.

$$K_d = Q/C_e \quad (2)$$

$$K = K_d(\text{GA})/K_d(\text{GA analogları}) \quad (3)$$

$$K' = K(\text{GA-MIP})/K(\text{GA-NIP}) \quad (4)$$

### 2.7. Gerçek örneklerden GA-MIP'ler ile GA uzaklaştırılması

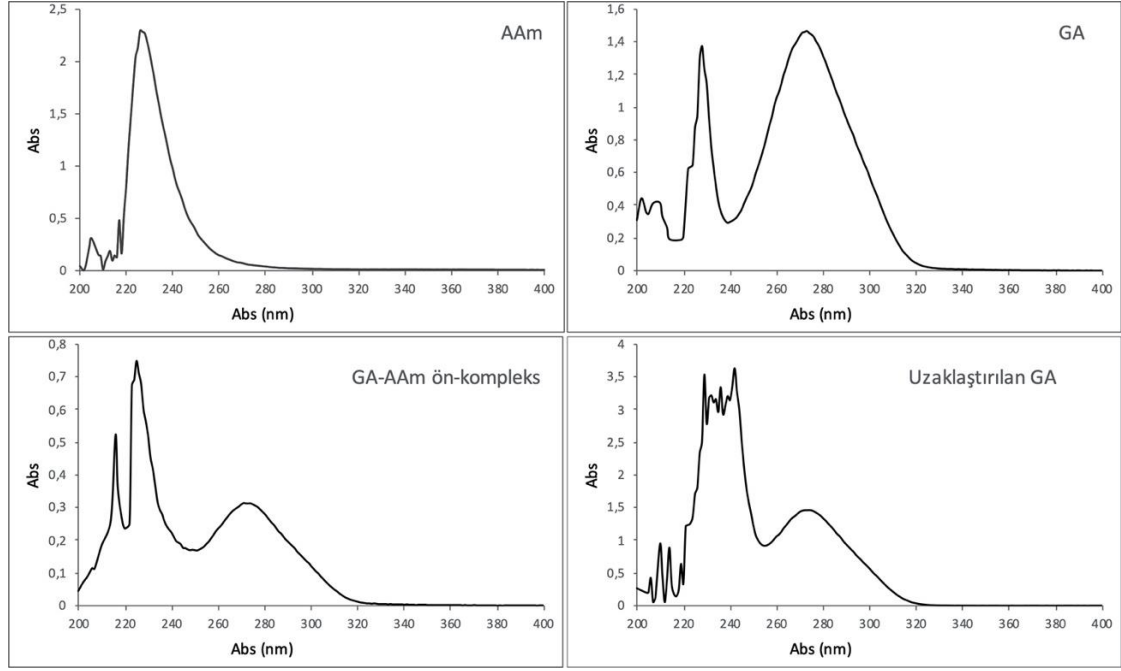
GA meyve ve meyve suyunda, şarap, likör gibi alkollü içeceklerde, karnabahar, patlıcan, hindiba gibi sebzelerde, adaçayı, dağ kekiği, karanfil gibi bitkilerde, demleme çay, ham kestane ve sirke gibi ürünlerde değişen miktarlarda bulunmaktadır. Çalışmada kullanılmak üzere bu ürünlerden, yeşil ve siyah çay ve karanfil günlük hayatta bolca kullanılan ürünler oldukları ve GA içerikleri yüksek olduğu için tercih edilmiştir. Tüm ürünler ticari olarak yerel marketlerden satın alınmış ve çay örnekleri suda [36], karanfil örneği ise metanol içerisinde [37] ekstrakte edilmiştir. Yeşil ve siyah çay örnekleri 10 g tartılıp üzerlerine 100 mL kaynar su eklenmiştir. Örnekler, 5 dk demlendikten sonra süzülüp soğutulmuş ve adsorpsiyon deneylerinde kullanılmıştır. Karanfil tomurcukları 4 g tartılıp havanda öğütülmüş ve 40 mL metanol içerisine alınarak 1 saat kapalı kaptaki karıştırıldıktan sonra süzülerek adsorpsiyon deneylerinde kullanılmıştır. Adsorpsiyon deneyleri, optimizasyon deneylerindeki koşullarda gerçekleştirilmiş ve GA derişimleri HPLC'de tayin edilmiştir. GA-MIP'ler üzerine adsorplanan GA'nın geri alımı için santrifüjlenen GA-MIP'ler geri-süspanse edilmiş ve GA'nın geri alımı işlemi 2 kez 10 mL MeOH içerisinde hazırlanan 1 M NaCl kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 3. Sonuçlar ve tartışma

### 3.1. GA-AAm ön-kompleksinin ve GA-MIP, GA-NIP'lerin karakterizasyonu

Kalıp molekül GA, monomer AAm, AAm'nin hazırlanan ön-kompleks ve kalıp uzaklaştırma çözeltisine ait UV spektrumları Şekil 2'de verilmiştir.

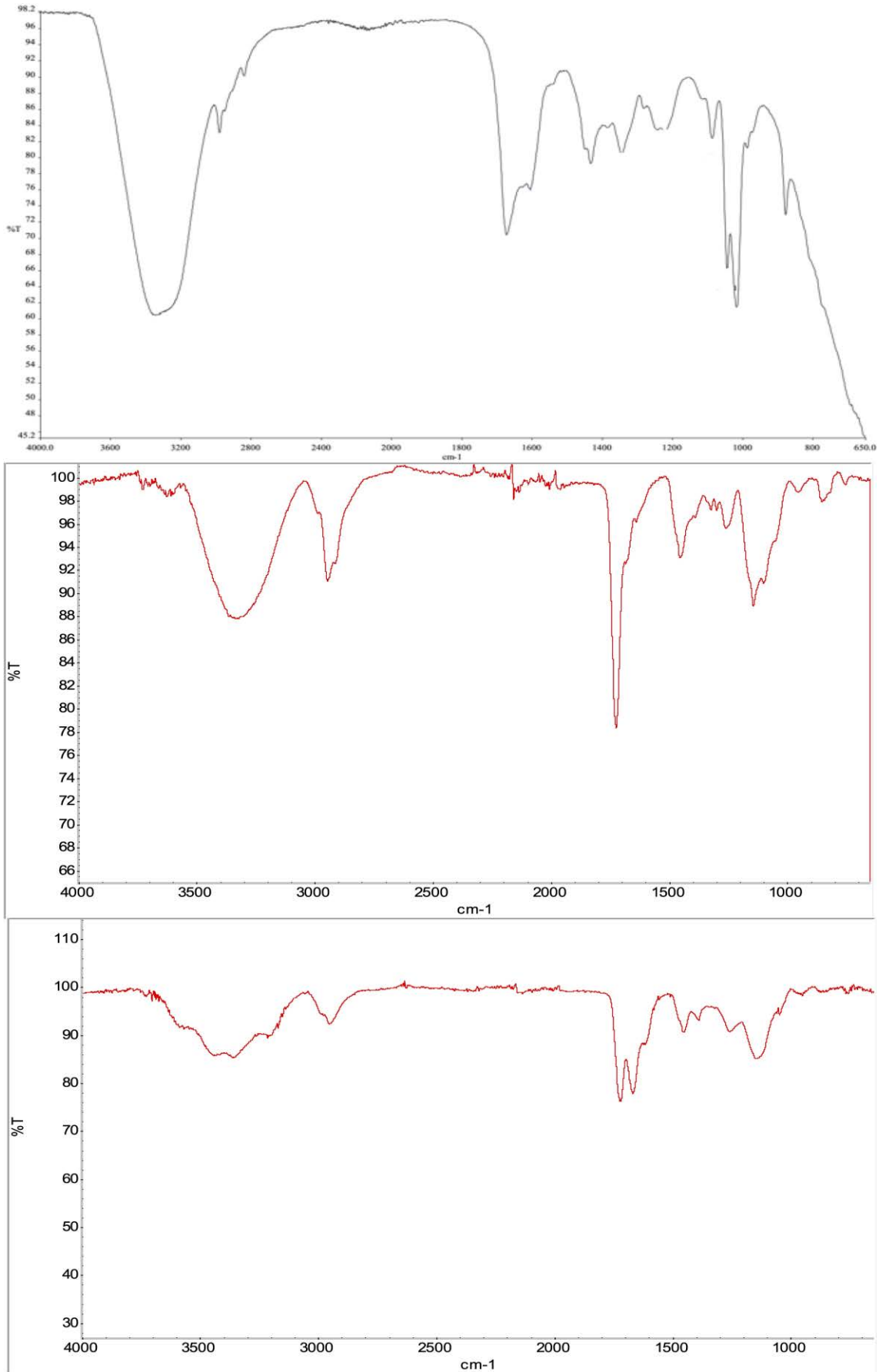




Şekil 2. GA, AAm, GA-AAm ön-kompleksi ve kalıp uzaklaştırma çözeltisine ait Uv-spektrumları.

Şekil 2'deki Uv-spektrumları incelendiğinde, maksimum absorpsiyonun AAm için 225 nm; GA için 230 ve 270 nm'lerde olduğu gözlenmektedir. GA-AAm ön-kompleksi için 216, 225 ve 270 nm'lerde gözlenen piklerin hem AAm hem GA yapılarına ait olduğu düşünülmekte, kompleks oluşumu nedeniyle 220-230 nm civarındaki piklerde küçük kaymalar olduğu gözlenmektedir. Kalıp uzaklaştırma çözeltisinin Uv spektrumunda 270 nm'de gözlenen pikin GA'ya ait olduğu ve kalıp molekülün başarılı şekilde uzaklaştırıldığı gözlenmektedir. Kalıp uzaklaştırma çözeltisinde metanol, asetik asit ve polimerizasyon çözeltisine katılmayan monomer ve çarpaz bağlayıcı bulunması nedeniyle farklı pikler de gözlenmektedir.

GA-AAm ön-kompleksi, GA-MIP ve GA-NIP için FTIR spektrumları kaydedilmiş ve Şekil 3'te verilmiştir.



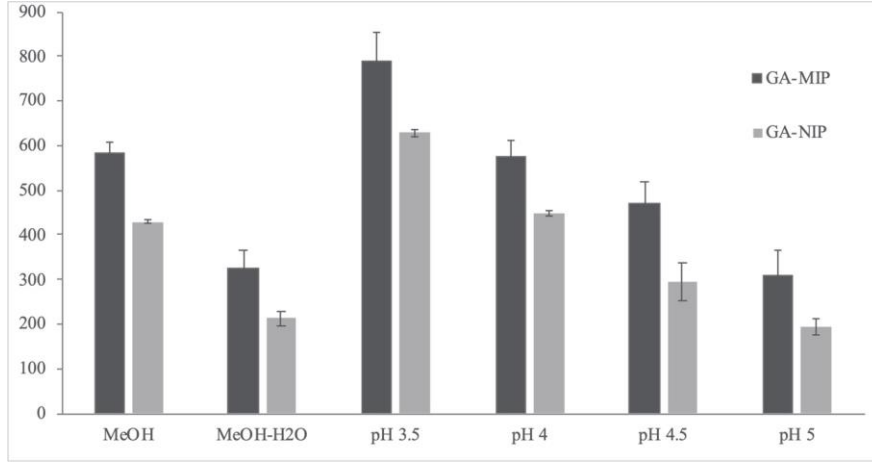
Şekil 3. GA-AAm ön-kompleksi<sup>a</sup>, GA-MIP<sup>b</sup> ve GA-NIP<sup>c</sup> çin FTIR spektrumları.

GA-AAm ön-kompleksine ait spektrum incelediğinde, 3340 ve 2980  $\text{cm}^{-1}$ 'de gözlenen bantların GA'nın H-bağı yapmış ve serbest -OH gruplarına, 1670  $\text{cm}^{-1}$ 'de ve 1030  $\text{cm}^{-1}$  civarı gözlenen ikili bandın sırayla GA'nın -C=O ve -C-O gerilmelerine ait olduğu düşünülmektedir. 1604  $\text{cm}^{-1}$ 'de omuz şeklinde ve 1430  $\text{cm}^{-1}$ 'de görülen bantların AA'm'nin -C=C gerilmesine ve alifatik -C-H gerilmelerine ait olduğu düşünülmektedir. GA-MIP'e ait spektrum incelendiğinde, polimerizasyonda eklenen diğer bileşenlerin etkisiyle GA-AAm ön-kompleksine kıyasla -OH gruplarına ait bant şiddetinde azalma -C-H gerilme bantlarının şiddetinde artış ve polimerizasyon sonucunda -C=C gerilme bandının kaybolduğu gözlenmektedir. GA-NIP'e ait spektrum incelendiğinde, 3450  $\text{cm}^{-1}$  civandaki ikili zayıf bandın primer amin gerilmesine ait olduğu görülmektedir. 1715, 1665 ve 1140  $\text{cm}^{-1}$ 'lerdeki bantların sırayla -C=O gerilme, -N-H eğilme ve -C-N eğilme titreşimlerine ait olduğu öngörülmektedir. GA-NIP'nin spektrumunda C=O ve -N-H eğilme bantları benzer şiddetine sahipken, GA'nın GA-MIP yapısına katılmasıyla -C=O gerilme bant şiddetinin -N-H eğilme şiddetine göre arttığı gözlenmektedir. -N-H eğilme bant şiddetindeki azalma, AA'm'nin  $\text{NH}_2$  grubu üzerinden H-bağlarıyla ön-kompleks oluşturması ile açıklanabilir.

Parçacık boyutu ve boy dağılımı analizleri sonucunda GA-MIP'lerin parçacık boyutu  $285 \pm 7$  nm, polidispersite indeksi (PdI)  $0,22 \pm 0,02$ ; GA-NIP'lerin parçacık boyutu  $337 \pm 3$  nm, PdI  $0,03 \pm 0,01$  olarak ölçülmüştür. PdI değeri 0-1 aralığında değişmekte ve PdI  $<0,1$  durumunda partikül dağılımındaki homojenitenin yüksek olduğunu göstermektedir. GA-NIP'ler için PdI  $<0,1$  olarak belirlenmesi eş-boyutlu partikül dağılımını göstermektedir [38]. GA-MIP'ler için PdI  $>0,1$  olması kalıp uzaklaştırma işlemleri sırasında GA-MIP'lerin çokça kez santrifüjlenip geri-süspansiyon edilmesi nedeniyle meydana gelen agregasyonlar ile açıklanabilir [39]. Zeta potansiyel değerleri GA-MIP'ler için  $-4,09 \pm 0,13$  mV; GA-NIP'ler için  $-3,29 \pm 0,26$  mV olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, hem GA-MIP hem GA-NIP'lerin yüzey yüklerinin (-) olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, zeta potansiyel değerlerinin 0-5 mV aralığında olması (- veya +) partiküllerin koagülasyon hızının yüksek olduğunu ve partikül stabilitesinin düşük olduğunu göstermektedir [40].

### 3.2. GA adsorpsiyonunun optimizasyonu

GA-MIP ve GA-NIP'ler üzerine GA adsorpsiyonuna çözücü etkisinin belirlenmesi için 1000 ppm GA çözeltisi ve 1,2 mg MIP veya NIP kullanılarak 90 dk süreyle incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, en yüksek adsorpsiyon kapasitesi pH 3,5'de belirlenmiştir. GA 4,40 pKa değerine sahiptir ve bu değer altındaki pH değerlerinde GA'nın fonksiyonel grupları protone olmuş haldedir. GA-MIP ve GA-NIP yapılarının yüzey yükleri de (-) olduğundan düşük pH değerinde adsorpsiyonu kapasitesinin yüksek olması iyonik etkileşimlerin artması ile açıklanabilir.



Şekil 4. GA-MIP ve GA-NIP yapıları üzerine GA adsorpsiyonuna çözücü etkisi.

GA adsorpsiyonu 10-90 dk aralığında 1000 ppm GA ve 1,2 mg MIP veya NIP kullanılarak 90 dk süreyle incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 5a'da verilmiştir. Şekil 5a'da görüldüğü üzere, adsorpsiyonu kapasitesi zaman ile doğrusal olarak artmış, 60 dk'da denge değerine ulaşmıştır. Bu nedenle, sonraki tüm deneylerde etkileşim süresi 60 dk olarak çalışılmıştır. Elde edilen veriler yalancı-birinci ve yalancı-ikinci mertebe kinetikleri, Elovich eşitliği ve partikül içi difüzyon modeline uygulanmış, elde edilen regresyon katsayısı ve kinetik parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen adsorpsiyon izotermine ait regresyon katsayısı değerleri incelendiğinde, GA-MIP'ler üzerine GA adsorpsiyonunun yalancı-birinci mertebe kinetiğine ve partikül-içi difüzyon modeline uyduğu görülmektedir. Partikül-içi difüzyon modeli, difüzyon mekanizmasını açıklamada daha detaylı bilgi sağlamaktadır. Hesaplanan  $C_i$  değerinin büyük olması, daha büyük sınır katmanını ifade etmektedir.

Polimer miktarının etkisini incelemek amacıyla, 0,6-2,4 mg aralığında çalışılmış ve sonuçlar Şekil 5b'de verilmiştir. En yüksek GA adsorpsiyonu kapasitesi 1,2 mg GA-MIP değerlerinde belirlenmiş, artan polimer miktarlarında GA-MIP üzerine adsorplanan GA miktarı değişmediği için adsorpsiyonu kapasitesinde keskin bir düşüş belirlenmiştir.

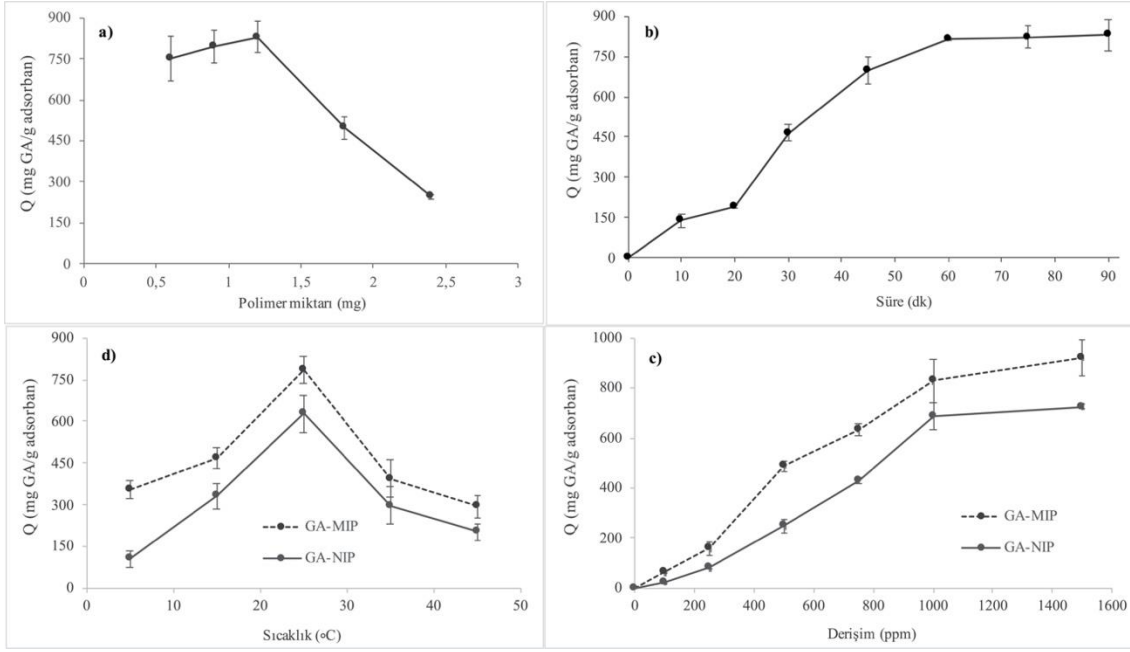
Başlangıç derişiminin etkisi 100-1500 ppm aralığında farklı derişimlerdeki GA çözeltileriyle 1,2 mg MIP veya NIP kullanılarak 60 dk sürede çalışılmış ve sonuçlar Şekil 5c'de görülmektedir. GA adsorpsiyonu, artan GA derişimiyle artmakta ve GA-MIP ve GA-NIP için maksimum adsorpsiyon kapasiteleri  $921,2 \pm 72,1$  ve  $725,0 \pm 8,9$  mg GA/g adsorban olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Redushkevich izotermine uygulanmış ve izotermine ait parametreler ve regresyon katsayısı değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen regresyon katsayısı değerleri incelendiğinde, GA-MIP'ler üzerine GA adsorpsiyonunun Freundlich izotermine uyduğu görülmektedir. Bu izoterm, heterojen yüzey adsorpsiyonunu ve  $n_f > 1$  olması kooperatif adsorpsiyonu göstermektedir. Heterojen yüzey adsorpsiyonu, güçlü bağlanma bölgelerinin ilk önce dolduğunu ve sonrasında bağlanma gücünün azaldığını açıklamaktadır. Temkin izotermine ait regresyon katsayısının yüksek olması, GA adsorpsiyonunda GA-MIP ve GA arasındaki ilişkinin bu izoterm parametreleriyle açıklanabileceğini göstermektedir. Adsorpsiyon ısıyla ilgili olan Temkin sabiti (B) ve maksimum bağlanma enerjisine bağlı denge bağlanma sabiti (A) değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 1. GA-MIP'lere GA adsorpsiyonu için adsorpsiyon kinetik ve izotermi.

<b>ADSORPSİYON KİNETİK MODELLERİ</b>				
<b>Yalancı-Birinci Mertebe Kinetik Model</b>				
$q_{e, \text{deneysel}} \text{ (mg/g)}$	$q_{e, \text{hesaplanan}} \text{ (mg/g)}$	$k_1 \text{ (1/h)}$	$R^2$	
821,7	1413,6	5,272	0,9265	
<b>Yalancı-İkinci Mertebe Kinetik Model</b>				
$q_{e, \text{hesaplanan}} \text{ (mg/g)}$	$k_2 \text{ (g/mg saat)}$	$t_{1/2} \text{ (dk)}$	$h_{0,2} \text{ (mg/g dk)}$	$R^2$
1428,6	$3,06 \times 10^{-4}$	137	10,42	0,2879
<b>Elovich Eşitliği</b>				
$1/\beta \ln(\alpha\beta) \text{ (mg/g)}$	$\alpha \text{ (mg/g saat)}$	$\beta \text{ (g/mg)}$	$R^2$	
425,6	2841,5	$2,3 \times 10^{-3}$	0,9130	
<b>Partikül-içi Difüzyon Modeli</b>				
$k_{pi} \text{ (mg/g h}^{1/2}\text{)}$	$C_i$		$R^2$	
161,6	429,7		0,9565	
<b>ADSORPSİYON İZOTERM MODELLERİ</b>				
<b>Langmuir İzotermi</b>				
$q_e \text{ (mg/g)}$	$L \text{ (L/mg)}$	$q_m \text{ (mg/g)}$	$R_L$	$R^2$
921,2	$2,5 \times 10^{-4}$	$3,33 \times 10^6$	0,8	0,5768
<b>Freundlich İzotermi</b>				
$n_f$	$K_f \text{ (mg/g)}$		$R^2$	
1,119	1166,5		0,9848	
<b>Temkin İzotermi</b>				
$A \text{ (L/g)}$	$b_T$	$B \text{ (J/mol)}$	$R^2$	
8,96	8,09	306,4	0,9877	
<b>Dubinini-Redushkevich İzotermi</b>				
$B \text{ (mol}^2\text{/J}^2\text{)}$	$X_m \text{ (mg/g)}$	$E \text{ (kJ/mol)}$	$R^2$	
$6 \times 10^{-8}$	4452	2,89	0,9377	

MIP'ler için seçiciliği gösteren faktörlerden biri baskılama faktörü (IF), Q(MIP)'in Q(NIP)'ye oranı şeklinde ifade edilmektedir. Farklı derişimlerdeki IF değerleri hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Düşük derişimlerde GA-MIP'lerin GA-NIP'lere göre daha seçici olarak GA adsorpladığı belirlenmiş, artan GA derişimlerinde spesifik olmayan etkileşimler nedeniyle IF değerlerinde düşüş olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple seçicilik çalışmaları 100 ppm GA ve 100 ppm GA analogu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sıcaklık, adsorpsiyonu etkileyen önemli parametrelerden biri olduğundan, 5-45°C aralığında çalışılarak sıcaklığın etkisi belirlenmiş ve Şekil 5d'de gösterilmiştir. GA adsorpsiyon kapasitesinin 5°C'den 25°C'ye artan sıcaklık ile 2,23 kat arttığı ve GA adsorpsiyonu için optimum sıcaklığın 25°C olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık artışı ile GA adsorpsiyonundaki artış, moleküller arası zayıf etkileşimlerin artışıyla açıklanabilir. Buna karşılık, 25°C'den 45°C'ye artan sıcaklık ile adsorpsiyon kapasitesinde 2,67 katlık bir düşüş gözlenmiştir. Sıcaklık artışı ile moleküllerin kinetik enerjilerinin artışı sterik engellemelere ve etkileşimlerin azalmasına neden olabileceğinden GA adsorpsiyonunda azalma gözlenmiş olabilir.



Şekil 5. GA-MIP yapıları üzerine GA adsorpsiyonuna süre<sup>a</sup>, polimer miktarı<sup>b</sup>, başlangıç derişimi<sup>c</sup> ve sıcaklık<sup>d</sup> etkisi.

### 3.3. Seçicilik çalışmaları

GA'nın analogları olan HB, KA ve PCA ile yarışmalı adsorpsiyonu sonuçları ile her bileşen için  $K_d$  değerleri hesaplanmıştır. GA-MIP ve GA-NIP'ler için  $K$  değerleri ve buna bağlı olarak  $K'$  değerleri hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde,  $K$  değerlerinin 1'den yüksek olması GA-MIP'lerin GA'yı HB ve KA analoglarına göre daha yüksek miktarda adsorpladığını göstermektedir. GA-MIP'lerin PCA'yı GA'ya göre daha yüksek miktarda adsorplaması spesifik olmayan etkileşimlerin fazla olması ile açıklanabilir. GA-NIP'ler için tüm  $K$  değerlerinin  $<1$  olması GA analoglarını GA'ya göre daha yüksek miktarda adsorpladığını göstermektedir. Tüm bağıl seçicilik katsayılarının  $>1$  olması GA-MIP'lerin GA-NIP'lere göre GA'yı tüm analoglarından daha fazla adsorpladığını göstermektedir.

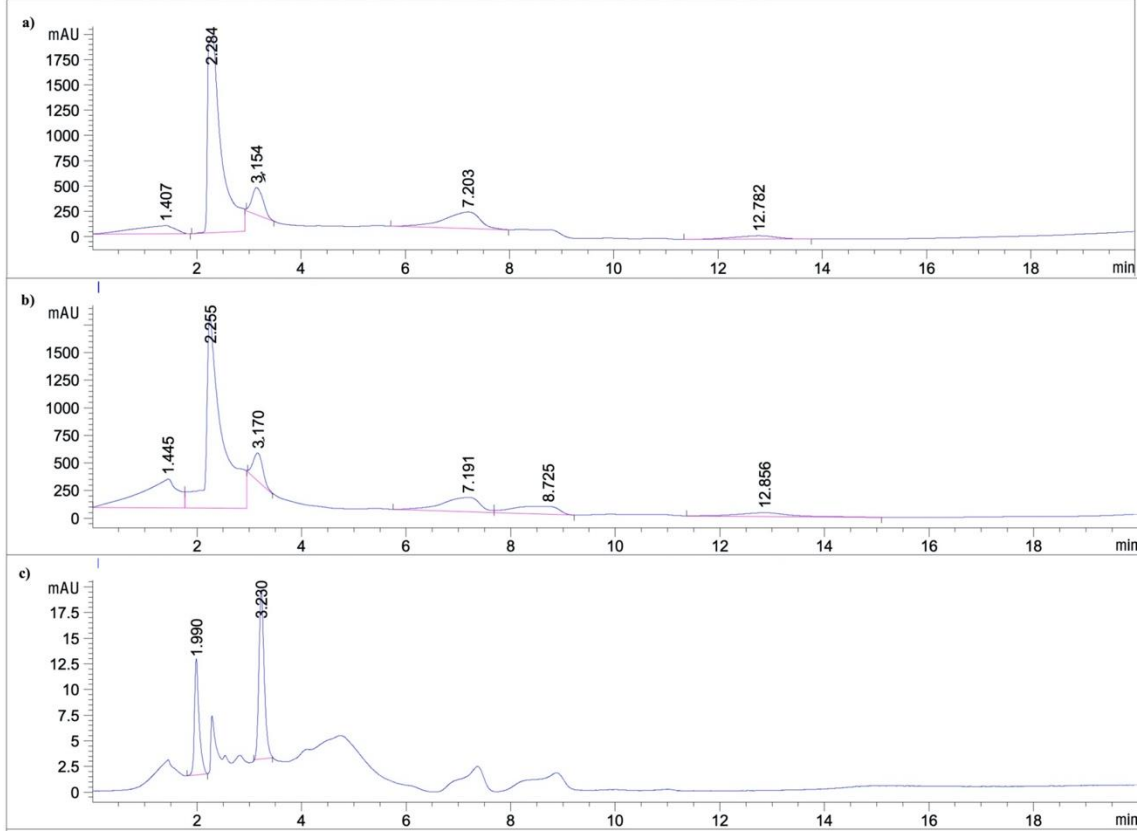
Tablo 2. Baskılama faktörü (IF), seçicilik katsayısı ve bağıl seçicilik değerleri.

IF değerleri	100 ppm	250 ppm	500 ppm	750 ppm	1000 ppm	1500 ppm
Q(MIP)/Q(NIP)	2,71	1,96	1,97	1,48	1,13	1,27
	$K$ (MIP)		$K$ (NIP)		$K'$	
<b>GA-HB</b>	1,63		0,43		3,80	
<b>GA-KA</b>	1,64		0,36		4,57	
<b>GA-PCA</b>	0,48		0,22		2,24	

### 3.4. Gerçek örneklerden GA-MIP'ler ile GA uzaklaştırılması

Yeşil çay, siyah çay ve karanfil örnekleri ile yapılan adsorpsiyon deneyleri sonucu elde edilen  $Q$  değerleri sırayla, 1,5; 27,0 ve 43,2 mg/g GA-MIP olarak hesaplanmıştır. Yeşil çay örneklerinden GA adsorpsiyonunun siyah çay örneklerine kıyasla düşük olması yeşil çay ve siyah çay örneklerinin ortam pH'larının farklı olmasıyla açıklanabilir. Yeşil çayın ortam pH'sı 7-10 aralığında değişirken, siyah çayın ortam pH'sı 4-5 civarındadır. Çözücü etkisi sonuçlarına göre, pH değeri arttıkça GA adsorpsiyonunun azaldığı

gözlenmekte, bu nedenle yeşil çay örneklerinden GA adsorpsiyonunun düşük olduğu düşünülmektedir. GA-MIP'lerden geri alım işlemi sonucunda % geri alım oranları %63,5; %60,7 ve %95,3 olarak belirlenmiştir. En etkin GA adsorpsiyon ve geri alım işleminin karanfil örneğiyle gerçekleştiği belirlenmiştir. Karanfil örneklerinin adsorpsiyon öncesi ve sonrasına, ve geri alma çözeltisine ait HPLC kromatogramları Şekil 6'da görülmektedir. Şekil 6c incelendiğinde, geri alma çözeltisinde GA'ya ait pik 3.2 dk'da görülmekte ve seçici şekilde GA'nın geri alındığı gözlenmektedir.



Şekil 6. Karanfil örneklerinin adsorpsiyon öncesi<sup>a</sup>, adsorpsiyon sonrası<sup>b</sup> ve geri alma çözeltilerine ait HPLC kromatogramları.

GA, farmasötik ve biyomedikal endüstrilerinde çok kullanılan doğal antioksidanlardan biridir. Anti-bakteriyel, anti-viral, kardiyovasküler hastalıklara karşı koruyucu, anti-inflamatuar, anti-tümör, anti-oksidan gibi etkileri nedeniyle besinlerde, ilaçlarda ve kozmetik ürünlerinde yaygın olarak kullanılmakta ve bu nedenle, dünya genelindeki yıllık talebi oldukça yüksektir. GA üretimi için yüksek miktarlarda kimyasal gerekmekte ve toksik atıklara neden olmaktadır. Meyve ve çeşitli bitkilerde bol miktarda bulunmasına rağmen, doğal materyallerin kompleks yapısı nedeniyle GA'nın seçici olarak ekstraksiyonu mümkün değildir. Bu nedenle, doğal kaynaklarından seçici olarak GA'nın ayrılması için MIP'ler gibi fonksiyonel materyaller kullanılması önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmada, AAM monomeri kullanılarak emülsiyon polimerizasyonu yöntemiyle GA baskılanmış ve baskılanmamış polimerik yapılar hazırlanmış ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. GA adsorpsiyonunun optimizasyon deneylerinde, MIP'lerin seçiciliğini gösteren IF faktörünün tüm derişimlerde 1'de büyük olduğu belirlenmiş, bu durum MIP'lerin NIP'lere göre GA'yı daha seçici adsorpladığını göstermektedir. GA'nın analogları olan HB, KA ve PCA ile yarışmalı adsorpsiyonu çalışmaları sonucunda tüm analoglar için bağıl seçicilik değerlerinin 2-4

aralığında olması GA baskılama işleminin başarıyla gerçekleştirildiğini kanıtlamaktadır. GA içeriği bakımından zengin olan yeşil, siyah çay ve karanfil örnekleri kullanılarak gerçek örnek uygulamaları yapılmış, özellikle karanfil örneklerinde GA seçici adsorpsiyonunun ve geri alımının yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Geri alım çözeltisinin HPLC kromatogramında GA'ya ait pik dışında pik bulunmaması GA-MIP'lerin seçici adsorpsiyonunu kanıtlamaktadır. Kolay, hızlı bir yöntemle hazırlanan GA-MIP'lerden oldukça düşük miktarlarda kullanılarak seçici olarak GA'nın uzaklaştırılması/saflaştırılması, MIP'lerin endüstriyel amaçlı kullanımı için öncül niteliktedir.

## Kaynaklar

- [1] Hsieh, S. C., Wu, C. C., Hsu, S. L. ve Yen, J. H., Molecular mechanisms of gallic acid-induced growth inhibition, apoptosis, and necrosis in hypertrophic scar fibroblasts, **Life Sciences**, 179, 130- 138, (2017).
- [2] Bhawani, S. A., Sen, T. S. ve Ibrahim, M. N. M., Synthesis of molecular imprinting polymers for extraction of gallic acid from urine, **Chemistry Central Journal**, 12,19-25, (2018).
- [3] Abdel-Hamid, R., Bakr, A., Newair, E. F. ve Garcia, F., Simultaneous voltammetric determination of gallic and protocatechuic acids in mango juice using a reduced graphene oxide-based electrochemical sensor, **Beverages**, 5, 17-28, (2019).
- [4] Badea, M., Modugno, F., Floroian, L., Tit, D. M., Restani, P., Bungau, S., Iovan, C., Badea, G. E. ve Aleya, L., Electrochemical strategies for gallic acid detection: Potential for application in clinical, food or environmental analyses, **Science of the Total Environment**, 672, 129-140, (2019).
- [5] Vissers, M. N., Zock, P. L. ve Katan, M. B., Bioavailability and antioxidant effects of olive oil phenols in humans: a review, **European Journal of Clinical Nutrition**, 58, 955-965, (2004).
- [6] Zhu, X. F., Cao, Q. E., Yang, X. Q., Li, F., Wang, G. S. ve Ding, Z. T., Preparation and recognition mechanism of gallic acid imprinted polymers, **Helvetica**, 92(1), 78-87, (2009).
- [7] Dos Santos, J. F. S., Tintino, S. R., de Freitas, T. S., Campina, F. F., de Menezes, I. R., Siqueira- Júnior, J. P., Coutinho, H. D. M. ve Cunha, F. A. B., In vitro e in silico evaluation of the inhibition of *Staphylococcus aureus* efflux pumps by caffeic and gallic acid, **Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases**, 57, 22–28, (2018).
- [8] You, H. L., Huang, C. C., Chen, C. J., Chang, C. C., Liao, P. L. ve Huang, S. T., Anti-pandemic influenza A (H1N1) virus potential of catechin and gallic acid, **Journal of the Chinese Medical Association**, 81, 458-468, (2018).
- [9] Abdel-Hamid, R. ve Newair, E. F., Adsorptive stripping voltammetric determination of gallic acid using an electrochemical sensor based on polyepinephrine/glassy carbon electrode and its determination in black tea sample, **Journal of Electroanalytical Chemistry**, 704, 32-37, (2013).
- [10] Asfaram, A., Ghaedi, M. ve Dashtian, K., Rapid ultrasound-assisted magnetic microextraction of gallic acid from urine, plasma and water samples by HKUST-1-MOF-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-GA-MIP-NPs: UV–vis detection and optimization study, **Ultrasonics Sonochemistry**, 34, 561-570, (2017).



- [11] Mudnic, I., Modun, D., Rastija, V., Vukovic, J., Brizic, I., Katalinic, V., Kozina, B., Medic-Saric, M. ve Boban, M., Antioxidant and vasodilatory effects of phenolic acids in wine, **Food Chemistry**, 119, 1205–1210, (2010).
- [12] Lim, K. S., Park, J. K., Jeong, M. H., Bae, I. H., Park, D. S., Shim, J. W., Kim, J. H., Kim, H. K., Kim, S. S., Sim, D. S., Hong, Y. J., Kim, J. H. ve Ahn, Y., Anti-inflammatory effect of gallic acid-eluting stent in a porcine coronary restenosis model, **Acta Cardiologica Sinica**, 34, 224-232, (2018).
- [13] Zhang, J., Li, B., Yue, H., Wang, J. ve Zheng, Y., Highly selective and efficient imprinted polymers based on carboxyl-functionalized magnetic nanoparticles for the extraction of gallic acid from pomegranate rind, **Journal of Separation science**, 41(2), 417-602, (2018).
- [14] Asnaashari, M., Farhoosh, R. ve Sharif, A., Antioxidant activity of gallic acid and methyl gallate in triacylglycerols of Kilka fish oil and its oil-in-water emulsion, **Food Chemistry**, 159, 439-444, (2014).
- [15] Hsu, S. S., Chou, C. T., Liao, W. C., Shieh, P., Kuo, D. H., Kuo, C. C., Jan, C. R. ve Liang, W. Z., The effect of gallic acid on cytotoxicity, Ca<sup>2+</sup> homeostasis and ROS production in DBTRG-05MG human glioblastoma cells and CTX TNA2 rat astrocytes, **Chemico-Biological Interactions**, 252, 61-73, (2016).
- [16] Suwalsky, M., Colina, J., Gallardo, M. J., Jemiola-Rzeminska, M., Strzalka, K., Manrique- Moreno, M. ve Sepúlveda, B., Antioxidant capacity of gallic acid in vitro assayed on human erythrocytes, **The Journal of Membrane Biology**, 249, 769-779, (2016).
- [17] Huang, D. W., Chang, W. C., Wu, J. S., Shih, R. W. ve Shen, S. C., Gallic acid ameliorates hyperglycemia and improves hepatic carbohydrate metabolism in rats fed a high-fructose diet, **Nutrition Research**, 36, 150-160, (2016).
- [18] Kong, F., Su, Z., Guo, X., Zeng, F. ve Bi, Y., Antidiabetic and lipid-lowering effects of the polyphenol extracts from the leaves of *Clausena lansium* (Lour.) skeels on streptozotocin-induced type 2 diabetic rats, **Journal of Food Science**, 83, 212-220, (2018).
- [19] Civenni, G., Iodice, M. G., Nabavi, S. F., Habtemariam, S., Nabavi, S. M., Catapano, C. V. ve Daglia, M., Gallic acid and methyl-3-O- methyl gallate: a comparative study on their effects on prostate cancer stem cells, **RSC Advances**, 5, 63800-63806, (2015).
- [20] Chen, Y. J., Lee, Y. C., Huang, C. H. ve Chang, L. S., Gallic acid-capped gold nanoparticles inhibit EGF-induced MMP-9 expression through suppression of p300 stabilization and NFκB/c-Jun activation in breast cancer MDA-MB-231 cells, **Toxicology and Applied Pharmacology**, 310, 98-107, (2016).
- [21] Heidarian, E., Keloushadi, M., Ghatreh-Samani, K. ve Valipour, P., The reduction of IL-6 gene expression, pAKT, pERK1/2, pSTAT3 signaling pathways and invasion activity by gallic acid in prostate cancer PC3 cells, **Biomedicine & Pharmacotherapy**, 84, 264-269, (2016).
- [22] Kim, S. H., Jun, C. D., Suk, K., Choi, B. J., Lim, H. J., Park, S., Lee, S. H., Shin, H. Y., Kim, D. K. ve Shin, T. Y., Gallic acid inhibits histamine release and pro-inflammatory cytokine production in mast cells, **Toxicological Sciences**, 91, 123-131, (2006).
- [23] Kim, Y. J., Antimelanogenic and antioxidant properties of gallic acid, **Biological and Pharmaceutical Bulletin**, 30, 1052-1055, (2007).
- [24] Jagan, S., Ramakrishnan, G., Anandakumar, P., Kamaraj, S. ve Devaki, T., Antiproliferative potential of gallic acid against diethylnitrosamine-induced rat

- hepatocellular carcinoma, **Molecular and Cellular Biochemistry**, 319, 51-59, (2008).
- [25] Costa, A. M., Souza, C. G. M., Brach, A., Kadowski, M. K., Souza, A. C. S., Oliveira, R. F. ve Peralta, R. M., Production of tannase and gallic acid by *Aspergillus tamarii* in submerged and solid state cultures, **African Journal of Biomedical Research**, 7, 197-202, (2013).
- [26] Bajpai, B. ve Patil, S., A new approach to microbial production of gallic acid, **Brazilian Journal of Microbiology**, 39, 708-711, (2008).
- [27] Lokeshwari, N. ve Reddy, S. Microbiological production of gallic acid by a mutant strain of *Aspergillus oryzae* using cashew husk, **Pharmacophore**, 1, 112-122, (2010).
- [28] Pardeshi, S., Dhodapkar, R. ve Kumar, A., Molecularly imprinted microspheres and nanoparticles prepared using precipitation polymerisation method for selective extraction of gallic acid from *Embllica officinalis*, **Food Chemistry**, 146, 385-393, (2014).
- [29] Hu, X., Xie, L. W., Guo, J. F., Li, H., Jiang, X. Y., Zhang, Y. P. ve Shi, S. Y., Hydrophilic gallic acid-imprinted polymers over magnetic mesoporous silica microspheres with excellent molecular recognition ability in aqueous fruit juices, **Food Chemistry**, 179, 206-212, (2015).
- [30] Hao, Y., Gao, R. X., Liu, D. C., Tang, Y. H. ve Guo, Z. J., Selective extraction of gallic acid in pomegranate rind using surface imprinting polymers over magnetic carbon nanotubes, **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, 407, 7681-7690, (2015).
- [31] Puoci, F., Scoma, A., Cirillo, G., Bertin, L., Fava, F. ve Picci, N., Selective extraction and purification of gallic acid from actual site olive mill wastewaters by means of molecularly imprinted microparticles, **Chemical Engineering Journal**, 198-199, 529-535, (2012).
- [32] Schwarz, L. J., Danylec, B., Harris, S. J., Boysen, R. I. ve Hearn, M. T. W., Preparation of molecularly imprinted polymers for the selective recognition of the bioactive polyphenol, (E)-resveratrol, **Journal of Chromatography A**, 1218, 2189-2195, (2011).
- [33] Cirillo, G., Parisi, O. I., Curcio, M., Puoci, F., Iemma, F., Spizzirri, U. ve Picci, G. N., Molecularly imprinted polymers as drug delivery systems for the sustained release of glycyrrhizic acid, **Journal of Pharmacy and Pharmacology**, 62, 577-582, (2010).
- [34] Yücebaş, B. B., Yaman, Y. T., Bolat, G., Özgür, E., Uzun, L. ve Abaci, S., Molecular imprinted polymer based electrochemical sensor for selective T detection of paraben, **Sensors & Actuators: B. Chemical**, 305, 127368, (2020).
- [35] Inanan T., Tüzmen, N., Akgöl, S. ve Denizli, A., Selective cholesterol adsorption by molecular imprinted polymeric nanospheres and application to GIMS, **International Journal of Biological Macromolecules**, 92, 451-460, (2016).
- [36] Can Agca A., Batcıoğlu, K. ve Sarer, E., Evaluation of gallic acid, EGCG contents and antiradical activity of green tea and black tea extracts, Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi, 44(1), 50-60, (2020).
- [37] Adaromola, B. ve Onigbinde, A., Effect of extraction solvent on the phenolic content, flavonoid content and antioxidant capacity of clove bud, **IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences**, 11(3), 33-38, (2016).

- [38] Gaumet, M., Vargas, A., Gurny, R. ve Delie, F., Nanoparticles for drug delivery: the need for precision in reporting particle size parameters, **European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics**, 69(1), 1-9, (2008).
- [39] Byun, H. S. ve Chun, D., Adsorption and separation properties of gallic acid imprinted polymers prepared using supercritical fluid technology, **The Journal of Supercritical Fluids**, 120, 2, 249-257, (2017).
- [40] Doostmohammadi, A., Monshi, A., Salehi, R., Fathi, M. H., Golniya, Z. ve Daniels, A. U., Bioactive glass nanoparticles with negative zeta potential, **Ceramics International**, 37, 2311-2316, (2011).

# Standart olmayan sonlu fark metodu ile dağılımlı mertebeden SVIR modelinin nümerik analizi

Mehmet KOCABIYIK<sup>1,2,\*</sup>, Mevlüde YAKIT ONGUN<sup>3</sup>,  
İlkem TURHAN ÇETİNKAYA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Burdur, Türkiye

<sup>2</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Isparta, Türkiye

<sup>4</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Kütahya, Türkiye

Geliş Tarihi (Received Date): 02.11.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 11.12.2020

## Öz

Çoğu bilim dalındaki matematiksel modellemelerde diferansiyel denklemler kullanılmaktadır. Ancak genelde kullanılan adi, kısmi ve kesirli mertebeden diferansiyel denklemlerin kullanımı yerine bu çalışmada daha kapsamlı bir diferansiyel denklem olan dağılımlı (distributed) mertebeden diferansiyel denklem ele alınmıştır. Bu çalışmada dağılımlı mertebeden diferansiyel denklem yardımı ile epidemik model olan SVIR (Susceptible, Vaccinated, Infectious, Recovered) modeli tanımlanmış ve nümerik çözümü standart olmayan sonlu fark metodu (NSFD) ile araştırılmıştır. Bulaşıcı hastalıkların incelenmesinde kullanılan bu model aynı zamanda içinde barındırdığı  $V$  terimi ile hastalık evresinde aşılamanın etkisini ve gelişimini ortaya koymaktadır. Dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerin kullanılmasında ki temel düşünce hem bu tip denklemlerin bir nevi adi ve kesirli diferansiyel denklemlerin genel hali olması hem de içinde tanımlanan yoğunluk fonksiyonu ile farklı durumlar hakkında tek bir denklem ile yorum yapılabilmesindedir. SVIR modelinin nümerik çözümü ve analizi çalışma içerisinde yapılmış ve sonrasında ayrıklaştırılmış sisteme ait kararlılık analizi ifade edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde dağılımlı mertebeden modellemenin bu tip epidemik modellemelerde kullanımının mümkün olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemler, SVIR epidemik model, aşılama.

\* Mehmet KOCABIYIK, mkocabiyik@mehmetakif.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-7701-6946>

Mevlüde YAKIT ONGUN, mevludeyakit@sdu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-2363-9395>

İlkem TURHAN ÇETİNKAYA, ilkem.turhan@dpu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-5520-310X>

## Numerical analysis of distributed order SVIR model by nonstandard finite difference method

### Abstract

*Differential equations are used in mathematical modelling in many disciplines of science. In this study, distributed order differential equations which are more comprehensive are considered instead of the ordinary, partial and fractional order differential equations. SVIR (Susceptible, Vaccinated, Infectious, Recovered) model which is an epidemic model is defined with the help of distributed order differential equation and numerical solution is investigated by (NSFD). The model used in examination of contagious disease exhibits the effect and improvement of vaccination with the term  $V$ . The basic idea of the usage of distributed order differential equations is that these kinds of differential equations are the general case of ordinary and partial differential equations in some way and these equations leads to make interpretation with an only equation about different cases with the help of the intensity function included. Numerical solution and analysis of SVIR model are done in the study and later on, stability analysis of the discrete system is presented. In consequence of these studies, it is seen that the usage of the distributed order modelling is possible for this kind of epidemic modelling.*

**Keywords:** *Distributed order differential equations, SVIR epidemic model, vaccination.*

### 1. Giriş

Aşılama bilindiği üzere kızamık, tetanos, tüberküloz gibi birçok hastalığı kontrol altına almak için kullanılan bir yöntemdir. Bu nedenden dolayı da çözümün farklı evrelerde ve durumlarda etkisini bilmek oldukça önemlidir.

Bulaşıcı hastalıklara ait modelleme ilk olarak Kermack ve Mckendrick tarafından ortaya konmuştur. Bu çalışmada Kermack ve Mckendrick total popülasyonu SIR (duyarlı, enfekte, iyileşmiş) şeklinde ele almıştır [1]. Sonrasında farklı epidemik modeller için farklı modellemeler kullanılmıştır. Liu vd. ise çalışmasında epidemik modellere aşı stratejilerini de ekleyerek SVIR modelinin oluşturmuştur [2]. Daha sonra bu tip aşılama modelinin çözümü ve analizi hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Kribs ve Velasco çalışmalarında çoklu epidemik modellerde basit aşı modelini ele alıp çözümünü araştırmışlardır [3]. Alexander vd. ise gribin bulaşma anında oluşan dinamikleri için bir aşılama modeli üzerinde çalışmışlardır [4]. Bir diğer çalışmada ise Li vd. aşılama ile epidemik modellerde kararlılık analizi konusunu ele almışlardır [5].

Dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemler son senelerde oldukça önem kazanan bir alan olmuştur. Çünkü dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemler içinde barındırdığı yoğunluk fonksiyonu ile adi ve kesirli mertebeden diferansiyel denklemler için de bir nevi çözüm oluşturmaktadır. Sadece bu tip denklemlerin genel hali olması nedeniyle değil, yoğunluk fonksiyonunun farklı seçimi ile rahatlıkla farklı durumlarda çözümün nasıl değiştiği görülebilmektedir.

Endemik modellerin farklı evrelerinde duyarlı, iyileşmiş veya enfekte bireyler üzerinde hastalığın gelişim durumunun önceden bilinmesi bireylerin hastalığa karşı vereceği

tepkiyi ölçmede oldukça önemlidir. Dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerde tam olarak tek bir denklem ile farklı evreler hakkında bilgi vereceğinden modelin bu tip diferansiyel denklemlerle ele alınması istenen yorum kabiliyetini sağlamaktadır. Bu yorum kabiliyeti ihtiyacından dolayı aşılı modeli bu tip diferansiyel denklemler ile ele alınmıştır.

Bu çalışma için, aşılı stratejilerine ait Liu vd. [2] tarafından oluşturulmuş modelin dağılımlı mertebeden hali aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}
 D_t^{v(\alpha)} S(t) &= a - aS(t) - bS(t)I(t) - cS(t) \\
 D_t^{v(\alpha)} V(t) &= cS(t) - dV(t)I(t) - eV(t) - aV(t) \\
 D_t^{v(\alpha)} I(t) &= bS(t)I(t) + dV(t)I(t) - fI(t) - aI(t) \\
 D_t^{v(\alpha)} R(t) &= eV(t) + fI(t) - aR(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Burada

$S(t)$ : Duyarlı bireylerin zamana bağlı yoğunluk fonksiyonu,

$V(t)$ : Aşılama periyodunda başlayan aşılıların zamana bağlı yoğunluk fonksiyonu,

$I(t)$ : Enfekte olmuş bireylerin zamana bağlı yoğunluk fonksiyonu,

$R(t)$ : İyileşmiş bireylerin yoğunluk fonksiyonu

olarak sembolize edilmiştir.

Burada,  $a$  popülasyonun iyileşme ve doğal ölüm oranı iken  $b$  ise duyarlı ve enfekte bireyler arasındaki geçiş katsayısıdır.  $c$  parametresi ise duyarlı bireylerin aşılama sürecine geçme oranı olarak tanımlanmıştır. Aşılanağın bağışıklık kazanmadan önce enfekte kişilerle temas ettiğinde hastalığın bulaşma oranı  $d$  ifadesi ile tanımlanmıştır. Aşılanağın iyileşmiş popülasyona geçme oranı  $e$  iken,  $f$  ise enfekte bireylerin iyileşme oranıdır.

Epidemik bir model olan SVIR modelinde de bu tip dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerin kullanımı çözümün farklı aşamalarında yorum kısmında oldukça kolaylık sağlamaktadır. SVIR modelinin çözümü ise içerisinde bulundurduğu  $V$  yoğunluk fonksiyonu nedeniyle dikkat çekicidir. Çünkü bu yoğunluk fonksiyonu aşılama evresinde ki takip için kullanılmaktadır.

Yeni tanımlanan ve lineer olmayan (1) sistemi içerisinde bulunan dağılımlı mertebeden türev kavramı ise ilk defa Caputo tarafından tanımlanmış ve sonrasında da yine Caputo bu konu hakkında farklı çalışmalar ile kullanım alanını genişletmiştir [6-9]. Hartley ve Lorenzo ise sürekli dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemleri kesirli sistemlerin çözümünde kullanmıştır [10]. Bagley ve Torvik çalışmalarında bu tip denklemlerin çözümünü ve varlığını araştırmıştır [11,12].

Farklı alanlarda kullanımı ile oldukça yaygın hale gelen dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerin varlık ve teklğine ait çalışma Ford ve Morgado tarafından ortaya konmuştur [13]. Nümerik çözümler ile ilgili ise Diethelm ve Ford, Katsikadelis, Li ve Wu gibi yazarların çalışmaları olmuştur [14-16]. Son olarak bu tip denklemlerin kararlılık analizi ile ilgili Aminiknah vd., Najafi vd. ve Refahi vd.'nin çalışmaları bulunmaktadır [17-19].

Bu makalede öncelikle 2. Bölümde dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemler için temel tanım ve teoremlere yer verilmiştir. Ek olarak yine bu bölümde modelin nümerik çözümü araştırılırken ayrıklaştırma için kullanılacak olan NSFD metoduna ait bazı özet bilgiler bulunmaktadır. 3. Bölümde ise, tanımlanan bu yeni tip dağılımlı mertebeden SVIR modeline ait ayrıklaştırma NSFD metodu yardımı ile yapılmıştır. Kararlılık analizi ile gerekli bilgiler yine bu bölümde verilip sonrasında ayrıklaştırılmış sistemin kararlılık analizine yapılmıştır. Ayrıklaştırılması yapılan sisteme ait nümerik simülasyonlar ve parametre değerleri ile birlikte kararlılık analizi 4. Bölümde yapılmıştır. 5. ve son bölümde ise elde edilen bilgiler ışığında sonuçların değerlendirilmesi yer almaktadır.

## 2. Bazı temel tanımlar

Dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemler için en önemli ifadelerden biri de kesinlikle kesirli mertebeden türevlerdir. Bu nedenle ilk olarak bazı kesirli türev tanımları, sonrasında ise dağılımlı mertebeden türev ve ayrıklaştırma için kullanılacak NSFD yöntemi hakkında temel bazı tanımlar yer alacaktır. Bölümde değinilen konulara ait detaylı bilgiler için [6,9,20-27] kaynaklarının incelenmesi faydalı olacaktır.

**Tanım 2.1:**  $\alpha$  mertebeden kesirli Caputo türevi,

$$D_C^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \int_\alpha^t \frac{f^{(n)}(z)}{(t - z)^{\alpha - n + 1}} dz$$

şeklinde tanımlanır. Burada,  $n \in \mathbb{N}^+$  için  $n - 1 < \alpha \leq n$  olmak üzere  $f(t)$ ,  $[a, b]$  aralığında integrallenebilir bir fonksiyon ve  $\Gamma(\cdot)$  ise Gamma fonksiyonudur [27].

**Tanım 2.2:**  $n \in \mathbb{N}^+$  için  $n - 1 < \alpha \leq n$  olmak üzere  $g(t)$ ,  $[a, b]$  aralığında integrallenebilir bir fonksiyon olsun.

$$D_{RL}^\alpha g(t) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_\alpha^t \frac{g^{(n)}(z)}{(t - z)^{\alpha - n + 1}} dz$$

şeklinde  $\alpha$  mertebeden kesirli Riemann-Liouville türevi tanımlanır [27].

**Tanım 2.3:**  $g^{(z)}(t)$  fonksiyonu, kapalı  $[a, t]$  aralığında sürekli ve  $z = 1, 2, \dots, n + 1$  türevlerine sahip olsun. Bu halde  $n < k < n + 1$  için Grünwald-Letnikov kesirli türevi,

$$D_{GL}^\alpha g(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{i=0}^n (-1)^i \binom{k}{i} g(t - ih)$$

şeklinde tanımlanır [27].

**Tanım 2.4:** Dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerin türev tanımı için öncelikle

$$D_t^{v(\alpha)} f(t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} v(\alpha) D_t^\alpha f(t) d\alpha$$

şeklinde bir integral operatörü tanımlamak gerekir. Bu tanımda  $\alpha \in (\omega_1, \omega_2)$  olup  $\int_{\omega_1}^{\omega_2} v(\alpha) = l > 0$  olmalıdır. Operatörde tanımlı  $D_t^\alpha f(t)$  kesirli türev operatörü olup yerine Caputo, Riemann-Liouville ya da Grünwald-Letnikov kullanılabilir. Operatördeki diğer önemli bir ifade  $v(\alpha)$  ise dağılımlı mertebeden türevin yoğunluk fonksiyonudur. Bu fonksiyonun seçimi adi, kesirli ya da çok daha farklı durumlar için yorum kabiliyeti sağlamaktadır [6-8].

**Tanım 2.5:** Tanım (2.4) de ifade edilen integral operatör ile dağılımlı mertebeden türevler,

$$D_t^{v(\alpha)} f(t) = \sum_{i=1}^n \alpha^i \int_{\omega_1}^{\omega_2} v_i(\alpha) D_t^{i-\alpha} f(t) d\alpha + \sum_{j=0}^n b_j f^j(t)$$

şeklinde tanımlanır [6-8].

Bu tanımlardan sonra dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümleri için kullanılacak olan yaklaşık Grünwald-Letnikov türev formülü,

$$D_{GL}^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\alpha} \sum_{i=0}^n (-1)^i \binom{\alpha}{i} f(t - ih)$$

biçimindedir [21]. Bu tanımda gerekli ayrıklaştırma ve düzenlemeler yapılırsa,

$$D_t^\alpha f(t) = \sum_{i=0}^n p_i^\alpha f(t_{n-r}), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

denklemini bulunur ki burada  $i = 1, 2, 3, \dots$  için  $p_i^\alpha = \left(1 - \frac{1+\alpha}{i}\right) p_{i-1}^\alpha$ ,  $v = h^{-\alpha}$  şeklindedir ve  $h$  oldukça küçük seçilmiştir [20,26].

Ayrıklaştırma için kullanılacak olan standart olmayan sonlu fark şemaları ilk olarak Mickens tarafından tanımlanmıştır [22]. Mickens bu şemalar ile klasik nümerik çözüm yöntemlerindeki kararsızlıkları ortadan kaldırmaya çalışmıştır. Bu metotta uygun payda (denominator) fonksiyonu seçimi ile çıkabilecek negatif çözüm olasılığı ve kararsızlık problemlerinin etkisiz hale getirilebileceğini göstermiştir. Genel olarak NSFD yöntemi için,  $\gamma$ : parametre olmak üzere  $\frac{dy}{dt} = K(\gamma, y)$  biçimindeki adi diferansiyel denklemi ele alalım. Bu denklem için NSFD şeması aşağıdaki biçimdedir:

$$t \rightarrow t_n, \quad K(y) \rightarrow K(y_n), \quad y(t) \rightarrow y(t_n), \quad \frac{dy}{dt} \rightarrow \frac{y_{n+1} - y_n}{\varphi}$$

Bu şemada  $\varphi$  payda fonksiyonudur ve  $\varphi = \frac{1 - e^{-ph}}{p}$  şeklinde seçilebilir. Payda fonksiyonunun seçimi için [28] incelenmelidir. Payda fonksiyonu olan  $\varphi$ ,  $h$  adım aralığına ve denge noktası ile hesaplanacak olan  $p$  değişkenine bağlıdır. Bu metot ve Grünwald-Letnikov yaklaşık türev formülü ile kesirli mertebeden türevlere de aynı şema uygulanabilir. Sonlu fark şemaları ve NSFD hakkında daha detaylı bilgi için [21-25,28-32] kaynaklarına bakılabilir.



### 3. Ayırıklaştırma ve kararlılık analizi

Bu bölümde, (1) ile tanımlanmış dağılımlı mertebeden diferansiyel denklem sisteminin yaklaşık çözümlerinin bulunabilmesi amacıyla ikinci bölümde ele alınan ve ayırıklaştırma sürecinde gerekli olan standart olmayan sonlu fark şeması ile dağılımlı mertebeden türevler için yaklaşık Grünwald-Letnikov türev tanımı kullanılmıştır. Ek olarak dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerde oldukça fazla karşılaşılan quadrature formülü ayırıklaştırma içerisinde yer almıştır. Bu bilgiler ışığında (1) diferansiyel denklem sisteminin son hali

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^Z \frac{v(\alpha_k)}{Z} \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i} &= a - aS_{n+1} - bS_{n+1}I_n - cS_{n+1} \\ \sum_{k=1}^Z \frac{v(\alpha_k)}{Z} \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i} &= cS_n - dV_{n+1}I_n - eV_{n+1} - aV_{n+1} \\ \sum_{k=1}^Z \frac{v(\alpha_k)}{Z} \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i} &= bS_nI_{n+1} + dV_nI_{n+1} - fI_{n+1} - aI_{n+1} \\ \sum_{k=1}^Z \frac{v(\alpha_k)}{Z} \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i} &= eV_n + fI_n - aR_{n+1} \end{aligned} \quad (2)$$

şeklinde olacaktır. Burada,  $j = 1,2,3,4$  ve  $0 < \alpha_k < 1$  için  $p_0^{\alpha_k} = (\varphi_j(h))^{-\alpha_k}$  dir. Standart olmayan sonlu fark şeması içerisinde tanımlanan denominator (payda) fonksiyonları, aşağıdaki şekilde seçilmiştir:

$$\begin{aligned} \varphi_1(h) &= \frac{e^{(a+c)h} - 1}{a + c}, \quad \varphi_2(h) = \frac{e^{(a+e)h} - 1}{a + e}, \\ \varphi_3(h) &= \frac{e^{(a+f)h} - 1}{a + f}, \quad \varphi_4(h) = \frac{e^{ah} - 1}{a}. \end{aligned}$$

Burada

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i} &= p_0^{\alpha_k} S_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i} = (\varphi_1(h))^{-\alpha_k} S_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i}, \\ \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i} &= p_0^{\alpha_k} V_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i} = (\varphi_2(h))^{-\alpha_k} V_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i}, \\ \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i} &= p_0^{\alpha_k} I_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i} = (\varphi_3(h))^{-\alpha_k} I_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i}, \\ \sum_{i=0}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i} &= p_0^{\alpha_k} R_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i} = (\varphi_4(h))^{-\alpha_k} R_{n+1} + \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i}, \end{aligned}$$

düzenlemeleri her bir denklem için yapıldıktan sonra (2) sisteminde bu ifadelerin yerine yazılması ve yalnız bırakma işleminden sonra denklemin ayırıklaştırılmış olarak son hali,

$$\begin{aligned} S_{n+1} &= \frac{a - H(p_1^{\alpha_k} S_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i})}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c + bI_n)}, \\ V_{n+1} &= \frac{cS_n - H(p_1^{\alpha_k} V_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i})}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e + dI_n)}, \\ I_{n+1} &= \frac{-H(p_1^{\alpha_k} I_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i})}{((U_3)^{-\alpha_k} + a + f - bS_n - dV_n)}, \\ R_{n+1} &= \frac{eV_n + fI_n - H(p_1^{\alpha_k} R_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i})}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)} \end{aligned} \quad (3)$$

şeklinde olur. Burada,  $j = 1,2,3,4$  için  $\sum_{k=1}^Z \frac{v(\alpha_k)}{Z} = H$  ve  $\sum_{k=1}^Z \frac{v(\alpha_k)}{Z} (\varphi_j(h))^{-\alpha_k} = U_j$  olarak kullanılmıştır.

**Teorem 3.1.** *Ayrıklaştırılmış (3) sisteminde pozitif başlangıç koşulları ve pozitif parametrelerin seçimi ile aşağıdaki özellikler sağlanırsa elde edilecek sonuçlar pozitif olmaktadır.*

- i)  $a > H(p_1^{\alpha_k} S_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i})$
- ii)  $cS_n > H(p_1^{\alpha_k} V_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i})$
- iii)  $(U_3)^{-\alpha_k} + a + f < bS_n + dV_n$
- iv)  $eV_n + fI_n > H(p_1^{\alpha_k} R_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i})$

**İspat**

Pozitif başlangıç koşulları ve pozitif parametreler seçimlerine ek olarak  $\frac{a-H(p_1^{\alpha_k} S_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i})}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + bI_n})} > 0$  olması için  $a > H(p_1^{\alpha_k} S_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i})$  koşulu sağlanmalıdır.  $V_{n+1}$  teriminin pozitifliği için ayrıklaştırılmış halinde payda kısmının pozitif olduğu görüldüğünden pay kısmının negatifliği için  $cS_n > H(p_1^{\alpha_k} V_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i})$  ifadesi gerçekleşmelidir. Sırasıyla elde edilen  $I_{n+1}$  ve  $R_{n+1}$  terimlerinin pozitifliği için ise  $(U_3)^{-\alpha_k} + a + f < bS_n + dV_n$  ve  $eV_n + fI_n > H(p_1^{\alpha_k} R_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i})$  ifadeleri sağlandığında pozitif başlangıç koşulları ve parametreler ile çözümler de pozitif olmaktadır.

Şimdi modelin kararlılık analizi kısmında lazım olacak olan  $J$  Jacobian matrisi, (3) ayrıklaştırılmış sistemi için:

$$J(S, V, I, R) = \begin{pmatrix} j_{11} & 0 & j_{13} & 0 \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & 0 \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & 0 \\ 0 & j_{42} & j_{43} & j_{44} \end{pmatrix} \tag{4}$$

biçimindedir ki burada

$$\begin{aligned} j_{11} &= \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c + bI_n)}, \\ j_{13} &= -b \left( \frac{a - H(p_1^{\alpha_k} S_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i})}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c + bI_n)^2} \right), \\ j_{21} &= \frac{c}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e + dI_n)}, \quad j_{22} = \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e + dI_n)}, \\ j_{23} &= -d \left( \frac{cS_n - H(p_1^{\alpha_k} V_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i})}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e + dI_n)^2} \right), \\ j_{31} &= b \left( \frac{-H(p_1^{\alpha_k} I_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i})}{((U_3)^{-\alpha_k} + a + f - bS_n - dV_n)^2} \right), \quad j_{32} = d \left( \frac{-H(p_1^{\alpha_k} I_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i})}{((U_3)^{-\alpha_k} + a + f - bS_n - dV_n)^2} \right), \\ j_{33} &= \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_3)^{-\alpha_k} + a + f - bS_n - dV_n)}, \quad j_{42} = \frac{e}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)}, \quad j_{43} = \frac{f}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)}, \quad j_{44} = \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)}. \end{aligned}$$

Kararlılık analizini araştıracağımız denge noktasını bulmak için,

$$\frac{a-H(p_1^{\alpha_k} S_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} S_{n+1-i})}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + bI_n})} = S_n \tag{5}$$

$$\frac{cS_n - H(p_1^{\alpha_k} V_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} V_{n+1-i})}{((U_2)^{-\alpha_k + a + e + dI_n})} = V_n \quad (6)$$

$$\frac{-H(p_1^{\alpha_k} I_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} I_{n+1-i})}{((U_3)^{-\alpha_k + a + f - bS_n - dV_n})} = I_n \quad (7)$$

$$\frac{eV_n + fI_n - H(p_1^{\alpha_k} R_n + \sum_{i=2}^{n+1} p_i^{\alpha_k} R_{n+1-i})}{((U_4)^{-\alpha_k + a})} = R_n \quad (8)$$

sisteminin çözülmesi gereklidir. İlk olarak (7) denkleminin çözümü araştırıldığında pozitif parametreler nedeniyle çözümün ancak  $I_n = 0$  durumunda sağlanacağı görülmektedir. Elde edilen bu bilgi ile (5) denkleminde gerekli düzenlemeler ile  $S_n = \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}$  biçiminde bulunur. (6) denkleminde bulunan bu iki ifade yardımı

ile  $V_n = \frac{c \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}}{((U_2)^{-\alpha_k + a + e + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}$  şeklinde bulunur. Son olarak (8) denkleminde ki

düzenlemeler ile  $R_n = \frac{\frac{eac((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}{((U_2)^{-\alpha_k + a + e + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}}{((U_4)^{-\alpha_k + a + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}$  olarak bulunur. Bu halde (3) sistemine ait denge noktası:

$$D = (S, V, I, R) = \left( \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}, \frac{c \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}}{((U_2)^{-\alpha_k + a + e + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}, 0, \frac{eac((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}{((U_4)^{-\alpha_k + a + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})} \right)$$

olarak hesaplanır.

**Tanım 3.1:**  $\frac{dv}{dt} = F(v)$  denkleminin yaklaşık çözümü  $v(t_k)$  olsun. Bu çözüme ait  $h$  adım aralığına göre genel nümerik şeması:

$$G_h(v_k) = Q_h(F; v_k), \quad v_k \approx v(t_k), \quad t_k = t_0 + kh \quad (9)$$

biçimindedir. Burada  $G_h(v_k) \approx \left( \frac{dv_1}{dt}, \frac{dv_2}{dt}, \dots, \frac{dv_n}{dt} \right)^T$  ve  $Q_h(F; v_k)$  ise yaklaşık çözümdür [33,34].

**Lemma 3.1.** *D noktası (9) sistemine ait denge noktası olsun. Bu halde denge noktasının kararlı olması için Jacobian matrisinde yerine koyulduğunda elde edilen tüm öz değerlerin mutlak değerleri 1'den küçük olmalıdır. Aksi halde en az bir öz değer mutlak değeri 1'den küçük değil ise denge noktası kararlı değildir. Ek olarak denge noktası kararlı iken eğer tüm öz değerler sıfırdan küçük ise denge noktası lokal asimptotik kararlıdır [33,35].*

Bazı durumlarda karalılık analizinde öz değerleri bulmak kolay olmamaktadır. Bu nedenle öz değerler için bulunacak olan karakteristik denklemin katsayıları ile tüm  $\lambda$  değerlerinin mutlak değerlerinin 1'den küçük olup-olmayacağı belirlenebilir. Bunun için Schur-Cohn testi karakteristik denklemin katsayıları yardımı ile uygulanır. Bu test için

$$P(\lambda) = t_n \lambda^n + t_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + t_2 \lambda^2 + t_1 \lambda + t_0$$

karakteristik polinomunu ele alalım. Bu katsayılar ile  $t_n > 0$  olmak üzere,

$$s_{2,i} = \det \begin{pmatrix} t_0 & t_{n-i} \\ t_n & t_i \end{pmatrix}, \quad i = 0, 1, \dots, n - 1.$$

$$s_{3,i} = \det \begin{pmatrix} s_{2,0} & s_{2,n-1-i} \\ s_{2,n-1} & s_{2,i} \end{pmatrix}, \quad i = 0, 1, \dots, n - 2.$$

...

$$s_{n,i} = \det \begin{pmatrix} s_{n-1,0} & s_{n-1,n-1-i} \\ s_{n-1,3} & s_{n-1,i} \end{pmatrix}, \quad i = 0, 1, 2.$$

ifadeleri tanımlansın.

Schur-Cohn testine göre tüm öz değerlerin mutlak değerlerinin 1’den küçük olması için aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır;

- i)  $P(1) > 0,$
- ii)  $(-1)^n P(-1) > 0,$
- iii)  $|t_0| < t_n,$
- iv)  $|s_{i,0}| > |s_{i,n+1-i}|, \quad i = 2, 3, \dots, n - 1, [20,36].$

**Lemma 3.2.**  $P(\lambda) = \lambda^4 + t_3\lambda^3 + t_2\lambda^2 + t_1\lambda + t_0, (t_4 = 1)$  şeklindeki karakteristik denklem için tüm öz değerlerin mutlak değerlerinin 1’den küçük olması:

- i)  $1 + t_3 + t_2 + t_1 + t_0 > 0,$
- ii)  $1 + t_3 + t_2 + t_1 + t_0 > 0,$
- iii)  $|t_0| < 1,$
- iv)  $|s_{2,0}| > |s_{2,3}|,$
- v)  $|s_{3,0}| > |s_{3,2}|,$

ifadelerinin sağlanması ile mümkündür [20,36].

Ek olarak bu tür epidemik sistemlerde nüfusun durumunu kontrol etmek amacıyla sınır koşulları oldukça önemlidir. Bu sebeple temel üreme sayısı olarak da adlandırılan  $R_0$  sayısını bulmak kararlılık açısından gereklidir.  $R_0$  sayısını bulmak için öncelikle elde edilen Jacobian matrisi  $J = P - S$  formatında iki matrisin farkı olarak ifade edilir. Daha sonra elde edilen bu matrisler ile  $PS^{-1}$  matrisi yazılır ve determinantı elde edilirse (1) sistemine ait temel üreme sayısı;

$$R_0 = \frac{acd(a + e)}{c(a + f) + a(-b + f + a)}$$

şeklinde bulunur [37].

**Teorem 3.2.**  $R_0 > 1$  için aşağıdaki koşulların sağlanması durumunda, (3) sisteminin D denge noktası lokal asimptotik kararlıdır, aksi halde kararsızdır.

- i)  $|-Hp_1^{\alpha_k}| < |((U_1)^{-\alpha_k} + a + c) |$
- ii)  $|-Hp_1^{\alpha_k}| < |((U_2)^{-\alpha_k} + a + e) |$
- iii)  $|-Hp_1^{\alpha_k}| < |((U_3)^{-\alpha_k} + a + f - b \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})} - d \frac{c \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}}{((U_2)^{-\alpha_k + a + e + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k}})}) |$
- iv)  $|-Hp_1^{\alpha_k}| < |((U_4)^{-\alpha_k} + a) |$

**İspat**

D olarak ifade edilmiş denge noktası (4) ile ifade edilen Jacobian matrisinde yerine yazılırsa;

$$\begin{pmatrix} \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c)} & 0 & -b \left( \frac{a - H \left( p_1^{\alpha_k} \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k})} \right)}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c)^2} \right) & 0 \\ \frac{c}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e)} & \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e)} & -d \left( \frac{c \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k})} - H \left( p_1^{\alpha_k} \frac{c}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k})} \right)}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e)^2} \right) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_3)^{-\alpha_k} + a + f - b \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k})} - d \frac{c}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k})})} & 0 \\ 0 & \frac{e}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)} & \frac{f}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)} & \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)} \end{pmatrix}$$

elde edilir. Elde edilen bu matrisin  $|J - \lambda I| = 0$  determinantı kullanılarak öz değerleri

$$\lambda_1 = \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c)}, \quad \lambda_2 = \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e)}, \quad \lambda_3 = \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_4)^{-\alpha_k} + a)},$$

$$\lambda_4 = \frac{-Hp_1^{\alpha_k}}{((U_3)^{-\alpha_k} + a + f - b \frac{a}{((U_1)^{-\alpha_k} + a + c + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k})} - d \frac{c}{((U_2)^{-\alpha_k} + a + e + H \sum_{i=1}^{n+1} p_i^{\alpha_k})})}.$$

olarak bulunur.

Burada fark edildiği üzere  $\lambda_4$  harici diğer tüm öz değerlerin pozitif parametreler kullanıldığında negatif olduğu aşıkardır.  $\lambda_4$  için ise  $R_0$  ifadesi 1’den büyük kabul edilirse yani  $acd(a + e) > c(a + f) + a(-b + f + a)$  olursa, bu halde  $\lambda_4$  ifadesinin paydası pozitif olmak durumunda kalır ve üst kısmın negatif olmasından dolayı  $\lambda_4$  öz değeri negatif olarak bulunur. Tüm  $\lambda$  değerlerinin mutlak değerleri payda kısımlarının pay kısımlarından daha büyük olması gerektiğinden dolayı belirtilen (i)-(iv) koşullarının sağlanması durumunda da D denge noktası lokal asimptotik kararlıdır.

**4. Nümerik simülasyon**

Bu bölümde ayrıklaştırılmış (3) diferansiyel denklem sistemi için nümerik simülasyonlar verilmiştir. Ek olarak D denge noktasındaki kararlılık analizi aşağıda verilen parametre değerleri ile araştırılmıştır. Öncelikle başlangıç değerleri  $S(0) = 0.4, V(0) = 0.4, I(0) = 0.2$  ve  $R(0) = 0.1$  olarak alınmış ve parametreler ise  $a = 1, b = 15, c = 15, d = 10, e = 4$  ve  $f = 2$  şeklinde seçilmiştir [37]. Bu seçimler ile  $R_0 = 22,272727 > 1$  olarak bulunmuştur. Öncelikle (3) ayrıklaştırılmış sisteminde bu verilerin yerleştirilmesi ve  $v(\alpha) = 1, \alpha = 0.4$  ve  $h = 0.8$  seçilmesiyle sisteme ait çözüm grafikleri Şekil 1’de verilmiştir. Sonrasında farklı  $v(\alpha)$  değerleri için tüm sistemdeki fonksiyonların grafikleri ayrı ayrı Şekil 2- Şekil 5’ de gösterilmiştir. İfade edilen değerler ile denge noktası  $D(0.062499, 0.937428, 0, 3.749891)$  şeklinde elde edilmiş ve Jacobian matrisinde bu noktanın yerine yazılmasıyla sistemin karakteristik denklemi

$$P(\lambda) = \lambda^4 + t_3\lambda^3 + t_2\lambda^2 + t_1\lambda + t_0$$

biçiminde olup buradaki katsayılar

$$t_3 = 0.012887, t_2 = 0.272094 \cdot 10^{-4}, t_1 = 0.114651 \cdot 10^{-7} \text{ ve } t_0 = 0.103291 \cdot 10^{-11}$$

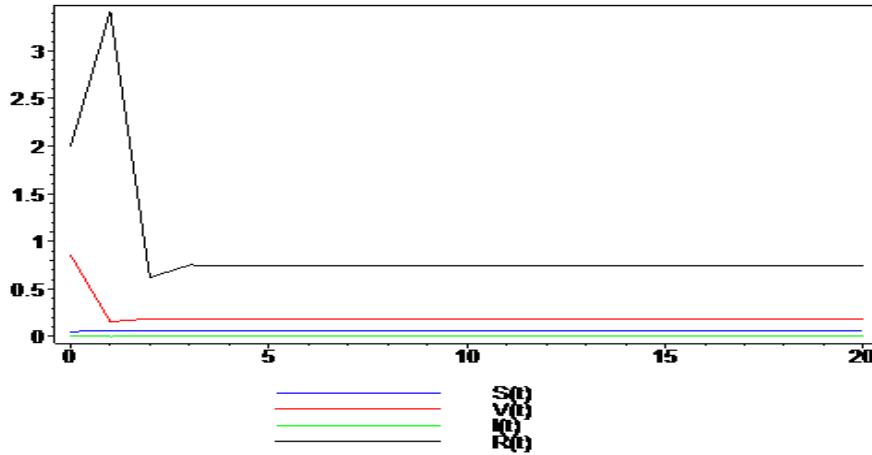
olarak elde edilir. Schur-Cohn kriterine göre

- i)  $1+t_3+t_2+t_1+t_0=1.012191 > 0$ ,
- ii)  $1-t_3+t_2-t_1+t_0=0.987139 > 0$ ,
- iii)  $|t_0| = 0.103291 \cdot 10^{-11} < 1$ ,
- iv)  $|s_{2,0}| = 1 > |s_{2,3}| = 0.114651 \cdot 10^{-7}$ ,
- v)  $|s_{3,0}| = 1 > |s_{3,2}| = 0.272093 \cdot 10^{-4}$ ,

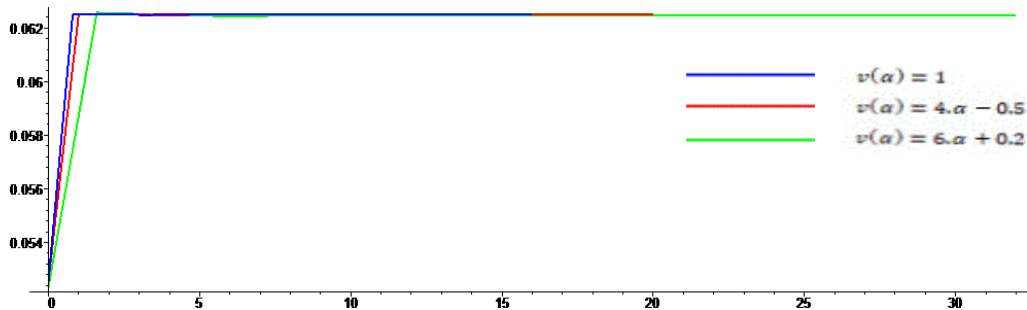
ifadeleri sağlanır. Bu durumda tüm  $\lambda$ 'lar için  $|\lambda| < 1$  sağlandığından D kararlı bir denge noktasıdır. Ek olarak karakteristik denklemin çözümü ile

$$\lambda_1 = -0.00012, \lambda_2 = -0.010369, \lambda_3 = -0.001993, \quad \lambda_4 = -0.000399.$$

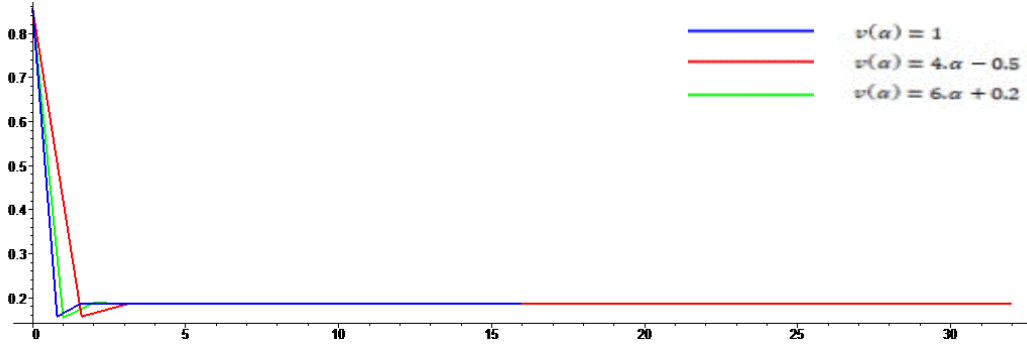
şeklinde elde edilmiş olup tüm öz değerler sıfırdan küçük olduğundan D denge noktası lokal asimptotik kararlıdır.



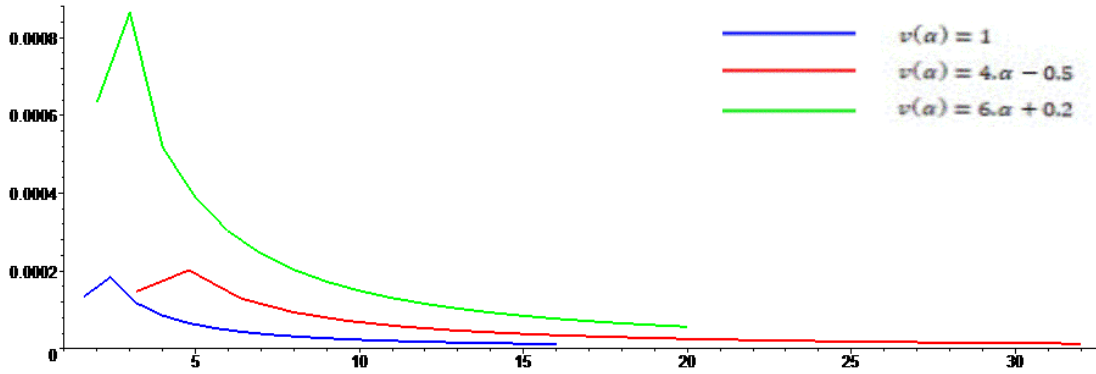
Şekil 1.  $v(\alpha) = 1$  için SVIR sisteminin çözüm grafikleri.



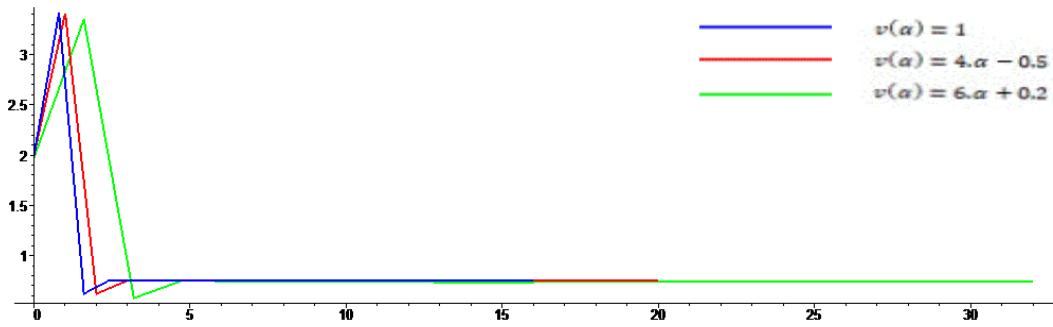
Şekil 2. Farklı  $v(\alpha)$  değerleri için  $S(t)$  fonksiyonu grafikleri.



Şekil 3. Farklı  $v(\alpha)$  değerleri için  $V(t)$  fonksiyonu grafikleri.



Şekil 4. Farklı  $v(\alpha)$  değerleri için  $I(t)$  fonksiyonu grafikleri.



Şekil 5. Farklı  $v(\alpha)$  değerleri için  $R(t)$  fonksiyonu grafikleri.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada öncelikler aşı stratejilerini de içeren epidemik bir model olan SVIR modelinin dağılımlı mertebeden hali yeni bir model olarak ifade edilmiştir. Sonrasında yeni tanımlanan bu denklemin ayrıklaştırılması ve kararlılık analizi yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalarla ilgili de son olarak 4. Bölümde nümerik simülasyonlar verilmiştir. Elde edilen bulgular ışığında dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerin bu tip epidemik modellerde kullanılmasının oldukça önemli olduğu görülmüştür. Çünkü dağılımlı

mertebeden denklemlerin içerdiği  $v(\alpha)$  değeri ile yorum ve analiz kısmında tek bir denklemle birden fazla denklem tipine ait yorum kabiliyeti geliştirildiği görülmüştür. Bu çalışma ile dağılımlı mertebeden diferansiyel denklemlerin nümerik çözümleri için NSFD şemaları ile ayırıklaştırma işleminin yapılmasının ve çözümlerin kararlılık analizinin mümkün olduğu görülmüştür.

### Teşekkür

Yazarlardan Mehmet KOCABIYIK, 2211-E Programı ile maddi ve manevi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür eder.

### Kaynaklar

- [1] Kermack, M. ve McKendrick, A. Contributions to the mathematical theory of epidemics. Part I. **Proceedings of the royal society A**, 115(5), 700-721, (1927).
- [2] Liu, X., Takeuchi, Y. ve Iwami, S. SVIR epidemic models with vaccination strategies. **Journal of Theoretical Biology**, 253(1), 1-11, (2008).
- [3] Kribs-Zaleta, C. M. ve Velasco-Hernández, J. X. A simple vaccination model with multiple endemic states. **Mathematical biosciences**, 164(2), 183-201, (2000).
- [4] Alexander, M. E., Bowman, C., Moghadas, S. M., Summers, R., Gumel, A. B. ve Sahai, B. M. A vaccination model for transmission dynamics of influenza. **SIAM Journal on Applied Dynamical Systems**, 3(4), 503-524, (2004).
- [5] Li, J., Yang, Y. ve Zhou, Y. Global stability of an epidemic model with latent stage and vaccination. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, 12(4), 2163-2173, (2011).
- [6] Caputo, M. **Elasticita e dissipazione**. Zanichelli, (1969).
- [7] Caputo, M. Mean fractional-order-derivatives differential equations and filters. **Annali dell'Universita di Ferrara**, 41(1), 73-84, (1995).
- [8] Caputo, M. Distributed order differential equations modelling dielectric induction and diffusion. **Fractional Calculus and Applied Analysis**, 4(4), 421-442, (2001).
- [9] Caputo, M. Diffusion with space memory modelled with distributed order space fractional differential equations. **Annals of Geophysics**, 223-234, (2003).
- [10] Hartley, T. T. ve Lorenzo, C. F. Fractional-order system identification based on continuous order distributions. **Signal processing**, 83(11), 2287-2300, (2003).
- [11] Bagley, R. L. ve Torvik, P. J. On the existence of the order domain and the solution of distributed order equations-Part I. **International Journal of Applied Mathematics**, 2(7), 865-882, (2000).
- [12] Bagley, R. L. ve Torvik, P. J. On the existence of the order domain and the solution of distributed order equations-Part II. **International Journal of Applied Mathematics**, 2(8), 965-988, (2000).
- [13] Ford, N. J. ve Morgado, M. L. Distributed order equations as boundary value problems. **Computers and Mathematics with Applications**, 64(10), 2973-2981, (2012).
- [14] Diethelm, K. ve Ford, N. J. Numerical analysis for distributed order differential equations. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 225(1), 96-104, (2009).



- [15] Katsikadelis, J. T. Numerical solution of distributed order fractional differential equations. **Journal of Computational Physics**, 259, 11-22, (2014).
- [16] Li, X. Y., ve Wu, B. Y. A numerical method for solving distributed order diffusion equations. **Applied Mathematics Letters**, 53, 92-99, (2016).
- [17] Aminikhah, H., Refahi Sheikhani, A. ve Rezazadeh, H. Stability analysis of distributed order fractional Chen system. **The Scientific World Journal**, 1-13, (2013).
- [18] Najafi, H. S., Sheikhani, A. R. ve Ansari, A. Stability analysis of distributed order fractional differential equations. **In Abstract and Applied Analysis**, Hindawi, (2011).
- [19] Refahi, A., Ansari, A., Najafi, H. S. ve Merhdoust, F. Analytic study on linear systems of distributed order fractional differential equations. **Le Matematiche**, 67(2), 3-13, (2012).
- [20] Dorciak L. **Numerical models for simulation the fractional order control systems**, UEF-04-94, The Academy of Sciences, Institute of Experimental Physic, Kosice, Slovak Republic, (1994).
- [21] Meerschaert, M. M. ve Tadjeran, C. Finite difference approximations for fractional advection–dispersion flow equations. **Journal of computational and applied mathematics**, 172(1), 65-77, (2004).
- [22] Mickens, R. E. Exact solutions to a finite-difference model of a nonlinear reaction-advection equation: Implications for numerical analysis. **Numerical Methods for Partial Differential Equations**, 5(4), 313-325, (1989).
- [23] Mickens, R. E. **Nonstandard finite difference models of differential equations**. World scientific, (1994).
- [24] Mickens, R. E. **Applications of nonstandard finite difference schemes**. World Scientific, (2000).
- [25] Mickens, R. E. Nonstandard finite difference schemes for differential equations. **Journal of Difference Equations and Applications**, 8(9), 823-847, (2002).
- [26] Oldham, K. ve Spanier, J. **The fractional calculus theory and applications of differentiation and integration to arbitrary order**. Elsevier, (1974).
- [27] Podlubny, I. **Fractional differential equations**, vol. 198 of Mathematics in Science and Engineering, (1999).
- [28] Mickens, R. E. Calculation of denominator functions for nonstandard finite difference schemes for differential equations satisfying a positivity condition. **Numerical Methods for Partial Differential Equations: An International Journal**, 23(3), 672-691, (2007).
- [29] Ongun, M. Y. ve Turhan, I. A numerical comparison for a discrete HIV infection of CD4+ T-Cell model derived from nonstandard numerical scheme. **Journal of Applied Mathematics**, 2013, 1-9, (2013).
- [30] Modanlı, M. Kesirli telegraf kısmi diferansiyel denklemlerin fark şeması metodu ile nümerik çözümü. **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 20(1), 440-449, (2018).
- [31] Ongun, M. Y., Arslan, D. ve Garrappa, R. Nonstandard finite difference schemes for a fractional order Brusselator system. **Advances in Difference equations**, 2013(1), 102, (2013).
- [32] Hiçdurmaz, B. Numerical analysis for coupled systems of two-dimensional time-space fractional Schrödinger equations with trapping potentials. **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 22(1), 1-12, (2020).

- [33] Dimitrov, D. T. ve Kojouharov, H. V. Nonstandard finite-difference methods for predator prey models with general functional response. **Mathematics and Computers in Simulation**, 78(1), 1-11, (2008).
- [34] Elaydi S.N. **An introduction to difference equations**, Second edition, Undergraduate Texts in Mathematics, Springer-Verlag, New York, 2.3, 3, (1999).
- [35] Dimitrov, D. T. ve Kojouharov, H. V. Nonstandard numerical methods for a class of predator-prey models with predator interference. **Electronic Journal of Differential Equations (EJDE)**, 67-75, (2007).
- [36] Ogata, K. **Discrete time control systems**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, (1995).
- [37] Ahmad, A., Javeed, N., Farman, M., Ahmad, M. O., Hafeez, A. ve Raza, A. Dynamical Behavior of Fractional Order SVIR Epidemic Model. **International Journal of Analysis and Applications**, 17(2), 260-274, (2019).

# Modal behaviour investigation of spur gears with lumped parameter and finite element methods

Ali TATAR<sup>1\*</sup>, Mertol TÜFEKÇİ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> University of Bristol, Department of Aerospace Engineering, Bristol, UK

<sup>2</sup> Imperial College London, Department of Mechanical Engineering, London, UK

<sup>3</sup> Istanbul Technical University, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Turkey

Geliş Tarihi (Received Date): 07.11.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 16.12.2020

## Abstract

Computation of gear dynamic forces accurately and correct modal behaviour estimation require highly validated modelling techniques in gear dynamics. In this paper, linear modal behaviour of a spur gear pair under prescribed conditions is investigated with lumped parameter and finite element methods. The main aim of this study is to compare the modal analysis results of the spur gear pair with the lumped parameter and finite element methods. For this purpose, a six degrees of freedom dynamic model of a spur gear pair is created using the lumped parameter method. In this method, the gears are assumed to be rigid disks whereas the gear teeth contacts and bearings are considered as flexible, which are modelled with spring elements. Then, a 3D solid model of the spur gear pair is created using the finite element method for high fidelity numerical analyses. In the finite element method, the gears are modelled with flexible three-dimensional solid elements, which is one of the main differences between the two methods. To remove the nonlinearity in the gear pair system, the contact is simplified with a rigid bonding of nodes in the finite element model. The natural frequencies and mode shapes are calculated by linear modal analysis for both methods. The obtained results from the individual methods show that flexible gear body modes, which are seen at higher frequencies, can only be detected with the finite element method. The tooth modes in which the gear bodies acting as a rigid body can be detected successfully with the two methods.

**Keywords:** Gear dynamics, spur gears, finite element method, lumped parameter method, modal analysis.

\*Ali TATAR, ali.tatar@bristol.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0001-9832-8108>

Mertol TÜFEKÇİ, tufekcime@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-5530-1471>

## Alın dişlilerin yığılı parametre ve sonlu elemanlar yöntemiyle modal davranışının incelenmesi

### Öz

*Dişli dinamiğinde, dişli dinamik kuvvetlerinin kesin olarak hesaplanması ve doğru modal davranış tahmini yüksek doğruluklu modelleme yöntemlerini gerektirmektedir. Bu çalışmada, bir alın dişli çiftinin doğrusal modal davranışı, belirlenmiş şartlar altında yığılı parametre ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmektedir. Bu çalışmanın ana amacı yığılı parametre ve sonlu elemanlar yöntemiyle dişli çiftinin modal analiz sonuçlarını karşılaştırmaktır. Bunun için alın dişli çiftinin altı serbestlik dereceli dinamik modeli yığılı parametre yöntemiyle oluşturulmuştur. Bu yöntemde, dişli gövdeleri rijit kabul edilirken dişli temasları ve yatakları esnek kabul edilmiştir. Sonrasında, alın dişli çiftinin üç boyutlu katı modeli yüksek doğruluklu sayısal hesaplamalar için sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yönteminde, dişliler esnek üç boyutlu katı elemanlarla modellenmiştir. Bu modelde, dişli çifti temasında doğrusal olmama durumunun kaldırılması için temas rijit olarak basitleştirilmiştir. Doğal frekanslar ve mod şekilleri her iki yöntemde doğrusal modal analiz ile hesaplanmıştır. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar, yüksek frekanslarda görülen esnek dişli gövde modlarının sadece sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanabileceğini göstermektedir. Gövdenin hareket etmediği diş modları ise her iki yöntemle başarılı bir şekilde tespit edilebilmektedir.*

**Anahtar kelimeler:** *Dişli dinamiği, alın dişliler, sonlu elemanlar yöntemi, yığılı parametre yöntemi, modal analiz.*

### 1. Introduction

Gears are commonly used machine elements in rotating systems for power and motion transmission, as well as speed and torque conversion. Particularly, spur gears can be seen in many industrial applications such as electrical motors, internal combustion engines, washing machines and geared pumps because of their advantages of higher efficiency, easy manufacturing process and lower production cost [1]. Contacts between the gear teeth under operating conditions results in a dynamic problem in gear systems [2, 3]. Therefore, dynamic modelling of gear systems is a significant issue to compute gear dynamic forces accurately and predict their modal behaviour properly.

In the literature, there are various analytical models using the lumped parameter method for the dynamic analysis of spur gear pairs [4–6]. The dynamic models are divided into three main groups as purely torsional model, torsional-transverse model and three-dimensional model [7]. The purely torsional model has one degree of freedom, which is initially proposed to investigate torsional vibrations of spur gear pairs [4]. Due to the rotating mass imbalances and significant gyroscopic moments at higher operating speeds, the vibrational motion also occurs in radial directions (transverse) of gears, known also as lateral vibrations [8, 9]. Therefore, the torsional model is expanded to the torsional-transverse model with the consideration of gear vibrations in transverse directions. The so-called torsional-transverse mode has three degrees of freedom (DOF) [10]. On the other hand, the torsional-transverse model could not be sufficient for the dynamic analysis

of helical gear pairs because of the occurrence of axial forces in them. For this reason, the three-dimensional model, which has six degrees of freedom, has recently been developed by adding axial and tilting motions to the torsional – transverse model [6, 8, 11]. Furthermore, computed vibrational responses from the linear lumped parameter models of gear systems were validated with the experimental studies, whereas these studies do not include the validation of the modal behaviour of gear pairs [10, 11]. Nonlinear vibration behaviour of spur gears is also shown by numerous numerical [12–25] and experimental studies [26–28]. Throughout these studies, the main reason for the nonlinearity is identified as losing the gear contact within backlash (clearance nonlinearity). In addition to the analytical studies, there are some numerical studies in which dynamic analyses are carried out with different modelling approaches such as dynamic finite element/contact mechanics model [29], finite element/lumped parameter model [30], frequency-domain finite element model [31]. Although there are numerous linear and nonlinear vibration analyses conducted with the analytical gear dynamic models, there are limited studies comparing the analytical methods with the numerical methods such as finite element method [32, 33]. From these two studies, Vinayak and Singh [32] numerically computed natural frequencies with multibody dynamics, including rigid and flexible gear body modelling, and finite element models; however they did not identify the vibration modes systematically. Ambarisha and Parker [33] analysed the nonlinear dynamic response of spur planetary gears using two-dimensional lumped parameter and finite element models, while they did not conduct a linear modal analysis for a spur gear pair using the lumped parameter method. When these studies are taken into consideration, modal behaviour comparison of spur gear pairs using lumped parameter and finite element methods is still not well understood in the gear dynamics field. Therefore, a detailed modal analysis of spur gear pairs with three-dimensional lumped parameter and finite element models is needed.

In this study, free vibration of a spur gear pair is investigated with the lumped parameter method (LPM), analytically, and with a linearized finite element method (FEM), numerically. In the lumped parameter model, the gear teeth contacts and supporting elements are assumed to be flexible while gear bodies are assumed to be rigid, whereas the finite element model considers gear teeth and disks as flexible bodies. In terms of linearization, the contact at the gear teeth is assumed to be rigid bonding. Basically, this removes the nonlinearity and simplifies the model significantly. Modal analyses are performed for both models, and modal parameters such as natural frequencies and mode shapes are investigated in detail. Finally, a comparison of these methods is done, and the advantages of each method are discussed.

## **2. Dynamic modelling of a spur gear pair**

In this section, dynamic modelling of a spur gear pair with lumped parameter and finite element methods is demonstrated.

### ***2.1. Lumped parameter model***

A spur gear pair consists of a driving gear (pinion) and a driven gear with their supports. To create a dynamic model of a spur gear pair, six degrees of freedom linear lumped parameter models are generally used [8, 11]. In the lumped parameter dynamic model, pinion and driven gear bodies are assumed to be rigid, whereas gear teeth contacts and supporting elements are assumed to be flexible. Moreover, time-varying mesh stiffness,

clearance nonlinearity due to losing the gear contact within backlash, damping at the gear meshes and supports, and gyroscopic effects are neglected. Gear teeth contact (mesh) stiffnesses and gear support (bearing) stiffnesses are modelled with linear spring elements as shown in Figure 1. Based on the linear spring element modelling approach, gear mesh stiffness does not change with respect to the time and position [8, 11].

In this dynamic model, generalized coordinates for each gear can be written as

$$\mathbf{q}_i = [x_i, y_i, z_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}], \tag{1}$$

where  $i = 1, 2$ . The first and second indices represent the pinion and driven gear, respectively. Generalized coordinates of this system are then written as

$$\mathbf{q} = [x_1, y_1, z_1, \theta_{x1}, \theta_{y1}, \theta_{z1}, x_2, y_2, z_2, \theta_{x2}, \theta_{y2}, \theta_{z2}]. \tag{2}$$

Based on the x-y reference plane in Figure 1,  $x_i$  and  $y_i$  represent in-plane translation,  $z_i$  represent out of plane translation,  $\theta_{xi}$  and  $\theta_{yi}$  represent out of plane rotation,  $\theta_{zi}$  represent in-plane rotation. Both pinion and driven gears have six degrees of freedom, which leads twelve degrees of freedom in total for the gear pair system.

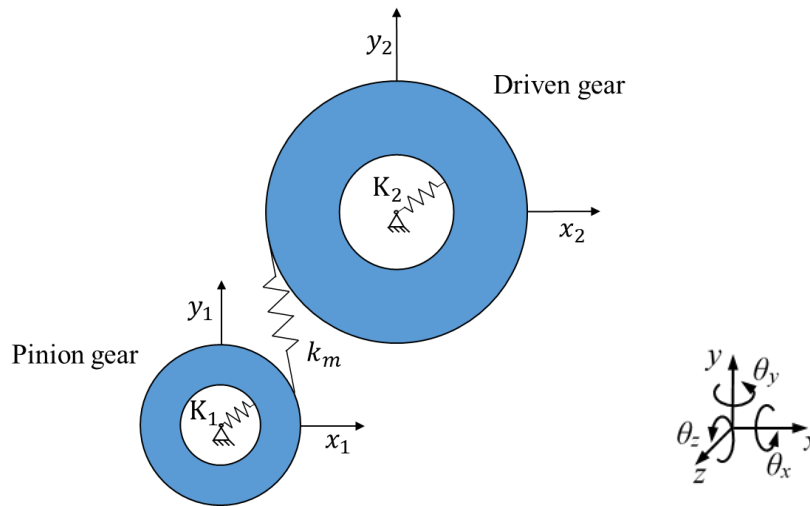


Figure 1. Dynamic model of a spur gear pair.

Support stiffnesses of pinion and driven gears,  $\mathbf{K}_i$  are written as

$$\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} k_{xi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{yi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{zi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{Qxi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{Qyi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{Qzi} \end{bmatrix} \tag{3}$$

where the support stiffnesses consist of six degrees of freedom spring elements, which can do both translational and rotational motion [8]. Based on this equation, support elements have stiffness terms in all directions except the torsional (in-plane rotation) direction. Torsional stiffnesses of the supports are defined as zero ( $k_{Qzi} = 0$ ) since the gears can rotate freely on their bearings during the power transmission without any

resistance. As can be clearly seen in Eq. (3), support stiffness is in diagonal form, as a result, there is no coupling term in the stiffness matrix, making the stiffness matrix uncoupled.

The equation of motion of the spur gear pair can be easily obtained using the Lagrange's equations. For this purpose, kinetic and potential energies of the system should be computed. The kinetic energy of the spur gear pair is written as

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2) + I_{di} (\dot{\theta}_{xi}^2 + \dot{\theta}_{yi}^2) + I_{pi} \dot{\theta}_{zi}^2 \quad (4)$$

where  $m_i$ ,  $I_{di}$  and  $I_{pi}$  are the mass, diametral and polar mass moment of inertia, respectively. The strain energies of the support elements for the pinion and driven gear are written as

$$V_s = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 k_{xi} x_i^2 + k_{yi} y_i^2 + k_{zi} z_i^2 + k_{Q_{xi}} \theta_{xi}^2 + k_{Q_{yi}} \theta_{yi}^2 + k_{Q_{zi}} \theta_{zi}^2 \quad (5)$$

The gear mesh strain energy due to the gear teeth deflection is also written as

$$V_m = \frac{1}{2} k_m \delta_m^2 \quad (6)$$

where  $k_m$  represents the mesh stiffness between the pinion and driven gear,  $\delta_m$  represents the relative displacement between the pinion and driven gears. The relative displacement is expressed as [8, 11]

$$\delta_m = [(x_p - x_g) \sin \phi + (y_p - y_g) \cos \phi + (r_p \theta_{zp} + r_g \theta_{zg})] \cos \beta + [(r_p \theta_{xp} + r_g \theta_{xg}) \sin \phi + (r_p \theta_{yp} + r_g \theta_{yg}) \cos \phi + (z_g - z_p)] \sin \beta \quad (7)$$

In Eq. (7),  $\beta$  and  $\phi$  represent the gear helix angle and pressure angle, respectively. It should be noted that the gear helix angle becomes zero for the spur gears. Following, the total potential energy of the system is computed as

$$V = V_s + V_m. \quad (8)$$

Finally, the equation of motion of the system for the free vibrations can be obtained using Lagrange's equation as

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial(T - V)}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial(T - V)}{\partial q_k} = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

Here,  $n$  represents the total degree of freedom. After solving the Eq. (9) for the free vibration of the system. The equation of motion of the system is derived as

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = 0. \quad (10)$$

In Eq. (10),  $\mathbf{M}$  and  $\mathbf{K}$  represent the mass and stiffness matrices of the gear system, respectively. Here,  $\mathbf{q}(t)$  also represents the generalized coordinates of the gear system. The mass and stiffness matrices of the gear system can be seen explicitly in reference [8].

The internal structure of the mass and stiffness matrices are seen in Figure 2, where all the elements are zero except the plotted points.

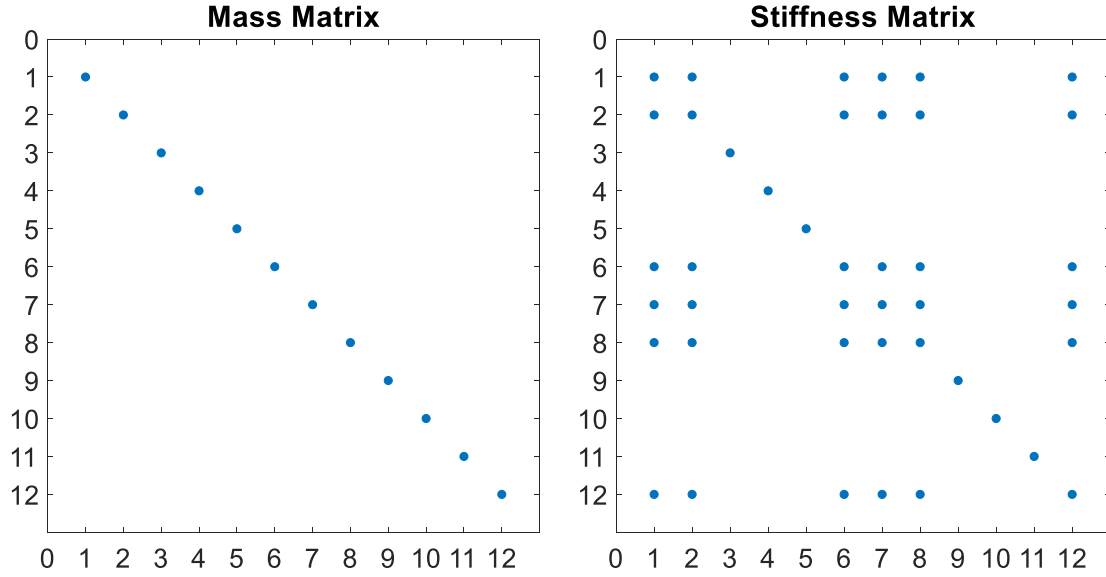


Figure 2. Mass and stiffness matrices of a spur gear pair.

For the free-free vibration problem, Eq. (10) can be converted into an eigenvalue problem by assuming displacement as harmonic,  $\mathbf{q}(t) = \{\psi\}e^{i\omega t}$ .

$$([\mathbf{K}] - \omega_r^2[\mathbf{M}])\{\psi\}_r = \{0\} \quad r = 1, 2, \dots, k \quad (11)$$

Here,  $\omega_r^2$  and  $\{\psi\}_r$  represent eigenvalues and eigenvectors, from which natural frequencies and mode shapes can be obtained, respectively. For a non-singular solution of the Eq. (11), the determinant below

$$\det([\mathbf{K}] - \omega_r^2[\mathbf{M}]) = 0 \quad (12)$$

should be equal to zero. After solving the Eq. (12),  $\omega_r^2$  and  $\{\psi\}_r$  are obtained. Modal matrix of the system can then be expressed using the eigenvectors as below

$$\mathbf{U} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n]. \quad (13)$$

## 2.2. Finite element model

A three-dimensional solid model of the spur gear pair is created in accordance with DIN 867 standards by using a CAD (Computer Aided Design) software. The prepared geometry of the spur gear pair is then transferred to a CAE (Computer Aided Engineering) software for the finite element analysis. The second-order tetrahedral elements are used when forming the mesh structure, because its ability to represent such geometries is relatively better and of course for better accuracy. The mesh structure of the gear pair consists of 7020 quadratic tetrahedral elements with 9774 nodes and 8421 quadratic hexahedral elements with 40559 nodes alongside with two spring elements with six degrees of freedom (fully compliant in  $\theta_z$  direction) per each, which is shown in Figure 3. The gear teeth have a more complex geometry. To represent the geometry in a more accurate way, tetrahedral elements are preferred over the hexahedral ones.



The reason of using two different types of elements can be explained with the balance of accuracy and computational cost. To avoid any convergence issues around the critical regions, such as contact area, fillet area and their neighbourhoods, the mesh is kept finer than the rest of the model. For the other parts, simpler geometries appear and therefore straightforward meshing could be applied. This leads to the usage of quadratic hexahedral elements and relatively coarser mesh structure. This also reduces the computational cost of the model.

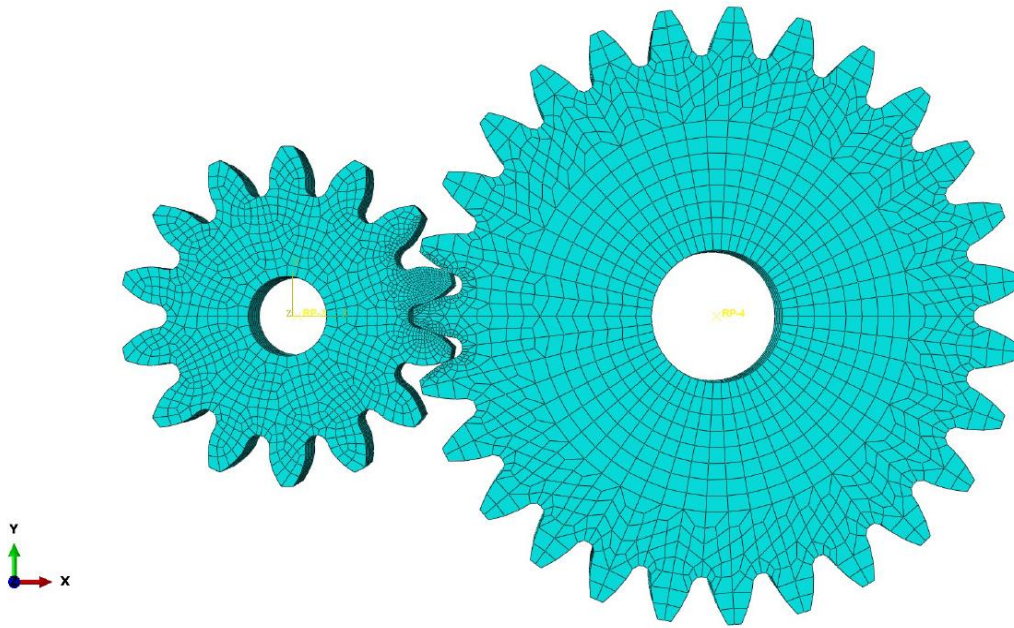


Figure 3. Geometry and mesh structure of the spur gear pair.

One of the most basic conditions for modal analysis when using a typical finite element software is that the system must be linear. The system in question is not substantially linear. The most important factor that disrupts linearity is the contact of gear teeth. In order to linearize the system, the contacts in multi-part systems need to be simplified with some assumptions. In this study, such a simplification is made by applying a rigid bonding condition at the gear teeth contact areas. This is achieved by applying the constraint on the nodes located at the contact patch between the driven and pinion gear. Furthermore, to represent the bearing and the shaft, six degrees of freedom springs are used, and they are connected to the holes at the centres of the gears by applying rigid couplings. The rotation of the gears around the z-axis is set as free. All the other degrees of freedom are restricted as described in Table 1. The stiffness values of these springs are chosen as the same as the analytical lumped parameter method. Similarly, the elastic properties of the gear material are taken as the same as in the lumped parameter model. More on the finite element model, no load is applied to the gears. It should be taken into consideration that the decrease in stiffness due to stresses in load applied gears and thus decrease in natural frequencies is to occur.

It is also to be noted that the basic assumptions in the analytical model are different from those in the finite element model. Most importantly, the lumped parameter model assumes gears as rigid disks, while the finite element model considers them flexible structures. In

the lumped parameter model, gear teeth are assumed within the disk mass and their compliance is not considered anywhere else except for the contact. In finite element analysis, other gear teeth are modelled as flexible bodies as well unified with the flexible disk, in their original position and geometry. Therefore, the calculations include the tooth modes and the elastic body modes of the disks that the analytical model cannot capture. Finally, in the analytical model, the gear teeth in contact are only connected by a translational spring. In the finite element analysis, the contact of the gear teeth is considered as rigid, therefore the analysis relies on the flexibility of the gear teeth.

### 3. Numerical analysis

To compare lumped parameter and finite element methods, a case study was prepared with certain parameters of the spur gear pair. The modal analyses for both lumped parameter and finite element models were performed using the parameters in Table 1. The material of the spur gear pair is assumed to be standard steel. The gear mesh stiffness value was determined based on the initial finite element analyses. Support stiffness values of the gears were selected as reasonable based on the values in the literature [6, 8, 10].

Table 1. Parameters of the spur gear pair.

Parameter	Pinion Gear	Driven Gear
Number of teeth	14	27
Module [mm]	4	4
Inner diameter [mm]	15	25
Thickness [mm]	15	15
Material density [kg/m <sup>3</sup> ]	7800	7800
Young's modulus [GPa]	210	210
Shear modulus [GPa]	80	80
Bearing radial stiffness [N/m]	$4 \times 10^8$	$4 \times 10^8$
Bearing axial stiffness [N/m]	$2 \times 10^8$	$2 \times 10^8$
Bearing tilting stiffness [N.m/rad]	$4 \times 10^6$	$4 \times 10^6$
Bearing torsional stiffness [N.m/rad]	0	0
Bearing radial damping [N/(m/s)]	0	0
Bearing axial damping [N/(m/s)]	0	0
Bearing tilting damping [N.m/(rad/s)]	0	0
Bearing torsional damping [N.m/(rad/s)]	0	0
Helix angle $\beta$ [degree]	0	0
Transverse Pressure angle $\phi$ [deg]	22	22
Mesh stiffness [N/m]	$4.15 \times 10^8$	$4.15 \times 10^8$
Mesh damping [N/(m/s)]	$4.15 \times 10^8$	$4.15 \times 10^8$

After the execution of both methods, the natural frequencies and mode shapes of the test cases were calculated. It should be noted that damping of the bearings, gear contacts and gear bodies were neglected in the spur gear pair because of not affecting the modal behaviour in terms of natural frequency and mode shapes significantly. The presented results for both lumped parameter and finite element methods were computed for the undamped case.

**3.1. Lumped parameter method results**

For the lumped parameter model of the spur gear pair system, natural frequencies and mode shapes were computed with the linear modal analysis. Natural frequencies are provided with corresponding vibration mode, as seen in Table 2.

Table 2. Computed natural frequencies with lumped parameter method.

Mode #	LPM Natural Frequency [Hz]	Mode Type
1	0	Rotational (Rigid Body)
2	2235	Axial (Gear)
3	2956	Translational – Rotational
4	3160	Translational (Gear)
5	4352	Axial (Pinion)
6	5081	Translational – Rotational
7	6154	Translational (Pinion)
8	11267	Tilting (Gear)
9	11267	Tilting (Gear)
10	12489	Translational – Rotational
11	40687	Tilting (Pinion)
12	40687	Tilting (Pinion)

The modal matrix (**U**) which shows eigenvectors of the spur gear pair system for each mode is provided in the Eq.14 below. The vibration modes shown in Table 2 were identified based on the eigenvectors in the modal matrix.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix}
 0 & 0 & -0.06 & 0 & 0 & -0.56 & -1.79 & 0 & 0 & 0.46 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -0.14 & 0 & 0 & -1.39 & 0.72 & 0 & 0 & 1.13 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1.93 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 127.82 & -0.01 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.01 & -127.82 \\
 -43.38 & 0 & 32.88 & 0 & 0 & 46.60 & 0 & 0 & 0 & 61.35 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0.34 & -0.92 & 0 & -0.11 & 0 & 0 & 0 & -0.10 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0.84 & 0.37 & 0 & -0.28 & 0 & 0 & 0 & -0.24 & 0 & 0 \\
 0 & -0.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 35.37 & 1.44 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.44 & -35.37 & 0 & 0 & 0 \\
 22.49 & 0 & 4.57 & 0 & 0 & 6.48 & 0 & 0 & 0 & 8.53 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \tag{14}$$

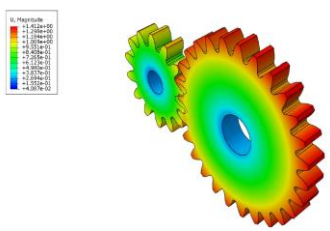
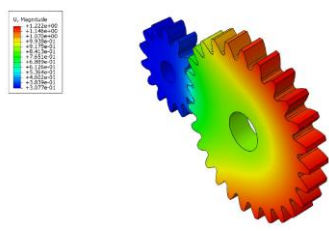
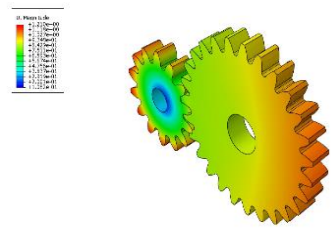
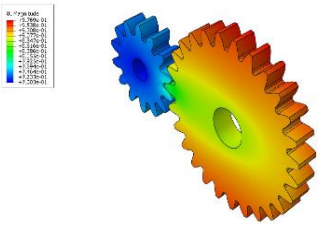
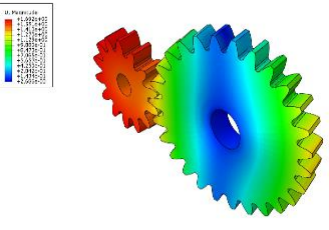
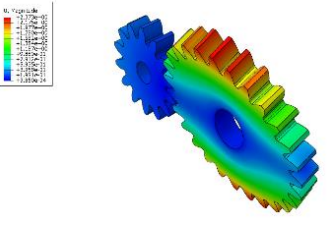
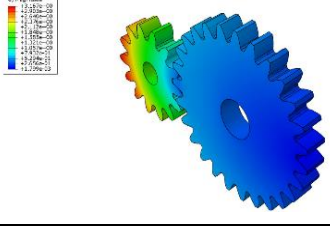
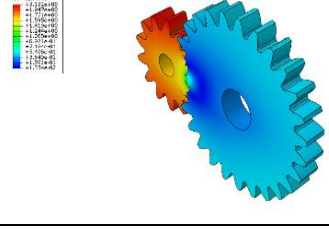
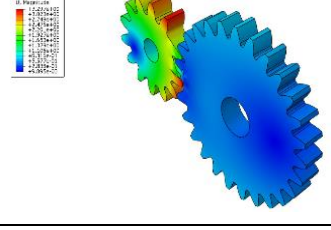
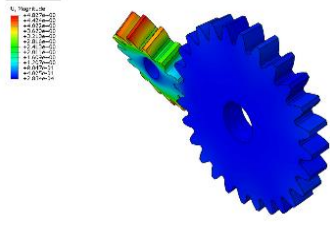
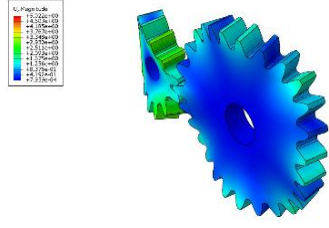
From the Table 2 and computed modal matrix, it is clearly seen that vibration modes consist of one rotational, two axial, two translational, three translational – rotational and four tilting modes. Among these modes, the rigid rotational and translational – rotational modes are also referred to as tooth modes and the remaining modes are referred to as bearing modes. [34]. There is a total of four tooth modes for the gear-pair, while eight bearing modes are available. It is important to point out that only tooth modes are affected by the change in gear teeth contact (mesh) stiffness.

**3.2. Finite element method results**

The mode shapes and the respective natural frequencies, calculated with the finite element method, are displayed in Table 3. The first thing to be noted about the results of the finite element method is the rotational mode. This first mode is supposed to be a rigid body motion. However, the simplification of the contact constrains this motion. Therefore, this

mode was calculated as a flexible mode as seen in Table 3. The simplification of the contact leads to coupling of some modes as the motions are restrained. An example of coupled modes is the coupling of pinion gear’s axial mode and driven gear’s tilting mode. Furthermore, the flexible disk modes of the driven gear are coupled with pinion gear’s tilting modes. This over constraining of the system can be considered as a drawback of a 3D linearized finite element model.

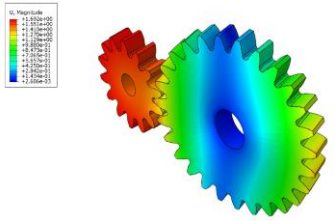
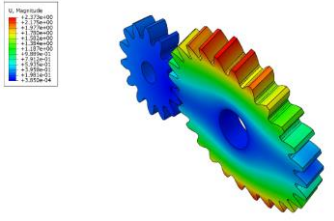
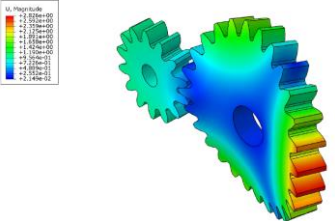
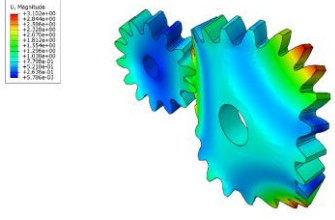
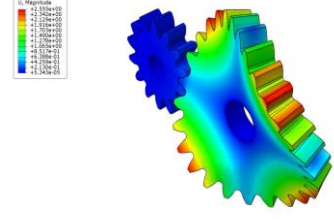
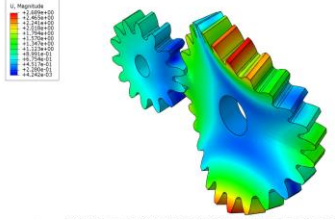
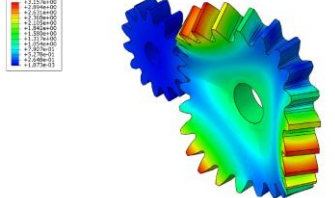
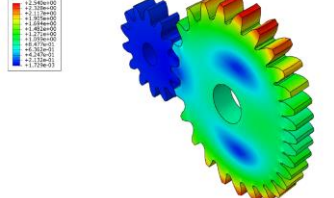
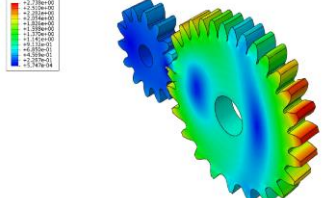
Table 3. The natural frequencies and the mode shapes of the spur gear pair calculated by the finite element analysis.

1) Rotational – 1011 Hz	2) Axial (Gear) – 2401 Hz	3) Translational-Rotational – 2964 Hz
		
4) Translational (Gear) – 3792 Hz	5,6) Tilting (Gear) / Axial (Pinion) – 4649 Hz	7) Tilting (Gear) – 4966 Hz
		
8) Translational-Rotational – 5098 Hz	9) Translational (Pinion) – 11506 Hz	10) Translational-Rotational - 12436 Hz
		
11) Tilting (Pinion) – 16326 Hz	12) Tilting (Pinion) – 17741 Hz	
		

One of the most significant differences between the lumped parameter model and the finite element model is the flexible body assumption of the finite element method. As

mentioned earlier, the lumped parameter method models the gears' main bodies as rigid disks which keep the degrees of freedom at a certain number, to be precise 12. Whereas, the finite element method assumes the whole structure as flexible bodies. Therefore, the degrees of freedom of the finite element model, though it depends on the number of nodes, is much greater than 12. This makes the finite element model capable of catching the natural frequencies and the mode shapes that cannot be calculated by the lumped parameter model. Some of these modes are flexible disk modes. Table 4 displays some examples of flexible disk modes.

Table 4. Some of the flexible disk modes and the respective natural frequencies of the gear pair calculated by the finite element analysis.

1) Gear Nodal Diameter 4649 Hz	2) Gear Nodal Diameter 4966 Hz	3) Gear Nodal Diameter 5013 Hz
		
4) Pinion and Gear Nodal Diameter 13703 Hz	5) Gear Nodal Diameter 7020 Hz	6) Pinion and Gear Nodal Diameter 8642 Hz
	<p>Printed using Abaqus/CAE on: Tue Feb 18 14:48:27 GMT Standard Time 2</p> 	<p>Printed using Abaqus/CAE on: Tue Feb 18 14:48:56 GMT Standard Time 20</p> 
7) Gear Nodal Diameter 12358 Hz	8) Gear Nodal Circle 24330 Hz	9) Gear Nodal Circle 24856 Hz
		

In flexible disks, nodal diameters and nodal circles determine the mode shapes. In cases with gears, there are essentially two disks connected to each other rigidly which leads to coupling of multiple modes of the two gears/disks. As to be seen from mode 1 in Table 4, the axial mode of the pinion gear, the tilting mode of the driven gear and the first nodal diameter mode of the driven gear are coupled. Mode 2 is also a coupled mode of tilting and the first nodal diameter of the driven gear. In the case of a thin disk, these two nodal diameter modes are supposed to be orthogonal modes and to have the same natural frequencies. Similarly, same comments could be made for the second nodal diameter modes of the driven gear which are shown in modes 5 and 6. The flexible disk modes also

exist for pinion gear, but the natural frequencies are much higher than the respective natural frequencies of the driven gear. The reason for this lies in the inertial and stiffness properties of the pinion gear, having a smaller geometry than the driven gear. Therefore, the pinion gear has less mass and is stiffer than driven gear. Nodal circle nodes of the driven gear are given in the last two modes 8 and 9 in Table 4. In fact, the nodal circle modes are supposed to be unique because of the axisymmetric structure of the disk. However, in this case, the connection between the driven gear and pinion gear removes the axial symmetry. Therefore, multiple modes are calculated for nodal circle modes. Another thing to note would be about the modes 3, 4 and 7 have similarly three nodal radii, which is not a case to be observed with disks with perfect symmetry. This also occurs due to the removal of the symmetry by the contact between the gear pair. Similar asymmetry in results can also be obtained by asymmetric loading. Being able to capture these modes, is a major advantage of applying the finite element method in gear modelling.

### 3.3. Comparison of LPM and FEM results

For the modal behaviour investigation of the spur gear pair, modal analysis results obtained with the finite element and lumped parameter analyses are compared in Table 5.

Table 5. Natural frequency comparison of lumped parameter (LPM) and finite element method (FEM)

Mode #	LPM Natural Frequency [Hz]	FEM Natural Frequency [Hz]	Mode Type
1	0	1011.3	Rotational (Rigid Body)
2	2235	2401	Axial (Gear)
3	2956	2964.2	Translational – Rotational
4	3160	3791.7	Translational (Gear)
5	4352	4648.8	Axial (Pinion)
6	5081	5097.9	Translational – Rotational
7	6154	11506	Translational (Pinion)
8	11267	4648.8	Tilting (Gear)
9	11267	4966.1	Tilting (Gear)
10	12489	12436	Translational – Rotational
11	40687	16326	Tilting (Pinion)
12	40687	17741	Tilting (Pinion)

Although there are significant differences between the assumptions of both analyses, consistent results are obtained. For instance, natural frequencies and mode shapes are obtained using the finite element analysis, which is made by employing the described mesh structure and boundary conditions. The gears are represented with flexible solid elements. For gear teeth contact, the contacting finite element nodes in both gears are rigidly connected. On the other hand, the gears are connected flexibly with translation and rotation springs in the lumped parameter model where the gears can rotate freely. It should be noted that the gear wheels are assumed to be not loaded in both two modelling techniques.

#### **4. Discussion**

The two methods which are lumped parameter and finite element methods are based on different assumptions. When comparing the results of these two methods, it should be pointed out that some of the natural frequencies of the respective modes are in good agreement. The natural frequencies of the axial and translational mode of the gear, the axial mode of the pinion gear, three of the translational – rotational modes are obtained with higher accuracy. The natural frequencies of these modes given by both methods are very close and consistent. This is because both methods use the same bearing stiffness values. The fact that the natures of the structures disk and gear teeth, as well as contact, are modelled differently in both methods leads to the calculation of slightly different frequencies.

However, the rest of the natural frequencies that are calculated with these two models have significant differences. The frequency that corresponds to the rotational mode is zero for the lumped parameter model whereas the finite element yields a nonzero frequency for the same mode. The reason behind this difference is, as mentioned earlier, essentially based on the modelling assumptions of the contact between the driven gear and the pinion gear. The rigid connection in the finite element model does not let the driven gear and pinion gear rotate freely while the spring on the lumped parameter model does not restrict that motion. Similarly, for the difference between the calculated axial modes, the same reason can be named. More precisely, in the lumped parameter model, it is assumed that the gear teeth can slide freely on each other, whereas in the finite element model, the contacting nodes in the gear teeth are connected to each other. Moreover, since the mass of the driven gear is larger than the pinion gear and the bending stiffness is small, the frequency values of the axial mode are very different.

Another difference to mention is about tilting modes around x and y axes. The tilting motion around the x-axis is coupled with other forms of motion in finite element method because of the 3D geometry of the gear teeth. Whereas in the lumped parameter method there is nothing that constrains the tilting motion of the gears. Therefore, these modes are not coupled with any other mode. In the results taken from the finite element method, the coupling is observed in tilting modes about y-axis as well. However, the reason behind this coupling is the over-restriction of the contact. Unlike the finite element model, the lumped parameter model displays uncoupled results for those modes. Thus, there is no restriction of this motion. It is seen that the frequencies of the in-plane mode of the gears, which express the vibration motion like a rigid disk, are different. This is due to the difference in gear teeth contact modelling assumptions as well as the flexible disk assumption of the finite element model.

As of the last comments, the finite element generally computes lower natural frequency values than the lumped parameter method. This roots from the difference between basic structural modelling assumptions. The lumped parameter model considers the disks as rigid. The only sources of flexibility in this model are the springs defined as the bearings and the spring that define the mesh stiffness. The same springs are used to define the bearings in the finite element model too. But additionally, the disks are also flexible in that model. This reduces the stiffness of the model. The only exception to this is the pinion gear's translational mode. The reason for the higher frequency in finite element method lies in the contact again. The contact restricts the motion in this direction, whereas, in the lumped parameter model, there is no restriction.

## 5. Conclusion

The natural frequencies and mode shapes of a spur gear pair under no-load are analysed with lumped parameter and finite element methods. In the lumped parameter model, gear bodies are assumed to be rigid, and they are grounded by uncoupled flexible bearing elements. Here, the gear teeth contacts are also considered as flexible. In the finite element model, gear bodies are modelled with 3D solid elements. Gear teeth contacts (meshes) are modelled as connected rigidly and bearing stiffnesses are modelled the same way as in the analytical method.

Overall, both methods show consistent modal behaviour despite the different assumptions on which they are built. The lumped parameter models can estimate the tooth modes satisfactorily, which is consistent with the finite element analysis results. On the other hand, lumped parameter model cannot compute the flexible gear body modes, which can only be detected with the finite element model. The analyses result shows that mode shapes predicted by the finite element and lumped parameter methods are mostly consistent, whereas some of the natural frequencies calculated by these two methods have significant differences. The reason for the differences between some natural frequencies lies in the gear contact and body modelling assumptions of the two methods.

Briefly, flexible gear body and gear contact modelling is necessary for an accurate modal parameter prediction of a spur gear pair system. Flexible gear body and contact modelling should be considered for a reliable gear dynamic analysis.

## Acknowledgement

This study was funded by the Ministry of National Education of the Republic of Turkey (MEB) and Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK). The authors thank Dr. Tugan Eritenel for his useful suggestions and comments.

## References

- [1] Lynwander, P., **Gear drive systems: Design and application**, 20, CRC Press, (1983).
- [2] Gregory, R. W., Harris, S. L. & Munro, R. G., Dynamic behaviour of spur gears, **Proceedings of the institution of mechanical engineers**, 178, 207–218 (1963).
- [3] Tang, X., Zou, L., Yang, W., Huang, Y. & Wang, H., Novel mathematical modelling methods of comprehensive mesh stiffness for spur and helical gears, **Applied Mathematical Modelling**, 64, 524–540 (2018).
- [4] Özgüven, H. N. & Houser, D. R., Mathematical models used in gear dynamics—a review, **Journal of Sound and Vibration**, 121, 383–411 (1988).
- [5] Wang, J., Li, R. & Peng, X., Survey of nonlinear vibration of gear transmission systems, **Applied Mechanics Reviews**, 56, 309–329 (2003).
- [6] Velex, P., On the Modelling of Spur and Helical Gear Dynamic Behaviour. (2012).
- [7] Yang, J. & Dai, L., Survey of dynamics of planetary gear trains, **International Journal of Materials and Structural Integrity**, 1, 302–322 (2008).



- [8] Chen, S., Tang, J., Li, Y. & Hu, Z., Rotordynamics analysis of a double-helical gear transmission system, **Meccanica**, 51, 251–268 (2016).
- [9] Chen, S., Tang, J., Zhou, C. & Hu, Z., Modal and whirling analysis of coupled lateral and torsional vibration of herringbone gear, **International Journal of Dynamics and Control**, (2014).
- [10] Wang, C., Wang, S. R., Yang, B. & Wang, G. Q., Dynamic modeling of double helical gears, **Journal of Vibration and Control**, 24, 3989–3999 (2018).
- [11] Kang, M. R. & Kahraman, A., An experimental and theoretical study of the dynamic behavior of double-helical gear sets, **Journal of Sound and Vibration**, 350, 11–29 (2015).
- [12] Kahraman, A. & Singh, R., Non-linear dynamics of a spur gear pair, **Journal of Sound and Vibration**, 142, 49–75 (1990).
- [13] Kahraman, A. & Singh, R., Interactions between time-varying mesh stiffness and clearance non-linearities in a geared system, **Journal of Sound and Vibration**, 146, 135–156 (1991).
- [14] Theodossiades, S. & Natsiavas, S., Non-linear dynamics of gear-pair systems with periodic stiffness and backlash, **Journal of Sound and Vibration**, 229, 287–310 (2000).
- [15] Litak, G. & Friswell, M. I., Vibration in gear systems, **Chaos, Solitons & Fractals**, 16, 795–800 (2003).
- [16] Li, S. & Kahraman, A., A spur gear mesh interface damping model based on elasto-hydrodynamic contact behaviour, **International Journal of Powertrains**, 1, 4 (2011).
- [17] Fang, Y., Liang, X. & Zuo, M. J., Effects of friction and stochastic load on transient characteristics of a spur gear pair, **Nonlinear Dynamics**, 93, 599–609 (2018).
- [18] Wei, S., Han, Q. K., Dong, X. J., Peng, Z. K. & Chu, F. L., Dynamic response of a single-mesh gear system with periodic mesh stiffness and backlash nonlinearity under uncertainty, **Nonlinear Dynamics**, 89, 49–60 (2017).
- [19] Yang, Y., Cao, L., Li, H. & Dai, Y., Nonlinear dynamic response of a spur gear pair based on the modeling of periodic mesh stiffness and static transmission error, **Applied Mathematical Modelling**, 72, 444–469 (2019).
- [20] Yang, Y., Xu, M., Du, Y., Zhao, P. & Dai, Y., Dynamic analysis of nonlinear time-varying spur gear system subjected to multi-frequency excitation, **Journal of Vibration and Control**, 25, 1210–1226 (2019).
- [21] Shi, J. fei, Gou, X. feng & Zhu, L. yun., Modeling and analysis of a spur gear pair considering multi-state mesh with time-varying parameters and backlash, **Mechanism and Machine Theory**, 134, 582–603 (2019).
- [22] Cirelli, M., Valentini, P. P. & Pennestri, E., A study of the non-linear dynamic response of spur gear using a multibody contact based model with flexible teeth, **Journal of Sound and Vibration**, 445, 148–167 (2019).
- [23] Xiao, Z., Zhou, C., Chen, S. & Li, Z., Effects of oil film stiffness and damping on spur gear dynamics, **Nonlinear Dynamics**, 96, 145–159 (2019).
- [24] Park, C. I., Dynamic behavior of the spur gear system with time varying stiffness by gear positions in the backlash, **Journal of Mechanical Science and Technology**, 34, 565–572 (2020).
- [25] Liu, F., Jiang, H., Liu, S. & Yu, X., Dynamic behavior analysis of spur gears with constant & variable excitations considering sliding friction influence, **Journal of Mechanical Science and Technology**, 30, 5363–5370 (2016).
- [26] Kahraman, A. & Blankenship, G. W., Experiments on nonlinear dynamic behavior of an oscillator with clearance and periodically time-varying parameters, **Journal**

- of Applied Mechanics**, 64, 217–226 (1997).
- [27] Velex, P. & Cahouet, V., Experimental and Numerical Investigations on the Influence of Tooth Friction in Spur and Helical Gear Dynamics, **Journal of Mechanical Design**, 122, 515 (2000).
- [28] Parker, R. G., Vijayakar, S. M. & Imajo, T., Non-linear dynamic response of a spur gear pair: modelling and experimental comparisons, **Journal of Sound and Vibration**, 237, 435–455 (2000).
- [29] Parker, R. G., Agashe, V. & Vijayakar, S. M., Dynamic Response of a Planetary Gear System Using a Finite Element/Contact Mechanics Model, **Journal of Mechanical Design**, 122, 304 (2002).
- [30] Abousleiman, V. & Velex, P., A hybrid 3D finite element/lumped parameter model for quasi-static and dynamic analyses of planetary/epicyclic gear sets, **Mechanism and Machine Theory**, 41, 725–748 (2006).
- [31] Cooley, C. G., Parker, R. G. & Vijayakar, S. M., A Frequency Domain Finite Element Approach for Three-Dimensional Gear Dynamics, **Journal of Vibration and Acoustics**, 133, 041004 (2011).
- [32] Vinayak, H. & Singh, R., Multi-body dynamics and modal analysis of compliant gear bodies, **Journal of Sound and Vibration**, 210, 171–214 (1998).
- [33] Ambarisha, V. K. & Parker, R. G., Nonlinear dynamics of planetary gears using analytical and finite element models, **Journal of Sound and Vibration**, 302, 577–595 (2007).
- [34] Cooley, C. G. & Parker, R. G., A Review of Planetary and Epicyclic Gear Dynamics and Vibrations Research, **Applied Mechanics Reviews**, 66, 040804 (2014).

# Uniqueness theorems for some classes of nonlinear fractional differential equations in the Riemann-Liouville sense

Müfit ŞAN\*

Çankırı Karatekin University, Faculty of Science, Department of Mathematics, Uluyazı Campus, Çankırı.

Geliş Tarihi (Received Date): 08.11.2020  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 11.12.2020

## Abstract

*In this study, some classes of Riemann-Liouville fractional differential equations with right-hand side functions having a singularity with respect to their first variable and with a nonhomogeneous initial condition are considered. First, it is briefly stated that under which conditions the existence of a local continuous solution of this initial value problem occurs. Later, uniqueness theorems were developed in types of Krasnosel'skii-Krein, Kooi, Roger and Banaś-Rivero, respectively. These theorems improve the previously obtained results, and for their proofs pre-existing techniques are enriched by the tools of Lebesgue spaces.*

**Keywords:** Fractional differential equations, Riemann-Liouville derivative, existence and uniqueness, Lebesgue spaces.

## Riemann-Liouville tip kesirli türevli lineer olmayan denklemlerin bazı sınıfları için teklik teoremleri

## Öz

*Bu çalışmada, sağ yan fonksiyonları birinci değişkenlerine göre singülerliğe sahip ve başlangıç koşulu homojen olmayan Riemann-Liouville kesirli diferansiyel denklemlerinin bazı sınıfları göz önüne alınmıştır. İlk önce, bu başlangıç-değer probleminin bir lokal sürekli çözümünün varlığını hangi koşullar altında gerçekleştiği kısaca ifade edilmiştir. Daha sonra ise, sırasıyla Krasnosel'skii-Krein, Kooi, Roger ve Banaś-Rivero tiplerinde teklik teoremleri ortaya çıkarılmıştır. Bu teoremler daha önceden elde edilen sonuçları geliştirirken, bu teoremlerin ispatları için, daha önceden var olan teknikler Lebesgue uzaylarının araçları ile zenginleştirilmiştir.*

\* Müfit ŞAN, mufitsan@karatekin.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-6852-1919>

**Anahtar kelimeler:** Kesirli mertebeden türevli denklemler, Riemann-Liouville türevi, varlık ve teklik, Lebesgue uzayları.

## 1. Introduction

Fractional Calculus (FC) is nowadays one of the most discussed and developing areas of mathematics (see, [1-6]). Perhaps the most important reason for this is that integral and derivative operators in FC, when compared with their integer order counterpart in classical calculus, are not uniquely defined, but rather one can witness that they are defined in many different ways in the literature. These so-called fractional derivatives are classified by some of their features, for example, by their kernels, singular or non-singular and by the time they were defined: newly or old-time defined (see, for example [1,4]). Riemann-Liouville (R-L), Grünwald-Letnikov, Hadamard fractional derivatives are counted as longstanding definitions, while Caputo-Fabrizio, Atangana-Baleanu, conformable are examples for newly defined operators. Recently, besides investigation of properties for each one of the newly defined operators, qualitative and quantitative properties of solutions to differential equations associated with them and their applications to physical and engineering problems are currently available in the literature and are still extensively studied. Although newly defined operators and related studies are recently popular in the theory and applications of FC, qualitative and quantitative properties such as existence, uniqueness and continuation, of solutions to the fractional differential equations in sense of Riemann-Liouville and Caputo fractional derivatives continue to be studied as before (see the latest work in [7-13]).

In this work, we use the R-L derivative and reveal some uniqueness criteria to a nonlinear fractional differential equation (FDE) involving the R-L derivative, given as follows:

$$\begin{aligned} {}_{RL}D^\gamma v(x) &= f(x, v(x)), 0 < x < T \\ v(0) &= v_0, \end{aligned} \quad (1)$$

where  $0 < \gamma < 1$  (is valid throughout the paper),  $T > 0$  is an arbitrary real number, the right hand side function  $f : (0, T] \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  will be given later,  $v_0 \neq 0$  is a real number and  ${}_{RL}D^\gamma$  stands for the R-L derivative of order  $\gamma$ , which is formularized by applying the ordinary derivative to R-L integral  $I^\gamma$  as below:

$${}_{RL}D^\gamma v(x) := \frac{d}{dx} \left[ I^{1-\gamma} v(x) \right] \text{ and } {}_{RL}I^\gamma v(x) := \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{v(\eta)}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta.$$

Here,  $\Gamma(\cdot)$  is the well-known Gamma function.

In [11], Şan and Sert investigated problem (1) under the following conditions:

(C1)  $f(x, v)$  is continuous on  $(0, T] \times \mathbb{R}$  so that  $x^\gamma f(x, v)$  is continuous on  $[0, T] \times \mathbb{R}$ .

(C2) There exists a real number  $M > 0$  so that

$$\left| x^\gamma f(x, \nu) - \frac{\nu_0}{\Gamma(1-\gamma)} \right| \leq M \max \left( x, \frac{|\nu - \nu_0|}{r} \right)$$

holds for all  $x \in [0, T]$  and for all  $t \in [\nu_0 - r, \nu_0 + r]$ , where  $r$  is a fixed positive real number.

They proved that problem (1) has at least one solution in  $C([0, T_0])$ , the space of continuous functions defined on  $[0, T_0]$ , where

$$T_0 := \begin{cases} \frac{r}{M\Gamma(1-a)}, & \text{if } M\Gamma(1-a) \geq r, \\ T & , \text{if } M\Gamma(1-a) \leq r. \end{cases}$$

It is worth noting that the inequality in (C2) implies  $x^\gamma f(x, \nu_0)|_{x=0} = \nu_0 / \Gamma(1-\gamma)$ , which is a necessary condition for the existence of a continuous solution to the problem as shown in [11]. Furthermore, since condition (C1) is not sufficient to give a Peano-type existence theorem by the aid of well-known theorems or methods (fixed point theorems, successive approximation etc.), they had to set another condition in (C2). For the uniqueness of solution to the problem, they gave a Nagumo-type criterion with the right hand side function  $f$  satisfying the inequality

$$x^\gamma |f(x, \nu_1) - f(x, \nu_2)| \leq L |\nu_1 - \nu_2| \tag{2}$$

where  $L$  is the Nagumo constant by  $L = [\Gamma(1-\gamma)]^{-1} < 1$ .

In this paper, our first aim is to obtain a better estimation for  $L$ . For this, in addition to the Nagumo-type condition, we will put forward a hypothesis which is a generalization of Krasnosel'skii-Krein-type condition given by [14-16]. The estimation we obtain for  $L$  will be greater than its previous value  $[\Gamma(1-\gamma)]^{-1}$  but still too limited (see, Remark 2.2). On the other hand, the continuity of the right-hand side function  $f$  of the FDE in (1) is the only criteria for determining the existence interval of solutions to the problem and it is sufficient for proving the existence of solutions. However, under each different condition such as Nagumo-type, Krasnosel'skii-Krein-type condition (see, [17-18] and other existence results of authors in references therein) existence theorems were proved by the method of successive approximations, which yield same existence interval for solutions. It is probably due to the desire for making contribution to the theory of FDE. Contrary to this we will not give an extra existence theorem and use the Peano-type existence theorem given in [11]. Moreover, the generalization of Kooi-type theorem in [16,19] will be given. When  $x^\gamma$  is replaced by  $x^{1+\gamma}$  in the inequality (2), we will establish the Roger-type uniqueness criterion which has a growth condition on  $f$  as in [16,20]. Finally, we generalize the lemma and the uniqueness theorem for ordinary differential equations of first order given by Banaś and Rivero in [21] to those for the FDE in (1). For proofs of all aforementioned uniqueness results we use techniques used

before with the tools of Lebesgue spaces such as Hölder inequality. For this reason, our results are convenient to be generalized for FDE in the weak sense.

The following lemma given in [11] will be main tool to reveal uniqueness results for problem (1):

**Lemma 1.1** Let condition (C1) and  $x^\gamma f(x, \nu_0)|_{x=0} = \nu_0 / \Gamma(1-\gamma)$  be fulfilled. Then  $\nu \in C([0, T])$  is a solution of problem (1) if and only if it is a solution of the Volterra-type integral equation

$$\nu(x) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{f(\eta, \nu(\eta))}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta. \tag{3}$$

Lastly, we point out that the continuity condition of  $x^\gamma f(x, \nu)$  on  $[0, T] \times \mathbb{R}$  is superfluous and thus can be dropped since condition (C2) with continuity of  $f(x, \nu)$  on  $(0, T] \times \mathbb{R}$  already implies it. Let us see this in the following remark:

**Remark 1.2** It is obvious that  $x^\gamma f(x, \nu) \in C((0, T] \times \mathbb{R})$ . Now, let  $\{(x_n, \nu_n)\}_{n=1}^\infty$  be a sequence in  $(0, T] \times \mathbb{R}$  so that  $(x_n, \nu_n) \rightarrow (0, \nu)$  for an arbitrary  $\nu \in \mathbb{R}$ . By using this in the inequality in condition (C2), one obtains

$$\begin{aligned} \left| x_n^\gamma f(x_n, \nu_n - \nu + \nu_0) - \frac{\nu_0}{\Gamma(1-\gamma)} \right| &\leq M \max \left( x_n, \frac{|\nu_n - \nu + \nu_0 - \nu_0|}{r} \right) \\ &= M \max \left( x_n, \frac{|\nu_n - \nu|}{r} \right) \rightarrow 0, \end{aligned}$$

which implies that  $x_n^\gamma f(x_n, \nu_n - \nu + \nu_0) \rightarrow \frac{\nu_0}{\Gamma(1-\gamma)} = x^\gamma f(x, \nu_0)|_{x=0}$ . From here, one can conclude  $x_n^\gamma f(x_n, \nu_n) \rightarrow x^\gamma f(x, \nu)|_{x=0}$  showing that  $x^\gamma f(x, \nu)$  is sequentially continuous. Therefore it is continuous on  $\{0\} \times \mathbb{R}$  as well. Consequently,  $x^\gamma f(x, \nu) \in C([0, T] \times \mathbb{R})$ .

## 2. Main results

We will begin with a Krasnosel'skii-Krein-type uniqueness theorem given as follows:

**Theorem 2.1** Let  $0 < \gamma < 1$  and conditions (C1)- (C2) be fulfilled. Furthermore, suppose that there exists a  $L > 0$  fulfilling the inequality  $\Gamma(L - \gamma + 1) < \Gamma(L)$  so that

$$x^\gamma |f(x, \nu_1) - f(x, \nu_2)| \leq L |\nu_1 - \nu_2| \tag{4}$$

holds for all  $(x, \nu_1), (x, \nu_2) \in [0, T] \times \mathbb{R}$ , and that there exist  $C > 0$  and  $\alpha \in (0, 1)$  satisfying  $\gamma - L(1 - \alpha) > 0$  such that

$$|f(x, \nu_1) - f(x, \nu_2)| \leq C|\nu_1 - \nu_2|^\alpha \tag{5}$$

is fulfilled for all  $(x, \nu_1), (x, \nu_2) \in [0, T] \times \mathbb{R}$ .

Then, problem (1) has a unique solution in  $C([0, T_0])$ .

**Proof.** Under hypothesis of the theorem, we suppose that problem (1) admits two different solutions represented by  $\nu_1, \nu_2 \in C([0, T_0])$ . We will prove by contradiction that they are actually equal. Set  $Y(x) = |\nu_1(x) - \nu_2(x)|$  with  $\nu_1, \nu_2$  satisfying (3). By applying condition (C1) and inequality in (5) we have the following estimation for  $Y(x)$  :

$$\begin{aligned} Y(x) &\leq \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{|f(\eta, \nu_1(\eta)) - f(\eta, \nu_2(\eta))|}{(x - \eta)^{1-\gamma}} d\eta \\ &\leq \frac{C}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{Y^\alpha(\eta)}{(x - \eta)^{1-\gamma}} d\eta \leq \frac{C}{\Gamma(\gamma)} \left( \int_0^x \left( \frac{1}{(x - \eta)^{1-\gamma}} \right)^q d\eta \right)^{1/q} \left( \int_0^x Y^{p\alpha}(\eta) d\eta \right)^{1/p} \\ &\leq \frac{C}{\Gamma(\gamma)(1 + (\gamma - 1)q)^{1/q}} x^{\frac{(\gamma-1)q+1}{q}} \Pi^{1/p}(x), \end{aligned}$$

where  $q > 1$  satisfies  $(\gamma - 1)q + 1 > 0$  and  $p = q / (q - 1)$ , and  $\Pi(x)$  is given by

$$\Pi(x) = \int_0^x Y^{p\alpha}(t) dt.$$

from here, we have the following inequality

$$Y^p(x) \leq C_1 x^{\frac{p(\gamma-1)q+1}{q}} \Pi(x). \tag{6}$$

This estimation leads to

$$\Pi'(x) = Y^{p\alpha}(x) \leq C_2 x^{\frac{p\alpha(\gamma-1)q+1}{q}} \Pi^\alpha(x).$$

Multiplying the both sides of the last inequality with  $(1 - \alpha)\Pi^{-\alpha}(x)$ ,

$$(1 - \alpha)\Pi^{-\alpha}(x)\Pi'(x) = \frac{d}{dx} [\Pi^{1-\alpha}(x)] \leq (1 - \alpha)C_2 x^{\frac{p\alpha(\gamma-1)q+1}{q}}$$

is obtained. If both sides of the above inequality are integrated from 0 to  $x$ , one gets

$$\Pi^{1-\alpha}(x) \leq C_3 x^{\frac{p\alpha(\gamma-1)q+1}{q}},$$

where  $\Pi(0) = 0$  is used. Consequently, this yields the following estimation for  $\Pi(x)$

$$\Pi(x) \leq C_4 x^{\frac{p\alpha(\gamma-1)q+1}{q(1-\alpha)} + \frac{1}{1-\alpha}}. \tag{7}$$

Determining (7) in (6), one can compute

$$Y(x) \leq C_4 x^{\frac{(\gamma-1)q+1}{q}} x^{\frac{\alpha(\gamma-1)q+1}{q(1-\alpha)} + \frac{1}{p(1-\alpha)}} \leq C_4 x^{\frac{\gamma}{1-\alpha}}$$

since  $\frac{p+q}{pq} = 1$ .

Now let  $\Pi_1(x) = x^{-L}\Pi(x)$ , where  $L$  fulfils the inequality  $\gamma - L(1-\alpha) > 0$  as it is assumed. Hence, from the last inequality it is  $0 \leq \Pi_1(x) \leq C_4 x^{\frac{\gamma}{1-\alpha} - L}$ .

It can be observed that  $\Pi_1(x)$  is continuous on  $[0, T_0]$  and  $\Pi_1(0) = 0$ . Let us now see that  $\Pi(x)$  vanishes identically on  $[0, T_0]$ . For this, suppose otherwise and let  $\Pi_1(x) \not\equiv 0$ . As a result of its continuity and non-negative valuedness, there is a point  $x_0 \in (0, T_0]$  at which  $\Pi_1(x)$  takes its maximum value. This enables the following assignation

$$M = \Pi_1(x_0) = \max_{x \in [0, T_0]} \Pi_1(x).$$

By using the inequality in (4),

$$\begin{aligned} M = \Pi_1(x_0) &= x_0^{-L}\Pi(x_0) \leq \frac{x_0^{-L}}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{x_0} \frac{\eta^\gamma |f(\eta, \nu_1(\eta)) - f(\eta, \nu_2(\eta))|}{\eta^\gamma (x_0 - \eta)^{1-\gamma}} d\eta \\ &\leq \frac{Lx_0^{-L}}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{x_0} \eta^{-\gamma} (x_0 - \eta)^{\gamma-1} \Pi(\eta) d\eta \leq \frac{Lx_0^{-L}}{\Gamma(\gamma)} \int_0^{x_0} \eta^{L-\gamma} (x_0 - \eta)^{\gamma-1} \Pi_1(\eta) dt \\ &\leq M \frac{\Gamma(L-\gamma+1)}{\Gamma(L)} < M \end{aligned}$$

for any  $t \in [0, x_0]$ , since  $\Gamma(L-\gamma+1) \leq \Gamma(L)$ . However, this is a contradiction. Hence,  $\Pi_1(x) \equiv 0$  on  $[0, T_0]$ , i.e  $\nu_1 = \nu_2$ , which is the desired result.

In the following we will give some observations on conditions of the theorem given above and comparison with the Nagumo-type uniqueness theorem given by [20].



**Remark 2.2** Consider the inequality  $\gamma - L(1 - \alpha) > 0$  in the hypothesis of the previous theorem. It is obvious that any value of  $\alpha \in (0, \gamma \Gamma(1 - \gamma) \delta^{-1})$  with  $\delta > 1$  and  $L = \beta(\Gamma(1 - \gamma))^{-1}$  with  $1 < \beta < \delta$  satisfy the above inequality. Here,  $L = \beta(\Gamma(1 - \gamma))^{-1} > (\Gamma(1 - \gamma))^{-1}$ , i.e.  $L$  is greater than the Nagumo constant. Moreover,  $\Gamma(L - \gamma + 1) < \Gamma(L)$  means that  $L$  cannot be greater than 1. This is the limitation of Theorem 2.1.

A Kooi-type uniqueness result which is known as a generalization of Krasnoselskii-Krein type uniqueness theorem is given as follows. Its proof is here omitted since it can be proved by the similar way used for the above theorem.

**Theorem 2.3** Let  $0 < \gamma < 1$  and conditions (C1)-(C2) be fulfilled. Furthermore, suppose that there exist a  $L > 0$  fulfilling the inequality  $\Gamma(L - \gamma + 1) \leq \Gamma(L)$  so that

$$x^\gamma |f(x, v_1) - f(x, v_2)| \leq L |v_1 - v_2|$$

holds for all  $(x, v_1), (x, v_2) \in [0, T] \times \mathbb{R}$ , and that there exist  $C > 0$ ,  $\beta \in [0, \gamma)$  and  $\alpha \in (0, 1)$  with  $\gamma - \beta - L(1 - \alpha) > 0$  such that

$$x^\beta |f(x, v_1) - f(x, v_2)| \leq C |v_1 - v_2|^\alpha$$

is satisfied for all  $(x, v_1), (x, v_2) \in [0, T] \times \mathbb{R}$ .

Then, problem (1) has a unique solution in the space of  $C([0, T_0])$ .

Replacing  $x^\gamma$  by  $x^{1+\gamma}$  in the inequality (4) and by putting forward a growth condition on the right hand side function  $f(x, v)$ , we reveal the Roger-type uniqueness criterion as follows:

**Theorem 2.4** Let  $0 < \gamma < 1$  and conditions (C1)-(C2) be fulfilled. Furthermore, suppose that there exists  $c$  with  $c \geq T_0^{\frac{q(1-\gamma)-1}{q}} \Gamma(\gamma) [1 - q(1 - \gamma)]^{\frac{1}{q}}$  ( $q < (1 - \gamma)^{-1}$ ) so that

$$x^{1+\gamma} |f(x, v_1) - f(x, v_2)| \leq c |v_1 - v_2| \tag{7}$$

holds for all  $(x, v_1), (x, v_2) \in [0, T] \times \mathbb{R}$ , and that there exist  $p > \frac{1}{\gamma}$  so that

$$f(x, v) = o \left( \exp \left( - \frac{1}{p [1 - p(1 + \gamma)] x^{[p(1+\gamma)-1]}} \right) x^{-(1+\gamma)} \right) \tag{8}$$

is uniformly valid for  $0 < v < \beta$  with an arbitrary  $\beta \in \mathbb{R}$ .

Then, problem (1) possesses at most one solution in the space of  $C([0, T_0])$ .

**Proof.** As in the proof of the previous theorem, we again assume that problem (1) has two different solutions such as  $\nu_1, \nu_2 \in C([0, T_0])$ . We will prove by contradiction that they are actually equal. By using inequality (7) in the integral representation of  $|\nu_1(x) - \nu_2(x)|$  and by applying Hölder inequality to the obtained inequality, respectively, we have

$$\begin{aligned} Y(x) = |\nu_1(x) - \nu_2(x)| &\leq \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{\eta^{1+\gamma} |f(\eta, \nu_1(\eta)) - f(\eta, \nu_2(\eta))|}{\eta^{1+\gamma} (x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta \\ &\leq \frac{c}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{Y(\eta)}{\eta^{1+\gamma} (x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta \\ &\leq \frac{c}{\Gamma(\gamma)} \left( \int_0^x \frac{1}{(x-\eta)^{q(1-\gamma)}} \right)^{1/q} \left( \int_0^x \left( \frac{Y(\eta)}{\eta^{1+\gamma}} \right)^p d\eta \right)^{1/p} \\ &\leq \frac{c}{\Gamma(\gamma)} \frac{T_0^{\frac{1-q(1-\gamma)}{q}}}{[1-q(1-\gamma)]^{\frac{1}{q}}} \left( \int_0^x \left( \frac{Y(\eta)}{\eta^{1+\gamma}} \right)^p d\eta \right)^{1/p} \\ &\leq \left( \int_0^x \left( \frac{Y(\eta)}{\eta^{1+\gamma}} \right)^p d\eta \right)^{1/p} := \Xi^{1/p}(x) \end{aligned}$$

i.e.  $Y^p(x) \leq \Xi(x)$  From here, one can draw the following conclusion

$$\frac{d}{dx} \Xi(x) = \frac{Y^p(x)}{x^{p(1+\gamma)}} \leq \frac{\Xi(x)}{x^{p(1+\gamma)}} \quad \text{and} \quad \frac{d}{dx} [e^{H(x)} \Xi(x)] \leq 0$$

for all  $x \in [0, T_0]$ , where

$$H(x) = -\frac{1}{[1-p(1+\gamma)]x^{[p(1+\gamma)-1]}}$$

This implies the non-increasing nature of  $e^{H(x)} \Xi(x)$ . With this fact, if we show that  $\lim_{x \rightarrow 0^+} e^{H(x)} \Xi(x) = 0$ , then it means that  $e^{H(x)} \Xi(x) \leq 0$  and, therefore, that  $Y(x) \leq 0$  for all  $x \in [0, T_0]$ , i.e.  $Y(x) \equiv 0$ . Now, let us show what we need. First, by considering the growth condition for  $f$  in (8) one has

$$Y(x) \leq \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{|f(\eta, \nu_1(\eta)) - f(\eta, \nu_2(\eta))|}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta$$

$$\begin{aligned} &\leq \frac{2\varepsilon}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{e^{-\frac{1}{p[1-p(1+\gamma)]\eta^{[p(1+\gamma)-1]}}}}{(x-\eta)^{1-\gamma}} \eta^{-(1+\gamma)} d\eta \\ &\leq \frac{2\varepsilon}{\Gamma(\gamma)} \left( \int_0^x \frac{1}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta \right)^{1/q} \left( \int_0^x e^{-\frac{1}{[1-p(1+\gamma)]\eta^{[p(1+\gamma)-1]}}} \eta^{-p(1+\gamma)} d\eta \right)^{1/p} \\ &\leq C \left( e^{-\frac{1}{[1-p(1+\gamma)]x^{[p(1+\gamma)-1]}}} \right)^{1/p}, \end{aligned}$$

which implies that  $Y^p(x) \leq C\varepsilon e^{-\frac{1}{[1-p(1+\gamma)]x^{[p(1+\gamma)-1]}}$ . By using this inequality, we obtain

$$\begin{aligned} e^{-H(x)}\Xi(x) &= \frac{1}{\Gamma(\gamma)} e^{-H(x)} \int_0^x \frac{Y^p(\eta)}{\eta^{p(1+\gamma)}} d\eta \\ &\leq \frac{C\varepsilon}{\Gamma(\gamma)} e^{-H(x)} \int_0^x \frac{e^{-\frac{1}{[1-p(1+\gamma)]\eta^{[p(1+\gamma)-1]}}}}{\eta^{p(1+\gamma)}} d\eta \\ &\leq C\varepsilon e^{-H(x)} e^{H(x)} = C\varepsilon \end{aligned}$$

which leads to  $\lim_{x \rightarrow 0^+} e^{H(x)}\Xi(x) = 0$ , as desired. This completes the proof.

To prove Theorem 2.6, we need the following lemma. Its proof can be derived by following the way depicted by Banaś and Rivero in [21].

**Lemma 2.5** Let  $Y \in C([0, T])$  be a non-negative function and  $g \in C(0, T]$  so that they satisfy the following conditions:

(C3) There exist a function  $G \in AC(0, T]$  so that  $G'(x) = g^p(x)$  a.e. in  $(0, T)$  and  $\lim_{x \rightarrow 0^+} G(x)$  exists.

(C4)  $Y^p(x) \leq \int_0^x g^p(\eta)\Omega^p(\eta)d\eta$  for  $x \in [0, T]$  and  $p \geq 1$ .

(C5)  $Y^p(x) = o(\exp(G(x)))$ .

Then,  $Y(x) \equiv 0$  on  $[0, T]$ .

By the aid of this lemma, uniqueness theorem to an initial value problem for the ODE in [22] can be extended to that for problem (1) as follows:

**Theorem 2.6** Let conditions (C1) and (C2) be fulfilled. Furthermore, suppose that the function  $g$  and  $G$  are given as in the previous lemma, and

$$c_1 \geq \Gamma(\gamma) [1 - q(1 - \gamma)]^{\frac{1}{q}} a^{-\frac{1-q(1-\gamma)}{q}} \quad \left(1 < q < \frac{1}{1-\gamma}\right)$$

so that the following conditions are satisfied:

$$|f(x, \nu_1) - f(x, \nu_2)| \leq c_1 g(x) |\nu_1 - \nu_2| \tag{10}$$

holds for all  $(x, \nu_1), (x, \nu_2) \in [0, T] \times \mathbb{R}$  and,

$$|f(x, \nu_1) - f(x, \nu_2)| = o(c_1 (g(x))^{1/p} \exp(\frac{1}{p} G(x))) \quad (p = \frac{q}{q-1} > \frac{1}{\gamma}) \tag{11}$$

is satisfied when  $x \rightarrow 0$  uniformly with respect to  $\nu_1, \nu_2$  in each closed interval in the type of  $[-b, b]$  for any  $b \in \mathbb{R}$ . Then, problem (1) has at most one solution in the space of  $C([0, T_0])$ .

**Proof.** Let  $\nu_1, \nu_2 \in C([0, T_0])$  be two different solutions of the problem. By contradiction let us show that they are identical on  $[0, T_0]$ . By applying inequality (10) to the integral representation of  $\nu_1, \nu_2$  in (3) and Hölder inequality with  $1 < q < \frac{1}{1-\gamma}$  and  $p = \frac{q}{q-1} > \frac{1}{\gamma}$  to the resultant inequality, one can deduce

$$\begin{aligned} Y(x) = |\nu_1(x) - \nu_2(x)| &\leq \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{|f(\eta, \nu_1(\eta)) - f(\eta, \nu_2(\eta))|}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta \\ &\leq \frac{c_1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{g(\eta) Y(\eta)}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta \\ &\leq \frac{c_1}{\Gamma(\gamma)} \left( \int_0^x \frac{1}{(x-\eta)^{q(1-\gamma)}} \right)^{1/q} \left( \int_0^x g^p(\eta) Y^p(\eta) d\eta \right)^{1/p} \\ &\leq \frac{c_1}{\Gamma(\gamma)} \frac{x^{\frac{1-q(1-\gamma)}{q}}}{[1-q(1-\gamma)]^{\frac{1}{q}}} \left( \int_0^x g^p(\eta) Y^p(\eta) d\eta \right)^{1/p} \\ &\leq \left( \int_0^x g^p(\eta) Y^p(\eta) d\eta \right)^{1/p} \end{aligned}$$

where  $c_1 \geq \Gamma(\gamma) [1-q(1-\gamma)]^{\frac{1}{q}} a^{\frac{1-q(1-\gamma)}{q}}$ . Hence, condition (C4) of Lemma 2.5 holds.

If inequality (11) is applied to the integral representation of  $\nu_1, \nu_2$  in (3), and if Hölder inequality with same  $p$  and  $q$  above is used to the obtained inequality, then

$$\begin{aligned} Y(x) = |\nu_1(x) - \nu_2(x)| &\leq \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{|f(\eta, \nu_1(\eta)) - f(\eta, \nu_2(\eta))|}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta \\ &\leq \frac{\epsilon c_1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x \frac{[g(\eta) \exp(G(\eta))]^{1/p}}{(x-\eta)^{1-\gamma}} d\eta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq \frac{\epsilon c_1}{\Gamma(\gamma)} \left( \int_0^x \frac{1}{(x-\eta)^{1-\gamma}} \right)^{1/q} \left( \int_0^x g(\eta) \exp(G(\eta)) d\eta \right)^{1/p} \\ &\leq \frac{\epsilon c_1}{\Gamma(\gamma)} \frac{a^{\frac{1-q(1-\gamma)}{q}}}{[1-q(1-\gamma)]^{\frac{1}{q}}} \left( \int_0^x g(\eta) \exp(G(\eta)) d\eta \right)^{1/p} \end{aligned}$$

which yields

$$Y(x) \leq \epsilon \int_0^x g(t) \exp(G(t)) dt = \epsilon \exp\left(\frac{1}{p} G(x)\right).$$

This means that condition (C5) is fulfilled. Thus, it has been shown that all conditions of Lemma 2.5 are fulfilled. As a result of the lemma,  $Y(x)$  vanishes identically on  $[0, T_0]$ , which indicates that problem (1) cannot have more than one solution.

### 3. Conclusion

In this work, we studied with Riemann-Liouville fractional differential equations with right-hand side functions having a singularity with respect to their first variable. The existence of local continuous solutions to the problem was briefly addressed. Furthermore, a Krasnosel'skii- Krein type uniqueness theorem for the problem was given for getting a better estimate for the Nagumo constant. For this result, Hölder's inequality, which is one of the most important tools of Lebesgue spaces, has been adapted to the available proof method. By using same inequality with the available methods, Kooi-type, Roger-type and Banaś-Rivero-type theorems were revealed under some appropriate conditions.

### Acknowledgement

We would like to thank the referees for their valuable comments eliminating deficiencies of the manuscript.

### References

- [1] Baleanu, D., Fernandez, A., On fractional operators and their classifications, **Mathematics**, 7(9), 830, (2019).
- [2] Kilbas, A. A. A., Srivastava, H.M., Trujillo, J.J., **Theory and applications of fractional differential equations**, Vol. 204, Elsevier Science Limited, (2006).
- [3] Miller, K.S., Ross, B., **An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations**, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley Sons Inc., New York, (1993).
- [4] Ortigueira, M.D., Machado, J.A.T. "What is a fractional derivative?.", **Journal of Computational Physics**, 293 (2015): 4-13.
- [5] Podlubny, I., **Fractional Differential Equations**, Academic Press, San Diego, (1999).

- [6] Samko, S.G., Kilbas A.A.A, Marichev, O.I., **Fractional Integrals and Derivatives: Theory and Applications**, Gordon and Breach, Yverdon, Switzerland, (1993).
- [7] Bilgici, S.S., Şan, M., Existence and Uniqueness Results for a nonlinear fractional differential equations of order  $\sigma \in (1,2)$ . **TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics**, (2020). (accepted)
- [8] Delbosco, D., and Luigi R., Existence and uniqueness for a nonlinear fractional differential equation, **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, 204.2 609-625, (1996).
- [9] Lan, K., Equivalence of higher order linear Riemann-Liouville fractional differential and integral equations. **Proceedings of the American Mathematical Society**, 148(12), 5225-5234, (2020).
- [10] Şan, M., Complex variable approach to the analysis of a fractional differential equation in the real line, **Comptes Rendus Mathématique**, 356, 3, 293-300, (2018).
- [11] Şan, M., Sert, U., Some analysis on a fractional differential equation with a right-hand side which has a discontinuity at zero, **Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics**, 49 (5), 1718 – 1725, (2020).
- [12] Wu, C., Liu, X, The continuation of solutions to systems of Caputo fractional order differential equations, **Fractional Calculus and Applied Analysis**, 23(2), 591-599, (2020).
- [13] Yörük, F., Bhaskar, T. G., Agarwal, R. P., New uniqueness results for fractional differential equations, **Applicable Analysis**, 92, No 2, 259-269, (2013).
- [14] Krasnosel'skii, M.A. Krein, S.G., Nonlocal existence theorems and uniqueness theorems for systems of ordinary differential equations, **Doklady Akademii Nauk SSSR (N.S.)** 102, 13-16, (1955).
- [15] Krasnosel'skii, M.A. Krein, S.G., On a class of uniqueness theorems for the equation  $y' = f(x,y)$ , **Uspekhi Matematicheskikh Nauk**, 11, 209-213, (1956).
- [16] Agarwal, R. P., Lakshmikantham, V., **Uniqueness and nonuniqueness criteria for ordinary differential equations**, Vol. 6, World Scientific, 1993.
- [17] Lakshmikantham, V., Leela, S., Nagumo-type uniqueness result for fractional differential equations, **Nonlinear Analysis**, 71, 7-8, 2886-2889, (2009).
- [18] Lakshmikantham, V., Leela, S., A Krasnoselskii–Krein-type uniqueness result for fractional differential equations, **Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications**, 71, 7-8, 3421-3424, (2009).
- [19] Kooi, O. The method of successive approximations and a uniqueness theorem of Krasnoselskii and Krein in the theory of differential equations, **Indagationes Mathematicae**, 20, 322-327, (1958).
- [20] Rogers, T., On Nagumo's condition, **Canadian Mathematical Bulletin**, 15, 609-611, (1972).
- [21] Banaś, J., Rivero, J., Remarks concerning J. Witte's theorem and its applications, **Commentationes Mathematicae Universitatis Carolinae**, 28(1), 23-31, (1987).

# Buluş yoluyla öğrenme ve anlamlı öğrenme yaklaşımlarına dayalı bir öğretim etkinliği; kimyasal denge tepkimeleri ve stokiyometri ilişkisi

Soner ERGÜL\*

Samsun Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Fen Bilgisi Eğitimi ABD, Kurupelit Yerleşkesi, Samsun

Geliş Tarihi (Received Date): 05.01.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.02.2021

## Öz

Kimya eğitiminde bir gösteri deneyinde gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını belirlemek ve kimyasal denge problemlerini çözmek hem öğretmenlerin hem de öğrencilerin en önemli problemlerinden biridir. Bu çalışmanın amacı, buluş yolu ve anlamlı öğrenme yaklaşımları ile bir gösteri deneyinde gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığının nasıl belirleneceğini ve kimyasal denge problemlerinde denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimini aşamalı olarak tasarlamaktır. Bu amaçla, problemlerin çözümünde, her bir aşamanın nasıl çözüleceğini açıklayan iki aşamalı tasarımı önerilmektedir. 7 etkinliğin yer aldığı tasarımda Etkinlik 1 ilk aşama için diğer etkinlikler ise ikinci aşama için tasarlanmıştır. Etkinlik 1'in anlaşılması diğer etkinlikler için ön koşuldur. İlk aşama (etkinlik 1) gösteri deneyinde gerçekleşen bir değişimin, kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına nasıl karar verileceğini açıklamaktadır. Etkinlik 1 için, dört açık uçlu gösteri deneyi tasarlanmıştır. Bu gösteri deneylerinin amacı, Le Châtelier İlkesi bağlamında sıcaklık değişiminin etkisinin gözlemlenmesidir. Etkinlik 2-7, bir kimyasal denge probleminde, denge sabiti hesaplanırken çözüm yönteminde her bir basamağın nasıl çözüleceğini göstermektedir. Etkinlik 2-7 için, on bir adet çözümlü problem verilmiştir. Tüm etkinlikler lise veya lisans düzeyindeki kimya eğitimi öğrencilerinin kimyasal denge konusu ile ilgili kavramları, Denge Teorisi ve Le Châtelier İlkesi'ni (Etki Tepki İlkesi) öğrenmelerinde yararlı olabilir. Bu etkinlikler ile öğrencilerin kimyasal denge konusunu anlamlı bir şekilde öğrenebilecekleri ve Stokiyometri bağlamında denge sabitini kolay bir şekilde hesaplayabilecekleri söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** Kimyasal denge, Stokiyometri, Le Châtelier ilkesi, gösteri deneyi, denge teorisi, dinamik denge.

\* Soner ERGÜL, sergul@omu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-6826-5481>

## A teaching activity based on discovery learning and meaningful learning approaches: the relationship between stoichiometry and chemical equilibrium reactions

### Abstract

*The determination whether a change occurring in a demonstration experiment is a chemical equilibrium reaction and solving equilibrium problems are some of the most important problems for both teachers and students in chemistry education. This study aims to gradually design the teaching of how to determine whether the change occurring in a demonstration experiment is a chemical equilibrium reaction, and how to calculate the equilibrium constant in chemical equilibrium problems through invention and meaningful learning approaches. For this purpose, a two-stage design that explains each stage in solving problems is proposed. In the design including 7 activities, Activity 1 was designed for the first stage and the other activities for the second stage. Understanding Activity 1 is a prerequisite for other activities. The first stage (activity 1) explains how to decide whether a change that occurs in the demonstration experiment is a chemical equilibrium reaction. For Activity 1, four open-ended demonstration experiments whose aim is to observe the effect of temperature change in the context of the Le Châtelier Principle are designed. Activity 2-7 shows how to solve the problem in each stage in the solution method when calculating the equilibrium constant in a chemical equilibrium problem. For Activity 2-7, eleven problems with solutions are given. All activities can be useful for high school or undergraduate chemistry students while learning the concepts of chemical equilibrium, Equilibrium Theory and Le Châtelier Principle. It can be said that via these activities, students will be able to learn the subject of chemical equilibrium in a meaningful way and calculate the equilibrium constant easily in the context of stoichiometry.*

**Keywords:** *Chemical equilibrium, Stoichiometry, Le Châtelier principle, demonstration experiment, equilibrium theory.*

### 1. Giriş

Kimya eğitiminde anlamlı öğrenme, öğrencinin bilimsel bilgiyi bilmesinin ötesinde, yeni durumlarda bilgiyi kullanabilmesini gerektirir (Hackathorn ve diğerleri, 2011). Öğrencilerin bilgiyi edinmesi ve kullanmasına yönelik yol gösterici olarak fen eğitimi literatüründe iki kuramsal yaklaşım kendini göstermektedir. Öğretim stratejilerini belirleyen bu yaklaşımlardan ilki genelde “Buluş Yoluyla Öğrenme” olarak adlandırılan öğrenme kuramıdır. Buluş yoluyla öğrenme, “bilmek bir ürün değil, bir süreçtir” diyen Bruner tarafından 1960’lı yıllarda geliştirilmiştir (Akman ve Erden, 1997, Senemoğlu, 2001). Bu kurama göre, öğretim ortamı öğretmenin hazır bilgiyi öğrenciye sunmasından çok, öğrencinin kendi kendine öğrenebileceği bir ortam olmalıdır. Bu nedenle öğrencilerin bilgiyi edinmeleri düşünme ve deneme sonucunda bir buluş ile gerçekleşir. Öğretmenin rolü ise bilgiyi doğrudan sunmak yerine öğrencilere deney yapmalarını ve bilimsel bilgilere (ilke ve kavramlara) ulaşmalarını sağlamak ve onlara rehberlik etmektir (Özmen,2004; Aydın, 2001). Buluş yoluyla bir fen konusunun öğretiminin temelini gösteri deneyleri, tümevarım yaklaşımı ve problem çözme oluşturmaktadır (Çepni, S.



2012). Diğer taraftan bilginin yeni durumlara uygulanması ve örneklendirilmesi açısından fen eğitimi için öne çıkan kuram ise D. Ausubel tarafından geliştirilmiştir. Bu kuram genelde sunuş yolu ile öğretimi destekleyen “Anamlı Öğrenme” kuramıdır. Bu kuramda bilginin birey tarafından anlamlandırılması esastır. Öğrenmenin anlamlı olarak gerçekleştirilebilmesi için; öğrenilecek bilgiler, kendi içinde bir bütünlük ve anlamlılık taşınmalı; öğrenci, öğrenilecek konuyla ilgili doğru ön bilgilere sahip, öğrenmeye karşı istekli ve kararlı olmalıdır. Bu yaklaşım tümdengelim yöntemini esas alır; öğretilecek konunun aşamalı olarak ayrıntılara dönüştürülmesi gerekir. Anamlı öğrenmenin gerçekleştirilebilmesi için, yeni bilgi ile eski bilgi arasındaki ilişkilerin belirtilmesi, önemli farklılık ve benzerliklerin ortaya konması ve anlaşılmayan noktaların giderilmesi gerekir (Fidan ve Erden, 1986).

Bu bağlamda bakıldığında buluş yolu ile öğrenme ve anlamlı öğrenme, başka bir ifade ile sunuş yolu ve buluş yolu, birlikteliğinde bir bütünlük oluşturmak kimya eğitiminde etkili sonuçlar verebilir. Çünkü kimya hem bir öğrencinin tümevarımla ulaşabileceği deneysel bilgileri (ampirik) hem de bir öğrencinin buluş yapması her zaman mümkün olmayan üzerinde uzlaşmış kuramsal bilgileri (teori ve modelleri) içeren bir bilimdir (Sarıtaş ve Tufan, 2013). Örneğin kuramsal bilgilerin öğrenilmesi kimya eğitiminde zordur. Örneğin yoğun bir kuramsal bilgi gerektiren kimyasal denge tepkimeleri kimya eğitiminde önemli ve anlaşılması zor olan konulardan biridir. Literatürde bir kimyasal tepkimenin denge tepkimesi olduğunu belirlemek amacıyla yapılmış çok az birinde (Cheung, 2009) Le Châtelier İlkesi (Etki Tepki İlkesi) bağlamında kimyasal dengeye derişimin etkisi ile ilgili uyguladığı testte 33 öğretmenden yalnızca 2 öğretmenin denge teorisini uygulayabildiği ve 31 öğretmenin kimyasal denge problemlerini çözme konusunda başarısız olduğu ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar sabit sıcaklıkta, NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazlarının dengede olduğu tepkimenin bulunduğu sistemin hacmi azaltıldığında, NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazlarının derişim veya basıncının başlangıçta ve tekrar denge kurulduğunda nasıl değişeceğini, dengenin hangi yöne kayacağına karar vermede çoğu öğretmenin problem yaşadığını ifade etmişlerdir. Bu durumu, okullar için hazırlanmış ders müfredatının yetersizliği ve kimyasal denge ile ilgili kavramların soyut olmasına dayandırmışlardır. Deneysel bilgilerin edinilmesinde kimya eğitiminde deneysel yaklaşımlar bağlamında laboratuvar yöntemi ve gösteri deneyleri oldukça önemlidir. Ancak kapalı uçlu deneysel etkinlikler öğrencilerin bilim insanı gibi davranış göstermesini sağlamaz iken; açık uçlu deneysel etkinlikler ise öğrencilerin, bilim insanı gibi davranış göstermesini sağlamaktadır. (Gallet, 1998). Bu nedenle deneyler özellikle daha az kuramsal bilgi gerektiren ve deneyden elde edilebilecek bilgileri hedefleyen etkinliklerde öğrencilerin buluşuna imkân vermektedir. Örneğin yine denge konusu ile ilgili olarak Eilks ve Gülaçar (2016), kimya eğitiminde gösteri deneyi uygulamalarının bazı kavramların öğretimini kolaylaştırdığını belirtmişlerdir. Eilks, Gülaçar ve Sandoval (2018), ise oda sıcaklığında katı olan zeolitlerin asit-baz özellikleri ile ilgili bir gösteri deneyi tasarlamışlardır. Bu gösteri deneyinde, etki-tepki ilkesinin öğretimi amacıyla tepkimede türlerden birinin derişiminin değiştirilmesi durumunda tepkimenin hangi yöne değiştiğini gözlem yoluyla elde edilen nitel verilere bağlı olarak basit ve somut bir şekilde yapılabildiğini belirtmişlerdir.

Kimya eğitiminde hem kuramsal hem de deneysel bilgilerin bir arada verilmesi gereken konulardan birisi olan kimyasal dengenin öğretiminde analogi ve bilgisayar destekli uygulamaların etkili olduğu bilinmektedir (Coloman ve Wildman; 200; İhde, 1989). Ancak yukarıda ifade edildiği üzere bu konudaki sorunlar devam etmektedir. Bu nedenle hem deneysel hem de kuramsal bilgilerin sistematik bir şekilde deneyime ve çıkarıma imkan veren bir etkinlik tasarımı ile sağlanabilmesi mümkündür. Bu konuda Ergül ve

arkadaşları (2020) turnusol testi bağlamında turnusol kağıdının asit ve baz çözeltilerindeki renk değişiminin tersinir nitelikte olduğunu somut ve basit bir şekilde gösteren ardışık gösteri deneyleri tasarlamış ve kimyasal denge tepkimeleri üzerinden kimyasal değişimin doğasının öğretiminde kullanılabilir bir öğretim planlaması önermişlerdir. Yine benzer bir etkinlik Ergül (2018) tarafından, az çözünen tuz oluşum tepkimelerine bağlı olarak  $Ag^{1+}$  ve  $Pb^{2+}$  katyonlarının  $Cl^{1-}$  ile  $AgCl$  ve  $PbCl_2$  az çözünen tuz oluşumu ile birbirinden ayrılabilirliği, gravimetrik olarak nicel analizlerinin yapılabilirliği ile stokiyometri ilişkisi üzerine etkinlik tasarımı önermiştir.

Bu çalışmada ise bilişsel kurama ait ve kimya konularındaki öğrenmelere uygun olan “Buluş Yoluyla Öğrenme Yaklaşımı” ve “Anlamlı Öğrenme Yaklaşımı” temel alınarak “Kimyasal Denge Tepkimeleri” konusunun öğretimi için ders tasarımı geliştirilmiş ve uygulamaya hazır hale getirilmiştir.

## 2. Etkinlik

### 2.1. Etkinlik, aşamalar ve soruları

Etkinlikler iki ana aşama içermektedir ve bu aşamalara bağlı olarak iki ana soruya cevap vermektedir;

İlk aşamada, açık uçlu bir gösteri deneyinde gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığının nasıl belirleneceği konusuna odaklanılmıştır. Bu aşamada şu soruya cevap aranmıştır; *Açık uçlu bir gösteri deneyinde gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına nedensellik ilkesi bağlamında nasıl karar verilir?*

İkinci aşamada kimyasal denge tepkimelerinde hesaplamaların nasıl yapılacağı örnek problemlerin çözümü yer almaktadır. Bu aşamada ise şu soruya cevap aranmıştır; *Bir kimyasal denge tepkimesinin denge sabiti ( $K_d$ ) nasıl hesaplanır?*

Etkinlikte bir gösteri deneyinde gerçekleşen kimyasal değişimin türünün nasıl belirleneceğinin ve kimyasal denge problemlerinin nasıl çözüleceğinin öğretimi için yedi etkinlik önerilmiş ve on beş adet çözümlü kimyasal denge problemi verilmiştir. Önerilen etkinlikler, kazanımları ve ilgili örnek problem numaraları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen etkinlikler, kazanımları ve örnek problem dağılımı.

Etkinlik ismi	Kazanımlar	Örnek Problem
Etkinlik 1	Kimyasal denge tepkimesini belirleme.	Problem 1–4
Etkinlik 2	Kimyasal denge tepkimesini denkleştirebilme. Homojen denge tepkimesi ve heterojen denge tepkimesini ayırt etme	Problem 5–6
Etkinlik 3	Denge sabiti eşitliğini yazma.	Problem 7-8
Etkinlik 4	Bir kimyasal denge probleminde dengedeki türlerin molar derişimleri verildiğinde, denge sabitini hesaplama	Problem 9
Etkinlik 5	Bir kimyasal denge probleminde dengedeki türlerin mol sayıları ve sistemin hacmi verildiğinde, denge sabitini hesaplama	Problem 10
Etkinlik 6	Bir kimyasal denge probleminde dengedeki türlerin kütleleri, mol kütleleri ve sistemin hacmi verildiğinde, denge sabiti hesaplama	Problem 11
Etkinlik 7	Bir kimyasal denge probleminde toplanabilirlik ilkesine göre, denge sabitini hesaplama	Problem 12-15

### 1. Aşama: Kimyasal Denge Tepkimesi

Bu aşamada 1 etkinlik ve 4 gösteri deneyi tasarlanmıştır.

Bir gösteri deneyinde gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına nasıl karar verileceğinin öğretimi Etkinlik 1’de açıklanmaktadır.

#### Etkinlik 1. (Değişim kimyasal denge tepkimesi mi değil mi?)

Açık uçlu bir gösteri deneyinde gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını öğrencinin belirlemesi amaçlanmıştır. Açık uçlu bir gösteri deneyi Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklık değişiminin dengeye etkisinin incelenmesine dayanır. Etkinlik 1’deki örnek problemlerde, sıcaklık değişimi ile renk şiddetinin değişimine bağlı olarak, değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını öğrenci tarafından belirlenmesi istenmektedir. Problem 4 basamakta çözümlenir. **Birinci basamakta**, öğrenci gösteri deneyindeki  $\text{NO}_2$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$  gazlarının hangi renkte olduğunu belirlemelidir. **İkinci basamakta**, sıcaklık değiştiğinde,  $\text{NO}_2$  ve  $\text{N}_2\text{O}_4$  gazlarının miktar veya derişimlerinin nasıl değiştiğini belirlemelidir. **Üçüncü basamakta**, Maddenin Korunumu Yasası ve Atom Teorisi’ne göre, renk şiddetindeki değişime bağlı olarak fiziksel değişim mi yoksa kimyasal değişim mi gerçekleştiğine karar vermelidir. **Dördüncü basamakta**, renk şiddetindeki değişim ve bu değişime neden olan fiziksel veya kimyasal değişimin tersinir mi yoksa tersinmez mi olduğuna karar vermelidir. **Son olarak**, gösteri deneyinde gerçekleşen değişimin, kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına karar vermelidir.

Öğretmen ders anında gösteri deneyi metnini okuduktan sonra, tekrar okumalı ve öğrencilerin her bir basamak ile ilgili soruyu yanıtlamalarını istemelidir. Bu amaçla dört açık uçlu gösteri deneyi tasarlanmıştır.

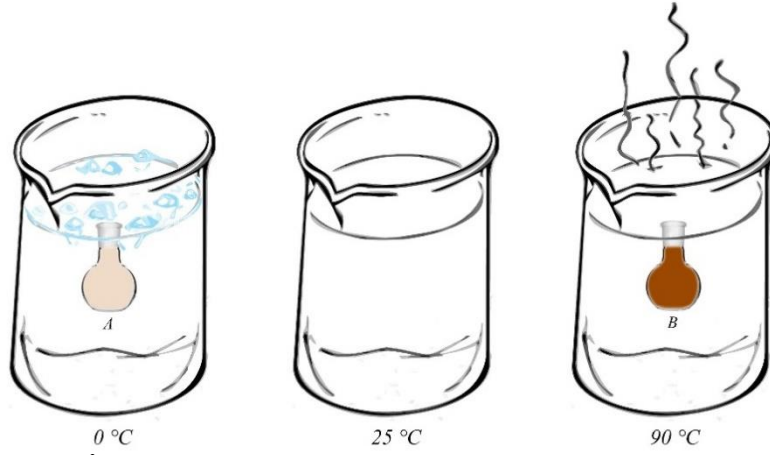
Gösteri Deneyi 1, Pimental G. C. (1963)’den yararlanılarak yeniden tasarlanmıştır.

#### Gösteri Deneyi 1 (Kimyasal dengeyi görebilir miyim?)

$0^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  ve  $90^\circ\text{C}$ ’de  $\text{N}_2\text{O}_4$  gazı renksiz iken,  $\text{NO}_2$  gazı kızıl kahve renkli olduğu bilinmektedir. Deneysel etkinliğin **birinci basamağında**, oda sıcaklığındaki ( $25^\circ\text{C}$ ) su banyosuna daldırılmış iki özdeş balona, aynı basınçta saf  $\text{NO}_2$  gazı doldurulmaktadır. **İkinci basamakta**,  $\text{NO}_2$  gazı dolu balonlardan birisi  $0^\circ\text{C}$ ’deki buz banyosuna, diğeri ise  $90^\circ\text{C}$ ’deki su banyosuna daldırılmaktadır.  $0^\circ\text{C}$ ’deki balondaki gazın zamana bağlı olarak kızıl kahve renk şiddetinin azaldığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı,  $90^\circ\text{C}$ ’deki balondaki gazın zamana bağlı olarak kızıl kahve renk şiddetinin arttığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. **Son basamakta**, her iki balonda tekrar  $25^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki balona daldırıldığında, her iki balonda da kızıl kahve renk şiddetinin aynı olduğu gözlenmektedir. Deneysel etkinliğin birinci, ikinci ve son aşamalarının görüntüleri sırasıyla Şekil 1-3’de verilmiştir.



Şekil 1. **Birinci basamak:**  $25^\circ\text{C}$ ’deki su banyosuna daldırılmış aynı basınçta saf  $\text{NO}_2$  gazı içeren A ve B balonlarının görüntüsü. (Açık kızıl kahve renkli).



Şekil 2. **İkinci basamak:** 0°C'de A balonunun ve 90°C'de B balonunun görüntüsü. (0°C'de renksiz yakın kızıl kahve, 90°C'de koyu kızıl kahve renkli).



Şekil 3. **Son basamak:** 25°C'de aynı basınçta NO<sub>2</sub> gazı içeren A ve B balonlarının görüntüsü. (Aynı şiddette açık kızıl kahve renkli).

**Problem 1.** Gösteri Deneyi 1'de gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına karar veriniz.

**Gösteri Deneyi 1'in amacı nedir?**

**Yanıt:** 25°C'de aynı basınçta NO<sub>2</sub> gazı doldurulmuş özdeş iki balonun Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklığı değiştirildiğinde, kızıl kahve renk şiddetinin nasıl değiştiğini gözlem yoluyla incelemek ve nedensellik ilkesi bağlamında değişimlerin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını açıklamaktır.

**Gösteri Deneyi 1'de ne gözlenmektedir?**

**Yanıt:** 25°C'den 0°C'deki buz banyosuna daldırılan balonda, kızıl kahve renk şiddetinin azaldığı, 25°C'den 90°C'deki su banyosuna daldırılan balonda ise, kızıl kahve renk şiddetinin arttığı gözlenmektedir. 0°C ve 90°C'deki balonlar tekrar 25°C'deki su banyosuna daldırıldığında, kızıl kahve renk şiddetinin her ikisinde de aynı olduğu gözlenmektedir.

**Gösteri Deneyi 1'de NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazlarının renkleri neden farklıdır?**

**Yanıt:** Bazı bileşiklerin molekülleri görünür bölge ışığını hiç absorblamaz iken, bazı bileşiklerin molekülleri ise görünür bölge ışığın bir miktarını absorblayabilir. Gösteri Deneyi 1'de, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> molekülleri görünür bölge ışınlarını absorblamaz iken, NO<sub>2</sub> molekülleri bazı görünür bölge ışınlarını absorblar. Bu nedenle, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı renksiz görünürken, NO<sub>2</sub> gazı kızıl kahve renkli görünür.

**Gösteri Deneyi 1'de aynı şartlarda iki gaz örneğinin renginin farklı olması ne anlama gelir?**

**Yanıt:** Atom Teorisi'ne göre, aynı şartlarda iki gaz örneğinin renginin farklı olması, moleküler yapılarının birbirinden farklı olduğu başka bir deyişle farklı maddeler olduğu anlamına gelmektedir. Gösteri Deneyi 1'de NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazları aynı tür (N ve O) atomlardan oluşmalarına rağmen, molekül yapıları bağlamında birleşen N ve O atomu sayılarının, molekül formüllerinin ve molekül geometrilerinin farklı olması nedeniyle maksimum absorpsiyon yaptıkları dalga boyu ( $\lambda_{max}$ ) değerleri veya renkleri farklıdır.

**Gösteri Deneyi 1'de renk şiddetinin azalması veya artmasının nedeni fiziksel değişim mi yoksa kimyasal değişim midir?**

**Yanıt:** Lambert Beer Yasası'na göre, NO<sub>2</sub> gazı derişimi ile kıvıl kahve renk şiddeti doğru orantılıdır. Balonun sıcaklığı 25°C'den 0°C'ye azaltıldığında kıvıl kahve renk şiddeti azaldığına göre, NO<sub>2</sub> gazı derişimi de azalır. Bu durumda, Maddenin Korunumu Yasası ve Atom Teorisi'ne göre NO<sub>2</sub> gazı, renksiz yeni bir maddeye (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı) dönüşmektedir. Bu nedenle, kimyasal değişim gerçekleştiği söylenebilir.

**Gösteri Deneyi 1'de renk şiddetinin değişimi tersinir mi yoksa tersinmez mi?**

**Yanıt:** 25°C'den 0°C'ye daldırılan balonun renk şiddeti azalırken, 25°C'den 90°C'ye daldırılan balonunun renk şiddetinin artması ve her iki balonda tekrardan 25°C'deki balona daldırıldığında aynı renk şiddetine sahip olması, gerçekleşen renk değişiminin tersinir özellikte olduğunu göstermektedir.

**Gösteri Deneyi 1'de renk şiddetinin değişiminin tersinir olması ne anlama gelmektedir?**

**Yanıt:** Tersinir renk değişimi nedeniyle gerçekleşen kimyasal değişimin, kimyasal denge tepkimesi olduğu anlamına gelir.

**Gösteri Deneyi 1'de renk şiddetinin sabit olması ne anlama gelmektedir?**

**Yanıt:** Kimyasal Kinetik Teori'ye göre, ileri tepkimenin hızının, geri tepkimenin hızına eşit olduğu, Termodinamik açıdan denge kesrinin denge sabitine eşit olduğu, sonuç olarak sistemde gerçekleşen tepkimenin denge konumuna ulaştığı anlamına gelmektedir.

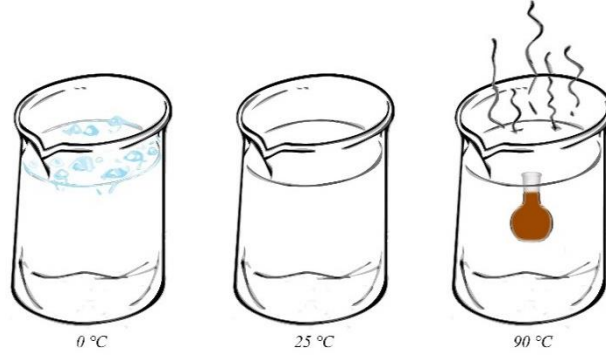
**Gösteri Deneyi 1'de renk şiddetinin sabit olması Denge Teorisi'ne göre nasıl açıklanır?**

**Yanıt:** Denge Teorisi'ne göre, sabit sıcaklıkta kapalı bir sistemde renk şiddeti gibi bir makroskobik özelliğın sabit olması, sistemde gerçekleşen değişimin dengede olduğunu göstergesidir. Ancak, renk şiddeti değişmemesine rağmen, dinamik dengenin doğası gereği moleküler düzeyde girenlerin ürünlere, ürünlerin girenlere dönüşümü devam eder.

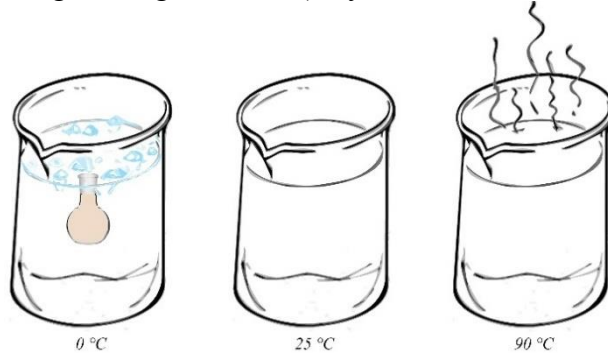
**Gösteri Deneyi 2 (Kimyasal dengeyi görebilir miyim?)**

**Deneysel yöntem:** 0°C, 25°C ve 90°C'de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı renksiz iken, NO<sub>2</sub> gazı kıvıl kahve renkli olduğu bilinmektedir. Deneysel etkinliğin **birinci basamağında**, 90°C'deki su banyosunda olan ağzı kapalı bir balona saf kıvıl kahve renkli NO<sub>2</sub> gazı doldurulmaktadır.

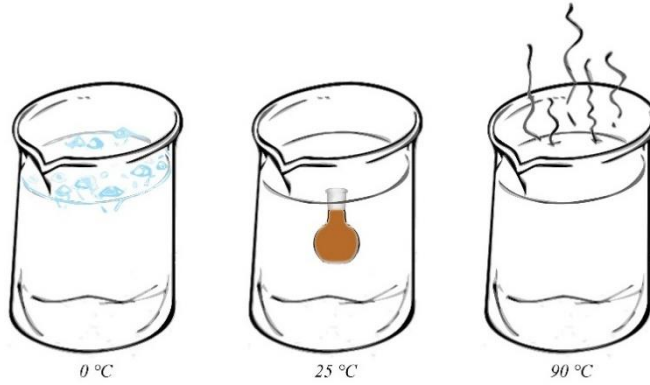
**İkinci basamakta**, 90°C'deki balon su banyosundan çıkarılıp 0°C'deki buz banyosuna daldırıldığında, zamana bağlı olarak kıvıl kahve renk şiddetinin azaldığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. **Son basamakta**, 0°C'deki buz banyosundaki balon 25°C'deki su banyosuna konulduğunda, zamana bağlı olarak kıvıl kahve renk şiddetinin arttığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca 90°C'deki kıvıl kahve renk şiddetinin 25°C'deki renk şiddetinden daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Deneysel etkinliğin birinci, ikinci ve son aşamasının görüntüleri sırasıyla Şekil 4- 6'da verilmiştir.



Şekil 4. **Birinci basamak:** 90°C'deki su banyosuna daldırılmış balondaki saf NO<sub>2</sub> gazının görüntüsü. (Koyu kırmızı kahve renkli).



Şekil 5. **İkinci basamak:** 0°C'deki buz banyosuna daldırılmış balondaki gazın görüntüsü. (Renksiz yakın kırmızı kahve renkli).



Şekil 6. **Üçüncü basamak:** 25°C'deki su banyosuna daldırılmış balondaki gazın görüntüsü. (Açık kırmızı kahve renkli).

**Problem 2.** Gösteri Deneyi 2'de gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına karar veriniz.

**Gösteri Deneyi 2'in amacı nedir?**

**Yanıt:** 90°C sıcaklıkta yalnızca NO<sub>2</sub> gazı içeren bir balonun Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklığı değiştirildiğinde, kırmızı kahve renk şiddetinin nasıl değiştiğini gözlem yoluyla incelemek ve nedensellik ilkesi bağlamında değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını açıklamaktır.

**Gösteri Deneyi 2'de ne gözlenmektedir?**

**Yanıt:** Balondaki gazın sıcaklığı 90°C'den 0°C'ye azaltıldığında kırmızı kahve renk şiddetinin azaldığı, 0°C'den 25°C'ye artırıldığında ise kırmızı kahve renk şiddetinin arttığı

gözlenmektedir. Ayrıca 90°C'deki kıvıll kahve renk şiddetinin 25°C'deki renk şiddetinden daha fazla olduğu belirlenmiştir.

**Gösteri Deneyi 2'de renk şiddetinin azalmasının nedeni fiziksel değişim mi yoksa kimyasal değişim midir?**

**Yanıt:** Lambert Beer Yasası'na göre, renge neden olan maddenin derişimi ile renk şiddeti doğru orantılıdır. Bu nedenle Gösteri Deneyi 2'de NO<sub>2</sub> gazı derişimi ile kıvıll kahve renk şiddeti doğru orantılıdır. Balonun sıcaklığı 90°C'den 0°C'ye azaltıldığında kıvıll kahve renk şiddeti azaldığına göre, NO<sub>2</sub> gazı derişimi de azalır. Bu durumda, Maddenin Korunumu Yasası ve Atom Teorisi'ne göre NO<sub>2</sub> gazı, renksiz yeni bir maddeye (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı) dönüşmektedir. Bu nedenle, kimyasal değişim gerçekleştiği söylenebilir.

**Gösteri Deneyi 2'de renk şiddetinin değişimi tersinir mi yoksa tersinmez mi?**

**Yanıt:** Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklık azaltıldığında ve artırıldığında, aynı renk (kıvıll kahve renk) azalıyor ve tekrar artıyorsa renk değişimi ve renk değişimine neden olan değişim tersinirdir. Bu nedenle, Gösteri Deneyi 2'de, balonun sıcaklığı 90°C'den 0°C'ye azaltıldığında, kıvıll kahve renk şiddetinin azalması ve 0°C'den 25°C'ye artırıldığında kıvıll kahve renk şiddetinin artması, gerçekleşen renk değişiminin tersinir özellikte olduğunu göstermektedir.

**Gösteri Deneyi 2'de renk şiddetinin değişiminin tersinir olması ne anlama gelmektedir?**

**Yanıt:** Tersinir renk değişimi nedeniyle gerçekleşen kimyasal değişimin, kimyasal denge tepkimesi olduğu anlamına gelir.

**Gösteri Deneyi 2'de renk şiddetinin sabit olması ne anlama gelmektedir?**

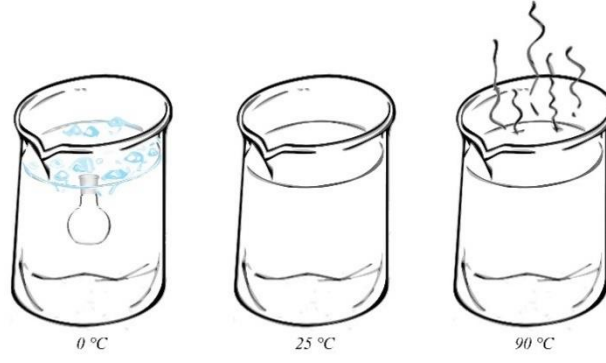
**Yanıt:** Kimyasal Kinetik Teori'ye göre, ileri tepkimenin hızının, geri tepkimenin hızına eşit olduğu, Termodinamik açıdan denge kesrinin denge sabitine eşit olduğu, sonuç olarak sistemde gerçekleşen tepkimenin denge konumuna ulaştığı anlamına gelmektedir.

**Gösteri Deneyi 2'de renk şiddetinin sabit olması Denge Teorisi'ne göre nasıl açıklanır?**

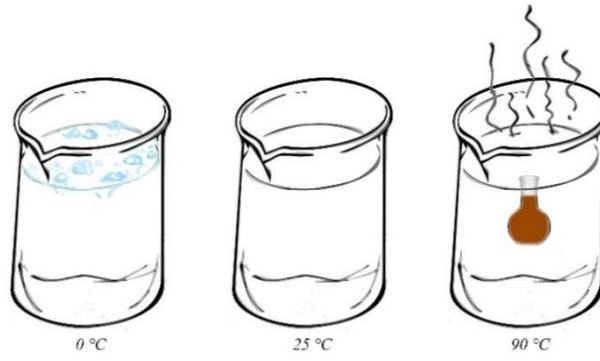
**Yanıt:** Denge Teorisi'ne göre, sabit sıcaklıkta kapalı bir sistemde renk şiddeti gibi bir makroskopik özelliğin sabit olması, sistemde gerçekleşen değişimin dengede olduğunun göstergesidir. Ancak, renk şiddeti değişmemesine rağmen, dinamik dengenin doğası gereği moleküler düzeyde girenlerin ürünlere, ürünlere girenlere dönüşümü devam eder.

**Gösteri Deneyi 3 (Kimyasal dengeyi görebilir miyim?)**

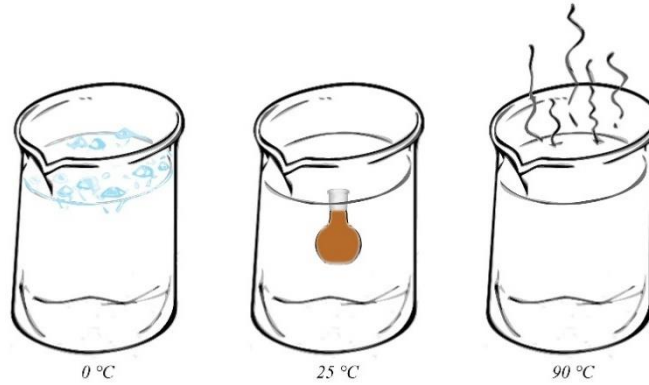
**Deneyel Yöntem:** 0°C, 25°C ve 90°C de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı renksiz iken, NO<sub>2</sub> gazı kıvıll kahve renkli olduğu bilinmektedir. Deneyel etkinliğin **birinci basamağında**, 0°C'deki buz banyosunda olan ağzı kapalı bir balona saf renksiz N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı doldurulmaktadır. **İkinci basamakta**, 0°C'deki balon buz banyosundan çıkarılıp 90°C'deki su banyosuna konulduğunda, zamana bağlı olarak kıvıll kahve renk şiddetinin arttığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. **Son basamakta**, 90°C'deki su banyosundaki balon 25°C'deki su banyosuna daldırıldığında, zamana bağlı olarak kıvıll kahve renk şiddetinin azaldığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca 90°C deki kıvıll kahve renk şiddetinin 25°C'deki renk şiddetinden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Deneyel etkinliğin birinci, ikinci ve son aşamasının görüntüleri sırasıyla Şekil 7- 9'da verilmiştir.



Şekil 7. **Birinci basamak:** 0°C'deki su banyosuna daldırılmış balondaki saf  $N_2O_4$  gazının görüntüsü. (Renksiz).



Şekil 8. **İkinci basamak:** 90°C'deki su banyosuna daldırılmış balondaki gazın görüntüsü. (Koyu kırmızı kahve renkli).



Şekil 9. **Üçüncü basamak:** 25°C'deki su banyosuna daldırılmış balondaki gazın görüntüsü. (Açık kırmızı kahve renkli).

**Problem 3.** Gösteri Deneyi 2'de gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına karar veriniz.

**Gösteri Deneyi 3'ün amacı nedir?**

**Yanıt:** 0°C sıcaklıkta yalnızca  $N_2O_4$  gazı içeren bir balonun Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklığı değiştirildiğinde, kırmızı kahve renk şiddetinin nasıl değiştiğini gözlem yoluyla incelemek ve nedensellik ilkesi bağlamında değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını açıklamaktır.

**Gösteri Deneyi 3'de ne gözlenmektedir?**



**Yanıt:** Balonun sıcaklığı 0°C'den 90°C'ye arttırıldığında renk şiddetinin arttığı, 90°C'den 25°C'ye azaltıldığında ise renk şiddetinin azaldığı gözlenmektedir. Ayrıca 90°C'deki kıvı kahve renk şiddetinin 25°C'deki renk şiddetinden daha fazla olduğu belirlenmiştir.

**Gösteri Deneyi 3'de renk şiddetinin artmasının nedeni fiziksel değişim mi yoksa kimyasal değişim midir?**

**Yanıt:** Lambert Beer Yasası'na göre, NO<sub>2</sub> gazı derişimi ile kıvı kahve renk şiddeti doğru orantılıdır. Balonun sıcaklığı 0°C'den 90°C'ye arttırıldığında kıvı kahve renk şiddeti arttığına göre, NO<sub>2</sub> gazı derişimi de artar. Bu durumda, Maddenin Korunumu Yasası ve Atom Teorisi'ne göre renksiz N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı, kıvı kahve renkli yeni bir maddeye (NO<sub>2</sub> gazı) dönüşmektedir. Bu nedenle, kimyasal değişim gerçekleşmektedir.

**Gösteri Deneyi 3'de renk şiddetinin değişimi tersinir mi yoksa tersinmez mi?**

**Yanıt:** Balonun sıcaklığı 0°C'den 90°C'ye arttırıldığında, renk şiddetinin artması ve 90°C'den 25°C'ye azaltıldığında renk şiddetinin azalması, gerçekleşen renk değişiminin tersinir özellikte olduğunu göstermektedir.

**Gösteri Deneyi 3'de renk şiddetinin değişiminin tersinir olması ne anlama gelmektedir?**

**Yanıt:** Tersinir renk değişimi nedeniyle gerçekleşen kimyasal değişimin, kimyasal denge tepkimesi olduğu anlamına gelir.

**Gösteri Deneyi 3'de renk şiddetinin sabit olması ne anlama gelmektedir?**

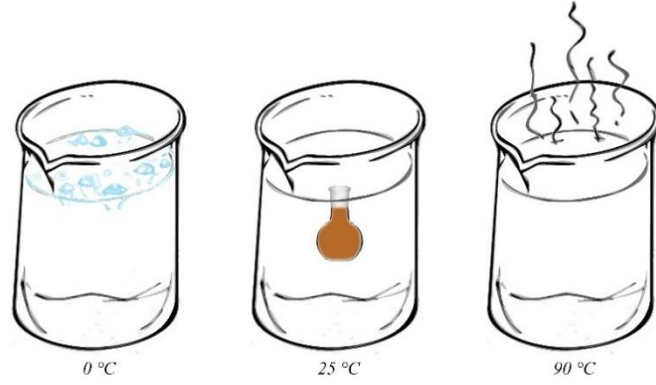
**Yanıt:** Kimyasal Kinetik Teori'ye göre, ileri tepkimenin hızının, geri tepkimenin hızına eşit olduğu, Termodinamik açıdan denge kesrinin denge sabitine eşit olduğu, sonuç olarak sistemde gerçekleşen tepkimenin denge konumuna ulaştığı anlamına gelmektedir.

**Gösteri Deneyi 3'de renk şiddetinin sabit olması Denge Teorisi'ne göre nasıl açıklanır?**

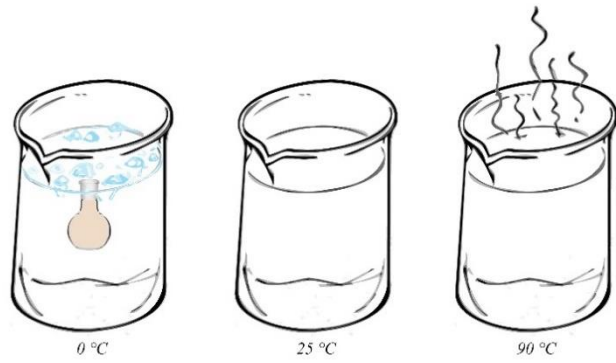
**Yanıt:** Denge Teorisi'ne göre, sabit sıcaklıkta kapalı bir sistemde renk şiddeti gibi bir makroskopik özelliğin sabit olması, sistemde gerçekleşen değişimin dengede olduğunu göstergesidir. Ancak, renk şiddeti değişmemesine rağmen, dinamik dengenin doğası gereği moleküler düzeyde girenlerin ürünlere, ürünlerin girenlere dönüşümü devam eder.

**Gösteri Deneyi 4 (Kimyasal dengeyi görebilir miyim?)**

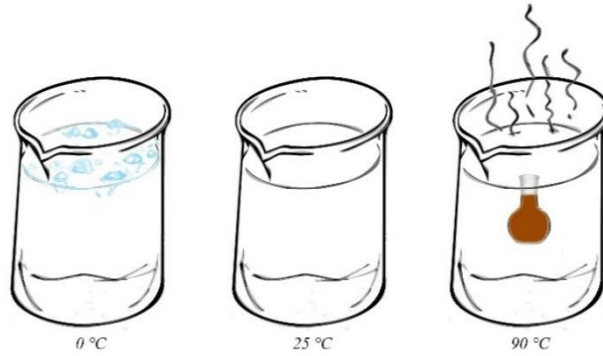
**Deneyel Yöntem:** 0°C, 25°C ve 90°C'de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı renksiz iken, NO<sub>2</sub> gazı kıvı kahve renkli olduğu bilinmektedir. Deneyel etkinliğinin **birinci basamağında**, 25°C'deki su banyosunda olan ağzı kapalı bir balona bir miktar NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazlarından doldurulmakta ve renk şiddeti sabit kalıncaya kadar bekletilmektedir. **İkinci basamakta**, 25°C'deki balon su banyosundan çıkarılıp 0°C'deki buz banyosuna daldırıldığında, zamana bağlı olarak kıvı kahve renk şiddetinin azaldığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. **Son basamakta**, 0°C'deki buz banyosundaki balon 90°C'deki su banyosuna konulduğunda, zamana bağlı olarak kıvı kahve renk şiddetinin arttığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca 90°C'deki kıvı kahve renk şiddetinin 25°C'deki renk şiddetinden daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Deneyel etkinliğin birinci, ikinci ve son aşamasının görüntüleri sırasıyla Şekil 10- 12'de verilmiştir.



Şekil 10. **Birinci basamak:** 25°C'deki su banyosuna daldırılmış  $N_2O_4$  ve  $NO_2$  gazı içeren balonun görüntüsü. (Açık kırmızı kahve renkli).



Şekil 11. **İkinci basamak:** 0°C'deki buz banyosuna daldırılmış balondaki gazın görüntüsü. (Rensize yakın kırmızı kahve renkli).



Şekil 12. **Üçüncü basamak:** 90°C'deki su banyosuna daldırılmış gazı içeren balonun görüntüsü. (Koyu kırmızı kahve renkli).

**Problem 4.** Gösteri Deneyi 4'de gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına karar veriniz.

**Gösteri Deneyi 4'ün amacı nedir?**

**Yanıt:** 25°C'deki  $NO_2$  ve  $N_2O_4$  gazı içeren bir balonun Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklığı değiştirildiğinde, kırmızı kahve renk şiddetinin nasıl değiştiğini incelemek ve nedensellik ilkesi bağlamında değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını açıklamaktır.

**Gösteri Deneyi 4'de ne gözlenmektedir?**

**Yanıt:** Balonun sıcaklığı 25°C'den 0°C'ye azaltıldığında renk şiddetinin azaldığı, 0°C'den 90°C'ye arttırıldığında ise renk şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Ayrıca 90°C'deki kıvı kahve renk şiddetinin 25°C'deki renk şiddetinden daha fazla olduğu belirlenmiştir.

**Gösteri Deneyi 4'de renk şiddetinin azalmasının nedeni fiziksel değişim mi yoksa kimyasal değişim midir?**

**Yanıt:** Lambert Beer Yasası'na göre, NO<sub>2</sub> gazı derişimi ile kıvı kahve renk şiddeti doğru orantılıdır. Balonun sıcaklığı 25°C'den 0°C'ye azaltıldığında kıvı kahve renk şiddeti azaldığına göre, NO<sub>2</sub> gazı derişimi de azalır. Bu durumda, Maddenin Korunumu Yasası ve Atom Teorisi'ne göre NO<sub>2</sub> gazı, renksiz yeni bir maddeye (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı) dönüşmektedir. Bu nedenle, kimyasal değişim gerçekleştiği söylenebilir.

**Gösteri Deneyi 4'de renk şiddetinin değişimi tersinir mi yoksa tersinmez mi?**

**Yanıt:** Balonun sıcaklığı 25°C'den 0°C'ye azaltıldığında, renk şiddetinin azalması ve 0°C'den 90°C'ye arttırıldığında renk şiddetinin artması, gerçekleşen renk değişiminin tersinir özellikte olduğunu göstermektedir.

**Gösteri Deneyi 4'de renk şiddetinin değişiminin tersinir olması ne anlama gelmektedir?**

**Yanıt:** Tersinir renk değişimi nedeniyle gerçekleşen kimyasal değişimin, kimyasal denge tepkimesi olduğu anlamına gelir.

**Gösteri Deneyi 4'de renk şiddetinin sabit olması ne anlama gelmektedir?**

**Yanıt:** Kimyasal Kinetik Teori'ye göre, ileri tepkimenin hızının, geri tepkimenin hızına eşit olduğu, Termodinamik açıdan denge kesrinin denge sabitine eşit olduğu, sonuç olarak sistemde gerçekleşen tepkimenin denge konumuna ulaştığı anlamına gelmektedir.

**Gösteri Deneyi 4'de renk şiddetinin sabit olması Denge Teorisi'ne göre nasıl açıklanır?**

**Yanıt:** Denge Teorisi'ne göre, sabit sıcaklıkta kapalı bir sistemde renk şiddeti gibi bir makroskopik özelliğin sabit olması, sistemde gerçekleşen değişimin dengede olduğunun göstergesidir. Ancak, renk şiddeti değişmemesine rağmen, dinamik dengenin doğası gereği moleküler düzeyde girenlerin ürünlere, ürünlerin girenlere dönüşümü devam eder.

Bir kimyasal tepkimenin nasıl denkleştirileceği ve homojen denge tepkimesi mi yoksa heterojen denge tepkimesi mi olduğuna nasıl karar verileceğinin öğretimi Etkinlik 2'de açıklanmaktadır.

## 2. Aşama: Kimyasal Denge Tepkimelerinde Hesaplamalar

Bu aşamada 6 etkinlik yer almaktadır.

### Etkinlik 2. (Kimyasal denge tepkimesi homojen mi heterojen mi?)

Bir problemde gerçekleşen kimyasal denge tepkimesinin denkleştirilmiş olarak yazılması ve tepkimenin homojen mi yoksa heterojen mi olduğuna öğrencinin karar vermesi istenir. Problem 3 basamakta çözülür. **Birinci basamakta**, kimyasal denge tepkimesi doğru olarak yazmalıdır. **İkinci basamakta**, kimyasal denge tepkimesi denkleştirmelidir. **Son basamakta ise**, tepkimenin homojen denge tepkimesi mi yoksa heterojen denge tepkimesi mi olduğuna karar vermelidir.

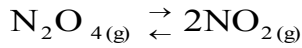
Öğretmen ders anında, soru metnini okuduktan sonra, soru metnine göre, öğrencilerin her bir basamaktaki soruyu yanıtlamalarını istemelidir. Bu amaçla biri homojen denge tepkimesi, diğeri ise heterojen denge tepkimesi olmak üzere iki problem tasarlanmıştır.

**Problem 5.** Sabit sıcaklıktaki kapalı bir balonda  $N_2O_4$  gazının  $NO_2$  gazına dönüşümü bir denge tepkimesidir. Denkleştirilmiş kimyasal tepkimeyi yazınız. Bu tepkime homojen denge tepkimesi mi yoksa heterojen denge tepkimesi midir?

**Çözüm:**

1. Denge tepkimesini yazalım.

Kimyasal tepkimede,  $N_2O_4$  gazı  $NO_2$  gazına dönüştüğüne göre,  $N_2O_4$  gazı tepkimeye giren,  $NO_2$  gazı ise oluşan üründür. Denge tepkimesi olduğuna göre, giren ve oluşan ürünün formülleri arasına çift yönlü ok konulmalı, formüllerinin sağ alt kısmına ise indis olarak parantez için g harfi yazılmalıdır. Maddenin Korunumu Yasası veya Atom Sayılarının Korunumu Yasası bağlamında tepkimeye giren atom türü ve sayıları korunarak tepkime denkleştirilmelidir.  $NO_2$  gazının katsayı 2,  $N_2O_4$  gazının katsayısı 1 olduğunda tepkime eşitlenmiş olur. Tepkime denklemi aşağıdaki gibi yazılır.



2. Homojen denge tepkimesi mi heterojen denge tepkimesi mi belirleyelim.

Kimyasal tepkimede hem  $N_2O_4$  hem de  $NO_2$  gaz halde olduğu için homojen denge tepkimesidir.

**Problem 6.** Katı haldeki  $NaHCO_3$  yüksek sıcaklıkta kapalı bir kaptaki ısıtıldığında, katı halde  $Na_2CO_3$ ,  $CO_2$  gazı ve su buharının ( $H_2O$ ) oluştuğu bir denge tepkimesi gerçekleşmektedir. Denkleştirilmiş tepkimeyi yazınız. Bu tepkime homojen denge tepkimesi mi yoksa heterojen denge tepkimesi midir?

**Çözüm:**

1. Denge tepkimesini yazalım.

Kimyasal tepkimede,  $NaHCO_3$  ve  $Na_2CO_3$  katı halde iken,  $CO_2$  ve su buharı ( $H_2O$ ) gaz haldedir.  $NaHCO_3(k)$  ve ısı tepkimeye giren,  $Na_2CO_3(k)$ ,  $CO_2(g)$  ve  $H_2O(g)$  ise oluşan ürünlerdir. Denge tepkimesi olduğuna göre, giren ve oluşan ürünün formülleri arasına çift yönlü ok konulmalı,  $NaHCO_3$  ve  $Na_2CO_3$  formüllerinin sağ alt köşesine indis olarak parantez içinde k,  $CO_2$  ve  $H_2O$  için ise g harfi yazılmalıdır. Maddenin Korunumu Yasası ve Atom Sayılarının Korunumu Yasası bağlamında tepkimeye giren atom türü ve sayıları korunarak tepkime denkleştirilmelidir. Bu durumda,  $NaHCO_3$ 'ün katsayısı 2, diğerlerinin katsayısı 1 olduğunda tepkime eşitlenmiş olur. Tepkime denklemi aşağıdaki gibi yazılır.



2. Homojen denge tepkimesi mi heterojen denge tepkimesi mi olduğunu belirleyelim.

Kimyasal tepkimede  $CO_2$  ve  $H_2O$  gaz halde iken,  $NaHCO_3$  ve  $Na_2CO_3$  katı haldedir. Bu durumda, sistem hem katı hem de gaz halde olmak üzere iki farklı faza sahiptir. Bu nedenle, heterojen denge tepkimesidir.

Bir denge tepkimesinin denge sabiti eşitliğinin nasıl yazılacağına öğretimi Etkinlik 3'de açıklanmaktadır.

**Etkinlik 3. (Denge sabiti eşitliğini yaz.)**

Bir sistemde gerçekleşen homojen veya heterojen denge tepkimesi denkleştirilmiş olarak yazıldıktan sonra, öğrencinin denge sabitini yazması istenir. Problem 2 basamakta çözülür. **Birinci basamakta**, Etkinlik 2 bağlamında denge tepkimesinin tam ve denk yazılıp yazılmadığı, ayrıca tepkimesinin homojen mi yoksa heterojen mi olduğu belirlenir. **İkinci basamakta**, tepkimedeki katı, saf sıvı ve çözücü türler denge sabiti

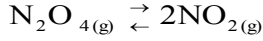
eşitliğinde yer almayacak şekilde, kütlelerin tesiri kanununa göre, denge sabiti eşitliği yazılır. Kütlelerin tesiri kanununa göre, ürünlerin molar derişimi paya, girenlerin molar derişimi ise paydaya yazılmalı ve türlerin stokiyometrik katsayıları tür derişimlerine üs olarak yazılmalıdır.

Öğretmen ders anında, soru metnini okuduktan sonra, öğrencilerin soru metnindeki kimyasal denge tepkimesinin denge sabiti eşitliğini yazmalarını istemelidir. Bu amaçla biri homojen denge tepkimesi, diğeri ise heterojen denge tepkimesi olmak üzere iki problem tasarlanmıştır.

**Problem 7.** Sabit sıcaklıktaki kapalı bir balonda  $N_2O_4$  gazının  $NO_2$  gazına dönüşümü bir kimyasal denge tepkimesidir. Denge sabiti eşitliğini yazınız.

**Çözüm:**

1. Denkleştirilmiş kimyasal tepkime denklemini yazalım.



2. Denge sabiti eşitliğini yazalım.

Kütlelerin tesiri kanununa göre, denge sabiti eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$k_d = \frac{[NO_2]^2}{[N_2O_4]}$$

**Problem 8.** Katı haldeki  $NaHCO_3$  yüksek sıcaklıkta kapalı bir kaptaki ısıtıldığında, katı halde  $Na_2CO_3$ ,  $CO_2$  gazı ve su buharının ( $H_2O$ ) oluştuğu bir kimyasal denge tepkimesi gerçekleşmektedir. Denge sabiti eşitliğini yazınız.

**Çözüm:**

1. Denkleştirilmiş kimyasal tepkime denklemini yazalım.



2. Denge sabiti eşitliğini yazalım.

Kütlelerin tesiri kanununa göre, denge sabiti eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$k_d = [CO_2][H_2O]$$

**Bir kimyasal denge tepkimesinin denge sabitinin hesaplanması**

Bir denge tepkimesinin denge sabitinin nasıl çözüleceğinin öğretimi Etkinlik 4-7’de açıklanmaktadır.

Bir kimyasal denge probleminde dengedeki türlerin molar derişimleri verildiğinde, denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi Etkinlik 4’de açıklanmaktadır.

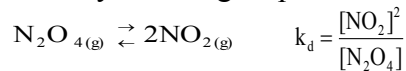
**Etkinlik 4. (Denge sabitini hesapla.)**

Bir kimyasal denge tepkimesi dengede iken, tepkimedeki türlerin molar derişimleri verilir ve denge sabitinin hesaplanması istenirse, problem 2 basamakta çözülür. **Birinci basamakta**, kimyasal denge tepkimesi ve denge sabiti eşitliği yazılır. **İkinci basamakta**, türlerin molar derişim değerleri denge sabiti eşitliğinde yerine konur ve denge sabiti hesaplanır.

**Problem 9.**  $25^\circ C$ ’deki ağzı kapalı 500 mL’lik bir balonda  $N_2O_4$  gazının  $NO_2$  gazına dönüşüm tepkimesi dengede iken yapılan analizde,  $N_2O_4$  ve  $NO_2$  gazlarının molar derişimlerinin sırasıyla  $1.0 \times 10^{-4}$  M ve  $2.0 \times 10^{-2}$  M olduğu belirlenmiştir. Buna göre, kimyasal denge tepkimesinin derişime bağlı denge sabitini ( $k_d$ ) hesaplayınız.

**Çözüm:**

1. Kimyasal denge tepkimesini ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



2. Denge sabitini ( $k_d$ ) hesaplayalım.

$$k_d = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]} = \frac{(2.0 \times 10^{-2})^2}{(1.0 \times 10^{-4})} = \frac{4.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-4}} = 4.0$$

Bir kimyasal denge probleminde dengedeki türlerin mol sayıları ve sistemin hacmi verildiğinde, denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi Etkinlik 5’de açıklanmaktadır.

### Etkinlik 5. (Denge sabitini hesapla.)

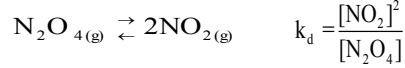
Bir kimyasal denge tepkimesi dengede iken, sistemin hacmi ve tepkimedeki türlerin mol sayıları verilirse, problem 3 basamakta çözülür. **Birinci basamakta**, kimyasal denge tepkimesi ve denge sabiti eşitliği yazılır. **İkinci basamakta**, türlerin molar derişimleri hesaplanır. **Son basamakta ise**, türlerin molar derişim değerleri denge sabiti eşitliğinde yerine konur ve denge sabiti hesaplanır.

**Problem 10.** 25°C’deki ağzı kapalı 500 mL’lik bir balonda N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının NO<sub>2</sub> gazına dönüşüm tepkimesi dengede iken yapılan analizde, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve NO<sub>2</sub>’nin mol sayılarının sırasıyla 5.0x10<sup>-5</sup> mol ve 1.0x10<sup>-2</sup> mol olduğu belirlenmiştir. Buna göre, denge tepkimesinin derişime bağlı denge sabitini (k<sub>d</sub>) hesaplayınız.

### Çözüm:

*Formül kullanma yöntemi ile çözelim.*

1. Kimyasal denge tepkimesini ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



2.1. N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>’ün molar derişimlerini hesaplayalım.

$$M_{\text{N}_2\text{O}_4} (\text{mol/L}) = \frac{n_{\text{N}_2\text{O}_4} (\text{mol})}{V_{\text{Sistem}} (\text{L})} = \frac{5.0 \times 10^{-5} \text{ mol}}{0.5 \text{ L}} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L N}_2\text{O}_4$$

2.2. NO<sub>2</sub>’nin molar derişimini hesaplayalım.

$$M_{\text{NO}_2} (\text{mol/L}) = \frac{n_{\text{NO}_2} (\text{mol})}{V_{\text{Sistem}} (\text{L})} = \frac{1.0 \times 10^{-2} \text{ mol}}{0.5 \text{ L}} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L NO}_2$$

3. Denge sabitini (k<sub>d</sub>) hesaplayalım.

$$k_d = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]} = \frac{(2.0 \times 10^{-2})^2}{(1.0 \times 10^{-4})} = \frac{4.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-4}} = 4.0$$

*Çevirme faktörü yöntemi ile çözelim.*

1. N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>’ün molar derişimlerini hesaplayalım.

$$? \text{ mol/L N}_2\text{O}_4 = 5.0 \times 10^{-5} \text{ mol N}_2\text{O}_4 \times \frac{1000 \text{ mL}}{500 \text{ mL}} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \equiv 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L N}_2\text{O}_4$$

2. NO<sub>2</sub>’nin molar derişimini hesaplayalım.

$$? \text{ mol/L NO}_2 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ mol NO}_2 \times \frac{1000 \text{ mL}}{500 \text{ mL}} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol} \equiv 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L NO}_2$$

3. Denge sabitini (k<sub>d</sub>) hesaplayalım.

$$k_d = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]} = \frac{(2.0 \times 10^{-2})^2}{(1.0 \times 10^{-4})} = \frac{4.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-4}} = 4.0$$

Bir kimyasal denge probleminde dengedeki türlerin kütleleri, mol kütleleri ve sistemin hacmi verildiğinde, denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi Etkinlik 6’da açıklanmaktadır.

### Etkinlik 6. (Denge sabitini hesapla.)

Bir sistemdeki kimyasal denge tepkimesi dengede iken, sistemin hacmi, tepkimedeki türlerin kütleleri ve mol kütleleri verilirse, problem 4 basamakta çözülür. **Birinci basamakta**, kimyasal denge tepkimesi ve denge sabiti eşitliği yazılır. **İkinci basamakta**, türlerin mol sayıları hesaplanır. **Üçüncü basamakta**, türlerin molar derişimleri

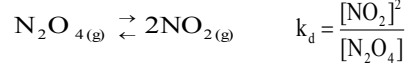
hesaplanır. **Son basamakta ise**, türlerin molar derişim değerleri denge sabiti eşitliğinde yerine konur ve denge sabiti hesaplanır.

**Problem 11.** 25°C'deki ağzı kapalı 500 mL'lik bir balonda N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının NO<sub>2</sub> gazına dönüşüm tepkimesi dengede iken yapılan analizde, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve NO<sub>2</sub>'nin kütlelerinin sırasıyla 4.6x10<sup>-3</sup> g ve 4.6x10<sup>-1</sup> g olduğu belirlenmiştir. Buna göre tepkimenin derişime bağlı denge sabitini (k<sub>d</sub>) hesaplayınız. (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: 92 g/mol, NO<sub>2</sub>: 46 g/mol)

**Çözüm:**

*Formül kullanma yöntemi ile çözelim.*

1. Kimyasal denge tepkimesini ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



2. Türlerin mol sayılarını hesaplayalım.

2.1. N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün mol sayısını hesaplayalım.

$$n_{\text{N}_2\text{O}_4}(\text{mol}) = \frac{m_{\text{N}_2\text{O}_4}(\text{g})}{M_{\text{N}_2\text{O}_4}(\text{g/mol})} = \frac{4.6 \times 10^{-3} \text{ g}}{92 \text{ g/mol}} = 5.0 \times 10^{-5} \text{ mol N}_2\text{O}_4$$

2.2. NO<sub>2</sub>'ün mol sayısını hesaplayalım.

$$n_{\text{NO}_2}(\text{mol}) = \frac{m_{\text{NO}_2}(\text{g})}{M_{\text{NO}_2}(\text{g/mol})} = \frac{4.6 \times 10^{-1} \text{ g}}{46 \text{ g/mol}} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ mol NO}_2$$

3. Türlerin molar derişimlerini hesaplayalım.

3.1. N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün molar derişimini hesaplayalım.

$$M_{\text{N}_2\text{O}_4}(\text{mol/L}) = \frac{n_{\text{N}_2\text{O}_4}(\text{mol})}{V_{\text{Sistem}}(\text{L})} = \frac{5.0 \times 10^{-5} \text{ mol}}{0.5 \text{ L}} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L N}_2\text{O}_4$$

3.2. NO<sub>2</sub>'nin molar derişimini hesaplayalım.

$$M_{\text{NO}_2}(\text{mol/L}) = \frac{n_{\text{NO}_2}(\text{mol})}{V_{\text{Sistem}}(\text{L})} = \frac{1.0 \times 10^{-2} \text{ mol}}{0.5 \text{ L}} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L NO}_2$$

4. Denge sabitini (k<sub>d</sub>) hesaplayalım.

$$k_d = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]} = \frac{(2.0 \times 10^{-2})^2}{(1.0 \times 10^{-4})} = \frac{4.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-4}} = 4.0$$

*Çevirme faktörü yöntemi ile çözelim.*

1. N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'ün molar derişimini hesaplayalım.

$$? \text{ mol/L N}_2\text{O}_4 = 4.6 \times 10^{-3} \text{ g N}_2\text{O}_4 \times \frac{1.0 \text{ mol N}_2\text{O}_4}{92 \text{ g N}_2\text{O}_4} \times \frac{1000 \text{ mL}}{500 \text{ mL}} = 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol N}_2\text{O}_4 \equiv 1.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L N}_2\text{O}_4$$

2. NO<sub>2</sub>'nin molar derişimini hesaplayalım.

$$? \text{ mol/L NO}_2 = 4.6 \times 10^{-1} \text{ g NO}_2 \times \frac{1.0 \text{ mol NO}_2}{46 \text{ g NO}_2} \times \frac{1000 \text{ mL}}{500 \text{ mL}} = 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol NO}_2 \equiv 2.0 \times 10^{-2} \text{ mol/L NO}_2$$

3. Denge sabitini (k<sub>d</sub>) hesaplayalım.

$$k_d = \frac{[\text{NO}_2]^2}{[\text{N}_2\text{O}_4]} = \frac{(2.0 \times 10^{-2})^2}{(1.0 \times 10^{-4})} = \frac{4.0 \times 10^{-4}}{1.0 \times 10^{-4}} = 4.0$$

Bir kimyasal denge probleminde toplanabilirlik ilkesine göre, bir kimyasal denge tepkimesinin denge sabitinin nasıl hesaplanacağının öğretilmesi Etkinlik 7'de açıklanmaktadır.

**Etkinlik 7. (Denge sabitini hesapla.)**

Bir kimyasal denge tepkimesi herhangi bir katsayı ile çarpıldığında, tepkimedeki türlerin stokiometrik katsayıları aritmetik olarak değişirken, denge sabiti üstel olarak değişir. Denge sabiti bilinen bir denge tepkimesi 2, ½, veya -1 ile çarpıldığında, yeni oluşan tepkime için denge sabitinin hesaplanması veya iki denge sabiti arasındaki matematiksel eşitliğin yazılması istenebilir. Bu durumda, problem 4 basamakta çözümlenir. **Birinci basamakta**, denge sabiti değeri bilinen tepkime ve denge sabiti (k<sub>d</sub>) eşitliği yazılır.

**İkinci basamakta**, birinci basamaktaki denge sabiti bilinen tepkime bir katsayı ile çarpıldığında, yeni oluşan tepkime ve denge sabiti ( $k_{d2}$ ) eşitliği yazılır. **Üçüncü basamakta**,  $k_{d2}$  ve  $k_{d1}$  arasındaki matematiksel eşitlik yazılır. **Son basamakta ise**,  $k_{d2}$  hesaplanır.

Bir kimyasal denge tepkimesi 2 ile çarpıldığında, türlerin stokiyometrik katsayıları 2 kat artar. Tepkimenin denge sabiti ise karesi kadar değişir. Başka bir deyişle, ikinci tepkimenin denge sabiti birinci tepkimenin denge sabitinin karesine eşittir. Problem 12 örnektir.

**Problem 12.** NO gazının  $O_2$  ile tepkimesinde  $NO_2$  gazının oluştuğu denge tepkimesi gerçekleşmektedir. Gerçekleşen denge tepkimesi ve denge sabiti ( $k_{d1}$ ), aşağıda (1) eşitliği ile verilmiştir.



(1) tepkimesi 2 ile çarpıldığında oluşan yeni tepkimenin denge sabiti değeri  $k_{d2}$  olarak ifade edilmiştir. Buna göre,  $k_{d1}$  ile  $k_{d2}$  arasındaki matematiksel eşitliği yazınız.

**Çözüm:**

1. (1) tepkimesi için denge sabiti eşitliğini yazalım.



2. (1) tepkimesi 2 ile çarpıldığında oluşan (2) tepkimesini yazalım.



3.  $k_{d2}$  ile  $k_{d1}$  arasındaki matematiksel ilişkiyi yazalım.

$k_{d2}$  sabiti eşitliğinin denge kesri,  $k_{d1}$  sabiti eşitliğinin denge kesrinin karesine eşittir. Bu durumda,  $k_{d2}$  ile  $k_{d1}$  arasında aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$k_{d2} = k_{d1}^2$$

Bir denge tepkimesi 1/2 ile çarpıldığında, türlerin stokiyometrik katsayıları yarısı kadar değişirken, tepkimenin denge sabiti ise karekökü kadar değişir. Başka bir deyişle, ikinci tepkimenin denge sabiti birinci tepkimenin denge sabitinin kareköküne eşittir. Problem 13 örnektir.

**Problem 13.** NO gazının  $O_2$  ile tepkimesinde  $NO_2$  gazının oluştuğu denge tepkimesi gerçekleşmektedir. Gerçekleşen denge tepkimesi ve denge sabiti ( $k_{d1}$ ), (1) eşitliği ile verilmiştir.



(1) tepkimesi 1/2 ile çarpıldığında gerçekleşen yeni tepkimenin denge sabiti değeri  $k_{d2}$  olarak ifade edilmiştir. Buna göre,  $k_{d1}$  ile  $k_{d2}$  arasındaki matematiksel eşitliği yazınız.

**Çözüm:**

1. (1) tepkimesi için denge sabiti eşitliğini yazalım.



2. (1) tepkimesi 1/2 ile çarpıldığında elde edilen (2) tepkimesini yazalım.



3.  $k_{d2}$  ile  $k_{d1}$  arasındaki matematiksel eşitliği yazalım.

$$k_{d2} = \sqrt{k_{d1}}$$

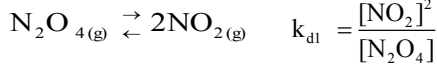
Bir denge tepkimesi -1 ile çarpıldığında, türlerin stokiyometrik katsayıları değişmez ancak tepkime ve denge sabiti tersine döner. Başka bir deyişle, ikinci tepkimenin denge sabiti birinci tepkimenin denge sabitinin tersine eşittir. Problem 14 örnektir.



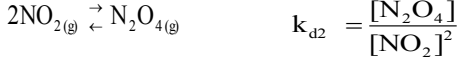
**Problem 14.** Sabit sıcaklıkta 500 mL'lik bir balonda  $N_2O_4$ 'ün  $NO_2$ 'e dönüşüm tepkimesi için denge sabiti,  $k_{d1}$ : 4.0 olarak belirlenmiştir. Buna göre,  $NO_2$ 'in  $N_2O_4$ 'e dönüşüm tepkimesinin  $k_d$  değerini hesaplayınız.

**Çözüm:**

1.  $N_2O_4$ 'ün  $NO_2$ 'e dönüşüm tepkimesi ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



2.  $NO_2$ 'in  $N_2O_4$ 'e dönüşüm tepkimesi ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



3.  $k_{d2}$  ve  $k_{d1}$  arasındaki ilişkiyi yazalım.

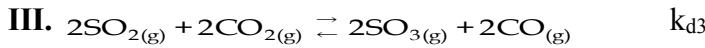
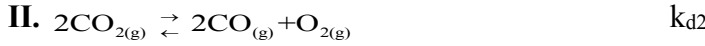
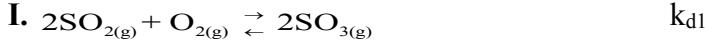
$$k_{d2} = \frac{1}{k_{d1}}$$

4.  $k_{d2}$  değerini hesaplayalım.

$$k_{d2} = \frac{1}{k_{d1}} = \frac{1}{4.0} = 0.25$$

İki denge tepkimesi toplanırsa, elde edilen üçüncü denge tepkimesinin denge sabiti,  $k_{d3}$ , toplanan tepkimelerin denge sabitlerinin çarpımına eşit olur. Problem 15 örnektir.

**Problem 15.** Aşağıda verilen I ve II tepkimelerinin denge sabitleri ile III tepkimesinin denge sabiti arasındaki matematiksel ilişkiyi belirleyiniz.



**Çözüm:**

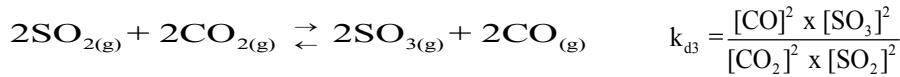
1. I tepkimesini ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



2. II tepkimesini ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



3. III tepkimesini ve denge sabiti eşitliğini yazalım.



4.  $k_{d2}$  ve  $k_{d1}$  ile  $k_{d3}$  arasındaki ilişkiyi yazalım.

$k_{d1}$  ve  $k_{d2}$  eşitliklerinin denge kesirleri çarpılırsa,  $k_{d3}$  eşitliğindeki denge kesri elde edilir. Bu durumda,  $k_{d3}$ 'ün  $k_{d1}$  ve  $k_{d2}$  çarpımına eşit olduğu görülür.

$$k_{d3} = k_{d1} \times k_{d2}$$

#### 4. Etkinliğin Değerlendirilmesi ve Tartışma

Kimya eğitiminde, kimyasal denge ile ilgili kavramların soyut ve karmaşık olması nedeniyle öğrenme ve öğretim hem öğretmen hem de öğrenciler için problemdir. Bu çalışmada, bir değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığının nasıl belirleneceğinin ve kimyasal denge tepkimelerinin  $k_d$  sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi için yedi etkinlik ve on beş çözümlü örnek problem tasarlanmıştır.

## Bir Değişimin Denge Tepkimesi Olabilirliği (Etkinlik 1, Problem 1-4)

Stokiyometri eğitiminde bir değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığını belirlemek problemidir. Bazı problemlerde, en az bir gösteri deneyi verilir ve deneyde gözlemlenen nitel veya nicel verilere bağlı olarak değişimin denge tepkimesi olup olmadığını öğretmenin veya öğrencinin belirlemesi gerekebilir. Bu tip problemlerde, Etki Tepki İlkesi bağlamında derişim, basınç, hacim, sıcaklık, pH gibi dengeye etki eden faktörlerden birinin incelendiği açık uçlu bir gösteri deneyi verilir. Bu durumda, ilk olarak; gösteri deneyindeki kimyasal maddelerin renk ve renk değişimi gibi bir özelliği bilinmeli, deneyde gerçekleşen değişimlerin neler olduğu ve nasıl değiştiği belirlenmelidir. İkinci olarak; gerçekleşen değişimin kimyasal değişim mi yoksa fiziksel değişim mi olduğu, üçüncü olarak; değişimin tersinir mi yoksa tersinmez mi olduğu sorgulanmalıdır. Son olarak, değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığına karar verilmelidir. Etkinlik 1 bağlamında Problem 1-4 bu amaçla hazırlanmış çözümlü problemlerdir.

Problem 1-4, renk ve renk değişimi, tersinir ve tersinmez özellik, fiziksel ve kimyasal değişim gibi betimsel kavramlarla, fiziksel dinamik denge, kimyasal dinamik denge Lambert Beer Yasası, Maddenin Korunumu Yasası, Atom Teorisi, Denge Teorisi ve Etki Tepki İlkesi gibi teorik kavramlar ile doğrudan ilişkilidir. Bu tip problemlerin çözümü için Etkinlik 1 önerilmiştir.

### Gösteri Deneyi 1-4 ün kimya eğitimi bağlamında tartışılması

#### *Gösteri Deneyi 1'in tartışılması*

Gösteri deneyi 1, 25°C'deki iki özdeş balona doldurulmuş NO<sub>2</sub> gazının N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazına dönüşüm tepkimesine Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklığın etkisinin incelendiği açık uçlu bir deneysel etkinliktir.

Şekil 1-3 incelendiğinde, 25°C'deki NO<sub>2</sub> gazı içeren balonlardan biri 0°C'deki buz banyosuna daldırıldığında kızıl kahve renk şiddeti azalırken, diğeri 90°C'deki sıcak su banyosuna daldırıldığında kızıl kahve renk şiddetinin arttığı gözlenmektedir. 0°C ve 90°C'deki balonlar tekrar 25°C'deki su banyosuna daldırıldığında ise, her iki balondaki kızıl kahve renk şiddeti aynı olduğu gözlenmektedir. Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklık değiştiğinde gözlemlenen renk şiddetindeki artış ve azalışa neden olan değişim, tersinirlik özelliğine sahiptir. Renk şiddetindeki değişim bağlamında sıcaklık 25°C'den 0°C'ye azaltıldığında, NO<sub>2</sub> gazının bir kısmının renksiz N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazına dönüştüğünü, 0°C'den 25°C'ye arttırıldığında ise oluşan N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının tekrar NO<sub>2</sub> gazına dönüştüğünü başka bir deyişle kimyasal değişim gerçekleştiğini göstermektedir. Lambert Beer Yasası, Maddenin Korunumu Yasası, Atom Teorisi ve Denge Teorisi bağlamında gösteri deneyinde gerçekleşen tersinir renk değişimine neden olan değişimin tek tipte bir kimyasal denge tepkimesi olduğu söylenebilir.

#### *Gösteri Deneyi 2'in tartışılması*

Tanecik Modeli veya Atom Teorisi bağlamında bir maddenin sıcaklığı değiştiğinde molekül geometri değişebilir. Bu durumda, sıcaklık azaltıldığında, kızıl kahve renkli NO<sub>2</sub> gazı, NO<sub>2</sub> formülüne sahip geometrisi farklı renksiz bir forma dönüşebileceği düşünülebilir. Benzer durum, sıcaklık arttırıldığında, renksiz N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> formülüne sahip kızıl kahve renkli geometrisi farklı yeni bir forma dönüşeceği de düşünülebilir. Bu nedenle, Gösteri Deneyi 1-4'de, 0°C, 25°C ve 90°C'de N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı renksiz iken, NO<sub>2</sub> gazı kızıl kahve renkli olduğu özellikle belirtilmiştir.

Maddenin Korunumu Yasası bağlamında madde vardan yok olmaz, yoktan da var olmaz. Diğer yandan, Lambert Beer Yasası'na göre, renge neden olan bir maddenin renk şiddeti veya absorbanası derişimi ile doğru orantılıdır. Gösteri Deneyi 2'de, yalnızca NO<sub>2</sub> gazı içeren balonun sıcaklığı 90°C'den 0°C'ye azaltıldığında, kızıl kahve renk şiddetinin azaldığı, balonun sıcaklığı 0°C'den 25°C'ye arttırıldığında ise, kızıl kahve renk şiddetinin arttığı gözlemlenmektedir. Bu durumda, Maddenin Korunumu Yasası ve Lambert Beer Yasası'na göre, renk şiddetindeki azalma; NO<sub>2</sub> gazının renksiz yeni bir maddeye (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı) dönüşümü nedeniyle NO<sub>2</sub> derişiminin azaldığını, renk şiddetindeki artma ise N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının NO<sub>2</sub> gazına dönüşümünden dolayı NO<sub>2</sub> derişiminin arttığını göstermektedir. Bu nedenle, sıcaklık değiştiğinde, renk şiddetindeki değişime bağlı olarak NO<sub>2</sub> gazının N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazına, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının da NO<sub>2</sub> gazına dönüştüğü söylenebilir. Sonuç olarak, balonda yalnızca NO<sub>2</sub> gazı olmasına rağmen, balonun sıcaklığı azaltıldığında kızıl kahve renk şiddetinin azalması, renksiz yeni bir madde (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazı) oluştuğunu başka bir deyişle balonda kimyasal değişim gerçekleştiğinin nitel göstergesidir.

Gösteri Deneyi 2'de, sıcaklık azaltıldığında, zamana bağlı olarak renk şiddetinin azaldığı ve belli bir süre sonra renk şiddetinin sabit kaldığı, sıcaklık arttırıldığında ise, zamana bağlı olarak renk şiddetindeki arttığı ve belli bir süre sonra tekrar sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklık değişimi nedeniyle renk şiddetindeki değişim, renk değişiminin tersinirlik özelliğine başka bir deyişle renk değişimine neden olan kimyasal tepkimenin de tersinirlik özelliğine sahip olduğunu göstermektedir. Bir kimyasal tepkimenin tersinirlik özelliğine sahip olması, Denge Teorisi bağlamında denge tepkimesi olduğu anlamına gelmektedir. Diğer yandan, renk şiddetinin sabit kalması, gerçekleşen kimyasal değişimin denge konumuna ulaştığını göstermektedir. Renk şiddetinin sabit olması, kimyasal tepkimede değişimin durduğu anlamına gelmez. Denge Teorisi'ne göre, tersinirlik özelliğine sahip bir denge tepkimesinde, moleküler düzeyde girenlerin ürünlere, ürünlerinde girenlere dönüşümü devam eder. Sonuç olarak, balonda sıcaklık değişimi nedeniyle gerçekleşen kimyasal tepkime, tersinirlik özelliğine sahip olduğu için bir kimyasal denge tepkimesidir.

Gösteri Deneyi 2'de, 90°C'deki kızıl kahve renk şiddetinin 25°C'deki renk şiddetinden daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda, sıcaklık artarken kızıl kahve renk şiddetinin artışı bağlamında NO<sub>2</sub> derişiminin arttığı, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> derişiminin azaldığı, tersi durumda ise, tam tersi gerçekleşmektedir. Bu bağlamda, Termodinamik açıdan değişimin endotermik mi yoksa ekzotermik mi olduğu ayrıca NO<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazlarının kararlılığı açıklanabilir. Balonun sıcaklığı azaltıldığında NO<sub>2</sub> gazının N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazına dönüşme eğilimi artarken, sıcaklık arttırıldığında N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının NO<sub>2</sub> gazına dönüşme eğilimi artmaktadır. Bu dönüşüm eğiliminin nedeni, NO<sub>2</sub> gazının yüksek sıcaklıkta **daha kararlı**, düşük sıcaklıkta **daha az kararlı olmasına**, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının düşük sıcaklıkta daha kararlı, yüksek sıcaklıkta daha az kararlı olmasına dayanmaktadır. Diğer yandan, sıcaklık arttırıldığında, NO<sub>2</sub> gazı derişiminin artışı nedeniyle, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının NO<sub>2</sub> gazına dönüşümü **endotermiktir**. Sıcaklık azaltıldığında, NO<sub>2</sub> gazı derişiminin azalışı nedeniyle, NO<sub>2</sub> gazının N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazına dönüşümü **ekzotermik** bir kimyasal tepkime olduğu söylenebilir. Kimyasal tepkime denkleminde NO<sub>2</sub> gazının stokiyometrik katsayısının N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının stokiyometrik katsayısından daha büyük olması N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazının NO<sub>2</sub> gazına dönüşümünün endotermik, NO<sub>2</sub> gazının N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> gazına dönüşümünün ise ekzotermik olduğunu desteklemektedir. Termodinamik açıdan, bir kimyasal tepkimede mol sayısı azalırken, sistemin hem düzensizliği hem de enerjisi azalır. Başka bir deyişle, enerji açığa çıkar ve kimyasal tepkime ekzotermiktir.

Gösteri Deneyi 2'deki gözlem yoluyla elde edilen verilere göre, Etki Tepki İlkesi bağlamında balonun sıcaklığın artırılması ve azaltılmasında gerçekleşen renk değişimine neden olan değişimin fiziksel değişim mi yoksa kimyasal değişim mi olduğu, renk değişiminin tersinir mi yoksa tersinmez mi olduğu, kimyasal değişimin denge tepkimesi olup olmadığı, bir kimyasal denge tepkimesine sıcaklığın etkisini ve dengedeki türlerin termodinamik açıdan kararlı olup olmadıkları bağlamında yukarıda Gösteri Deneyi 2 için yapılan tartışma, Gösteri Deneyi 3-4 içinde benzer bir şekilde yapılabilir. Yukarıdaki tartışmalar ışığında, Gösteri deneyi 1-4, bir kimyasal denge tepkimesine Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklığın etkisinin incelendiği açık uçlu bir deneysel etkinliktir.

### **Bir Denge Tepkimesinin Homojen veya Heterojen Denge Tepkimesi Olabilirliği (Etkinlik 2, Problem 5-6)**

#### *Denge tepkimesinin yazılması ve denkleştirilmesi*

Bir denge tepkimesi eşitliğinde, makro mikro ve sembol ilişkisi bağlamında tepkimeye girenler ile oluşan ürünlerin sembol/formülleri arasına çift yönlü ok konulmalı ve türlerin sembol/formüllerinin sağ alt köşesinde indis olarak fiziksel halleri (gaz: *g*, sıvı: *s* ve katı: *k* gibi) belirtilmelidir. Çift yönlü ok, kimyasal denge tepkimesi olduğunun göstergesidir. Bir kimyasal tepkime eşitliğinde, Maddenin Korunumu Yasası, Kütleinin Korunumu Yasası veya Atom Sayılarının Korunumu Yasası'na göre, girenler ile ürünlerdeki atom türleri ve atom sayıları korunmalıdır. Ayrıca, Tanecik Modeli bağlamında Atom Teorisi'ne göre, maddenin tanecikli yapısı gereği türlerin stokiyometrik katsayıları en küçük tam sayılar olmalıdır.

#### *Bir Denge Tepkimesinin Homojen veya Heterojen Olabilirliği*

Bir denge tepkimesinde yer alan her tür denge sabiti eşitliğinde yer almaz. Denge sabitinde hangi türlerin yer alacağını karar vermek için denge tepkimesinin homojen mi yoksa heterojen mi olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bir kimyasal tepkimenin yazılması, denkleştirilmesi ve homojen denge tepkimesi mi yoksa heterojen denge tepkimesi mi olduğunun nasıl belirleneceğinin öğretimi için Etkinlik 2 önerilmiş ve Problem 5-6 çözümlü örnek problem olarak verilmiştir.

### **Bir Denge Tepkimesi İçin Denge Sabiti Eşitliğinin Yazılması (Etkinlik 3, Problem 7-8)**

Kimya Eğitimi alan lisans düzeyindeki çoğu öğrenci için bir denge tepkimesinin denge sabiti eşitliğini yazabilmek problemdir. Kimyasal Kinetik Teori ve Termodinamik bağlamında Kütleinin Tesiri Kanuna göre denge sabiti eşitliği yazılmalıdır.

Dengede olmayan bir sistemin dengeye gelmesi sürecinde, katı ve saf sıvıların derişimi değişmez. Çözeltideki çözücünün derişimi ise ihmal edilecek kadar küçük değişime uğrar. Bu nedenle, katı ve saf sıvı maddelerin derişimi sabit iken, çözeltideki çözücünün derişimi ise sabit kabul edilir. Sonuç olarak, bir denge tepkimesindeki katı haldeki türler (element veya bileşikler), saf sıvılar ve çözeltideki çözücü tür denge sabiti eşitliğinde yazılmaz. Kütleinin Tesiri Kanunu'na göre, denge konumuna etki eden ürünlerdeki türler paya, girenlerdeki türler ise paydaya stokiyometrik katsayıları üs olacak şekilde yazılır. Homojen ve heterojen denge tepkimeleri için denge sabiti eşitliğinin nasıl yazılacağı öğretimi için Etkinlik 3 önerilmiş ve Problem 7-8 çözümlü örnek problem olarak verilmiştir.

Problem 7'de gerçekleşen tepkimede hem tepkimeye giren  $N_2O_4$  hem de oluşan  $NO_2$  bileşikleri gaz haldedir. Bu durumda gerçekleşen tepkimede bütün türler aynı fiziksel hale

sahiptir. Bu nedenle, gerçekleşen denge tepkimesi bir homojen denge tepkimesidir ve hem  $\text{NO}_2$  hem de  $\text{N}_2\text{O}_4$  gazları denge sabiti eşitliğinde yazılmalıdır. Problem 8’de gerçekleşen kimyasal denge tepkimesinde ise,  $\text{CO}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  gaz halde iken,  $\text{NaHCO}_3$  ve  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  katı haldedir. Bu durumda, sistemde hem katı hem de gaz halde olmak üzere iki farklı faz mevcuttur. Bu nedenle, gerçekleşen tepkime, heterojen denge tepkimesidir ve  $\text{CO}_{2(g)}$  ve  $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$  denge sabiti eşitliğinde yazılırken,  $\text{NaHCO}_{3(k)}$  ve  $\text{Na}_2\text{CO}_{3(k)}$  katı olduğu için yazılmaz.

#### **Denge Sabitinin Hesaplanması (Etkinlik 4-6, Problem 9-11)**

Bir denge tepkimesinin denge sabitinin değeri, dengedeki türlerin molar derişimleri ile ilişkilidir. Gaz içeren sistemlerde gaz türlerin molar derişimi, gaz haldeki türün kütlesi veya mol sayısı ve sistemin hacmi ile ilişkilidir. Etkinlik 4-6 sırasıyla basitten karmaşığa sarmallık ilişkisi dikkate alınarak tasarlanmıştır.

Etkinlik 4; dengedeki türlerin molar derişimleri verildiğinde, Etkinlik 5; dengedeki türlerin mol sayıları ve sistemin hacmi verildiğinde, Etkinlik 6; dengedeki türlerin kütleleri, mol kütleleri ve sistemin hacmi verildiğinde,  $K_d$  sabitinin nasıl hesaplanacağını açıklamaktadır. Bu bağlamda, Problem 9-11 çözümlü örnek problemlerdir. Problem 10’da mol sayısı ve sistemin hacminden türlerin molar derişimlerinin hesabı, Problem 11 de ise, türlerin kütleleri, mol kütleleri ve sistemin hacminden molar derişimlerinin hesaplanması formül yöntemi ve çevirme faktörü ile olmak üzere iki farklı yöntemle çözülmüştür. Problem 11’de, türlerin kütleleri ile mol kütlelerinden mol sayıları, mol sayıları ile sistemin hacminden molar derişimleri ve molar derişimlerden denge sabitinin hesaplanması ardışık olarak yapılmaktadır. Bu şekilde problem çözümü ile kütle, mol sayısı, mol kütlesi sistemin hacmi, molar derişim ve  $K_d$  sabiti arasındaki ilişki dikkate alınmaktadır. Problem 9’dan Problem 11’e artan kapasite yaklaşımı bağlamında sarmallık ilişkisi ile hem öğretimin kolaylaştığı hem de öğrenmenin daha etkin hale geldiği söylenebilir.

#### **Toplanabilirlik İlkesi ile Denge Sabitinin Hesaplanması (Etkinlik 7, Problem 12-15)**

Bir denge tepkimesinin denge sabiti, deneysel yöntemde elde edilen verilere bağlı olarak veya denge sabiti bilinen tepkimelere toplanabilirlik ilkesinin uygulaması ile hesaplanabilir. Toplanabilirlik ilkesine göre, denge sabitini hesaplamak için denge tepkimesi bir katsayı ile çarpıldığında, tepkimedeki türlerin stokiyometrik katsayıları ve denge sabitinin nasıl değiştiğini öğretmek gerekir. Bu bağlamda, denge sabitinin nasıl hesaplanacağını Etkinlik 7 açıklamaktadır.

Etkinlik 7 bağlamında Problem 12, bir denge tepkimesi 2 ile çarpıldığında tepkimenin denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi için örnektir. Bir denge tepkimesi 2 ile çarpıldığında, türlerin stokiyometrik katsayıları 2 kat artar. Tepkimenin denge sabiti ise karesi kadar değişir. Başka bir deyişle, ikinci tepkimenin denge sabiti birinci tepkimenin denge sabitinin karesine eşittir. Problem 12 örnektir.

Etkinlik 7 bağlamında Problem 13, bir denge tepkimesi 1/2 ile çarpıldığında, tepkimenin denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi için örnektir. Bir denge tepkimesi 1/2 ile çarpıldığında, türlerin stokiyometrik katsayıları yarisına düşer. Tepkimenin denge sabiti ise karekökü kadar değişir. Başka bir deyişle, yeni oluşan tepkimenin denge sabiti birinci tepkimenin denge sabitinin kareköküne eşittir. Problem 13 örnektir.

Etkinlik 7 bağlamında Problem 14, bir denge tepkimesi -1 ile çarpıldığında, tepkimenin denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi için örnektir. Bir denge tepkimesi -1 ile çarpıldığında, türlerin stokiyometrik katsayıları değişmez ancak tepkimenin denge sabiti tersine döner. Başka bir deyişle, yeni oluşan tepkimenin denge sabiti birinci tepkimenin denge sabitinin tersine eşittir.

Etkinlik 7 bağlamında Problem 15, denge sabiti bilinen kimyasal denge tepkimelerinden denge sabiti bilinmeyen tepkimenin denge sabitinin nasıl hesaplanacağını öğretimi için örnektir. Toplanabilirlik ilkesine göre, iki denge tepkimesi toplanırsa, yeni oluşan denge tepkimesinin denge sabiti, toplanan tepkimelerin denge sabitlerinin çarpımına eşittir.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, bir sistemde gerçekleşen değişimin kimyasal denge tepkimesi olup olmadığının nasıl belirleneceği ayrıca denge tepkimelerinde  $K_d$  sabitinin nasıl hesaplanacağını aşamalı olarak öğretimi anlamlı ve buluş yolu ile öğrenme yaklaşımına uygun olarak tasarlanmıştır.

Bu bağlamda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- (1) Gösteri deneyi 1-4,  $\text{NO}_2$  gazının dimerleşme tepkimesine Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklığın etkisinin incelendiği açık uçlu bir deneysel etkinliktir.
  - (a) Etkinlik 1'e göre, Etki Tepki İlkesi bağlamında sıcaklık değişiminin gerçekleşen renk şiddetindeki değişime neden olan değişimin, fiziksel değişim mi yoksa kimyasal değişim mi olduğu,
  - (b) Etkinlik 1'e göre, kıvılcak kahve renk değişiminin tersinir mi yoksa tersinmez mi olduğu,
  - (c) Etkinlik 1'e göre, gerçekleşen kimyasal değişimin bir denge tepkimesi olup olmadığı,
  - (d) Etkinlik 1'e göre, Etki Tepki İlkesi bağlamında bir kimyasal denge tepkimesine sıcaklığın etkisi,
  - (e) Gerçekleşen değişimin ekzotermik mi yoksa endotermik mi olduğu,
  - (f) Dengedeki türlerin termodinamik açıdan kararlılığı, somut ve basit bir şekilde açıklanabilir ve öğretilir.
- (2) Denge Teorisi bağlamında kimyasal denge tepkimeleri ile Stokiyometri birbiri ile ilişkilidir. Bu ilişki, Etkinlik 2-7 ile örneklendirilmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Akman, Y. & Erden, M., Eğitim Psikolojisi: Gelişim-Öğrenme-Öğretme. Ankara: **Arkadaş Yayınevi**, (1997).
- [2] Aydın, A., Gelişim ve Öğrenme Psikolojisi. Bursa: Alfa Kitabevi, (2001).
- [3] Cheung, D., The Adverse Effects of Le Châtelier's Principle on Teacher Understanding of Chemical Equilibrium, **Journal of Chemical Education**, 86(4), 514-518, (2009).
- [4] Coloman, W. F. & Wildman, R. J., "From Our Peer-Reviewed Collection, **Journal of Chemical Education**, 80(4), 456, (2003).
- [5] Eilks, I. & Gulaçar, Ö., A Colorful Demonstration to Visualize and Inquire into Essential Elements of Chemical Equilibrium, **Journal of Chemical Education**, 93(11), 1904-1907, (2016).

- [6] Eilks, I., Gulaçar Ö. & Sandoval J., Thinking Acid-Base Chemistry and Chemical Equilibrium: Exploring the Mysterious Substance, X and Y: Challenging Students, **Journal of Chemical Education**, 95(4) 601–604, (2018).
- [7] Ergül, S., Three Hypothetical Problems For Quantitative Precipitation, **Chemistry: Bulgarian Journal of Science Education**, 24(2), 247-255, (2015).
- [8] Ergül, S., Nine Hypothetical Problems For Linkage Between Qualitative Analysis and Stoichiometric Calculations, **Chemistry: Bulgarian Journal of Science Education**, 27(4), 598-614, (2018).
- [9] Ergül, S., Sarıtaş, D. & Özcan, H., Hipotetik TGA (Tahmin-Gözlem-Açıklama) Döngüsü ile Kimyasal Değişimin Doğasının Öğretimi: Asit Baz İndikatör Tepkimesi Örneği, **BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 22(2), 490-506, (2020).
- [10] Fidan, N. & Erden, M. Eğitim Bilimine Giriş. Ankara: Kadioğlu Matbaası (1986).
- [11] Gallet, C., Problem Solving Teaching in the Chemistry Laboratory: Leaving the Cooks..., **Journal of Chemical Education**, 75(1), 72, (1998).
- [12] Hackathorn, J., Solomon, E. D., Blankmeyer, K. L., Tennial, R. E. & Garczynski, A. M., Learning by Doing: An Empirical Study of Active Teaching Techniques, **Journal of Effective Teaching**, 11(2), 40-54, (2011).
- [13] Hennis, A. D., Highberger, C. S. & Schreiner, S., Formation and Dimerization: A General Chemistry Experiment, **J Journal of Chemical Education**, 74(11), 1340-1342, (1997).
- [14] Ihde, J., Le Chatelier and The Chemical Equilibrium, **Journal of Chemical Education**, 66(3), 238-239, (1989).
- [15] Pimental G. C., Chemistry: An experimental science. Chemical education material study. London: W. H. Freeman and Company, (1963).
- [16] Senemoğlu, N., Gelişim Öğrenme ve Öğretim Kuramdan Uygulamaya. Ankara: Gazi Kitabevi, (2001).
- [17] Sarıtaş, D. ve Tufan, Y., (2013). İndirgemecilik Açısından Kimya Öğretiminde Makro ve Mikro Bilgi Seviyeleri, **GEFAD / GUJGEF**, 33(2), 165-192.

# Kapalı idealler üzerinde asal gamma halkanın kesirler halkası

Ahmet GENÇ\*

Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Merkez Kampüsü, Aydın

Geliş Tarihi (Received Date): 12.01.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 08.02.2021

## Öz

Bu çalışmanın amacı, soldan kapalı idealler üzerinde Nobusawa anlamında asal gamma halkanın kesirler halkasını oluşturmaktır.

**Anahtar kelimeler:** Asal gamma halka, sol ideal, soldan kapalı ideal.

## Quotient rings of prime gamma ring on the closed ideals

### Abstract

The aim of this paper is to give a construction of quotient gamma rings of prime gamma rings in the sense of Nobusawa on left closed ideals.

**Keywords:** Prime gamma ring, left ideal, left closed ideal.

### 1. Giriş

Gamma halkalar teorisi hakkındaki çalışmalar Nobusawa' nın [7] 1964 yılında yaptığı çalışma ile başlamıştır. Bu çalışmasında Nobusawa, Wedderburn-Artin Teoreminin genelleştirilmesini ispatlamıştır. Günümüze kadar birçok yazar, gamma halkalar hakkında çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Birleşmeli halkalar (cebirler) teorisinde, (yarı) asal halkalar büyük bir sınıfı oluşturmaktadır. Bu teorideki sıklıkla çalışılan bölüm genelleştirilmiş polinom özdeşliklerini (GPI) sağlayan (yarı) asal halkalardır. W. Martindale [6], aşikar olmayan genelleştirilmiş polinom özdeşliklerini sağlayan merkezi kapalı asal halkanın güçlü ilkel (primitive) halka olduğunu göstermiştir. Bu önemli sonucu ispatlamak için, Martindale, kendi adıyla anılan (sağ, sol) kesirler halkası kavramını tanımlamıştır. Daha sonra Amitsur [1] bu kavramı yarıasal halkalara

\* Ahmet GENÇ, agenc@adu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-2535-1689>



genişletmiştir.

Asal gamma halkalarında klasik asal halkalar teorisinde olduğu gibi üzerinde çalıştığımız halkadan daha geniş olan ve halkanın kendisini homomorfik olarak içeren bir kesirler halkasını idealler üzerinde inşa etmektir. Bu çalışmada kesirler halkasını soldan kapalı idealler üzerinde oluşturulmuştur. İdealler üzerinden elde edilen kesirler halkasının soldan kapalı idealleri üzerinden elde edilen kesirler halkasını içerdiğini ancak gamma halka birimli ise bu iki kesirler halkasının çakıştığını ifade ettik. Kesirler halkasını, tek yanlı kapalı idealleri üzerinden oluşturmamızın sebebi, gamma halkanın tek yanlı kapalı idealleri ve operatör halkanın tek yanlı kapalı idealleri arasında birebir eşleme olması ve bunun gamma halkalarının kesirler halkası ile operatör halkasının kesirler halkası arasındaki ilişkiyi araştırabilmeyi olanak sağlamasıdır.

## 2. Önbilgiler

**2.1 Tanım:**  $M$  elemanları  $a, b, c, \dots$  ile gösterilen toplamsal değişmeli grup ve  $\Gamma$  elemanları  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  ile gösterilen toplamsal değişmeli grup olsun. Her  $a, b \in M$  ve  $\gamma, \beta \in \Gamma$  için,  $a\gamma b$   $M$  toplamsal grubunun elemanı ve  $\gamma a \beta$  elemanı da  $\Gamma$  toplamsal grubunun elemanı olarak tanımlansın. Eğer bu çarpımlar aşağıdaki üç koşulu da sağlıyor ise  $M$  toplamsal grubuna  **$\Gamma$ -halkası** denir.

- (i)  $(a_1+a_2)\gamma b = a_1\gamma b + a_2\gamma b$   
 $a(\gamma_1+\gamma_2)b = a\gamma_1 b + a\gamma_2 b$   
 $a\gamma(b_1+b_2) = a\gamma b_1 + a\gamma b_2$
- (ii)  $(a\gamma b)\beta c = a\gamma(b\beta c) = a(\gamma b\beta)c$
- (iii) Her  $a, b \in M$  için  $a\gamma b = 0$  ise  $\gamma = 0$ .

Barnes [2] makalesinde Nobusawa'nın vermiş olduğu  $\Gamma$ -halkası tanımının koşullarını zayıflatarak aşağıdaki tanımı vermiştir.

**Tanım 2.2**  $M = \{a, b, c, \dots\}$  ve  $\Gamma = \{\alpha, \beta, \gamma, \dots\}$  toplamsal değişmeli gruplar olmak üzere, her  $a, b, c \in M, \alpha, \beta \in \Gamma$  için,

- (i)  $a\alpha b, M$  grubunun elemanıdır.
- (ii)  $(a+b)\alpha c = a\alpha c + b\alpha c$   
 $a(\alpha+\beta)b = a\alpha b + a\beta b$   
 $a\alpha(b+c) = a\alpha b + a\alpha c$
- (iii)  $(a\alpha b)\beta c = a\alpha(b\beta c)$

koşullarını sağlanıyorsa  $M$  toplamsal grubuna  **$\Gamma$ -halkası** denir.

Bundan sonra tanımlarda karışıklığa yol açmamak için Barnes anlamında  $M$   $\Gamma$ -halkası için  $(\Gamma, M)_B$  ve Nobusawa anlamında  $M$   $\Gamma$ -halkası için  $(\Gamma, M)_N$  gösterimini kullanılacaktır.

**Tanım 2.3**  $I \subseteq M$  olmak üzere,  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının,  $I\Gamma M = \{a\alpha c | a \in I, \alpha \in \Gamma, c \in M\}$   $(M\Gamma I)$  kümesini kapsayan  $I$  toplamsal grubuna  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının **sağ (sol) ideali** denir. Eğer  $I$  hem sağ hem de sol ideal ise  $I$  toplamsal grubuna  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının **iki yanlı ideali** veya kısaca  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının **ideali** denir.

**Tanım 2.4**  $(\Gamma, M)_B$  olmak üzere,  $x \in M$  ve  $\delta \in \Gamma$  olsun. Her  $y \in M$  için,  $y[\delta, x] = y\delta x$  ile tanımlanan  $[\delta, x]: M \rightarrow M$  dönüşümü,  $M$  toplamsal grubunun bir endomorfizmasıdır.  $\delta_i \in \Gamma$ ,  $x_i \in M$  olmak üzere,  $\sum_i [\delta_i, x_i]$  formundaki tüm toplamları içeren  $R$  kümesi,  $End^r(M)$  (sağ taraftan  $M$  ile işleme konulan endomorfizmlerin halkası) nin bir alt halkasıdır.  $R$  ye  $(\Gamma, M)_B$  nin **sağ operatör halkası** denir.

Benzer şekilde,  $(\Gamma, M)_B$  gamma halkasının **sol operatör halkası**  $L = \left\{ \sum_j [y_j, \mu_j] \mid y_j \in M, \mu_j \in \Gamma \right\} \leq End^l(M)$  tanımlanır.

**Tanım 2.5**  $(\Gamma, M)_B$  gamma halka ve  $R(L)$ , onun sağ (sol) operatör halkası olsun. Eğer her  $x \in M$  için,  $\sum_i x\delta_i e_i = x$   $\left( \sum_j f_j w_j x = x \right)$  olacak şekilde  $\sum_i [\delta_i, e_i] \in R$   $\left( \sum_j [f_j, w_j] \in L \right)$  var ise  $\sum_i [\delta_i, e_i] \left( \sum_j [f_j, w_j] \right)$  elemanına  $M$  gamma halkasının **sağ (sol) birimi** denir.  $\sum_i [\delta_i, e_i]$  elemanın  $R$  nin birimi,  $\sum_j [f_j, w_j]$  elemanın  $L$  nin birimi olduğu kolaylıkla görülebilir.

Aynı zamanda,  $\sum_i [\delta_i, e_i] \left( \sum_j [f_j, w_j] \right)$  elemanı  $\Gamma M$ -halkasının sol (sağ) birimidir.

**Tanım 2.6**  $(\Gamma, M)_N$  gamma halka olsun. Her  $x \in M$  için,  $e\delta x = x$  olacak şekilde  $e \in M$  ve  $\delta \in \Gamma$  var ise  $(\delta, e)$  çiftine  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının **güçlü (strong) sol birimi** denir. Her  $x \in M$  için,  $x\delta e = x$  olacak şekilde  $e \in M$  ve  $\delta \in \Gamma$  var ise  $(\delta, e)$  çiftine  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının **güçlü (strong) sağ birimi** denir.  $(\delta, e)$  çifti,  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının hem güçlü sağ ve sol birim ise kısaca **güçlü (strong) birim** denir.

**Tanım 2.7** [5]  $(\Gamma_1, M_1)_N$  ve  $(\Gamma_2, M_2)_N$  gamma halkaları,  $\phi$  ve  $\theta$  sırasıyla  $\Gamma_1$  grubundan  $\Gamma_2$  grubuna ve  $M_1$  grubundan  $M_2$  grubuna iki dönüşüm olmak üzere, aşağıdaki koşulları sağlayan  $(\phi, \theta)$  sıralı çiftine  $(\Gamma_1, M_1)_N$  gamma halkasından  $(\Gamma_2, M_2)_N$  gamma halkasına **homomorfizma** denir.

- (i)  $\theta, M_1$  grubundan  $M_2$  grubuna grup homomorfizmasıdır.
- (ii)  $\phi, \Gamma_1$  grubundan  $\Gamma_2$  grubuna grup homomorfizmasıdır.
- (iii) Her  $x, y \in M$  ve  $\alpha \in \Gamma$  olmak üzere,  
 $(x\alpha y)\theta = (x\theta)(\alpha\phi)(y\theta)$
- (iv) Her  $x \in M$  ve  $\alpha, \gamma \in \Gamma$  olmak üzere,  
 $(\alpha x \gamma)\phi = (\alpha\phi)(x\theta)(\gamma\phi)$

İlaveten,  $\phi$  ve  $\theta$  bire bir ve örten ise  $(\phi, \theta)$  sıralı çifti  $(\Gamma_1, M_1)_N$  gamma halkasından  $(\Gamma_2, M_2)_N$  üzerine **izomorfizma** denir ve  $(\Gamma_1, M_1)_N \cong (\Gamma_2, M_2)_N$  ile gösterilir.

**Tanım 2.8** Her  $n, n_1, n_2 \in N$ ,  $m, m_1, m_2 \in M$  ve  $\alpha, \beta \in \Gamma$  için, aşağıdaki koşulları sağlayan  $N$  toplamsal değişmeli grubuna **sağ  $\Gamma M$  – modül** denir.

- (i)  $nam \in N$
- (ii)  $(n_1 + n_2)am = n_1 am + n_2 am$
- (iii)  $n(\alpha + \beta)m = nam + n\beta m$
- (iv)  $n\alpha(m_1 + m_2) = nam_1 + nam_2$

**Tanım 2.9**  $N_1$  ve  $N_2$  sağ  $\Gamma M$  – modül olsun. Aşağıdaki koşulları sağlayan  $\theta : N_1 \rightarrow N_2$  dönüşümüne **sağ  $\Gamma M$  – modül homomorfizması** denir.

- (i)  $\theta : N_1 \rightarrow N_2$  grup homomorfizmasıdır,
- (ii) Her  $x \in N_1$  ve  $m \in M$ ,  $\alpha \in \Gamma$  için,  $\theta(xam) = \theta(x)am$ .

**Tanım 2.10**  $(\Gamma, M)$  gamma halka olsun. Eğer  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının herhangi iki  $A$  ve  $B$  ideali için,  $A\Gamma B \subseteq P$  olması  $A \subseteq P$  veya  $B \subseteq P$  olmasını gerektiriyorsa,  $(\Gamma, M)$  nın  $P$  idealine **asal ideal** denir.

**Tanım 2.11**  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sıfır ideali **asal** ideal ise  $(\Gamma, M)$  gamma halkasına **asal gamma halka** denir.

**Tanım 2.12**  $R$  ve  $L$  sırasıyla  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sağ ve sol operatör halkaları  $A, R$  halkasının sol ideali olsun.  $RA = A$  ise  $A$  sol idealine **soldan kapalı** ideal denir.  $U$ ,  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sol ideali olsun.  $LU = M\Gamma U = U$  ise  $U$  sol idealine,  $M$  nin **soldan kapalı** ideali denir.

Benzer şekilde,  $B, L$  halkasının sağ ideali olsun.  $BL = B$  ise  $B$  sağ idealine **sağdan kapalı** ideal denir.  $V$ ,  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sağ ideali olsun.  $VR = V\Gamma M = V$  ise  $V$  sağ idealine,  $M$  nin **sağdan kapalı** ideali denir.

**Tanım 2.13**  $A, R$  sol operatör halkasının sol ideali ise  $MA$  da  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sol idealidir.  $MA$  sol ideali  $*A$  ile gösterilir.  $U$ ,  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sol ideali ise  $[\Gamma, U]$  da  $R$  sol operatör halkasının sol idealidir.  $[\Gamma, U]$  sol ideali  $*U$  ile gösterilir.

Benzer şekilde,  $B, L$  sağ operatör halkasının sağ ideali ise  $BM$  de  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sağ idealidir.  $BM$  sağ ideali  $B^*$  ile gösterilir.  $V$ ,  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının sağ ideali ise  $[V, \Gamma]$  da  $L$  sağ operatör halkasının sağ idealidir.  $[V, \Gamma]$  sağ ideali  $V^*$  ile gösterilir.

**Özellik 2.14** Eğer  $R$  sol operatör halkasının  $A$  sol ideali soldan kapalı ise  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının  $*A$  sol ideali de soldan kapalıdır. Eğer  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının  $U$  sol ideali soldan kapalı ise  $R$  sol operatör halkasının  $*U$  sol ideali de soldan kapalıdır. Benzer özellikler sağdan kapalılar içinde verilebilir[5].

**Teorem 2.15**  $R$  sol operatör halkasının soldan kapalı sol idealleri ile  $(\Gamma, M)$  gamma halkasının soldan kapalı sol idealleri arasında birebir eşleme vardır [5].

### 3. Asal gamma halkanın soldan kapalı idealleri ile kurulan kesirler halkası

**Örnek 3.1**  $M = \left\{ \begin{bmatrix} a & 0 \\ a & 0 \end{bmatrix} : a \in \mathbb{Z} \right\}$  ve  $\Gamma = \left\{ \begin{bmatrix} x & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} : x \in \mathbb{Z} \right\}$  güçlü sağ birimli gamma

halkadır.  $\left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right) \in (\Gamma, M)_N$  gamma halkasının güçlü sağ birimidir.

$U = \left\{ \begin{bmatrix} 3a & 0 \\ 3a & 0 \end{bmatrix} : a \in \mathbb{Z} \right\} (\Gamma, M)_N$  gamma halkasının soldan kapalı bir idealidir.

$(\Gamma, M)_N$ , güçlü sağ birimli asal gamma halka ve  $U$ ,  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı soldan kapalı bir ideali olsun.  $(\Gamma, M)_N$ , sağ güçlü birimli olduğundan  $M\Gamma M = M$  ve Tanım 2.6 dan  $R$  operatör halkası birimlidir.  $M\Gamma M = M$  olması kullanılarak,  $R^2 = [\Gamma, M]$ .  $[\Gamma, M] = [\Gamma, M\Gamma M] = [\Gamma, M] = R$  elde edilir. Yani  $R$  operatör halkası da kendisinin soldan kapalı bir idealidir.  $A$  ve  $B$ ,  $R$  operatör halkasının soldan kapalı idealleri olmak üzere,  $R(A \cap B) \subseteq A \cap B$  olduğu  $A \cap B$  nin ideal olmasından açıktır.  $A \cap B \subseteq R(A \cap B)$  olduğu  $R$  operatör halkasının birimli olmasından görülür. O halde, soldan kapalı ideallerin arakesiti de soldan kapalı bir idealdir. Özellik 2.14 ve Teorem 2.15 kullanılarak,  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının soldan kapalı ideallerinin arakesitinin de soldan kapalı bir ideal olduğu kolaylıkla görülür.

**Özellik 3.2**  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı soldan kapalı  $U$  ve  $V$  idealleri için,  $UV$  ideali de soldan kapalıdır ve  $UV \subseteq U \cap V$  dir.

**İspat**  $U$  soldan kapalı olduğundan  $M\Gamma UV = UV$  ve  $U$  ve  $V$  ideal olması kullanılarak  $UV \subseteq U$  ve  $UV \subseteq V$  elde edilir. Yani,  $UV \subseteq U \cap V$  dir.

$U$ ,  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı soldan kapalı bir ideali olsun.

$$\mathfrak{S} = \{(U, f) \mid f: U \rightarrow M \text{ } f, \text{ sol } M\Gamma - \text{ modül homomorfizma}\}$$

kümesi üzerinde, “ $\sim$ ” bağıntısı “ $(U, f) \sim (V, g) \Leftrightarrow f|_W = g|_W$  olacak şekilde  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının  $U \cap V$  tarafından kapsanan sıfırdan farklı en az bir soldan kapalı  $W$  ideali vardır” olarak tanımlansın.  $(\Gamma, M)_N$  asal gamma halka olduğundan, sıfırdan farklı soldan kapalı  $W$  ideali bulmak her zaman mümkündür. Örneğin, eğer  $W = UV$  alırsak,  $U \neq 0$ ,  $V \neq 0$  ve  $U, V (\Gamma, M)_N$  gamma halkasının ideali ve  $(\Gamma, M)_N$  asal gamma olduğundan  $0 \neq UV$  olur. Özellik 3.2 den  $UV \subseteq U \cap V$  ve  $UV$ ,  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının soldan kapalı bir idealdir.

- $0 \neq U$   $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının ideali için,  $W = U\Gamma U$  alındığında  $W \neq 0$  dir.  $(U, f) \sim (U, f)$  olduğu açıktır. Yani “ $\sim$ ” bağıntısı yansıma özelliğini sağlar.
- $(U, f) \sim (V, g)$  olsun.  $f|_W = g|_W$  olacak şekilde  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının  $U \cap V$  tarafından kapsanan sıfırdan farklı en az bir  $W$  ideali vardır. Buradan,  $(V, g) \sim (U, f)$  elde edilir. Bu da “ $\sim$ ” bağıntısının simetrik olduğunu gösterir.
- $(U, f) \sim (V, g)$  ve  $(V, g) \sim (K, h)$  olsun.  $(U, f) \sim (V, g)$  olduğundan  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı bir  $W_1 \subseteq U \cap V$  ideali için,  $f|_{W_1} = g|_{W_1}$  eşitliği sağlanır.  $(V, g) \sim (K, h)$  olduğundan  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı bir  $W_2 \subseteq V \cap K$  ideali için,  $g|_{W_2} = h|_{W_2}$  olur.  $W = W_1\Gamma W_2$  alalım.  $W$ ,  $(\Gamma, M)_N$

gamma halkasının sıfırdan farklı soldan kapalı idealidir ve  $W=W_1\Gamma W_2 \subseteq W_1 \cap W_2 \subseteq U \cap V \cap K \subseteq U \cap K$  sağlanır. Diğer taraftan,  $f|_{W_1} = g|_{W_1}$  ve  $g|_{W_2} = h|_{W_2}$  olduğundan  $f|_W = g|_W$  ve  $g|_W = h|_W$  olduğu açıktır. O halde,  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı  $W=W_1\Gamma W_2$  soldan kapalı ideali için  $f|_W = h|_W$  dir. Böylece,  $(U, f) \sim (K, h)$  olduğu görülür. Yani “ $\sim$ ” bağıntısı geçişmelidir.

Öyleyse ” $\sim$ ” bağıntısı  $\mathfrak{N}$  kümesi üzerinde bir denklik bağıntısıdır.

Denklik sınıflarını  $\overline{(U, f)} = \hat{f}$  ile gösterelim.

$\mathfrak{N}$  kümesinin tüm elemanlarının denklik sınıflarının kümesi  $Q_C$  olsun.  $Q_C$  üzerinde ”+” işlemi aşağıdaki gibi tanımlansın.

$$\hat{f} + \hat{g} = \overline{(U, f)} + \overline{(V, g)} = \overline{(U \cap V, f + g)}$$

Yukarıda tanımlanan toplama işlemi iyi tanımlıdır.  $\overline{(U, f)}$ ,  $\overline{(V, g)}$ ,  $\overline{(U', f')}$ ,  $\overline{(V', g')} \in Q_C$  için,  $(\overline{(U, f)}, \overline{(V, g)}) = (\overline{(U', f')}, \overline{(V', g')})$  olsun. O halde,  $\overline{(U, f)} = \overline{(U', f')}$  ve  $\overline{(V, g)} = \overline{(V', g')}$  dir. Buradan,  $(U, f) \sim (U', f')$  ve  $(V, g) \sim (V', g')$  elde edilir. “ $\sim$ ” bağıntısının tanımından,  $W_1 \subseteq U \cap U'$  olacak şekilde  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı soldan kapalı bir  $W_1$  ideali üzerinde  $f = f'$  ve  $W_2 \subseteq V \cap V'$  olacak şekilde  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının sıfırdan farklı soldan kapalı bir  $W_2$  ideali üzerinde  $g = g'$  dir.  $W = W_1\Gamma W_2$  alalım.  $W \neq 0$  ve  $W \subseteq (U \cap V) \cap (U' \cap V')$  dir. Her  $w \in W$  için,  $(w)(f+g) = (w)f + (w)g = (w)f' + (w)g' = (w)(f' + g')$  olduğundan,  $\overline{(U \cap V, f + g)} \sim \overline{(U' \cap V', f' + g')}$  bulunur. O halde,  $\overline{(U \cap V, f + g)} = \overline{(W \cap T, h + k)}$  elde edilir.

Burada  $f + g : U \cap V \rightarrow M$  sol  $M\Gamma$  -modül homomorfizmasıdır.  $Q_C$  kümesinin bu işlem altında toplamsal değişmeli grup olduğu bir önceki bölüme benzer şekilde kolaylıkla gösterilir.

Benzer şekilde,  $(M, \Gamma)_N$  asal gamma halka ve  $0 \neq \Omega$   $(M, \Gamma)_N$  gamma halkasının soldan kapalı bir ideali olsun.

$\mathfrak{R} = \{(\Omega; \tau) \mid \tau : \Omega \rightarrow \Gamma \tau, \text{ sağ } M\Gamma - \text{ modül homomorfizması} \}$   $\mathfrak{R}$  kümesi üzerinde “ $\approx$ ” bağıntısı şu şekilde tanımlansın.

“( $\Omega, \tau$ )  $\approx$  ( $\Lambda, \sigma$ )  $\Leftrightarrow \tau|_{\Pi} = \sigma|_{\Pi}$  olacak şekilde  $(M, \Gamma)_N$  gamma halkasının  $\Omega \cap \Lambda$  tarafından kapsanan sıfırdan farklı en az bir soldan kapalı  $\Pi$  ideali vardır”

$(M, \Gamma)_N$  asal gamma halka olduğundan, sıfırdan farklı  $(M, \Gamma)_N$  gamma halkasının  $\Pi$  ideali her zaman bulunabilir. Yukarıdaki bağıntıya benzer şekilde “ $\approx$ ” bağıntısının denklik bağıntısı olduğu görülür.

Denklik sınıflarını  $\overline{(\Omega, \tau)} = \hat{\tau}$  ile gösterelim.  $\mathfrak{R}$  kümesinin bütün elemanlarının denklik sınıflarının kümesini  $\Delta_{Cl}$  ile gösterelim.  $\Delta_{Cl}$  üzerinde toplama işlemini aşağıdaki gibi tanımlayalım.

$$\hat{\tau} + \hat{\sigma} = \overline{(\Omega, \tau)} + \overline{(\Lambda, \sigma)} = \overline{(\Omega \cap \Lambda, \tau + \sigma)}$$

Yukarıda yaptıklarımıza benzer şekilde  $\Delta_{Cl}$  kümesinin toplamsal değişmeli grup olduğu kolaylıkla görülür.

$\tau$ ,  $\Omega$  dan  $\Gamma$  ya sağ  $M\Gamma$  – modül homomorfizması olmak üzere,  $\tau$  yardımı ile toplamsallık özelliğini sağlayacak şekilde  $\hat{\tau} : M \Omega M \rightarrow M$ ,  $\hat{\tau}(m\gamma n) = m\tau(\gamma)n$  ile  $\hat{\tau}$  dönüşümünü tanımlayalım.

$Q_{Cl}$  ve  $\Delta_{Cl}$  toplamsal değişmeli grupları göz önüne alınarak aşağıdaki işlemini tanımlayalım;

$\therefore Q_{Cl} \times \Delta_{Cl} \times Q_{Cl} \rightarrow Q_{Cl}$  işlemini,

$$(\hat{f}, \hat{\tau}, \hat{g}) \rightarrow \hat{f} \cdot \hat{\tau} \cdot \hat{g} = \overline{(U, f) \cdot (\Omega, \tau) \cdot (V, g)} = \overline{(V\Omega U, f \hat{\tau} g)} \text{ ile tanımlayalım.}$$

Bu işlemin iyi tanımlı olduğunu gösterelim.

$$(\overline{(U, f)}, \overline{(\Omega, \tau)}, \overline{(V, g)}) = (\overline{(U_1, f_1)}, \overline{(\Omega_1, \tau_1)}, \overline{(V_1, g_1)}) \text{ olsun.}$$

“ $\sim$ ” ve “ $\approx$ ” bağıntısının tanımından,

$(U, f) \sim (U_1, f_1) \Rightarrow f|_W = f_1|_W$  olacak şekilde,  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının  $U \cap U_1$  tarafından kapsanan sıfırdan farklı en az bir soldan kapalı  $W$  ideali vardır,  $(\Omega, \tau) \approx (\Omega_1, \tau_1) \Rightarrow \tau|_{\Pi} = \tau_1|_{\Pi}$  olacak şekilde,  $(M, \Gamma)_N$  gamma halkasının  $\Omega \cap \Omega_1$  tarafından kapsanan sıfırdan farklı en az bir soldan kapalı  $\Pi$  ideali vardır ve  $(V, g) \sim (V_1, g_1) \Rightarrow g|_K = g_1|_K$  olacak şekilde,  $(\Gamma, M)_N$  gamma halkasının  $V \cap V_1$  tarafından kapsanan sıfırdan farklı en az bir soldan kapalı  $K$  ideali var olduğu elde edilir.  $A = K\Pi WTK\Pi W \neq 0$ . Eğer  $A = 0$  olsa  $(\Gamma, M)_N$  asal olması ve  $K\Pi W$  in  $(\Gamma, M)_N$  halkasının ideali olması kullanılarak  $\Pi = 0$  elde edilir. Bu da  $\Pi \neq 0$  olması ile çelişir.

$$A = K\Pi WTK\Pi W = \left\{ \sum_{sonlu} k\gamma w\beta k'\gamma'w' \mid \forall w, w' \in W, \gamma, \gamma' \in \Pi, k, k' \in K, \beta \in \Gamma \right\}.$$

$$\begin{aligned} (k\gamma w\beta k'\gamma'w') f \hat{\tau} g &= (k\gamma w\beta k'\gamma'f(w')) \hat{\tau} g = (k\tau(\gamma w\beta k'\gamma')f(w')) g \\ &= (k\tau_1(\gamma w\beta k'\gamma')f_1(w')) g_1 \\ &= (k\gamma w\beta k'\gamma'w') f_1 \hat{\tau}_1 g_1, \forall w, w' \in W, \gamma, \gamma' \in \Pi, k, k' \in K, \beta \in \Gamma. \end{aligned}$$

Ayrıca,  $f_1 \hat{\tau}_1 g_1$  toplamsal olduğundan,  $f \hat{\tau} g \Big|_A = f_1 \hat{\tau}_1 g_1 \Big|_A$  olduğu görülür.

$(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_N$  nun gamma halka olduğunu Genç [4] benzer olarak gösterilir. Böylece,  $(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_N$  gamma halkadır. Benzer şekilde aşağıdaki işlem altında  $(Q_{Cl}, \Delta_{Cl})_N$  nin gamma halka olduğu görülebilir.

$(\hat{\tau}, \hat{f}, \hat{\sigma}) \rightarrow \hat{\tau} \cdot \hat{f} \cdot \hat{\sigma} = \overline{(\Omega, \tau) \cdot (U, f) \cdot (\Lambda, \sigma)} = \overline{(\Lambda U \Omega, \tau f \sigma)}$  olacak şekilde,

$\therefore \Delta_{Cl} \times Q_{Cl} \times \Delta_{Cl} \rightarrow \Delta_{Cl}$  “.” işlemi ve burada  $\hat{f} : \Gamma U \Gamma \rightarrow \Gamma$  ( $\gamma m \beta$ )  $\hat{f} = \gamma f(m) \beta$  olarak tanımlanır.

$(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_{\mathbb{N}}$  gamma halkası birimlidir.  $I_M : M \rightarrow M$  ve  $I_{\Gamma} : \Gamma \rightarrow \Gamma$  birim dönüşümleri  $M\Gamma$ -modül homomorfimasıdır. Her  $(U, f) \in Q_{Cl}$  için,

$$\overline{(U, f) \cdot (\Gamma, I_{\Gamma}) \cdot (M, I_M)} = \overline{(M, I_M) \cdot (\Gamma, I_{\Gamma}) \cdot (U, f)} = \overline{(U, f)}$$

$(\overline{(M, I_M)}, \overline{(\Gamma, I_{\Gamma})})$  çifti  $(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_{\mathbb{N}}$  halkasının birimidir.

**Sonuç 3.3**  $(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_{\mathbb{N}}$  kesirler halkası  $(\Delta, Q)_{\mathbb{N}}$  kesirler halkası tarafından kapsanır. Eğer  $(\Gamma, M)_{\mathbb{N}}$  asal gamma halkası güçlü birimli ise bu halkalar birbirine eşittir.

**İspat:**  $(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_{\mathbb{N}}$  kesirler halkası kapalı idealler üzerinden kurulduğundan ve her kapalı ideal öncelikle ideal olarak alındığından  $(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_{\mathbb{N}} \subset (\Delta, Q)_{\mathbb{N}}$  olduğu açıktır. Eğer  $(\Gamma, M)_{\mathbb{N}}$  asal gamma halkası güçlü birimli ise her ideali kapalı olduğundan  $(\Delta_{Cl}, Q_{Cl})_{\mathbb{N}} = (\Delta, Q)_{\mathbb{N}}$  olduğu kolaylıkla görülür.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, asal gamma halkalarının soldan kapalı idealler üzerinde kesirler halkası oluşturulmuş ve bu halkanın birimli olduğu, asal gamma halkasının kesirler halkası tarafından kapsandığı ve eğer asal gamma halkası güçlü birimli ise bu iki kesirler halkasının eşit olduğu gösterilmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Amitsur, S. A., On central division algebras, **Israel J. Math.**, 12, 408-420, (1972).
- [2] Barnes, W. E., On the  $\Gamma$ -ring of Nobusawa, **Pacific Journal of Mathematics**, 18, 411-422, (1966).
- [3] Beidar K. I., Martindale III W. S. and Mikhalev, A. V., Rings with Generalized Identities, **Marcel Dekker Incorporated**, (1996).
- [4] Genç A., Asal Gamma halkalarının Kesirler Halkası, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2008).
- [5] Kyuno, S., Gamma Rings, **Hadronic Press Incorporated**, (1991).
- [6] Martindale, W., Prime Rings Satisfying a Generalized Polynomial Identity, **Journal of Algebra**, 12, 576-584, (1969).
- [7] Nobusawa, N., On a Generalization of the Theory, **Osaka Journal of Mathematics**, 1, 81-89, (1964).

# $G_3$ 'te $\Delta^{\text{II}} x_i = \lambda_i x_i$ şartını sağlayan küresel çarpım yüzeyleri

Bengü BAYRAM, Özgün BİÇGİN\*

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çağış kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 05.01.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.02.2021

## Öz

$n$ -boyutlu bağlantılı bir manifolddan  $m$ -boyutlu Öklid uzayına tanımlı bir izometrik daldırma için,  $M$  manifoldunun yer vektörü Laplas operatörünün sabit olmayan öz fonksiyonlarının sonlu bir toplamı olarak ayrışabiliyorsa,  $M$  manifoldu sonlu tiptedir, denir. Sonlu tipte yüzeyler farklı uzaylarda birçok yazar tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada, 3-boyutlu Galilean uzayda,  $\Delta^{\text{II}}$  ikinci temel forma göre Laplas operatörü olmak üzere,  $\Delta^{\text{II}} x_i = \lambda_i x_i$  eşitliğini sağlayan küresel çarpım yüzeylerini ele aldık. Ayrıca, bu yüzeylerin tam bir sınıflandırmasını verdik.

**Anahtar kelimeler:** Sonlu tipte yüzeyler, Galilean uzay, küresel çarpım yüzeyi.

## Spherical product surfaces satisfying $\Delta^{\text{II}} x_i = \lambda_i x_i$ in $G_3$

### Abstract

For an isometric immersion of  $n$ -dimensional connected manifold into Euclidean  $m$ -space, the position vector of  $M$  can be decomposed as a finite sum of  $IE^m$  valued non-constant functions of the Laplacian operator, one can say that  $M$  is of finite type. Finite type surfaces corresponds to the fundamental forms are studied in different spaces by many authors. In this study, we consider the spherical product surface in 3-dimensional Galilean space satisfying the condition  $\Delta^{\text{II}} x_i = \lambda_i x_i$  where  $\Delta^{\text{II}}$  is the Laplacian with respect to second fundamental form. We also give exact classification of these type surfaces.

**Keywords:** Finite type surface, Galilean space, spherical product surface.

Bengü BAYRAM, benguk@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-1237-5892>

\* Özgün BİÇGİN, ozgunbicgin@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0255-8633>



## 1. Giriş

$x: M \rightarrow IE^m$ ,  $n$ -boyutlu bağlantılı manifold  $M$ 'den  $m$ -boyutlu Öklid uzayı  $IE^m$ 'ye bir izometrik daldırma olsun.  $M$ 'nin Laplace operatörü  $\Delta$  olmak üzere  $x$  konum vektörü ve  $H$  ortalama eğrilik vektörü  $\Delta x = -nH$  Bertrami formülünü sağlar. Daldırmanın minimal ( $H=0$ ) olması için gerek ve yeter şart daldırmanın harmonik olmasıdır yani  $\Delta x = 0$  olmasıdır. Bir  $x: M \rightarrow IE^m$  izometrik daldırması eğer  $\Delta^2 x = 0$  yani  $\Delta H = 0$  olursa *biharmonik* olarak adlandırılır. (bkz. [10,11]). [19]'da Takahashi  $\Delta x + \lambda x = 0$ ,  $\lambda \in \mathbb{R}$  koşulunu sağlayan Öklid uzayındaki altmanifoldları çalıştı ve sınıflandırdı.  $M$ 'nin düzgün fonksiyonlara etkisi  $M$ 'nin  $\Delta$  Laplası ile gösterilir. Eğer  $IE^m$ 'deki  $M$ 'nin  $x$  konum vektörü,  $\Delta$  Laplasının sabit olmayan fonksiyonlarının sonlu toplamı olarak ayrıştırılırsa,  $M$ 'ye *sonlu tiptedir* denilir. Tam olarak ifade etmek gerekirse  $M$ 'deki  $x$  konum vektörü  $x = x_0 + x_1 + \dots + x_k$  formunda ifade edilebilir. Burada  $\Delta x_i = \lambda_i x_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  olmak üzere;  $x_0$  sabit dönüşüm,  $x_1, x_2, \dots, x_k$  sabit olmayan dönüşümlerdir. Eğer  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  birbirinden farklıysa  $M$ 'ye *k tipindedir* denir. Eğer bazı  $i$ 'ler için  $\lambda_i = 0$  durumu varsa  $M$  *null k tipindedir* denir [7-8].

Eğer  $M$ 'deki  $x$  konum vektörü  $\Delta^J$  operatörünün sabit olmayan özvektörlerinin sonlu toplamı olarak, yani

$$x = x_0 + x_1 + \dots + x_k, \Delta^J x_i = \lambda_i x_i, i = 1, \dots, k,$$

olarak yazılırsa  $M$ 'ye *J temel formuna göre sonlu tipte ya da kısaca sonlu J -tipindedir* denir. Burada  $\Delta^J x_i = \lambda_i x_i$ ,  $i = 1, \dots, k$  olmak üzere  $x_0$  sabit vektör ve  $x_1, x_2, \dots, x_k$  sabit olmayan dönüşümlerdir. Eğer özellikle bütün  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$  özdeğerleri farklıysa  $M$ 'ye *J temel formuna göre k-tipindedir (J -type k)*, diğer durumda  $M$  *sonsuz tiptedir* denir. Bazı  $i = 1, \dots, k$  için  $\lambda_i = 0$  ise  $M$ 'ye *J temel formunda göre null k tipindedir (null J -type k)* denir [18].

[20]'de Yoon, üç boyutlu Galilean uzayda  $\Delta x_i = \lambda_i x_i$ ,  $\lambda_i \in \mathbb{R}$  koşulu altında öteleme yüzeylerini sınıflandırdı. [5,13]'teki yazarlar üç boyutlu uzaylarda  $\Delta''' r_i = \mu_i r_i$  şartını sağlayan öteleme yüzeylerini ve dönel yüzeyleri sınıflandırdı. [16, 21]'de yazarlar 3-boyutlu Öklid uzayında ve Minkowski uzayında minimal homotetik yüzeyleri çalıştılar. Mohammed Bekkar ve Bendehiba Senoussi, [4]'te, 3-boyutlu Öklid ve Lorentz uzaylarında  $\Delta r_i = \lambda_i r_i$  şartını sağlayan homothetical yüzeyleri sınıflandırdılar. Aydın, Öğrenmiş ve Ergüt, [3]'te psuedo Galilean uzayında Gauss ve ortalama eğriligi sıfır olan homothetical yüzeyleri araştırdılar. Karacan, Yoon ve Bukçü [14]'te  $\Delta^J x_i = \lambda_i x_i$ ,  $J = 1, 2$  ve  $\Delta''' x_i = \lambda_i x_i$  şartlarını sağlayan *tip-1* öteleme yüzeylerini sınıflandırdılar. Son olarak Çakmak, Karacan, Kızıltuğ ve Yoon [9]'da 3-boyutlu Galilean uzayda  $\Delta'' x_i = \lambda_i x_i$  şartını sağlayan öteleme yüzeylerini çalıştılar.

Bu çalışmada, 3-boyutlu Galilean uzayda  $\Delta'' x_i = \lambda_i x_i$  şartını sağlayan küresel çarpım yüzeyi çalışılmıştır. Burada  $\Delta''$  ikinci temel formun Laplas operatörüdür.

## 2. Temel kavramlar

$G_3$  3-boyutlu Galilean uzay, ideal şekli  $\{w, f, I, I_1\}$  olan bir kompleks projektif uzaydır. Burada  $w$  reel düzlemi ideal düzlem,  $f \subset w$  reel doğrusu ideal doğru,  $I$  ve  $I_1$  iki kompleks eşlenik noktaldır.

$G_3$  Galilean uzayının reel modeli  $P^3$  projektif uzayda  $\{w, f\}$  idealini alabiliriz. Burada  $w \subset G_3$  reel düzlem, üzerinde  $\varepsilon$  eliptik involüsyonu tanımlı  $f \subset w$  reel doğrudur. Homojen koordinatlarda  $\varepsilon$  eliptik involüsyonu

$$(0 : 0 : x_2 : x_3) \rightarrow (0 : 0 : x_3 : -x_2)$$

şeklinde tanımlanabilir.  $G_3$  'ün hareket grubu

$$\bar{x} = a + x,$$

$$\bar{y} = b + cx + y \cos \theta + z \sin \theta$$

$$\bar{z} = d + ex - y \sin \theta + z \cos \theta$$

ile afin koordinatlardan verilen altı parametrelili bir gruptur. Burada  $a, b, c, d, e$  ve  $\theta$  reel sayılardır.

$G_3$  Galilean uzayında dört çeşit doğru vardır. Bunlar  $f$  ile kesişmeyen reel izotropik olmayan doğrular,  $w$  düzlemine ait olmayıp  $f$  ile kesişen reel izotropik doğrular, reel ve izotropik olmayan doğrular yani,  $w$  düzleminin tüm doğruları ( $f$  dışında) ve  $f$  ideal doğrusudur.

3- boyutlu Galilean uzayda  $x = \text{sabit}$  olan düzlemler ( $w$ ) ideal düzlemi de dahil reel Öklidiyen düzlemlerdir. Diğer düzlemler ise izotropiktir.

3-boyutlu Galilean uzayda  $p_1 = (x, y, z)$  ve  $p_2 = (x_1, y_1, z_1)$  iki vektör olmak üzere bu iki vektörün iç çarpımı

$$\langle p_1, p_2 \rangle = \begin{cases} xx_1, & x \neq 0 \text{ veya } x_1 \neq 0 \\ yy_1 + zz_1, & x = x_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır.

Bir  $p$  vektörü için  $\|p\| = \sqrt{\langle p, p \rangle} = 1$  durumu sağlanırsa *birim vektördür*. Galilean uzayda  $p_1$  ve  $p_2$  vektörünün vektörel çarpımı

$$p_1 \times p_2 = \begin{vmatrix} 0 & e_2 & e_3 \\ x & y & z \\ x_1 & y_1 & z_1 \end{vmatrix} = (0, x_1 z - z_1 x, x y_1 - y x_1). \quad (2)$$

biçimindedir.

$p_i = (x, y, z)$  vektörüne  $x=0$  olması halinde *izotropik*, diğer durumda *non-izotropik* denir. Üç boyutlu Galilean uzayında  $C^r$  ( $r \geq 1$ ) sınıfından bir yüzey

$$X : U \rightarrow M, \quad U \subset \mathbb{R}^2,$$

$$X(u_1, u_2) = (x(u_1, u_2), y(u_1, u_2), z(u_1, u_2))$$

olarak parametrelendirilmiş olsun. Burada  $x, y, z$   $U$  üzerinde türevlenebilir reel değerli fonksiyonlardır.

$$\frac{\partial x}{\partial u_i} = x_{u_i} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 x}{\partial u_i \partial u_j} = x_{u_i u_j}, \quad 1 \leq i, j \leq 2$$

göstersiz. Benzer işlemler  $y$  ve  $z$  için de geçerlidir.  $x_{u_i} \neq 0$   $i = 1, 2$  olduğu zaman yüzey *admissible* (yani Öklid teğet düzlemleri olmayan) yüzeydir.

$$g_i = x_{u_i}, \quad h_{ij} = y_{u_i} y_{u_j} + z_{u_i} z_{u_j} \quad (i, j = 1, 2)$$

göstersiz. Böylece  $M$ 'nin birinci temel formu

$$I = ds_1^2 + \varepsilon ds_2^2$$

dir. Burada

$$ds_1^2 = (g_1 du_1 + g_2 du_2)^2, \quad ds_2^2 = h_{11} du_1^2 + 2h_{12} du_1 du_2 + h_{22} du_2^2$$

ve

$$\varepsilon = \begin{cases} 0, & du_1 : du_2 \text{ izotropik değil} \\ 1, & du_1 : du_2 \text{ izotropik} \end{cases}$$

dir.  $M$ 'nin ikinci temel formu

$$II = L_{11} du_1^2 + 2L_{12} du_1 du_2 + L_{22} du_2^2$$

olarak ifade edilir. Burada  $M$ 'nin ikinci temel form katsayıları

$$L_{ij} = \left\langle \frac{X_{u_i u_j} \cdot x_{u_i} - x_{u_i u_j} \cdot X_{u_i}}{x_{u_i}}, N \right\rangle = \left\langle \frac{X_{u_i u_j} \cdot x_{u_2} - x_{u_i u_j} \cdot X_{u_2}}{x_{u_2}}, N \right\rangle, \quad x_{u_i} \neq 0, \quad x_{u_2} \neq 0, \quad i, j = 1, 2 \quad (3)$$

dir. Yüzeyin ikinci temel formu özdeş olarak sıfırsa yüzeye *total geodezik* denir.

$M$  yüzeyinin birim normal vektör alanı  $N$ ,

$$N(u_1, u_2) = \frac{X_{u_1} \times X_{u_2}}{W}(u_1, u_2) \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $W = \|X_{u_1} \times X_{u_2}\|$  olur.  $M$  parabolik noktalara sahip olmayan bir yüzey olsun. Diğer bir ifadeyle  $L_{11}L_{22} - L_{12}^2 \neq 0$  olsun.  $M$ 'nin  $\{u_1, u_2\}$  lokal koordinatlarına göre ikinci temel formun Laplas operatörü

$$\Delta'' X = -\frac{I}{\sqrt{|L_{11}L_{22} - L_{12}^2|}} \left[ \frac{\partial}{\partial u_1} \left( \frac{L_{22}X_{u_1} - L_{12}X_{u_2}}{\sqrt{|L_{11}L_{22} - L_{12}^2|}} \right) - \frac{\partial}{\partial u_2} \left( \frac{L_{12}X_{u_1} - L_{11}X_{u_2}}{\sqrt{|L_{11}L_{22} - L_{12}^2|}} \right) \right] \quad [17]. \quad (5)$$

biçiminde tanımlanır.

### 3. $G_3$ 'te $\Delta'' x_i = \lambda_i x_i$ şartını sağlayan küresel çarpım yüzeyleri

[1,6]'da yazarlar,  $IE^3$  ve  $IE^4$  Öklid uzaylarında küresel çarpım yüzeylerini çalışmışlardır. [2]'de, yazarlar bu tip yüzeyleri  $G_3$  üç boyutlu Galilean uzayda incelemişlerdir. Bununla beraber [15]'te, yazarlar  $G_3$  üç boyutlu Galilean uzayda noktasal 1-tip Gauss dönüşümüne sahip küresel çarpım yüzeylerini incelemişlerdir.

Bu bölümde,  $G_3$ 'te  $\Delta'' x_i = \lambda_i x_i$  şartını sağlayan küresel çarpım yüzeyleri çalışılmış ve bu yüzeylerin tam sınıflandırılması verilmiştir.

$\alpha, \beta : I_1 \subset \mathbb{R} \rightarrow G_2$ ,  $\alpha(u) = (f_1(u), f_2(u))$  ve  $\beta(v) = (g_1(v), g_2(v))$  olacak şekilde iki Galilean düzlem eğrisi olsun. Burada  $f_i$  ve  $g_i$  ( $i=1,2$ ) sırasıyla  $I_1$  ve  $I_2$  açıklarında reel değerli sabit olmayan türevlenebilir fonksiyonlardır. O zaman  $G_3$ 'te iki düzlem eğrisinin  $M$  küresel çarpım yaması

$$X = \alpha \otimes \beta : I_1 \times I_2 \rightarrow G_3,$$

$$X(u, v) = (f_1(u), f_2(u)g_1(v), f_2(u)g_2(v)) \quad (6)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $u_0 < u < u_1$ ,  $v_0 < v < v_1$  dir. [2, 12].

$f_i$  ve  $g_i$  sabit olmadığından,  $M$  her zaman admissible olur.

(6)'da parametrizasyonu verilen küresel çarpım yüzeyi için, ikinci temel form katsayıları

$$L_{11} = \frac{(f_1'' f_2' - f_1' f_2'') (g_1 g_2' - g_1' g_2)}{f_1' \sqrt{g_1'^2 + g_2'^2}}, \quad L_{12} = 0, \quad L_{22} = \frac{f_2 (g_1' g_2'' - g_1'' g_2')}{\sqrt{g_1'^2 + g_2'^2}} \quad (7)$$

olur.

(5), (6) ve (7), kullanılırsa

$$\Delta'' x_1 = \lambda_1(u, v) f_1(u) = \frac{1}{2} C(u, v) E(u) f_1(u) \quad (8)$$

$$\Delta'' x_2 = \lambda_2(u, v) f_2(u) g_1(v) = C(u, v) [A(u) + B(v)] f_2(u) g_1(v), \quad (9)$$

$$\Delta'' x_3 = \lambda_3(u, v) f_2(u) g_2(v) = C(u, v) [A(u) + D(v)] f_2(u) g_2(v) \quad (10)$$

olur. Burada  $\lambda_i, i=1,2,3$ , sabittir ve

$$A(u) = \frac{1}{\left(f_1'' f_2' - f_1' f_2''\right)^2} \left( \left(f_1'' f_2' - f_1' f_2''\right) \left(\frac{1}{2} f_2' f_1'' + \frac{1}{2} \frac{f_1' f_2'^2}{f_2} + f_1' f_2''\right) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} f_1' f_2' \left(f_1''' f_2' - f_1' f_2'''\right) \right), \quad (11)$$

$$B(v) = \frac{1}{\left(g_1' g_2'' - g_1'' g_2'\right)^2} \left( \frac{g_1''}{g_1} \left(g_1 g_2' - g_1' g_2\right) \left(g_1' g_2'' - g_1'' g_2'\right) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{g_1'}{g_1} \left(g_1' g_2'' - g_1'' g_2'\right) \left(g_1 g_2'' - g_1'' g_2'\right) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \frac{g_1'}{g_1} \left(g_1 g_2' - g_1' g_2\right) \left(g_1' g_2''' - g_1'' g_2''\right) \right), \quad (12)$$

$$C(u, v) = -\frac{\sqrt{g_1'^2 + g_2'^2}}{\left(g_1 g_2' - g_1' g_2\right) f_2}, \quad (13)$$

$$D(v) = \frac{1}{\left(g_1' g_2'' - g_1'' g_2'\right)^2} \left( \frac{g_2''}{g_2} \left(g_1 g_2' - g_1' g_2\right) \left(g_1' g_2'' - g_1'' g_2'\right) \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \frac{g_2'}{g_2} \left(g_1' g_2'' - g_1'' g_2'\right) \left(g_1 g_2'' - g_1'' g_2'\right) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \frac{g_2'}{g_2} \left(g_1 g_2' - g_1' g_2\right) \left(g_1' g_2''' - g_1'' g_2''\right) \right), \quad (14)$$

$$E(u) = \frac{f_1'}{2\left(f_1'' f_2' - f_1' f_2''\right)^2 f_1} \left[ \left(f_1'' f_2' - f_1' f_2''\right) \left(3 f_1'' f_2 + f_2' f_1'\right) \right. \\ \left. - f_1' f_2 \left(f_1''' f_2' - f_1' f_2'''\right) \right] \quad (15)$$

dir. Burada  $f_i, g_i, i=1,2,3, f_i \neq c_2 f_2 + c_3$  ve  $g_i \neq c g_2 + c_l$  durumlarını sağlayan diferansiyellenebilir fonksiyonlardır.  $f_i$  and  $g_i$ 'nin ikinci türevleri aynı anda sıfır olamaz, yani  $M$  en fazla 3-tipindedir.

**Tanım 1.**

Üç boyutlu Galilean uzayda bir yüzey  $\Delta''x=0$  koşulunu sağlıyorsa o yüzeye *II-harmonik* denir.

**Teorem 1.**

Üç boyutlu Galilean uzayda *II-harmonik* küresel çarpım yüzeyi yoktur [22].

**İspat.**  $M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun.  $M$  *II-harmonik* ise (8), (9) ve (10)'dan

$$E(u)=0,$$

$$A(u)+B(v)=0,$$

$$A(u)+D(v)=0$$

elde edilir.  $B(v)$  and  $D(v)$ 'nin sıfır olamayacağı açıktır, bu yüzden,  $A(u)$  sabittir ve  $B(v)$  ile  $D(v)$  sabit ve  $A(u)$ 'nun ters işaretlisidir.  $E(u)=0$  olduğundan

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = c f_1'^3 f_2 \tag{16}$$

olur. (16) ifadesi (11)'de yerine yazılırsa

$$A(u) = -I \tag{17}$$

elde edilir. (17) ve  $B(v)=D(v)$  kullanılırsa

$$\frac{(g_1' g_2 - g_1 g_2')^3}{(g_1' g_2'' - g_1'' g_2')} = c_6, \tag{18}$$

elde edilir ve buradan da

$$B(v)=D(v) = -I. \tag{19}$$

olur. Fakat bu bir çelişkidir. O zaman  $M$  *II-harmonik* olamaz.

Şimdi,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  fonksiyonlarına göre sıradaki durumları inceleyeceğiz.

**Durum 1.**  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq 0$  olsun. (8), (9) ve (10)'dan

$$E(u)=0, \tag{20}$$

$$A(u)+B(v) \neq 0, \tag{21}$$

$$A(u)+D(v) \neq 0 \tag{22}$$

elde edilir ve buradan da

$$E(u)=0 \text{ and } A(u)=0 \quad (23)$$

olur. O zaman burada iki alt durum vardır.

**a)** Eğer  $E(u)=0$ ,  $A(u)=0$  ise

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = c_1 f_1' f_2 f_2'^2, \quad (24)$$

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = c f_1'^3 f_2$$

elde edilir ki bu da

$$f_1 = \pm c_2 f_2 + c_3 \quad (25)$$

demektir. Bu bir çelişkidir.

**b)** Eğer  $E(u)=0$ ,  $A(u) \neq 0$  ise buradan

$$f_1 \neq \pm c_2 f_2 + c_3 \quad (26)$$

ve  $A(u)=-1$  olur.  $B(v) \neq 0$  ve  $D(v) \neq 0$  olduğundan

$$g_1'' \neq 0 \text{ and } g_2'' \neq 0 \quad (27)$$

elde edilir. Böylece sıradaki teorem verilebilir.

***Teorem 2.***

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman,  $M$ 'nin null 2-tip 3 ( $\lambda_1=0$ ,  $\lambda_2 \neq \lambda_3 \neq 0$ ) olması için gerek ve yeter şart

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = c f_1'^3 f_2, \quad g_1'' \neq 0, \quad g_2'' \neq 0$$

olmasıdır [22].

**Durum 2.**  $\lambda_1=0$ ,  $\lambda_2=\lambda_3 \neq 0$  olsun. (8), (9) ve (10)'dan

$$E(u)=0 \text{ and } B(v)=D(v) \text{ and } (A(u)=0 \text{ or } A(u) \neq 0)$$

olur yani

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = c f_1'^3 f_2 \quad (28)$$

ve

$$\frac{(g_1'g_2 - g_1g_2')^3}{(g_1'g_2'' - g_1''g_2')} = c_6. \tag{29}$$

elde edilir.  $f_1 \neq \pm c_2 f_2 + c_3$  olduğundan,  $E(u)=0$  ile  $A(u)=0$  ve  $B(v)=D(v) \neq 0$  bir önceki durumda belirtildiği gibi var olamaz. Bu yüzden  $E(u)=0$  ile  $A(u) \neq 0$  ve  $B(v)=D(v) \neq 0$  olur. Buradan da  $A(u) = -1 \neq 0$ ,  $B(v)=D(v) = -1$  elde edilir.

Böylece sıradaki teoremi verebiliriz.

**Teorem 3.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin null 2-tip 2 ( $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$ ) olması için gerek ve yeter şart

$$f_1''f_2' - f_1'f_2'' = cf_1'^3 f_2, \quad \frac{(g_1'g_2 - g_1g_2')^3}{(g_1'g_2'' - g_1''g_2')} = c_6$$

denklemlerini sağlamasıdır [22].

**Örnek 1.**

$$X(u,v) = (e^u, (\sin e^u + \cos e^u) \sin v, (\sin e^u + \cos e^u) \cos v)$$

parametrizasyonu ile verilen küresel çarpım yüzeyi null 2-tip 2'dir.  $E(u) = 0$ ,  $A(u) = -1 \neq 0$ ,  $B(v) = D(v) = -1 \neq 0$  olduğundan  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$  durumu elde edilir [22].

**Durum 3. a)**  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 \neq 0$  olsun. (8), (9) ve (10)'dan

$$E(u) = 0, A(u) + B(v) = 0 \text{ and } A(u) + D(v) \neq 0$$

elde edilir. Eğer  $E(u) = 0$  ise  $f_1''f_2' - f_1'f_2'' = cf_1'^3 f_2$  olur. Bu da  $A(u) = -1$  demektir. Buradan  $B(v) = 1$ , yani

$$\frac{g_1(g_1''g_2' - g_1'g_2'') + 3g_1''(g_1g_2' - g_1'g_2)}{g_1'(g_1g_2' - g_1'g_2)} = \frac{g_1'g_2''' - g_1'''g_2'}{g_1'g_2'' - g_1''g_2'} \tag{30}$$

ve  $D(v) \neq 1$  yani

$$\frac{g_2(g_1''g_2' - g_1'g_2'') + 3g_2''(g_1g_2' - g_1'g_2)}{g_2'(g_1g_2' - g_1'g_2)} \neq \frac{g_1'g_2''' - g_1'''g_2'}{g_1'g_2'' - g_1''g_2'} \tag{31}$$



elde edilir. (30) ve (31)'den

$$4(g_1 g_2' - g_1' g_2)(g_1'' g_2' - g_1' g_2'') \neq 0 \quad (32)$$

olur.

**b)**  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 = 0$  olsun. Buradan

$$E(u) = 0, A(u) + B(v) \neq 0 \text{ and } A(u) + D(v) = 0$$

elde edilir. Eğer  $E(u) = 0$  ise  $f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = c f_1'^3 f_2$  olur. Buradan da  $A(u) = -1$  olur. Böylece  $B(v) \neq 1$ , yani

$$\frac{g_1(g_1'' g_2' - g_1' g_2'') + 3g_1''(g_1 g_2' - g_1' g_2)}{g_1'(g_1 g_2' - g_1' g_2)} \neq \frac{g_1' g_2''' - g_1''' g_2'}{g_1' g_2'' - g_1'' g_2'} \quad (33)$$

ve  $D(v) = 1$  yani

$$\frac{g_2(g_1'' g_2' - g_1' g_2'') + 3g_2''(g_1 g_2' - g_1' g_2)}{g_2'(g_1 g_2' - g_1' g_2)} = \frac{g_1' g_2''' - g_1''' g_2'}{g_1' g_2'' - g_1'' g_2'} \quad (34)$$

elde edilir. (33) ve (34)'ten

$$4(g_1 g_2' - g_1' g_2)(g_1'' g_2' - g_1' g_2'') \neq 0 \quad (35)$$

olur. O halde sıradaki teorem verilebilir.

**Teorem 4.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin null 2-tip 2 ( $\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 \neq 0$  yada  $\lambda_1 = 0, \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 = 0$ ) olması için gerek ve yeter şart

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = c f_1'^3 f_2 \quad \text{ve} \quad 4(g_1 g_2' - g_1' g_2)(g_1'' g_2' - g_1' g_2'') \neq 0$$

koşullarını sağlamasıdır [22].

**Durum 4.**  $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 0$  olsun. (8) denkleminde

$$-\frac{\sqrt{g_1'^2 + g_2'^2}}{g_1 g_2' - g_1' g_2} = c_4 \quad (36)$$

denklemini sıfırdan farklı bir sabit olarak alabiliriz ve

$$E(u) \neq 0 \quad (37)$$

olur. (9) ve (10)'dan

$$A(u)+B(v)=0 \text{ and } A(u)+D(v)=0 \quad (38)$$

olur.  $B(v)$  ve  $D(v)$  sıfır olmayacağı için,  $-A(u)=B(v)=D(v)$  ifadesi sabit olarak alınır. Buradan

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' \neq c f_1'^3 f_2, \quad (39)$$

$$\frac{(g_1' g_2 - g_1 g_2')^3}{(g_1' g_2'' - g_1'' g_2')} = c_6, \quad (40)$$

ve

$$g_1^2 + g_2^2 = c_5 \quad (41)$$

elde edilir. (40)'tan, ayrıca

$$B(v)=D(v)=-1 \quad (42)$$

elde edilir.  $A(u)=1$  olduğundan

$$\frac{f_2 f_2'^4}{c_1 f_1'} = f_1'' f_2' - f_1' f_2'' . \quad (43)$$

olur. (39), (43) ve (40), (41)'den

$$f_1 \neq c_2 f_2 + c_3, \quad (44)$$

ve  $c_6 = -1$  yani

$$\frac{(g_1' g_2 - g_1 g_2')^3}{(g_1' g_2'' - g_1'' g_2')} = -1 \quad (45)$$

elde edilir. Sıradaki sonuca ulaşılmış oluruz.

**Teorem 5.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin null 2-tip 2 ( $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = 0$ ) olması için gerek ve yeter şart (44) ve (45) şartlarını sağlamasıdır [22].

**Durum 5.**  $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 \neq 0$  olsun. O zaman

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' \neq c f_1'^3 f_2, \quad (46)$$

$$g_1^2 + g_2^2 = c_5 \quad (47)$$

ve

$$\begin{cases} A(u) + B(v) \neq 0 \\ A(u) + D(v) \neq 0 \end{cases} \quad (48)$$

elde edilir. (48)'den

$$A(u) = 0, B(v) \neq 0, D(v) \neq 0 \quad (49)$$

ya da

$$A(u) \neq 0, B(v) \neq 0, D(v) \neq 0 \quad (50)$$

olur. Eğer  $B(v) \neq 0$  ve  $D(v) \neq 0$  ise

$$g_1'' \neq 0 \text{ and } g_2'' \neq 0 \quad (51)$$

olur. (46) ve (49)'den

$$f_1 \neq c_2 f_2 + c_3 \quad (52)$$

elde edilir. Diğer taraftan (46) ve (50)'den

$$f_1 = c_2 f_2 + c_3 \quad (53)$$

durumu çıkar ki bu bir çelişkidir. Diğer taraftan , (47) ve (51)'den

$$g_1' \neq \sqrt{(-g_2 g_2')} = \text{sabit} \text{ ve } g_2' \neq \sqrt{(-g_1 g_1')} = \text{sabit} . \quad (54)$$

elde edilir. Böylece sıradaki teorem verilebilir.

**Teorem 6.**

$M$  , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$  'nin 2-type 3 ( $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 \neq 0$ ) olması için gerek ve yeter şart (52) ve (54) koşullarının sağlanmasıdır [22].

**Durum 6.** Let  $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$  . Buradan

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' \neq c f_1'^3 f_2, \quad (55)$$

$$g_1^2 + g_2^2 = c_5 \quad (56)$$

ve

$$A(u)+B(v)=A(u)+D(v) \neq 0 \quad (57)$$

olur. (57)'den

$$A(u)=0 \text{ ve } B(v)=D(v) \neq 0 \quad (58)$$

ya da

$$A(u) \neq 0 \text{ ve } B(v)=D(v) \neq 0 \quad (59)$$

elde edilir. Eğer  $B(v)=D(v)$  ise

$$\frac{\left(g_1'g_2 - g_1g_2'\right)^3}{\left(g_1'g_2'' - g_1''g_2'\right)} = c_6 \quad (60)$$

ve

$$B(v)=D(v)=-I \quad (61)$$

olur. (55) ve (58)'den

$$f_1 \neq \pm c_2 f_2 + c_3. \quad (62)$$

elde edilir, fakat (55) ve (59)'dan

$$f_1 = \pm c_2 f_2 + c_3 \quad (63)$$

olur ki bu bir çelişkidir.

(56) ve (60)'tan  $c_6 = -I$ , yani

$$\frac{\left(g_1'g_2 - g_1g_2'\right)^3}{\left(g_1'g_2'' - g_1''g_2'\right)} = -I. \quad (64)$$

elde edilir. Böylece sıradaki sonuç verilebilir.

**Teorem 7.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin 2-type 2 ( $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$ ) olması için gerek ve yeter şart (62) ve (64) şartlarını sağlamasıdır [22].

**Durum 7. a)**  $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 \neq 0$  olsun. Buradan

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' \neq c f_1'^3 f_2, \quad (65)$$

$$g_1^2 + g_2^2 = c_5 \quad (66)$$

ve

$$\begin{cases} A(u) + B(v) = 0 \\ A(u) + D(v) \neq 0 \end{cases} \quad (67)$$

elde edilir. (67)'den dolayı,  $A(u) = c_1$  (sabit) ve

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' = \frac{f_1^{(l-2c_1)} f_2^{(2+2c_1)} f_2}{c_1} \quad (68)$$

ve  $B(v) = -c_1$ , yani

$$\frac{1}{g_1 g_2' - g_1' g_2} \left[ g_1'' \left( \frac{2(1-c_1) g_1 g_2'}{g_1'} - 3g_2 \right) + 2 \left( c_1 + \frac{1}{2} \right) g_1 g_2'' \right] = \frac{g_1' g_2''' - g_1''' g_2'}{g_1' g_2'' - g_1'' g_2'} \quad (69)$$

ve  $D(v) \neq -c_1$ , yani

$$\frac{g_2''}{g_1 g_2' - g_1' g_2} \left[ 3g_1 + \frac{2(c_1 - 1) g_1' g_2}{g_2'} - \frac{2 \left( \frac{1}{2} + c_1 \right) g_1'' g_2}{g_2'} \right] \neq \frac{g_1' g_2''' - g_1''' g_2'}{g_1' g_2'' - g_1'' g_2'} \quad (70)$$

elde edilir. (65) ve (68)'den

$$f_1^{(-2-2c_1)} f_2^{(2+2c_1)} \neq c c_2. \quad (71)$$

olur. (69) ve (70)'ten

$$\frac{2 \left( \frac{1}{2} + c_1 \right) g_1' g_2'' \left( g_1'' g_2 + g_1 g_2' \right) - 3 g_1' g_2' \left( g_1 g_2'' + g_1'' g_2 \right)}{2(c_1 - 1) \left( g_1'^2 g_2 g_2'' + g_1 g_1'' g_2'^2 \right)} \neq 1. \quad (72)$$

elde edilir. (66) ve (72)'den

$$\frac{g_2' g_2'' \left( a g_2 g_2' - b g_2^4 + d g_2^2 + e \right) + f g_2^2 \left( g_2'' \right)^2 \left( c_5 - g_2^2 \right) - 3 c_5 g_2 \left( g_2' \right)^3}{2 \left( c_5 - g_2^2 \right) \left( 2 g_2^3 g_2'' - c_5 g_2 g_2'' - c_5 \left( g_2' \right)^2 \right)} \neq \frac{k g_2'}{g_2}, \quad (73)$$

elde edilir. Burada

$$a = c_5 + 2c_1 c_5, \quad b = 2c_1 - 5, \quad d = -7c_5 + 4c_1 c_5, \quad e = 2c_5^2 - 2c_1 c_5^2, \quad f = 1 + 2c_1 \quad \text{and} \quad k = c_1 - 1$$

dir.

**b)** Let  $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 = 0$ . Buradan

$$\begin{cases} A(u) + B(v) \neq 0 \\ A(u) + D(v) = 0 \end{cases} \quad (74)$$

olur. (74)'ten (68) ve  $B(v) \neq -c_1$  yani

$$\frac{1}{g_1 g_2' - g_1' g_2} \left[ g_1'' \left( \frac{2(1-c_1)g_1 g_2'}{g_1'} - 3g_2 \right) + 2 \left( c_1 + \frac{1}{2} \right) g_1 g_2'' \right] \neq \frac{g_1' g_2''' - g_1''' g_2'}{g_1' g_2'' - g_1'' g_2'} \quad (75)$$

ve  $D(v) = -c_1$  yani

$$\frac{g_2''}{g_1 g_2' - g_1' g_2} \left[ 3g_1 + \frac{2(c_1 - 1)g_1' g_2}{g_2'} - \frac{2 \left( \frac{1}{2} + c_1 \right) g_1'' g_2}{g_2'} \right] = \frac{g_1' g_2''' - g_1''' g_2'}{g_1' g_2'' - g_1'' g_2'} \quad (76)$$

elde edilir. Sıradaki teorem verilebilir.

**Teorem 8.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin null 2-tip 3 ( $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 = 0, \lambda_3 \neq 0$  ya da  $\lambda_1 \neq 0, \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 = 0$ ) olması için gerek ve yeter şart (71) ve (73)'ün sağlanmasıdır [22].

**Durum 8.**  $\lambda_1 = \lambda_3 \neq 0, \lambda_2 = 0$  olsun. Buradan  $E(u) \neq 0$ , yani

$$f_1'' f_2' - f_1' f_2'' \neq c f_1'^3 f_2 \quad (77)$$

ve

$$\begin{cases} A(u) + B(v) = 0 \\ \frac{E(u)}{2} = (A(u) + D(v)) \neq 0 \end{cases} \quad (78)$$

elde edilir. (78)'den

$$A(u) = c_1, B(v) = -c_1, D(v) = c_2 \neq -c_1 \quad (79)$$

olur. Burada  $c_1$  ve  $c_2$  sabittir. (78) ve (79)'dan

$$E(u) = 2(c_1 + c_2) \quad (80)$$

elde edilir. (80)'den

$$e^{\int \frac{4(c_1+c_2)f_1(f_1'f_2''-f_1''f_2')}{f_1'^2f_2}} = \frac{c_3(f_1''f_2' - f_1'f_2'')}{f_1'^3f_2}, \quad c_3 = \text{int. sabiti} \quad (81)$$

ve (79)'dan

$$f_1''f_2' - f_1'f_2'' = \frac{f_1'^{(1-2c_1)}f_2'^{(2+2c_1)}f_2}{c_4}, \quad c_4 = \text{int. sabiti} \quad (82)$$

ve

$$\frac{1}{g_1g_2' - g_1'g_2} \left[ g_1'' \left( \frac{2(1-c_1)g_1g_2'}{g_1'} - 3g_2 \right) + 2 \left( c_1 + \frac{1}{2} \right) g_1g_2'' \right] = \frac{g_1'g_2''' - g_1'''g_2'}{g_1'g_2'' - g_1''g_2'} \quad (83)$$

ve

$$\frac{g_2''}{g_1g_2' - g_1'g_2} \left[ 3g_1 + \frac{2(-c_2-1)g_1'g_2}{g_2'} - \frac{2 \left( \frac{1}{2} - c_2 \right) g_1''g_2}{g_2'} \right] = \frac{g_1'g_2''' - g_1'''g_2'}{g_1'g_2'' - g_1''g_2'} \quad (84)$$

elde edilir. (81), (82), (83) ve (84) denklemleri kullanılarak

$$\frac{-2(c_1+c_2)}{c_4(c_1+1)} = \frac{(f_1'f_2'' - f_1''f_2')f_1'^{2c_1}}{f_1f_2'^{(2c_1+3)}}, \quad c_1 \neq -1 \quad (85)$$

ve

$$\frac{-2g_1'g_2''(g_1g_2'(1-c_1) - g_1'g_2(1+c_2))}{\left[ g_1'g_2((-1+2c_2)g_2'' + 3g_2') - 2(1-c_1)g_1g_2'^2 \right] g_1''} = 1 \quad (86)$$

elde edilir. Böylece sıradaki teoremi verebiliriz.

**Teorem 9.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin null 2-type  $2(\lambda_1 = \lambda_3 \neq 0, \lambda_2 = 0)$  olması için gerek ve yeter şart (85) ve (86) denklemlerini sağlamasıdır [22].

**Durum 9.**  $\lambda_1 = \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 = 0$  olsun. Buradan  $E(u) \neq 0$ , yani

$$f_1''f_2' - f_1'f_2'' \neq cf_1'^3f_2 \quad (87)$$

ve

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E(u)}{2} = (A(u) + B(v)) \neq 0 \\ A(u) + D(v) = 0 \end{array} \right\} \quad (88)$$

elde edilir. (88)'den

$$A(u) = c_1, B(v) = c_2 \neq -c_1, D(v) = -c_1 \quad (89)$$

olur. Burada  $c_1$  ve  $c_2$  sabittir.

(89)'dan,

$$E(u) = 2(c_1 + c_2) \quad (90)$$

ve

$$e^{\int \frac{4(c_1+c_2)f_1(f_1'f_2''-f_1''f_2')}{f_1'^2f_2} dx} = \frac{c_3(f_1''f_2' - f_1'f_2'')}{f_1'^3f_2}, c_3 = \text{int. sabiti} \quad (91)$$

elde edilir. (89)'dan

$$f_1''f_2' - f_1'f_2'' = \frac{f_1'^{(1-2c_1)}f_2'^{(2+2c_1)}f_2}{c_4}, c_4 = \text{int. sabiti} \quad (92)$$

ve

$$\frac{1}{g_1g_2' - g_1'g_2} \left[ g_1'' \left( \frac{2(1+c_2)g_1g_2'}{g_1'} - 3g_2 \right) + 2 \left( -c_2 + \frac{1}{2} \right) g_1g_2'' \right] = \frac{g_1'g_2''' - g_1'''g_2'}{g_1'g_2'' - g_1''g_2'} \quad (93)$$

ve

$$\frac{g_2''}{g_1g_2' - g_1'g_2} \left[ 3g_1 + \frac{2(c_1-1)g_1'g_2}{g_2'} - \frac{2 \left( \frac{1}{2} + c_1 \right) g_1''g_2}{g_2'} \right] = \frac{g_1'g_2''' - g_1'''g_2'}{g_1'g_2'' - g_1''g_2'} \quad (94)$$

elde edilir. (91), (92), (93) ve (94) denklemleri kullanılarak

$$\frac{-2(c_1+c_2)}{c_4(c_1+1)} = \frac{(f_1'f_2'' - f_1''f_2')f_1'^{2c_1}}{f_1f_2'^{(2c_1+3)}}, c_1 \neq -1 \quad (95)$$

ve



$$\frac{-2g_1'g_2''(g_1g_2'(1-c_1)-g_1'g_2(1+c_2))}{\left[g_1'g_2((-1+2c_2)g_2''+3g_2')-2(1-c_1)g_1g_2'^2\right]g_1''} = I \quad (96)$$

elde edilir. Böylece sıradaki sonucu verebiliriz.

**Teorem 10.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin null 2-tip 2 ( $\lambda_1 = \lambda_2 \neq 0, \lambda_3 = 0$ ) olması için gerek ve yeter şart (95) ve (96) denklemlerinin sağlanmasıdır [22].

**Durum 10.**  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$  olsun. Buradan

$$\frac{E(u)}{2} = A(u) + B(v) = A(u) + D(v) \quad (97)$$

olur. Böylece  $B(v) = D(v)$ , yani

$$\frac{(g_1'g_2 - g_1g_2')^3}{(g_1'g_2'' - g_1''g_2')} = c_6, \quad c_6 = \text{int. sabiti} \quad (98)$$

elde edilir ve (98)'den

$$B(v) = D(v) = -1. \quad (99)$$

olur. Böylece

$$E(u) = 2A(u) - 2. \quad (100)$$

elde edilmiş olur. (100) eşitliğinden gerekli hesaplamalar yapılırsa

$$\frac{cf_2(2f_1f_2' - f_1'f_2)^2}{f_1'(f_1''f_2' - f_1'f_2'')} = e^{-2\int \frac{2f_1f_2'' - (f_1'f_2)'}{2f_1f_2' - f_1'f_2}} dx, \quad c = \text{int. sabiti} \quad (101)$$

elde edilir. Böylece sıradaki teoremi verebiliriz.

**Teorem 11.**

$M$ , (6) parametrizasyonu ile verilen bir küresel çarpım yüzeyi olsun. O zaman  $M$ 'nin 2-tip 1 ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 \neq 0$ ) olması için gerek ve yeter şart (98) ve (101) denklemlerinin sağlanmasıdır [22].

## Kaynaklar

- [1] Arslan, K., Bulca, B., (Kilic) Bayram, B., Öztürk, G. and Ugail, H., On spherical product surfaces in  $IE^3$ , **Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society**, Int. Conf. CYBERWORLDS, 132-137, (2009).
- [2] Aydın, M., E. and Öğrenmiş, A., O., Spherical Product Surface in The Galilean Space **Konuralp Journal of Mathematics**, 2, 290-298, (2016).
- [3] Aydın, M., E., Öğrenmiş A., O. and Ergüt, M., Classification Of Factorable Surfaces In The Psuedo Galilean Space, **Glasnik Matematicki**, 70(50), 441-451, (2015).
- [4] Bekkar, M. and Senoussi, B., Factorable Surfaces In The Three-Dimensional Euclidean And Lorentzian Spaces Satisfying  $\Delta r_i = \lambda_i r_i$ , **Journal of Geometry**, 103(1), 17-29, (2012).
- [5] Bekkar, M. and Senoussi, B., Translation Surfaces In The 3-Dimensional Space Satisfying  $\Delta''' r_i = \lambda_i r_i$ , **Journal of Geometry**, 103, no. 3, 367-374, (2012).
- [6] Bulca, B., Arslan, K., (Kilic) Bayram, B., Öztürk, G., Spherical product surfaces in  $IE^4$ , **Analele Stiintifice ale Universitatii Ovidius Constanta**, 20, 41-54, (2012).
- [7] Chen, B., Y., Total Mean Curvature And Submanifolds of Finite Type, **World Scientific**, (1984).
- [8] Chen, B., Y., On The Total Curvature Of Immersed Manifolds, VI: Submanifolds of finite type and their application, **Bulletin of the Institute of Mathematics Academia Sinica**, 11, 309-328.
- [9] Çakmak, A., Karacan, M., K., Kiziltug, S. and Yoon, D., W., Translation Surfaces In The Three Dimensional Galilean Space Satisfying  $\Delta'' x_i = \lambda_i x_i$ , **Bulletin of the Korean Mathematical Society**, 54(4), 1241-1254, (2017).
- [10] Defever, F., Hypersurfaces Of  $IE^4$  With Harmonic Mean Curvature Vector Field, **Mathematische Nachrichten**, 196, 61-69, (1998).
- [11] Hasanis, Th., Vlachos, Th., Hypersurfaces In  $IE^4$  With Harmonic Mean Curvature Vector Field, **Mathematische Nachrichten**, 172, 145-169, (1995).
- [12] Jaclic, A., Leonordis, A. and Solina F., Segmentation And Recovery Of Superquadrics, **Kluvar Academic Publishers**, 20, (2000).
- [13] Kaimakamis, G., Papantoniou, B. and Petoumenos, K., Surfaces of Revolution In The 3- Dimensional Lorentz-Minkowski Space Satisfying  $\Delta''' r = Ar$ , **Bulletin of the Greek Mathematical Society**, 50, 75-90, (2005).
- [14] Karacan, M., K., Yoon, D., W. and Bukcu, B., Translation Surfaces In The Three Dimensional Simply Isotropic Space  $I_3^1$ , **The International Journal of Geometric Methods in Modern Physics**, 3, no. 7, 1650088, (2016).
- [15] Kisi, I., Öztürk, G., Spherical product surface having pointwise 1-type Gauss map in Galilean 3-space  $G_3$ , **The International Journal of Geometric Methods in Modern Physics**, 16, no. 12, 1950186, (2019).
- [16] Meng, H., and Liu, H., Factorable Surfaces In 3-Minkowski Space, **Bulletin of the Korean Mathematical Society**, 46, no. 1, 155-169, (2009).
- [17] Senoussi, B. And Bekkar, M., Helicodial Surfaces With  $\Delta' r = Ar$  In The 3-Dimensional Euclidian Space, **Studia Universitatis Babeş-Bolyai Mathematica**, 60, no.3, 437-448, (2015).
- [18] Stamatakis, S. and Al-Zoubi, H., On Surface Of Finite Chen-Type, **Results in Mathematics**, 43, no. 1-2, 181-190, (2003).

- [19] Takahashi, T., Minimal Immersions Of Riemannian Manifolds, **The Journal of the Mathematical Society of Japan**, 18, 380-385, (1966).
- [20] Yoon, D., W., Some Classification Of Translation Surfaces In Galilean 3-Space, **International Journal of Mathematical Analysis**, 6, no. 28, 1355-1361, (2012).
- [21] Yu, Y. and Liu, H., The Factorable Minimal Surfaces, **Proceedings of The Eleventh International Workshop On Differential Geometry**, 11, 33-39, (2007).
- [22] Biçgin, Ö., Galilean uzayda bazı yüzeylerin temel forma göre Laplasları, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2020).

# The modified trial equation method to the (2+1)-dimensional Broer-Kaup-Kupershmidt equation and Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov equation

Seyma TULUCE DEMIRAY\*, Serife DUMAN

*Department of Mathematics, Osmaniye Korkut Ata University, Osmaniye, Turkey*

*Geliş Tarihi (Received Date): 04.01.2021*

*Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.03.2021*

## Abstract

Many methods have been developed by scientists to find solutions for nonlinear problems. In this paper, the general structure of the modified trial equation method (MTEM) is introduced, and MTEM is used to find some exact solutions of (2+1)-dimensional Broer-Kaup-Kupershmidt (BKK), Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov (KPP) equations. Firstly, an algebraic equation system is obtained by reducing the nonlinear partial differential equation (NLPDE) to the ordinary differential equation under the travelling wave transformation. Travelling wave solutions are found by solving the obtained algebraic equation systems. By using Mathematica 9 program, three and two dimensional graphs for suitable parameters were plotted to analyze the physical behavior of wave solutions. MTEM is of great importance in finding exact solutions of some partial differential equations.

**Keywords:** (2+1)-dimensional BKK equation, KPP equation, travelling wave solution.

## (2+1)-boyutlu Broer-Kaup-Kupershmidt denklemi ve Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov denkleminin modifiye edilmiş deneme denklem metodu

## Öz

Lineer olmayan problemlerin çözümünü bulmak için bilim insanları tarafından birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yazıda, modifiye edilmiş deneme denklem metodunun (MEDDM) genel yapısı tanıtılmış ve (2+1)-boyutlu Broer-Kaup-Kupershmidt (BKK), Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov (KPP) denklemlerinin bazı tam çözümlerini bulmak

\* Seyma TULUCE DEMIRAY, seymatuluce@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8027-7290>  
Serife DUMAN, serifecalik1993@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9156-9387>

*için MEDDM kullanılmıştır. İlk olarak, hareketli dalga dönüşümü altında lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemin (NLPDE) adi diferansiyel denkleme indirgenmesiyle bir cebirsel denklem sistemi elde edilmiştir. Elde edilen cebirsel denklem sistemleri çözümlenerek hareketli dalga çözümleri bulunur. Mathematica 9 programı kullanılarak, dalga çözümlerinin fiziksel davranışını analiz etmek için uygun parametreler için üç ve iki boyutlu grafikler çizilmiştir. MEDDM, bazı kısmi diferansiyel denklemlerin tam çözümlerini bulmada büyük önem taşımaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** *(2+1)-boyutlu BKK denklemi, KPP denklemi, hareketli dalga çözümü.*

## 1.Introduction

Partial differential equations are mathematical models of physical events. Finding algebraic calculations of complex nonlinear equations has an important place in soliton theory. Many effective methods have been developed to solve these physical problems [1-5]. Studies on (2+1)-dimensional BKK equation have been carried out in many application areas of nonlinear optics, mathematics and physics. In recent years, the many scientists have obtained the solutions of the Broer-Kaup-Kupershmidt equation by applying different methods. Some of those, Song et al. obtained several new solutions to the (2+1)-dimensional BKK Equation by using the bifurcation method and the qualitative theory of dynamic systems [6]. Gurefe et al. obtained new solutions by using an irrational trial equation method method to solve the (2+1)-dimensional BKK Equations [7]. They have obtained the solutions by applying the nonlinear (2+1)-dimensional BKK Equation to different methods.

Recently, many scientists have used various methods to obtain new solutions of Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov (KPP) equation. Rouhparvar has obtained new exact solutions by using the integral method to the (KPP) equation [8]. Feng has found hyperbolic, trigonometric and rational wave solutions using the (G'/G)-expansion method [9]. Since finding the solution of nonlinear problems and obtaining algebraic calculations is complex, many methods have been developed not only with a few methods.

Some of those are Hirota's Bilinear method [11, 12], the Jacobi elliptic function method [13], the Tanh Method [14-16], Simple Equation Method [17], Generalized Kudryashov method [18-21], Exp-Function method [22-23], Homogenous Balance Method [24-26], Modified Trial Equation Method [27]. They are effective methods for finding wave solutions of nonlinear problems. In this study, we have applied MTEM to obtain the exact solution of (2+1)-dimensional BKK Equation and KPP Equation. By reducing NLPDE to nonlinear ordinary differential equation (NLODE), an algebraic equation system was obtained by Mathematica 9. By solving these system, travelling wave solutions have been found. The purpose of this method is to find the traveling wave solutions of NLPDEs. In the light of these data, it is a suitable method to find the solutions of NLPDEs.

We consider the following (2+1)-dimensional BKK equation [6-7];

$$m_{ty} - m_{xxy} + 2(mm_x)_y + 2s_{xx} = 0, \tag{1}$$

$$s_t + s_{xx} + 2(ms)_x = 0.$$

and the following KPP equation [8-10];

$$u_t - u_{xx} + \mu u + \nu u^2 + \delta u^3 = 0. \tag{2}$$

Here, in  $\mu, \nu$  and  $\delta$  are real valued constants.

## 2.The Modified Trial Equation Method

**Step 1:** Consider the NLPDE,

$$P(u, u_t, u_x, u_{xx}, \dots) = 0, \tag{3}$$

wave transform as,

$$u(x, t) = u(\xi) = u(kx - wt), \tag{4}$$

where  $w$  is a constant. Applying Eq.(4) to Eq.(3), we can observe the following nonlinear ordinary differential equation (NLODE).

$$O(t, x, u, u', u'', \dots) = 0, \tag{5}$$

where  $u' = \frac{du}{d\xi}$ .

**Step 2.** The first order trial equation,

$$u' = \frac{M(u)}{N(u)} = \frac{\sum_{i=0}^n a_i u^i}{\sum_{j=0}^l b_j u^j} = \frac{a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + \dots + a_n u^n}{b_0 + b_1 u + b_2 u^2 + \dots + b_l u^l}, \tag{6}$$

and

$$u'' = \frac{M(u)[M'(u)N(u) - M(u)N'(u)]}{N^3(u)}, \tag{7}$$

where  $M(u)$  and  $N(u)$  are polynomial of  $u$ . Substituting Eq.(6) and Eq.(7) into Eq.(5), we get

$$\sigma(u) = \chi_0 + \chi_1 u + \dots + \chi_r u^r = 0. \tag{8}$$

**Step 3.** Equating the coefficients of  $\sigma(u)$  to zero, we can obtain

$$\chi_p = 0, \quad p = 0, \dots, r. \tag{9}$$

Solving the system (9), we can find the values of  $a_0, \dots, a_n$  and  $b_0, \dots, b_l$ .

**Step 4.** Consider Eq. (6), the following integral form can be written

$$\xi - \xi_0 = \int \frac{N(u)}{M(u)} du. \tag{10}$$

Using the complete discrimination system with the roots of  $M(u)$ , we obtain exact solutions of Eq. (3).

### 3.Application to (2+1)-dimensional BKK equation

Getting transformation as

$$m = \varphi(\eta), \quad s = \phi(\eta), \quad \eta = kx + qy + wt, \tag{11}$$

Eq.(1) converts to

$$qw\varphi'' - k^2 q\varphi''' + 2kq(\varphi\varphi')' + 2k^2\phi'' = 0, \tag{12}$$

$$w\phi' + k^2\phi'' + 2k(\varphi\phi)' = 0.$$

Then, it becomes the following NLODE,

$$qk^4\varphi'' - 2qk^2\varphi^3 - 2qwk\varphi^2 - qw^2\varphi + Z_1 = 0, \tag{13}$$

where  $Z_1$  is constant.

The from the balancing principle in Eq. (13),  $n$  and  $l$  are determined by as  $n = l + 2$ .

**Case 1:**

For  $l = 0$  and  $n = 2$  then

$$u' = \frac{a_0 + a_1u + a_2u^2}{b_0}, \tag{14}$$

$$u'' = \frac{(a_0 + a_1u + a_2u^2)(a_1 + 2a_2u)}{b_0^2}, \tag{15}$$

where  $a_2 \neq 0$  and  $b_0 \neq 0$ . Then, an algebraic equation system is obtained. By solving these system, the following solutions have been found:

**Case 1.1:**

$$w = -3\sqrt[3]{\frac{kZ_1}{5q}}, \quad a_2 = -\frac{a_1}{2}\sqrt[3]{\frac{5k^2q}{Z_1}}, \quad a_0 = -\frac{a_1}{4}\sqrt[3]{\frac{25Z_1}{k^2q}}, \quad b_0 = \pm\frac{a_1}{2}\sqrt[3]{\frac{5k^5q}{Z_1}}. \tag{16}$$

When we substitute Eq.(16) into Eq.(10), we get the following trigonometric function solution,

$$u(x, y, t) = \sqrt[3]{\frac{Z_1}{5k^2q}} - \sqrt[6]{\frac{27Z_1^2}{200k^4q^2}} \tan \left[ \pm \sqrt[6]{\frac{27k^2Z_1^2}{200q^2}} \left( x + \frac{q}{k}y - 3\sqrt[3]{\frac{Z_1}{5k^2q}}t \mp 10\sqrt[3]{k^4q^2}\eta_0 \right) \right]. \tag{17}$$

**Case 2:**

For  $l = 1$  and  $n = 3$  then

$$u' = \frac{a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3}{b_0 + b_1u}, \tag{18}$$

and

$$u'' = \frac{(a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3)((b_0 + b_1u)(a_1 + 2a_2u + 3a_3u^2) - b_1(a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3))}{(b_0 + b_1u)^3}, \tag{19}$$

Where  $a_3 \neq 0$ . Then, an algebraic equation system is obtained. By solving these system, the following solutions have been found:



**Case 2.1:**

$$a_1 = \frac{(-159 - 82i\sqrt{6})a_3^5 Z_1^2}{200q^2 b_0^4}, a_2 = \frac{(18 - 11i\sqrt{6})a_3^3 Z_1}{20qb_0^2}, a_0 = \frac{(-394 + 13i\sqrt{6})a_3^7 Z_1^3}{800q^3 b_0^6},$$

$$b_1 = \frac{2(14 + 3i\sqrt{6})qb_0^3}{25a_3^2 Z_1}, k = \frac{2(-14 - 3i\sqrt{6})qb_0^3}{25a_3^2 Z_1}, w = \frac{3i(2i + \sqrt{6})b_0}{5a_3},$$
(20)

Substituting Eq.(20) into Eq.(10), we get the following trigonometric function solution,

$$u_1(x, y, t) = \varepsilon \tan \left[ \frac{\sqrt{-7923 + 2046\sqrt{6}a_3^2 Z_1}}{200q^2 b_0^5} \left( \frac{(28 + 6i\sqrt{6})qb_0^3}{25a_3^3 Z_1} x + qy + \frac{6 - 3i\sqrt{6}}{5a_3} ta_3^3 Z_1 + 800q^3 b_0^7 C[1] \right) \right],$$
(21)

where  $\varepsilon = \frac{a_3^2 Z_1}{20qb_0^2} \left( 2 - 4i\sqrt{6} + \sqrt{-6(23 + 4\sqrt{6})} \right).$

**4.Application to KPP Equation**

Getting transformation as

$$u(x, t) = u(\xi) = u(kx - wt),$$
(22)

Eq.(2) converts to

$$-wu_\xi - k^2 u_{\xi\xi} + \mu u + \nu u^2 + \delta u^3 = 0.$$
(23)

The from the balancing principle in Eq.(23),  $n$  and  $l$  are determined by as  $n = l + 2$ .

**Case 1:**

For  $l = 0$  and  $n = 2$  then

$$u' = \frac{a_0 + a_1 u + a_2 u^2}{b_0},$$
(24)

$$u'' = \frac{(a_0 + a_1 u + a_2 u^2)(a_1 + 2a_2 u)}{b_0^2},$$
(25)

where  $a_2 \neq 0$  and  $b_0 \neq 0$ . Then, an algebraic equation system is obtained. By solving these system, the following solutions have been found:

**Case 1.1:**

$$a_0 = \frac{\mu a_1}{v}, \quad w = -\frac{kv}{\sqrt{2\delta}}, \quad a_2 = \frac{\delta a_1}{v}, \quad b_0 = \frac{ka_1 \sqrt{2\delta}}{v}. \quad (26)$$

when we substitute Eq. (26) into Eq. (10), we the following trigonometric function solution,

$$u(x,t) = -\frac{v}{2\delta} - \frac{\sqrt{v(-4\delta a_0 + a_1)}}{2\delta \sqrt{a_1}} \tan \left[ \frac{\sqrt{a_1(-4\delta a_0 + a_1)}}{2b_0 \sqrt{v}} \left( kx - \frac{v}{\sqrt{2\delta}} t + vb_0 C[1] \right) \right]. \quad (27)$$

**Case 1.2:**

$$a_0 = 0, \quad a_2 = \frac{k^2 v^2 a_1^2 + \sqrt{k^4 v^2 (v^2 - 4\delta\mu)} a_1^4}{2k^2 v \mu a_1}, \quad b_0 = \sqrt{\frac{k^2 (v^2 - 2\delta\mu) a_1^2 + \sqrt{k^4 v^2 (v^2 - 4\delta\mu)} a_1^4}{\delta \mu^2}}. \quad (28)$$

when we substitute Eq. (28) into Eq. (10), we get the following exp-function solution,

$$u(x,t) = \frac{2\mu}{\exp \left( 2\mu + \frac{\mu a_1 \sqrt{\delta}}{\sqrt{k^2 (v^2 - 2\delta\mu) + v \sqrt{v^2 - 4\delta\mu}} a_1^2} \left( kx - \frac{-\theta \sqrt{\frac{\theta}{\delta \mu^2}}}{4k^2 \delta a_1^3} t \right) + v + \sqrt{v^2 - 4\delta\mu} C[1] \right)}, \quad (29)$$

where  $\theta = \left( k^2 (v^2 - 6\delta\mu) a_1^2 + \sqrt{k^4 v^2 (v^2 - 4\delta\mu)} a_1^4 \right)$ .

**Case 2:**

For  $l=1$  and  $n=3$  then

$$u' = \frac{a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3}{b_0 + b_1 u}, \quad (30)$$

and

$$u'' = \frac{(a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3) \left( (b_0 + b_1 u) (a_1 + 2a_2 u + 3a_3 u^2) - b_1 (a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3) \right)}{(b_0 + b_1 u)^3}, \quad (31)$$

where  $a_3 \neq 0$ . Then, an algebraic equation system is obtained. By solving these system, the following solutions have been found:

**Case 2.1:**

$$a_0 = a_0, a_1 = a_0 \left( \frac{v}{\mu} + \frac{b_1}{b_0} \right), a_2 = \frac{a_0(\delta b_0 + v b_1)}{\mu b_0}, k = -\frac{\mu b_0}{\sqrt{2\delta a_0}}, w = -\frac{v \mu b_0}{2\delta a_0}. \quad (32)$$

Substituting Eq. (32) into Eq. (10), we get the following trigonometric function solution,

$$u(x,t) = \frac{-v + \sqrt{-v^2 + 4\delta\mu}}{2\delta} \tan \left[ \frac{\sqrt{-v^2 + 4\delta\mu}}{4k\sqrt{\delta}} \left( -\frac{\mu b_0}{\sqrt{2\delta a_0}} x + \frac{v \mu b_0}{2\delta a_0} t - 2\sqrt{\frac{\delta}{2}} \right) \right]. \quad (33)$$

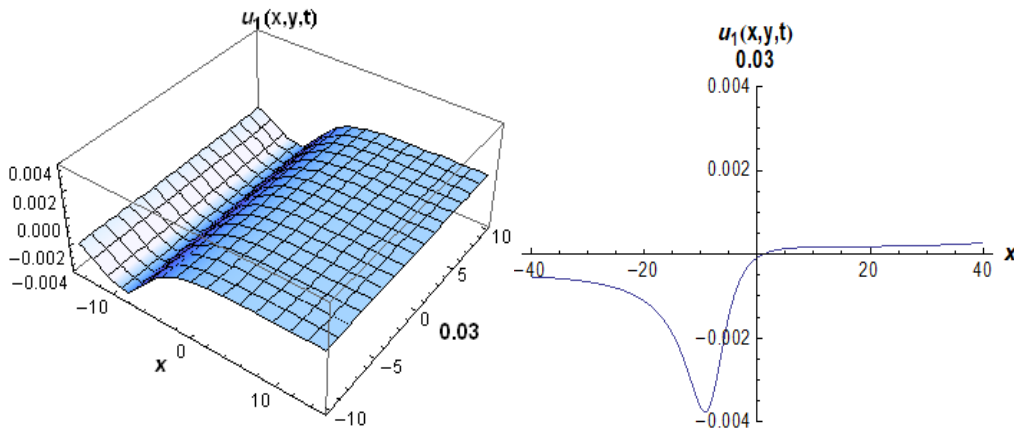


Figure 1. The 3D and 2D surfaces of real values of Eq.(21) for  $a_3 = 0.2, q = 1.3, b_0 = 6, Z_1 = 1, -15 \leq x \leq 15, -10 \leq t \leq 10$  and  $y = 0.01, t = 0.03$  for 2D.

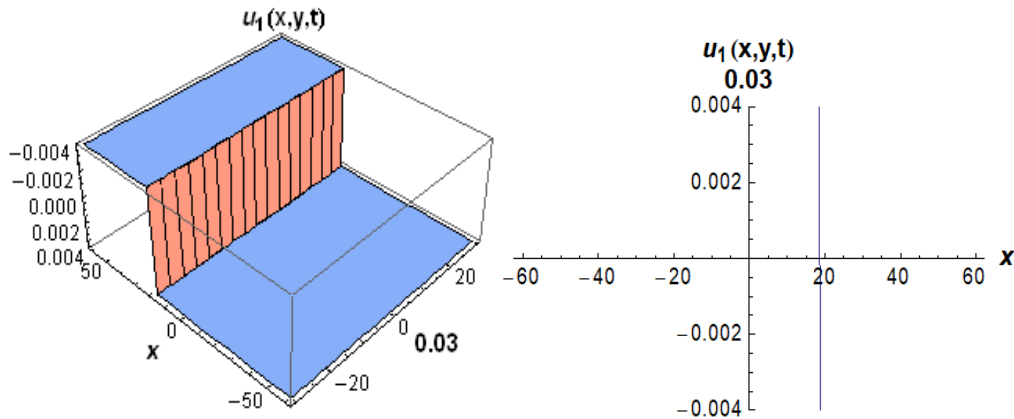


Figure 2. The 3D and 2D surfaces of imaginary values of Eq.(21) for  $a_3 = 3, b_0 = 1, q = 7, Z_1 = 1, -60 \leq x \leq 60, -30 \leq t \leq 30$ , and  $y = 0.05, t = 0.03$  for 2D.

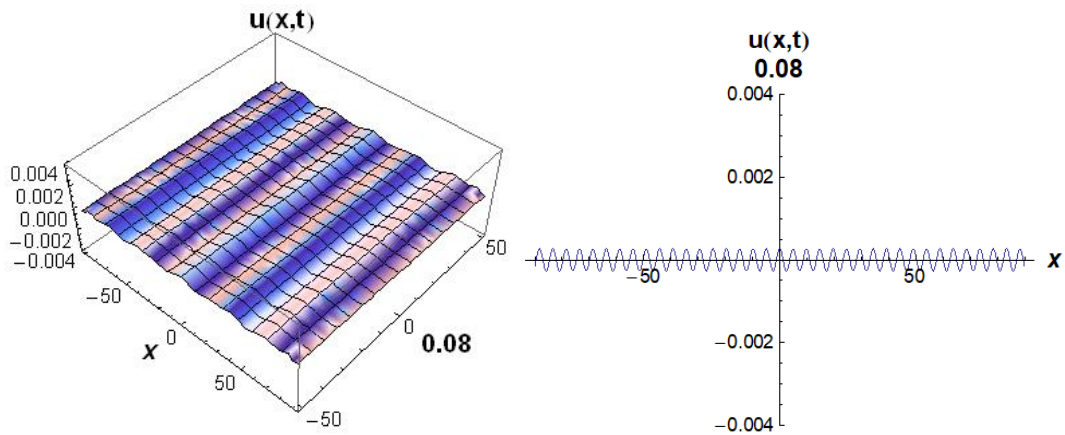


Figure 3. The 3D and 2D surfaces of real values of Eq.(29) for  $\nu=3$ ,  $\delta=-10$ ,  $\mu=5$ ,  $a_1=-7$ ,  $b_0=10$ ,  $k=1$ ,  $-90 \leq x \leq 90$ ,  $-50 \leq t \leq 50$ , and  $t=0.08$  for 2D.

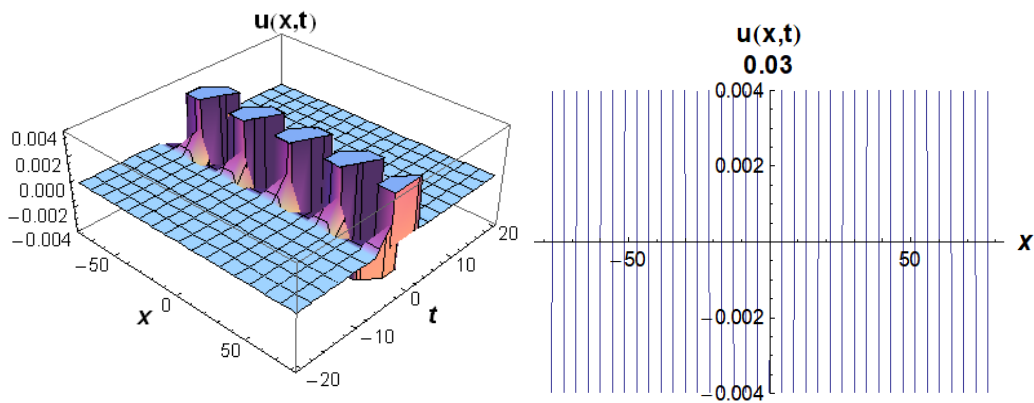


Figure 4. The 3D and 2D surfaces of imaginary values of Eq.(29) for  $a_1=-3$ ,  $b_0=7$ ,  $\nu=2$ ,  $\delta=-5$ ,  $\mu=2$ ,  $k=1$ ,  $-80 \leq x \leq 80$ ,  $-20 \leq t \leq 20$ , and  $t=0.08$  for 2D.

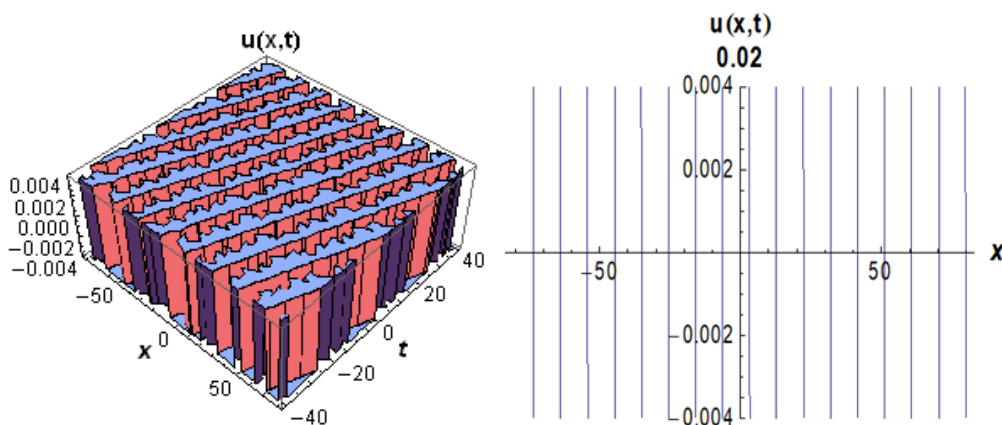


Figure 5. The 3D and 2D surfaces of real values of Eq.(33) for  $a_0=-10$ ,  $b_0=-5$ ,  $\nu=3$ ,  $\delta=8$ ,  $\mu=2$ ,  $k=1$ ,  $-80 \leq x \leq 80$ ,  $-40 \leq t \leq 40$ , and  $t=0.02$  for 2D.

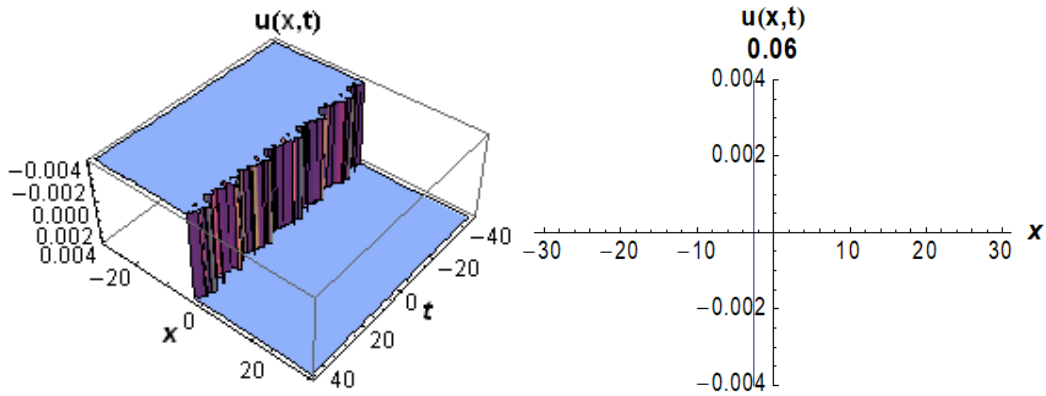


Figure 6. The 3D and 2D surfaces of imaginary values of Eq.(33) for  $a_0 = 7, b_0 = -2, v = -5, \delta = -3, \mu = 9, k = 3, -30 \leq x \leq 30, -45 \leq t \leq 45$ , and  $t = 0.06$  for 2D.

In Figs. 1-2, we plot 3D and 2D surfaces of real and imaginary values of  $u_1(x, y, t)$  in Eq.(21), which explain the vitality of solutions with appropriate parameters. Also, in Figs. 3-4, we draw 3D and 2D surfaces of real and imaginary values of  $u(x, t)$  in Eq.(29), which demonstrate the dynamics of solutions with proper parameters. Finally, in Figs. 5-6, we plot 3D and 2D surfaces of real and imaginary values of  $u(x, t)$  in Eq.(33), which show the vitality of solutions with appropriate parameters.

**Remark**

In this study, travelling wave solutions of Eq. (1) and Eq. (2) are obtained by using MTEM. Also, these solutions were checked in Mathematica 9. The solutions of Eq. (1) are new. Our (33) solution of Eq. (2) is similar to the  $u_5, u_6$ , solutions given by Rouhparvar. According to our research, other solutions of Eq. (2) are not given before and are new.

**5. Conclusions**

In this article, travelling wave solutions of (2+1)-dimensional BKK equation and KPP equation are obtained by using MTEM. Exp-function, trigonometric wave solutions were found by applying this method to the submitted problems. Three and two-dimensional graphs were drawn for appropriate parameters by using Mathematica 9. Physical behaviors were examined by demonstrating three and two dimensional graphics for some values of the parameters. It can be said that MTEM is an effective for finding exact solutions of NLPDEs and it is an important method for obtaining travelling wave solutions. Also, this is a very significant method for solving nonlinear problems.

## References

- [1] Evirgen, F., Yavuz, M., An Alternative Approach for Nonlinear Optimization Problem with Caputo – Fabrizio Derivative, **In ITM Web of Conferences**, 22, EDP Sciences, (2018).
- [2] Sarp, U., Evirgen, F., Ikikardes, S., Applications of differential transformation method to solve systems of ordinary and partial differential equations, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 20, 2, 135-156, (2018).
- [3] Yavuz, M., Sene, N., Approximate solutions of the model describing fluid flow using generalized  $\rho$ -Laplace transform method and heat balance integral method, **Axioms**, 9, 4, 123, (2020).
- [4] Yavuz, M., European option pricing models described by fractional operators with classical and generalized Mittag-Leffler kernels, **Numerical Methods for Partial Differential Equations**, 1-23, (2020).
- [5] Yavuz, M., Abdeljawad, T., Nonlinear regularized long-wave models with a new integral transformation applied to the fractional derivative with power and Mittag-Leffler kernel, **Advances in Difference Equations**, 2020, 367, 2-18, (2020).
- [6] Song, M., Li, S., Cao, J., New Exact Solutions for the (2+1)-Dimensional Broer-Kaup-Kupershmidt Equations, **Abstract and Applied Analysis**, 2010, 9, (2010).
- [7] Gurefe, Y., Sonmezoglu, A., Misirli, E., Application of an Irrational Trial Equation Method to High-Dimensional Nonlinear Evolution Equations, **Journal of Advanced Mathematical Studies**, 5, 2, 41-47, (2012).
- [8] Rouhparvar, H., Travelling Wave Solution of the Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov Equation by the First Integral Method, **Malaysian Mathematical Sciences Society**, 37, 1, 181-190, (2014).
- [9] Feng, J., Li, W., Wan Q., Using (G'/G)-expansion method to seek the traveling wave solution of Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov Equation, **Applied Mathematics and Computation**, 217, 12, 5860-5865, (2011).
- [10] Ma, W. X., Fuchssteiner, B., Explicit and Exact Solutions to a Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov Equation, **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 31, 3, 329-338, (1996).
- [11] Hirota, R., *The Direct Method in Soliton Theory*, Cambridge University Press, 252-253, Cambridge, (2004).
- [12] W. X. Ma, Tiecheng Xia, Pfaffianized systems for a generalized Kadomtsev Petviashvili Equation, **Physica Scripta**, 87, 5, 8, (2013).
- [13] Liu, G. T., Fan, T. Y., New applications of developed Jacobi elliptic function expansion methods, **Physics Letters A**, 345, 1-3, 161–166, (2005).
- [14] Wazwaz, A. M., The tanh method: exact solutions of the sine-Gordon and the sinh-Gordon equations, **Applied Mathematics and Computation**, 167, 2, 1196-1210, (2005).
- [15] Zarea, S. A., The tanh method A tool for solving some mathematical models, **Chaos, Solitons & Fractals**, 41, 2, 979-988, (2009).
- [16] Malfliet, W., Hereman, W., The tanh method Exact solutions of nonlinear evolution and wave equations, **Physica Scripta**, 54, 6, 563-568, (1996).
- [17] Irshad, A., Mohyud-Din, S.T., Ahmed, N., Khan, U., A New Modification in Simple Equation Method and its applications on nonlinear equations of physical nature, **Results in Physics**, 7, 2017, 4232-4240, (2017).
- [18] Tuluçe Demiray, S., Pandir, Y., Bulut, H., Generalized Kudryashov Method for Time-Fractional Differential Equation, **Abstract and Applied Analysis**, 6, 1-13, (2014).

- [19] Mahmud, F., Samsuzzoha, Md., Akbar, M.A., The Generalized Kudryashov Method to obtain exact traveling wave solutions of the PHI-four Equation and the Fisher Equation, **Results in Physics**, 7, 4296-4302, (2017).
- [20] Tuluce Demiray, S., Bulut, H., Generalized Kudryashov method for nonlinear fractional double sinh–Poisson Equation, **Journal of Nonlinear Science and Applications**, 9, 3, 1349-1355, (2016).
- [21] Habib, M. A., Shahadat Ali, H.M., Miah, M., Akbar, M.A., The generalized Kudryashov method for new closed form traveling wave solutions to some NLEEs, **Aims Mathematics**, 4, 3, 896–909, (2019).
- [22] Gurefe, Y., Misirli, E., Exp-function method for solving nonlinear evolution equations with higher order nonlinearity, **Computers and Mathematics with Applications**, 61, 8, 2025-2030, (2011).
- [23] Naher, H., Abdullah , F.A., Akbar, M. A., The Exp-function Method for new exact solutions of the nonlinear partial differantial equations, **International Journal of the Physical Sciences**, 6, 29, 6706-6716, (2011).
- [24] Fan, E., Hongqing, Z., A note on the homogenous balance method, **Physics Letters**, 246, 5, 403-406, (1998).
- [25] Abdelsalam, U. M., Ghazal, M. G. M., Analytical Wave Solutions for Foam and KdV-Burgers Equations Using Extended Homogeneous Balance Method, **Mathematics**, 7, 8, 1-12, (2019).
- [26] Injrou, S., New exact Solutions for Generalized Fitzhug-Nagumo Equation by Homogeneous balance Method, **Journal for Research and Scientific Studies**, 37, 4, 57-65, (2015).
- [27] Bulut, H., Pandir, Y., Baskonus, H.M., The Modified Trial Equation Method for Fractional Wave Equation and Time Fractional Generalized Burgers Equation, **Abstract and Applied Analysis**, 2013, 8, (2013).

# Cibacron Blue F3GA ile modifiye polimerik mikroküreler ile RuBisCO adsorpsiyonu

Bilgen OSMAN<sup>1,\*</sup>, Asuman CANSEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Bursa

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Bursa

Geliş Tarihi (Received Date): 18.01.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.03.2021

## Öz

Bu çalışmada, Cibacron Blue F3GA (CB) ile modifiye edilmiş poli(hidroketil metakrilat) [PHEMA] mikroküreler hazırlandı ve ribuloz-1,5-bisfosfat karboksilaz/oksijenaz (RuBisCO) adsorpsiyonunda kullanıldı. PHEMA mikroküreler süspanسیون polimerizasyonu tekniği ile sentezlendi ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve Fourier transform infrared spektroskopisi (FTIR) ile karakterize edildi. CB ile kovalent olarak modifiye edilen CB-PHEMA mikroküreler RuBisCO adsorpsiyonunda kullanıldı. Adsorpsiyona CB içeriği, başlangıç RuBisCO derişimi (0,2-1.0 mg/mL), pH (5,5-9.0), sıcaklık (4°C, 22 °C ve 35°C) ve temas süresinin etkisi araştırıldı. CB-PHEMA mikrokürelerin CB içeriği elementel analiz ile belirlenen %N miktarı kullanılarak hesaplandı. CB-PHEMA mikrokürelere adsorplanan maksimum RuBisCO miktarı 33,59 mg/g olarak belirlendi (22 °C, pH 6,0). Üç farklı sıcaklıkta (4°C, 22 °C ve 35°C) elde edilen RuBisCO adsorpsiyon verilerinin izoterm ve kinetik modellere uygunluğu araştırıldı. RuBisCO adsorpsiyon verilerinin Freundlich izoterm modeli ve yalancı-ikinci derece kinetik modele uygun olduğu belirlendi. RuBisCO adsorpsiyonuna ilişkin Gibbs serbest enerji değişimi ( $\Delta G^\circ$ ) değerleri; 4 °C, 22 °C ve 35 °C sıcaklık için sırasıyla -9,22 kJ/mol, -10,44 kJ/mol ve -11,33 kJ/mol olarak hesaplandı. Entalpi değişimi ( $\Delta H^\circ$ ) +9,661 kJ/mol ve entropi değişimi ( $\Delta S^\circ$ ) +68,14 J/mol.K olarak belirlendi. Termodinamik parametreler, CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonunun endotermik ve kendiliğinden gerçekleşen bir proses olduğunu kanıtladı. CB-PHEMA mikrokürelerin ispanak protein ekstraktından RuBisCO adsorpsiyon performansı SDS-PAGE analizi ile değerlendirildi.

**Anahtar kelimeler:** RuBisCO, adsorpsiyon, Cibacron blue F3GA, bitki proteom analizi.

\* Bilgen OSMAN, bilgeno@uludag.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8406-149X>  
Asuman CANSEV, auslu@uludag.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3353-846X>



## RuBisCO adsorption via polymeric microbeads modified with Cibacron Blue F3GA

### Abstract

*In this study, poly(hydroxyethyl methacrylate) [PHEMA] microbeads modified with Cibacron Blue F3GA (CB) were prepared and used for the adsorption of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (RuBisCO). PHEMA microbeads were synthesized by suspension polymerization and characterized by scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Then, CB modified CB-PHEMA microbeads were used for RuBisCO adsorption. Effects of CB content, initial RuBisCO concentration (0.2-1.0 mg/mL), pH (5.5-9.0), temperature (4 °C, 22 °C and 35°C) and contact time were investigated. The CB amount of the CB-PHEMA microbeads was calculated via N% determined by elemental analysis. The maximum RuBisCO amount adsorbed onto the CB-PHEMA microbeads was determined as 33.59 mg/g (22 °C, pH 6.0). The RuBisCO adsorption data obtained at three different temperatures (4°C, 22 °C and 35°C) were applied to isotherm and kinetic models. Freundlich isotherm model and pseudo-second order kinetic model were well fitted to adsorption data with high correlation coefficients. Gibbs free energy changes ( $\Delta G^\circ$ ) of RuBisCO adsorption for 4 °C, 22 °C and 35 °C were calculated as -9.22 kJ/mol, -10.44 kJ/mol and -11.33 kJ/mol, respectively. Enthalpy change ( $\Delta H^\circ$ ) was +9.661 kJ/mol and entropy change ( $\Delta S^\circ$ ) was +68.14 J/mol.K. The calculated thermodynamic parameters showed that RuBisCO adsorption onto CB-PHEMA microbeads was endothermic and spontaneous. The RuBisCO adsorption performance of CB-PHEMA microbeads from spinach protein extract was evaluated by SDS-PAGE analysis.*

**Keywords:** RuBisCO, adsorption, Cibacron blue F3GA, plant proteomics.

### 1. Giriş

Proteom analizi; bitkilerdeki gelişimsel değişmelerin, biyotik ve abiyotik stresin etkilerinin, hormonların rolünün belirlenmesi gibi araştırmalarda farklılaşan proteinlerin tespitinde kullanılır. Günümüzde iki boyutlu (2D) jel elektroforezi bitkilerin kompleks proteomlarının analizinde sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir [1]. Bitkilerde proteom analizi; model bitki türleri, organeller ve stress fizyolojisi, üreme ve sinyal gibi bitki yaşam döngüsü ile ilgili spesifik olaylara ışık tutmaktadır. Ancak, 2D jel elektroforezi ile bitki proteinlerinin ayrılmasında ve protein spotlarının belirlenmesinde biyolojik örneklerde bulunan yüksek bolluklu proteinlerin interferans etki yaptığı rapor edilmektedir [2]. Proteom analizinde bitki dokuları ile insan dokuları karşılaştırıldığında bitki dokuları ile ilgili ilave problemlerin olduğu görülmektedir. İlk olarak, farklılaşmış bitki hücrelerinde büyük vakuoller ve rijid hücre duvarları nedeniyle çözünür protein miktarı düşüktür [3]. Ayrıca bitki hücreleri proteaz enzimlerince zengindir ve bu nedenle ekstraksiyon prosedürleri özel önlemler gerektirebilmektedir [4]. Polisakkaritler, lipidler, polifenoller ve ikincil metabolitler gibi bitkilere özgü hücresel bileşenler de proteinlerin ayrılmasında ve analizinde girişim etkisi yapmaktadır [5]. Bu alandaki temel zorluklar proteinlerin fizikokimyasal özelliklerindeki heterojenite ve protein derişimindeki farklılıklardır [6]. Kaynağa bağlı olarak, bitki proteomundaki dinamik aralık  $10^7$ - $10^{12}$  kadardır ve günümüzdeki proteomik platformlar ile sadece küçük

bir dinamik aralıktaki proteinler aynı anda analiz edilebilmektedir [7]. Bitki türüne bağlı olarak, toplam yaprak proteinlerinin yaklaşık % 30-60'ını oluşturan ribuloz-1,5-bisfosfat karboksilaz/oksijenaz (RuBisCO), bitki proteom çalışmalarında tüm 2D jellerde en sık tanımlanan proteindir ve düşük bolluklu proteinlerin görüntülenmesini engellemektedir [8]. Yüksek bolluklu RuBisCO proteininin varlığı, 2D jelde yalnızca düşük bolluktaki proteinlerin dinamik çözünürlüğünü ve verimini sınırlamakla kalmayıp aynı zamanda komşu protein türlerinin elektroforetik göçünü de etkilemektedir. Bu nedenle proteom analizi öncesi RuBisCO'nun uzaklaştırılması, proteom analizinde düşük derişimli proteinlerin belirlenmesi açısından son derece önemlidir. RuBisCO proteininin varlığından kaynaklanan girişim etkisi ile ilgili problem bugüne kadar çok az sayıda araştırmacı tarafından ele alınmıştır. RuBisCO proteininin proteomdan uzaklaştırılması için birçok çalışmada sıklıkla PEG (polietilen glikol) ile çöktürme [9,10] ve RuBisCO proteinine özgü IgY anti-RuBisCO içeren afinite kolonların kullanılması gibi yaklaşımlardan yararlanılmaktadır [11]. IgY anti-RuBisCO içeren afinite kolonların avantajı kolonun RuBisCO proteini için seçiciliğinin yüksek olmasıdır. Fakat afinite kolonları maliyetlidir ve aynı zamanda IgY anti-RuBisCO biyolojik bir ligand olduğundan raf ömrü kısa, üretilmesi oldukça zor ve kararsızdır.

Boya ligandları farklı türdeki proteinlere, özellikle enzimlere bazı durumlarda oldukça spesifik bir şekilde bağlanabilmektedir. Ayrıca boya ligandları ticari olarak üretilmektedir, ucuzdur ve özellikle hidroksil grubu içeren adsorbanlara kolayca immobilize edilebilmektedir. Boya ligandları sentetik olmalarına karşın, birçok proteinin aktif bölgesi ile proteinin substratlarını, kofaktörlerini ya da bağlanma ajanlarını taklit ederek etkileştikleri için afinite ligandı olarak adlandırılırlar. Reaktif boyalar olarak adlandırılan çok sayıda tekstil boyası, boya ligand afinite sistemlerinde proteinlerin ayrılması için kullanılır. Reaktif boyaların büyük bir çoğunluğu genellikle mono- yada diklorotriazin halkasına bağlı bir kromofor (azo boyaları, antrakınon ya da fitalosiyanın) içerir [12]. Boya ligand afinite, reaktif boyaların proteinlere seçici ve geri dönüşümlü bir şekilde bağlanabilme özelliğine dayanır [12,13]. Cibacron Blue F3GA (CB) boya ligandı ilk kez Sefadex G-200 üzerine immobilize edilerek mayadan piruvat kinazın saflaştırılmasında kullanılmıştır [14]. Daha sonra bu yaklaşım, CB immobilize edilmiş farklı adsorbanların kullanılması ile çok sayıda proteinin saflaştırılmasında kullanılmıştır [15,16,17]. Birçok boya ligandının, özellikle de CB ve analoglarının bazı oksidoredüktazlar, fosfokinazlar ve ATPazlar ile etkileşimleri araştırılmıştır [18,19]. Elde edilen sonuçlar, boya yapısındaki antrakınon ve benzen sülfonat halkalarının enzimlere bağlanmada önemli olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmalar boyaların kinazlar ve dehidrojenazlar gibi nükleotid kofaktörleri kullanan enzim ve proteinlere daha seçici bir şekilde bağlandığını göstermektedir. Ancak CB, insan serum albumin [20,21], lizozim [22] ve interferon [23] gibi dinükleotid bağlama bölgeleri olmayan proteinlere de yüksek bir afinite ile bağlanmaktadır. Boyaların proteinlere bağlanması elektrostatik ve hidrofobik etkileşimler ile ya da daha spesifik bir şekilde ligand bağlanma bölgeleri ile "psedoafinite" etkileşimleri aracılığı ile gerçekleşmektedir.

Bu çalışmada, CB boyasının ligand olarak kullanıldığı bir afinite materyalinin bitkilerde yüksek bolluklu protein olduğu bilinen RuBisCO adsorpsiyonundaki etkinliği araştırıldı. Bu amaçla, ilk olarak poli(hidroksietil metakrilat) [PHEMA] mikroküreler sentezlendi. PHEMA mikroküreler CB boya ligandının kovalent olarak bağlanmasıyla modifiye edilerek CB-PHEMA mikroküreler hazırlandı. Hazırlanan CB-PHEMA mikroküreler ile sulu çözeltiden RuBisCO adsorpsiyon çalışmaları yapıldı. RuBisCO adsorpsiyonuna boya ligand (CB) miktarı, pH, başlangıç RuBisCO derişimi, temas süresi ve sıcaklığın

etkisi araştırıldı. İzotermal, kinetik ve termodinamik analizler ile adsorpsiyon olayının fizikokimyasal doğası aydınlatıldı. Ayrıca, hazırlanan CB-PHEMA mikrokürelerin RuBisCO adsorpsiyonundaki tekrar kullanılabilirliği incelendi. Maksimum adsorpsiyonun gerçekleştiği koşullarda, CB-PHEMA mikrokürelerin ıspanaktan elde protein karışımından RuBisCO uzaklaştırma etkinliği sodyum dodesil sülfat poliakrilamid jel elektroforezi (SDS-PAGE) tekniği ile belirlendi.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Malzemeler

İspanak RuBisCO enzimi (EC 4.1.1.39) ve Cibacron Blue F3GA (CB) Sigma firmasından temin edildi (St. Louis, USA). Hidroksietil metakrilat (HEMA) ve etilen glikol dimetakrilat (EGDMA) Fluka firmasından satın alındı. Azobisisobütironitril (AIBN) Merck firmasından temin edildi. Askorbik asit, aseton, gliserol, hidroklorik asit, izopropanol, polivinilpolipirrolidon (PVPP), fenilmetilsülfonil florür (PMSF),  $\beta$ -merkaptotanol, sodyum tetraborat, triklorasetik asit (TCA), Trizma® baz, Trizma® hidroklorür ve Brilliant blue G Sigma firmasından temin edildi (St. Louis, USA). Protein boyası, sığır serum albumin (BSA), sodyum dodesil sülfat (SDS), akrilamid/bis-29:1, amonyum persülfat (APS), tetrametiletildiamin (TEMED), SDS-PAGE molekül ağırlığı standartları ve Tris/Glisin/SDS tamponu Bio-Rad firmasından satın alındı (California, USA). Deneysel kullanımlar için ultra saf su Elga Flex3 (Veloia Water Solutions & Technologies, France) saf su cihazı ile hazırlandı.

### 2.2. PHEMA mikrokürelerin sentezi ve karakterizasyonu

PHEMA mikroküreler süspansiyon polimerizasyonu tekniği ile sentezlendi [22]. Dispersiyon fazı, 50 mL saf su içerisinde 0,2 g polivinilalkolün (PVA) çözünmesi ile hazırlandı. Organik fazın hazırlanması için; HEMA (4 mL) ve çapraz bağlayıcı EGDMA (4 mL), 8 mL toluen içerisinde çözüldü ve 0,1 g AIBN (başlatıcı) karışımın içerisine ilave edildi. Organik faz, sulu faz içerisinde dağıtılarak 400 rpm karıştırma hızında polimerizasyon reaktöründe karıştırıldı. Polimerizasyon karışımı reaktör içerisinde 65 °C 'de 4 saat ve 80 °C'de 2 saat süre ile polimerleştirildi. Elde edilen PHEMA mikroküreler, etil alkol ve saf su ile yıkanarak reaksiyona girmeyen monomerler uzaklaştırıldı. Elde edilen mikroküreler vakum etüvünde 50 °C'de kurutuldu. Optik profilometre (Zeta Instruments) analizleri ile PHEMA mikrokürelerin düzgün küreler şeklinde olduğu tespit edildi. PHEMA mikroküreler 53-106  $\mu$ m çap aralığında elenerek daha sonraki çalışmalarda kullanıldı. Mikrokürelerin kimyasal yapı analizi için Fourier transform infrared spektroskopisi (FTIR) (Perkin Elmer, Spectrum 100, USA) ve morfolojik analizi için taramalı elektron mikroskopisi (SEM) (CARL ZEISS EVO 40) tekniği kullanıldı.

### 2.3. CB-PHEMA mikrokürelerin hazırlanması

4,0 g NaOH içeren 100 mL NaOH çözeltisine CB boya ligandı eklendi. Ardından 3,0 g PHEMA mikroküre çözeltiye ilave edilerek 80 °C sıcaklıkta çalkalamalı su banyosunda 4 saat karıştırıldı [22]. CB boya ligandı ile modifiye edilen PHEMA mikroküreler santrifüjlenerek (5000 rpm, 15 dakika) ortamdaki ayrıldı ve etanol ve saf su ile yıkandı. Uygulanan yöntemde; CB derişimi 0,5-5,0 mg/mL aralığında değiştirilerek farklı CB içeriklerine sahip yedi farklı CB-PHEMA mikroküre hazırlandı. Hazırlanan CB-PHEMA mikroküreler 50 °C sıcaklıkta etüvde kurutuldu. CB-PHEMA mikrokürelerin %N içeriği elementel analiz ile belirlendi (Leco, CHNS-932, USA). %N miktarları

kullanılarak PHEMA mikrokürelere bağlanan CB miktarları mg CB/ g mikroküre olarak hesaplandı.

#### **2.4. RuBisCO adsorpsiyonuna CB miktarının etkisi**

Farklı CB içeriklerine sahip CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonu için kullanıldı. 0,05 g CB-PHEMA mikroküre, 3 mL 0,3 mg/mL RuBisCO çözeltisine (pH 8,0, 0,1 M fosfat tamponu) ilave edilerek 200 rpm karıştırma hızında oda sıcaklığında 24 saat karıştırıldı. PHEMA mikrokürelere de aynı koşullar altında RuBisCO adsorpsiyonunda kullanıldı. Adsorpsiyon öncesi ve sonrası RuBisCO çözeltilerindeki protein miktarı 280 nm dalga boyunda absorbans ölçümleri ile UV spektrofotometre (Shimadzu, UV-1700) ile belirlendi. CB-PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı Eşitlik (1) kullanılarak hesaplandı.

$$Q = \frac{[(C_0 - C)V]}{m} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de; Q mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı (mg RuBisCO/g mikroküre), C<sub>0</sub> ve C sırasıyla adsorpsiyon öncesi ve sonrası çözeltideki RuBisCO derişimi (mg/mL), V çözeltinin hacmi (mL) ve m mikroküre miktarıdır (g).

#### **2.5. pH etkisi**

RuBisCO adsorpsiyonuna pH etkisinin araştırılması için, pH 5,5 ile 9,0 aralığında 0,1M fosfat tamponları (PB) kullanılarak hazırlanan RuBisCO çözeltileri (3 mL, 0,15 mg/mL) 0,05 g CB-PHEMA mikroküre ile oda sıcaklığında 24 saat inkübe edildi (Karıştırma hızı: 200 rpm). Farklı pH değerlerine sahip RuBisCO çözeltilerinden adsorplanan RuBisCO miktarı Eşitlik (1) kullanılarak hesaplandı.

#### **2.6 Başlangıç RuBisCO derişiminin etkisi**

RuBisCO adsorpsiyonuna başlangıç derişiminin etkisi 0,2 mg/mL-1,0 mg/mL RuBisCO derişim aralığında incelendi (pH 6,0). Bu amaçla, 0,05 g CB-PHEMA mikroküre 3 mL RuBisCO çözeltisi ile oda sıcaklığında 24 saat süre ile inkübe edildi. Adsorpsiyon çalışmaları üç farklı sıcaklıkta (4°C, 22 °C ve 35°C) gerçekleştirildi. PHEMA mikrokürelere ile RuBisCO adsorpsiyonu ise aynı RuBisCO derişim aralığında (0,2 mg/mL-1,0 mg/mL) 22 °C'de gerçekleştirildi. CB-PHEMA ve PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı Eşitlik (1) kullanılarak hesaplandı.

#### **2.7. Temas süresinin etkisi**

Temas süresinin adsorplanan RuBisCO miktarına etkisi üç farklı sıcaklıkta (4°C, 22 °C ve 35°C) araştırıldı. Bu amaçla; 30 mL RuBisCO çözeltisi (0,8 mg/mL, pH 6,0), 0,5 g CB-PHEMA mikroküre ile inkübe edildi. 24 saat süre ile belirli zaman aralıklarında RuBisCO çözeltisinden örnek alındı. Örneklerdeki RuBisCO derişimi spektrofotometrik olarak belirlenerek CB-PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı hesaplandı.

#### **2.8. CB-PHEMA mikrokürelere tekrar kullanılabilirliği**

CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonundaki tekrar kullanılabilirliğini araştırmak için RuBisCO adsorpsiyon/desorpsiyon döngüsü 6 kez tekrarlandı. CB-PHEMA mikrokürelere (0,05 g), 3 mL 0,4 mg/mL RuBisCO çözeltisi (pH 6,0) ile 24 saat inkübe edildi. Adsorpsiyon sonrası CB-PHEMA mikrokürelere ortamdan ayrıldı ve 0,1 M fosfat tamponu (pH 6,0) ile 3 kez yıkandı. Desorpsiyon 1 M etilen glikol çözeltisi (3

mL) kullanılarak gerçekleştirildi. Desorpsiyonun ardından mikroküreler fosfat tamponu (pH 6.0) ile yıkandı ve aynı koşullarda tekrar RuBisCO adsorpsiyonunda kullanıldı.

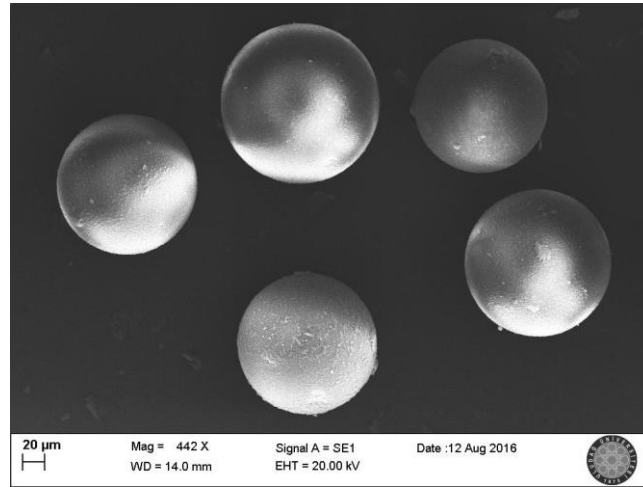
### 2.9. SDS-PAGE analizi

CB-PHEMA mikrokürelerin RuBisCO adsorpsiyonundaki etkinliği SDS-PAGE analizleri ile takip edildi. Bu amaçla; saf RuBisCO içeren çözeltiler ve ıspanak protein ekstraktı kullanıldı. Ispanak proteinlerinin ekstraksiyonu için uygulanan yöntemde; 1mM PMSF ve 1%  $\beta$ -merkaptoetanol (w/v) içeren borat tamponu (pH 6,0) ekstraksiyon tamponu olarak kullanıldı. Ispanak örneği, ekstraksiyon tamponu ve PVPP; 1:3:0,35 oranında karıştırıldı. Hazırlanan homojenat 90 dakika süre ile 4 °C'de santrifüjlendi (26.000 g, BeckmanCoulter, Allegra 64R). Süpernatant sırasıyla 0,45  $\mu$ m ve 0,22  $\mu$ m gözenek çapına sahip PVDF filtreden geçirildi. Taze hazırlanmış protein ekstraktı (3 mL, pH 6,0) ve saf RuBisCO çözeltisi (1 mg/mL, 3 mL, pH 6,0), 4 °C sıcaklıkta 24 saat süre ile CB-PHEMA mikroküreler ile inkübe edildi. Ardından mikroküreler santrifüjlenerek ortamdan ayrıldı (5000 g, 30 dakika). CB-PHEMA ve PHEMA mikrokürelerin saf RuBisCO çözeltilerinden ve/veya ıspanak protein ekstraktından RuBisCO adsorpsiyon etkinliği SDS-PAGE ile dikey jel sistemi (Biorad, Miniprotean 3 Cell, USA) kullanılarak araştırıldı. Bu amaçla, adsorpsiyon öncesi ve sonrası saf RuBisCO çözeltilerinden ve ıspanak protein ekstraktından alınan protein örnekleri SDS-PAGE jellere yüklendi. Jele yüklenen örneklerdeki protein miktarı Bradford metodu ile belirlendi. Elektroferez işleminin ardından jeldeki proteinler % 12 (v/v) TCA ile sabitlendi ve protein bantları Comassie Brilliant Blue G-250 boyama ile görüntüldü.

## 3. Sonuçlar ve tartışma

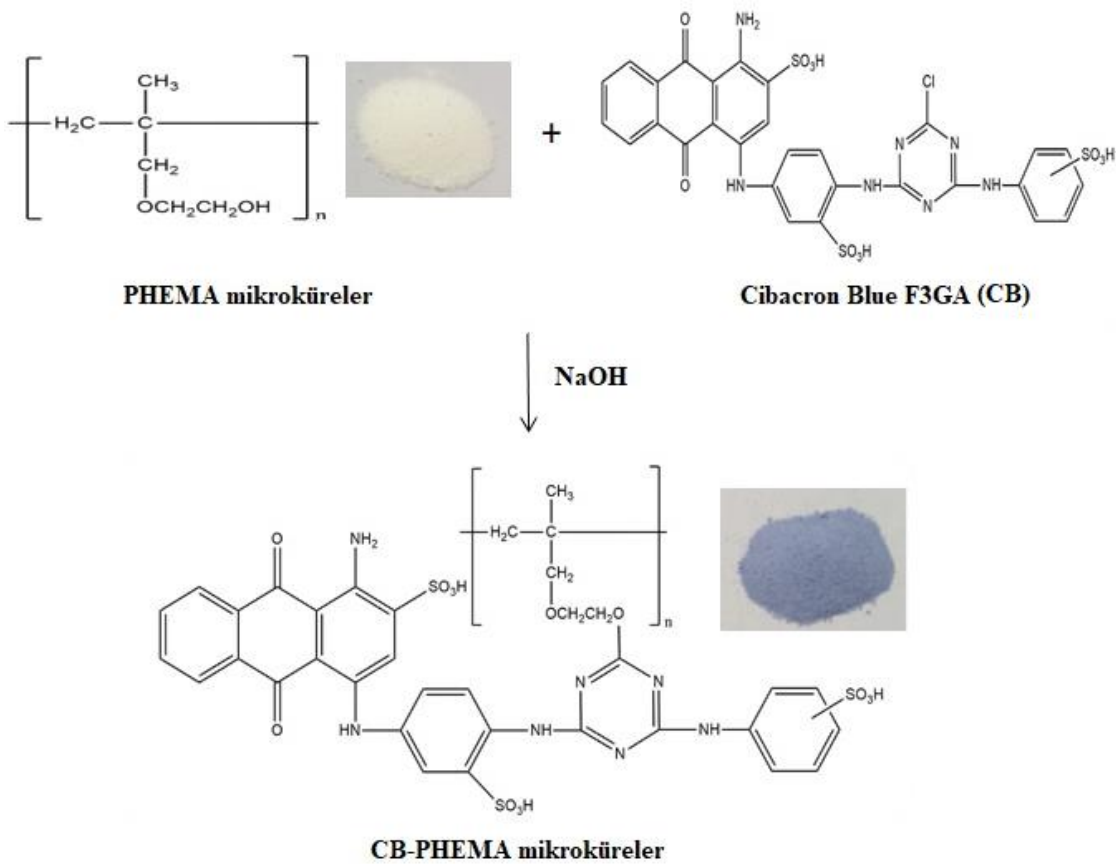
### 3.1. Mikrokürelerin kimyasal ve morfolojik özellikleri

PHEMA mikrokürelerin morfolojisi SEM ile karakterize edildi. Elde edilen SEM fotoğrafları uygulanan süspansiyon polimerizasyonu tekniği ile küresel formda PHEMA mikrokürelerin başarıyla sentezlendiğini kanıtladı (Şekil 1). SEM analizleri PHEMA mikrokürelerin pürüzlü bir yüzeye sahip olduğunu gösterdi. Yüzey pürüzlüğü, yüzey alanını arttırdığı için adsorpsiyon kapasitesini olumlu yönde etkileyen bir parametredir.



Şekil 1. PHEMA mikrokürelerin SEM fotoğrafı.

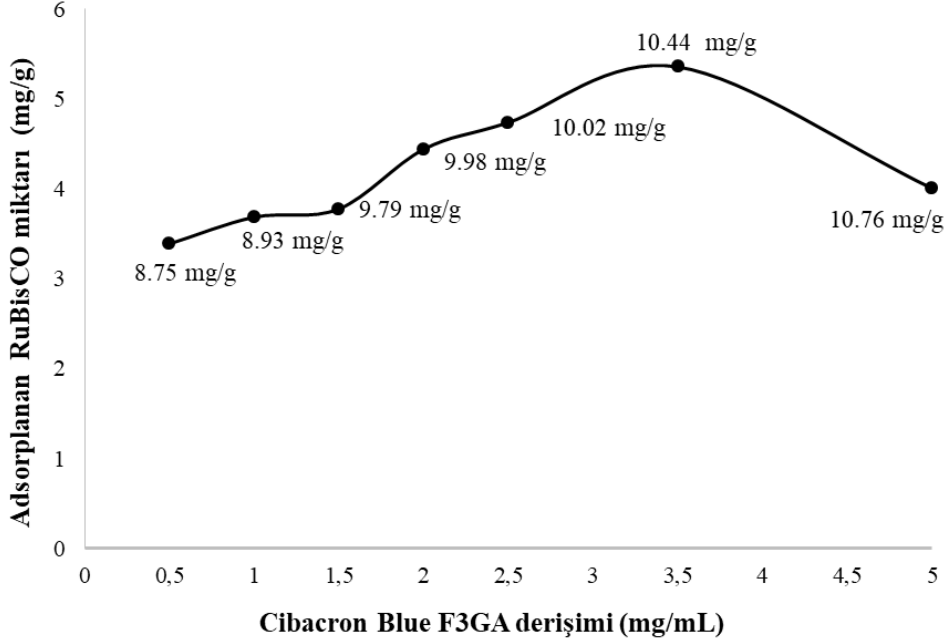
CB-PHEMA mikrokürelere, CB moleküllerinin PHEMA mikrokürelere kovalent olarak bağlanması ile hazırlandı (Şekil 2). CB-PHEMA ve PHEMA mikrokürelere ait kimyasal yapıları FTIR analizi ile belirlendi. PHEMA mikrokürelere ait FTIR spektrumunda; 1716  $\text{cm}^{-1}$  ve 1146  $\text{cm}^{-1}$  'de sırasıyla C=O ve C-O (ester) gerilme titreşimlerine ait absorpsiyon bandları gözlemlendi. 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$  frekans aralığında gözlenen absorpsiyon bandı hidroksil gruplarına (-OH) aittir. CB-PHEMA mikrokürelere ait FTIR spektrumunda 1022  $\text{cm}^{-1}$  frekans değerinde ortaya çıkan absorpsiyon bandı, PHEMA mikrokürelere kovalent olarak bağlanan CB moleküllerindeki S=O simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklandı. Ayrıca, 849  $\text{cm}^{-1}$  and 897  $\text{cm}^{-1}$ 'de sırasıyla CB molekülünün primer ve sekonder amin gruplarına ait absorpsiyon bandları gözlemlendi. CB-PHEMA mikrokürelere ait FTIR spektrumunda gözlenen ve CB molekülünün varlığından kaynaklanan absorpsiyon bandları kovalent modifikasyonun başarıyla gerçekleştiğini kanıtladı.



Şekil 2. PHEMA mikrokürelere CB ile modifikasyonunun şematik gösterimi.

PHEMA mikrokürelere modifikasyonunda kullanılan CB çözeltisinin derişimi 0,5 ile 5,0  $\text{mg/mL}$  aralığında değiştirilerek, değişen CB içeriklerine sahip yedi adet farklı CB-PHEMA mikroküre hazırlandı. Mikrokürelere CB içerikleri elementel analiz sonucu belirlenen % N miktarları kullanılarak hesaplandı ve CB-PHEMA mikrokürelere sulu çözeltiden RuBisCO adsorpsiyonunda kullanıldı. CB-PHEMA mikrokürelere CB içerikleri 8,75  $\text{mg CB/g}$  mikroküre (0,5  $\text{mg/mL}$  derişimde CB çözeltisi ile hazırlanan) ile 10,76  $\text{mg/g}$  mikroküre (5,0  $\text{mg/mL}$  derişimde CB çözeltisi ile hazırlanan) aralığında değiştirdi. Şekil 3'de CB içeriğinin CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyon kapasitesine etkisi gösterildi. Elde edilen sonuçlara göre; CB-PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı, artan CB içeriği ile arttı. Maksimum RuBisCO

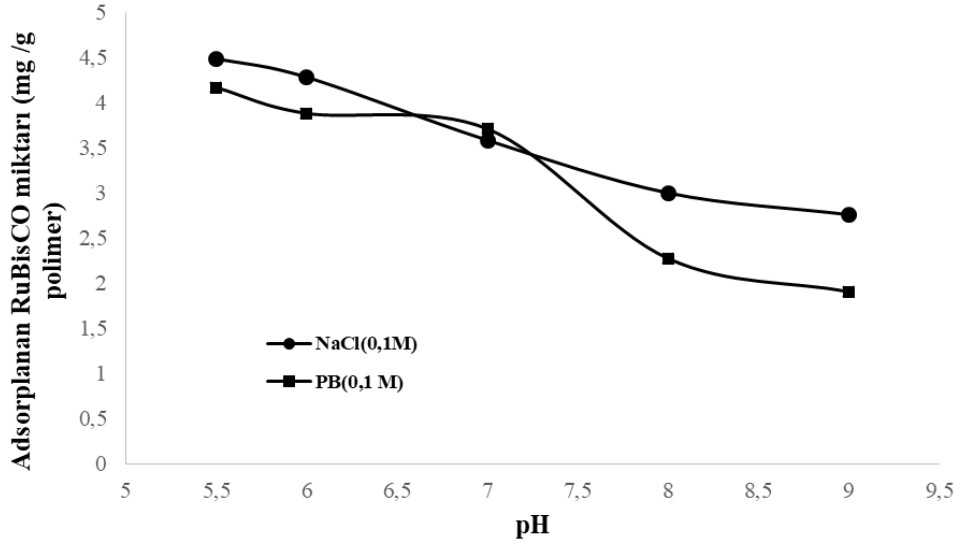
adsorpsiyonu 3,5 mg/mL derişiminde CB kullanılarak hazırlanan (10,44 mg CB /g mikroküre) CB-PHEMA mikroküreler ile elde edildi. Daha yüksek CB içeriğine sahip CB-PHEMA mikroküreler (10,76 mg CB/g mikroküre) ile adsorplanan RuBisCO miktarı dikkate değer ölçüde azaldı. Bu sonuç; PHEMA mikrokürelerin yüzeyine immobilize edilen CB moleküllerinin miktarı arttıkça, CB moleküllerinin kendi aralarındaki etkileşimin de arttığını ve bu nedenle adsorplanan protein miktarının azalmış olabileceğini düşündürdü. RuBisCO adsorpsiyon çalışmaları için en yüksek RuBisCO adsorpsiyon kapasitesine sahip CB-PHEMA mikroküreler (10,44 mg CB / g polimer) kullanıldı.



Şekil 3. CB içeriğinin CB-PHEMA mikroküreler üzerine RuBisCO adsorpsiyonuna etkisi (Başlangıç RuBisCO derişimi: 0,3 mg/mL; CB-PHEMA mikroküre miktarı: 0,05 g ; çözelti hacmi : 3 mL; pH: 8,0; sıcaklık : 22 °C; adsorpsiyon süresi : 24 saat).

### 3.2. Adsorpsiyon çalışmaları pH etkisi

Protein moleküllerinin ve/veya adsorbanın yükünü etkilediği için, ortamın pH değeri adsorpsiyon çalışmalarında önemli bir parametredir. RuBisCO proteini ve CB molekülü farklı pH değerlerinde farklı yükler taşımaktadır. Ortamın pH değerinin CB-PHEMA mikroküreler üzerine adsorplanan RuBisCO miktarına etkisi Şekil 4'te gösterildi. RuBisCO 5,5'ten daha küçük pH değerlerinde çözünür olmadığı için, adsorpsiyon çalışmaları fosfat tamponları (0,1 M) kullanılarak hazırlanan RuBisCO çözeltileri ile pH 5,5-9,0 aralığında gerçekleştirildi. Ayrıca RuBisCO çözeltilerine (pH 5,5-9,0) derişimi 0,1 M olacak şekilde NaCl eklenerek RuBisCO adsorpsiyonuna iyonik şiddetin etkisi araştırıldı.



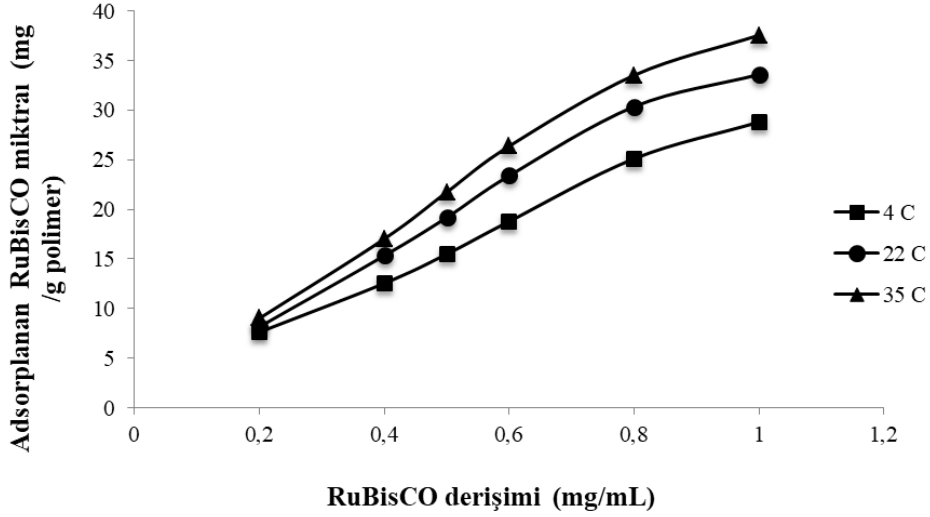
Şekil 4. pH değerinin CB-PHEMA mikrokürelere üzerine RuBisCO adsorpsiyonuna etkisi (Başlangıç RuBisCO derişimi: 0,15 mg/mL; CB-PHEMA mikroküre miktarı: 0,05 g ; çözelti hacmi : 3 mL, sıcaklık : 22 °C, adsorpsiyon süresi : 24 saat).

Şekil 4'te görüldüğü gibi ortamın pH değeri arttıkça adsorplanan RuBisCO miktarı dikkate değer ölçüde azaldı. RuBisCO'nun izoelektrik noktası (pI) 5,5-6,0'dır [24] ve izoelektrik noktada RuBisCO proteininin net yükü sıfırdır. 6,0'dan büyük pH değerlerinde ise RuBisCO net bir negatif yüke sahiptir. CB molekülleri de yapısında yer alan sülfonat grupları nedeniyle negatif yüke sahiptir. Dolayısıyla, pH 5,5 ile 9,0 arasında negatif yük taşıyan CB ve RuBisCO arasında elektrostatik bir itme söz konusudur. Bu nedenle, pH arttıkça CB-PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarının azaldığı düşünülmektedir. RuBisCO çözeltilerine NaCl ilave edilmesi ile tüm pH değerlerinde adsorplanan RuBisCO miktarında bir miktar artış gözlemlendi. Bu sonuç, Na<sup>+</sup> iyonlarının CB ve RuBisCO moleküllerinde bulunan negatif yüklü gruplara bağlanarak negatif yük yoğunluğunu azalttığını ve dolayısıyla elektrostatik itmenin azalması ile adsorplanan RuBisCO miktarının artmasına neden olduğunu düşündürdü. Bu koşullarda CB ve RuBisCO molekülleri arasında hidrofobik etkileşimler ve Van der Waals etkileşimlerinin daha etkin hale geleceği açıktır.

#### *Başlangıç RuBisCO derişiminin etkisi*

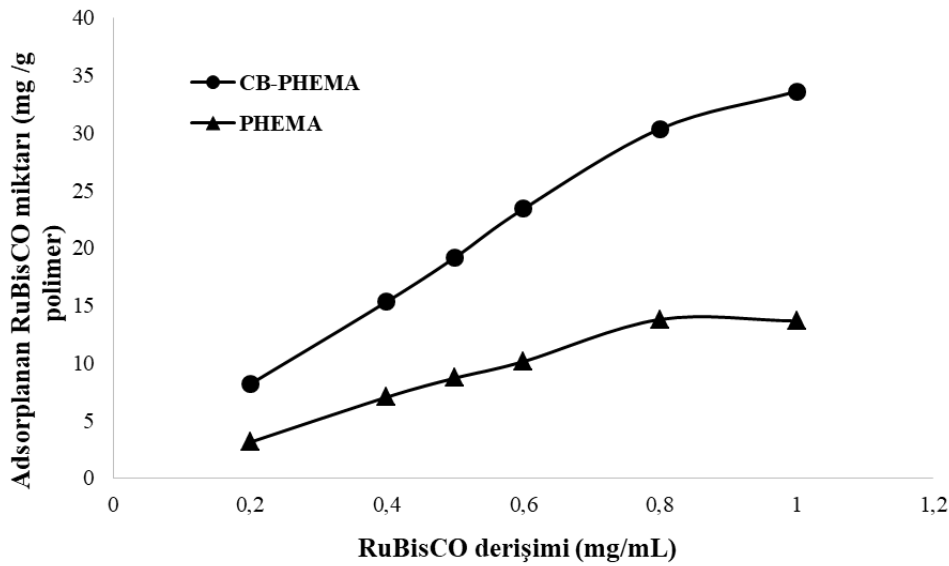
Başlangıç RuBisCO derişiminin CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonuna etkisi, 0,2 mg/mL-1,0 mg/mL RuBisCO derişim aralığında ve üç farklı sıcaklıkta (4°C, 22 °C ve 35 °C) incelendi. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te verildi. Başlangıç RuBisCO derişiminin artmasıyla adsorplanan RuBisCO miktarı arttı. 1,0 mg/mL (pH 6,0) başlangıç RuBisCO derişiminde CB-PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı, 4 °C, 22 °C ve 35 °C sıcaklıklarda sırasıyla 28,79 mg/g, 33,59 mg/g ve 37,54 mg/g olarak belirlendi.





Şekil 5. Başlangıç RuBisCO derişiminin CB-PHEMA mikrokürelere üzerine RuBisCO adsorpsiyonuna etkisi (CB-PHEMA mikroküre miktarı: 0,05 g ; çözelti hacmi :3 mL, pH: 6,0, adsorpsiyon süresi : 24 saat).

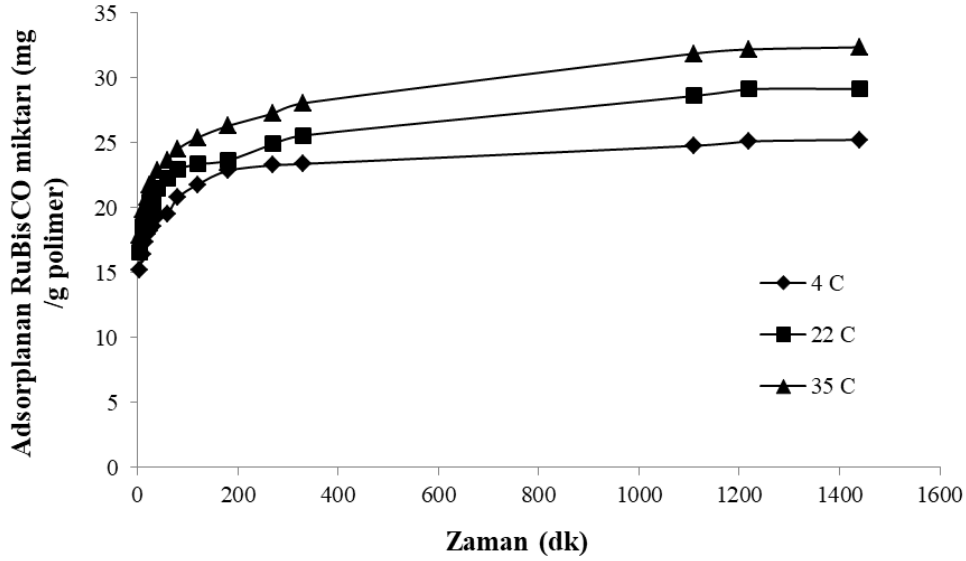
PHEMA mikrokürelere de aynı RuBisCO derişim aralığında (0,2 mg/mL-1,0 mg/mL) 22°C sıcaklıkta RuBisCO adsorpsiyonu için kullanıldı. PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı belirlenerek, 22°C sıcaklıkta CB-PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı ile karşılaştırıldı (Şekil 6). 0,2 mg/mL ile 1,0 mg/mL derişim aralığında PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarı, tüm başlangıç derişimleri için CB-PHEMA mikrokürelere üzerine adsorplanan RuBisCO miktarından düşüktür. 22°C sıcaklıkta ve 1,0 mg/mL RuBisCO derişiminde adsorplanan RuBisCO miktarı, PHEMA ve CB-PHEMA mikrokürelere için sırasıyla 13,65 mg/g ve 33,59 mg/g olarak belirlendi. Bu sonuç, CB ile RuBisCO proteini arasında elektrostatik etkileşimler, hidrojen bağları, Van der Waals etkileşimleri ve hidrofobik etkileşimlerin ortak etkisinden kaynaklanan spesifik bir etkileşim olduğunu açıkça kanıtladı.



Şekil 6. Başlangıç RuBisCO derişiminin PHEMA ve CB-PHEMA mikrokürelere üzerine RuBisCO adsorpsiyonuna etkisi (CB-PHEMA ve PHEMA mikroküre miktarı: 0,05 g ; çözelti hacmi :3 mL, pH: 6,0, sıcaklık: 22 °C; adsorpsiyon süresi : 24 saat).

### Temas süresinin etkisi

Temas süresinin adsorplanan CB-PHEMA mikrokürelere adsorplanan RuBisCO miktarına etkisi üç farklı sıcaklıkta (4°C, 22 °C ve 35°C) araştırıldı. Adsorplanan RuBisCO miktarı yaklaşık 180 dakikada denge değerine ulaştı (Şekil 7). Bu sonuç adsorpsiyonun oldukça hızlı gerçekleştiğini gösterdi. Adsorplanan RuBisCO miktarı yükselen sıcaklık değeri ile arttı. Adsorplanan RuBisCO miktarı 4 °C, 22 °C ve 35 °C sıcaklık için sırasıyla 25,23 mg/g, 29,15 mg/g ve 32,35 mg/g olarak belirlendi. Elde edilen sonuçlar CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonunun endotermik olduğunu gösterdi.



Şekil 7. Temas süresinin CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonuna etkisi (Başlangıç RuBisCO derişimi: 0,8 mg/mL, CB-PHEMA mikroküre miktarı: 0,5 g ; çözelti hacmi :30 mL, pH: 6,0, adsorpsiyon süresi : 24 saat).

### 3.3. İzotermal, kinetik ve termodinamik analizler

Adsorpsiyon mekanizmasının aydınlatılmasında adsorpsiyon verilerinin kinetik ve izoterm modellere uygunluğunun araştırılması büyük bir öneme sahiptir. Kinetik, izoterm ve termodinamik parametrelerin belirlenmesi ile analit ve adsorban arasındaki etkileşimin kuvveti belirlenebilir. Ayrıca, entalpi değişimi ( $\Delta H^\circ$ ), entropi değişimi ( $\Delta S^\circ$ ), ve serbest enerji değişimi ( $\Delta G^\circ$ ) değerleri ile sırasıyla adsorpsiyon prosesinin doğası, adsorpsiyon sisteminin düzensizliği ve adsorpsiyonun kendiğinden gerçekleşebilirliği öngörülebilir. CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonu için üç farklı sıcaklıkta elde edilen adsorpsiyon verileri kullanılarak izotermal, kinetik ve termodinamik analizler yapıldı.

0,2 mg/mL ile 1,0 mg/mL RuBisCO derişim aralığında üç farklı sıcaklıkta (4 °C, 25 °C ve 35 °C) elde edilen adsorpsiyon verilerinin Langmuir, Freundlich ve Dubinin–Radushkevich (DR) izoterm modellerine uygunluğu araştırıldı. Langmuir izoterm modeline göre; adsorpsiyon tek tabakalı, adsorban yüzeyi homojen ve adsorban yüzeyindeki bağlanma bölgeleri eş enerjilidir. Langmuir izoterminin doğrusal denklemi Eşitlik (2)'deki gibidir [25].

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_L K_L} + \frac{C_e}{Q_L} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de;  $C_e$  çözeltideki denge RuBisCO derişimini (mg/L);  $q_e$  denge anında adsorplanan RuBisCO miktarını (mg/g);  $Q_L$  yüzeydeki tek tabakalı adsorpsiyon için maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg/g) ve  $K_L$  bağlanma bölgelerinin afinitesiyle ilgili Langmuir denge sabitini (L/mg) ifade etmektedir.

Freundlich izoterm modeli, heterojen bağlanma bölgeleri içeren adsorbanlarda adsorpsiyon prosesini açıklamak için kullanılmaktadır [26]. Freundlich izoterm modelinde bağlanma bölgeleri eş enerjili değildir. Ayrıca adsorbat molekülleri arasında etkileşim mümkündür. Freundlich izoterm modeli Eşitlik (3)'te verilen denklem ile ifade edilir.

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te;  $K_f$  Freundlich denge sabitini [(mg/g)(L/mg)<sup>1/n</sup>],  $C_e$  çözeltideki denge adsorbat derişimini (mg/L),  $q_e$  denge anında adsorplanan adsorbat miktarını (mg/g) ve  $n$  Freundlich sabitini (birimsiz) ifade etmektedir. Langmuir ve Freundlich izoterm modelleri sıklıkla kullanılmasına rağmen adsorpsiyon mekanizmasını açıklayamaz. Dubinin-Radushkevich (DR) izoterm modeli adsorpsiyon serbest enerjisini hesaplamak için kullanılır. DR izoterm modeline ait denklem Eşitlik (4) 'teki gibidir [27].

$$\ln Q_e = \ln Q_{DR} - K_{DR} \mathcal{E}^2 \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te;  $Q_e$  g mikroküre başına adsorplanan mg RuBisCO miktarını (mg/g),  $Q_{DR}$  maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg/g),  $K_{DR}$  DR sabitini (mol<sup>2</sup>/J<sup>2</sup>) ve  $\mathcal{E}$  ise Polanyi potansiyelini (J/mol) ifade etmektedir.

Polanyi potansiyeli Eşitlik (5) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{E} = RT \ln \left( 1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (5)$$

Eşitlik (5)'te;  $R$  gaz sabitini (J/mol K),  $T$  çözelti sıcaklığını (K),  $C_e$  ise çözeltideki denge RuBisCO derişimini (mg/L) ifade etmektedir.

Adsorpsiyon serbest enerjisi  $E_{fe}$  ise Eşitlik (6) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$E_{fe} = \frac{1}{\sqrt{-2K_{DR}}} \quad (6)$$

CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonu için belirlenen Langmuir ve Freundlich izoterm verileri Tablo 1'de özetlendi. 4°C, 22°C ve 35°C sıcaklıkta; Freundlich izoterm modeli için elde edilen korelasyon katsayıları, Langmuir izoterm modeli için elde edilen korelasyon katsayılarından daha yüksektir. Bu nedenle, CB-HEMA mikrokürelere üzerine RuBisCO adsorpsiyonu Freundlich izoterm modeline uygundur. RuBisCO adsorpsiyonu heterojen bağlanma bölgelerinde çok tabakalı olarak gerçekleşmekte ve heterojen yüzey üzerinde adsorpsiyon ısısı ve ilgisi (afinitesi) eşit dağılmamaktadır. DR izoterminden hesaplanan  $E_{fe}$  değerleri, 4°C için 3,790 kJ/mol,

22°C için 3,750 kJ/mol ve 35°C için 3,900 kJ/mol'dür (Tablo 1).  $E_{fe}$  değerlerinin 8 kJ/mol'den küçük olması CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonunun fiziksel adsorpsiyon olduğunu gösterdi [28].

Tablo 1. CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonuna ait izoterm parametreleri.

Langmuir izoterm modeli			
Sıcaklık (K)	277	295	308
$Q_{deneyse}$ (mg/g)	28,79	33,59	37,54
$Q_L$ (mg/g)	57,8	83,3	208,3
$K_L$ (L/mg)	2,403	1,690	0,530
$R^2$	0,9308	0,8983	0,8034
Freundlich izoterm modeli			
Sıcaklık (K)	277	295	308
$K_F(mg/g)(L/mg)^{1/n}$	54,61	71,03	83,21
$n$	1,453	1,297	1,112
$R^2$	0,9949	0,9896	0,9975
DR izoterm modeli			
Sıcaklık (K)	277	295	308
$Q_{deneyse}(mg/g)$	28,79	33,59	37,54
$Q_{D-R}$ (mg/g)	34,63	43,80	49,20
$K_{D-R} \times 10^8 (mol^2/J^2)$	3,490	3,560	3,290
$E$ (kJ/mol)	3,790	3,750	3,900
$R^2$	0,9565	0,9707	0,9743

Kinetik çalışmalar 4 °C, 22 °C ve 35 °C sıcaklıkta gerçekleştirildi. Sıcaklığın 4°C'den 35°C'ye yükselmesi ile CB-PHEMA mikrokürelere adsorplanan RuBisCO miktarının artması, adsorpsiyonun endotermik olduğunu gösterdi. 0,8 mg/mL başlangıç RuBisCO derişiminde üç farklı sıcaklıkta elde edilen adsorpsiyon verilerinin yalancı-birinci derece [29] ve yalancı-ikinci derece [30] kinetik modele uygunluğu araştırıldı. Kinetik modellere ait denklemler sırasıyla Eşitlik (7) ve Eşitlik (8)'deki gibidir.

$$\text{Yalancı birinci derece} \quad \log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (7)$$

$$\text{Yalancı ikinci derece} \quad \frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (8)$$

Eşitlik (7) ve Eşitlik (8)'de;  $k_1$  (1/dk) ve  $k_2$  ((g/mg)/dk) sırasıyla yalancı-birinci derece ve yalancı-ikinci derece adsorpsiyon hız sabitini,  $t$  zamanı (dk),  $q_e$  ve  $q_t$  ise sırasıyla dengede ve herhangi bir  $t$  (dk) anında adsorplanan RuBisCO miktarını (mg/g) ifade etmektedir. Eşitlik (7) ve Eşitlik (8) kullanılarak hesaplanan kinetik parametreler Tablo 2'de gösterildi. Yalancı-ikinci derece model için elde edilen korelasyon katsayısı değerlerinin daha büyük olması ( $\geq 0.9989$ ) ve deneysel olarak elde edilen  $q_e$  (deneysel) değerlerinin çalışılan tüm sıcaklıklarda hesaplanan  $q_e$  değerlerine yakın olması, RuBisCO adsorpsiyon prosesinin yalancı-ikinci derece kinetik modele uygun olduğunu gösterdi.

Tablo 2. CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonuna ait kinetik parametreler.

<b>Yalancı-birinci derece kinetik model</b>			
<b>Sıcaklık (K)</b>	<b>277</b>	<b>295</b>	<b>308</b>
<b><math>q_e</math> deneysel (mg/g)</b>	25,24	29,15	32,36
<b><math>q_e</math> (mg/g)</b>	7,948	9,867	11,860
<b><math>k_1</math> (1/dk)</b>	0,0053	0,0032	0,0035
<b><math>R^2</math></b>	0,9195	0,8771	0,9161
<b>Yalancı-ikinci derece kinetik model</b>			
<b>Sıcaklık (K)</b>	<b>277</b>	<b>286</b>	<b>298</b>
<b><math>q_e</math> deneysel (mg/g)</b>	25,24	29,15	32,36
<b><math>q_e</math> (mg/g)</b>	25,32	29,30	32,60
<b><math>k_2 \times 10^3</math> ((g/mg)/dk)</b>	2,91	1,67	1,37
<b><math>R^2</math></b>	0,9998	0,9999	0,9989

CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonuna ilişkin termodinamik parametreler; Gibbs serbest enerji değişimi ( $\Delta G^\circ$ ), entalpi değişimi ( $\Delta H^\circ$ ) ve entropi değişimi ( $\Delta S^\circ$ ) Van't Hoff eşitliği kullanılarak hesaplandı.

$$\ln K = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (9)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (10)$$

Gibbs serbest enerji değişimi ( $\Delta G^\circ$ ) değerleri; 4°C, 22°C ve 35 °C sıcaklık için sırasıyla -9,22 kJ/mol, -10,44 kJ/mol ve -11,33 kJ/mol olarak belirlendi. Negatif  $\Delta G^\circ$  değerleri CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyonunun kendiliğinden gerçekleştiğini gösterdi. Ayrıca,  $\Delta G^\circ$  değerlerinin artan sıcaklık ile azalması RuBisCO adsorpsiyonunun yüksek sıcaklıklarda daha istemli olduğunu kanıtladı. Entalpi değişimi ( $\Delta H^\circ$ ) +9,661 kJ/mol olarak hesaplandı ve RubisCO adsorpsiyonunun endotermik doğasını kanıtladı. Entropi değişimi ( $\Delta S^\circ$ ), +68,14 J/mol.K, RuBisCO adsorpsiyon prosesi sırasında sistemin düzensizliğinin arttığını gösterdi.

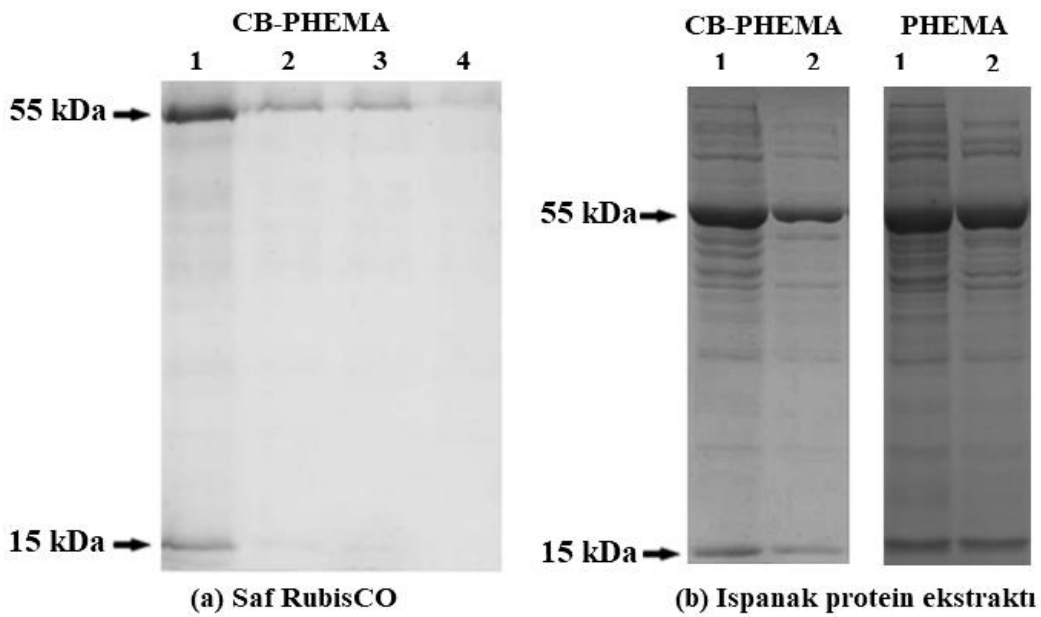
#### **3.4. CB-PHEMA mikrokürelerin tekrar kullanımı**

CB-PHEMA mikroküreler RuBisCO adsorpsiyonunda 6 kez tekrar kullanıldı. Tekrar kullanım sırasında; CB-PHEMA mikrokürelere adsorplanan RuBisCO miktarı sırasıyla 15,33; 15,28; 15,30; 15,32; 15,30 ve 15,29 mg/g olarak belirlendi. Desorpsiyon ajanı olarak 1M etilen glikol çözeltisi kullanıldı. Elde edilen sonuçlara göre; CB-PHEMA mikrokürelere RuBisCO adsorpsiyon kapasitesinde belirgin bir azalma olmaksın tekrar tekrar kullanılabilir.

#### **3.5. Ispanak protein ekstraktından RuBisCO adsorpsiyonu**

CB-PHEMA mikroküreler ile RuBisCO adsorpsiyonu SDS-PAGE analizleri ile takip edildi. Bu amaçla; saf RuBisCO içeren çözeltiler (1 mg/mL, 3 mL, pH 6,0) ve ıspanak protein ekstraktı (3 mL, pH 6,0) mikroküreler (CB-PHEMA ve/veya PHEMA) ile muamele edildi. Adsorpsiyon öncesi ve sonrası ortamdan alınan protein örnekleri SDS-

PAGE ile analiz edildi. Şekil 8 (a)'da; adsorpsiyon öncesi (1) ve adsorpsiyon sonrası (2,3,4) saf RuBisCO çözeltilerinden alınan protein örneklerinin SDS-PAGE analizi ile elde edilen protein bantları görülmektedir. Adsorpsiyon çalışmaları; 0,25 g , 0,5 g ve 1,0 g CB-PHEMA mikroküre kullanılarak gerçekleştirildi. SDS-PAGE jelde 55 kDa ve 15 kDa molekül ağırlığında olmak üzere iki bant gözlemlendi. RuBisCO'nun bitki yapraklarındaki toplam çözümlü proteinlerin %50 sini oluşturduğu tahmin edilmektedir [31]. RuBisCO kloroplastların stromasında bulunur ve bitki türüne göre kloroplast proteinlerinin %15-50 sini oluşturur [32]. Yüksek bitkiler, algler ve siyanobakterilerde RuBisCO iki farklı alt birim sekiz adet kopyasından oluşur (Form I RuBisCO). Büyük alt birim 55 kDa ve küçük alt birim ise 15 kDa molekül ağırlığına sahiptir [33]. CB-PHEMA mikroküreler ile saf RuBisCO çözeltilerinden adsorpsiyon sonrasında protein bantlarının yoğunluğunun azaldığı ve bant yoğunluklarındaki azalışın, artan CB-PHEMA miktarı ile arttığı belirlendi.



Şekil 8. Saf RuBisCO çözeltilerine ve ıspanak protein ekstraktına ait SDS-PAGE jeller: (a) adsorpsiyon öncesi (1) ve 0,25 g (2) , 0,5 g (3) ve 1,0 g (4) CB-HEMA mikroküre ile adsorpsiyon sonrası RuBisCO çözeltilerinden alınan protein örneklerine (b) adsorpsiyon öncesi (1) ve 0,5 g (2) CB-HEMA/PHEMA mikroküre ile adsorpsiyon sonrası ıspanak protein ekstraktından alınan protein örneklerine aittir.

Ispanak protein ekstraktı ise; 0,5 g CB-PHEMA ve 0,5 g PHEMA mikroküre ile muamele edildi. Adsorpsiyon öncesi ve sonrası ıspanak protein ekstraktı örnekleri SDS-PAGE jelde yürütüldü. Şekil 8 (b)'de adsorpsiyon öncesi (1) ve adsorpsiyon sonrası (2) protein ekstraktından alınan protein örneklerinin SDS-PAGE jel görüntüleri verildi. Adsorpsiyon öncesi ıspanak protein ekstraktına ait SDS-PAGE jeller incelendiğinde (Sıra 1); ekstrakt içerisinde farklı molekül ağırlığına sahip çok sayıda proteinin olduğu, ancak 55 kDa ve 15 kDa molekül ağırlığındaki protein bant yoğunluklarının RuBisCO varlığı nedeniyle oldukça yüksek olduğu görüldü. CB-PHEMA mikroküreler ile adsorpsiyon sonrasında (Sıra 2), 55 kDa ve 15 kDa molekül ağırlığındaki bant yoğunluklarının dikkate değer ölçüde azaldığı, ancak PHEMA mikroküreler ile muamele edilen protein örneklerine (adsorpsiyon sonrası) ait SDS-PAGE jelde (Sıra 2); aynı molekül ağırlıklarındaki protein bant yoğunluklarında belirgin bir azalmanın

olmadığı tespit edildi. Bu sonuç, CB molekülleri ile RuBisCO arasında spesifik bir etkileşim olduğunu açık bir şekilde kanıtladı. Hayvansal ve bitkisel hücrelerde biyobelirteç olarak kullanılan reseptör ve/veya sinyal/düzenleyici proteinler genellikle nispeten düşük bollukta bulunmakta ve bu proteinler yüksek bollukta bulunan proteinler tarafından maskelenmektedir [10, 34, 35]. Bitki proteom çalışmalarında, fotosentetik bitki dokularında biyobelirteç olarak kullanılacak fonksiyonel proteinlerin saptanmasında RuBisCO çok önemli bir sınırlayıcı proteindir [10]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, fotosentetik bitki dokularında yüksek bollukta bulunan RuBisCO proteininin uzaklaştırılmasında kullanılacak alternatif bir yöntemin geliştirilebilmesi için ümit vadetmektedir. Öte yandan, CB-PHEMA ile muamale edilmiş ıspanak proteinlerinin yürütüldüğü jelde, adsorpsiyon öncesi gözlemlenen çok sayıda farklı proteinin bandının da yoğunluklarının azaldığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, CB-PHEMA mikrokürelerin RuBisCO yanında başka proteinleride adsorplamasından kaynaklanmaktadır. İmmunafinite tekniğinde de; ligand olarak kullanılan antikorların yüksek seçiciliklerine rağmen, hedef protein yanında çok sayıda protein immün afinite kolonlarına adsorplanmaktadır. İnsan albümin antikorları içeren immunafinite kolon kullanılarak insan plazmasından albumin uzaklaştırıldığında, albumin ile birlikte 32 adet farklı proteinin kolona adsorplandığı belirlenmiştir [36]. Aynı çalışmada, CB boya ligandı içeren ticari bir kolon ile insan plazmasından albumin uzaklaştırılmış ve albumin ile birlikte 60 adet farklı proteinin kolona adsorplandığı tespit edilmiştir. Bu nedenle ileride yapılacak çalışmalarda; CB-PHEMA mikroküreler ile RuBisCO adsorpsiyonu sırasında ıspanak protein ekstraktından RuBisCO ile birlikte adsorplanan proteinlerin, 2D jel elektroforezi ve LC/MS/MS çalışmaları ile belirlenmesi uygun olacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Cánovas, F.M., Dumas-Gaudot, E., Recorbet, G., Jorin, J., Mock, H.P., Rossingnol, M., Plant proteome analysis, **Proteomics**, 4, 285-298, (2004).
- [2] Rabilloud, T., Solubilization of proteins for electrophoretic analyses, **Electrophoresis**, 17,813–829. 1996.
- [3] Rose, J.K., Bashir, S., Giovannoni, J.J., Jahn, M.M., Saravanan, R.S., Tackling the plant proteome: practical approaches, hurdles and experimental tools **Plant Journal**, 39,715–733, (2004).
- [4] des Francs, C.C., Thiellement, H., de Vienne, D., Analysis of leaf proteins by two-dimensional gel electrophoresis: protease action as exemplified by Ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase degradation and procedure to avoid proteolysis during extraction, **Plant Physiology**, 78,178–182, (1985).
- [5] Gegenheimer, P., Preparation of extracts from plants, **Methods in Enzymology**, 182,174–193, (1990).
- [6] Wilkins, M.R., Gasteiger, E., Sanchez, J.C., Bairoch, A., Hochstrasser, D.F. Two-dimensional gel electrophoresis for proteome projects: The effects of protein hydrophobicity and copy number, **Electrophoresis**, 19,1501– 1505, (1998).
- [7] Corthals, G.L., Wasinger, V.C., Hochstrasser, D.F., Sanchez, J.C., The dynamic range of protein expression: a challenge for proteomic research, **Electrophoresis**, 21,1104–1115, (2000).
- [8] Freeby, S, Berkelman, T, Paulus, A, Liu, N, Wehr, T, Academia, K, Walker, J. 2D-analysis of leaf protein samples treated with proteomimer beads under denaturing and non-denaturing conditions. [https://www.bio-rad.com/webroot/web/pdf/lsr/literature/Bulletin\\_6441.pdf](https://www.bio-rad.com/webroot/web/pdf/lsr/literature/Bulletin_6441.pdf) (12.01.2021)

- [9] Kim, S.T., Cho, K.S., Jang, Y.S., Kang, K.Y., Two-dimensional electrophoretic analysis of rice proteins by polyethylene glycol fractionation for protein arrays, **Electrophoresis**, 22, 2103–2109, (2001).
- [10] Xi, J.H., Wang, X., Li, S.Y., Zhou, X., Yue, L., Fan, J., Hao, D.Y., Polyethylene glycol fractionation improved detection of low-abundant proteins by two-dimensional electrophoresis analysis of plant proteome, **Phytochemistry**, 67, 2341–2348, (2006).
- [11] Cellar, N.A., Kuppannan, K., Langhorst, M.L., Ni, W., Xu, P., Young, S.A., Cross species applicability of abundant protein depletion columns for ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, **Journal of Chromatography B: Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences**, 861, 29–39, (2008).
- [12] Denizli, A., and Piskin, E., Dye-ligand affinity systems, **Journal of Biochemical and Biophysical Methods**, 49, 391–416, (2001).
- [13] Stellwagen, E., Chromatography on immobilised reactive dyes, **Methods in Enzymology**, 182, 343–357, (1990).
- [14] Roschlau, P., Hess, B., Affinity chromatography of yeast pyruvate kinase with Cibacron blue bound to Sephadex G-200, **Hoppe-Seyler's Zeitschrift für physiologische Chemie**, 353, 441–443, (1972).
- [15] Lowe, C.R., Gald, M., Larsson, P.O., Ohlson, S., Small, D.A.P., Atkinson, T., High performance liquid affinity chromatography of proteins on Cibacron Blue F3GA bonded silica, **Journal of Chromatography**, 215-303, (1981).
- [16] Lowe, C.R., Hans, M., Spibey, N., Drabble, W.T., The purification of inosine-5-monophosphate dehydrogenase from *Escherichia coli* by affinity chromatography on immobilized Procion dyes, **Analytical Biochemistry**, 104, 23–28, (1980).
- [17] Dean, P.D.G., Watson, D.H., Protein purification using immobilised triazine dyes, **Journal of Chromatography**, 165: 310–319, (1969).
- [18] Bollin, E., Vastola, K., Olezszak, P., Sulkowski, E., The interaction of mammalian interferons with immobilized Cibacron Blue F3GA: modulation of binding strength, **Preparative Biochemistry**, 8, 259–264, (1978).
- [19] Biellman, J.F., Samma, J.P., Branden, C.I., Eklund H., X-ray studies of the binding of Cibacron Blue F3GA to liver alcohol dehydrogenase, **European Journal of Biochemistry**, 102-107, (1979).
- [20] Travis, J., Pannell, R., Selective removal of albumin from plasma by affinity chromatography, **Clinica Chimica Acta**, 49, 49-52, (1973).
- [21] Travis, J., Brown, J., Tewksbury, D., Johnson, D., Pannell, R., Isolation of albumin from whole human plasma and fractionation of albumin-depleted plasma, **Biochemical Journal**, 157, 301-306, (1976).
- [22] Odabaşı, M., Denizli, A., Cibacron Blue F3GA incorporated magnetic poly(2-hydroxyethyl methacrylate) beads for lysozyme adsorption, **Journal of Applied Polymer Science**, 93, 719–725, (2004).
- [23] Jankowski, W.J., Ansen, W.H., Sulkowski, E., Carter, W.A., Binding of human interferons to immobilized Cibacron Blue F3GA: The nature of molecular interaction. **Biochemistry**, 15, 5182-5187, (1976).
- [24] Nynäs, A.L., White proteins from green leaves in food applications. A literature study. Alnarp: Sveriges lantbruksuniversitet. (Introductory paper at the Faculty of Landscape Architecture, Horticulture and Crop Production Science, (2018).
- [25] Langmuir, I., The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part 1. Solids, **Journal of the American Chemical Society**, 38, 2221 – 2295, (1916).



- [26] Freundlich, H.M.F., Over the Adsorption in Solution, **Journal of Physical Chemistry**, 57, 385–471, (1906).
- [27] Dubinin, M.M., Radushkevich, L.V., The equation of the characteristic curve of activated charcoal, **Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Physical Chemistry Section**, 55,331–337, (1947).
- [28] Unlü, N., Ersoz M., Adsorption characteristics of heavy metal ions onto a low cost biopolymer sorbent from aqueous solutions, **Journal of Hazardous Materials**, 136, 272–280, (2006).
- [29] Lagergren, S., Zur theorie der sogenannten Adsorption gel oster stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens, **Handlingar**, 25,4, 1–39, (1898).
- [30] Ho, Y.S., McKay, G., Pseudo-second-order model for sorption processes, **Process Biochemistry**, 34, 451–465, (1999).
- [31] Ellis, R.J., Most abundant protein in the World, **Trends in Biochemical Sciences**, 4, 241-244, (1979).
- [32] Vapaavuori, E.M., Correlation of activity and amount of ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase with chloroplast stroma crystals in water-stressed willow leaves, **Journal of Experimental Botany**, 37, 174, 189-198, (1986).
- [33] Maeda, N., Kitano, K., Fukui, T., Ezaki, S., Atomi, H., Miki, K., Tadayuki Imanaka, T., Ribulose bisphosphate carboxylase/oxygenase from the hyperthermophilic archaeon *pyrococcus kodakaraensis* kod1 is composed solely of large subunits and forms a pentagonal structure, **Journal of Molecular Biology**, 293, 57-66, (1999).
- [34] Yang, H., Wang, G., Zhang, T., Beattie, J.H., Zhou S. Establishing an optimized method for the separation of low and high abundance blood plasma proteins. **Analytical Chemistry at Peer Journal**. DOI: 10.7717/peerj-achem.6, (2020).
- [35] Gupta R. High abundance proteins: Proteomer’s thorns in the flesh? **Journal of Proteomics & Bioinformatics**. 10, 7, 1000e35,(2017).
- [36] Zolotarjova, N., Nicol, G., Martosella, J., Yang, L-S., Zhang, K., Boyes, B., Evaluation of serum albumin depletion methods for proteomic analysis, **HPLC**, Nice, France, (2003).

# İnşaat projelerindeki riskler ve bu riskleri azaltmak için inşaat sektöründe kullanılan sigortalar üzerine bir araştırma

Çağla KÜÇÜKERDEN, Gürkan Emre GÜRCANLI, Senem BİLİR MAHÇİÇEK\*

*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, İstanbul.*

*Geliş Tarihi (Received Date): 06.01.2021*

*Kabul Tarihi (Accepted Date): 29.03.2021*

## Öz

Hızla gelişen, teknoloji ve rekabetin büyümesi ile oldukça yüksek ve çeşitli risk kaynaklarının söz konusu olduğu inşaat sektöründe, riski paylaşmak ve bir kısmını kendi üzerinden aktarmak isteyen yüklenicilerin ilk yöneldiği sektörlerin başında sigorta sektörü gelmektedir. Hali hazırda yaygın olarak kullanılan inşaat sigortaları, çoğunlukla mal sahibinin taleplerini yerine getirmek adına yapılmakta ve genellikle öncelik prim bedellerine verilmektedir. Mevcut uygulamalarda çoğunlukla düşük primli poliçeler tercih edilmektedir. Bu makalede amaç, yüklenicilerin sadece işveren istekleri doğrultusunda değil, kendilerini daha fazla koruma altına alabilmek adına tüm risklerini paylaşmak için sigorta satın alma ve hasar süreçlerinde bilinçlendirmektir. Ayrıca, bu çalışma ile her geçen gün inşaat sektöründe daha da önem kazanan proje yönetimi yaklaşımından yola çıkılarak hem yüklenicinin risklerini değerlendirip hem de işveren bakış açısıyla yaklaşarak, sigorta satın alma hususunda dikkat edilmesi gereken genel ve özel şartlar sunulmuştur. İnşaat sigortacılık sektöründe yapılan araştırmanın sonuçları kullanılarak, yükleniciler açısından kolaylık olması amacıyla da örnek bir sigorta fiyatlama hesap aracı yaratılmış ve sigorta satın alınırken kullanılmak üzere bir kontrol listesi hazırlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Tüm risk sigortası, inşaat proje yönetimi, fiyatlama hesap aracı, sigorta öncesi bilgi ve belge kontrol listesi, Munich Re klozları.

Çağla KÜÇÜKERDEN, kucukerden@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-5394-8204>

Gürkan Emre GÜRCANLI, gurcanlig@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-0807-2020>

\* Senem BİLİR MAHÇİÇEK, sbilir@itu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-6755-7960>

## A research on risks in construction projects and insurances used to mitigate those risks in the construction industry

### Abstract

*Insurance industry is the first industry that contractors apply to share and transfer risks in the rapidly developing construction industry where various risks due to technology and rivalry exist. Commonly used construction insurances are generally employed to satisfy owners demands and contractors give priority to cost of insurance premiums. In currently signed insurance contracts, contractors generally prefer low cost insurance policies. The main aim of this study is raising awareness among contractors who sign insurances to distribute project related risks to protect their interests and giving information how to use these insurances after damages occur. Additionally, this study tries to assess risks of the contractors from their as well as owners' point of view under the guidance of project management approach and provides general and particular conditions for the contractors when they purchase construction insurances. By the utilization of the results of the research in the construction insurance industry, insurance price calculation tool was created and a check list is prepared to help the contractors when purchasing construction insurances.*

**Keywords:** *All risk insurance, construction project management, price calculation tool, information and document checklist before insurance, Munich Re clauses.*

### 1. Giriş

Hem inşaat sektörü hem de sigorta sektörü günümüzdeki uygulamalarına oldukça köklü bir tarih ve gelişim sonrası ulaşmıştır. Her iki sektör de günümüzde modern hayatın ayrılmaz bir parçasıdır. Bu iki sektör aynı zamanda birbirlerinden de ayrı düşünülemez. Günümüzde geldiğimiz noktada, inşaat ve sigorta sektörleri hem ekonomik dinamikleri hem de teknolojik gelişmeleri ile birbirlerine sıkı sıkıya bağlıdır. Gelişen dünyada inşaat sektörünün teknolojiye ayak uydurması gerekmiştir. İnşaat projeleri büyüdükçe ve dünyaya açıldıkça, risk kapsamı da oldukça genişlemektedir. Hem işveren, hem müteahhit hem de proje yönetimi firmaları sahip oldukları riskleri dengelemek ve kendilerini korumaya almak amacıyla sigortaya yaptıkları yatırımı arttırmışlardır. Geleneksel inşaat projelerine baktığımızda, riske en çok maruz kalan taraf olarak kabul edilen müteahhitler, satın aldıkları sigorta ürünlerini ve kapsamlarını, ayrıca satın alabilecekleri çeşitli sigorta ürünlerini ayrıntılı olarak bilmeli ve değerlendirmelidir. Bu değerlendirmeyi aynı zamanda proje yönetimi tarafından baktığımızda, proje yönetiminin sigorta hususuna hakim olmadığı ve satın aldığı/alabileceği ürünleri yeterince tanımadığı durumlarda, tüm taraflar için halihazırda yüksek olan riskler daha da artacaktır. Özetle, inşaat projeleri geliştikçe, risk artmaktadır.

İnşaat sektöründe var olan riskler ile ilgili çok sayıda çalışma olsa da bu risklere sigorta bakış açısıyla yaklaşan çalışma sayısı çok fazla değildir. Bu sebeple var olan çalışmalar sigorta sektöründe mevcut kaynaklar ile birlikte değerlendirilmiş ve inşaat proje yönetiminin güncel sınıflandırmaları ve proje yönetimi kapsamındaki risklerin sınıflandırmaları ile literatür araştırması tamamlanmıştır. Proje yönetiminin inşaat

sektöründeki özellikleri araştırılırken, en çok CMAA (2015) çalışmalarında yer alan sınıflandırmalar dikkate alınmıştır [1]. İnşaat sektöründe kullanılabilecek sigorta türleri için en detaylı bilgiler ve bunların uygulamaları ve şartları Türk Sigorta Birliği'ne ait internet sitesinde yayınlanmaktadır. Aynı zamanda Uluslararası Deniz Müteahhitleri Birliği (IMCA)'ne ait internet sitesinde inşaat tüm risk sigortaları ve diğer mühendislik branşlarına ait sigortalar ile ilgili uygulamaları örneklere ve detaylı açıklamalara yer verilmektedir [2]. Bölükbaşı (2009) ve Uralcan (2009)'da çalışmalarında sigortacılığın temel prensiplerinden ve sigorta branşlarının temel özelliklerinden bahsetmiştir [3,4]. İnşaat Tüm Risk Sigortaları'nın değerlendirilmesi açısından Geyik (2011) risk değerlendirmelerinden ve uygun fiyatlandırmalardan bahsetmiştir [5]. Tüfekçi (2006) inşaat sigortaları uygulamalarında brokerlik firmalarının yerinden bahsederken risk ve sigorta kavramlarını da birlikte değerlendirmiştir [6]. İnşaat sektöründe uygulanan sigortalar ve hasar tespitlerinden bahseden Özdiğer (2002) ise sigortanın temel kavramlarını, terimlerini ve maddelerini detaylı bir şekilde incelemiştir [7]. Bu konuda rastlanan en geniş kaynak ise Haar and Levine (2008) ait ve inşaat sigortalarının temel kavramlarını Birleşik Krallık tarafından kullanılan standart sözleşmeler ile beraber değerlendiren kitaptır [8]. Aynı zamanda yine sigorta bakış açısından yararlanabilecek, uluslararası sektör açısından sadece politik risklere odaklanmış Karabay'ın (1997) çalışması da mevcuttur [9]. İnşaat Tüm Risk sigortaları özelinde yararlanılan en önemli kaynaklarda biri ise, Munich Reasürans firmasının kendi adlarını verdikleri ve dünya çapında kullanılan Munich Re klozlarıdır [10].

Bu çalışmada, proje yönetiminin satın aldıkları sigorta ürünlerini tanıması, yenilikçi ve gelişen dünyada karşılıklarına çıkabilecek yeni risklerin belirtilmesi ve bu yeni risklerini transfer edebilmeleri için kullanabilecekleri çeşitli sigorta ürünlerini tanıması hedeflenmiştir. Her ne kadar çalışma içerisinde İnşaat Tüm Riskler teminatı üzerinde durulsa da proje yönetiminin ve yüklenicilerin İnşaat Tüm Riskler poliçesinin kapsamı dışında kalabilecek proje riskleri için de kendileri sigorta yolu ile nasıl koruyabilecekleri açıklanmıştır. Bu makale ile ayrıca risk faktörlerinden ve dokümanlardan yola çıkılarak inşaat projeleri için örnek teşkil edebilecek bir fiyatlama hesap aracı geliştirilmiş ve inşaat sektörü çalışanlarının bu fiyatlama hesap aracı üzerinden riskleri ve maliyetlerini öngörmesi hedeflenmiştir.

## 2. Araştırma yöntemi

Bu çalışmada inşaat sektörünün en önemli paydaşlarından proje yönetiminin, inşaat sigortalarının yönetimini nasıl yapması gerektiği, inşaat projelerinde kullanılabilecek sigorta türleri ve sektörde en çok kullanılan çeşit olan inşaat tüm risk poliçelerinin proje yönetimine katkıları açıklanmıştır. Bu doğrultuda ise aşağıdaki adımlar sırası ile bu çalışmada uygulanmıştır: Öncelikle, Türkiye'de ve dünyada sigortacılık inşaat sektörü özelinde incelenmiş ve en çok kullanılan sigorta türleri belirlenerek içerikleri açıklanmıştır. Bir sonraki adımda, inşaat sektöründe en çok kullanılan poliçe olan inşaat tüm risk teminatı, özel şartlar (klozlar) ve Munich Re klozları olarak adlandırılan diğer ek maddeler incelenmiştir. Klozları takiben, inşaat sigortacılığında riskler mülakat yöntemi ile değerlendirilip, sektörde dikkat edilen faktörler tespit edilmiş ve sonuç olarak, belirlenen bu risk değerlendirme faktörlerinden, literatürde tespit edilen risklerden ve inşaat sektörü çalışanları ile yapılan görüşmelerden faydalanılarak bir Tüm risk poliçesi fiyatlama hesap aracı geliştirilmiştir.

### **2.1. Proje yönetimi ve proje yönetimi kapsamında risklerin sınıflandırılması**

1969 yılında kurulan ve dünya çapında bir kuruluş olan Project Management Institute (PMI)'ın proje yönetimi gerektiren tüm sektörlerle getirdiği standartların inşaat sektörü özelinde yorumlanması noktasında, inşaat proje yönetiminin uygulanması, geliştirilmesi için profesyonel çalışmalar yapan ve eğitimler veren bir kuruluş olan CMAA çalışmaları yön gösterici olmaktadır [1]. CMAA tarafından 2015 yılında yayınlanan İnşaat Proje yönetimi standartlarında belirtilen bu başlıklar: (Genel) Proje Yönetimi, Maliyet Yönetimi, Süre Yönetimi, Kalite Yönetimi, Sözleşme İdaresi, İş Güvenliği Yönetimi, Sürdürülebilirlik, Risk Yönetimi ve BIM'dir [1]. Tablo 1'de genel olarak literatürde yer alan risklerin çoğunu kapsayan 6 adet kaynağa yer verilmiştir. Ancak, Tablo 1'de yer almayan fakat inşaat projelerinde yer alan risklere değinen başka kaynaklar da bulunmaktadır. Örneğin; Dikmen ve diğerleri (2008), inşaat projelerinin yapım öncesi, yapım sırası ve yapım sonrası risklerini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmiştir [16]. Serpella ve diğerleri ise, işverenlerin ve yüklenicilerin geçmiş proje deneyimlerinden yola çıkarak bir risk yönetimi organizasyonu oluşturmasını sağlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir [17]. Bu çalışmada sektörde en çok kullanılan Tüm Risk sigortaları baz alındığından, bu kapsamda zararları karşılanacak riskler: teknik riskler, sözleşmesel riskler, coğrafi riskler, tasarım riskleri, politik riskler ve kaynak riskleri olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Literatürde yer alan risk tanımları ve bunların sigorta poliçelerindeki karşılıkları

Literatürde Yer Alan Risk Tanımları						Sigorta Sektörü	Sigorta Poliçesi Türleri
Dikmen, Birgönül, Han - Uluslararası İnşaat Projesi Riskleri, 2006 [11]	IMCA (Uluslararası Deniz Mühendisleri Birliği, Temel Risk Alanları, 2006 [2])	AİMD (Amerika İnşaat Mühendisleri Derneği, İnşaat Riskleri, 2005 [12])	Bu-Qammar, Dikmen, Birgonul, Uluslararası Proje Riskleri, 2009 [13]	Şener, İnşaat riskleri, 2012 [14]	Liu, Zhao, Yan, Uluslararası İnşaat Projelerinin İçerdiği Riskler, 2016 [15]	Sigorta teminatları/poliçeleri tarafından karşılanabilecek ve tazmin edilebilecek riskler (Literatürdeki riskler arasından seçilmiştir)	Literatürdeki risklerin karşılanması için verilen sigorta poliçesi türleri/isimleri
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknik risk</li> <li>• Yönetimsel risk</li> <li>• Kaynak riski</li> <li>• Performans riski</li> <li>• Tasarım riskleri</li> <li>• Yatırım/Ödemeler riski</li> <li>• İşveren riski</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sözleşmesel riskler</li> <li>• Finansal riskler</li> <li>• Politik riskler</li> <li>• Teknik riskler</li> <li>• Coğrafi riskler</li> <li>• Operatör riskleri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İzinler ve kurallar</li> <li>• Saha Girişi / Kullanım Hakları</li> <li>• İşgücü, malzeme ve ekipmanın elde edilebilirliği</li> <li>• İşgücü verimliliği</li> <li>• Ekipman verimliliği</li> <li>• Eksik/Hatalı Tasarım</li> <li>• İşteki değişiklikler</li> <li>• Yeraltı koşulları (jeoloji, yeraltı suyu)</li> <li>• Doğal afetler</li> <li>• Malzemelerin uygunluğu, mevcudiyeti ve ulaşılabilirliği</li> <li>• Hükümet politikaları, düzenlemeleri, vergi oranı değişimleri</li> <li>• İşçi uzlaşmazlıkları</li> <li>• Kazalar / Güvenlik</li> <li>• Enflasyon</li> <li>• Yüklenici yetenekleri</li> <li>• Değişiklik talimatı görüşmeleri</li> <li>• Çevresel</li> <li>• Kamusal düzensizlik</li> <li>• Geciken uyumsuzluk kararları</li> <li>• Geciken ödemeler</li> <li>• Yanlışlar / hatalı işler</li> <li>• Tazminatlar ve zararsız kılma</li> <li>• İşveren, yüklenici, alt yüklenici, tedarikçi başarısızlıkları</li> <li>• İşlerin gerçekleşen miktarları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ülke riskleri</li> <li>o Rüşvet</li> <li>o Bürokratik zorluklar</li> <li>o Yönetimsel ve hukuksal değişiklikler</li> <li>o Değişken hükümetler</li> <li>o Gelişmemiş hukuk sistemleri</li> <li>o Ekonomik koşullardaki değişiklikler</li> <li>• Ülke içi çatışmalar ve terörizm</li> <li>• Ülkelerarası Riskler</li> <li>o Kültürel farklılıklar</li> <li>o Coğrafi uzaklık</li> <li>o Ev sahibi ülkenin olumsuz tavrı</li> <li>o Ülkeler arası (Türkiye ile) olumsuz ilişkiler</li> <li>• Proje Ekibi Riskleri</li> <li>o İşveren riskleri</li> <li>o Müşavir riskleri</li> <li>o Tasarımcı riskleri</li> <li>o Ortaklık riskleri</li> <li>• İnşaat İşleri Riskleri</li> <li>o Elverişsiz fiziksel koşullar</li> <li>o Tasarım riskleri</li> <li>o Yönetimsel güçlükler</li> <li>o Finansan kaynak yetersizlikleri</li> <li>o Teknik ve teknolojik güçlükler</li> <li>o Altyüklenici bulunamaması/yetersizliği</li> <li>o Kaynak yetersizlikleri</li> <li>• Sözleşmesel Riskler</li> <li>o Düşük avans ödemesi</li> <li>o Sıkı çevresel yönetmelikler</li> <li>o Sıkı iş güvenliği yönetmelikleri</li> <li>o Sıkı kalite yönetmelikleri</li> <li>o Yoğun/sıkışık iş programları</li> <li>o Belirsiz/muğlak sözleşme şartları/ifadeleri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yangın, korozyon, patlama, yapısal kusur, savaş vb fiziksel/meteryal riskler</li> <li>• Yangın, hırsızlık vb. sonrası kar kaybı gibi dolaylı riskler</li> <li>• Kamu görüşleri, iş gücü gibi sosyal riskler</li> <li>• Hukuksal riskler</li> <li>• Hükümetler arası ilişkiler, yaptırımlar, hükümetin müdahaleleri, ülke giriş çıkış uygulamaları ve ticaret yaptırımları gibi politik riskler</li> <li>• Enflasyon, kredi uygulamaları gibi finansal riskler</li> <li>• Gelişen teknoloji, iletişim ve veri kontrolü, üreticilere bağımlılık, stok kontrolü gibi teknik riskler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Makroekonomik riskler</li> <li>• Ev Sahibi Halkın olumsuz tutumu</li> <li>• Sosyal Riskler</li> <li>• Kaynak Maliyetlerindeki Dalgalanmalar</li> <li>• Ev sahibi ülkenin kaynak yetersizlikleri</li> <li>• Sözleşmesel Problemler</li> <li>• Olumsuz Saha Koşulları</li> <li>• Proje Özellikleri ve Standartları ile İlgili Riskler</li> <li>• Tasarım Değişiklikleri</li> <li>• Düşük Verimlilik</li> <li>• Ödemeler ve nakit akışındaki gecikmeler</li> <li>• Teknoloji ve bilgi paylaşımındaki aksaklıklar</li> <li>• Projedeki diğer tarafların teknik yetersizlikleri</li> <li>• Proje paydaşları arasındaki olumsuz ve zayıf ilişkiler</li> <li>• İşverenin finansal ve teknik yetersizlikleri</li> <li>• Yüklenicinin tecrübe eksikliği</li> <li>• Yüklenicinin yönetimsel yetersizlikleri</li> <li>• Projenin karmaşıklığı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknik riskler</li> <li>• Sözleşmesel riskler</li> <li>• Coğrafi riskler</li> <li>• Tasarım riskleri</li> <li>• Yönetimsel riskler</li> <li>• Politik riskler</li> <li>• Kaynak riskleri</li> <li>• Finansal riskler</li> <li>• Eksik/Hatalı Tasarım</li> <li>• Yeraltı koşulları (jeoloji, yeraltı suyu)</li> <li>• Doğal afetler</li> <li>• Malzemelerin uygunluğu, mevcudiyeti ve ulaşılabilirliği</li> <li>• Kazalar / Güvenlik</li> <li>• Çevresel</li> <li>• Kamusal düzensizlik</li> <li>• Yanlışlar / hatalı işler</li> <li>• Yangın, korozyon, patlama, yapısal kusur, savaş vb fiziksel/meteryal riskler</li> <li>• Yangın, hırsızlık vb. sonrası kar kaybı gibi dolaylı riskler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• İnşaat tüm riskler (All Risk)</li> <li>• İşveren mali mesuliyet sigortaları</li> <li>• 3. Şahıs mali mesuliyet sigortaları</li> <li>• Makine ve şantiye tesisleri (CPM)</li> <li>• Makine kırılması sigortası</li> <li>• Kaçırılma ve fide sigortası.</li> <li>• Elektronik cihaz sigortası</li> <li>• Profesyonel sorumluluk sigortası</li> <li>• Malzemelerin sorumluluk sigortası</li> <li>• Tehlikeli madde/ atık sorumluluk</li> <li>• Kasko sigortası</li> <li>• Tekne ve deniz araçları sorumluluk sigortası</li> <li>• Politik risk sigortası</li> <li>• Nakliyat Sigortası</li> <li>• Kar Kaybı Sigortası</li> <li>• Yangın sigortaları</li> <li>• Para nakli sigortaları</li> <li>• Emniyeti suistimal sigortası</li> </ul>

## 2.2. İnşaat sektöründe en çok kullanılan sigorta türleri ve sigorta terimleri

Sigorta bakış açısında her risk sigortalanabilir değildir. Geleneksel olarak sektörde, bir sözleşme gerekliliği olarak İnşaat Tüm Riskler ve İşveren Mali Mesuliyet sigortalarını yaptırmak olağan hale gelmiştir. Ancak inşaat projelerinin barındırdığı ve Tablo 1’de belirtilen riskler oldukça önemlidir. Bu risklerin kapsanması için en çok kullanılan sigorta çeşitleri Tablo 2’de belirtilmiştir. Bu sigorta teminatı çeşitlerinin, daha önce bahsedilen risklerle uyumlu olduğu görülmüş ve bu sebeple açıklanması için seçilmiştir.

Tablo 2. İnşaat sektöründe en çok kullanılan sigorta türleri

<b>İnşaat tüm riskler (All Risk)</b>	:	Projenin başına gelebilecek her türlü doğal afetlerin, terör veya çeşitli halk hareketleri sonucu oluşabilecek zararların kapsam altına alındığı sigortadır
<b>İşveren mali mesuliyet sigortaları</b>	:	Bir iş kazası sonucu çalışanın tedavi masrafları, kendilerinin ve yakınlarının talep edebilecekleri maddi ve manevi tazminatların karşılandığı sigortadır
<b>3. Şahıs mali mesuliyet sigortaları</b>	:	Projeden kaynaklanan ve 3. Şahısların başına gelebilecek her türlü kaza sonucu oluşacak tedavi masrafları ve yine maddi ve manevi tazminat taleplerini karşılar
<b>Makine ve şantiye tesisleri (CPM)</b>	:	Projede kullanılan tüm iş makinelerinin, şantiye tesislerinin ve varsa TBM’in her türlü doğal afet, terör ve diğer dış etkenli zararlarının karşılandığı sigortadır
<b>Makine kurlması sigortası</b>	:	İş makinelerinin, doğal afetlere, dış etkenlere ve kendi doğasından kaynaklanabilecek garanti dışındaki zararlara karşı korunması için temin edilen sigorta çeşididir
<b>Kaçırılma ve fidye sigortası</b>	:	Çalışanların ihalelere veya toplantılara katılmak için farklı ülkelerdeki ziyaretleri veya yurtdışı projelerinde risk barındıran ülkelerdeki faaliyetleri sonucu başlarına gelebilecek kaçırılma ve rehin alınma olayları için fidye masraflarının ödenmesi, kriz yönetimi, acil ulaşım ve çeşitli tedavi masraflarının karşılandığı sigortadır
<b>Elektronik cihaz sigortası</b>	:	Elektronik cihazların hem dış etken hem de cihaz kapsamında ve garanti kapsamı dışında oluşabilecek belirli hasarlarını karşılayan sigortadır
<b>Profesyonel sorumluluk sigortası</b>	:	Dizayn sorumluluk tarafın mesleki faaliyetini gerçekleştirirken yaptığı bir hata sonucu oluşabilecek hasarların ve bu hasarlar sonucu oluşabilecek tazminat tutarlarının, dava ve çeşitli mahkeme masraflarının belirli şartlar ve istisnalar olmak kaydıyla karşılandığı sigortadır
<b>Tehlikeli madde/ atık sorumluluk sigortası</b>	:	Proje faaliyetleri esnasında yapılacak olan çeşitli patlatma işleri için kullanılacak kimyasalların ve bu kimyasalların kullanılması sonucu oluşacak atıkların çevreye ve proje sahasına ve imalatlarına verebileceği zararları belirli şartlar ve istisnalarla beraber karşılayan teminatır
<b>Kasko sigortası</b>	:	Projede kamyon, traktör gibi hafriyat işlerinde kullanılan ve yüksek bedelli taşıtların, göçme, toprak stabilite bozukluğu vb. etkenler sonucu oluşan hasarları karşılar

## 2.3. Sigorta sektöründe risk değerlendirmesi

İnşaat projelerinin sigortalanma aşamasında belirli kriterler dikkate alınarak riskler değerlendirilir ve bu değerlendirmenin sonucuna istinaden sigorta şartları ve fiyatları oluşturulur. İnşaat Tüm Riskler teminatı sağlanırken Türkiye’de ve dünyada geçerli birçok sigorta genel şartı esas alınabilir. Hem ülkemizde hem dünyada geçerli, inşaat ve montaj projelerinde kullanılan en yaygın genel şartlar ve klozları 2 ana grup altında sıralanabilir. Bunlardan birincisi:

- Türk Sigorta Birliği İnşaat Sigortası Genel Şartları (Tüm Risks) [18]

Dünyada ve ülkemizde kullanılan diğer en yaygın sigorta genel şartları ve klozları:

- Munich Re Contractor’s All Risk Insurance Genel Şartları ve Klozları [10]

1880 yılında Almanya’da kurulan ve günümüzde Dünya’nın en büyük reasürans şirketleri arasında yer alan Munich Re, verdiği reasürans hizmetinin yanı sıra çeşitli sigorta branşları için tüm sektörde kabul edilen ve norm haline gelmiş klozlar yayınlamıştır. Bu klozlar uluslararası tüm sigorta poliçelerinde kullanılabilir. Bu sebeple Munich Re klozlarının yer aldığı bir İnşaat Tüm Risk poliçesinde, ülke ve coğrafyalardan bağımsız olarak tüm tarafların karşılıklı olarak anlaşması ve aynı dilden konuşması oldukça kolay olmaktadır. Hem Türkiye’de hem de uluslararası projelerde karşılaşılabilecek ve daha önce sunulan risklerden, sigorta teminatı kapsamında bu çalışmada değerlendirilecek olan risk sınıflandırmaları ve karşılık olarak sunulan klozlar Tablo 3’de sunulmuştur.

#### **2.4. İnşaat proje yönetimi sınıflandırmaları ve bu sınıflara uygun klozlar**

Profesyonel bir proje yönetimi sisteminde olması gereken ve CMAA tarafından tanımlanan proje yönetimi alt sınıflandırmaları sistemsel bir bütün oluşturmakla beraber, bu sınıflandırmaların barındırdığı çeşitli risklerin karşılanması için yine inşaat tüm risk teminatına başvurulabilir. Munich Re klozları bir projenin maliyet, kalite, iş güvenliği vb. tüm elementlerine atıfta bulunabilecek içerikler barındırabilmektedir. Bu sebeple klozlar içerisinde en çok vurgulanan kapsam ve bu doğrultuda belirtilen önlemler dikkate alınarak Tablo 4'deki sınıflandırmalar yapılmıştır. Aynı zamanda CMAA tarafından 2015 yılında yayınlanan proje yönetimi standartların, diğerlerinden sonra eklenen Sürdürülebilirlik ve BIM ile ilgili sektörde yaygın olarak kullanılan klozlar bulunmamaktadır ve bu sebeple klozlardaki sınıflandırmalara bu kavramlar dahil edilmemiştir. Yine 2015 yılında proje yönetimi standartlarına eklenen risk yönetimi kavramı ise Tüm risk teminatının tamamını kapsadığı için herhangi bir sınıflandırmaya tabi tutulmamıştır.

#### **2.5. İnşaat tüm risk teminatında risk değerlendirilirken dikkate alınması gereken hususlar**

Tüm Risk teminatı özelinde Munich Re'ye klozlarına göre belirlenen risk faktörleri Tablo 5'te gösterilmektedir. Bu risklerin sigorta teminatı tarafından karşılanabilmesi için en temel kural ise, ani ve beklenmedik olmaları, yani sigorta ettiren tarafından önceden bilinmeyecek ve öngörülemeyecek bir sebepten meydana gelmiş olmasıdır.

### **3. Bulgular ve değerlendirme**

Önceki bölümlerde Tüm Risk sigortalarında bulunan genel şartlar ve proje yönetimi açısından bulunması gereken klozlar sunulmuştur. Bu bölümde ise sunulan genel şartlar ve klozlar kullanılarak kapsamlı bir Tüm Risk sigortası fiyatlama hesap aracı geliştirilmiştir. Bununla birlikte, inşaat projeleri için Tüm Risk Sigortası teklifi almak için bir kontrol listesi hazırlanmıştır.

#### **3.1. Bir proje yöneticisinin sigorta teklifi alması için örnek bir uygulama**

Hem inşaat sigortacılığı sektöründeki güncel rekabet gerçeğini göz önünde bulundurarak hem de dikkat edilmesi gereken bazı kriterleri göz önünde bulundurarak bir Tüm risk sigortası fiyatlama hesap aracı geliştirilmiştir.



Tablo 3. Literatürde yer alan inşaat sektöründeki risk tanımları ve bunların Munich Re klozları çerçevesinde sınıflandırılması

Teknik Riskler	Sözleşmesel Riskler	Coğrafi Riskler	Tasarım Riskler	Politik Riskler	Kaynak Riskleri
<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 101 Tünel ve Galeri İnşaatı İşleri Özel Şartları</li> <li>o MR 104 Baraj ve Su Rezervuarlarına İlişkin Özel Şartlar</li> <li>o MR 111 Toprak Kayması Sonucu Enkaz Kaldırma Giderleri Teminatı</li> <li>o MR 118 Su Kuyuları Delme İşlemleri Özel Şartı</li> <li>o MR 120 Vibrasyon (Titreşim), Taşıyıcı Elemanların Zayıflaması veya Kaldırılmasına İlişkin Teminat Klozu</li> <li>o Munich Re “Wet Risks” Ek klozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 002 Çapraz Sorumluluk Klozu</li> <li>o MR 003 Bakım Ziyaretleri Klozu</li> <li>o MR 004 Genişletilmiş Bakım Devresi Klozu</li> <li>o MR 005 Yapı ve Montaj Sigortaları İş Programı Özel Şartı</li> <li>o MR 100 Makine ve Tesisat İçin Tecrübe Devresi Klozu</li> <li>o MR 102 Yeraltı Kablo, Boru ve Diğer Donanımlara İlişkin Özel Koşullar</li> <li>o MR 103 Ekinlere, Ormanlara ve Her Türlü Dikili Kültür Bitkilerine Gelebilecek Kayıp ve Zararlar</li> <li>o MR 113 Yurt İçi Taşımalar Teminatı</li> <li>o MR 116 Kısmi Kabul ve İşletmeye Alınan İşlerle İlgili Teminat Klozu</li> <li>o MR 119 İşverenin veya sigorta ettirenin mülkiyetinde, zilyetliğinde, emanetinde veya kontrolünde bulunan bina veya tesislere ilişkin kloz</li> <li>o 3. Şahıs Sorumluluk Teminatı</li> <li>o Otomatik süre artışı klozu</li> <li>o Otomatik değer artışı klozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 008 Deprem Bölgesindeki Yapılar Klozu</li> <li>o MR 009 Deprem Teminatında Maddi ve Sorumluluk Hasarları İstisna Klozu</li> <li>o MR 010 Sel Seylap Teminatında Maddi ve Sorumluluk Hasarları İstisna Klozu</li> <li>o MR 012 Fırtına ve Fırtınaya Bağlı Maddi ve Sorumluluk Hasarları İstisna Klozu</li> <li>o 72 Saat Klozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 008 Deprem Bölgesindeki Yapılar Klozu</li> <li>o MR 106 İşin Bölümler Halinde Yapılması Klozu</li> <li>o MR 110 Yağış, Sel ve Seylap Riskleri ile İlgili Güvenlik Önlemleri Klozu</li> <li>o MR 114 Seri Hasarlar Klozu</li> <li>o MR 115 Plan ve Proje Yapımcısı Teminatı</li> <li>o MR 117 Temiz Su ve Pis Su Borularının Döşenmesine İlişkin Teminat</li> <li>o MR 121 Temel ve İstinat Duvarlarına İlişkin Kloz</li> <li>o Planlar ve dokümanlar klozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 001 Grev, Lokavt, Kargaşalık, Halk Hareketleri ve Terör</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 006 Fazla mesai, gece işçiliği, tatil günlerinde çalışma ve seri taşıma ek giderleri teminatı</li> <li>o MR 007 Uçakla Taşıma Ek Giderleri Teminatı</li> <li>o MR 013 Şantiye Dışı Depolanın İnşaat Malzemeleri Teminatı</li> <li>o MR 107 Şantiye Binaları ve Malzeme Depoları Teminatı</li> <li>o MR 108 İnşaat Makineleri, Tesisat ve Ekipmanları Garanti Klozu</li> <li>o MR 109 İnşaat Malzemeleri Garanti Klozu</li> <li>o MR 112 Yangın Söndürme Araç – Gereçleri ve Yangına Karşı Alınacak Güvenlik Önlemlerine İlişkin Özel Koşullar</li> <li>o 50/50 Klozu</li> <li>o Profesyonel hizmetler klozu</li> </ul>

Tablo 4. CMMA’ya göre inşaat proje yönetimi sınıflandırmaları ve bunların Munich Re klozları çerçevesinde sınıflandırılması.

Genel Proje Yönetimi	Maliyet Yönetimi	Zaman Yönetimi	Kalite Yönetimi	Sözleşme İdaresi	İş Güvenliği Yönetimi
<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 008 Deprem Bölgesindeki Yapılar Klozu</li> <li>o MR 101 Tünel ve Galeri İnşaatı İşleri Özel Şartları</li> <li>o MR 102 Yeraltı Kablo, Boru ve Diğer Donanımlara İlişkin Özel Koşullar</li> <li>o MR 104 Baraj ve Su Rezervuarlarına İlişkin Özel Şartlar</li> <li>o MR 106 İşin Bölümler Halinde Yapılması Klozu</li> <li>o MR 115 Plan ve Proje Yapımcısı Teminatı</li> <li>o MR 117 Temiz Su ve Pis Su Borularının Döşenmesine İlişkin Teminat</li> <li>o MR 118 Su Kuyuları Delme İşlemleri Özel Şartı</li> <li>o MR 121 Temel ve İstinat Duvarları Kolonlarına İlişkin Kloz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 006 Fazla mesai, gece işçiliği, tatil günlerinde çalışma ve seri taşıma ek giderleri</li> <li>o MR 007 Uçakla Taşıma Ek Giderleri Teminatı</li> <li>o MR 009 Deprem Teminatında Maddi ve Sorumluluk Hasarları İstisna Klozu</li> <li>o MR 010 Sel Seylap Teminatında Maddi ve Sorumluluk Hasarları İstisna Klozu</li> <li>o MR 012 Fırtına ve Fırtınaya Bağlı Maddi ve Sorumluluk Hasarları İstisna Klozu</li> <li>o MR 107 Şantiye Binaları ve Malzeme Depoları Teminatı</li> <li>o MR 108 İnşaat Makineleri, Tesisat ve Ekipmanları Garanti Klozu</li> <li>o MR 109 İnşaat Malzemeleri Garanti Klozu</li> <li>o MR 111 Toprak Kayması Sonucu Enkaz Kaldırma Giderleri Teminatı</li> <li>o Planlar ve dokümanlar klozu</li> <li>o Profesyonel hizmetler klozu</li> <li>o 72 saat klozu</li> <li>o Munich Re “Wet Risks” Ek klozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 005 Yapı ve Montaj Sigortaları İş Programı Özel Şartı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 003 Bakım Ziyaretleri Klozu</li> <li>o MR 004 Genişletilmiş Bakım Devresi Klozu</li> <li>o MR 100 Makine ve Tesisat İçin Tecrübe Devresi Klozu</li> <li>o MR 114 Seri Hasarlar Klozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 001 Grev, Lokavt, Kargaşalık, Halk Hareketleri ve Terör</li> <li>o MR 002 Çapraz Sorumluluk Klozu</li> <li>o MR 103 Ekinlere, Ormanlara ve Her Türlü Dikili Kültür Bitkilerine Gelebilecek Kayıp ve Zararlar</li> <li>o MR 113 Yurt İçi Taşımalar Teminatı</li> <li>o MR 116 Kısmi Kabul ve İşletmeye</li> <li>o MR 119 İşverenin veya sigorta ettirenin mülkiyetinde, zilyetliğinde, emanetinde veya kontrolünde bulunan bina veya tesislere ilişkin kloz</li> <li>o MR 120 Vibrasyon (Titreşim), Taşıyıcı Elemanların Zayıflaması veya</li> <li>o 3. Şahıs Sorumluluk Teminatı</li> <li>o Otomatik değer artışı klozu</li> <li>o Otomatik süre artışı klozu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o MR 110 Yağış, Sel ve Seylap Riskleri ile İlgili Güvenlik Önlemleri Klozu</li> <li>o MR 112 Yangın Söndürme Araç – Gereçleri ve Yangına Karşı Alınacak Güvenlik Önlemlerine İlişkin Özel Koşullar</li> <li>o MR 013 Şantiye Dışı Depolanın İnşaat Malzemeleri Teminatı</li> </ul>

Tablo 5. Tüm risk sigortalarına eklenen riskler ve gereken dokümanlar

İnşaat Sigortacılığında Var Olan Riskler, (Munich Re, 2016)	Risklerin Tespiti İçin İstenen Dokümanlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eksik/hatalı tasarım</li> <li>• Yeni ve/veya prototip inşaat metotları</li> <li>• Daha önce kullanılmayan ve/veya davranışları bilinmeyen materyaller</li> <li>• Yüklenici ve/veya denetimci tecrübe eksikliği</li> <li>• Doğal afetler</li> <li>• Sektörde gelişmelerin ve yeniliklerin son derece sık gerçekleşmesi</li> <li>• Ürün ve imalatların beklenenden erken tamamlanması</li> <li>• İnşaat/Montaj/Yerleştirme detaylarının daha önce yapılmamış, alışık olunmayan detaylar içermesi</li> <li>• İnşaat sahasının çevresindeki 3. şahıs riskleri</li> <li>• İnşaat sahasının lokasyonundan kaynaklanan diğer çevresel riskler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A. Zemin raporu</li> <li>B. İş Programı</li> <li>C. Yerleşim Planı</li> <li>D. Bedel Kırılımı</li> </ul>

Fiyatlama hesap aracı oluşturulurken inşaat sigortacılığı sektöründe deneyimli (2-30 yıl arasında deneyim sahibi) 10 uzman ile birebir görüşmeler yapılmıştır. Fiyatlama hesap aracında inşaat sigortacılığı sektöründe deneyimli kişilerle görüşülmesinin nedeni, sektörde fiyatlama yapılırken genel olarak fiyatlamayı yapan kişilerin kendi deneyimlerini göz önünde bulundurmasıdır. Örnek Tüm risk sigortası girdileri aşağıdaki gibidir:

Proje lokasyonu: İstanbul

Deprem grubu: 1. Deprem grubu

Proje bedeli: 629.870.000 TL

İnşaat malzemeleri ve ekipmanları (CPE) bedeli: 1.000.000 TL

MR 111 Enkaz Kaldırma Klozu limiti: 12.617.400

MR 119 Mevcut Tesisler Teminatı klozu limiti: 10.000.000 TL

3. Şahıs Mali Mesuliyet limiti: 10.000.000 TL

İnşaat makineleri ve ekipmanları (CPM) bedeli: 5.000.000 TL

- Terör riski: Bölge İstanbul'da merkezi bir konumdadır, ancak projenin yapılış amacı itibarıyla kamu yatırımı olmaması, özel bir yatırım olması ve bina inşaatı olması, aynı zamanda projenin bulunduğu ilçe de göz önünde bulundurulduğunda, terör riski düşük olarak değerlendirilmiştir

- Otomatik süre uzatımı klozu: Otomatik süre uzatımı limiti 6 ay ile sınırlandırılmıştır

- Bakım devresi klozu: MR 004 Genişletilmiş Bakım Devresi klozu 2 yıl limit ile verilmiştir

- Test devresi: MR 100 Makine ve Tesisat İçin Tecrübe Devresi Klozu 8 hafta limit ile verilmiştir

- Dokümanlar: Projeye ait ihtiyaç duyulan zemin raporu, iş programı, bedel kırılımı ve yerleşim planı temin edilmiştir

- Zemin raporu: Projeye ait zemin raporu incelendiğinde, zeminde drenaj ilgili alınması gereken önlemlerden bahsedilmektedir. Bu sebeple zemin raporunda risk "orta" olarak değerlendirilmiştir

- 3. Şahıs Riskleri: Proje İstanbul'da oldukça merkezi ve etrafı 3. Şahıslara ait binalarla çevrili bir konumdadır. Bu sebeple 3. Şahıs riskleri "yüksek" olarak değerlendirilmiştir.

- EML - Tahmin Edilen En Büyük Hasar Yüzdesi: Proje bedelinin tamamı tek bir binaya ait olup, projenin son evrelerine yakın bir zamanda olası bir yangın senaryosu düşünüldüğünde gerekli önlemlerin alındığı varsayılarak binanın tamamının yangından

korunduğunu ancak yarısının yangından zarar göreceği varsayılmıştır. Bu durumda EML %50 olarak hesaplanmıştır

- Tünel yüzdesi: Projenin tamamı bina inşaatı olup, tünel imalatı bulunmamaktadır.
- Bina yüksekliği: Projeye ait binanın kat sayısı 45'dir
- Sanat yapıları: Projenin tamamı bina inşaatı olup, tünel imalatı bulunmamaktadır
- Poliçe şartları: Poliçe standart Tüm risk şartları doğrultusunda verilmiş, ancak özellikle Türkiye'de inşaat sigortacılığında yaşanan rekabetten ötürü, proje lokasyonu İstanbul'da 1. Bölgede olmasına rağmen, teklifi güçlendirmek için deprem muafiyeti bir miktar sigortalı lehine verilmiştir. Sigortacı gözüyle değerlendirildiğinde bu muafiyet iyileştirmesi için %5 ek prim öngörülmüştür. Tüm bu bilgiler ışığında belirlenen veriler, önerilen fiyatlama hesap aracı üzerinde uygulandığında elde edilen prim: 309.778 TL olmuştur. Bu örnek proje için gerçek bir sigorta firmasından alınan birebir aynı şartlardaki gerçek Tüm risk teklifindeki teklif edilen prim ise: 314.000 TL'dir. Ulaşılan sonuç fiyatlama hesap aracı üzerinde aşağıdaki Tablo 6'da belirtilmiştir.

### **3.2. Bir proje yöneticisinin sigorta teklifi alması için örnek bir uygulama**

Yukarıda yer alan fiyatlama önerisinde de yer alan dokümanlar ve bu dokümanların içeriği yükleniciler için teklif alma aşamasında oldukça önemlidir. Bu dokümanların varlığı ve içerisinde yer alan bilgilerin doğruluğu sonucu yükleniciler projelerine yönelik daha uygun/sağlıklı teklifler alabilmektedir. Proje yönetiminin bu teklif alma sürecine katkı sağlaması açısından sigortacılara iletilen dokümanların ve içerdiği bilgilerin kontrolünü sağlaması önemlidir. Bu sebeple bu dokümanlar ve içerdiği gereken bilgiler için Tablo 7'de sunulan kontrol listesi hazırlanmıştır. Bu tarife içerisinde yer alan fiyatlar minimum fiyatlardır ve projenin bulunduğu deprem bölgesi doğrultusunda bu fiyatların altında poliçe fiyatı verilmesi kanunlara aykırıdır. Bununla beraber inşaat tüm risk fiyatlamasını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Ancak özellikle Türkiye'de inşaat sektöründeki rekabette yaşanan artış, Tüm risk sigortalarına da büyük bir yansıma yapmıştır. Bu sebeple sigorta şirketleri prim kazancını arttırmak için bazı faktörleri göz ardı edebilmektedir. Yukarıdaki belgeler ve içerdikleri bilgilerin sağlanma yüzdesi arttıkça, proje yönetiminin projeye özgün, projenin ihtiyaçlarını karşılayan ve hasar ödeyebilen bir poliçe satın alma oranı yükselecektir.

## **4. Sonuç ve öneriler**

Karmaşık yapı çeşitliliğinin ve ileri teknolojilerin hızla arttığı günümüz inşaat sektöründe özellikle müteahhitlerin Türkiye'deki aktivitelerinin gelişmesi ve proje yönetiminin de bu gelişime ayak uydurabilmesinin sigorta ayağına katkıda bulunabilmek için hazırlanan bu makalede sektöre dair çeşitli çıkarımlarda bulunmak mümkündür. Bu çalışmada öncelikle, müteahhitlerin ve proje yöneticilerinin inşaat projelerinin barındırdığı riskleri ve bu risklerin sigorta sektöründeki karşılığını öğrenebilmeleri için geniş bir literatür araştırması yapılmış ve sigortacılıkta yaygın kullanılan terimlerden, proje yönetimi sınıflarına; en sık karşılaşılan sigorta ve risk türlerine bu çalışmada yer verilmiştir. Proje yöneticileri, inşaat sigortasını proje yönetimi içerisinde yalnızca risk yönetimi alanında değil, diğer alanlarda da etkin bir şekilde kullanabilirler. Bu makalede tanıtılan Munich Re klozlarının ve diğer ek klozların proje yönetimi içerisindeki genel proje yönetimi, maliyet yönetimi, zaman yönetimi, kalite yönetimi, sözleşme idaresi ve iş güvenliği yönetimi alanlarındaki katkısı da yadsınamaz. Bu amaçla bu çalışmada sıklıkla kullanılan Tüm Risk sigortaları

Tablo 6. Tüm risk teminatı fiyatlama hesap aracı önerisi için örnek uygulama

TÜM RİSK TEMİNATI FİYATLAMA HESAP ARACI ÖNERİSİ												
Kur	TL											
Proje Başlangıç Tarihi	23.11.2019					Bakım Devresi Başlangıç		23.11.2021				
Proje Bitiş Tarihi	23.11.2021					Bakım Devresi Bitiş		23.11.2023				
Proje Süresi (Gün)	731	Proje Süresi (Ay)	24	Proje Süresi (Yıl)	2	Bakım Süresi (Gün)	730	Bakım Süresi (Ay)	24	Bakım Süresi (Yıl)	2	
Deprem Tarifesi	Grup	Sınıf	Süre (Yıl)	Koastürans	Muafiyet	Limit	Minimum Deprem Primi					
	1	A	3	-	-	-	26.250					
Tüm Risk Teminatları	CAR	CPE	Proje Tipi	Terör	Enkaz Kaldırma	Mevcut Tesisler	TPL	CPM	Otomatik Süre Uzatımı	Bakım	Test Devresi	
Teminat Bedelleri/Limitleri	629.870.000	1.000.000	-	-	12.617.400	10.000.000	10.000.000	5.000.000	-	-	-	
Teminat Kriterleri	-	-	Üstyapı - Bina, yardımcı tesisler, geçici barakalar	Düşük	Orta	-	-	1,5	3-6	Genişletilmiş Bakım Devresi Klozu >1 Yıl	<8 Hafta	
Prim	26.250	10.000	189.520	189.520	190.780	195.787	198.791	213.812	215.950	218.109	218.109	
Risk Değerlendirme Kriterleri	Zemin Raporu eksik mi?	İş Programı eksik mi?	Bedel Kırılımı eksik mi?	Yerleşim Planı eksik mi?	Zemin Raporunda belirtilen riskler	3. Şahıs riskleri	EML - Tahmin Edilen En Büyük Hasar Yüzdesi	Tünel yüzdesinin proje bedeline oranı	Bina Yüksekliği	Sanat yapılarının proje bedeline yüzdesi	Poliçe şartları (muafiyetler, genişletmeler, istisnalar vb.) ile ilgili poliçede yapılabilecek indirimler veya arttırmalar	
Kriterler	<b>Hayır</b>	<b>Hayır</b>	<b>Hayır</b>	<b>Hayır</b>	<b>Orta</b>	<b>Yüksek</b>	<b>%30-%60</b>	-	<b>&gt;25</b>	-	<b>5%</b>	
Prim	<b>218.109</b>	<b>218.109</b>	<b>218.109</b>	<b>218.109</b>	<b>220.290</b>	<b>224.696</b>	<b>226.943</b>	<b>226.943</b>	<b>295.026</b>	<b>295.026</b>	<b>309.778</b>	
<b>TOPLAM</b>												
	Prim		Fiyat (rate-binde) (%)									
<b>Yıllık</b>	154.677		0,239									
<b>Proje Süresince</b>	309.778		0,480									

üzerinde durulmuştur. Tüm risk sigortalarının ve kullanılan klozların proje yönetimi katkısının maksimum oranda olabilmesi için bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak, klozların proje ve risk yönetimine katkısını genişletmek için birtakım öneriler getirilmiştir. Öncelikle, sigorta bilincinin gelişmesi ve proje yönetimi adımları içerisinde her alanda sağlıklı bir şekilde çalışması için ilgili personellere şirket içinde eğitimler düzenlenmelidir. Yüklenicilerin sigorta ile ilgilenen departmanları aynı anda birden fazla sigorta projesi üzerinde çalışabilmektedir. Özellikle, inşaat projelerinin ve dolayısıyla şantiyelerin dinamik yapısı ve alınan anlık, kritik kararlar düşünüldüğünde sigorta konularına hâkim ve yetkin kişilerin proje yönetimin her aşamasında yer alması risk yönetimine büyük bir katkı sağlayacaktır. Hasar anında sigorta departmanlarından bağımsız olarak alınması gereken hızlı kararların doğruluğu arttıkça, sigorta teminatlarının da sektöre katkısı artacaktır. Ayrıca, bazı yüklenici firmalar özellikle işverenin tepkisinden çekindiği için, kendi hatalarından kaynaklı birçok hasarı gizli tutmaktadır. Öyle ki, bazı hasarların sadece proje ekibi içerisinde kaldığı, merkez ofise bildirilmediği durumlar bile olmaktadır. Ancak bilinmelidir ki, sigorta kavramı özellikle yüklenicilerin kendi hatalarından ve dikkatsizliklerinden kaynaklanan, ani ve beklenmedik hasarlar için bulunmaktadır. Hem bu durum hem de çalışmada bahsedilen sigorta ve inşaat ilişkisi ile ilgili tüm bilgiler proje yönetimi tarafından tüm çalışanlarına iletilmelidir. Proje yönetimi, işveren ve yüklenici bu kavramlar hakkında bilinçlenmeli, her türlü hasarlarını kapsayacak sigortayı tespit etmek ve taleplerini yapabilmek konusunda kendilerini geliştirmelilerdir.

Bu gelişime katkıda bulunmak için hem sigorta satın alım departmanı hem de danışmanlık hizmeti ile bu konuda yetkin kişiler proje yönetimi çalışanlarını düzenli eğitime tabi tutmalıdır. Tekrarlanan sunumlarda özellikle hasar örnekleri üzerinden gidilerek, hasarların sigortanın ayrılmaz bir parçası olduğu ve tazmin edilebileceği gerçeği çalışanlara aşılmalıdır. Bu bilincin oluşması şantiye içerisinde iletişim kopukluğunu gidermeye, hasarların örtbas edilmesinin önüne geçilmesine ve sonucunda sigorta şartları doğrultusunda tazmin edilmesine katkı sağlayabilir.

Tablo 7. Tüm Risk teklifi almak için hazırlanmış kontrol listesi.

Doküman	Sağlanması Gereken Bilgi	Temini
A. Zemin raporu	1. Projenin yapılacağı lokasyonun bulunduğu deprem bölgesi	
	2. Zemin türü	
	3. Sıvılaşma	
	4. Oturma Problemi	
	5. Uygulanması önerilen yöntemler	
B. İş Programı	1. İş programının mevsim koşulları ile uyumu	
	2. Projenin geçirdiği kış mevsimi sayısı	
	3. Kritik ekipmanların sahada bekleme süresi	
	4. Sigortacının kendi yönetmelikleri gereği sigortalayamayacağı hususlar	
C. Yerleşim Planı	1. 3. Şahıs riskleri	
	2. Lokasyon bazından doğal afet riskleri ve diğer riskleri	
	3. Yangın mesafesi	
D. Bedel Kırılımı	1. Riskli işlerin toplam maliyete oranı	

Bir diğer öneri ise BIM ve sürdürülebilirlik konuları üzerine olacaktır. BIM ve sürdürülebilirlik kavramları hem inşaat sektöründe hem de inşaat sektöründe oldukça yenidir. Her iki kavram da henüz Türk inşaat sektöründe yeni yeni düzene oturtulmaya başlanmıştır ancak bu kavramların en kısa zamanda sektörü oluşturan birçok yapı taşı içerisinde yerini alması ve inşaat projelerinin ayrılmaz bir ögesi olması gerekmektedir. Sektörde sözleşme, şartname vb. temel noktalarda revize edilmesi ve güncellenmesi gereken birçok nokta bulunmaktadır. Tüm risk sigortalarında BIM ve sürdürülebilirlik klozlarına da yer verilmesi ve hasar tazminatı almak için belirli klozlarda ön koşul

olarak belirtilmesi bu kavramların proje yönetiminde kalıcı bir şekilde yer etmesi için büyük bir katkı sağlayacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği, CMAA, **İnşaat (Proje) Yönetiminin Hizmet ve Uygulama Standardı**, 3. Baskı, (2015).
- [2] The International Marine Contractors Association, IMCA, **Identifying and Assessing Risk in Construction Contracts**, (2006).
- [3] Bölükbaşı, A.G., Baturalp E., **Sigortanın Temel Prensipleri**. İstanbul, (2009).
- [4] Uralcan, Ş., **Temel Sigorta Bilgileri ve Sigorta Sektörünün Yapısal Analizi**. İstanbul, (2004).
- [5] Geyik, B., İnşaat all risk sigortalarında risk değerlendirmesi ve uygun fiyatlandırma için öneriler, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2011).
- [6] Tüfekçi, A. Sigorta brokerliği firmalarının inşaat sigortaları uygulamalarındaki işlevi, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006).
- [7] Özdiñer, E., İnşaat sigortaları ve hasar tespiti, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
- [8] ter Haar, R., & Levine, M., Appointing insurance brokers and the role of insurance brokers. **In Construction Insurance**, Informa Law from Routledge, 155-164, (2013).
- [9] Karabay, M., Uluslararası inşaat sektöründe politik risk ve bulanık kümeler yardımıyla analizi için bir yöntem önerisi, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (1997).
- [10] Munich Re klotzları. (t.y.). Erişim: 5 Ocak 2020, <https://www.imia.com/>.
- [11] Dikmen, I., Birgonul, M.T., Han S., Using fuzzy risk assessment to rate cost overrun risk in international construction project. **International Journal of Project Management**, 25, 494-505, (2006).
- [12] IMUA Construction, Installation & Contractors' Equipment Committee, An Overview of Underwriting Concerns in Developing PML Estimates for Building & Civil Works Construction, (1993).
- [13] Bu-Quammaz, A.A., Dikmen, I., Birgonul, M.T., Risk assessment of international construction projects using the analytic network process. **NRC Research Press**, (2009).
- [14] Şener, B., İnşaat şirketlerinde riskin algılanması ve risk azaltıcı tedbirler, Doktora tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2012).
- [15] Liu, J., Zhao, X., Yan P., Risk paths in international construction projects: case study from chinese contractors. **Journal of Construction Engineering and Management**, 142(6), (2016).
- [16] Dikmen, I., Birgonul, M.T., Anac C., Aouad G., Learning from risks: A tool for post-project risk assessment. **Automation in Construction**, 18, 42-50, (2008).
- [17] Serpella, A. F., Ferrada, X., Howard R., Rubio L., Risk management in construction projects: a knowledge-based approach, **27th IPMA World Congress**, (pp.653-662). Croatia: Pontificia Universidad Catolica de Chile, October 1-3, (2014).
- [18] Türk Sigorta Birliği İnşaat Sigortası Genel Şartları. (t.y.). Erişim: 5 Ocak 2020, <https://www.tsb.org.tr/>

# Defining phylogenetic relationship between the genera *Opopanax* and *Crenosciadium* using nuclear and chloroplast DNA sequence data

Taner ÖZCAN<sup>1,\*</sup>, Özlem ÇETİN<sup>2</sup>, Mustafa ÇELİK<sup>3</sup>, Fatih ALBAYRAK<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Biology Education, Faculty of Education, Balıkesir University, Balıkesir, Turkey

<sup>2</sup>Department of Biotechnology, Faculty of Science, Selçuk University, Konya, Turkey

<sup>3</sup>Advanced Technology Research and Application Center, Selçuk University, Konya, Turkey

<sup>4</sup>Department of Molecular Biology and Genetics, Institute of Natural and Applied Sciences, Balıkesir University, Balıkesir, Turkey

Geliş Tarihi (Received Date): 16.10.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 03.04.2021

## Abstract

A phylogenetic study of the *Opopanax* and *Crenosciadium* was conducted to elucidate their circumscription and infrageneric relationships. Sequence data from nrDNA ITS, cpDNA matK and trnL-F were used to determine their phylogenetic relationship. Polymerase Chain Reaction (PCR) amplifications of all regions were performed using universal primers. Maximum Likelihood (ML) trees were constructed using PAUP\* software, another phylogenetic tree of ITS sequences showing node ages was obtained from MrBayes programme and Neighbour Net Diagrams were constructed using Splits Tree programme. Our results clearly showed that *Smyrniopsis* and *Opopanax* are allied strongly with *Petroedmondia syriaca*, *Magydaris panacifolia*, and *Crenosciadium siifolium*.

**Keywords:** *Opopanax*, *Crenosciadium*, Apiaceae, Phylogeny

\* Taner ÖZCAN, ozcant@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1683-7297>  
Özlem ÇETİN, ozlemcetin8419@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2886-3409>  
Mustafa ÇELİK, mstfclk.54@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2708-9944>  
Fatih ALBAYRAK, albayrakfatih09@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2712-2668>

## *Opopanax* ve *Crenosciadium* cinsleri arasındaki filogenetik ilişkinin çekirdek ve kloroplast DNA dizisi verilerinin kullanılarak belirlenmesi

### Öz

*Opopanax* ve *Crenosciadium* üzerine filogenetik bir çalışma, cinslerin sınırlarını ve cinsler arası ilişkilerini aydınlatmak için yapıldı. Çekirdek DNA'sından ITS, kloroplast DNA'sından *matK* ve *trnL-F'*'den elde edilen dizi verileri, filogenetik ilişkilerini belirlemek için kullanıldı. Tüm bölgelerin Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) amplifikasyonları evrensel primerler kullanılarak yapıldı. Maksimum Olabilirlik (ML) ağaçları, PAUP\* yazılımı kullanılarak oluşturuldu, ITS dizilerinin nod yaşlarını gösteren bir diğer filogenetik ağacı MrBayes programından elde edildi ve Komşu Ağ Diyagramları, Splits Tree Programı kullanılarak oluşturuldu. Sonuçlarımız, *Smyrniopsis* ve *Opopanax*'ın *Petroedmondia syriaca*, *Magydaris panacifolia* ve *Crenosciadium siifolium* ile güçlü bir şekilde yakın ilişkili olduğunu açıkça gösterdi.

**Anahtar kelimeler:** *Opopanax*, *Crenosciadium*, *Apiaceae*, *Filogeni*.

### 1. Introduction

The flowering plant family *Apiaceae* (*Umbelliferae*) comprises approximately 450 genera and 3700 species [1-2]. It is widely distributed in the temperate zones of both the northern and southern hemispheres and is highly diverse in Central Asia [3]. *Apiaceae* comprises 105 genera and approximately 493 species in Turkey [4].

The genus *Opopanax* W.D.J.Koch is distributed in southern Europe, Mediterranean region and Western Asia. *Crenosciadium* Boiss. & Heldr. is a monotypic endemic genus, which is distributed in Central Anatolia in Turkey. *Opopanax* is represented by two species, *O. hispidus* Griseb. and *O. persicus* Boiss. & Heldr., in *Flora Iranica* Rechinger [5], by only one species, *Opopanax hispidus*, in *Flora of Cyprus* [6], by only one species, *O. armeniacum* Bordz., in *Flora of USSR* [7], by two species, *O. chironium* W.D.J. Koch and *O. hispidus* in *Flora Europaea* [8]. According to *Flora of Turkey* and the latest study, *Opopanax* represented three species in Turkey [9-10]. Turkey is the only area where all *Opopanax* species can proliferate together. *O. persicus* has limited geographical extension in the world and is distributed in Iran, Armenia, and Eastern part of Turkey. The eastern part of Turkey is the western boundary of distribution of this species. *O. hispidus* has wider geographic distribution than the other *Opopanax* species and it is distributed from Europe to the western parts of Asia. *O. chironium* is distributed from the western part of Europe to Balkans.

The earlier molecular studies on *Apiaceae* family showed that there were problems in most tribal and intergeneric classifications. The classification of the family was reconstructed based on molecular data. The first comprehensive molecular phylogenetic analysis of *Opopanax*, based ITS sequence [11] show that the genus very closely related to *Smyrniopsis* Boiss. and these positions were confirmed by Ajani et al. [12].



The aim of this study was to determine the genetic relationships between *Opopanax* and its allies and to resolve their unclear and controversial status by using a DNA-based molecular marker system.

## 2. Material and methods

### 1.1. Plant specimens

Specimens were collected from different localities in Turkey (Appendix 1) and plant samples were identified according to Tutin [8], Chamberlain [9], Meikle [6], Shishkin [7] and Rechinger [5].

### 1.2. DNA extraction and amplification

DNA extractions (both of gDNA and cpDNA) were performed using the DNeasy Plant Mini Kit (QIAGEN, Germany), following the manufacturer's instructions with some modifications (incubation at 65 °C and waiting on the ice have been set to 30 minutes). Powdered plant tissues were obtained from dried green leaves using liquid nitrogen in a mortar with a pestle 100 µL of elution buffer was used for each the first and the second elutions. PCR procedures were performed with the second elutions. ITS region of studied taxa was amplified using ITS4 (5' TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC 3') and ITS5a (5' GGA AGG AGA AGT CGT AAC AAG 3') primers [13-14]. For the chloroplast DNA, two different regions were used: *trnL-c* as forward (5'-CGA AAT CGG TAG ACG CTA CG-3') and *trnL-f* as reverse (5'-ATT TGA ACT GGT GAC ACG AG-3') primers [15] for *trnL-F* region, and *matK-3F\_KIM* (forward) (5'-CGT ACA GTA CTT TTG TGT TTA CGA G-3') and *matK-1R\_KIM* (reverse) (5'-ACC CAG TCC ATC TGG AAA TCT TGG TTC-3') primers [16] were used to amplify the desired *matK* region. PCR conditions set to 95°C for 5 min initial denaturation, 35 cycles of 94 °C for 1 m denaturation, 50 °C for 1 m annealing, and 72 °C for 1 min extension, 72 °C for 10 min final extension. PCR products were visualized by agarose gel.

### 1.3. DNA sequencing and analysis

The amplified fragments were sequenced using the same PCR primers by BGI Europe. ITS1+5.8S rDNA+ITS2 nrDNA, *matK* and *trnL-F* cpDNA sequences of the studied taxa were edited Sequencher 5.4 and aligned via Bioedit version 7.2.5. PAUP\* 4.0.164 [17] were used to construct phylogenetic trees. Phylogenetic tree criterion was set to likelihood. Bootstrap resampled method was chosen, and search type were set full heuristic. Swapping algorithm was TBR. Also, MrBayes programme [18] was used to obtain another phylogenetic tree to show the node ages of different clades. In addition to these phylogenetic tree, Neighbour Net diagrams were done using Splits Tree 5.0.12.

## 3. Results and discussion

**ITS data**—The results were obtained from 56 specimens, *Opopanax* group and 13 outgroups genera (*Echinophora* L., *Ammi* L., *Anethum* L., *Apium* L., *Grammosciadium* DC., *Caropodium* Stapf & Wettst. ex Stapf.) *Pimpinella* L., *Lagoecia* L., *Seseli* L., *Cymbocarpum* DC., *Tordylium* Tourn. ex L., *Heracleum* L., *Tetrataenium* (DC.) Manden., *Pastinaca* L.) (Figure 1-3). The aligned ITS sequences yielded a total of 576 characters and contained 267 conserved sites, 68 variable sites, of which 241 were

parsimony informative. ML tree generating from ITS dataset is shown in Figure 1, another phylogenetic tree conducted by MrBayes and a Neighbour-Net diagram are given in Figure 2 and 3, respectively. Maximum Likelihood and MrBayes trees constitute seven major clades.

The member of the first clade is belonging to tribus Echinophoreae. *Echinophora* was first included in Smyrneae by de Candolle [19], and then tribus Echinophoreae was recognized as comprising the genera *Echinophora* and *Pycnocycla* Lindl. [20]. This circumscription of the tribe was expanded to include *Anisosciadium* DC. and *Dicyclophora* Boiss. by Downie et al. [21].

The members of the third clade are belonging to genera *Grammosciadium* in tribus Careae. The members of fourth and fifth clades are *Pimpinella tragium* Vill. and *Lagoecia cuminoides* L. *Smyrneae* was recognized as comprising the genera *Lagoecia* and *Magydaris*, and the others by de Candolle [19]. Then *Lagoecia* was transferred to Saniculeae by Bentham & Hooker [20]. According to phylogenetic analysis, *Lagoecia* is closely related to members of Pyramidoptereae.

The members of the sixth clade are represented by only two taxa, *Ammi* and *Anethum*, in this study. Historically, *Anethum* was placed in tribe Peucedaneae with *Opopanax* and other genera, but phylogenetic studies have revealed that *Anethum* is closed to tribe Apieae.

The members of seventh clade are represented by *Opopanax*, *Smyrniopsis*, *Petroedmondia*, *Magydaris* in this study. The “*Opopanax*” clade is recognized as comprising the genera *Opopanax*, *Smyrniopsis*, *Crenosciadium*, *Petroedmondia* Tamamsch., *Magydaris* W.D.J.Koch ex DC. *Smyrniopsis* and *Opopanax* are allied strongly with *Petroedmondia syriaca*, *Magydaris panacifolia*, and *Crenosciadium siifolium* within the Apioid super clade in study of Ajani et al. [12] and our phylogenetic analyses strongly supported this alliance. In addition to this phylogenetic tree, the other phylogenetic tree based on Bayesian analysis presented in Figure 2 supported ML analysis. And also, clustering of the mentioned genera members is shown the phylogenetic relationships of *Opopanax* and its allies.

The genus *Smyrniopsis* which placed in Smyrnieae of classification of Drude [22] is nested *Opopanax* clade and is more closely related to *Opopanax* than the other genera placed in this group. The tribal name Smyrnieae has been used by virtually all authors of Apiaceae suprageneric classifications. First described by Sprengel [22] and later modified by Koch [24], de Candolle [19], Bentham [20], and Drude [22], the size and composition of the tribe have varied considerably [25]. The artificiality of the tribe, however, has been demonstrated by different researcher [26-30]. The genus *Smyrniopsis* was placed in tribe Ammineae of classifications of Bentham & Hooker [20] and then transferred in the tribe Smyrnieae by Drude [21]. The immunochemical study of Shneyer et al. [26] showed that *Smyrnum* occupies an isolated position away from all other Smyrnieae and other Apiaceae investigated [25]. Recent phylogenetic studies confirm distinct position of *Smyrniopsis* from this clade.

*Smyrniopsis* was revised by Stevens in Flora of Turkey and he noted that *Smyrniopsis* is not a natural genus. He pointed out the two sections recognized by Boissier have been in the past treated as separate genera. However, he hesitated to change Boissier's

classification, without more extensive study of these genera. Then *Smyrniopsis cachroides* was recognized as new species by S.M.Tamamschian, and this species was treated as a synonym of *Petroedmondia syriaca* in Flora Iranica. The mericarps are concave in transverse section in *Opopanax* while mericarps are nearly semicircular in transverse section in *Petroedmondia*. Moreover, all ribs are equally projecting or narrowly winged in *Petroedmondia*, while lateral and median ribs are slightly projecting and filiform, marginal ribs are strongly projecting and winged in *Opopanax*. The fruits of *Petroedmondia* are multi vittate and vittae ring around the endosperm, while there are 6-8 commissural vittae as well as 1-3 vallecular vittae in each furrow in *Opopanax*.

There are some obvious differences between *Opopanax* and *Smyrniopsis* which is readily distinguished from *Opopanax* by its unwinged and laterally compressed fruit. Moreover, all ribs are filiform in *Smyrniopsis*, although the median and lateral ribs are filiform and marginal one is distinctly winged in *Opopanax*. *Smyrniopsis* is monotypic and endemic to the Caucasus according to Tamamschian [31]. But this genus also includes *Smyrniopsis syriaca* Boiss. and *S. behboudiana* Rech.f. & Esfand. which are currently remain unresolved.

*Magydaris* which was placed in tribe Smyrnieae of classification of Drude [22] is nested in *Opopanax* clade like as *Smyrniopsis*. *Magydaris* was placed in tribe Seselineae by Bentham & Hooker [20]. The genera *Magydaris*, *Cachrys* L., and *Prangos* Lindl., together with *Phellopterus* (Nutt. ex Torr. & A.Gray) J.M.Coult. & Rose were referred to subtribe Cachrydeae of the tribe Seselineae, far from Ammineae-Smyrnieae [26] but phylogenetic studies have revealed that *Magydaris* is closed to *Opopanax* clade.

Bentham & Hooker [20] considered that *Crenosciadium* was closely allied to and possibly congeneric with *Opopanax*. Menemen [32] rearranged *Crenosciadium siifolium* as a synonym of *Opopanax siifolium* but the latter study showed their distinct position. *Crenosciadium* apparently differs from the *Opopanax* which has dorsally flattened fruit, a character which would clearly differentiate the two genera. Mericarp ribs are also significant characteristics to differentiate these two genera. Mericarps of *Crenosciadium* show five distinctly projecting ribs, whereas those of *Opopanax* have 3 slender, filiform dorsal ridges.

According to Chamberlain [9], *O. hispidus* and *O. persicus* are closely related and may prove to be conspecific. The two accessions of *O. hispidus* do not unite as monophyletic in study of Ajani et al. [12]. Leaf lamina indumentum is the distinguishing character of the genus *Opopanax*. They are stellate hairy on both sides in *O. hispidus*, and glabrous beneath in *O. persicus*.

The members of the eighth clade are belonging *Cymbocarpum*, *Tordylium*, *Tetrataenium*, *Heracleum*, *Pastinaca*. Tribe Tordylieae was circumscribed by Pimenov & Leonov [1] to include the genera *Ainsworthia* Boiss., *Ducrosia* Boiss., *Heracleum*, *Kalakia* Alava, *Malabaila*, *Pastinaca*, *Semenovia* Regel & Herder, *Symphyoloma* C.A.Mey., *Tetrataenium*, *Tordylium*, *Vanasushava* P.K.Mukh. & Constance, and *Zosima* [12]. The circumscription of Tordylieae was expanded the to include *Cymbocarpum* by Ajani et al. [11].

The classification of Bentham & Hooker [20], *Opopanax* was placed into tribe Peucedaneae with *Johrenia* DC., *Tordylium*, *Zosimia*, *Ducrosia* Boiss., *Malabaila*, *Polytaenia* DC., *Leptotaenia* Nutt. ex Torr. & A.Gray, *Heracleum*, *Lefeburia* Lindl.,

*Peucedanum*, *Dorema* D.Don, *Perula* Schreb. Some genera placed in this tribus was transferred to *Tordylieae*. Recent phylogenetic studies confirm distinct position of *Opopanax* from this clade.

**matK data.**— The analysis comprises 27 accessions including 21 outgroups (*Crenosciadium siifolium*, *Apium nodiflorum* (L.) Lag., *A. graveolens* L., *Grammosciadium daucoides* DC., *Heracleum maximum* W.Bartram, *H. candicans* var. *obtusifolium* (Wall. ex DC.) F.T.Pu & M.F.Watson, *Tetrataenium canescens* (Lindl.) Manden., *Seseli yunnanense* Franch., *S. mairei* H.Wolff., *Anethum graveolens* L., *Ammi trifoliatum* Trel., *Pimpinella tragium* Vill., *Lagoecia cuminoides*, *Ammi visnaga* (L.) Lam., *Ammi majus* L., *Petroedmondia syriaca*) (Figure 3). Of the aligned matK sites, yielded a total of 770 characters, 79 were variable and 42 parsimony informative. 649 of the total characters were constant. RI and CI indices were 0.853 and 0.868, respectively, and homoplasy index was 0.132.

**trnL-F data.**— The analysis comprises 21 accessions including 8 outgroups (*Crenosciadium siifolium*, *Apium nodiflorum*, *Lagoecia cuminoides*, *Ammi visnaga*, *Ammi majus*, *Pimpinella tragium* Vill., *Grammosciadium daucoides*, *Petroedmondia syriaca*, *Seseli mairei*, *S. squarrulosum* R.H.Shan & M.L.Sheh, *Heracleum candicans* var. *obtusifolium*, *H. dissectifolium* K.T.Fu, *Pastinaca sativa* L.) of the aligned trnL-F sites (Figure 4), yielded a total of 812 characters, 92 were variable and 30 parsimony informative. RI and CI indices were 0.732 and 0.873, respectively, and homoplasy index was 0.127.

#### 4. Conclusion

Fruit morphology and anatomy were traditionally viewed as the most promising sources of taxonomic characters, exhibiting some variation in features such as fruit shape, the degree and direction of mericarp compression, modifications of the pericarp ribs (e.g., wings or spines), and the shape of mericarp commissural faces. Thus, most traditional classifications of Apiaceae have relied almost exclusively on fruit characters [35-37].

Bentham & Hooker [20] emphasized the importance of the number of mericarp ribs and proposed three series, Heterosciadiae, Haplozygiae and Diplazygiae, and 9 tribus. *Opopanax* was placed into tribe Peucedaneae with *Johrenia*, *Tordylium*, *Zosimia*, *Ducrosia*, *Malabaila*, *Polytaenia*, *Leptotaenia*, *Heracleum*, *Lefeburia*, *Peucedanum*, *Dorema*, *Perula*.

According to Boissier [38], *Opopanax* was placed in tribe Peucedaneae with *Crenosciadium*, *Ferulago* W.D.J.Koch, *Johrenia*, *Peucedanum*, *Anethum*, *Kruberia* Hoffm., *Cymbocarpum*, *Ormosciadium* Boiss., *Tordylium*, *Heracleum*, *Zosima*, *Ainswortia* and 14 other genera.

Drude [22] recognized three subfamilies (Apioideae, Saniculoideae, and Hydrocotyloideae) of Apiaceae and dividing each into a series of tribes and subtribes. The genus *Opopanax* was placed in Peucedaneae in subfamily Apioideae with *Pastinaca*, *Peucedanum*, *Ferulago*, *Ferula*, *Johrenia*, *Diplotaenia*, *Capnophyllum* Gaertn., and 13 other genera.

The tribal classification of *Opopanax* and *Crenosciadium* has not changed for many years and these genera was evaluated in tribe Peucedanee. A revised tribal classification of *Opopanax* and *Crenosciadium* was proposed by Ajani et al. [12] and Downie et al. [21]. The first comprehensive molecular phylogenetic analysis of *Opopanax*, based ITS sequence [10] show that the genus very closely related to *Smyrniopsis aucheri* and these positions were confirmed by Ajani et al. [12] and Downie et. al [21]. According to phylogenetic study of Ajani et al. [12], *Opopanax* and *Smyrniopsis* are allied strongly with *Petroedmondia syriaca* (Boiss.) Tamamsch., *Magydaris panacifolia* (Vahl) Lange, and *Crenosciadium siifolium* Boiss. & Heldr. within the Apioidei superclade.

According to phylogenetic analysis performed in this study, ITS data gave more information about the relationship between *Opopanax* and *Crenosciadium* genera. And, because of there are more specimens in NCBI, we presented a better solution according to ITS data. In ITS phylogenetic tree (Figure 1), we can see that *Petroedmondia syriaca* shares the same clade with *Opopanax*, *Smyrniopsis*, *Magydaris* and *Crenosciadium* members. *Smyrniopsis aucheri* (Ajani854 which a NCBI data) appears to be the closest specimen to *Opopanax* members examined in this study. Six different *Opopanax* specimens show that this species is probably not monophyletic. But on the other hand, the genus *Opopanax* seems be monophyletic. But on the other hand, the genus *Opopanax* seems be monophyletic. matK and *trnL-F* data did not solve the phylogenetic relationship as enough as nrITS data. According to matK phylogenetic tree (Figure 4), *Petroedmondia syriaca* and *Crenosciadium siifolium* differs *Opopanax* species, and according to *trnL-F* data (Figure 5) *C. siifolium* is the sister group with *Opopanax* species and *Petroedmondia syriaca* is the closest out group member of this two genera. In conclusion, our previously published rearrangements [10] have been confirmed by phylogenetic analysis in this new study. *Opopanax* species show a correlation between morphologic diagnostic characters and molecular taxonomic classification in the dendrogram. We believe that this study will play a role in resolving the problems of taxonomy in *Opopanax* group.

### Acknowledgment

We express our thanks to the Scientific Investigation Projects Coordinate Office of the Selçuk University (Project number: 17401082) for financial support.

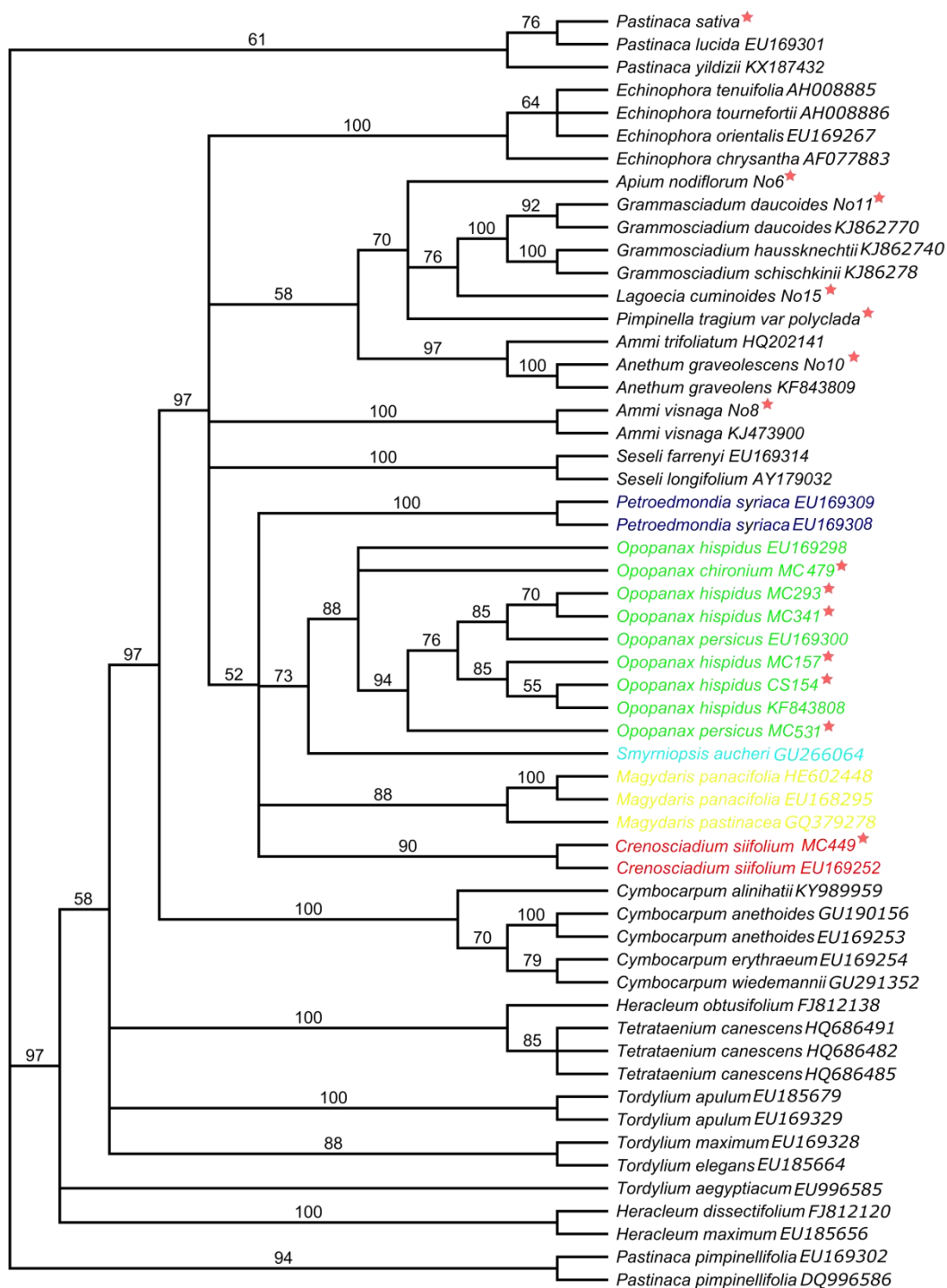
### References

- [1] Pimenov, M.G., Leonov, M.V., **The genera of the Umbelliferae**, Royal Botanic Gardens, Kew, Richmond, Surrey, UK, (1993).
- [2] Amiri, M.S., Joharchi, M.R., Ethnobotanical knowledge of Apiaceae family in Iran: A review, **Avicenna Journal of Phytomedicine**, 6, 6 621–635, (2016).
- [3] Menglan, S., Fading, P., Zehui, P., Watson, M.F., Cannon, J.F.M., Holmes-Smith, I., Kljuykov, E.V., Phillippe, L.R., Pimenov, M.G., **Apiaceae (Umbelliferae)**. In: Flora of China. Ed. Wu Zhengyi, R. H. Raven Vol. 14 (Apiaceae through Ericaceae), Missouri Botanical garden Press, Beijing: Science Press & St. Louis, 1–205, (2005).
- [4] Guner, A., Aslan, S., Ekim, T., Vural, M., Babaç, M.T. (Eds.), **Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)**, Nezahat Gökyigit Botanik Bahçesi ve Flora Arastirma Dernegi Yayını, Istanbul, (2012).

- [5] Rechinger, K.H., *Trinia* In: Rechinger, K.H. & Hedge, I.C. (eds.), **Flora Iranica** **162**, Akademische Druck and Verlagsanstalt, Graz, Austria, 343-344, (1987).
- [6] Meikle, R.D. (Ed.), **Flora of Cyprus, vol 1**. Bentham-Moxon Trust and Royal Botanic Garden, Kew, 757–758, (1977)
- [7] Shishkin, B.K., *Opopanax*, **Flora of the U.S.S.R. Volume 17** (Umbelliflorae). Botanical Institute of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow-Leningrad, (1973).
- [8] Tutin, T.G., *Opopanax* L. In: Tutin, T.G., Heywood, V.H., Burges, N.A., Moore, D.M., Valentine, D.H., Walters, S.M. & Webb, D.A. (Eds.) **Flora Europaea, vol. 2.**, Cambridge University Press, Cambridge, 360, (1968).
- [9] Chamberlain, D.F., *Opopanax* Koch. In: Davis, P.H. (Ed.) **Flora of Turkey and the East Aegean Island, vol. 4.**, Edinburgh University Press, Edinburgh, 471–473, (1972).
- [10] Çetin, Ö., Çelik, M., Comparative morphological, anatomical, micromorphological, and palynological studies on the genera *Opopanax* and *Crenosciadium* (Apiaceae), **Phytotaxa**, 372, 1, 35–50, (2018).
- [11] Katz-Downie, D.S., Valiejo-Roman, C.M., Terentieva, E.I., Troitsky, A.V., Pimenov, M.G., Lee, B., Downie, S.R., Towards a molecular phylogeny of Apiaceae subfamily Apioideae: additional information from nuclear ribosomal DNA ITS sequences, **Plant Systematics and Evolution**, 216, 167–195, (1999).
- [12] Ajani, Y., Ajani, A., Cordes, J.M., Watson, M.F., Downie, S.R., Phylogenetic analysis of nrDNA ITS sequences reveals relationships within five groups of Iranian Apiaceae subfamily Apioideae, **Taxon**, 57, 383–401, (2008).
- [13] White, T.J. Bruns, T., Lee, S., Taylor, J., Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics, In: **PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications**, Innis, M.A. et. al. (eds), Academic Press, Inc., New York, 315-322, (1990).
- [14] Sang, T., Crawford, DJ., Stuessy TF., Mario Silva O., ITS sequences and the phylogeny of the genus *Robinsonia* (Asteraceae), **Systematic Botany**, 20, 55–64, (1995).
- [15] Taberlet, P., Gielly, L., Pautou, G., Bouvet J., Universal primers for amplification of three noncoding regions of chloroplast DNA, **Plant Molecular Biology**, 17, 1105–1109, (1991).
- [16] CBOL Plant Working Group, A DNA barcode for land plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 106, 31, 12794–12797, (2009).
- [17] Swofford, D.L., **PAUP: phylogenetic analysis using parsimony**, version 4.0 b10. Sinauer Associates, Sunderland MA, (2002).
- [18] Altekari, G., Dwarkadas, S., Huelsenbeck, J.P., Ronquist, F., Parallel Metropolis-coupled Markov chain Monte Carlo for Bayesian phylogenetic inference. **Bioinformatics**, 20, 407–415, (2004).
- [19] De Candolle, A.P., Umbelliferae. In A.P. de Candolle [ed.], **Prodromus systematis naturalis regni vegetabilis**, 4: 55–250, (1830).
- [20] Bentham, G., Umbelliferae. In Bentham G & Hooker J. D. [eds.], **Genera Plantarum**, 1, 859–931, Reeve, London, UK, (1867).
- [21] Downie, S.R., Spalik, K., Katz-Downie, D.S., Reduron, J.P., Major clades within Apiaceae subfamily Apioideae as inferred by phylogenetic analysis of nrDNA ITS sequences, **Evolution and Biodiversity of Plants**, 128, 111–136, (2010).
- [22] Drude, C.G.O., Umbelliferae. In Engler A. and Prantl K. [eds.], **Die natürlichen Pflanzenfamilien**, 3, 63–250, Wilhelm Engelmann, Leipzig, Germany, (1897-1898).

- [23] Sprengel C.P.J., Umbelliferae. In J. J. Roemer and J. A. Schultes [eds.], **Systema Vegetabilium**, 6, xxix–lx, 315–628, (1820).
- [24] Koch, W.D.J., Generum tribuum queplantarum Umbelliferarum nova dispositio. **Nova Acta Academiae Caesareae Leopoldino–Carolinae Germanicae Naturae Curiosorum**, 12, 55–156, (1824).
- [25] Downie, S.R., Katz-Downie, D.S., Watson, M.F., A phylogeny of the flowering plant family apiaceae based on chloroplast dna *rpl16* and *rpo1* intron sequences: towards a suprageneric classification of subfamily Apioideae, **American Journal of Botany**, 87, 2, 273–292, (2000).
- [26] Shneyer, V.S., Borschtschenko, G.P., Pimenov, M.G., Leonov, M.V., The tribe Smyrniaceae (Umbelliferae) in the light of serotaxonomical analysis, **Plant Systematics and Evolution**, 182, 135–148, (1992).
- [27] Downie, S.R., Katz-Downie, S., A molecular phylogeny of Apiaceae subfamily Apioideae: evidence from nuclear ribosomal DNA internal transcribed spacer sequences, **American Journal of Botany**, 83, 234–251, (1996).
- [28] Plunkett, D., Soltis E., Soltis P.S., Higher level relationships of Apiales (Apiaceae and Araliaceae) based on phylogenetic analysis of rbcL sequences, **American Journal of Botany**, 83, 499–515, (1996).
- [29] Downie, S.R., Ramanath, S., Katz-Downie, D.S., Ilanas, E., Molecular systematics of Apiaceae subfamily Apioideae: phylogenetic analyses of nuclear ribosomal DNA internal transcribed spacer and plastid rpoC1 intron sequences, **American Journal of Botany**, 85, 563–591, (1998).
- [30] Valiejo-Roman, C.M., Pimenov M.G., Terentieva E.I., Downie S.R., Katz-Downie D.S., Troitsky A.V., Molecular systematics of the Umbelliferae: using nuclear rDNA internal transcribed spacer sequences to resolve issues of evolutionary relationships, **Botanicheskii Zhurnal**, 83, 1–22, (1998).
- [31] Tamamschian, S.G., *Grammosciadium* DC. In: Rechinger KH (ed.). **Flora Iranica Vol. 162**, 96–100, Akademische Drucku, Verlagsanalt, Graz, (1987).
- [32] Menemen, Y., *Opopanax* In Güner, A., et. al. (eds.) **Türkiye Bitkileri Listesi (Damarlı Bitkiler)**, Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırma Derneği Yayını, İstanbul, (2012).
- [33] Plunkett, G.M., Downie, S.R., Major lineages within Apiaceae subfamily Apioideae: a comparison of chloroplast restriction site and DNA sequence data, **American Journal of Botany**, 86, 1014–1026, (1999).
- [34] Spalik, K., Downie, S.R., Intercontinental disjunctions in *Cryptotaenia* (Apiaceae, Oenantheae): an appraisal using molecular data, **Journal of Biogeography**, 34, 2039–2054, (2007).
- [35] Koch, M.A., Bani, B., German, D.A., Huang, X.C., Phylogenetics, phylogeography and vicariance of polyphyletic *Grammosciadium* (Apiaceae: Careae) in Anatolia, **Botanical Journal of the Linnean Society**, 185, 168–188, (2017).
- [36] Magee, A.R., van Wyk, B.-E., Tilney, P.M., Downie, S.R., Generic delimitations and relationships of the Cape genera *Capnophyllum*, *Dasispermum* and *Sonderina*, the North African genera *Kruberia* and *Stoibrax*, and a new monotypic genus of the subfamily Apioideae (Apiaceae), **Systematic Botany**, 34, 580–594, (2009).
- [37] Winter, P.J.D., Magee, A.R., Phephu, N., Tilney, P.M., Downie, S.R., van Wyk, B.E., A new generic classification for African peucedanoid species (Apiaceae), **Taxon**, 57, 347–364, (2008).
- [38] Boissier, E., **Flora Orientalis**, vol. 2, Geneva, Switzerland, H. Georg, (1872).

Bootstrap consensus tree



\*: taxa examined in this study.

Figure 1. Maximum Likelihood phylogenetic tree based on nrITS DNA data.



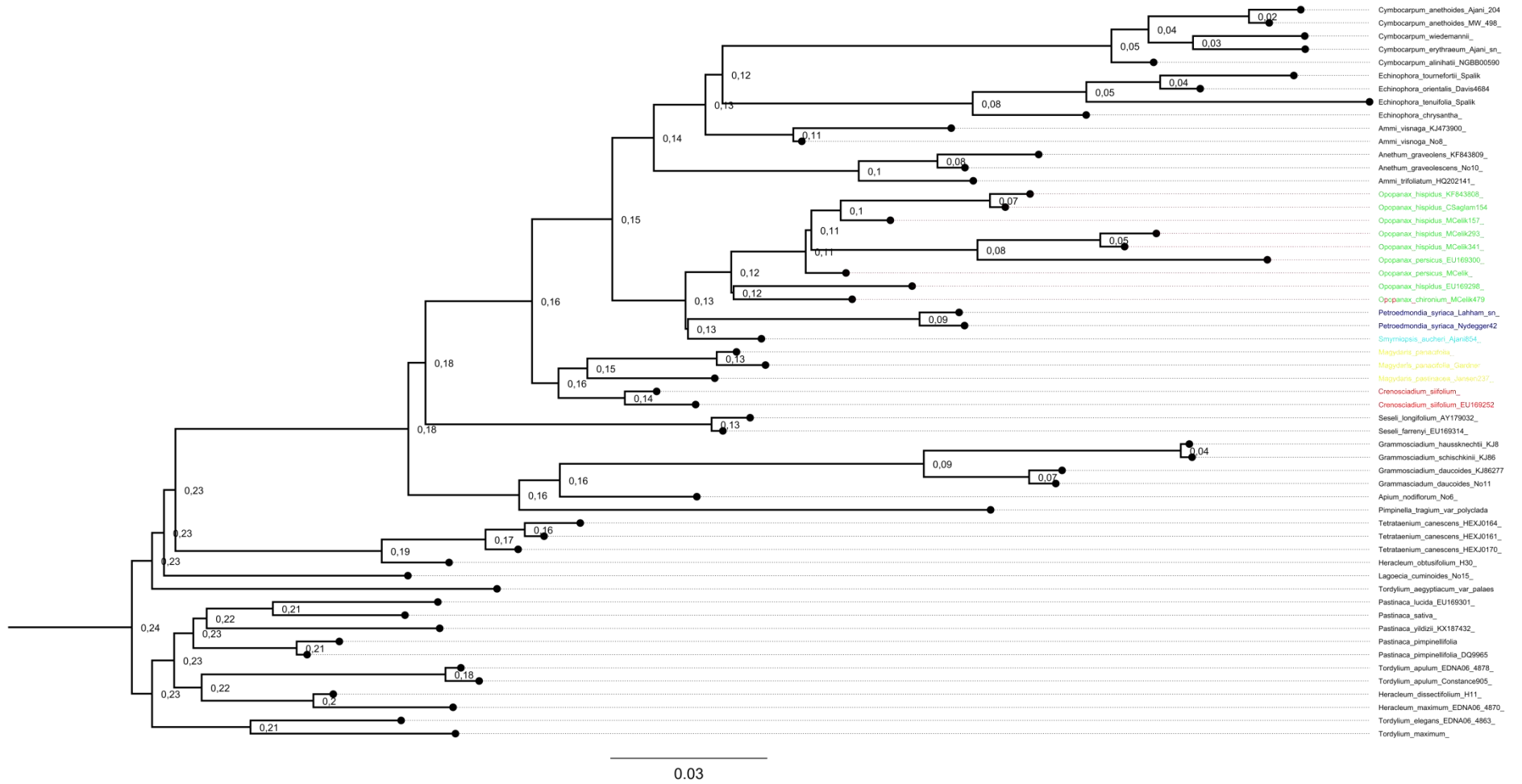


Figure 2. MrBayes phylogenetic tree based on nrITS DNA data.

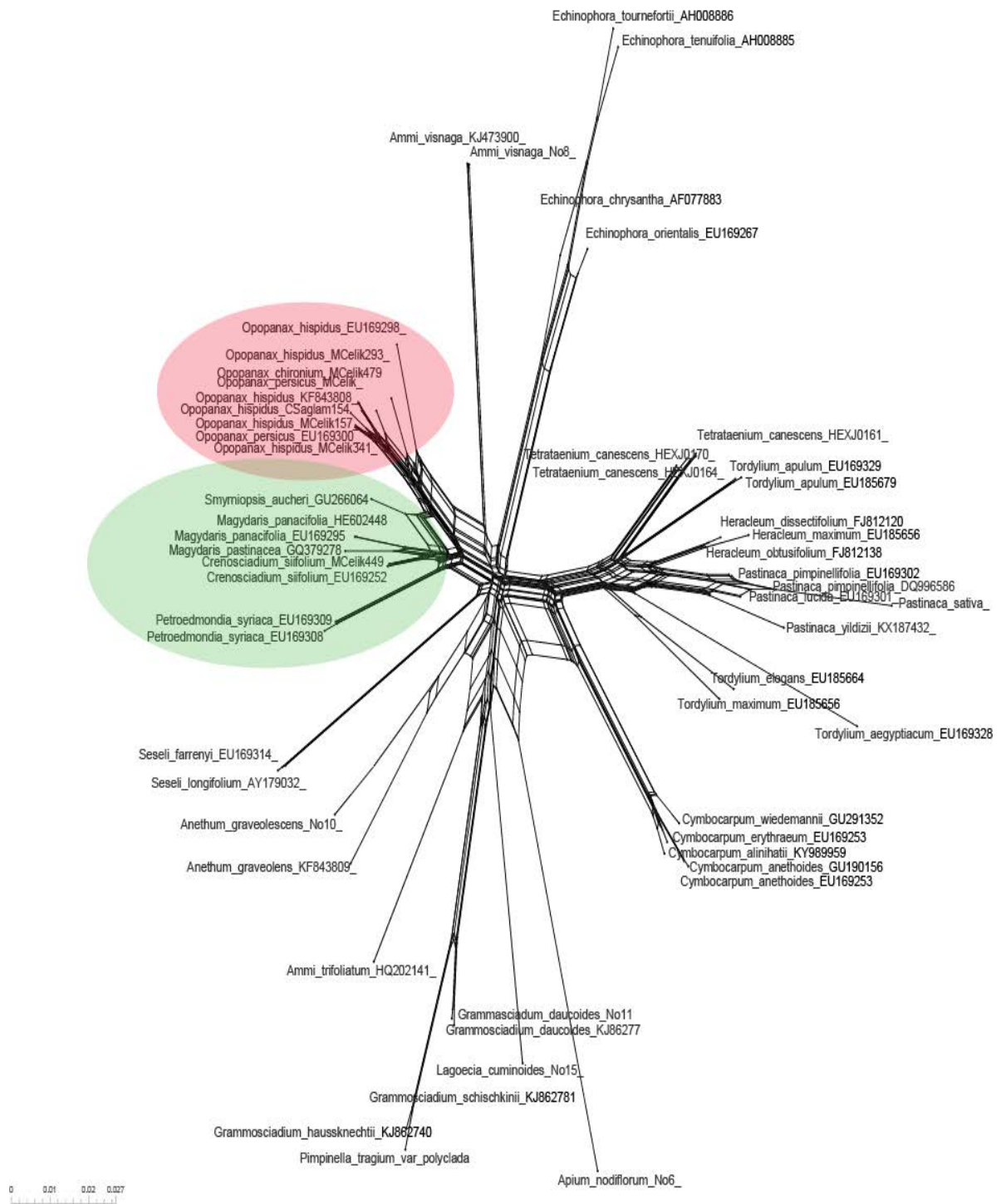
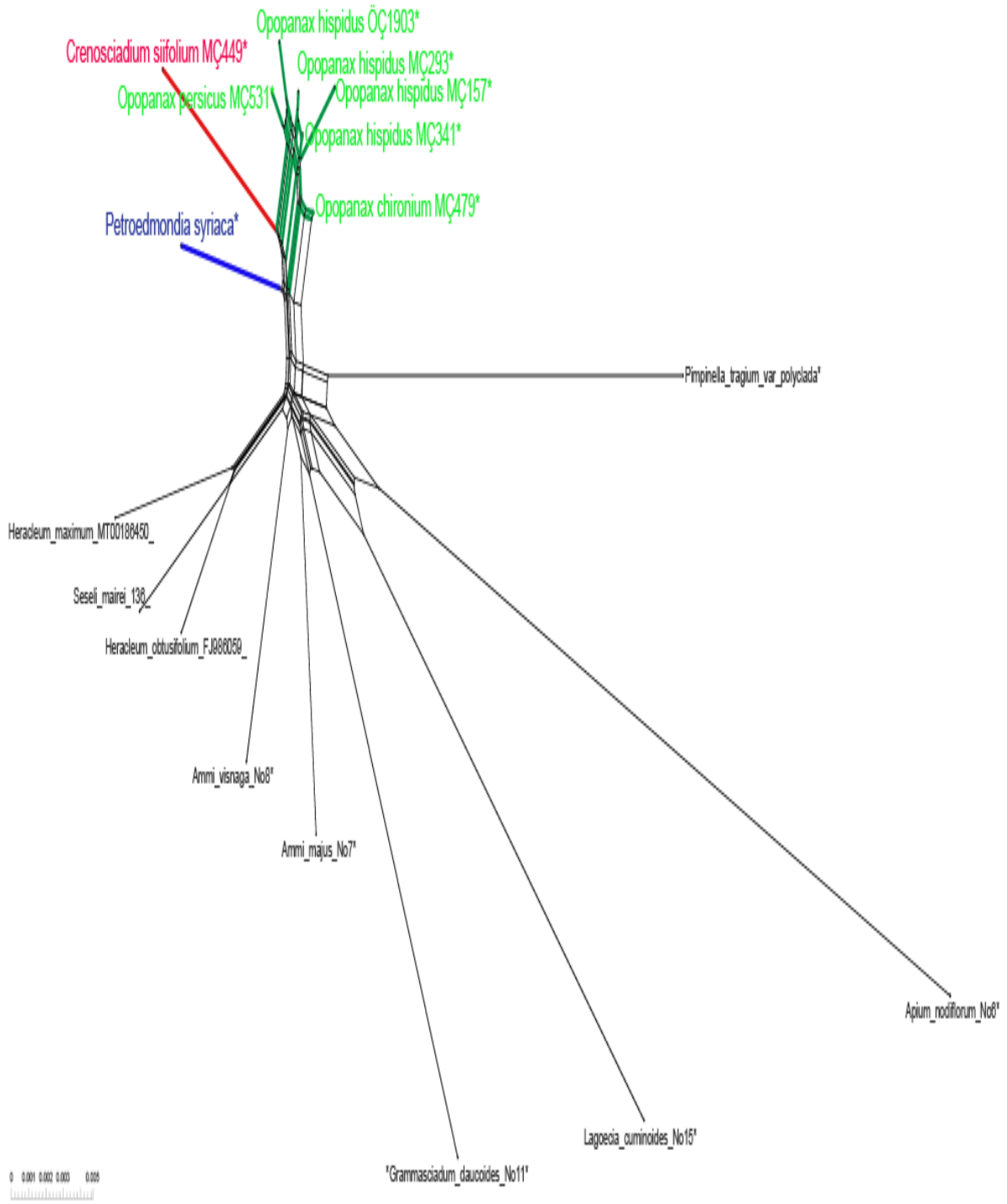
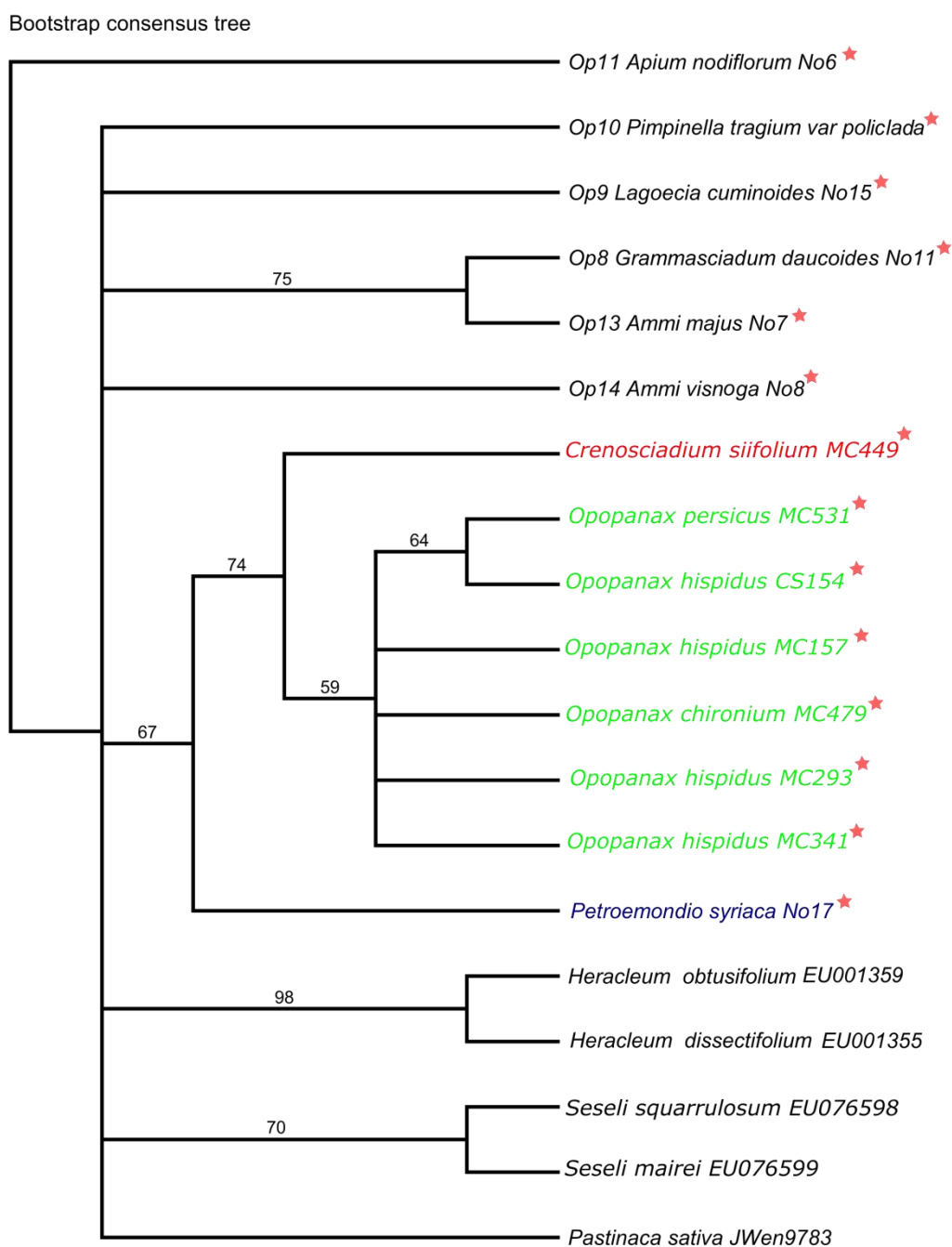


Figure 3. Neighbour Net Diagram based on nrITS DNA data.



\*: taxa examined in this study.

Figure 4. Neighbour Net Diagram based on combined matK-trnL-F cpDNA data.



\*: taxa examined in this study.

Figure 5. ML phylogenetic tree based on *trnL-F* cpDNA data.

## Appendix

**List of NCBI accessions of Apiaceae included in the phylogenetic analysis of nuclear rDNA ITS, matK, trnL-F sequences and voucher information is presented for those sequences obtained in this investigation.**

*Echinophora tenuifolia*, Downie et al. (2000), AH008885.2; *Echinophora tournefortii*, Downie et al. (2000), AH008886.2; *Echinophora orientalis*, Ajani et al. (2008), EU169267.1; *Echinophora chrysantha*, Valiejo-Roman et al. (1998) AF077883.1; *Ammi trifoliatum*, Schaefer et al. (unpubl.), HQ202141.1; Schaefer et al. (unpubl.), HM850718; *Anethum graveolens*, Menemen (unpubl.), KF843809.1; *Smyrniopsis aucheri*, Logacheva et al. (2010), GU266064.1; *Magydaris panacifolia*, Kool et al. (2012), HE602448.1; Spalik et al. (2010), GQ379278.1; *Grammosciadium haussknechtii*, Koch and Augsten (unpubl.), KJ862740.1; *Grammosciadium schischkinii*, Koch and Augsten (unpubl.), KJ862781.1; *Seseli farrenyi*, Ajani et al. (2008), EU169314.1; *Seseli longifolium*, Spalik et al. (unpubl.), AY179032.1; *Seseli yunnanense*, Zhang and Yang (unpubl.), KU853710.1; *Seseli mairei* Zhang and Yang (unpubl.), KU853709.1; Zhang and Yang (unpubl.), KU853708.1; He et al. (unpubl.), EU076599; *Seseli squarulosum* He et al. (unpubl.), EU076598; *Cymbocarpum alinihatii*, Menemen et al. (2017), KY989959.1; *Cymbocarpum anethoides*, Logacheva et al. (2010), GU190156.1; Ajani et al. (2008), EU169253.1; *Cymbocarpum erythraeum* EU169254.1; *Cymbocarpum wiedemannii*, Logacheva et al. (2010), GU291352.1; *Tordylium maximum*, Logacheva et al. (2010), DQ996585.1; *Tordylium elegans*, Paik and Watson, (unpubl.), EU185664.1; *Heracleum obtusifolium*, Yu et al. (unpubl.), FJ812138.1; Deng et al. (unpubl.), FJ986059; *Tetrataenium canescens*, Li et al. (2011), HQ686491.1; Deng et al. (unpubl.), FJ986062; Li et al. (2011), HQ686482.1; Li et al. (2011), HQ686485.1; *Tordylium apulum*, Paik and Watson (unpubl.), EU185679.1; Ajani et al. (2008), EU169329.1; *Tordylium aegyptiacum*, Ajani et al. (2008), EU169328.1; *Heracleum dissectifolium*, Yu et al. (unpubl.), FJ812120.1; *Heracleum maximum*, Paik and Watson (unpubl.), EU185656.1; Kuzmina et al. (2017), MG224911.1; *Pastinaca yildizii*, Menemen et al. (unpub.), KX187432.1; *Pastinaca pimpinellifolia*, Ajani et al. (2008), EU169301.1; Logacheva et al. (2010), DQ996586.1; *Pastinaca lucida*, Ajani et al. (2008), EU169301.1; *Pastinaca sativa*, Ajani et al. (2008), EU169303.1; KJ157767.1; ***Opopanax chironium***: A1 Tekirdağ: Malkara, between Malkara-Karaiğdemir dam, 200 m, 14 July 2017, Ö.Çetin 1930 & M.Çelik; ***Opopanax hispidus***, Ajani et al. (2008), EU169298.1; Menemen (unpubl.), KF843808.1; B7 Malatya: between Malatya- Pütürge, 8 km away from Kubbe pass 8 km, 1632 m, 25 June 2015, rocky slopes, M.Çelik 293, C2 Muğla: Datça, Kocadağ, Mesudiye, road side, 35S 0551420 N, 4063578, 544 m, 24 April 2015, M.Çelik 157 & F.Altınordu, C2 Burdur: Gölhisar, Uylupınar, Gölhisar Lake, 02 July 2017, Ö.Çetin 1903; ***Opopanax persicus***, EU169300.1; C9 Van: Gürpınar, steppe, 2484 m, 08 June 2017, M.Çelik 531; ***Crenosciadium siifolium***, Ajani et al. (2008), EU169252.1; C4 Karaman: Ermenek, Balkusan, Aktepe, Boğazçayır around, 36°44'N, 32°55'E, 1687 m, 28 June 2017, M.Çelik 449; *Ammi visnaga*, Jimenez-Mejias and Vargas (unpubl.), KJ473900.1; Schaefer et al. (unpubl.) HM850725; Kahramanmaraş, Kıyıkçı village, 12 June 2015, Ö.Çetin 1569; ***Ammi majus***: C4 Mersin: Mut, Between Evren and Kırıkkavak, Kırıkkavak entrance, 143 m, 31.05.2015, 36 S 527919, 4047529, M.Çelik 204, F.Altınordu; ***Anethum graveolens***: Erzincan: Tatlısu village, 1500 m; *Petroedmondia syriaca*, Ajani et al. (2008), EU169309.1, EU169308.1; C7 Şanlıurfa: Birecik, Arat Village, Arat mountain, 839 m, 10 June 2014, M.Çelik 123; *Apium*

graveolens KP900771.1; C7 Şanlıurfa: Birecik dam, 340 m, 02 June 2012, Ö.Çetin 1076; **Pimpinella tragioides**:— Isparta: Garip Forest, 1500 m, 04 August 2013, Ö.Çetin 1362 & M.Çelik; **Lagoecia cuminoides**:— C2 Muğla: between Datça-Marmaris, 255 m, 24 April 2015, M.Çelik 175 & F.Altınordu; **Grammosciadium dauroides**, Koch and Augsten (unpubl.), KJ862772.1; C4 Antalya: Alanya, Karapınar Avenues, Dikmetaş plateau, 1380 m, 11.06.2015, 36 S 448613, 4052049, M.Çelik 272 & F.Altınordu.

# Fractional approach for model of network access control using efficient method

Esin İLHAN\*

Faculty of Engineering and Architecture, Kirsehir Ahi Evran University, Kirsehir, 40500, Turkey

Geliş Tarihi (Received Date): 15.09.2020

Kabul Tarihi (Accepted Date): 29.12.2020

## Abstract

In this paper, we find the solution for the system of nonlinear ordinary differential equations having fractional-order arising in network access control using fractional natural decomposition method (FNDM). The consider a model which consists of a system of five nonlinear ordinary differential equations (NODEs), which illustrate the sensor networks are interesting essentials for malicious outbreaks that attack the network with the intention of reducing the integrity, availability and confidentiality. Further, we captured the nature of FNDM results for different value of fractional order in terms of the plots. The considered scheme highly effective and structured while examining nonlinear models and which can be observed and confirm from the obtained results. Further, the conspiracies cited in plots confirm the hired fractional operator and algorithm can help to exemplify the more fascinating properties of the nonlinear system associated real-world problems.

**Keywords:** Caputo derivative, network access control, mathematical model, fractional natural decomposition method.

## Etkili yöntem kullanan ağ erişim kontrolü modeli için kesirli yaklaşım

### Öz

Bu makalede, kesirli doğal ayrıştırma yöntemi (FNDM) kullanarak ağ erişim kontrolünde ortaya çıkan kesirli mertebeye sahip doğrusal olmayan adi diferansiyel denklemler sistemi için çözüm buluyoruz. Sensör ağlarını göstermek için kullanılan ve beş doğrusal olmayan adi diferansiyel denklem (NODE) sisteminden oluşan bu model, bütünlüğü, kullanılabilirliği ve gizliliği azaltmak amacıyla ağa saldıranlar için ilginç

\* Esin İLHAN, eilhan@ahievran.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-0839-0942>

*temel özelliklere sahiptir. Ayrıca, grafikler açısından farklı kesirli parametre değerleri için FNDM çözümlerinin grafiklerini de çizdik. Dikkate alınan method, doğrusal olmayan modelleri incelerken oldukça etkili ve yapılandırılmıştır ve elde edilen sonuçlardan gözlemlenebilir ve doğrulanabilir. Üstelik, grafiklerden elde edilen verilerden, kesirli operatörlerin, gerçek dünya problemlerinin kaydadeğer özelliklerini ortaya çıkarmak için oldukça yardımcı olabilir olduğu doğrulanır.*

**Anahtar kelimeler:** *Caputo türevi, ağ erişim kontrol model, matematiksel model, kesirli natural ayrıştırma yöntemi.*

## 1. Introduction

The analysis of nature and its constituents with the aid of mathematical models have attracted researchers due to their significant contributions towards the development of essentials. The mathematical models can provide exact and effective predictions of the phenomena in a short time without causing any loss to nature and its constituents. In this connection, differential calculus gets more and more notices and it is the only instrument which can perfectly exemplify the mechanism with the rate of change. There have numerous procedures to employ this tool to nurture the phenomena raised in daily life. Recently mathematicians and scientists are illustrated and proved that the concept of fractional calculus (FC) is more appropriated as related to the classical concept. Moreover, it can capture more essential and interesting consequences as compared to traditional calculus. Even though, there are plenty of open questions are raised with FC, due to the revolution of technology within the frame of computer many scholars show tremendous interest in this concept and derived numerous stimulating results. There are diverse notions exemplified by many mathematicians to enrich the concept and lead the foundations for FC [1-33].

On other hand, Wireless Sensor Networks (WSN) attracted the attention of many researchers due to its gigantic technology in the present scenario. Without engineered position or predetermined in untrusted terrains, these networks permit the random positioning of sensor-nodes. This significant technology is miniaturized; however low powered battery devices that integrate minimal sensing, radio transmission capabilities, computation and processing [34]. Due to adaptable and dynamic architectures and also above-mentioned virtues, it has been widely used in the military, industries, healthcare's, and homes. Particularly, in order to monitoring targeting, evaluation of battle damage, reconnaissance, battlefield surveillance, equipment measurement and other pivotal essence are examined by the help of WSN. In the environment and homes, WSN is considering in order detecting the flood and fire, it helps to map the bio-complexity and mainly consider agriculture precision. Recently, it has been considered as an essential instrument in the commercial purpose like drug and patients administration telemonitoring and others [35].

In the present investigation, we consider a system of five equations describing the nature of the model of wireless sensor network which aid to investigate transmission range, distribution density, and sensor field/area. Without human intervention or physical contact, in sensor networks recent innovation-based advances designate the malevolent attacker can operate numerous innards of sensor nodes to outspread malicious [36]. Moreover, the communication happens in the medium of open-air [37]



the WSN an easy target to external attacks due to and its distribution in unfriendly, untrusted, unguarded terrain. Further, the open challenges exploit due to these attackers to WSN including, uncertainty, communication range, computational power and finite bandwidth, and others [34, 35].

In order to perfectly characterize the malicious code banquet with time in a sensor network, authors in [38] suggest the NCA–Susceptible–Exposed–Infectious–Remediated–Vaccinated (NAC-SEIRV) epidemic model with the inclusion of transmission range ( $r^2$ ) and distribution density ( $\sigma$ ). Initially, the sensor nodes transient via the pre-screening process and sent to the remediated compartment after the infectious immigrant nodes are treated and isolated. Sensor nodes enter the susceptible sensor population when they are free of any malicious code infection. To the outbreak of subsequent malicious code infections, Immunization of the predisposed sensor nodes offers supplementary immunization competence.

For the compartment of NCA and its dynamics is described with the aid of the following relation

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \lambda - Q(\omega + \eta + \rho + d), \tag{1}$$

where  $\lambda$  is inclusion rate of nodes,  $\omega$  is the transmission rate to remediated class from quarantine class,  $\eta$  is the rate of death infected immigrant nodes,  $\rho$  is the transmission rate to susceptible class from quarantined. With the aid of convolution integral, the solution for the above equation with the initial population  $Q_0$ , as follows

$$Q(t) = e^{-(\omega+\eta+\rho+d)t}Q_0 + \frac{\lambda}{\omega+\eta+\rho+d} (1 - e^{-(\omega+\eta+\rho+d)t}).$$

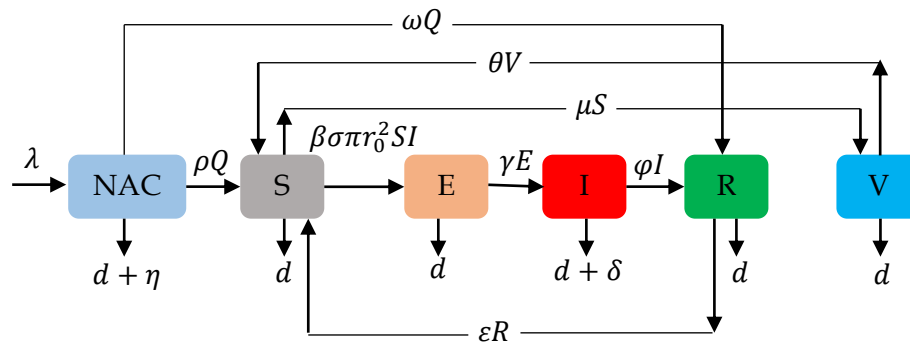


Figure 1. Schematic diagram of NAC-SEIRV model [25].

In Figure 1, the schematic diagram is presented and the dynamical transfer of the population as of assumptions and with the help of this a system of NODEs are generated with susceptible ( $S$ ), exposed ( $E$ ), infectious ( $I$ ), recovered ( $R$ ) and vaccinated ( $V$ ), and which is of the form of [38]

$$\begin{aligned} \frac{dS(t)}{dt} &= \rho Q(t) + \theta V(t) + \varepsilon R(t) - (\beta\sigma\pi r_0^2 I(t) + \mu + d)S(t), \\ \frac{dE(t)}{dt} &= \beta\sigma\pi r_0^2 S(t)I(t) - (\gamma + d)E(t), \\ \frac{dI(t)}{dt} &= \gamma E(t) - (\varphi + \delta + d)I(t), \\ \frac{dR(t)}{dt} &= \omega Q(t) + \varphi I(t) - (\varepsilon + d)R(t), \end{aligned} \tag{2}$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \mu S(t) - (\theta + d)V(t).$$

Here,  $\rho$  and  $\varepsilon$  respectively signifies transmission rate from quarantined to susceptible and remediated to susceptible classes,  $\theta$  indicate transmission rate from vaccinating to susceptible,  $\beta$  denotes the rate of infectivity contact, for the susceptible nodes,  $\sigma$  is the coefficient rate of vaccinating, due to failure of software or hardware, rate of death or mortality nodes is symbolised by  $d$ ,  $\gamma$  represents the transmission rate from exposure to infectious,  $\varphi$  and  $\omega$  are respectively denote the transmission rate from infectious to remediated and quarantine to remediated,  $\delta$  represents the rate of crashing due to attack of worms and  $\eta$  rate of death of the infected immigrant nodes.

The fundamental notions and associated rules of FC are extensively hired by many scholars to exemplify their viewpoints about the numerous classes of nonlinear phenomena. Specifically, the solitons solutions for optic problems, the mechanisms and processes exist in nanotechnology, to study the behaviour of the human diseases with mathematical models, to examine the behaviour of systems related to chaotic behaviour, and many other activities and phenomena. By incorporating this concept to any system, we get more degree of freedom to examine the corresponding phenomena. However, day by day new operators with respect to fractional calculus have been proposed by many researchers to overcome formerly acknowledged limitations and drawbacks.

In the present framework, we consider the system (1) with the novel fractional operator of the form

$$\begin{aligned} D_t^\alpha S(t) &= \rho Q(t) + \theta V(t) + \varepsilon R(t) - (\beta\sigma\pi r_0^2 I(t) + \mu + d)S(t), \\ D_t^\alpha E(t) &= \beta\sigma\pi r_0^2 S(t)I(t) - (\gamma + d)E(t), \\ D_t^\alpha I(t) &= \gamma E(t) - (\varphi + \delta + d)I(t), \\ D_t^\alpha R(t) &= \omega Q(t) + \varphi I(t) - (\varepsilon + d)R(t), \\ D_t^\alpha V(t) &= \mu S(t) - (\theta + d)V(t), \end{aligned} \tag{3}$$

where  $\alpha$  is fractional order of the system.

The study of mathematical models, specifically differential systems is the most attracted area of research and numerous new ideas, results and notions with interesting significances are derived. But, humankind is unrest, every day coming with new ideas and novel tools to investigate essential properties. From lost twenty years, numbers of new solution procedures are proposed by many senior scholars to find the solution for the systems. In this regard, Adomian decomposition technique [39] is also one of them and it has been extensively employed by many others to investigate diverse family and classes of problems without perturbation and conversion for PDEs to ODEs and nonlinear to linear. However, some authors nurtured as unions with familiar transform schemes, this method becomes more powerful, it consumes less time to evaluate the terms and increase the reliability of the method. The considered method is a merge of the above-cited method with natural transform [40] suggested by *Rawashdeh* and *Maitama* [41, 42]. Later, it hired by many authors to find and analyse the corresponding nature of the solution for many real-world problems [43-47]. The effort of many scientists and mathematicians in the area of computer technology and its security is magnetized many authors. The projected model and its similar development are analysed by many scholars [48-55].

## 2. Preliminaries

In this segment, we recall some basic and fundamentals of FC.

**Definition 1.** In the fractional Riemann-Liouville sense, the integral of a function  $f(t) \in C_\delta(\delta \geq -1)$  is presented as follows [1]

$$J^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\mu)} \int_0^t (t - \vartheta)^{\mu-1} f(\vartheta) d\vartheta. \tag{3}$$

**Definition 2.** The Caputo fractional derivative of  $f \in C_{-1}^n$  is presented as [2]

$$D_t^\alpha f(t) = \begin{cases} \frac{d^n f(t)}{dt^n}, & \alpha = n \in \mathbb{N}, \\ \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^t (t - \vartheta)^{n-\alpha-1} f^{(n)}(\vartheta) d\vartheta, & n - 1 < \alpha < n, n \in \mathbb{N}. \end{cases} \tag{4}$$

**Definition 3.** The Mittag-Leffler type function with one-parameter is defined [56] as follows

$$E_\alpha(z) = \sum_{k=0}^\infty \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + 1)}, \quad \alpha > 0, z \in \mathbb{C}. \tag{5}$$

**Definition 4.** The natural transform (NT) of  $f(t)$  is symbolized by  $\mathbb{N}[f(t)]$  for  $t \in \mathbb{R}$  and presented with the NT variables  $s$  and  $\omega$  by [40]

$$\mathbb{N}[f(t)] = R(s, \omega) = \int_{-\infty}^\infty e^{-st} f(\omega t) dt; \quad s, \omega \in (-\infty, \infty).$$

Now, we define the NT with Heaviside function  $H(t)$  as

$$\mathbb{N}[f(t)H(t)] = \mathbb{N}^+[f(t)] = R^+(s, \omega) = \int_0^\infty e^{-st} f(\omega t) dt; \quad s, \omega \in (0, \infty). \tag{6}$$

**Theorem 1** [40]: The NT  $R_\alpha(s, \omega)$  of the fractional derivative of  $f(t)$  Riemann-Liouville sense is symbolized by  $D^\alpha f(t)$  and defined as

$$\mathbb{N}^+[D^\alpha f(t)] = R_\alpha(s, \omega) = \frac{s^\alpha}{\omega^\alpha} R(s, \omega) - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{s^k}{\omega^{\alpha-k}} [D^{\alpha-k-1} f(t)]_{t=0}, \tag{7}$$

where  $R(s, \omega)$  is NT of  $f(t)$ ,  $\alpha$  is the order and  $n$  be any positive integer. Further,  $n - 1 \leq \alpha < n$ .

**Theorem 2** [57]: The natural transform  $R_\alpha(s, \omega)$  of the arbitrary derivative in Caputo sense of  $f(t)$  is symbolize by  ${}^c D^\alpha f(t)$  and defined as

$$\mathbb{N}^+[{}^c D^\alpha f(t)] = R_\alpha^c(s, \omega) = \frac{s^\alpha}{\omega^\alpha} R(s, \omega) - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{s^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k f(t)]_{t=0}. \tag{8}$$

## 3. Fundamental solution procedure of the projected method

Here, we consider coupled system in order to illustrate the basic solution procedure of the considered algorithm with initial conditions

$$\begin{aligned} D_t^\alpha u(x, t) + Ru(x, t) + Fu(x, t) &= h_1(x, t), \\ D_t^\alpha v(x, t) + Rv(x, t) + Fv(x, t) &= h_2(x, t), \end{aligned} \tag{9}$$

and

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= g_1(x), \\ v(x, 0) &= g_2(x), \end{aligned} \tag{10}$$

where  $D^\alpha u(x, t)$  and  $D^\alpha v(x, t)$  respectively signifies the fractional Caputo derivatives of  $u(x, t)$  and  $v(x, t)$ ,  $h_1(x, t)$  and  $h_2(x, t)$  are the source terms.  $F$  and  $R$  respectively the nonlinear and linear differential operator. On applying  $NT$  and with the help of Theorem 2, then Eq. (9) gives

$$\begin{aligned} U(x, s, \omega) &= \frac{u^\alpha}{s^\alpha} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{s^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k u(x, t)]_{t=0} + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[h_1(x, t)] \\ &\quad - \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[Rv(x, t) + Fu(x, t)], \\ V(x, s, \omega) &= \frac{v^\alpha}{s^\alpha} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{s^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k v(x, t)]_{t=0} + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[h_2(x, t)] \\ &\quad - \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[Ru(x, t) + Fv(x, t)]. \end{aligned} \tag{11}$$

On employing inverse  $NT$  on Eq. (11) to get

$$\begin{aligned} u(x, t) &= G(x, t) - \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[Rv(x, t) + Fu(x, t)] \right], \\ v(x, t) &= H(x, t) - \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[Ru(x, t) + Fv(x, t)] \right]. \end{aligned} \tag{12}$$

From given initial conditions, non-homogeneous terms,  $G(x, t)$  and  $H(x, t)$  exists. The infinite series solution is presented as

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t), & Fu(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n, \\ v(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t), & Fv(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} B_n, \end{aligned} \tag{13}$$

where  $A_n$  and  $B_n$  are indicating the nonlinear terms of  $Fu(x, t)$  and  $Fv(x, t)$ , respectively. By using the Eqs. (12) and (13), we have

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t) &= G(x, t) - \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ R \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) \right] + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \right], \\ \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t) &= H(x, t) - \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ R \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t) \right] + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \right]. \end{aligned} \tag{14}$$

By comparing both sides of Eq. (14), we obtain

$$\begin{aligned}
 u_0(x, t) &= G(x, t), \\
 u_1(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{S^\alpha} \mathbb{N}^+ [Rv_0(x, t)] + A_0 \right], \\
 u_2(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{S^\alpha} \mathbb{N}^+ [Rv_1(x, t)] + A_1 \right], \\
 &\vdots \\
 v_0(x, t) &= H(x, t), \\
 v_1(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{S^\alpha} \mathbb{N}^+ [Ru_0(x, t)] + B_0 \right], \\
 v_2(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{S^\alpha} \mathbb{N}^+ [Ru_1(x, t)] + B_1 \right], \\
 &\vdots
 \end{aligned}$$

Similarly, we can obtain the recursive relation in general form for  $n \geq 1$  and defined as

$$\begin{aligned}
 u_{n+1}(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{S^\alpha} \mathbb{N}^+ [Rv_n(x, t)] + A_n \right], \\
 v_{n+1}(x, t) &= -\mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{S^\alpha} \mathbb{N}^+ [Ru_n(x, t)] + B_n \right].
 \end{aligned} \tag{15}$$

Lastly, the approximate solutions are defined as follows

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t), \quad v(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} v_n(x, t).$$

#### 4. FNDM solution for the projected system

Here, we consider the fractional-order system of equations presented in Eq. (2) to find the solution for using projected solution procedure. Then

$$\begin{cases}
 D_t^\alpha S(t) = \rho Q(t) + \theta V(t) + \varepsilon R(t) - (\beta \sigma \pi r_0^2 I(t) + \mu + d)S(t), \\
 D_t^\alpha E(t) = \beta \sigma \pi r_0^2 S(t)I(t) - (\gamma + d)E(t), \\
 D_t^\alpha I(t) = \gamma E(t) - (\varphi + \delta + d)I(t), \\
 D_t^\alpha R(t) = \omega Q(t) + \varphi I(t) - (\varepsilon + d)R(t), \\
 D_t^\alpha V(t) = \mu S(t) - (\theta + d)V(t),
 \end{cases} \quad 0 < \alpha \leq 1, \tag{16}$$

associated with initial conditions

$$S(0) = S_0(t), \quad E(0) = E_0(t), \quad I(0) = I_0(t), \quad R(0) = R_0(t), \quad V(0) = V_0(t). \tag{17}$$

By the assist of  $NT$  on Eq. (16), one can get

$$\begin{aligned}
 \mathbb{N}^+ [D_t^\alpha S(t)] &= \mathbb{N}^+ [\rho Q(t) + \theta V(t) + \varepsilon R(t) - (\beta \sigma \pi r_0^2 I(t) + \mu + d)S(t)], \\
 \mathbb{N}^+ [D_t^\alpha E(t)] &= \mathbb{N}^+ [\beta \sigma \pi r_0^2 S(t)I(t) - (\gamma + d)E(t)], \\
 \mathbb{N}^+ [D_t^\alpha I(t)] &= \mathbb{N}^+ [\gamma E(t) - (\varphi + \delta + d)I(t)], \\
 \mathbb{N}^+ [D_t^\alpha R(t)] &= \mathbb{N}^+ [\omega Q(t) + \varphi I(t) - (\varepsilon + d)R(t)], \\
 \mathbb{N}^+ [D_t^\alpha V(t)] &= \mathbb{N}^+ [\mu S(t) - (\theta + d)V(t)].
 \end{aligned} \tag{18}$$

The non-linear operator is define as

$$\begin{aligned}
 \frac{S^\alpha}{W^\alpha} \mathbb{N}^+[S(t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{S^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k S]_{t=0} &= \mathbb{N}^+[\rho Q(t) + \theta V(t) + \varepsilon R(t) - (\beta\sigma\pi r_0^2 I(t) + \mu + d)S(t)], \\
 \frac{S^\alpha}{W^\alpha} \mathbb{N}^+[E(t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{S^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k E]_{t=0} &= \mathbb{N}^+[\rho\beta\sigma\pi r_0^2 S(t)I(t) - (\gamma + d)E(t)], \\
 \frac{S^\alpha}{W^\alpha} \mathbb{N}^+[I(t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{S^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k I]_{t=0} &= \mathbb{N}^+[\gamma E(t) - (\varphi + \delta + d)I(t)], \\
 \frac{S^\alpha}{W^\alpha} \mathbb{N}^+[R(t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{S^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k R]_{t=0} &= \mathbb{N}^+[\omega Q(t) + \varphi I(t) - (\varepsilon + d)R(t),], \\
 \frac{S^\alpha}{W^\alpha} \mathbb{N}^+[V(t)] - \sum_{k=0}^{n-1} \frac{S^{\alpha-(k+1)}}{\omega^{\alpha-k}} [D^k V]_{t=0} &= \mathbb{N}^+[\mu S(t) - (\theta + d)V(t)].
 \end{aligned} \tag{19}$$

By the above equation, we get

$$\begin{aligned}
 \mathbb{N}^+[S(t)] &= \frac{1}{s} [S_0(t)] + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\rho Q(t) + \theta V(t) + \varepsilon R(t) - (\beta\sigma\pi r_0^2 I(t) + \mu + d)S(t)], \\
 \mathbb{N}^+[E(t)] &= \frac{1}{s} [E_0(t)] + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\beta\sigma\pi r_0^2 S(t)I(t) - (\gamma + d)E(t)], \\
 \mathbb{N}^+[I(t)] &= \frac{1}{s} [I_0(t)] + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\gamma E(t) - (\varphi + \delta + d)I(t)], \\
 \mathbb{N}^+[R(t)] &= \frac{1}{s} [R_0(t)] + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\omega Q(t) + \varphi I(t) - (\varepsilon + d)R(t),], \\
 \mathbb{N}^+[V(t)] &= \frac{1}{s} [V_0(t)] + \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\mu S(t) - (\theta + d)V(t)].
 \end{aligned} \tag{20}$$

On employing inverse *NT* on Eq. (20), we have

$$\begin{aligned}
 S(t) &= S_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\rho Q(t) + \theta V(t) + \varepsilon R(t) \right. \\
 &\quad \left. - (\beta\sigma\pi r_0^2 I(t) + \mu + d)S(t)] \right], \\
 E(t) &= E_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\beta\sigma\pi r_0^2 S(t)I(t) - (\gamma + d)E(t)] \right], \\
 I(t) &= I_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\gamma E(t) - (\varphi + \delta + d)I(t)] \right], \\
 R(t) &= R_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\omega Q(t) + \varphi I(t) - (\varepsilon + d)R(t),] \right], \\
 V(t) &= V_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+[\mu S(t) - (\theta + d)V(t)] \right].
 \end{aligned} \tag{21}$$

Let us consider that, the series solution for  $S(t), E(t), I(t), R(t)$  and  $V(t)$  respectively as follows

$$\begin{aligned}
 S(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} S_n(t), & E(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} E_n(t), \\
 I(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} I_n(t), & R(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} R_n(t), \\
 V(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} V_n(t).
 \end{aligned}$$

Note that,  $SI = \sum_{n=0}^{\infty} P_n$  is represents the nonlinear terms and they are known as the Adomian polynomials. By the help of these terms, then Eq. (21) becomes

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=0}^{\infty} S_n(t) &= S_0(t) \\
 &+ \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ \rho Q(t) + \theta \sum_{n=0}^{\infty} V_n(t) + \varepsilon \sum_{n=0}^{\infty} R_n(t) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \left( \beta \sigma \pi r_0^2 \sum_{n=0}^{\infty} P_n + \mu \sum_{n=0}^{\infty} S_n(t) + d \sum_{n=0}^{\infty} S_n(t) \right) \right] \right], \\
 \sum_{n=0}^{\infty} E_n(t) &= E_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ \beta \sigma \pi r_0^2 \sum_{n=0}^{\infty} P_n - (\gamma + d) \sum_{n=0}^{\infty} E_n(t) \right] \right], \tag{22} \\
 \sum_{n=0}^{\infty} I_n(t) &= I_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ \gamma \sum_{n=0}^{\infty} E_n(t) - (\varphi + \delta + d) \sum_{n=0}^{\infty} I_n(t) \right] \right], \\
 \sum_{n=0}^{\infty} R_n(t) &= R_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ \omega Q(t) + \varphi \sum_{n=0}^{\infty} I_n(t) - (\varepsilon + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. d) \sum_{n=0}^{\infty} R_n(t) \right] \right], \\
 \sum_{n=0}^{\infty} V_n(t) &= V_0(t) + \mathbb{N}^{-1} \left[ \frac{\omega^\alpha}{s^\alpha} \mathbb{N}^+ \left[ \mu \sum_{n=0}^{\infty} S_n(t) - (\theta + d) \sum_{n=0}^{\infty} V_n(t) \right] \right].
 \end{aligned}$$

By the assist of the above system with prescribed initial conditions, we can find the terms of the series solution for the projected model systematically. Then, we establish the series solutions as

$$\begin{aligned}
 S(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} S_n(t) = S_0(t) + S_1(t) + S_2(t) + \dots \\
 E(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} E_n(t) = E_0(t) + E_1(t) + E_2(t) + \dots \\
 I(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} I_n(t) = I_0(t) + I_1(t) + I_2(t) + \dots
 \end{aligned}$$

$$R(t) = \sum_{n=0}^{\infty} R_n(t) = R_0(t) + R_1(t) + R_2(t) + \dots$$

$$V(t) = \sum_{n=0}^{\infty} V_n(t) = V_0(t) + V_1(t) + V_2(t) + \dots$$

**5. Numerical results and discussion**

The investigation and analysis of mathematical models representing the network access control is a hot topic in this era. More importantly, using the efficient solution procedure and nonlocal operator, it attracted many scholars. In this work, we find the solution for a system of nonlinear equations exemplifying the projected model and further captured its corresponding consequences in the plots to confirm the reliability of the method employed and operator incorporated. With the assist of Figure 1, the differential system has been presented with specified parameters and corresponding values of the parameters are cited in Table 1.

Table 1. The specific value of the parameters presented in the projected system [38].

Parameters	Values
$\rho$	0.3
$\theta$	0.06
$\varepsilon$	0.3
$\beta$	0.1
$\sigma$	0.3
$\mu$	0.3
$r_0$	1
$d$	0.003
$\gamma$	0.25
$\lambda$	0.33
$\varphi$	0.4
$\delta$	0.07
$\omega$	0.01

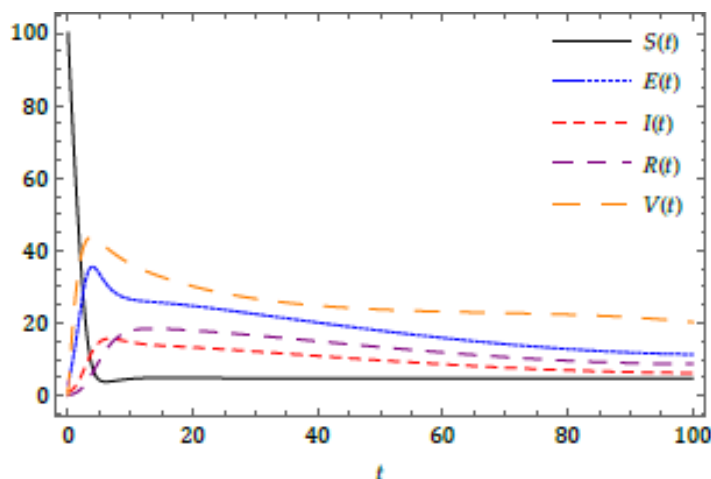


Figure 2. Nature of projected model for classical order using Table 1.



The response for the classical order model has been captured in Figure 2 using the initial conditions

$$Q_0 = 5, \quad S(0) = S_0(t) = 100, \quad E(0) = E_0(t) = 3, \quad I(0) = I_0(t) = 1, \\ R(0) = R_0(t) = 0, \quad V(0) = V_0(t) = 0.$$

Further, the nature of the result obtained by FNDM is presented in Figure 3 using the values of the parameters defined in Table 1. From the Figures 2 and 3; we can see that the degree of freedom offered by the considered fractional operator related to classical model and also plots show some simulating results and consequences associated to hereditary properties and history-based results. Moreover, the current research can help to study a wide range of technological models exemplifying essential for the development of science and technology.

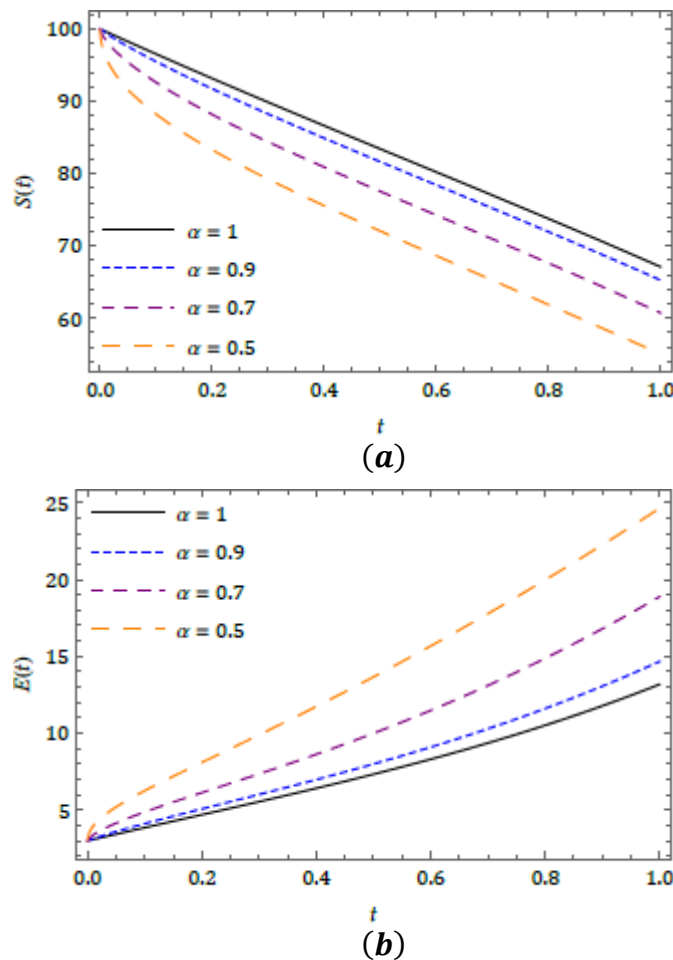


Figure 3. Nature of the obtained solution for (a) susceptible ( $S$ ), (b) exposed ( $E$ ), (c) infectious ( $I$ ), (d) recovered ( $R$ ) and (e) vaccinated ( $V$ ), with distinct  $\alpha$  by the help of Table 1.

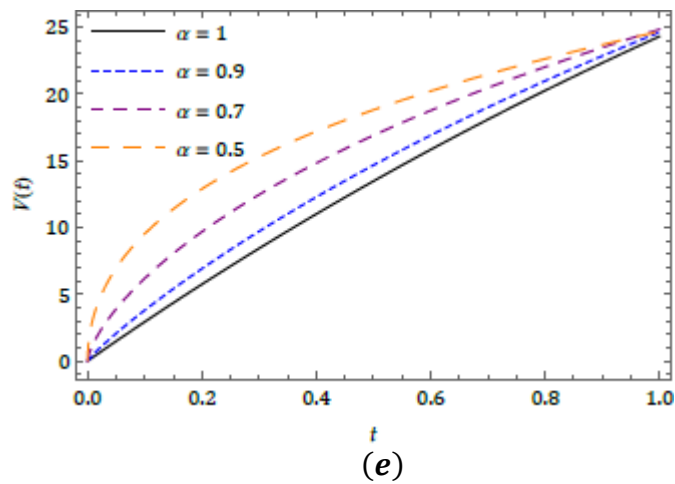
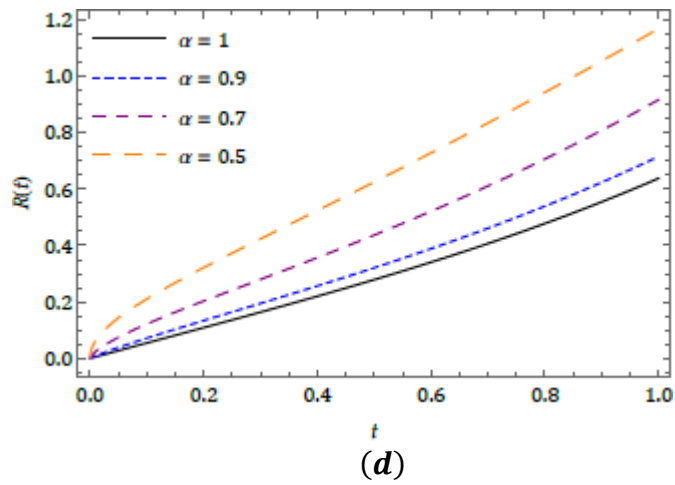
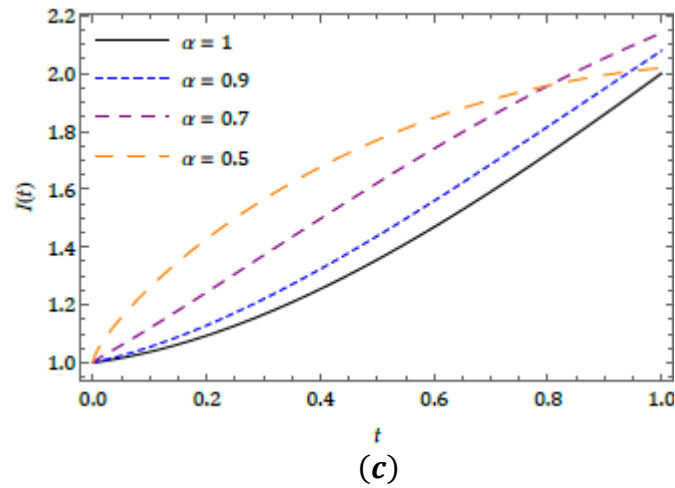


Figure 3 (Continued). Nature of the obtained solution for (a) susceptible ( $S$ ), (b) exposed ( $E$ ), (c) infectious ( $I$ ), (d) recovered ( $R$ ) and (e) vaccinated ( $V$ ), with distinct  $\alpha$  by the help of Table 1.

## 6. Conclusion

The fractional-order system exemplifying the network access control in the frame of the mathematical model is lucratively analysed and find the corresponding solution using efficient scheme (namely, FNDM) and considered nonlinear system exemplify

computer networking solution that uses a set of protocols to implement and define. The obtained results by the considered solution procedure are more interesting associated with those is accessible in the literature. The considered method evaluates the solution for the complex nonlinear coupled systems without hiring any conversion, perturbation or discretization. The plots authorize the reliability of the hired algorithm and the effect of fractional order while we analysing biological models. Related to significances available in the literature, the attained results with the projected scheme are more stimulating and interesting. This study confirms, the phenomena conspicuously are contingent on the time history and the time instant, and these can be proficiently exemplified by the help of the fundamental notion of FC. The investigations of these types of models can provide a new path to analyse more real-world problems and it opens the door for employing an efficient method to study nonlinear phenomena associated with science and technology.

## References

- [1] Caputo, M., *Elasticita e Dissipazione*, Zanichelli, Bologna, (1969).
- [2] Miller, K. S. and Ross, B., *An introduction to fractional calculus and fractional differential equations*, A Wiley, New York, (1993).
- [3] Podlubny, I., *Fractional Differential Equations*, Academic Press, New York, (1999).
- [4] Kilbas, A. A., Srivastava, H. M. and Trujillo, J. J., *Theory and applications of fractional differential equations*, Elsevier, Amsterdam, (2006).
- [5] Baleanu, D., Guvenc, Z. B. and Machado, T. J. A., *New trends in nanotechnology and fractional calculus applications*, Springer Dordrecht Heidelberg, London New York, (2010).
- [6] Prakasha, D. G. and Veerasha, P., Analysis of Lakes pollution model with Mittag-Leffler kernel, **J. Ocean Eng. Sci.**, 5 (4), 310-322, (2020).
- [7] Baleanu, D., Wu, G. C. and Zeng, S. D., Chaos analysis and asymptotic stability of generalized Caputo fractional differential equations, **Chaos Solitons Fractals**, 102, 99-105, (2017).
- [8] Veerasha, P., Prakasha, D. G. and Baskonus, H. M., New numerical surfaces to the mathematical model of cancer chemotherapy effect in Caputo fractional derivatives, **Chaos**, 29, (013119), (2019).
- [9] Baskonus, H. M., Sulaiman, T. A. and Bulut, H., On the new wave behavior to the Klein-Gordon-Zakharov equations in plasma physics, **Indian J. Phys.**, 93, (3), 393-399, (2019).
- [10] Veerasha, P. and Prakasha, D. G., Solution for fractional generalized Zakharov equations with Mittag-Leffler function, **Results Eng.**, 5, 1-12, (2020).
- [11] Prakasha, D. G., Malagi, N. S. and Veerasha, P., New approach for fractional Schrödinger–Boussinesq equations with Mittag-Leffler kernel, **Math. Meth. Appl. Sci.**, (2020).
- [12] Gao, W., Baskonus, H. M. and Shi, L., New investigation of Bats-Hosts-Reservoir-People coronavirus model and apply to 2019-nCoV system, **Adv. Differ. Equ.**, 391, (2020).
- [13] Cattani, C. and Pierro, G., On the fractal geometry of DNA by the binary image analysis, **Bull. Math. Biol.**, 75, (9), 1544-1570, (2013).

- [14] Gao, W., Veerasha, P., Prakasha, D. G. and Baskonus, H.M., Novel dynamical structures of 2019-nCoV with nonlocal operator via powerful computational technique, **Biology**, 9, (5), (2020).
- [15] Gao, W., Veerasha, P., Baskonus, H. M., Prakasha, D. G. and Kumar, P., A new study of unreported cases of 2019-nCOV epidemic outbreaks, **Chaos Solitons Fractals**, 138, (2020).
- [16] Cattani, C., Haar wavelet-based technique for sharp jumps classification, **Math. Comput. Model.**, 39, (2-3), 255-278, (2004).
- [17] Gao, W., Yel, G., Baskonus, H.M. and Cattani, C., Complex solitons in the conformable (2+1)-dimensional Ablowitz-Kaup-Newell-Segur equation, **AIMS Math.**, 5, (1), 507–521, (2020).
- [18] Al-Ghafri, K. S. and Rezazadeh, H., Solitons and other solutions of (3+1)-dimensional space–time fractional modified KdV–Zakharov–Kuznetsov equation, **Appl. Math. Nonlinear Sci.**, 4, (2), 289-304, (2019).
- [19] Dananea, J., Allalia, K. and Hammouch, Z., Mathematical analysis of a fractional differential model of HBV infection with antibody immune response, **Chaos Solitons Fractals**, 136, 109787, (2020).
- [20] Singh, J., Kumar, D., Hammouch, Z. and Atangana, A., A fractional epidemiological model for computer viruses pertaining to a new fractional derivative, **Appl. Math. Comput.**, 316, 504-515, (2018).
- [21] Ravichandran, C., Logeswari, K. and Jarad, F., New results on existence in the framework of Atangana–Baleanu derivative for fractional integro-differential equations, **Chaos Solitons Fractals**, 125, 194-200, (2019).
- [22] Veerasha, P., Prakasha, D. G. and Baskonus, H. M., An efficient technique for coupled fractional Whitham-Broer-Kaup equations describing the propagation of shallow water waves, **Advances in Intelligent Systems and Computing**, 49-75, (2020).
- [23] Kiran, M. S., et al., A mathematical analysis of ongoing outbreak COVID-19 in India through nonsingular derivative, **Numer. Meth. Partial Differ. Equ.**, (2020), DOI: 10.1002/num.22579.
- [24] Veerasha, P., Prakasha, D. G., Singh, J., Kumar, D. and Baleanu, D., Fractional Klein-Gordon-Schrödinger equations with Mittag-Leffler memory, **Chinese J. Phys.**, 68, 65-78, (2020).
- [25] Subashini, R., Ravichandran, C., Jothimani, K. and Baskonus, H. M., Existence results of Hilfer integro-differential equations with fractional order, **Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. S**, 13, (3), 911-923, (2020).
- [26] Veerasha, P. and Prakasha, D. G. Novel approach for modified forms of Camassa–Holm and Degasperis–Procesi equations using fractional operator, **Commun. Theor. Phys.**, 72, (10) (2020),
- [27] Panda, S. K., Abdeljawad, T. and Ravichandran, C., Novel fixed point approach to Atangana-Baleanu fractional and  $L_p$ -Fredholm integral equations, **Alexandria Eng. J.**, 59, (4), 1959-1970, (2020).
- [28] Veerasha, P., Prakasha, D. G. and Hammouch, Z., An efficient approach for the model of thrombin receptor activation mechanism with Mittag-Leffler function, **Nonlinear Analysis: Problems, Applications and Computational Methods**, 44-60, (2020).
- [29] Subashini, R., Jothimani, K., Nisar, K. S. and Ravichandran, C. New results on nonlocal functional integro-differential equations via Hilfer fractional derivative, **Alexandria Eng. J.**, 59, (5), 2891-2899, (2020).

- [30] Alqudah, M. A., Ravichandran, C., Abdeljawad, T. and Valliammal, N., New results on Caputo fractional-order neutral differential inclusions without compactness, **Adv. Differ. Equ.**, 528, (2019).
- [31] Veerasha, P., Prakasha, D. G. and Baleanu, D., Analysis of fractional Swift-Hohenberg equation using a novel computational technique, **Math. Meth. Appl. Sci.**, 43, (4), 1970-1987, (2020).
- [32] Logeswari, K. and Ravichandran, C., A new exploration on existence of fractional neutral integro-differential equations in the concept of Atangana–Baleanu derivative, **Phys. A**, 544, (2020), DOI: 10.1016/j.physa.2019.123454
- [33] Veerasha, P., Prakasha, D. G. and Kumar, D., Fractional SIR epidemic model of childhood disease with Mittag-Leffler memory, **Fractional Calculus in Medical and Health Science**, 229-248, (2020).
- [34] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E., Wireless sensor networks: A survey, **Computer Networks**, 38, (4), 393–422, (2002).
- [35] Nwokoye, C. H., Umeh, I., Nwanze, M. and Alao, B. F., Analyzing time delay and sensor distribution in sensor networks, **IEEE African Journal of Computing & ICT** 8, 1, 159–164, (2015).
- [36] Giannetsos, T., Dimitriou, T. and Prasad, N. R., Self-propagating worms in wireless sensor networks, **ACM CoNEXT-Student Workshop'09**, 31–32, (2009).
- [37] Gupta, A. and Gupta, A. K., A survey: Detection and prevention of wormhole attack in wireless sensor networks, **Global Journal of Computer Science and Technology: E Network, Web & Security**, 14, 23–31, (2014).
- [38] ChukwuNonso, H. N., Mbeledogu, N., Umeh, I. I., Ihekeremma, and Ejimofor, A., Modeling the effect of network access control and sensor random distribution on worm propagation, **I.J. Modern Education and Computer Science**, 11, 49-57, (2017).
- [39] Adomian, G., A new approach to nonlinear partial differential equations, **J. Math. Anal. Appl.**, 102, 420-434, (1984).
- [40] Khan, Z. H. and Khan, W. A., N-Transform-properties and applications, **NUST J. Engg. Sci.**, 1, (1), 127-133, (2008).
- [41] Rawashdeh, M. S., The fractional natural decomposition method: theories and applications, **Math. Meth. Appl. Sci.**, 40, 2362-2376, (2017).
- [42] Rawashdeh, M. S. and Maitama, S., Finding exact solutions of nonlinear PDEs using the natural decomposition method, **Math. Meth. Appl. Sci.**, 40, 223-236, (2017).
- [43] Prakasha, D. G., Veerasha, P. and Rawashdeh, M. S., Numerical solution for  $(2 + 1)$ -dimensional time-fractional coupled Burger equations using fractional natural decomposition method, **Math. Meth. Appl. Sci.**, 42, (10), 3409-3427, (2019).
- [44] Veerasha, P., Prakasha, D.G. and Singh, J., Solution for fractional forced KdV equation using fractional natural decomposition method, **AIMS Math.**, 5, (2), 798-810, (2019).
- [45] Rawashdeh, M. S., Solving fractional ordinary differential equations using FNDM, **Thai Journal of Mathematics**, 17, (1), 239–251, (2019).
- [46] Prakasha, D. G., Veerasha, P. and Baskonus, H. M., Two novel computational techniques for fractional Gardner and Cahn-Hilliard equations, **Comp. Math. Methods**, 1, (2), 1-19, (2019).

- [47] Veerasha, P. and Prakasha, D. G. An efficient technique for two-dimensional fractional order biological population model, **Int. J. Mod. Simul. Sci. Comput.**, (2050005), 1-17, (2020).
- [48] Mishra, B. K. and Keshri, N., Mathematical model on the transmission of worms in wireless sensor network, **Appl. Math. Model.**, 37, 4103–4111, (2013).
- [49] Chunbo, L. and Chunfu, J., Modeling passive propagation of malwares on the WWW, **Physics Procedia**, 33, 271–278, (2012).
- [50] Yao, Y., Guo, L., Guo, H., Yu, G., Gao, F. X. and Tong, X. J., Pulse quarantine strategy of internet worm propagation: Modeling and analysis, **Computers and Electrical Engineering**, 38, 1047–1061, (2012).
- [51] Khayam, S. A. and Radha, H., Using signal processing techniques to model worm propagation over wireless sensor networks, **IEEE Signal Processing Magazine**, 164–169, (2006).
- [52] Wang, X. and Li, Y., An improved SIR model for analyzing the dynamics of worm propagation in wireless sensor networks, **Chinese Journal of Electronics**, 18, 8-12, (2009).
- [53] Wang, X., Li, Q. and Li, Y., EiSIRS: A formal model to analyze the dynamics of worm propagation in wireless sensor networks, **J. Comb. Optim.**, 20, 47–62, (2010).
- [54] Wang, Y. and Yang, X., Virus spreading in wireless sensor networks with a medium access control mechanism, **Chinese Phy. B**, 22, 40200-40206, (2013).
- [55] Zhang, Z. and Si, F., Dynamics of a delayed SEIRS-V model on the transmission of worms in a wireless sensor network, **Adv. Diff. Equ.**, 295, (2014).
- [56] Mittag-Leffler, G. M., Sur la nouvelle fonction  $E_\alpha(x)$ , **C. R. Acad. Sci. Paris**, 137, 554-558, (1903).
- [57] Loonker, D. and Banerji, P. K., Solution of fractional ordinary differential equations by natural transform, **Int. J. Math. Eng. Sci.**, 12, (2), 1-7, (2013).

# Son deneysel veriler ışığında CMSSM

Yaşar HİÇYILMAZ\*

Balıkesir Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik. Bölümü, Çağış kampüsü, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 13.04.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 02.05.2021

## Öz

*Bu çalışmada Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) ve karanlık madde sonuçları çerçevesinde, son deneysel veriler kullanılarak sınırlandırılmış Minimal Süpersimetrik Standart Model (CMSSM)'in durumu incelenmiş ve parametre uzayına ilişkin sınırlamalar gözlemlenerek gelecekteki deneyler için öngörülerde bulunulmuştur.*

*Anahtar kelimeler: Süpersimetri, CMSSM, Büyük Hadron çarpıştırıcısı.*

## CMSSM in the light of the recent experimental data

### Abstract

*In this study, we probe the status of CMSSM under the recent experimental data from the LHC and Dark Matter results. We also restrict the parameter space and make predictions for the future experiments.*

*Keywords: Supersymmetry, CMSSM, Large Hadron Collider.*

### 1. Giriş

Standart Model (SM) düşük enerji skalasında doğayı çok güzel betimleyebilmesine ve deneylerle tam olarak uyumlu olmasına karşın, başta Hiyerarşi problemi olmak üzere bir çok probleme sahiptir. Hiyerarşi Problemine çözüm sunmak için ise yüksek enerjilerde Higgs kütleline gelen ve ağaç seviyesine göre çok büyük olan kuadratik düzeltmelerinden kurtulmak gereklidir. Süpersimetri (SUSY), temel olarak fermiyonlar ve bozonlar arasında bir bağıntı kurabilen ve bahsettiğimiz bu düzeltmeleri önemli ölçüde azaltan bir uzay-zaman simetrisidir. Teoriye göre, fermiyonik ve bozonik durumları birbirine bağlayan bir jeneratör yardımı ile, Standart Model'deki her bir

\* Yaşar HİÇYILMAZ, yasarihicyilmaz@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-3222-7942>

fermiyon için *bozonik bir süpereş* (*sfermiyon- $\tilde{f}$* ) ve her bir ayar bozonu için ise *fermiyonik bir süpereş* (*ayarino- $\tilde{g}$* ) söz konusudur. Yani Süpersimetrik modellerde SM parçacık sayısı en az ikiye katlanır.

Süpersimetri, yukarıda yazdığımız yapısından dolayı SM'in Hiyerarşi Problemi'ne çözüm getirebilmektedir [1]. Son araştırmaların ardından elde edilen sonuçların ışığında Süpersimetrik parçacıklar ağır olabilmekte (stop kütlelerinin top kuark kütlelerinden daha büyük olması gibi) ve daha küçük bir hiyerarşi problem ortaya çıkabilmektedir. Süpersimetri kendi içerisinde ekstra ayar simetrisi, daha büyük ayar grupları ya da ekstra parçacık genişlemeleri gibi mekanizmalar ile bu sorunu da çözebilmektedir. Ayrıca, Süpersimetri'nin sahip olduğu parçacık süpereşlerinin etkilerinin de hesaba katılmasıyla üç temel etkileşimin ayar bağlaşımlarının yüksek enerjilerde birleştiği görülmüştür [2]. Süpersimetri'deki ekstra parçacıklar ve bunlarla ilişkili çeşni ailelerinin karışabileceği yumuşak kırınım terimleri gibi yeni kompleks terimler sayesinde yük-parite simetri ihlalinin yeni fazlar ile artması sonucu, SM'in açıklamakta yetersiz kaldığı evrendeki madde-antimadde asimetrisine makul bir açıklama getirilebilir [3]. Bu da Süpersimetri için ayrı bir motivasyon kaynağı olarak görülür. Son olarak, LSP (Lightest Supersymmetric Particle) adı verilen, elektrik ve renk yükü bakımından nötral ve çok zayıf etkileşime giren en hafif süpersimetrik parçacıklar önemli bir '*Soğuk Karanlık Madde*' adaydır.

Süpersimetri, kuşkusuz parçacık fiziği deneylerinde en çok araştırılan teorilerden biridir. Özellikle Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda (LHC) bulunan CMS ve ATLAS deney grupları deneysel verilerde süpersimetrik parçacıkların izlerini yoğun şekilde aramaktadır. Ne yazık ki şimdiye kadar bu tür parçacıkların varlığına ilişkin herhangi bir kanıt bulunmamaktadır. Fakat bu deney sonuçları ışığında elimizdeki Süpersimetrik modellere ilişkin parameter uzayları daraltılabilmekte ve modellerin bundan sonraki durumları ve öngörülleri incelenebilmektedir.

Bu çalışmada, Minimal Süpersimetrik Standart Model (MSSM)'in bazı temel parametrelerinin Büyük Birleşim (GUT) skalasında birleştiği varsayımından yola çıkan sınırlandırılmış MSSM'in (CMSSM), son çarpıştırıcı ve karanlık madde deneylerinden elde edilen sonuçlar sonrası deneyler ile uyumlu parameter uzayı ve modelin öngörülleri araştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde genel olarak MSSM'in yapısından bahsedilecektir. Üçüncü bölümde çalışmada izlediğimiz yöntemden söz edilecek olup, dördüncü ve son bölümde ise yapılan analizler ve alınan sonuçlar grafikler halinde gösterilecek ve elde edilen bu sonuçlar tartışılacaktır.

## 2. Minimal Süpersimetrik Standart Model

MSSM, SM ile aynı ayar gruplarını içeren, minimal parçacık sayısına ve etkileşime sahip süpersimetrik modeldir. MSSM'de, her bir SM parçacığı ve ilgili parçacığın süpereşi 'kiral (madde) veya ayar (vektör) süperçoklular' denen yapılarda gruplandırılırlar. SM'deki tek Higgs çiftisine karşın MSSM'de iki Higgs çiftisi bulunur.

Temel olarak MSSM Lagrangian'ı iki temel parçadan oluşur. Bunlardan ilki kinetik ve etkileşim terimlerini içerirken, ikinci kısım ise Süpersimetri'nin yumuşak kırınımı sağlayan ve SM parçacıklarının süpereşlerine kütle kazandıran terimleri içerir.



$$L = L_{SUSY} + L_{SOFT} \quad (1)$$

$L_{SUSY}$ , SM ile aynı ayar gruplarıyla ilgili ayar-değişmez kinetik terimleri ve ayar etkileşim terimleri daha sonra bahsedeceğimiz Süperpotansiyel'den türetilen Yukawa etkileşim terimlerini ve skaler potansiyeli içerir.

$$L_{SUSY} = L_{Kinetik} + L_{Ayar} - L_{Yukawa} - V_F \quad (2)$$

MSSM için yazılabilecek en genel formdaki süperpotansiyel

$$\hat{W}_{MSSM} = -\mu \hat{H}_d \cdot \hat{H}_u + \hat{Q} \cdot \hat{H}_u Y_u \hat{U} + \hat{H}_d \cdot \hat{Q} Y_d \hat{D} + \hat{H}_d \cdot \hat{L} Y_e \hat{E} \quad (3)$$

şeklinde yazılır. Denklem (3)'de  $\hat{U}$ ,  $\hat{D}$  ve  $\hat{E}$  sağ-elli parçacıkların süperalanlarını simgelerken,  $\hat{Q}$  ve  $\hat{L}$  skuark ve slepton çiftlerini ifade eder.  $Y_u, Y_d$  ve  $Y_e$  ise sırasıyla yukarı-tipli kuarklar, aşağı-tipli kuarklar ve leptonlar için Yukawa bağlaşımlarıdır.

Süpersimetrik Lagrangian'ın son iki terimi olan Yukawa etkileşim terimleri,  $L_{Yukawa}$  ve skaler potansiyel,  $V_F$ , ifade (3)'de belirtilen süperpotansiyelden türetilir.

$$\begin{aligned} L_{Yukawa} &= \sum_{i,j} \frac{\partial^2 W}{\partial \phi_i \partial \phi_j} \psi_i \psi_j + h.c \\ &= \varepsilon_{ij} [E Y_e L^i \cdot H_d^j + D Y_d Q^i \cdot H_d^j + U Y_u Q^i \cdot H_u^j + \mu H_u^i \cdot H_d^j] \\ &\quad + \varepsilon_{ij} [\tilde{E} Y_e L^i \cdot \tilde{H}_d^j + \tilde{D} Y_d Q^i \cdot \tilde{H}_d^j + \tilde{U} Y_u Q^i \cdot \tilde{H}_u^j] \\ &\quad + \varepsilon_{ij} [E Y_e \tilde{L}^i \cdot \tilde{H}_d^j + D Y_d \tilde{Q}^i \cdot \tilde{H}_d^j + U Y_u \tilde{Q}^i \cdot \tilde{H}_u^j] + h.c \end{aligned} \quad (4)$$

Burada,  $\phi$ , kiral süperçoklusunun skaler bileşeni olup,  $\psi$  ise aynı süperçoklusunun fermiyonik bileşenidir. Süpersimetri'nin kırınımıyla ilgili kesin bir mekanizmanın olmamasından dolayı, simetriyi kıran terimler Lagrangian'a el ile yazılır. MSSM için yazılan holomorfik yumuşak simetri kırınım terimleri,

$$\begin{aligned} -L_{soft} &= \tilde{Q}^\dagger m_{\tilde{Q}}^2 \tilde{Q} + \tilde{U}^\dagger m_{\tilde{U}}^2 \tilde{U} + \tilde{D}^\dagger m_{\tilde{D}}^2 \tilde{D} + \tilde{L}^\dagger m_{\tilde{L}}^2 \tilde{L} + \tilde{E}^\dagger m_{\tilde{E}}^2 \tilde{E} \\ &\quad + m_{H_u}^2 H_u^\dagger H_u + m_{H_d}^2 H_d^\dagger H_d + [-\mu B H_d \cdot H_u + h.c.] \\ &\quad + [\tilde{Q} \cdot H_u Y_u^A \tilde{U} + \tilde{Q} \cdot H_d Y_d^A \tilde{D} + \tilde{L} \cdot H_d Y_e^A \tilde{E} + h.c.] \\ &\quad - [m_{\tilde{g}} \lambda_{\tilde{g}}^a \lambda_{\tilde{g}}^a + M_2 \lambda_{\tilde{W}}^i \lambda_{\tilde{W}}^i + M_1 \lambda_{\tilde{B}} \lambda_{\tilde{B}} + h.c.] \end{aligned} \quad (5)$$

şeklinde dir. Burada,  $m_{\tilde{Q}, \dots, \tilde{E}}^2$  skaler fermiyonların yumuşak kütle karelerini,  $Y_{u,d,e}^A$  holomorfik üçlü-lineer bağlaşımlarını ve son olarak  $m_{\tilde{g}}, M_2$  ve  $M_1$  gluino, wino ve bino kütleleridir. Buna ek olarak, gluino indisi olan  $a$ , birden sekize kadar ve wino indisi olan  $i$  ise birden üçe kadar değerler alır. Yumuşak Lagrangian terimleri içerisinde Higgs sektörü  $m_{H_u}^2$  ve  $m_{H_d}^2$  yumuşak kütleleri ile tanımlanır ve B (bilineer skaler

bağlaşım sabiti) ise iki Higgs çiftlisi arasındaki karışım sabitidir. MSSM Lagrangian'ı ile ilgili bu bilgilerden sonra sırasıyla parçacık sektörlerinden bahsedebiliriz.

### 2.1. Higgs sektörü

Daha önce de belirtildiği gibi MSSM'de, hiperyükleri  $Y_{H_u} = 1/2$  ve  $Y_{H_d} = -1/2$  olmak üzere iki Higgs çiftlisi vardır ve vakum durumunda bu iki çiftlinin nötral bileşenleri sıfırdan farklı değerler alır. Dolayısıyla  $H_u$  ve  $H_d$ ,

$$\begin{aligned} H_u &= \begin{pmatrix} H_u^+ \\ H_u^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} H_u^+ \\ \nu_u + \phi_u + i\varphi_u \end{pmatrix} \\ H_d &= \begin{pmatrix} H_d^0 \\ H_d^- \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \nu_d + \phi_d + i\varphi_d \\ H_d^- \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

şeklinde vakum beklenen değerleri ve alanlar cinsinden açılabilir. MSSM için Higgs bozonu kütesini bulmak için öncelikle Higgs potansiyeli bulunmalıdır. MSSM'de, en basit süreç olan 'tree-level' sürecinde Higgs için skaler potansiyel, Lagrangian'daki F-terim, D-terim ve yumuşak kırınım terimlerinden elde edilir.

$$V_{tree} = V_F + V_D + V_{soft} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_F &= |\mu|^2 (H_u^\dagger H_u + H_d^\dagger H_d) \\ V_D &= \frac{G^2}{8} (H_u^\dagger H_u - H_d^\dagger H_d)^2 + \frac{g_2^2}{2} (H_u^\dagger H_u H_d^\dagger H_d - |H_u \cdot H_d|^2) \\ V_{soft} &= m_{H_u}^2 H_u^\dagger H_u + m_{H_d}^2 H_d^\dagger H_d - \mu B(H_u \cdot H_d + h.c.) \end{aligned} \quad (8)$$

denklem (8)'de  $G^2 = g_2^2 + g_Y^2$  olarak tanımlanır. Burada  $g_2$  ve  $g_Y$  sırasıyla  $SU(2)_L$  ve  $U(1)_Y$  ayar gruplarının ayar bağlaşımlarıdır. Dolayısıyla Higgs için skaler potansiyel,

$$\begin{aligned} V_{tree} &= (m_{H_u}^2 + |\mu|^2) |H_u|^2 + (m_{H_d}^2 + |\mu|^2) |H_d|^2 - \mu B(H_u \cdot H_d + h.c.) \\ &+ \frac{G^2}{8} (|H_u|^2 - |H_d|^2)^2 + \frac{g_2^2}{2} (|H_u|^2 |H_d|^2 - |H_u \cdot H_d|^2) \end{aligned} \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu potansiyelin minimumunda kendiliğinden elektrozayıf simetri kırınımı sonrası nötral Higgs bileşenleri sıfırdan farklı vakum beklenen değerlerini alırken, elektromanyetik simetrisinin kırılmamasından dolayı yüklü Higgs bileşenlerinin vakum beklenen değeri sıfırdır.

$$\langle H_u^0 \rangle = \frac{\nu_u}{\sqrt{2}}, \quad \langle H_d^0 \rangle = \frac{\nu_d}{\sqrt{2}}, \quad \langle H_u^+ \rangle = \langle H_d^- \rangle = 0 \quad (10)$$

Yüklü Higgs bileşenlerinin sıfır olması ile (9)'daki skaler potansiyel

$$V_{tree} = m_1^2 |H_d|^2 + m_2^2 |H_u|^2 - \mu B(H_d^0 H_u^0 + h.c.) + \frac{(g_2^2 + g_Y^2)}{8} (|H_u^0|^2 - |H_d^0|^2)^2 \quad (11)$$

şeklinde indirgenebilir. Burada  $m_3^2 = \mu B$ ,  $m_1^2 = m_{H_d}^2 + |\mu|^2$  ve  $m_2^2 = m_{H_u}^2 + |\mu|^2$  şeklinde tanımlanmıştır. Elektrozayıf simetri kırınımı olması ve minimum potansiyelde nötral Higgs bileşenlerine vakum beklenen değeri gelmesi için

$$m_1^2 + m_2^2 \geq 2m_3^2 \\ m_3^2 > m_1^2 m_2^2 \quad (12)$$

koşulları sağlanmalıdır. Bilindiği gibi SM’de, serbestlik derecesi dört olan tek bir Higgs çiftlisi elektrozayıf simetri kırınımı sonrası serbestlik derecesi bir olan reel skaler Higgs bozonuna dönüşür. Geriye kalan diğer üç bileşen ise elektrozayıf ayar bozonlarına kütle kazandırmak için yine o bozonlar tarafından yenir. SUSY’de ise varolan iki Higgs çiftlisinden gelen sekiz serbestlik derecesinin üç bileşeni yine  $W^\pm$  ve  $Z^0$  bozonları tarafından yenir. Geri kalan beş serbestlik derecesi ise iki CP-çift nötral skaler ( $h^0, H^0$ ), bir CP-tek psedu-skaler ( $A^0$ ) ve iki farklı yüklü Higgs ( $H^\pm$ ) şeklinde dağılır. Nötral Higgs bozonları  $h^0$  ve  $H^0$ ’ın fiziksel kütleleri

$$m_{h^0, H^0}^2 = \frac{1}{2} \left[ (m_{A^0}^2 + M_Z^2) \mp \sqrt{(m_{A^0}^2 + M_Z^2)^2 - 4m_{A^0}^2 M_Z^2 \cos^2 2\beta} \right] \quad (13)$$

şeklindedir.

Diğer yandan, MSSM’de Higgs sektörüne gelen ışınımsal düzeltmeler azımsanmayacak miktardadır. Bu ışınımsal düzeltmelerin büyük ölçüde bir kısmı,  $\tan \beta \leq 30$  durumunda üst kuark ve onun süpereşi olan skaler-üst kuark halka diyagramlarından gelir. Sonuç olarak deneylerle uyumlu sonuçlar elde etmek için en azından tek halkadan gelen ışınımsal düzeltmeler potansiyele eklenmelidir. Dolayısıyla efektif potansiyel

$$V' = V_{tree} + V_{halka} \quad (14)$$

şeklindedir. Buradaki halka potansiyeli ise üst-kuark ve skaler üst-kuark katkısı için aşağıdaki gibi yazılabilir[4].

$$V_{halka} = \frac{6}{64\pi^2} \left[ \sum_{i=1}^2 m_i^4(H) \left( \log \frac{m_i^2(H)}{\Lambda^2} - \frac{3}{2} \right) - 2m_t^4(H) \left( \log \frac{m_t^2(H)}{\Lambda^2} - \frac{3}{2} \right) \right] \quad (15)$$

Burada  $\Lambda$ , renormalizasyon skalasını,  $m_i$ , s-fermiyon sektöründeki skaler üst-kuark kütlelerini ve  $m_t$  ise üst-kuark kütlelerini ifade eder. Sonuç olarak, üst kuark ve skaler-üst kuarktan gelen ışınımsal düzeltmelerinde eklenmesiyle en hafif Higgs kütlesi aşağıdaki gibidir.

$$m_{h^0}^2 \leq M_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3m_t^4 \sin^4}{2\pi^2(v_u^2 + v_d^2)} \ln \left( \frac{m_{\tilde{t}_1}^2 + m_{\tilde{t}_2}^2}{2m_t} \right) \quad (16)$$

## 2.2. Skaler fermion sektörü

MSSM’de skuarkların ve sleptonların kütle matrisleri hesaplanırken sadece üçüncü aile parçacıklarının hesaba katılması yeterlidir. Yukawa bağlaşımları parçacık kütleleriyle orantılı olduğu için, doğal olarak sadece üçüncü aile parçacıklarının Yukawa bağlaşımlarının ve onların yumuşak kırınım terimlerini içeren terimler sfermion kütlelerine ciddi katkılar yapabilir. Birinci ve ikinci aile parçacıklarının Yukawa bağlaşımlarından gelen terimler, sfermion kütle skalası düşünüldüğünde ihmal edilebilir derecede azdır. Skaler-üst kuark kütle matrisi için kütle terimleri, süpersimetrik lagrangiyandaki skaler potansiyelden ( $V_F$ ), D-terimlerden ve yumuşak kırınım terimlerinden gelir. Sonuç olarak,

$$\begin{aligned} m_{LL}^2 &= m_{\tilde{t}_L}^2 + m_t^2 - \frac{1}{4} \left( g_2^2 - \frac{1}{3} g_Y^2 \right) \left( |H_u^0|^2 - |H_d^0|^2 \right) \\ m_{LR}^2 &= h_t A_t^* H_u^{0*} - h_t \mu H_d^0 \\ m_{LR}^2 &= h_t A_t H_u^0 - h_t \mu^* H_d^{0*} \\ m_{RR}^2 &= m_{\tilde{t}_R}^2 + m_t^2 - \frac{1}{3} g_Y^2 \left( |H_u^0|^2 - |H_d^0|^2 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

olmak üzere skaler-üst kuark kütle kare matrisi,

$$M_{\tilde{t}}^2 = \begin{pmatrix} m_{LL}^2 & m_{LR}^2 \\ m_{RL}^2 & m_{RR}^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

şeklinindedir. (18)’deki matrisin dikleştirilmesinin ardından elde edilen özdeğerler, iki skaler-üst kuark durumu için kütle kareleri verir.

$$\begin{aligned} m_{\tilde{t}_{1,2}}^2 &= \frac{1}{2} \left[ m_{\tilde{t}_L}^2 + m_{\tilde{t}_R}^2 + 2m_t^2 + \frac{1}{2} \cos 2\beta M_Z^2 \right. \\ &\quad \left. \mp \sqrt{\left( m_{\tilde{t}_L}^2 - m_{\tilde{t}_R}^2 + \left( \frac{1}{2} - \frac{4}{3} s_W^2 \right) \cos 2\beta M_Z^2 \right)^2 + 4m_t^2 (A_t - \mu^2 \cot \beta)} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

Denklem (19)’de  $s_W \equiv \sin \theta_W$  olup,  $\theta_W$  elektrozayıf karışım açısı olan Weinberg açısıdır. Aynı yöntemle skaler-aşağı kuark ve stau’nun kütle kare matrisleri bulunabilir. Genel bir ifade ile skaler-aşağı kuark ve stau’nun kütle kare matris elemanları

$$\begin{aligned}
 (m_{LL})_{\tilde{b},\tilde{\tau}}^2 &= m_{\tilde{b}_L,\tilde{\tau}_L}^2 + m_{b,\tau}^2 + \delta_{b_L,\tau_L}^2 \\
 (m_{LR})_{\tilde{b},\tilde{\tau}}^2 &= h_{b,\tau} A_{b,\tau}^* H_d^{0*} - h_{b,\tau} \mu H_u^0 \\
 (m_{RL})_{\tilde{b},\tilde{\tau}}^2 &= h_{b,\tau} A_{b,\tau} H_d^0 - h_{b,\tau} \mu^* H_u^{0*} \\
 (m_{RR})_{\tilde{b},\tilde{\tau}}^2 &= m_{\tilde{b}_R,\tilde{\tau}_R}^2 + m_{b,\tau}^2 + \delta_{b_R,\tau_R}^2
 \end{aligned} \tag{20}$$

şeklindedir.

Burada skaler nötrinolar için ek bir bilgilendirme yapmak yerinde olacaktır. Bilindiği gibi denklem (3)'te skaler nötrinolarla kütle kazandıracak bir terim olmamasına karşın bu parçacıklar Süpersimetri çerçevesinde yukarıdaki mekanizmaya benzer bir şekilde kütle kazanabilirler. Kütle terimlerinin temel kaynağı ise denklem (5)'te gösterilen yumuşak simetri kırınım terimleridir.

### 2.3. Nötralino sektörü

Elektrozayıf simetrisinin kırınımı sonucu, aynı ayar gurubu gösterimine sahip nötral Higgsinolar  $(\tilde{H}_u^0 \ \tilde{H}_d^0)$  ve nötral ayarınolar  $(\tilde{B}^0 \ \tilde{W}^0)$  birbirlerine karışarak nötralino'ları  $(\tilde{\chi}_i^0)$  oluşturur. SUSY yumuşak kırınımından gelen  $\tilde{B}^0$  ve  $\tilde{W}^0$  kütle terimleri

$$-\frac{1}{2}(M_1 \tilde{B}^0 \cdot \tilde{B}^0 + M_2 \tilde{W}^0 \cdot \tilde{W}^0) \tag{22}$$

ile

$$L_{etkileşim} = -\sqrt{2}g [(\phi_i^\dagger T^a \bar{\psi}_i) \cdot \lambda^a + h.c] - \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial \phi_i \partial \phi_j} \psi_i \psi_j + h.c \right] \tag{23}$$

etkileşim Lagrangianından gelen Higgsino ve ayarino karışım terimleri MSSM'in nötralino sektörünü oluşturur. Sonuç olarak,  $\psi^0 = (\tilde{B}^0, \tilde{W}^0, \tilde{H}_u^0, \tilde{H}_d^0)$  ayar bazında nötralino kütle terimleri içeren lagrangian kısmı

$$L_{nötralino} = -\frac{1}{2}(\psi^0)^T M_{\tilde{N}} \psi^0 \tag{24}$$

olarak yazılabilir. Burada  $M_{\tilde{N}}$  nötralino kütle matrisi olup, aşağıda gösterildiği gibidir.

$$M_{\tilde{N}} = \begin{pmatrix} M_1 & 0 & -M_Z \cos \beta \sin \theta_W & M_Z \sin \beta \sin \theta_W \\ 0 & M_1 & M_Z \cos \beta \cos \theta_W & -M_Z \sin \beta \cos \theta_W \\ -M_Z \cos \beta \sin \theta_W & M_Z \cos \beta \cos \theta_W & 0 & -\mu \\ M_Z \sin \beta \sin \theta_W & -M_Z \sin \beta \cos \theta_W & -\mu & 0 \end{pmatrix} \tag{25}$$

### 2.3. Yüklino sektörü

Nötralinolardaki duruma benzer bir şekilde, yüklü Higgsinolar  $(\tilde{H}_u^+ \quad \tilde{H}_d^-)$  ile yüklü  $SU(2)_L$  ayarınoların karışımı yüklino sektörü meydana gelir. Yüklino kütle matrisi iki yüklü Higgsinonun karışımını ve higgs bozonları, bir yüklü ayarino ve bir yüklü higgsino arasındaki etkileşimleri içerir. Dolayısıyla, yüklino kütle terimlerini içeren lagrangian,

$$L_{\text{yüklino}} = -\frac{1}{2}(\psi^\pm)^T M_{\tilde{\chi}_{1,2}^\pm} \psi^\pm \quad (26)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,  $\psi^+ = (\tilde{W}^+ \quad \tilde{H}_u^+)$  ve  $\psi^- = (\tilde{W}^- \quad \tilde{H}_d^-)$  olan iki baz ve  $M_{\tilde{\chi}_{1,2}^\pm}$  ise yüklino kütle matrisidir.

$$M_{\tilde{\chi}_{1,2}^\pm} = \begin{pmatrix} 0 & X^T \\ X & 0 \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} M_2 & \sqrt{2}M_W \sin \beta \\ \sqrt{2}M_W \cos \beta & \mu \end{pmatrix} \quad (27)$$

### 3. Yöntem

Bu çalışmada ele alınan modellerle ilgili data üretilirken SPheno [5], SARAH [6] ve MicrOMEGAS [7] kodlarından yararlanılmıştır. MSSM için renormalizasyon grup denklemlerinin aktarılmış olduğu bu kodlarla CMSSM için uygun olarak Büyük Birleşim (GUT) skalasında belirlenen sınır koşulları altında renormalizasyon grup denklemleri kullanarak zayıf skaladaki parametreler hesaplanmış ve deneysel veriler ışığında incelenmiştir. Elde edilen dataya farklı deneylerden elde edilen sonuçların uygulanmasıyla, parametre uzayında sınırlamalara gidilmiştir. Parametre uzayı taramasında kullanılan aralıklar aşağıdaki gibidir.

Tablo 1. CMSSM Parametre Uzayı.

Parametre	Taranan Aralık
$m_0$	[0, 5] TeV
$M_{1/2}$	[0, 5] TeV
$\tan\beta$	[1, 60]
$A_0/m_0$	[-3, 3]

Bu çalışmada kullanılan deney sınırlamaları [8-18]'den alınmıştır ve kısaca aşağıdaki gibidir.

$$m_h = 122 - 128 \text{ GeV},$$

$$m_{\tilde{g}} \geq 2.0 \text{ TeV},$$

$$0.8 \times 10^{-9} \leq \text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) \leq 6.2 \times 10^{-9} \text{ (} 2\sigma \text{ tolerance),}$$

$$m_{\tilde{\chi}_1^\pm} \geq 103.5 \text{ GeV},$$

$$m_{\tilde{\tau}} \geq 105 \text{ GeV},$$

$$2.99 \times 10^{-4} \leq \text{BR}(B \rightarrow X_s \gamma) \leq 3.87 \times 10^{-4} \text{ (} 2\sigma \text{ tolerance),}$$

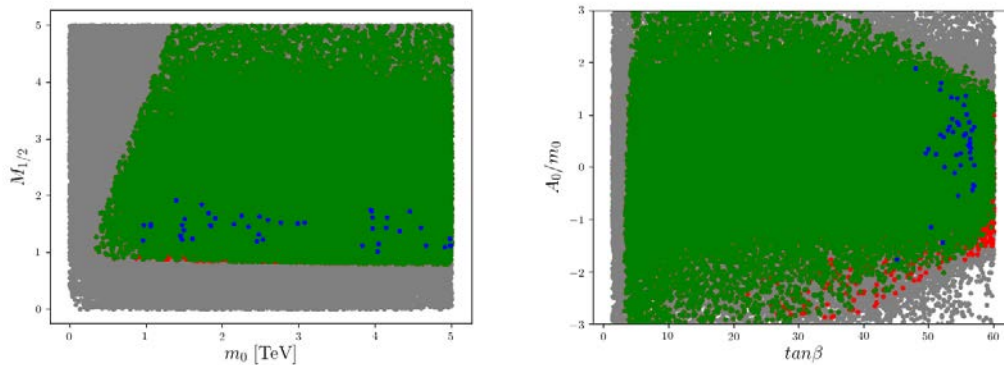
$$0.15 \leq \frac{\text{BR}(B_u \rightarrow \tau \nu_\tau)_{\text{NHSSM}}}{\text{BR}(B_u \rightarrow \tau \nu_\tau)_{\text{SM}}} \leq 2.41 \text{ (} 3\sigma \text{ tolerance),}$$

$$0.114 \leq \Omega_{\text{CDM}} h^2 \leq 0.126 \text{ (} 5\sigma \text{ tolerance).}$$

#### 4. Sonuçlar ve tartişma

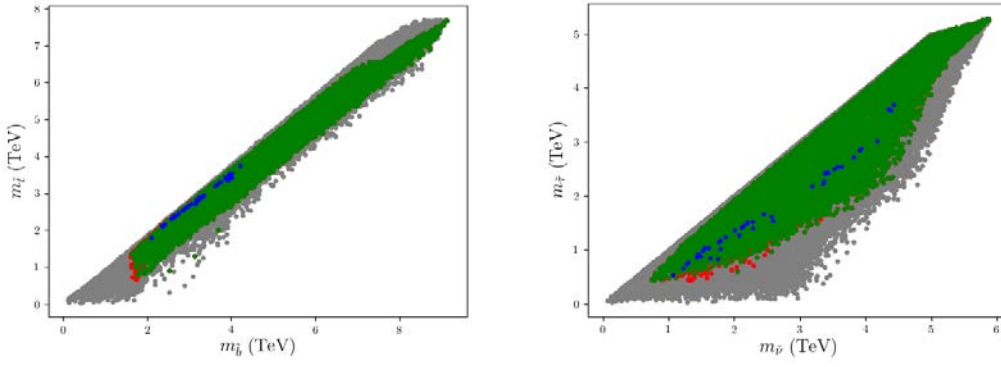
Bu bölümde CMSSM parameter uzayının taranmasının ardından, bir önceki bölümde verilen deneysel sınırlamalar sonucunda parameter uzayının hayatta kalan bölgeleri ve bu bölgelere ilişkin öngörüler ařaēıda gösterilen grafiklerde sunulmuştur. Bu grafiklerde gösterilen gri bölgeler alınan tüm dataları ifade ederken sırasıyla kırmızı bölgeler sadece skaler parçacık kütlesi ve Higgs keşfinden gelen sınırlamalara uyan, yeşil bölgeler skaler parçacık kütlesi, Higgs keşfinden gelen sınırlamalar ve B fizik sonuçlarına uyan ve son olarak mavi bölgeler ise karanlık madde kalıntı yoēunluēu ile birlikte tüm deney sonuçlarına uyan noktaları ifade etmektedir.

şekil 1’de CMSSM’in temel parametrelerinin bahsedilen deney sonuçları sonucunda hayatta kalan bölgeleri gösterilmiştir. Buna göre, karanlık madde deneylerinden gelen sınırlamalar sonucunda ortak gaugino kütle parametresi  $M_{1/2}$ , 1-2 TeV aralıēına sıkışıyorken,  $\tan\beta$  ise 40’dan büyük olmalıdır. Ortak skaler kütlesi  $m_0$  ile ortak l etkileşim sabiti  $A_0$  üzerinde kayda deēer bir sınırlama ise görülmemektedir.



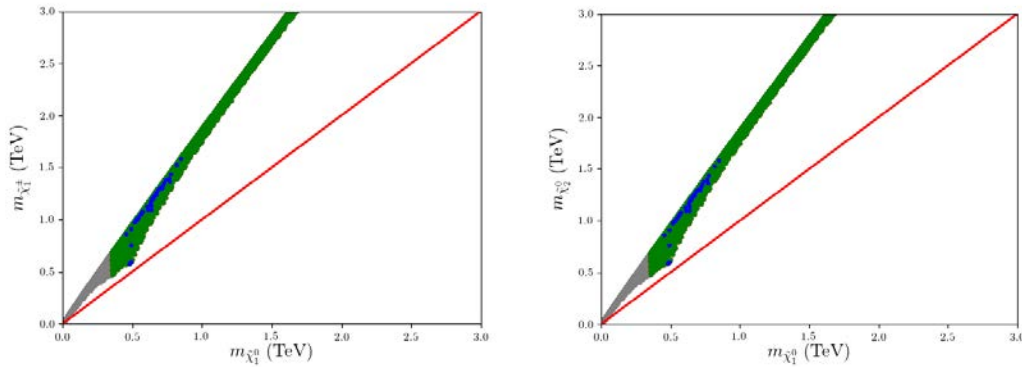
şekil 1. CMSSM parametre uzayı.

Diēer taraftan şekil 2’de skaler fermiyon kütlesine ilişkin öngörüler grafiklerle gösterilmiştir. Soldaki grafikte skaler st ve skaler alt kuark kütleleri tüm deneysel sınırlamalar uygulandıktan sonra 2 TeV’den büyük olmalıdır. Buna raēmen saē taraftaki grafiēe bakıldıēında skaler tau kütlesi 1 TeV’in altına inebildiēi gözlemlenmiştir.



Şekil 2. CMSSM Skaler fermiyon kütleleri.

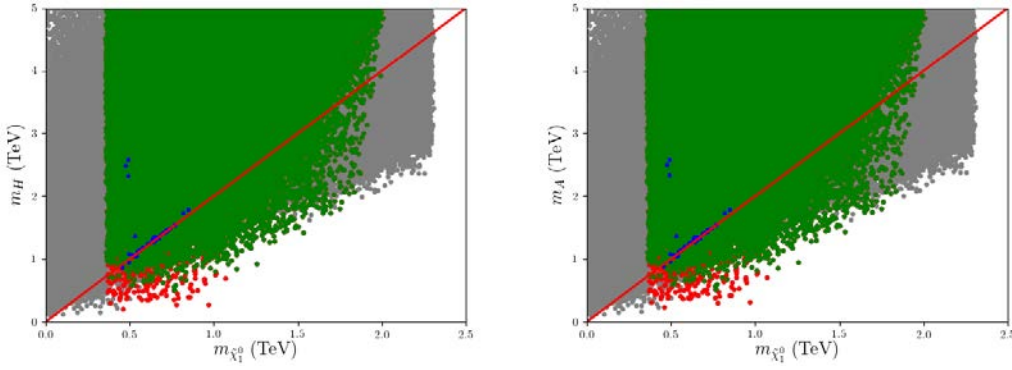
Şekil 3'te nötralinno ve yüklinno kütleleri gösterilmiştir. Grafiklerde bulunan kırmızı çizgi her iki eksendeki kütlelerin dejenere olduğu bölgeyi göstermektedir. Buna göre karanlık madde adayı olan en hafif nötralinno kütlesi 0.5-1 TeV aralığında değişmekte iken, en hafif yüklinno kütlesi 0.6-1.5 TeV aralığındadır. Bu kütle aralıkları BHC'deki Run-1 ve Run-2 sonuçları ile uyum halinde olup, Run-3'te incelenecektir. Her iki kütlelerin dejenere olduğu bir bölge bulunmamakta olup, bu durum en hafif nötralinonun Higgsino benzeri bir parçacık olma olasılığını ortadan kaldırmaktadır. Diğer taraftan bazı sonuçların bu çizgiye yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar için en hafif nötralinno bino benzeri olup, en hafif yüklinno ise Higgsino benzeridir. Elimizdeki sonuçlara göre tüm deney sınırlamalarını sağlayan diğer tüm noktalar için en hafif nötralinno Bino benzeridir.



Şekil 3. CMSSM Nötralinno-yüklinno kütleleri.

Son olarak Şekil 4'te en hafif nötralinno kütlelerine karşılık CP-çift ve CP-tek Higgs kütleleri verilmiştir. Grafiklerde gösterilen kırmızı çizgi, nötralinno kütlelerinin iki katına denk gelen bölgeleri göstermektedir. Sonuçlarımıza göre, evrende ölçülen kalıntı yoğunluğunun sağlanması için en hafif nötralinnoya ait karanlık madde yok etme (Dark Matter annihilation) sürecinin, genel olarak ağır Higgs'ler aracılığıyla gerçekleştiği söylenebilir. Bu ağır Higgs'ler en hafif 1 TeV olup, bu sınır BHC'deki deneyler ile uyumludur [19]. Ek olarak, bu süreçlerin genliklerinin  $\tan\beta$  ile doğru orantılı olması parameter uzayımızın büyük  $\tan\beta$  değerlerine hapsolmesini açıklamaktadır [20].





Şekil 4. CMSSM Nötrino-Higgs Kütelleri.

Sonuç olarak, bu çalışmada CMSSM çerçevesinde deneylerden gelen sınırlamalar eşliğinde parametre uzayının izinli bölgelerine bakılmış ve öngörülerde bulunulmuştur. Buna göre karanlık madde kalıntı yoğunluğundan gelen sonuçlar,  $M_{1/2}$  ve  $\tan\beta$  uzayını bir hayli sınırlamaktadır. Tüm deney sınırlamaları uygulandıktan sonra elde kalan izinli bölgeler skaler-üst ve skaler-alt kuark kütlelerinin 2 TeV'den büyük olması gerektiğini ve skaler tau kütlelerinin 1 TeV'in altına düşebileceğini söylemektedir. Karanlık madde adayı olan en hafif nötrino kütlesi ise 0.5-1 TeV aralığındadır.

### Kaynaklar

- [1] Barbieri, R. ve Giudice, G. F., Upper Bounds on Supersymmetric Particle Masses, **Nucl. Phys. B**, 306,63–76, (1988).
- [2] Georgi, H. ve Glashow, S. L., Unity of All Elementary Particle Forces, **Phys. Rev. Lett.**, 32, 438–441, (1974).
- [3] Dugan M., Grinstein B. ve Hall L. J., CP Violation in the Minimal N=1 Supergravity Theory, **Nuclear Phys. B.**, 255, 413-438, (1985).
- [4] Coleman S. ve Weinberg E., Radiative Corrections as the Origin of Spontaneous Symmetry Breaking, **Phys. Rev. D**, 7, 1888, (1973).
- [5] Porod, W., SPheno, a program for calculating supersymmetric spectra, SUSY particle decays and SUSY particle production at  $e^+ e^-$  colliders, **Comput. Phys. Commun.**, 153, 275–315, (2003).
- [6] Staub, F., SARAH 4: A tool for (not only SUSY) model builders, **Comput. Phys. Commun.**, 185, 1773-1790, (2014).
- [7] Bélanger, G., Boudjema, F., Goudelis, A., Pukhov A. ve Zaldivar, B., micrOMEGAs5.0: Freeze-in, **Comput. Phys. Commun.**, 231, 173–186, (2018).
- [8] Atlas Collaboration, Search for supersymmetry in events containing a same-flavour opposite-sign dilepton pair, jets, and large missing transverse momentum in  $\sqrt{s}=8$  TeV pp collisions with the ATLAS detector, **Eur. Phys. J. C**, 75, 318, (2015).
- [9] Atlas Collaboration, Search for Scalar Charm Quark Pair Production in pp Collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV with the ATLAS Detector, **Phys. Rev. Lett.**, 114, 161801, (2015).
- [10] Atlas Collaboration, Search for top squark pair production in final states with one isolated lepton, jets, and missing transverse momentum in  $\sqrt{s}=8$  TeV pp collisions with the ATLAS detector, **JHEP**, 11, 118, (2014).

- [11] Particle Data Group, Review of Particle Physics, **Chin. Phys. C**, 38, 090001, (2014).
- [12] Atlas Collaboration, Search for direct production of charginos, neutralinos and sleptons in final states with two leptons and missing transverse momentum in pp collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV with the ATLAS detector, **JHEP**, 05, 071, (2014).
- [13] Atlas Collaboration, Search for a Heavy Neutral Particle Decaying to  $e\mu$ ,  $e\tau$ , or  $\mu\tau$  in pp Collisions at  $\sqrt{s}=8$ TeV with the ATLAS Detector, **Phys. Rev. Lett.**, 115, 031801, (2015).
- [14] Atlas Collaboration, Search for squarks and gluinos with the ATLAS detector in final states with jets and missing transverse momentum using  $\sqrt{s}=8$ TeV proton-proton collision data, **JHEP**, 09, 176, (2014).
- [15] Atlas Collaboration, A search for high-mass resonances decaying to  $\tau^+\tau^-$  in pp collisions at  $\sqrt{s}=8$  TeV with the ATLAS detector, **JHEP**, 07, 157, (2015).
- [16] Belle Collaboration, Measurement of the  $B^- \rightarrow X_s \gamma$  Branching Fraction with a Sum of Exclusive Decays, **Phys. Rev. D**, 91, 052004, (2015).
- [17] CMS and LHCb Collaborations, Observation of the rare  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  decay from the combined analysis of CMS and LHCb data, **Nature**, 522, 68-72, (2015).
- [18] Planck collaboration, Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, **Astron.Astrophys.**, 641, (2020).
- [19] Atlas Collaboration, Search for Heavy Higgs Bosons Decaying into Two Tau Leptons with the ATLAS Detector Using pp Collisions at  $\sqrt{s}=13$  TeV, **Phys. Rev. D**, 125, 051801, (2020).
- [20] Beskidt C., de Boer W., Hanisch T., Ziebarth E., Zhukov V., Kazakov D., Constraints on Supersymmetry from Relic Density compared with future Higgs Searches at the LHC, **Phys. Lett., B.**, 695, 143-148, (2011).

# Determinants of passenger loyalty for high speed rail system in Turkey

Güzin AKYILDIZ ALÇURA<sup>1,\*</sup>, Gülhayat Gölbaşı ŞİMŞEK<sup>2</sup>, Sümeyye Şeyma KUŞAKCI GÜNDOĞAR<sup>1</sup>, Sami Cankat TANRIVERDİ<sup>3</sup>, Mustafa GÜRSOY<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Civil Engineering Department, Transportation Division, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Faculty of Art and Sciences, Department of Statistics, Yıldız Technical University, Istanbul, Turkey

<sup>3</sup> Istanbul Municipality-İBB, Transportation Planning Division, Istanbul

Geliş Tarihi (Received Date): 05.03.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 04.05.2021

## Abstract

*Satisfaction and loyalty of passengers is important for a public transportation system provider especially if a competition exists between service providers. The factors affecting passenger satisfaction and loyalty must be determined by managers, operators, and decision makers. In this study, 900 passengers using High Speed Rail System between two cities (Ankara and Eskişehir) in Turkey were asked to rate their perceptions about the service they get. Their ratings are analyzed in terms of effects of factors on satisfaction and loyalty. The factors taken into consideration are service quality dimensions (which have ten sub-criteria), trust, perceived value, involvement, image, satisfaction and loyalty. Structural equation modeling is used to examine the direct and indirect relationships between these factors. Image is found effective on almost all factors analyzed: Perceived value, Trust, Satisfaction, Involvement and Loyalty. According to results, two important dimensions of service quality among ten dimensions came forward as most effective on satisfaction: Reliability and Interaction quality of personnel, which is found effective also on trust, satisfaction and involvement. On loyalty, the effective factors are found as perceived value, involvement, satisfaction and image.*

**Keywords:** High speed rail system, public transportation, loyalty, service quality dimensions, image, satisfaction, trust, perceived value.

\*Guzin AKYILDIZ ALÇURA, akyildiz@yildiz.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-7424-2764>  
Gülhayat Gölbaşı ŞİMŞEK, gulhayat@yildiz.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-8790-295X>  
Sümeyye Şeyma KUŞAKCI GÜNDOĞAR, skusakci@yildiz.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7665-0005>  
Sami Cankat TANRIVERDİ, cankattanriverdi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4881-5618>  
Mustafa GÜRSOY, gursoy@yildiz.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3782-5941>

# Türkiyedeki yüksek hızlı tren sisteminde yolcu sadakatinin belirleyicileri

## Öz

*Yolcuların memnuniyeti ve sadakati, bir toplu taşıma sistemi sağlayıcısı için, özellikle hizmet sağlayıcılar arasında bir rekabet varsa önemlidir. Yolcu memnuniyetini ve sadakatini etkileyen faktörler yöneticiler, operatörler ve karar vericiler tarafından belirlenmelidir. Bu çalışmada, Türkiye'de iki şehir (Ankara ve Eskişehir) arasında Yüksek Hızlı Raylı Sistem kullanan 900 yolcudan aldıkları hizmetle ilgili algılarını derecelendirmeleri istenmiş, faktörlerin memnuniyet ve sadakat üzerindeki etkileri açısından derecelendirmeleri incelenmiştir. Dikkate alınan faktörler; alt kriterleriyle birlikte hizmet kalitesi boyutları, güven, algılanan değer, katılım, imaj, memnuniyet ve sadakattir. Bu faktörler arasındaki doğrudan ve dolaylı ilişkileri incelemek için Yapısal Eşitlik Modeli kullanılmıştır. İmaj, analiz edilen hemen hemen tüm faktörlerde (algılanan değer, güven, memnuniyet, katılım ve sadakat) etkili bulunmuştur. Sonuçlara göre, memnuniyet üzerinde hizmet kalitesinin iki önemli boyutu öne çıkmıştır: Personelin Etkileşim Kalitesi ve Güvenilirlik. Bu iki kriter aynı zamanda güven, memnuniyet ve katılım üzerinde de etkili bulunmuştur. Sadakat üzerinde etkili faktörler, algılanan değer, katılım, memnuniyet ve imaj olarak bulunmuştur.*

**Anahtar kelimeler:** Yüksek hızlı tren, toplu taşıma sistemleri, sadakat, hizmet kalitesi, itibar, güven, algılanan değeri.

## 1. Introduction

Passengers' evaluations, feelings and obligations for the company they get service, brings out so many aspects to examine. For this examination, researchers developed so many techniques through the history of quality concept. Starting from quality of goods, it became possible to measure the intangible properties of services. Transportation, which is one of the most important service people need, must provide an optimum satisfaction to a wide range of users and their wide range of expectations. When it becomes the subject of competition, any firm, that provides transportation service, must know the attitudes and properties of its customers to provide satisfaction and get loyalty in return.

Since the end of the 1980's, questionnaires evaluating the transportation environment from the passengers' point of view have been used [1]. This is crucial to minimize the gap between the service provided by the company and service experienced by customers. In most of the studies [2-16] that focus on satisfaction and loyalty the main factors investigated mostly can be addressed as service quality and its dimensions, trust, perceived value, involvement and image.

Satisfaction is defined as customers' willingness and attitude to buy the product/service [17] and it depends on comparison of the offered product/service and expectations. If the offered product/service meets expectations, the customer will be satisfied, or vice versa [18]. To provide satisfaction in transportation services, it is important to determine the different expectations of passengers and ameliorate the services in these

aspects [19]. A study by Sarı et al. [20] was conducted to determine the satisfaction levels of passengers using (High Speed Rail System) HSRS and their perceptions about the transportation strategies implemented by the authorities. Cleanliness of seats and helpfulness of personnel were found to be the most satisfied attributes according to the ANOVA and t tests. A customer's willingness to continue his/her relationship with a firm or brand is named as loyalty [21]. Being a customer of a product or service may be defined as either preferring the same product, service, or company [22] or being engaged to a brand or firm [23]. Transportation operators' main purpose is increasing their mode share in all travel. To achieve this purpose, firstly, the number of loyal customers should be increased. If customer satisfaction increases, so does customer loyalty, meaning that satisfied customers are more likely to continue using a service, and recommend the service to others [15]. Being a loyal customer is a dynamic process and satisfaction is one of the conditions of this process. A satisfied customer will turn into a loyal customer after a continuous and satisfied consumption experience is obtained [13]. Satisfaction and loyalty are the key factors for a sustainable firm, thus, determination of the factors effecting satisfaction and loyalty is especially important.

Service Quality, one of the effective factors, is defined as the difference between the expectations and the perceptions of the users of a system by Zeithaml et al. [19]. In a study by Karadeniz and Ünver [24], efficiency, reliability and cleanliness are determined as the most effective factors on satisfaction and service perception. According to the results of the study by Feng et al. [13], it is determined that all the dimensions of service quality (economy, speed and punctuality, convenience, comfort, and security) have positive effects on satisfaction. In a recent study by Yılmaz and Arı [16], service quality is considered in the structural model as technical (what is delivered as service) quality and functional (how the service is delivered to customers) quality, which is suggested by Grönroos [25] who preferred to handle quality as a function of a range of resources and activities.

Another factor, the trust concept was firstly used to analyze personal relationships in social psychology studies. By the 1990's, it became popular after the realization that it is one of the basic relationships between the consumer and the manufacturer [26]. By forming a valuable relationship between customer and provider, trust provides continuity of the relationship and becomes a determinant of brand loyalty [27]. The results of a study conducted by Harris and Goode [2] on online services show that trust have a positive impact on loyalty. Another study about the relationship between the trust and loyalty was made by Mikulic et al. [28], and the same positive effect was obtained for airline passengers' loyalty.

Perceived value is defined as the perception resulting from the comparison between what is received (benefits provided by the service) and what is given, the costs or sacrifice in acquiring and utilizing a service) for the customer [29]. It involves evaluations of the products/services made by customers according to the quality of the products or services. Three basic factors affect the perceived value of customers: quality of the product, the price paid for it, and tangible and intangible characteristics of the product [9]. Park et al [3] and Hapsari et al [30] examined the effects of service quality on perceived value and perceived value on satisfaction. Results of these studies show that service quality has a significantly positive effect on perceived value and perceived value has a significantly positive effect on satisfaction.

Involvement represents an individual's motivation based on natural needs, judgement, and interests in an object [31]. It is defined as "personal meaning of the product" or "relationship between consumer and the product" [32]. In their study, Lai and Chen [10] define Involvement as the level of interest in or importance of public transit to a passenger. Their results show that passengers with higher public transit involvement are those who have higher needs, values, and interest regarding to public transit. Bennett et al. [5] found that involvement is an important antecedent of brand loyalty. Involvement proved to be a complete mediator between satisfaction and repurchase loyalty [7].

The last factor that is known effective on satisfaction and loyalty is Image. It is the total subjective evaluation of the customer about a brand [33]. In other words, image is the picture of the product or a firm in a customer's mind formed by all the associations or remembrance. Experiencing the product or the service is not necessary for the customer to form an image. Image is formed by advertisements, the general impression of a society and all the perceptions gained from all sources [34]. According to Aydın and Özer [35], image stems from a consumer's consumption experiences, and service quality is a function of these consumption experiences.

Turkey's first HSRS started operating between Ankara and Eskişehir on 13th of March 2009. This section of high-speed rail system, with a length of 245 km, has 4 stops and duration of 1 hr. 25 min. and is the first stage of the Ankara-Istanbul line [36]. Between these cities, trip with intercity bus system takes 3 hours with almost at the same fare amount and has a more frequent schedule compared to rail system. Since it provides more efficient and modern transportation opportunity, the factors affecting the satisfaction and loyalty of HSRS users will provide useful data for managers to optimize the usage of restricted sources, keep loyal customers in the system and attract new ones. As Sirohi et al. [37] state, understanding current customers' loyalty intentions and their determinants is an important basis for the identification of optimal retailer actions. Additionally, as a study conducted in Turkey, Kırbaş in his study [38], investigated satisfaction of the users of the light rail transit (LRT) system in Samsun, Turkey. To evaluate users satisfaction, the five-likert survey method is used. Seemingly LRT users are broadly not satisfied with the vehicle occupancy rates.

In literature, the effect of service quality dimensions on satisfaction and loyalty is taken into consideration mostly in compact forms. In this study, service quality is involved in the model in terms of its dimensions which are adapted from TRB - Report 47 [39] and constructed to involve all the trip phases: trip planning, fare type and level, accessibility, service, station environment, security, and vehicle environment as stated in TRB - Report 47 [39]. Their definitions are as follows: Information (easiness and reliability of information that the passengers can get about the service), Disabled (amenities provided for disabled passengers), StaAccess (easiness of accessibility to stations and other transportation modes), Effectiveness (availability and frequency of service hours), StationE (lighting and cleanliness of stations, availability of information boards and announcements), Security (emergency precautions at stations and vehicles), Comfort (lighting and air quality of vehicles, availability of information boards and comfort of seats), Reliability (providing the service as promised in terms of speed and duration), Interaction quality of Personnel (general attitude, kindness of personnel, ease of contact and getting help), Accessibility to service-ServAccess (availability of trip departure times and daily period of service), and Seat Direction (availability of reversible seat according to movement direction). In a recent study by authors (Akyıldız Alcura et al., 2016) the reverse seat configuration of the vehicles was found as

the most complained feature by passengers of HSRS users of Ankara-Eskişehir line [40]. Due to this reason, the authors needed to take the seat direction configuration into consideration as a single factor even it was not loaded to any factor. This paper is organized in four sections. In the following section, general information about the study area, data and establishment of the model are presented. The model is presented in the third section. Finally, the results and the conclusions are provided in the fourth section.

## 2. Methodology and the proposed model

A face-to-face questionnaire survey was conducted to a random sample of 900 HSRS passengers between Ankara and Eskişehir to collect data in the period from the middle of March to the end of April 2015. The passengers were sampled by using stratified sample scheme according to the scheduled trip hours. The fulfillment of the service quality attributes was rated using Likert scale between “5” (completely satisfied) and “1” (completely dissatisfied). Also, 5-point Likert scale ranging from strongly agree (5) to strongly disagree (1) is used for the other items in the questionnaire. All the questionnaires were responded by HSRS users during the journey on board. Half of the respondents were interviewed in Ankara to Eskişehir direction and the other half in Eskişehir to Ankara. 72% of the passengers were interviewed in weekdays, 28% in weekends. The demographic characteristics of the sample are presented in Table 1.

Table 1: Sample characteristics.

<i>Demographic Information</i>		<i>Number</i>	<i>%</i>
1. Gender	Female	394	43.8
	Male	506	56.2
2. Age	18-24	309	34.3
	25-35	359	39.9
	36-45	124	13.8
	46-55	51	5.7
	56-65	22	2.4
	>65	4	.4
	No answer	31	3.4
3. Qualification	Primary school graduate	9	1.0
	Secondary school graduate	16	1.8
	High school graduate	245	27.2
	Associate/Bachelor's Degree	461	51.2
	Post graduate/Doctoral Degree	165	18.3
	No answer	4	.4
4. Marital Status	Single	550	61.1
	Married	320	35.6
	Divorced/Widowed	22	2.4
	No answer	8	.9

In this study, Structural Equation Modeling (SEM) is preferred. Structural equation modeling (SEM) is a multivariate statistical method that integrates a factor analytic model into a path analysis to analyze structural relationships by taking measurement properties of variables into account. SEM comprises two parts, a measurement and a structural model, estimated simultaneously. The measurement model specifies the relationships between observed variables, also called measured variables, manifest variables, items, measures, or indicators, and latent variables that are predefined

constructs unobserved/unmeasured directly but reflected indirectly through their indicators. The other part of the model is the structural model that specifies the relationship between the latent variables. Confirmatory Factor Analysis (CFA) model is a special case of SEM where only the measurement model part specifications are needed without distinction between endogenous and exogenous formation of latent variables [41]. The hypotheses used in this study with their labels and statements are given in Table 2 as a result of extensive literature review.

Table 2: Hypothesis used in this study.

<i>Hypothesis</i>	<i>Statement</i>
H1-H11	Effectiveness, Security, Passenger Information, Interaction Quality of Personnel, Reliability, Service for disabled passengers, Comfort, Station environment, Station accessibility, Service accessibility, Seat direction have a positive effect on perceived value [10, 3, 2, 6, 4, 30, 14, 42]
H12-H21	Effectiveness, Security, Passenger Information, Interaction Quality of Personnel, Reliability, Service for disabled passengers, Comfort, Station environment, Station accessibility, Service accessibility have a positive effect on perceived value [2, 35]
H22-H32	Effectiveness, Security, Passenger Information, Interaction Quality of Personnel, Reliability, Service for disabled passengers, Comfort, Station environment, Station accessibility, Service accessibility, Seat direction have a positive effect on satisfaction. [8, 10, 3, 2, 6, 4, 14, 13, 15, 16, 11, 14]
H33-H42	Effectiveness, Security, Passenger Information, Interaction Quality of Personnel, Reliability, Service for disabled passengers, Comfort, Station environment, Station accessibility, Service accessibility have a positive effect on image. [3, 35, 8]
H43-H44	Trust has a positive effect on satisfaction and involvement [9, 2]
H45-H46	Perceived value has a positive effect on trust and involvement [2, 10, 41]
H47-H50	Image has a positive effect on perceived value, trust, satisfaction, and involvement [8, 9, 6, 16]
H51	Involvement has a positive effect on loyalty. [5, 7]
H52-H53	Satisfaction has a positive effect on loyalty and involvement [8, 13, 15, 16, 10, 7, 42]

### **2.1 Determination of factors used for SEM**

In this study, the dimensions of service quality were determined first. A measurement model of Service Quality Dimensions was established, and the model was assessed in three steps: Exploratory Factor Analysis (EFA), Confirmatory Factor Analysis (CFA) and reliability assessment.

For the first step of the validation studies, EFA was implemented with Varimax rotation and Principal Components extraction. Out of the 61 attributes, 19 were excluded because they disrupted the conceptual meaning of the factors, did not load on the relevant factor or had high factor complexity. For the 42 remaining attributes, 10 factors were determined. By including the reverse seat configuration, 11 factors explaining 70.292% of total variance were determined. For the model with 43 variables and 11 factors, the KMO measure of sampling adequacy was found as .926 and the null hypothesis for Bartlett's test of Sphericity was rejected (Chi-square=21983.659, d.f.=903,  $p < .01$ ). With these results, the data were found to be appropriate for factor analysis (Table 3).



CFA was used to confirm if the latent variables were measured by relevant indicators or not. To validate the structure of the 11 factor model, the covariance matrix was analyzed using LISREL 8.80 and CFA was performed by using maximum likelihood estimation. For the measurement model of 11 service quality dimensions, showing a good fit between the model and the data, all the coefficients were found to be statistically significant. Also, standardized coefficients were greater than the offered value of .50 and most of them were found to be greater than the ideal value of .7 ([43, 44]). R<sup>2</sup> values of the questions vary between .35 and .94, and most of them are greater than .50 which proves at least half of the variance of an indicator is explained by the relevant factor. It can be said that the indicators are reliable measures of the factors. Since all the coefficients were found to be statistically significant and positive (theoretically appropriate), convergent validity of the measurements was confirmed according to CFA. Goodness of fit values were improved after elimination of questions (STA1, C1 and SRA1). The measurement model of 11 factors with 40 indicator variables has a good model fit with values  $\chi^2=2488.19$ , Degrees of Freedom (d.f.)=685, (Calculated Probability: P-Value) (p)=.00, Standardized Root Mean Square Residual (SRMR)=.043, Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA)=.054, Normed Fit Index (NFI)=.97, Non-Normed Fit Index (NNFI)=.97, and Comparative Fit Index (CFI)=.98. After validity analysis, reliability studies were conducted for each construct and Cronbach Alpha internal consistency reliability coefficients were calculated. The values fall in the range .760-.94 and corrected item total correlation values of the indicators vary between .58 and .89. When any indicator was deleted from the item set of a factor, the alpha coefficients decreased between .10 and .01. It was decided not to eliminate any indicator to increase the reliability which was found to be acceptable for all factors. Cronbach alpha was not calculated for “Seat direction” factor since it has a single indicator.

For all the factors included in the proposed model, EFA was re-performed with Principal Components extraction and Varimax rotation. By EFA analysis applied to 86 indicators, a structure of 17 factors was determined. KMO and Bartlett’s tests were conducted to test adequacy and suitability of implementing factor analysis to the sample and the KMO value was found as .959 which is defined as superb. By Bartlett’s test, the hypothesis that the correlation matrix is an identity matrix was rejected (p<.01). Factor analysis was found to be appropriate. When the 17 factors were analyzed, they were found to be conceptually meaningful and acceptable according to factors handled in the literature. The factors with their indicators, and the Varimax rotation factor loadings of the indicators on the relevant factor are shown in Table 3.

Table 3. Factors with indicators, descriptive statistics of the indicators, factor loadings (EFA), and CFA estimates of the measurement model.

Factor	Attribute (Indicator)	Mean	Standard Deviation	Factor Loading (EFA)	Standardized Factor Loading (CFA)	Standard Error	t value	R <sup>2</sup>
Information given to passengers	I1: Accessibility to information about HSRS trip	3.98	.91	.64	.63	.03	21.00**	.40
	I2: Availability of correct and up-to-date information about HSRS	4.09	.92	.64	.65	.03	21.67**	.42
	I3: Ease of using the web site of HSRS	3.78	1.14	.76	.72	.04	18.00**	.52

Table 3. (Continued).

	I4: Adequacy of information on the HSRS web site	3.77	1.07	.78	.79	.03	26.33**	.63
	I5: Using the web site securely	4.13	.89	.72	.72	.03	24.00**	.52
Service for disabled passengers	D1: Availability of wheelchair ramps for disabled passengers	3.63	1.10	.80	.82	.03	27.33**	.68
	D2: Availability of pavements for disabled passengers	3.48	1.15	.83	.89	.03	29.67**	.80
	D3: Availability of seats for disabled passengers	3.52	1.09	.78	.79	.03	26.33**	.63
	D4: Availability of personnel to help disabled passengers	3.58	1.07	.65	.68	.03	22.67**	.46
Access to stations	STA2: Ease of accessibility to the station with other transportation modes	3.48	1.23	.60	.78	.04	19.50**	.62
	STA3: Availability/frequency of other transportation modes	3.43	1.14	.77	.91	.04	22.75**	.83
Effectiveness	E1: Availability of service hours on weekdays	3.27	1.26	.76	.83	.03	27.67**	.70
	E2: Frequency of service hours on weekdays	3.11	1.27	.83	.90	.03	30.00**	.80
	E3: Availability of service hours on weekends	3.11	1.29	.82	.81	.04	20.25**	.66
	E4: Frequency of service hours on weekends	2.99	1.28	.84	.80	.04	20.00**	.64
	E5: Frequency of service hours generally	3.09	1.27	.81	.86	.03	28.67**	.74
Station environment	SE1: Availability of route maps and schedules at stations and stops	3.78	.98	.51	.71	.03	23.67**	.51
	SE2: Availability of announcements at stations	4.07	.91	.68	.73	.03	24.33**	.54
	SE3: Lighting quality at stations	3.93	.92	.71	.80	.03	26.67**	.64
	SE4: Cleanliness of stations	3.85	1.02	.51	.70	.03	23.33**	.49
Security	SEC1: Security personnel at stations	3.79	.99	.69	.73	.03	24.33**	.53
	SEC2: Emergency phones/alarms at stations	3.67	.95	.74	.80	.03	26.67**	.64
	SEC3: Availability of guidance and signs to exits at stations	3.71	.96	.72	.79	.03	26.33**	.62
	SEC4: Security to warn disruptive passengers at stations	3.52	1.11	.69	.70	.03	23.33**	.49
	SEC5: Ease of reaching personnel at stations	3.75	1.06	.48	.66	.03	22.00**	.43
	SEC6: Emergency phones/alarms in vehicles	3.90	.87	.44	.69	.03	23.00**	.48

Table 3. (Continued).

Comfort	C2: Lighting quality of vehicles	3.99	.85	.52	.74	.03	24.67**	.55
	C3: Availability of information boards and signs in vehicles	3.83	.97	.49	.73	.03	24.33**	.53
	C4: Air conditioning in vehicles	3.80	1.05	.64	.62	.03	20.67**	.39
	C5: Number and comfort of seats in vehicles	3.71	1.11	.62	.60	.04	15.00**	.34
Reliability	R1: Speed of vehicles compared to promised speeds	3.89	1.04	.75	.78	.03	26.00**	.60
	R2: Trip times compared to promised times	3.92	1.03	.84	.96	.03	32.00**	.92
	R3: Completion of trips in promised length of time	3.93	1.03	.83	.88	.03	29.33**	.78
Interaction quality of personnel	P1: General attitude of personnel on vehicles	3.95	.96	.70	.77	.03	25.67**	.59
	P2: Kindness and care of personnel on vehicles	3.97	.93	.75	.84	.03	28.00**	.70
	P3: Ease of contacting personnel on vehicles	3.72	1.03	.67	.74	.03	24.67**	.55
	P4: Getting understandable and reliable answers from personnel on vehicles	3.87	.92	.73	.82	.03	27.33**	.67
Accessibility to service	SRA2: The time of the last scheduled trip (20:40)	2.76	1.38	.81	.93	.04	23.25**	.86
	SRA3: Service period of HSRS (06:30-20:40)	2.82	1.36	.83	.96	.04	24.00**	.91
Seat Direc.	S1: Availability of reversible seats according to movement direction	2.92	1.30	.56	1.00 <sup>a</sup>	-		-
Satisfaction	STF1: I made a good decision by choosing HSRS.	4.11	.83	.51	.77	.02	38.50**	.60
	STF2: HSRS fulfilled my expectations.	3.88	.89	.58	.79	.03	26.33**	.62
	STF3: HSRS service is better than my expectations.	3.43	1.00	.50	.71	.03	23.67**	.51
	STF4: I am satisfied about HSRS trip duration.	3.84	.98	.55	.71	.03	23.67**	.50
	STF5: I am satisfied about safety of HSRS.	3.69	1.01	.51	.65	.03	21.67**	.42
	STF6: I am satisfied about comfort of HSRS.	3.73	.99	.56	.72	.03	24.00**	.51
	STF7: I am satisfied about punctuality of HSRS.	3.86	1.06	.49	.63	.03	21.00**	.39
	STF8: I am satisfied about HSRS generally.	4.04	.81	.58	.82	.02	41.00**	.67

Table 3. (Continued).

Loyalty	L1: I will use HSRS again.	4.46	.72	.86	.81	.02	40.50**	.66
	L2: I will keep using HSRS.	4.45	.72	.86	.84	.02	42.00**	.71
	L3: I recommend HSRS to others.	4.32	.82	.77	.92	.02	46.00**	.85
	L4: I state my satisfaction about HSRS.	4.09	.92	.58	.80	.03	26.67**	.64
	L5: I will use HSRS more in my future trips.	4.15	1.08	.59	.78	.03	26.00**	.61
	L6: HSRS is my first choice for a trip.	3.99	1.05	.47	.66	.03	22.00**	.43
Trust	T1: I think HSRS is a reliable operator.	3.87	.90	.69	.88	.02	44.00**	.78
	T2: I think HSRS is master of its domain.	3.77	.95	.71	.91	.02	45.50**	.82
	T3: I think HSRS is an honest operator.	3.74	.96	.74	.89	.03	29.67**	.80
	T4: I think HSRS is a responsible operator to its passengers.	3.77	.94	.76	.89	.02	44.50**	.78
	T5: I think HSRS personnel are reliable.	3.83	.86	.80	.84	.02	42.00**	.71
	T6: I think HSRS personnel are master of their domain.	3.74	.94	.80	.85	.03	28.33**	.72
	T7: I think HSRS personnel are honest.	3.78	.90	.81	.82	.02	41.00**	.68
	T8: I think HSRS personnel are responsible for the passengers.	3.75	.92	.78	.79	.03	26.33**	.63
Perceived Value	PV1: The service of HSRS is worth the payment I have made.	3.51	1.08	.75	.74	.03	24.67**	.54
	PV2: The fare of a ticket is at a reasonable level.	3.44	1.07	.77	.67	.03	22.33**	.44
	PV3: The service of HSRS is worth the effort I have made.	3.82	.90	.64	.81	.03	27.00**	.65
	PV4: HSRS fits my needs.	3.97	.79	.56	.79	.02	39.50**	.62
	PV5: The comfort of HSRS is worth the payment and effort I have made.	3.63	.96	.74	.83	.03	27.67**	.69
	PV6: The safety of HSRS is worth the payment and effort I have made.	3.73	.92	.66	.83	.03	27.67**	.69
	PV7: The consistent and planned trip with HSRS is worth the payment and effort I have made.	3.78	.91	.68	.86	.02	43.00**	.74
	PV8: HSRS met my needs more than I expected.	3.40	1.01	.51	.72	.03	24.00**	.53
	PV9: HSRS is worth the payment and effort I have made in general.	3.74	.90	.63	.87	.02	43.50**	.75

Table 3. (Continued).

Involvement	INV1: I like travelling with HSRS.	4.07	.84	.53	.85	.02	42.50**	.72
	INV2: HSRS has an important place in my trips.	4.00	.90	.67	.85	.02	42.50**	.73
	INV3: I think taking HSRS is consistent with my life style.	3.94	.88	.67	.87	.02	43.50**	.76
	INV4: I prefer taking HSRS whatever the weather conditions are.	3.89	.99	.75	.81	.03	27.00**	.66
	INV5: I prefer taking HSRS whether I have time pressure or not.	3.75	1.06	.74	.78	.03	26.00**	.60
	INV6: I prefer taking HSRS whatever the trip purpose is.	3.62	1.08	.73	.73	.03	24.33**	.54
Image	IMG1: HSRS is a steady company.	3.80	.91	.57	.88	.02	44.00**	.77
	IMG2: HSRS is a strong company.	3.85	.88	.67	.91	.02	45.50**	.83
	IMG3: HSRS is a well-established company.	3.78	.98	.71	.76	.03	25.33**	.58
	IMG4: I always prefer HSRS to any other operator.	3.44	1.07	.64	.66	.03	22.00**	.44
	IMG5: HSRS (TCDD <sup>b</sup> ) always produces projects that are not transient.	3.68	.95	.69	.73	.03	24.33**	.53
	IMG6: HSRS (TCDD <sup>b</sup> ) always produces projects that are useful for society.	3.83	.90	.64	.74	.03	24.67**	.55

\*\* $p < .01$ ; <sup>a</sup>Fixed to 1.00 for scaling purpose; <sup>b</sup> TCDD is the abbreviation for Turkish Railways, general railway operator of Turkey.

Composite Reliability (CR) values, presented in Table 4, were calculated using the standardized CFA results. The composite reliability of the factors is reported here because it is generally acknowledged that CR is a better measure of scale reliability than Cronbach's alpha since alpha tends to increase with the increase of the number of indicators and tends to decrease with non-equal factor loadings [45] and these ranged between .80 and .96, indicating good reliability considering that .70 is the cutoff value for being acceptable. Since all the reliabilities were at an acceptable level, with the factor loadings found to be significant and of an acceptable size, the measurement model provided good fit, and convergent validity was confirmed according to CFA. The AVE values were calculated using the standardized CFA results of the items for each factor in the model and are presented in Table 4. When Table 4 is examined, it is seen that the AVE values of all factors are larger than .50 except Comfort, with an AVE value of 0.46 which is quite close to .50, and convergent validity is shown according to this strict approach. For the single item factor Seat direction, Cronbach's alpha cannot be calculated, and CR and AVE are not meaningful criteria since the indicator's factor loading is fixed at 1.00 for scaling purposes.

Table 4. Cronbach's alpha, composite reliability (CR), and average variance extracted (AVE) values.

Factor	Cronbach's alpha	CR	AVE
Effectiveness	.93	.92	.71
Security	.87	.87	.53
Information	.83	.83	.50
Interaction Quality of Personnel	.87	.87	.63
Reliability	.91	.91	.77
Disabled	.87	.87	.64
Comfort	.76	.77	.46
StationE	.82	.83	.54
StaAcces	.83	.84	.72
ServAcces	.94	.94	.89
Trust	.96	.96	.74
Perceived Value	.94	.94	.63
Loyalty	.91	.92	.65
Involvement	.96	.92	.67
Image	.91	.90	.62
Satisfaction	.90	.90	.53

In addition to assessing item-level discriminant validity with the examination of the factor loadings and cross loading from the EFA perspective, factor-level discriminant validity was investigated using the correlations between factors obtained from CFA. In Table 5, the correlations between the factors, presented as the elements of a lower triangular matrix, ranged from .84 to .06.

Table 5. Correlations between the factors (lower diagonal) and square roots of AVE values of factors (on diagonal).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Effectiveness (1)	.84																
Security (2)	.46**	.73															
Information (3)	.39**	.46**	.70														
Interaction Quality of Personnel (4)	.38**	.61**	.45**	.79													
Reliability (5)	.40**	.39**	.34**	.48**	.88												
Disabled (6)	.39**	.60**	.40**	.40**	.29**	.80											
Comfort (7)	.49**	.82**	.53**	.64**	.46**	.48**	.68										
StationE (8)	.44**	.79**	.52**	.58**	.44**	.51**	.84**	.74									
StaAcces (9)	.43**	.43**	.28**	.27**	.29**	.42**	.43**	.44**	.85								
ServAcces (10)	.51**	.36**	.23**	.35**	.29**	.39**	.35**	.33**	.29**	.95							
Trust (11)	.38**	.42**	.38**	.48**	.40**	.31**	.44**	.42**	.28**	.25**	.86						
Perceived Value (12)	.42**	.45**	.36**	.51**	.42**	.36**	.52**	.47**	.33**	.32**	.68**	.79					
Loyalty (13)	.26**	.29**	.35**	.44**	.38**	.22**	.39**	.37**	.20**	.14**	.57**	.71**	.81				
Involvement (14)	.30**	.34**	.37**	.43**	.34**	.30**	.42**	.38**	.25**	.22**	.70**	.74**	.72**	.82			
Image (15)	.36**	.37**	.36**	.45**	.38**	.29**	.41**	.40**	.30**	.25**	.79**	.70**	.61**	.67**	.78		
Satisfaction (16)	.47**	.52**	.44**	.60**	.56**	.37**	.59**	.55**	.35**	.33**	.67**	.79**	.72**	.70**	.68**	.73	
Seat Direction (17)	.17**	.19**	.06 <sup>n.s.</sup>	.27**	.14**	.13**	.17**	.18**	.10**	.24**	.16**	.22**	.15**	.15**	.14**	.20**	n.a.

\*\*p<.01; <sup>n.s.</sup>nonsignificant; n.a..not applicable

To establish the structural model, all the hypotheses were set in the model. After that, the goodness of fit values of the model of 17 factors with the hypothesized relationships were determined. In the structural equation model (SEM)  $\chi^2=9877.66$ , d.f.= 3206,  $p=.00$ , RMSEA=.048, SRMR=.047, NNFI=.98 and CFI=.98 were found and the model provided a good fit. The standardized path coefficients, standard errors and t values of the structural model of 17 factors measured by 83 indicators are shown in Table 6.

Table 6. Results of the proposed model.

Hypothesis	Standardized path coefficient	Standard error	t-value	Hypothesis	Standardized path coefficient	Standard error	t-value	
H1	.06	.03	1.65	H28	.06	.08	.84	
H2	-.07	.07	-1.06	H29	.04	.06	.73	
H3	-.02	.04	-.59	H30	-.01	.02	-.27	
H4	.09	.04	<b>2.17*</b>	H31	-.03	.01	-1.17	
H5	.05	.03	1.59	H32	-.01	.01	-.38	
H6	.06	.03	1.60	H33	.11	.03	<b>2.41*</b>	
H7	.25	.12	<b>2.74**</b>	H34	-.03	.08	-.38	
H8	-.05	.09	-.73	H35	.11	.04	<b>2.61**</b>	
H9	.01	.03	.36	H36	.23	.05	<b>4.67**</b>	
H10	.03	.02	.87	H37	.14	.03	<b>3.59**</b>	
H11	.07	.02	<b>2.88**</b>	H38	.02	.03	.34	
H12	.05	.02	1.49	H39	.02	.13	.15	
H13	.04	.06	.68	H40	.06	.10	.62	
H14	.03	.03	1.02	H41	.10	.03	<b>2.43*</b>	
H15	.08	.03	<b>2.20*</b>	H42	.00	.02	-.03	
H16	.04	.02	1.41	H43	.07	.04	1.89	
H17	.01	.02	.42	H44	.28	.05	<b>6.28**</b>	
H18	.07	.09	.85	H45	.48	.03	<b>12.40**</b>	
H19	-.05	.07	-.76	H46	.35	.05	<b>7.17**</b>	
H20	-.02	.02	-.67	H47	.54	.04	<b>14.50**</b>	
H21	-.02	.02	-.62	H48	.70	.04	<b>18.92**</b>	
H22	.05	.02	1.76	H49	.13	.04	<b>2.94**</b>	
H23	-.02	.05	-.37	H50	.11	.05	<b>2.15*</b>	
H24	.03	.02	1.13	H51	.43	.03	<b>11.01**</b>	
H25	.12	.02	<b>3.40**</b>	H52	.43	.04	<b>11.04**</b>	
H26	.17	.02	<b>6.34**</b>	H53	.15	.06	<b>3.16**</b>	
H27	-.02	.02	-.64					
Squared Multiple Correlation (SMC) Coefficients								
Trust								.67
Perceived value								.59
Loyalty								.62
Involvement								.63
Image								.29
Satisfaction								.76

\* $p<.05$ ; \*\* $p<.01$ ; significant t values are in bold



### 3. Results

The results of the SEM are summarized in Figure 1 and Table 7. It is determined that the coefficients related to the hypothesis H4, H7, H11, H15, H25, H26, H33, H35, H36, H37, H41, H44, H45, H46, H47, H48, H49, H50, H51, H52 and H53 are statistically significant. The model is considered to be predictive as 67% of the total variance of Trust, 59% of the total variance of Perceived Value, 62% of the total variance of Loyalty, 63% of the total variance of Involvement, 29% of the total variance of Image and 76% of the total variance of Satisfaction are explained by the model implied relationships. Eliminating the insignificant paths from the proposed model, the final model shown in Figure 1 with  $\chi^2=9934.43$ , d.f.= 3238,  $p=.00$ , RMSEA=.048, SRMR=.049, NNFI=.98 and CFI=.98 is provided good fit.

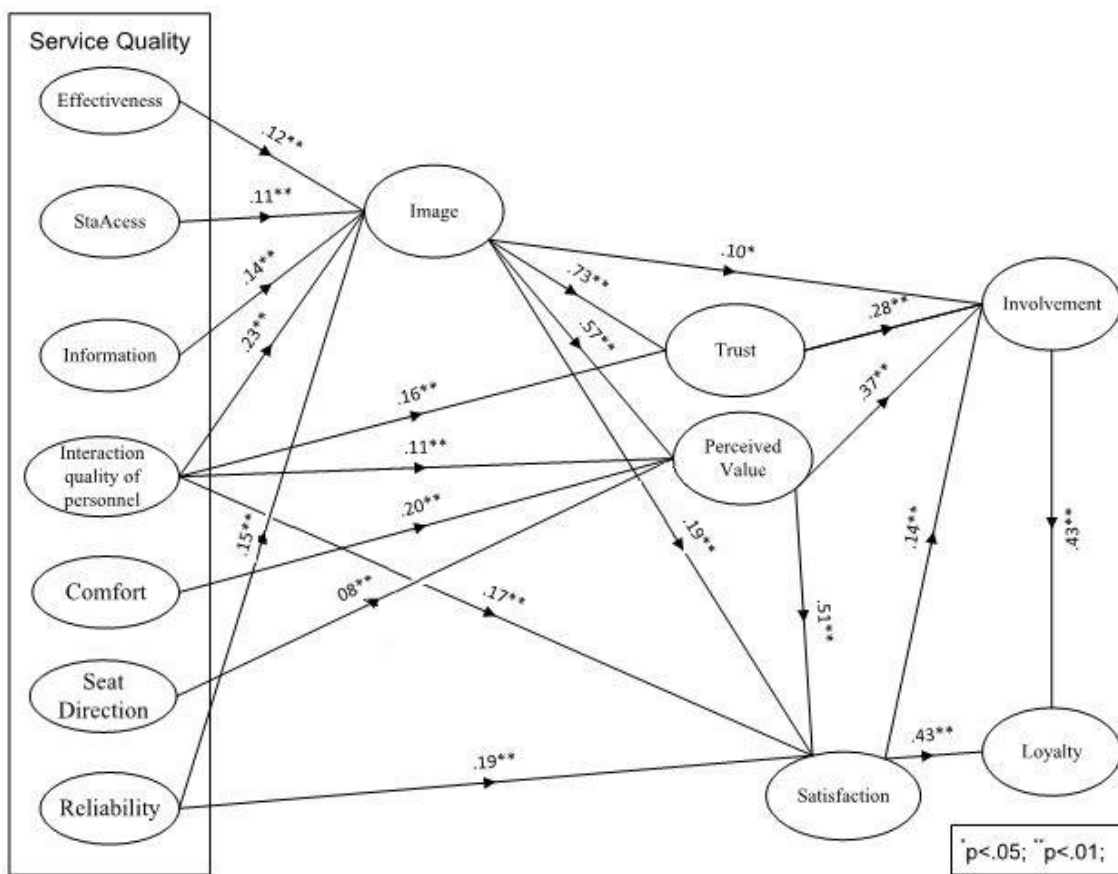


Figure 1. Final Model for HSRS passenger loyalty.

Table 7. Standardized direct, indirect and total effects on endogenous variables.

		<i>Effectiveness</i>	<i>Security</i>	<i>Information</i>	<i>Interaction Quality of Personnel</i>	<i>Reliability</i>	<i>Disabled</i>	<i>Comfort</i>	<i>StationE</i>	<i>StaAcces</i>	<i>ServAcces</i>	<i>Seat Direction</i>	<i>Trust</i>	<i>Perceived Value</i>	<i>Involvement</i>	<i>Image</i>	<i>Satisfaction</i>
Image	D	.12**	-	.14**	.23*	.15*	-	-	-	.11**	-	-	-	-	-	-	-
	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	T	.12**	-	.14**	.23*	.15*	-	-	-	.11**	-	-	-	-	-	-	-
Perceived Value	D	-	-	-	.11*	-	-	.20**	-	-	-	.08**	-	-	-	.57**	-
	I	.07**	-	.08**	.14*	.09*	-	-	-	.06**	-	-	-	-	-	-	-
	T	.07**	-	.08**	.25*	.09*	-	.20**	-	.06**	-	.08**	-	-	-	.57**	-
Trust	D	-	-	-	.16*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.73**	-
	I	.09**	-	.10**	.17*	.11*	-	-	-	.08**	-	-	-	-	-	-	-
	T	.09**	-	.10**	.33*	.11*	-	-	-	.08**	-	-	-	-	-	.73**	-
Satisfaction	D	-	-	-	.17*	.19*	-	-	-	-	-	-	-	.51**	-	.19**	-
	I	.06**	-	.07**	.17*	.07*	-	.10**	-	.05**	-	.04**	-	-	-	.29**	-
	T	.06**	-	.07**	.34*	.26*	-	.10**	-	.05**	-	.04**	-	.51**	-	.48**	-
Involvement	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.28**	.37**	-	.10*	.14**
	I	.07**	-	.08**	.26*	.12*	-	.09**	-	.07**	-	.03**	-	.07**	-	.49**	-
	T	.07**	-	.08**	.26*	.12*	-	.09**	-	.07**	-	.03**	.28**	.44**	-	.59**	.14**
Loyalty	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	.43**	-	.43**
	I	.06**	-	.06**	.26*	.16*	-	.08**	-	.05**	-	.03**	.12**	.41**	-	.46**	.06**
	T	.06**	-	.06**	.26*	.16*	-	.08**	-	.05**	-	.03**	.12**	.41**	.43**	.46**	.49**

\*p&lt;.05; \*\*p&lt;.01; - undefined effect

The effective factors on the endogenous variables Trust, Perceived Value, Loyalty, Involvement, Image and Satisfaction are summarized as follows:

The most effective variable on Trust was found as Image (.73). Image was followed by Interaction Quality of Personnel, Reliability, Effectiveness and Information. Effectiveness, Information, Reliability and Station Access have indirect effects on Trust, while Interaction Quality of Personnel has direct effects.

When the total effects on Perceived Value were considered, again Image was the most effective variable (.57) among the others which was followed by Interaction Quality of Personnel, Comfort, Reliability, Seat Direction, Effectiveness and Information. If only the service quality dimensions were considered, the most effective variables on Perceived Value were Interaction Quality of Personnel and Comfort. The Seat Direction variable having direct effects on Perceived value was found to be statistically meaningful.

Loyalty was mostly affected by Satisfaction with a total value of .49. The direct effect (.43) of Satisfaction was much greater than its indirect effect. Satisfaction was followed by Involvement which has a direct effect (.43) on Loyalty and has no indirect effect. Among the indirect effective variables, the most effective one following Image was found as Perceived Value (.41) which was followed by Interaction Quality of Personnel, Reliability, Trust, Comfort, Information and Effectiveness.

When the most effective, variables on Involvement were analyzed, it was found that Image had the greatest effect (.59). The second and third most effective variables were Perceived Value (.44) and Trust (.28) on Involvement. Interaction Quality of Personnel was the most effective of the indirect effective variables.

On Image, Interaction Quality of Personnel (.23) was found to be the most effective direct variable. It was followed by other directly effective components of service: Reliability, Information and Effectiveness.

On Satisfaction, Perceived Value (.51) and Image (.48) were found as the variables with greatest effects. Interaction Quality of Personnel, Reliability and Comfort follow these variables. Interaction Quality of Personnel, Reliability and Image have both direct and indirect effects on Satisfaction while Effectiveness, Comfort, Station Access and Seat Direction variables have only indirect effects. For example, Seat Direction variable does not have a direct effect on Satisfaction but has an indirect effect through Perceived Value.

#### **4. Conclusions**

In this study, an integrative model was proposed to investigate antecedents of passenger satisfaction and passenger loyalty in High Speed Rail System line between Ankara and Eskişehir in Turkey based on the survey data. For this purpose, Structural Equation Modelling was performed with complementary –pre and post- analyses. We firstly focused on the factors of service quality, for which great attention was given to specialize them for HSRS as passenger information, service for disabled persons, accessibility to station, accessibility to service, effectiveness, station environment, security, comfort, reliability, interaction quality of personnel and seat direction, which in turn they provide us more comprehensive results to conclude about HSRS in Turkey.

To avoid model misspecification, the effects of the factors trust, perceived value, image, and involvement were also investigated in a holistic way.

TCDD, the main railway provider and operator of HSRS in Turkey has a strong image because of its long history and solid investments. One of the results of the model showing the direct and strong relationship between Image and Trust relies on this fact. Image has a direct effect not only on Trust, but also on Perceived Value. The other option to travel between the two cities is bus transportation. The ticket price is almost the same, but the trip takes approximately 3 hours by bus, which is twice as long as the duration of the trip by HSRS. Also, HSRS provides a more standardized and reliable service to passengers when compared to bus service providers. When the indirect effects are also considered, it can be seen that Image has effects on Involvement, Satisfaction and Loyalty of passengers as well.

The results show that Effectiveness, Interaction Quality of Personnel, Comfort and Reliability are the most effective dimensions of service quality. Especially, Interaction Quality of Personnel and Reliability are determined to have direct influence on Image. Because Interaction Quality of Personnel has an effect on almost all factors directly and also indirectly, the company should keep providing and enhancing reliable service as well as kind and caring personnel. The personnel, who are in direct contact with passengers, represent the face of the company and will shape passengers' ideas about the company and the service provided in terms of sufficiency, reliability, and responsibility. Also, kindness and the caring attitude of the personnel will make passengers feel that the fare of the ticket or other efforts made to take the trip are worth paying for. According to the results of the model, this feeling about the perceived value has positive contributions to satisfaction and involvement as well. As long as the passenger feels good about the amount and worth of payment or the effort, he/she makes, he/she will feel satisfied and prefer to travel with HSRS. On perceived value, another service quality - Comfort- was found to be effective. The lighting and air quality in the vehicles, availability of information and comfort of seats have positive contributions on passengers' perceived value. Those indicators of comfort make the passengers feel that they have made a reasonable decision by using HSRS. In addition to effects of Comfort, the seat configuration in terms of movement direction in the vehicles should be given attention as it was found effective on Satisfaction via Perceived Value.

Involvement and Satisfaction play a great role in Loyalty as can be seen from the results. This relationship has again been proved as in many previous studies [12, 10, 5, 7]. As a conclusion, it is recommended to HSRS management to focus on providing friendly and accessible personnel, reliable service, and a strong image to have satisfied and loyal passengers.

Besides these conclusions, there are some limitations of the study. As can be seen from Table 7, Security, Station Environment, Service Access, and Disabled dimensions of service quality do not provide significant effects on any factors. If the questions of Disabled dimension were asked to disabled persons during the study or if the questions about disabled persons include not only disabled but also special needs people like pregnant women or seniors, the results could have been different. These dimensions are planned to be enhanced besides considering other factors like switching barriers in further studies.

### Acknowledgements:

The authors acknowledge the Turkish Railways (TCDD), HSRS Department for their support. This research is supported by the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK) under the support program of 3001 - Starting R&D Projects Funding Program with Project No 114K093.

### References

- [1] Carlson, E. D., Giuliano, G. and R. E. Skinner, Transit Cooperative Research Program, TCRP Report 8: A Guidebook for Developing Transit Performance-Measurement System. Kittelson and Associates Inc., **Transportation Research Board**, Washington. D.C, (2003).
- [2] Harris, L. C., and M. M. Goode, The four levels of loyalty and the pivotal role of trust: a study of online service dynamics, **Journal of Retailing**, 80(2), 139-158, (2004).
- [3] Park, J. W., Robertson, R., and C. L. Wu, The effect of airline service quality on passengers' behavioural intentions: a Korean case study, **Journal of Air Transport Management**, 10(6), 435-439, (2004).
- [4] Ball, D., Simões Coelho, P., and A. Machás, The role of communication and trust in explaining customer loyalty: An extension to the ECSI model, **European Journal of Marketing**, 38(9/10), 1272-1293, (2004).
- [5] Bennett, R., Härtel, C. E., and J. R. McColl-Kennedy, Experience as a moderator of involvement and satisfaction on brand loyalty in a business-to-business setting 02-314R, **Industrial Marketing Management**, 34(1), 97-107, (2005).
- [6] Hsu, S. H., Chen, W. H., and J. T. Hsueh, Application of customer satisfaction study to derive customer knowledge, **Total Quality Management and Business Excellence**, 17(04), 439-454, (2006).
- [7] Olsen, S. O, Repurchase loyalty: The role of involvement and satisfaction, **Psychology & Marketing**, 24(4), 315-341, (2007).
- [8] Chou, J. and C. Kim, A Structural Equation Analysis of the QSL Relationship with Passenger Riding Experience on High-Speed Rail: An Empirical Study of Taiwan and Korea, **Expert Systems with Applications**, 36(3): 6945-6955, (2009).
- [9] Gölbaşı Şimşek G. and F. Noyan, Türkiye'de Cep Telefonu Cihazı Pazarında Marka Sadakati İçin Bir Model Denemesi, **ODTÜ Gelişme Dergisi**, 36: 121-159, (2009).
- [10] Lai, W. T. and C. F. Chen, Behavioral intentions of public transit passengers-The roles of service quality, perceived value, satisfaction and involvement, **Transport Policy**, 18(2), 318-325, (2011).
- [11] Chiou, Y. C., and Y. H. Chen, Service quality effects on air passenger intentions: a service chain perspective, **Transportmetrica**, 8(6): 406-426, (2012).

- [12] Chou, P. F., Lu, C. S. and Y.H. Chang, Effects of service quality and customer satisfaction on customer loyalty in high-speed rail services in Taiwan, **Transportmetrica**, A: Transport Science, 10(10), 917-945. 2014.
- [13] Feng, Y., Li, Xuamei, Li, Xuwei and L. Yang, Interrelations among the Urban Rail Service Quality, Passenger Satisfaction and Loyalty, Paper presented at the **Transportation Research Board 98th Annual Meeting**, Washington, DC, (2015).
- [14] Shen, W., Xiao, W., and X. Wang, Passenger satisfaction evaluation model for Urban rail transit: A structural equation modeling based on partial least squares, **Transport Policy**, 46, 20-31, (2016).
- [15] Van Lierop, D., and A. El-Geneidy, Enjoying loyalty: The relationship between service quality, customer satisfaction and behavioral intentions in public transit, **Research in Transportation Economics**, 59, 50-59, (2016).
- [16] Yılmaz V. and E. Arı, The Effects of Service Quality, Image and Customer Satisfaction on Customer Complaints and Loyalty in High-Speed Rail Service in Turkey: A Proposal of The Structural Equation Model, **Transportmetrica**, A: Transport Science, 13(1): 67-90, (2017).
- [17] LaBarbera, P. A. and D. A. Mazursky, Longitudinal Assessment of Consumer Satisfaction/Dissatisfaction: The Dynamic Aspect of the Cognitive Process, **Journal of Marketing Research**, 20(4): 393-404, (1983).
- [18] Kotler, P. and K. L. Keller. Marketing Management. N., **Beta Publishing**, Istanbul, (2000).
- [19] Özgüven, N, Hizmet Pazarlamasında Müşteri Memnuniyeti ve Ulaştırma Sektörü Üzerinde Bir Uygulama, **Ege Academic Review**, 8(2): 652-682, (2008).
- [20] Sarı, Y., Kılıçlar, A. and C. Seçilmiş, Yüksek Hızlı Tren (YHT) Yolcularının Kişisel Değişkenler Açısından Memnuniyet Algılamalarının Değerlendirilmesi, **Anatolia: Turizm Araştırmaları Dergisi**, 22(2): 127-138, (2011).
- [21] Cyr, D., Hassanein, K., Head, M. and A. Ivanov, The Role of Social Presence in Establishing Loyalty in E-service Environments, **Interacting with Computers** 19(1): 43-56, (2007).
- [22] Zeithaml, V.A., Berry, L.L. and A. Parasuraman, The Behavioral Consequences of Service Quality, **Journal of Marketing**, 60(2): 31-46, (1996).
- [23] Oyman, M, Müşteri Sadakati Sağlamada Sadakat Programlarının Önemi, **Kurgu Dergisi**, 19, (2002).
- [24] Karadeniz, M. and N. M. Ünver, Şehir İçi Denizyolu Ulaşımında Müşterilerin Hizmet Algısı ve Memnuniyeti: Bir Uygulama, **Marmara Üniversitesi Öneri Dergisi** 42: 43-68, (2014).
- [25] Grönroos C, A Service Quality Model and Its Marketing Implications, **European Journal of Marketing**, 18 (4): 36-44, (1984).
- [26] Delgado-Ballester, E. and J. L. Munuera-Aleman, Brand Trust in the Context of Consumer Loyalty, **European Journal of Marketing**, 35(11): 1238-1258, (2001).
- [27] Morgan, R. M., and S. D. Hunt, The Commitment Trust Theory of Relationship Marketing, **Journal of Marketing**, 58(2): 20-38, (1994).

- [28] Mikulic, J., Seric, M., and L. Matas Milkovic, Airline loyalty determinants among business travelers: empirical evidence from Croatia, **Transportation Letters**, 9(3), 177-183, (2017).
- [29] Hellier, P. K., Geursen, G. M., Carr, R. A. and A. Rickard, Customer Repurchase Intention: A General Structural Equation Model, **European Journal of Marketing**, 37(11): 1762-1800, (2003).
- [30] Hapsari, R., Clemes, M., and D. Dean, The mediating role of perceived value on the relationship between service quality and customer satisfaction: evidence from Indonesian airline passengers, **Procedia Economics and Finance**, 35, 388-395, (2016).
- [31] Zaichkowsky, J. L. Measuring the Involvement Construct, **Journal of Consumer Research**, 12(3): 341-52, (1985).
- [32] Martin, C., L, Relationship Marketing: a High-Involvement Product Attribute Approach, **Journal of Product & Brand Management** 7(1): 6-26, (1998).
- [33] Keller, K. L Conceptualizing, Measuring, Managing Customer-Based Brand Equity, **Journal of Marketing** 57(1), 1-22, (1993).
- [34] Akkaya, E, Marka İmajı ve Bileşenleri: Otomobil Sektöründe Bir Uygulama, Paper presented at the **4. Ulusal Pazarlama Kongresi**, 21. Yüzyıl Eşiğinde Ulusal Pazarlama, Antakya, Türkiye, 101-111, (1999).
- [35] Aydin, S., and G. Özer The analysis of antecedents of customer loyalty in the Turkish mobile telecommunication market, **European Journal of marketing**, 39(7-8), 910-925 (2005).
- [36] TCDD (Turkish State Railways). 2015. Yüksek Hızlı Tren Projeleri - Ankara-İstanbul Hızlı Tren Hattı. <http://www.tcdd.gov.tr/ankara-istanbul+m272>. Accessed: November 17th 2015.
- [37] Sirohi, N., McLaughlin E.W., Wittink D.R, A Model of Consumer Perceptions and Store Loyalty Intentions for a Supermarket Retailer, **Journal of Retailing**, 74: 223-245, (1998).
- [38] Kırbaş, U., The Preferability of Light Rail Transit Systems between Transportation Modes: Samsun Case, **Conference: 1. International Conference on Intelligent Transportation Systems - BANU ITSC'20** (2018).
- [39] Shackelford, W., Wacks, M. and R. E. Skinner, Transit Cooperative Research Program. TCRP Report 47. A Handbook for Measuring Customer Satisfaction and Service Quality. Morpace International, Inc., et al., **Transportation Research Board**, Washington, D.C., (1999).
- [40] Akyıldız Alçura, G., Kuşakcı Gündoğar, Ş., Gölbaşı Şimşek, G., Gürsoy, M. and Tanrıverdi, S. C., Impact Score Technique for Analyzing the Service Quality of a High-Speed Rail System, **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board** 2541: 64-72, (2016).
- [41] Gölbaşı Şimşek G., F. Noyan Tekeli. Understanding the Antecedents of Customer Loyalty by Applying Structural Equation Modeling, **Handbook of Research on Developing Sustainable Value in Economics, Finance, and Marketing**, IGI Global, Hershey, PA, pp.420-445, (2015).

- [42] Irtema, H. I. M., Ismail, A., Borhan, M. N., Abdelsalam, H. M., Alshetwi, A. B., Albrka, S. I., and H. A. Yahia, Perceptions Passengers on Service Quality: Public Transport in Kuala Lumpur, **International Journal of Engineering & Technology**, 7(2.29), 865-870, (2018).
- [43] Hair, J.F., Anderson, R.E., Tahtam, R.L. and W.C. Black, **Multivariate Data Analysis**, Prentice Hall, New Jersey, USA.1998.
- [44] Anderson, J. C. and D. W. Gerbing, Structural Equation Modeling in Practice: A Review and Recommended Two Step Approach, **Psychological Bulletin**, 103(3), 411-423, (1988).
- [45] Bagozzi, R. P., & Yi, Y, On the Evaluation of Structural Equation Models, **Journal of the Academy of Marketing Science**, 16(1), 74-94, (1988).



# Siber saldırı tespiti için makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarının incelenmesi

Fatih DEMİR\*

Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler MYO. Elektrik ve Otomasyon. Bölümü, Rektörlük Kampüsü, Elazığ

Geliş Tarihi (Received Date): 07.02.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 04.05.2021

## Öz

İnternet tabanlı cihazların kullanımının artması, siber ortamda güvenlik sorunlarına yol açmaktadır. Kötü amaçlı yazılımlar, sistemlerin işleyişini bozabilir ve sistemlerdeki güvenlik açıkları nedeniyle veri gizliliğini tehlikeye atabilir. Siber saldırıları belirlemek ve sınıflandırmak için Saldırı Tespit Sistemleri (STS) geliştirilmektedir. Yapay zeka tabanlı yöntemler, STS sistemlerini iyileştirmek için daha sık kullanılmaktadır. Bu çalışmada, STS sistemlerinin geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılan ISCX-2012 veri setinin kullanıldığı literatür çalışmaları gözden geçirilmiştir. Ayrıca bu veri seti kullanılarak makine öğrenmesi tabanlı güçlü bir yaklaşım ile siber saldırılar %100 doğrulukla tespit edilmiştir. Önerilen yöntemin sınıflandırma doğruluğu performansını artırmak için öznitelik ve hiperparametre seçme algoritmaları kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın yapay zeka temelli STS sistemleri geliştirmek için faydalı olacağı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Siber saldırı, saldırı tespit sistemleri, makine öğrenmesi.

## Investigation of performance of machine learning methods for cyber-attack detection

### Abstract

The increase in internet based devices gets security problems in cyber environment. Malwares can disturb the functioning of systems and compromise data privacy due to vulnerabilities in systems. Intrusion Detection Systems (IDS) are improved to determine and classify attacks. Artificial intelligence-based methods are used more frequently to improve IDS systems. In this study, literature studies using ISCX-2012 data set, which was widely used in the development of IDS systems, were reviewed. Besides, by using this

\* Fatih DEMİR, fatihdemir@firat.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-3210-3664>

*data set, cyber-attacks were detected with 100% accuracy with a powerful machine learning-based approach. Feature and hyperparameter selection algorithms are used to increase the classification accuracy performance of the proposed method. These machine learning approaches are thought to be useful for developing artificial intelligence-based STS systems.*

**Keywords:** *Cyber-attack, intrusion detection systems, machine learning.*

## 1. Giriş

Son yıllarda özellikle Nesnelerin İnterneti teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte internet kullanan kişi ve uygulama sayısı sürekli artmaktadır. Dünyada internet kullanımı hakkında bilgi veren DataReportal verilerine göre internet kullanımı giderek artmaktadır. Ayrıca DataReportal verilerine göre her gün 1 milyon internet kullanıcısı eklenmektedir.

İnternet kullanımının artması birçok güvenlik açığını da beraberinde getirmiştir. Bu güvenlik açıklarını önlemek için güvenlik duvarı, veri şifreleme, kullanıcı kimlik doğrulama gibi birçok teknoloji kullanılmaktadır. Bu güvenlik mekanizmaları birçok saldırı türünü engellemektedir. Ancak, bu güvenlik teknolojileri derinlemesine paket analizi yapamaz. Bu nedenle istenilen saldırı tespit seviyesine ulaşamazlar. Saldırı Önleme Sistemi (SÖS) ve STS sistemleri, bu güvenlik mekanizmalarının eksikliklerini tamamlamak için geliştirilmiştir. Bu sistemler, makine öğrenmesi ve derin öğrenmeyi kapsayan yapay zeka tabanlı algoritmalar sayesinde diğer güvenlik sistemlerine göre daha derin veri analizleri yapabilmektedir. SÖS sistemleri hem saldırı algılama hem de önleme mekanizmaları olarak çalışırken, STS sistemleri yalnızca saldırı tespiti ve analizi için kullanılmaktadır [2-4]. Bu çalışmada STS sistemlerine odaklanmıştır.

İnternet kullanımının ve veri aktarım hızlarının artması da birçok anormalliğe neden olmuştur [5]. Sonuç olarak, internete yapılan saldırılar sürekli artmaktadır. Skybox Security tarafından 2020 yılında yayınlanan zafiyetler ve iş parçacıkları raporuna göre 2019 yılında 17220 yeni zafiyet tespit edilmiş olup, bir önceki yıla göre % 3,8'lik bir artış söz konusu olmuştur [6]. Bu yüzden, kurum ve kuruluşlar, kullanıcılarına güvenli ve istikrarlı bir hizmet sunabilmek için siber güvenlik teknolojileri harcamalarını sürekli artırmaktadır. Crystal Market Research (CMR) tarafından yayınlanan rapora göre 2012 yılında yaklaşık 58,13 milyar ABD doları değerinde olan Siber Güvenlik Piyasasının 2022 yılına kadar 173,57 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Yine bu rapora göre bulutun gelişmesi depolama ve Nesnelerin İnterneti gibi teknolojiler veri ihlali riskini artırmaktadır [7].

İnternet kullanımının artması, siber güvenlik şirketlerini geleneksel güvenlik yöntemlerinin yanı sıra daha hassas sistemler üretmeye zorlamıştır. Sonuç olarak, ağ davranış analizi, makine öğrenmesi, tehdit analizi gibi proaktif siber güvenlik sistemleri geliştirilmiştir. Günümüzde STS sistemleri, siber tehditlere daha duyarlı hale gelmek için sıklıkla kullanılmaktadır.

STS sistemleri geliştirmek için literatürde birçok makine öğrenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Önerilen yöntemin performansı ISCX 2012 veri seti üzerinde değerlendirildiği için bu veri setini kullanan çalışmalara yer verilmiştir.

Awad vd. [8], katmanlı örnekleme yöntemini ve farklı maliyet fonksiyonu şemalarını Ağırlıklandırılmış Aşırı Öğrenme Makinesi ile birleştirmiştir. Önerilen yöntem ISCX2012 veri kümesine uygulanmıştır. Bouteraa vd. [9] ISCX 2012 veri setini kullanarak izinsiz giriş tespiti için veri madenciliği tekniklerinin karşılaştırmalı bir çalışmasını gerçekleştirmiştir. Injadat vd. [10], anormallik tespiti için etkili bir çerçeve önermiştir. Rastgele Değişken (RD), DVM ve K-EYK makine öğrenmesi yöntemleri sınıflandırma için kullanılmıştır. DVM, RD ve K-EYK parametrelerini ayarlamak için Bayes Optimizasyon tekniği kullanılmıştır. Yassin vd. [11] K-Merkezli Kümeleme ve Saf Bayes sınıflandırıcılarını entegre bir şekilde kullanan hibrit bir algoritma önermiştir. Hassan vd. [12], yüksek doğruluk değerlerine sahip ağ saldırılarını tespit etmek için hibrit bir derin öğrenme modeli oluşturmuştur. Bu amaçla CNN ve ağırlığı azaltılmış Uzun Kısa Vadeli Bellek (UKVB) içeren bir derin öğrenme yöntemi kullanılmıştır.

Bu çalışmada literatürde sık kullanılan ISCX 2012 veri seti ile makine öğrenmesi tabanlı STS uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ki-kare öznelik seçme algoritması ile yüksek seviyeli öznelikler seçilmiştir. Böylece hesaplama maliyeti düşürülmüştür. KA algoritması ile sınıflandırma işlemi yapılmıştır. KA sınıflandırıcısının hiperparametreleri Bayes optimizasyon yöntemiyle otomatik olarak seçilmiştir. Böylelikle hiperparametre seçimindeki pratik deneyim gereksinimi ortadan kaldırılmıştır.

## 2. Sınıflandırma teknikleri

Makine öğrenmesi teknikleri uygulanırken sistemin performansını etkileyen en önemli aşamalardan birisi sınıflandırmadır. Çıkarılan özneliklere göre her sınıfa ait örnekler belli bir bölgeye konumlandırılır. Sınıflar arası ayırım her sınıfa ait örneklerin bu konumlarına göre yorumlanmalıdır ve elde edilen bulgulara göre uygun sınıflandırıcı veya sınıflandırıcılar seçilmelidir.

### 2.1. Destek vektör makineleri (DVM)

DVM, hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerini çözmek için kullanılabilen gözetimli bir makine öğrenme algoritmasıdır. Bununla birlikte, en çok sınıflandırma problemlerinin çözümünde kullanılır. DVM algoritmasında, her veri çifti ve her bir öznelik değeri özel bir koordinat düzleminde olacak şekilde n boyutlu uzayda bir nokta olarak temsil edilebilir. Ardından, iki sınıflı bir sınıflandırma problemini çözmek için bir hiper düzlem bulunur ve sınıflandırma yapılır [13]. Hiper düzlemdeki doğrusal denklemler ve sınıflar arasındaki mesafenin Lagrange çarpanları ile optimize edilmesi gerekir. Eğer sınıflar doğrusal olarak ayrılamaz ise Gauss, Dairesel Taban ve Polinomial gibi çekirdek fonksiyonları kullanarak problem başka uzaya taşınır. Böyle bir durumdaki DVM sınıflandırıcısının karar fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir.

$$f(x) = \text{sgn} \left( \sum_i^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad (1)$$

Burada, “ $\alpha_i$ ” Lagrange çarpanlarından elde edilen ağırlık vektörü, “ $y_i$ ” sınıf etiketi, “ $x_i$ ” giriş değeri ve “ $b$ ” bias vektörüdür.

### 2.2. *K-en yakın komşu (K-EYK)*

K-EYK algoritması, en basit ve en yaygın kullanılan sınıflandırma algoritmalarından biridir. K-EYK, parametrik olmayan tembel bir öğrenme algoritmasıdır. İstekli öğrenmenin aksine tembel öğrenmede bir eğitim aşaması yoktur. K-EYK, eğitim verilerini öğrenmez; bunun yerine eğitim veri kümesini ezberler. Bir tahmin yapmak istenildiğinde, tüm veri setinde en yakın komşuları aranır. Algoritma çalışmasında bir  $k$  değeri belirlenir. Bu  $k$  değerinin anlamı, bakılacak eleman sayısıdır. Bir değer geldiğinde, en yakın  $k$  elemanı alınarak gelen değer arasındaki mesafe hesaplanır. Öklid işlevi genellikle mesafe hesaplamasında kullanılır. Öklid işlevine alternatif olarak City Block, Manhattan, Minkowski ve Chebyshev işlevleri de kullanılabilir [14]. Mesafe hesaplandıktan sonra en yakın komşular sıralanır ve gelen değer uygun sınıfa atanır.

### 2.3. *Karar ağacı (KA)*

KA sınıflandırıcısı, çoğunlukla sınıflandırma problemlerini basit yoldan çözmek için kullanılmaktadır. KA algoritmasında, sınıflandırma problemini çözmek için en doğru yol belirli yöntemlerle aranır. KA sınıflandırıcısında, yukarıdan aşağıya inen kökler, yapraklar ve dallardan oluşan bir yapı bulunmaktadır. KA sınıflandırıcısında ayırma kriteri olarak Gini katsayısı, Büyüyen KA veya Sapmalar metotları uygulanmaktadır [15].

### 2.4. *Lineer ayırtaç analizi (LAA)*

LAA algoritması, sınıflandırma ve öznitelik seçimi için sıklıkla kullanılmaktadır. LAA algoritması, sınıf içinde eşit olmayan frekanslarda ve rastgele oluşturulan test verilerinde kolayca uygulanır. LAA algoritmasının temel çalışma prensibi, belirli bir veri setindeki sınıflar arasındaki varyans oranını sınıflar içindeki varyans oranına maksimize ederek en iyi ayrıştırılmayı bulmaya dayanmaktadır [16]. Genel bir LAA algoritmasında, dağılım matrisleri sınıflar arası dağılım matrisleri hesaplanır. LAA fonksiyonu Denklem (2)'de verilmiştir

$$d(x) = w^T \left( x - \frac{m}{w} \right) \quad (2)$$

Burada, “ $w$ ” dağılım matrislerine göre oluşturulan ağırlık vektörü, “ $x$ ” giriş örneklerini ve “ $m$ ” sınıf etiketlerini temsil etmektedir.

### 2.5. *Ki-Kare Algoritması*

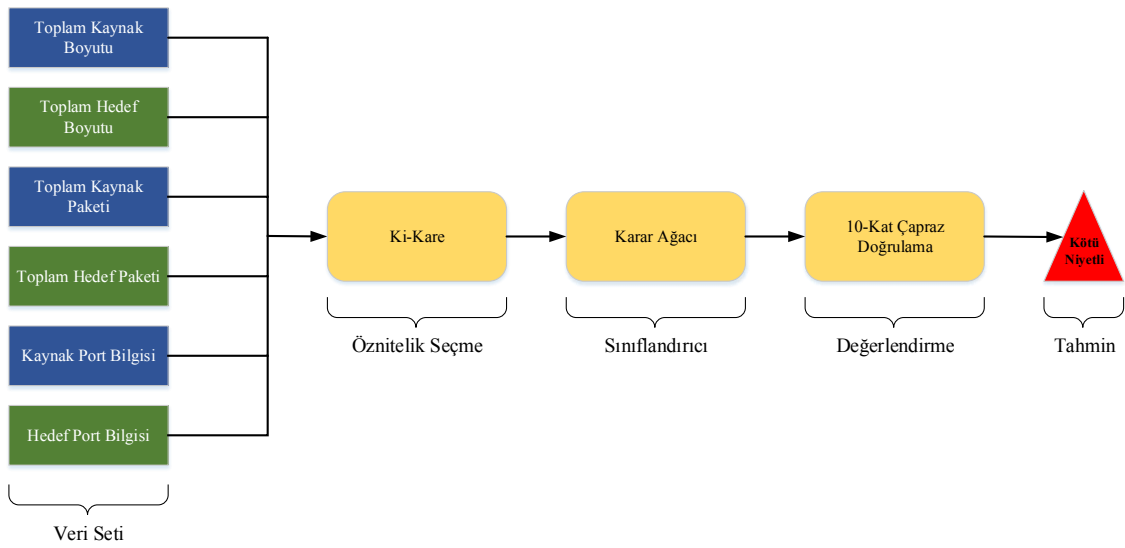
Ki-Kare yönteminde [17]  $r_i$  öznitelik setindeki seçim, bir  $S_j$  sınıfı ile korelasyonu temel alınarak yapılır ve  $r_i$  öznitelik setinde bulunan  $S_j$  sınıfının ayırt etme yeteneği Denklem (3)'teki gibi hesaplanır:

$$x^2(r_i, S_j) = \frac{L \times (m_{ij}c_{ij} - n_{ij}d_{ij})^2}{(m_{ij}c_{ij}) \times (m_{ij}d_{ij}) \times (n_{ij}c_{ij}) \times (n_{ij}d_{ij})} \quad (3)$$

$L$ , toplam giriş sayısını ifade etmektedir.  $m_{ij}$ ,  $r_i$  özniteliğinde bulunan  $S_j$  sınıfına ait örnek sayısını ve  $n_{ij}$ ,  $S_j$  kategorisindeki  $r_i$  özniteliğine ait olmayan örneklerin sayısını karşılık gelmektedir.  $d_{ij}$ ,  $r_i$  özniteliğine ait fakat  $S_j$  kategorisini içermeyen örneklerin sayısına karşılık gelmektedir.  $c_{ij}$ ,  $S_j$  kategorisinde bulunmayan ve  $r_i$  özniteliğine ait olmayan örneklerin sayısına karşılık gelmektedir.

## 2.6. Materyal metot

Makine öğrenme tabanlı STS sistemlerinin uygulamasını gerçekleştirmek için ISCX 2012 veri kullanılmıştır. Bu veri seti, yedi günlük ağ verilerinden oluşturulmuştur. Veri seti, normal ve kötü niyetli ağ trafiğini içermektedir. Kötü amaçlı ağ trafiği, ağa içeriden sızma, HTTP Hizmet Reddi, Dağıtılmış Hizmet Reddi ve Brute Force SSH saldırılarını içermektedir. Makine öğrenme uygulamasını gerçekleştirmek için 2516 normal ve 2515 kötü niyetli sınıf örneği olacak şekilde veri seti azaltılmıştır. [18]. Veri setinde yer alan toplam kaynak boyutu (bayt), toplam hedef boyutu (bayt), toplam kaynak paketi (adet), toplam hedef paketi (adet), kaynak portu ve hedef portu öznelik olarak kullanılmıştır. Çıkarılan özneliklerin içinden yüksek seviyeli olanlar için Ki-Kare algoritması ile seçilmiştir ve öznelik sayısı 6'dan 3'e düşürülmüştür. Seçilmiş öznelikler en iyi sınıflandırma sonucunu verdiği için KA sınıflandırıcısına iletilmiştir ve kötü niyetli örnekler tahmin edilmiştir. Önerilen metodun temsili grafiği Şekil 1'de verilmiştir. Sonuçları değerlendirmek için 10-kat çapraz doğrulama metodu kullanılmıştır.



Şekil 1. Önerilen metodun temsili grafiği.

## 2.7. Performans metrikleri

Bu çalışmada önerilen metodun performansını ölçmek için doğruluk (Do) ana kriter olmak üzere duyarlılık (Du), özgüllük (Öz), kesinlik (Ks) ve *F-skor* değerleri kullanılmıştır. Bu ölçütleri hesaplamak için karmaşıklık matrisinde yer alan doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN), yanlış pozitif (YP), yanlış negatif (YN) değerleri kullanılmıştır. Bu performans metrikleri aşağıdaki denklemler ile elde edilmiştir.

$$Do = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (4)$$

$$Du = \frac{DP}{DP + YN} \quad (5)$$

$$Öz = \frac{DN}{DN + YP} \quad (6)$$

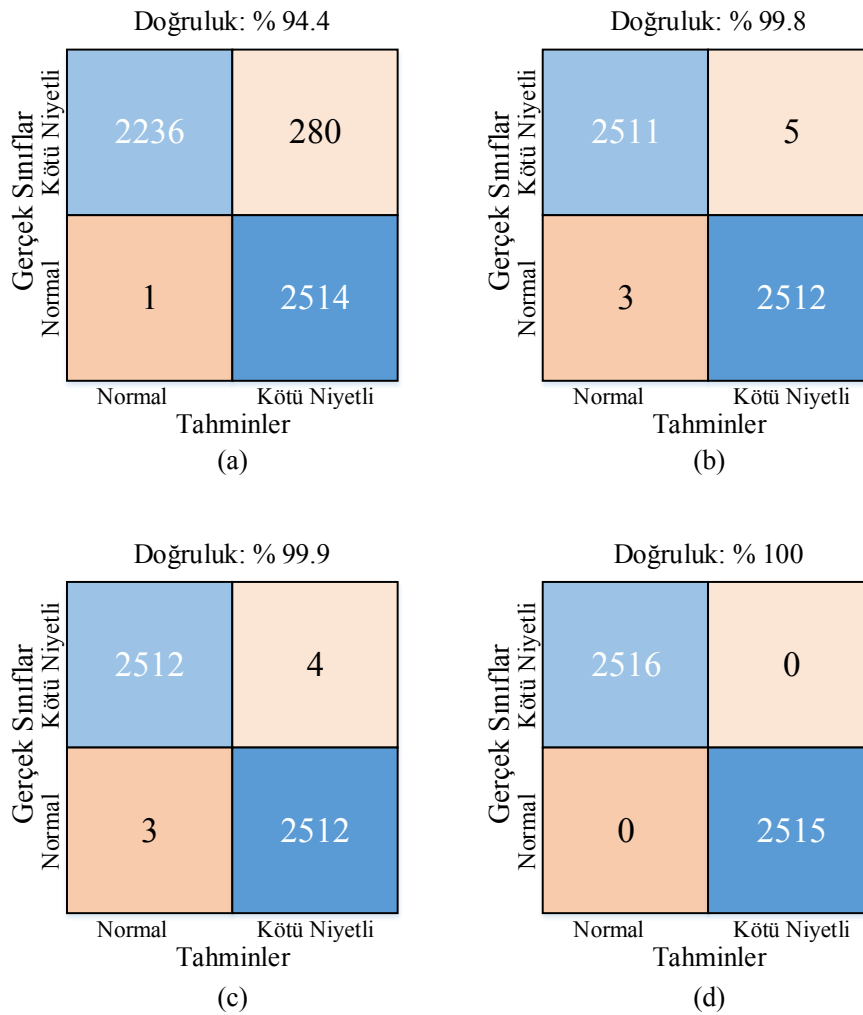
$$Ks = \frac{DP}{DP + YP} \quad (7)$$

$$F - skor = 2 \times \frac{Ks \times Du}{Ks + Du} \quad (8)$$

Ayrıca bir performans ölçütü olarak ROC eğrisi ve AUC değeri de verilmiştir. ROC eğrisi DP oranının YP oranına göre değişimi kullanılarak çizdirilir. AUC değeri ise ROC eğrisi altında kalan alandır.

### 3. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada Ki-kare öznelik seçimi haricindeki tüm kodlamalar Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir. Öznelik seçimi için Python programlama dili kullanılmıştır. Intel® Core™ i7-5500 CPU işlemcisi, 8GB DRR3 bellek ve 2GB grafik kartına sahip bir bilgisayar donanım ile çalışılmıştır. DVM sınıflandırıcısı için Gauss çekirdek fonksiyonu tercih edilmiştir. Çekirdek ölçeği, “0.64” ve kutu kısıtlaması “1” seçilmiştir. K-EYK sınıflandırıcısında uzaklık denklemi “kosinüs” ve en yakın komşu sayısı “10” seçilmiştir. LAA sınıflandırıcısındaki hiperparametre gama, “0” olarak girilmiştir. 10-Kat Çapraz değerlendirme sonunda kullanılan sınıflandırıcıların karmaşıklık matrisi sonuçları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Sınıflandırma sonuçları: (a) LAA, (b) DVM (c) K-EYK, (d) KA

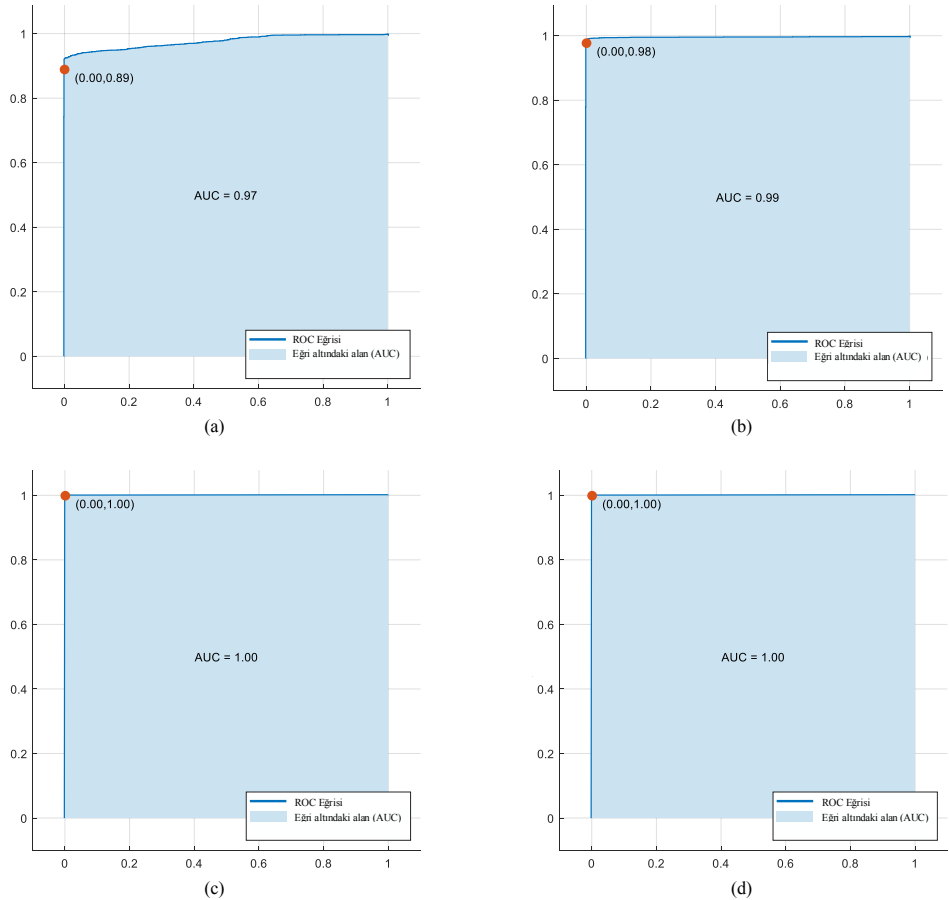
Şekil 2’de verilen sonuçlara göre en iyi sınıflandırma sonucuna %100 doğruluk ile KA sınıflandırıcısıyla ulaşılırken, en kötü sonuca %94.11 doğruluk ile LAA sınıflandırıcısıyla ulaşılmıştır. Şekil 2’deki karmaşıklık matrisleri kullanılarak elde edilen Du, Öz, Ks ve F-skor değerleri Tablo 1’de verilmiştir. En iyi sonuçlara yine KA sınıflandırıcısıyla ulaşılırken en kötü sonuçlara LAA sınıflandırıcısıyla ulaşılmıştır.

Tablo. 1 Sınıflandırıcıların Du, Öz, Ks ve F-skor sonuçları.

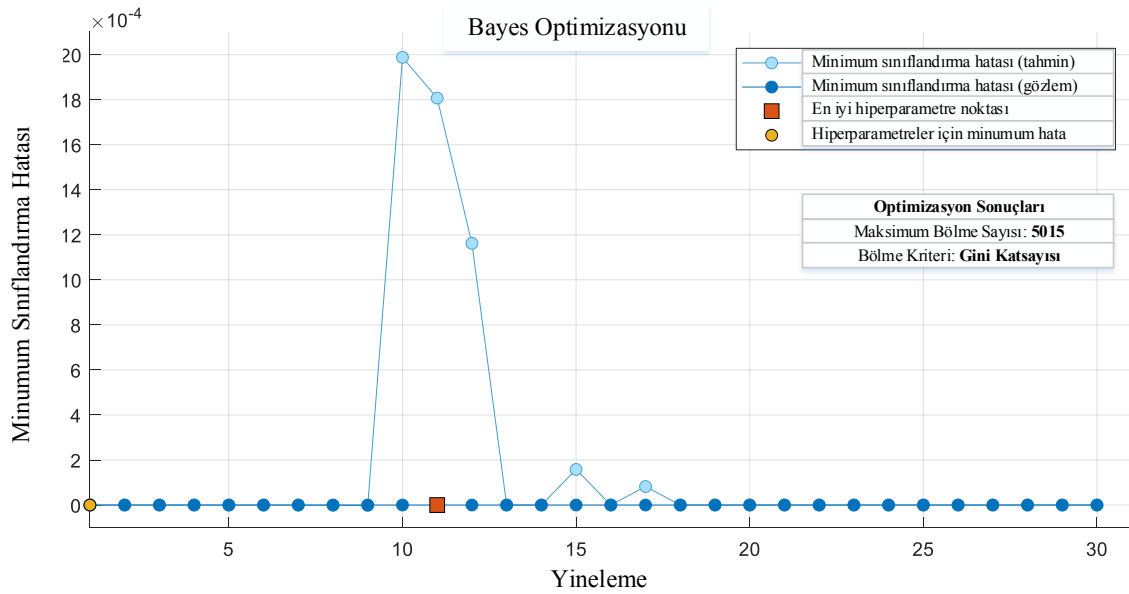
Sınıflandırıcı	Sınıf	Du	Öz	Ks	F-skor
LAA	Normal	0,88	0,99	0,99	0,94
	Kötü Niyetli	0,99	0,88	0,89	0,94
DVM	Normal	0,99	0,99	0,99	0,99
	Kötü Niyetli	0,99	0,99	0,99	0,99
K-EYK	Normal	0,99	0,99	0,99	0,99
	Kötü Niyetli	0,99	0,99	0,99	0,99
KA	Normal	1	1	1	1
	Kötü Niyetli	1	1	1	1

Tablo 1’e göre en iyi sonuçlar KA sınıflandırıcısıyla alınırken, en kötü sonuçlar LAA sınıflandırıcısıyla alınmıştır.

Tüm sınıflandırıcılar için ROC eğrileri ve AUC değerleri Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 3’e göre en kötü AUC değeri LAA sınıflandırıcısıyla elde edilirken, en iyi AUC değerine DVM ve KA sınıflandırıcısıyla ulaşılmıştır.



Şekil 3. Sınıflandırıcıların ROC eğrileri: (a) LAA, (b) DVM (c) K-EYK, (d) KA



Şekil 4. KA sınıflandırıcısının hiperparametre seçimi

Şekil 4'te KA sınıflandırıcısının hiperparametre seçimi için Bayes optimizasyon algoritması uygulanmıştır. Bu optimizasyon tekniğinin uygulanışı ile ayrıntılı bilgi [20]'de yer almaktadır. Bayes algoritması en iyi sınıflandırma sonucunu verecek hiperparametreleri 30 yineleme sonucunda otomatik olarak bulmuştur. Hiperparametrelerden biri olan maksimum bölme sayısı 1-5030 aralığında aranmıştır ve en iyi maksimum bölme sayısı 5015 olarak bulunmuştur. Bölme kriteri olarak Gini katsayısı ve maksimum sapma azaltma kullanılmıştır ve Gini katsayısı kriterinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Tablo 2'de ISCX 2012 setini kullanan mevcut çalışmaların performans metrikleri verilmiştir. Tablo 2'ye göre tüm performans metrikleri birbirine çok yakın olmakla beraber en iyi sonuçlar önerilen metotta kullanılan KA sınıflandırıcısıyla elde edilmiştir.

Tablo. 2 Metotların karşılaştırılması

Referans	Sınıflandırıcı	Do	Du	Ks	F-skör
Injadet vd. [10]	DVM	0.9984	1.00	0.9998	-
	K-EYK	0.9993	1.00	0.9999	-
	RD	0.9992	1.00	0.9999	-
Kılincer vd. [19]	KA	1.00	0.9994	0.9994	0.9994
	K-EYK	0.9980	0.9978	0.9978	0.9979
	DVM	0.9980	0.9978	0.9978	0.9979
Önerilen Metot	KA	1.00	1.00	1.00	1.00
	K-EYK	0.9990	0.9986	0.9986	0.9986
	DVM	0.9980	0.9984	0.9984	0.9984

Elde edilen sonuçlar STS için kullanılan makine öğrenmesi sınıflandırıcılarının üstün performans sağladığını göstermiştir. Aynı veri setini kullanan diğer çalışmalara göre daha iyi sınıflandırma doğrulukları elde edilmiştir. Dahası, bu sınıflandırma doğrulukları daha az öznitelikle (3 adet öznitelik) elde edilmiştir ve hesaplama maliyeti azaltılmıştır. Bu



çalışmada, sınıflandırma performansı için sınıflandırıcı ve hiperparametre seçiminin önemli olduğu görülmüştür. En iyi sınıflandırma sonucunu elde KA sınıflandırıcısı ile elde edilirken hiperparametre seçimi Bayes algoritması ile otomatik olarak yapılmıştır. Kötü niyetli yazılımları tespit etmek için geliştirilen bu sistem yüksek başarımla sağladığından STS sistemlerinde kullanılabilir. Ayrıca gelecekteki çalışmalarda daha çok sınıfı yüksek başarımla otomatik olarak tanıyan Derin Öğrenme Tabanlı STS sistemlerini geliştirmek de önem arz etmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Kemp, S., Digital 2019: Global digital overview, **Retrieved from Datareportal**, (2019).
- [2] Hajisalem, V. ve Babaie, S., A hybrid intrusion detection system based on ABC-AFS algorithm for misuse and anomaly detection, **Computer Networks**, 136, 37-50, (2018).
- [3] Inayat, Z., Gani, A., Anuar, N. B., Khan, M. K. ve Anwar, S., Intrusion response systems: Foundations, design, and challenges, **Journal of Network and Computer Applications**, 62, 53-74, (2016).
- [4] Ashoor, A. S. ve Gore, S., Difference between intrusion detection system (IDS) and intrusion prevention system (IPS), **In International Conference on Network Security and Applications**, 497-501, Berlin, Heidelberg, (2011).
- [5] Jabez, J. ve Muthukumar, B., Intrusion detection system (IDS): anomaly detection using outlier detection approach, **Procedia Computer Science**, 48, 338-346, (2015).
- [6] Quepons, I., Vulnerability and Trust, **PhaenEx**, 13, 2, 1-10, (2020).
- [7] Garcia-Teodoro, P., Diaz-Verdejo, J., Maciá-Fernández, G. ve Vázquez, E., Anomaly-based network intrusion detection: Techniques, systems and challenges, **Computers and Security**, 28,1-2, 18-28, (2009).
- [8] Awad, M., ve Alabdallah, A., Addressing Imbalanced Classes Problem of Intrusion Detection System Using Weighted Extreme Learning Machine, **International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)**, 1-11, Toronto, Canada, (2019).
- [9] Bouteraa, I., Derdour, M. ve Ahmim, A., Intrusion Detection using Data Mining: A contemporary comparative study, **In 2018 3rd International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Systems (PAIS)**, 1-8, Algeria (2018).
- [10] Injadat, M., Salo, F., Nassif, A. B., Essex, A. ve Shami, A., Bayesian optimization with machine learning algorithms towards anomaly detection, **In 2018 IEEE global communications conference (GLOBECOM)**, 1-6, Abu Dhabi, (2018).
- [11] Yassin, W., Udzir, N. I., Muda, Z. ve Sulaiman, M. N., Anomaly-based intrusion detection through k-means clustering and naives bayes classification, **In Proc. 4th Int. Conf. Comput. Informatics (ICOI)**, 298-303, Kuching, Sarawak, (2013).
- [12] Hassan, M. M., Gumaei, A., Alsanad, A., Alrubaian, M. ve Fortino, G., A hybrid deep learning model for efficient intrusion detection in big data environment, **Information Sciences**, 513, 386-396, (2020).
- [13] Cortes, C. ve Vapnik, V. Support Vector Machine, **Machine Learning**, 20, 3, 273-297, (1995).
- [14] Akbulut, Y., Sengur, A. ve Guo, Y., Smarandache, F., NS-k-NN: Neutrosophic set-based k-nearest neighbors classifier, **Symmetry**, 9, 9, 179, (2017).

- [15] Safavian, S. R. ve Landgrebe, D., A survey of decision tree classifier methodology, **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, 21, 3, 660-674, (1991).
- [16] Altay, O. ve Ulas, M., Prediction of the autism spectrum disorder diagnosis with linear discriminant analysis classifier and K-nearest neighbor in children, **In 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS)**, Antalya, Turkey, 1-4, (2018).
- [17] Kira, K. ve Rendell, L. A., A practical approach to feature selection, **In Machine learning proceedings 1992**, 249-256, Morgan Kaufmann, (1992).
- [18] Shiravi, A., Shiravi, H., Tavallae, M. ve Ghorbani, A. A., Toward developing a systematic approach to generate benchmark datasets for intrusion detection, **Computers and Security**, 31, 3, 357-374, (2012).
- [19] Kilincer, I. F., Ertam, F. ve Sengur, A., Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection: Datasets and Comparative Study, **Computer Networks**, 107840, (2021).
- [20] Ucar, F. ve Korkmaz, D., COVIDiagnosis-Net: Deep Bayes-SqueezeNet based diagnosis of the coronavirus disease 2019 (COVID-19) from X-ray images, **Medical Hypotheses**, 140, 109761, (2020).

# Performance comparison of artificial bee colony algorithm based approaches for retinal vessel segmentation

Mehmet Celalettin CİHAN<sup>1</sup>, Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA<sup>2, \*</sup>, Hakan DURAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Kapadokya University, School of Health Sciences, Department of Audiology, Nevşehir  
<sup>2,3</sup> Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Mechatronics Engineering, Kayseri

Geliş Tarihi (Received Date): 16.10.2020  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 05.05.2021

## Abstract

Structural changes in the retinal blood vessels provide important information about retinal diseases. Therefore, computer-aided segmentation of retinal blood vessels has become an active area of research in last decades. Due to the close contrast between the retinal blood vessels and the retinal background, robust methods should be developed to detect retinal blood vessels with high accuracy. In this work, artificial bee colony (ABC) algorithm which provides effective solutions to engineering problems has been applied to the retinal vessel segmentation. Clustering based ABC (basic ABC), quick-ABC (Q-ABC) and modified ABC (MR-ABC) algorithms have been analyzed for accurate segmentation of retinal blood vessels and their performances were compared. The simulations have been realized on the normal and abnormal retinal images taken from the DRIVE database. Simulation results and statistical analyses represent that ABC based approaches are stable and able to reach to optimal clustering performance with higher convergence rates. As a result it can be concluded that ABC based approaches can successfully be used for accurate segmentation of retinal blood vessels.

**Keywords:** Retinal blood vessel segmentation, artificial bee colony algorithm, quick artificial bee colony algorithm, modified artificial bee colony algorithm.

---

Mehmet Celalettin CİHAN, mcelalettincihan@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-3399-7188>

\* Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA, cetinkaya@erciyes.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-3378-4561>

Hakan DURAN, hakanduran@erciyes.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-6696-6081>

# Retinal damar segmentasyonuna yönelik yapay arı koloni algoritması tabanlı yaklaşımların performans mukayesesi

## Öz

*Retinal kan damarlarında meydana gelen yapısal değişiklikler retinal hastalıklara yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu nedenle, son yıllarda bilgisayar destekli retinal damar segmentasyonu uygulamaları önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Retinal kan damarları ile retina görüntüsü art alanı arasındaki kontrast farkları çok düşük olduğu için retinal kan damarlarının yüksek doğrulukta tespit edilmesine yönelik güçlü algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, mühendislik problemlerine etkim çözümler üreten yapay arı koloni (ABC) algoritması retinal damar segmentasyonuna yönelik uygulanmıştır. Retinal kan damarlarının yüksek doğrulukta segmentasyonuna yönelik olarak kümeleme tabanlı ABC (temel ABC), hızlı-ABC (Q-ABC) ve modifiye edilmiş ABC (MR-ABC) algoritmaları geliştirilmiş ve performansları mukayese edilmiştir. Benzetimler, DRIVE veri tabanından alınmış olan normal ve hastalıklı retinal görüntüler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları ve istatistiksel analizler ABC tabanlı yaklaşımların kararlı bir şekilde çalıştıklarını ve en uygun kümeleme performanslarına yüksek yakınsama hızlarında ulaştıklarını göstermektedir. Sonuç olarak, ABC tabanlı yaklaşımların retinal kan damarlarının yüksek doğrulukta segmentasyonuna yönelik olarak başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.*

**Anahtar kelimeler:** Retinal kan damar segmentasyonu, yapay arı koloni algoritması, hızlı yapay arı koloni algoritması, modifiye edilmiş yapay arı koloni algoritması.

## 1. Introduction

Accurate detection and regular follow up of the changes occurring in the retinal blood vessels are too important to early diagnosis and correct treatment. Structural changes in the retinal blood vessels are precursors of serious retinal diseases such as diabetic retinopathy, hypertension, arteriosclerosis and cardiovascular diseases [1-3]. Retinal blood vessel segmentation can be defined as the detection of changes occurring in the retinal blood vessels and it also gives knowledge about the location of the retinal blood vessels [4, 5].

Due to the complexity of information obtained after retinal blood vessel, segmentation, manual measurements cannot produce accurate results enough. Therefore, computer-aided methods should be used to perform an accurate retinal blood vessel segmentation. In literature the most common used methods for retinal blood vessel segmentation can be classified as kernel-based, tracking-based and classifier based methods.

Kernel-based methods in which the whole retinal image is being filtered by using a vessel like kernel include morphological methodology [6-8] and matched filters [9-13]. In morphological methodology, the retinal blood vessels are highlighted with approaches such as top-hat and bottom-hat [8]. In the matched filter methodology, in order to detect the retinal blood vessels the matched filter structures such as Gaussian type filters [9-13] and Wavelet filters [14] are being used. Kernel-based methods have

two main disadvantages. Firstly, the matched filters may usually detect undesired regions such as bright blobs. Secondly, in this method additional kernels needed to be used to detect vessels with different thicknesses at different orientations.

The basic philosophy of tracking-based methods is edge detection. The vessels attempted to be detected by using edge information. Tracking-based methods use various vessel profile models such as Gaussian profile [15], generic parametric model [16], Bayesian probabilistic model [17] and multi-scale profile [18] to obtain the best matching model. The most important disadvantage of these methods is that the bifurcations at the edges of the vessels cannot be accurately detected in thin vessels.

The classifier based methods can be grouped as supervised and unsupervised methods. Supervised methods [19–21,22,23] use some prior information belonging to the relevant vessel to associate a pixel as vessel or non-vessel pixel. In order to realize pixel classification the classifier based methods use different classifiers such as artificial neural network (ANN) [19–21], gaussian mixture model [23], K-nearest neighbour (KNN) [22] and support vector machine (SVM) classifiers [23]. In contrast to supervised methods, the unsupervised methods do not need pre-classified data for retinal blood vessel segmentation [24, 25]. In general, the vessel segmentation performance of the classifier based methods is directly proportional to the feature of the pixels extracted from the retinal image. The feature extraction methods create feature vectors derived from the retinal image. In literature, the most common used methods while creating feature vectors are local binary patterns operator [20], a 7-D feature vector composed of gray level and moment invariants [21], Gabor wavelet transform [23], ridge detection [22], line operators [23], matched filters [24] and trench detection [25]. In addition to the methods mentioned above some researchers [26, 27] prefer to use methods based on eigenvalues and eigenvectors obtained from Hessian matrices. In this method, the elements of the Hessian matrices represent vesselness values and vessel directions. In [28], authors use a graph-based method to extract both vessel edges.

The conventional methods concluded above are well developed and frequently used in literature for clustering based retinal blood vessel segmentation. However, there are few works in literature including retinal image analysis by using heuristic algorithms. In contrast to conventional methods, heuristic algorithms can provide effective solutions to many engineering problems due to their flexible and robust structure. In this work, clustering based artificial bee colony, quick artificial bee colony and modified artificial bee colony algorithms have been applied for retinal blood vessel segmentation and then the performances of these approaches are compared. The analysis have been realized on the normal and abnormal retinal images taken from the Digital Retinal Images for Vessel Extraction (DRIVE) database. Figure 1 shows the normal and abnormal retinal images taken from DRIVE database.



(a) Normal retinal image      (b) Abnormal retinal image

Figure 1. Retinal images taken from DRIVE database.

The method proposed for retinal blood vessel segmentation includes two phases: pre-processing and artificial bee colony algorithm based segmentation. In order to improve the performance of retinal vessel segmentation, pre-processing operations have to be applied before clustering.

## 2. Material and methods

In order to increase the contrast between the vessels and the image background, as the first pre-processing application, the red (R), green (G) and blue (B) layers of the retinal images of Figure 1 and Figure 2 were analyzed in terms of contrast and brightness. It was seen that the optimal contrast and brightness levels have been obtained in the Green (G) layer for both images due to the poor illuminance of R and B layers [29].

For this reason, after this step, the image analysis will be continued on the green layer in accordance with the literature [30]. The pre-processing mentioned above can be called as band selection. Despite the increase in contrast and brightness values of the retinal images after the pre-processing phase mentioned above, the contrast difference between the vessels and the image background was not found to be sufficient for a high clustering performance. Thus, a second pre-processing operation called bottom-hat transformation is applied in the next step to optimize the retinal image for clustering. This transformation can be described as extraction of the original image from the morphologically closed image. Bottom-hat filter removes the background of the image and only leaves dark areas which are smaller than the radius of the structural element used. Equation 1 represents the the enhancement obtained in the contrast between bright and dark areas after bottom-hat transformation,

$$\text{bottom-hat}(g) = g - (g \bullet nB) \quad (1)$$

where  $g$  represents the mapping points taken from an Euclidean space in grayscale retinal image,  $(\bullet)$  operator determines the closing operation,  $B$  is the grayscale structural element to be used, and  $n$  is the bottom-hat transformation. In this work, a disk with  $r = 8$  pixel radius has been used as building element and bottom-hat transformation is applied as to be  $n = 8$ .

The green layer images obtained after band selection pre-processing for the retinal images taken from the DRIVE database given in Figures 1 (a) and (b), are given below with Figures 2 (b) and (e). This green layer images then subjected to bottom-hat transformation. The enhanced retinal images obtained after pre-processing operations have been represented in Figures 2 (c) and (f).

### 2.1. Basic artificial bee colony algorithm (ABC)

ABC algorithm which is proposed by Karaboga in 2005 [31] is one of the swarm intelligence based algorithms inspired from the collective behaviour of bees. In ABC algorithm, the colony includes employed bees, onlookers and scouts. In the models proposed in this work, half of the population consists of employed bees and the other half consists of onlookers. Employed bees are associated with randomly produced food source positions. The position of a food source represents a possible solution to the problem to be optimized and the nectar amount of a food source corresponds to the fitness (quality) value of the associated solution.

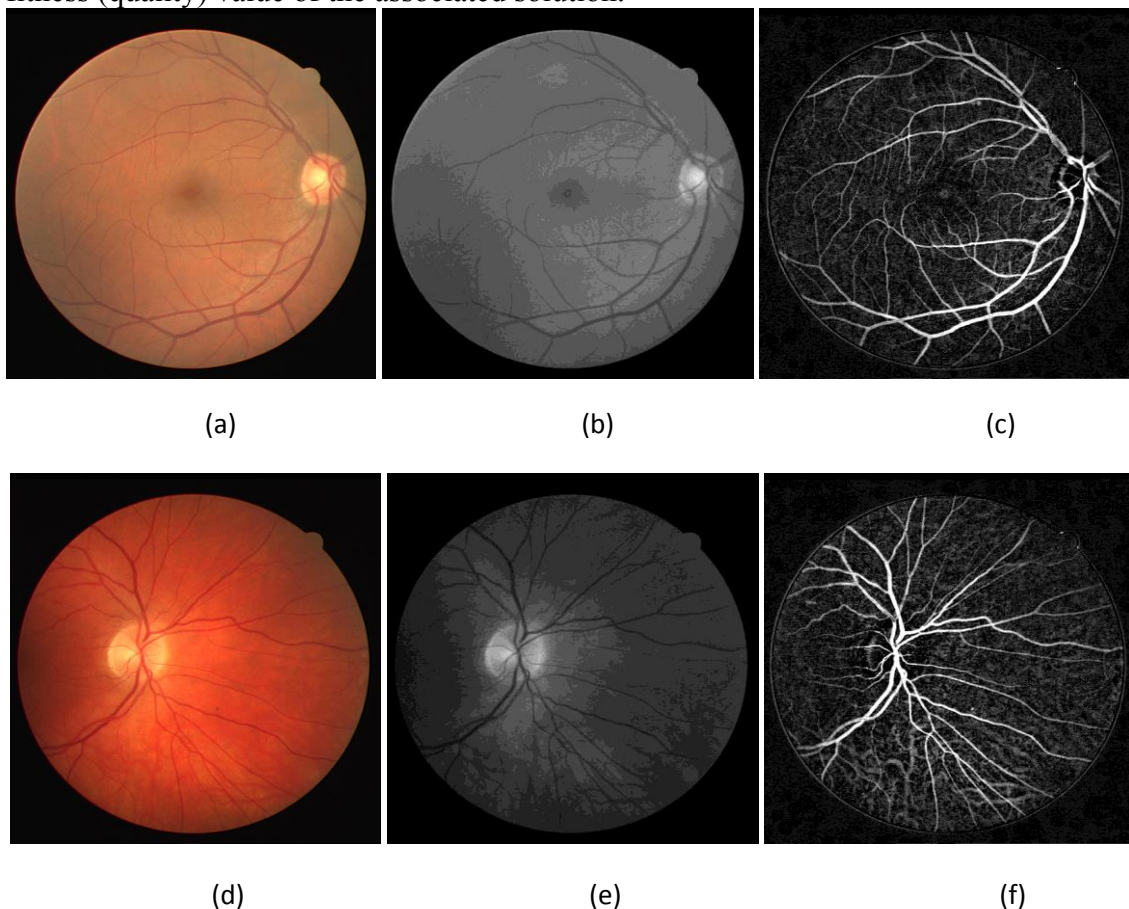


Figure 2. (a) and (d) are the normal and abnormal retinal images, (b) and (e) are the green layer images obtained as a result of band selection, (c) and (f) are the enhanced retinal images obtained after the bottom-hat filtering.

In ABC algorithm, the position of a food source represents a possible solution to the problem to be optimized and the nectar amount of a food source corresponds to the fitness (quality) value of the associated solution. Each employed bee shares its position info with onlooker bees by means of a dance performed into the hive. Onlooker bees select the food sources according to their fitness values. The last group is the scout bees. Scout bees search for previously undiscovered food sources regardless of any information. The initial phase of the search is carried out on randomly produced

solutions. In further cycles, if a solution cannot be improved by a predetermined number of trials, the employed bee related to this solution becomes a scout. The number of trials for releasing a solution is controlled by an important control parameter called limit. The main loop of an ABC algorithm and the description of each phase are given below:

```

Initialization phase
REPEAT
    Employed phase
    Onlooker phase
    Memorize the best solution achieved so far
    Scout phase
UNTIL (termination criteria is met)
    
```

### 2.1.1. Initialization phase

In the initialization phase, an initial population is randomly created according to Equation 2.

$$x_{m,i} = l_i + rand(0,1) \cdot (u_i - l_i) \quad (2)$$

where,  $x_{m,i}$  represents the  $i^{th}$  dimension of the  $m^{th}$  solution.  $u_i$  and  $l_i$  are the upper and lower bounds of the  $x_{m,i}$ , respectively. An initial population consisting of randomly produced  $SN$  solutions can be shown as  $P(c) = \{x_{m,i} \mid m=1, 2, \dots, SN\}$ . Then, the fitness value of each initial solution is calculated by using Equation 3 and memorized.

$$fit(x_m) = \frac{1}{1 + |f(x_m)|} \quad (3)$$

### 2.1.2. Employed phase

In this phase, new possible neighbour solutions are determined within the neighborhood of the memorized solutions in the initialization phase. These new neighbour solutions can be obtained by using Equation 4.

$$v_{m,i} = x_{m,i} + \phi_{m,i} (x_{m,i} - x_{k,i}) \quad (4)$$

where,  $x_k$  is a randomly selected solution and  $i$  determines the randomly selected dimension of  $x_k$ .  $\phi_{m,i}$  is a coefficient that scales the new solution and it varies in the range of  $[-1, 1]$ . After the new neighbour solution is produced, a greedy selection is applied between  $x_m$  and  $v_m$  according to their fitness values.

### 2.1.3. Onlooker phase

In onlooker phase, firstly, some of the solutions produced in employed phase are selected within a certain probability depending on their fitness values. The probability of a solution to be selected can be defined as the following,



$$p_m = \frac{fit(x_m)}{\sum_{m=1}^{SN} fit(x_m)} \quad (5)$$

After this probabilistically selection process, as in the employed phase a neighbor solution  $v_m$  is produced according to Equation 4. Then, the solution with higher fitness value is chosen by applying greedy selection between  $x_m$  and  $v_m$ . Onlooker phase provides a positive feedback by ensuring that solutions with higher fitness value remain in the population.

#### 2.1.4. Scout phase

The solution which cannot be improved despite "limit" number of trials can be thought as an exhausted solution. In Scout phase, the exhausted solutions are replaced with new solutions produced by using Equation 2. Thus, these new solutions produced in scout phase are transferred to the next generation instead of exhausted solutions.

#### 2.2. Quick artificial bee colony algorithm (Q-ABC)

In basic ABC, an onlooker chooses a food source depending on the information taken from the employed bee and then she directly evaluates only the corresponding source. This research methodology reduces the convergence rate because possible better solutions around the corresponding source are being ignored. To overcome this disadvantage of basic ABC, Q-ABC proposes a new search approach in onlooker phase [32]. In the proposed approach both the corresponding source and the new possible sources around it are evaluated and the solution with higher fitness value is selected. In this new model, the behaviour of onlookers can be modeled as the following,

$$v_{N_m, i}^{best} = x_{N_m, i}^{best} + \phi_{m, i} (x_{N_m, i}^{best} - x_{k, i}) \quad (6)$$

where,  $x_{N_m}^{best}$  represents the best solution among the neighbours of  $x_m$  and itself ( $N_m$ ). Namely, an onlooker memorizes the solution  $x_m$  which transferred in employed phase and then she searches the region which is centered by  $x_m$ .

In Q-ABC algorithm,  $x_m$  represents the possible solutions in the initial population which are produced by Equation 2. Firstly, the best solution around the  $x_m$  itself is obtained and represented as  $N_m$ . In the next step, the best solution that occurs around the neighboring solutions of  $x_m$  are obtained. Finally, the solution with higher fitness value among these two solutions is selected as the best solution. As a result of this search procedure, a regional search is performed instead of a local search.

In addition to the parameters of basic ABC algorithm, Q-ABC has one more control parameter called *neighbourhood radius* ( $r$ ) which determines the radius of the search area around  $x_m$ . The value of  $r$  parameter has to be chosen as,  $r \geq 0$  [32]. If  $r$  is

chosen as  $r = 0$ , it is clear that Q-ABC turns to be the standard ABC, namely,  $x_{N_m}^{best}$  will be equal to  $x_m$ .

**2.3. Modified artificial bee colony algorithm (MR-ABC)**

In basic ABC, a possible solution in the neighbourhood of the present solution is being created by changing only one parameter of the present solution. This approach is restricting the radius of search space and as a result of this the convergence rate decreases especially in the initial phase of the search. To overcome this disadvantage of basic ABC, the neighbor solution might be created by changing more than one parameter of the present solution. The ABC producing neighbour solutions in this way is called modified ABC [33]. In addition to the control parameters of basic ABC, modified ABC has got one more control parameter called modification rate-MR. In modified ABC algorithm, the number of parameters to be changed while generating a neighbour solution is being determined according to MR parameter. The recommended value for this control parameter is between [0,1] [33].

Table 1 represents the control parameter values of the ABC based algorithms used.

Table 1. Control parameter values of the algorithms used in the simulations.

ABC	Q-ABC	MR-ABC
Maximum Cycle = 100	Maximum Cycle = 100	Maximum Cycle = 100
Colony Size = 10	Colony Size = 10	Colony Size = 10
Limit Value = 120	Limit Value = 120 Radius = 1	Limit Value = 120 Modification Rate = 0.7
$X_{max}$ and $X_{min}$ represent the highest and lowest pixel values of the image, respectively.	$X_{max}$ and $X_{min}$ represent the highest and lowest pixel values of the image, respectively.	$X_{max}$ and $X_{min}$ represent the highest and lowest pixel values of the image, respectively.

**2.4. Retinal vessel segmentation**

As mentioned earlier the performances of the methods proposed in this work are evaluated on the retinal images taken from the DRIVE database which is the most used benchmark databases in retinal image analysis. DRIVE database [22] contains 40 color fundus photographs which were obtained by a diabetic retinopathy screening program. The screening population has been consisted of 453 subjects between 31 and 86 years of age. Each image has been JPEG compressed, which is common practice in screening programs. In this database, 7 of 40 images have pathology such as exudates, hemorrhages and pigment epithelium changes. The images have been captured by a Canon CR5 3 CCD camera with a 45° field of view (FOV) and size is 700 × 605 pixels per color channel.

The flowchart of the retinal vessel segmentation process proposed in this work can be given as the following.

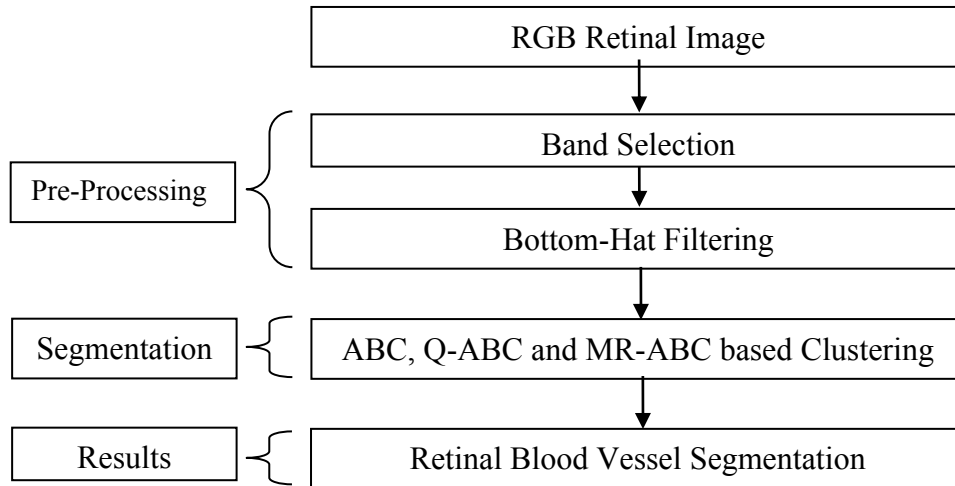


Figure 3. Flowchart of retinal vessel segmentation process.

When the R, G, and B layers of the RGB retinal image were analyzed, it was seen that the G layer provides the highest contrast difference between the vessels and the background. Therefore, in the next steps analyses have been continued over the G layer. Although its higher rate of contrast, the G layer is additionally subjected to preprocessing of bottom-hat filtering to be enhanced for a more successful clustering.

Retinal images enhanced and optimized for a successful clustering with pre-processing phase are then subjected to clustering based segmentation by the algorithms of ABC, Q-ABC and MR-ABC. In the segmentation phase, optimal clustering centers have been determined by using ABC, Q-ABC and MR-ABC algorithms in order to obtain the highest clustering performance and clustering has been realized according to these centers. In the clustering process cluster centers are randomly determined and all pixels are indexed to the closest cluster center. In order to measure the success of pixel indexing the Mean-Squared Error (MSE) criteria is used. The MSE function which determines the quality of the solutions can be expressed as the following,

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - y_i)^2 \quad (7)$$

As seen from the equation given above, MSE error function calculates the quality of a solution based on the distance between each pixel and its related cluster center. In this equation,  $N$  represent the total number of pixels in the retinal image. Cluster centers are determined by algorithm and  $f_i$  represents the value of the cluster center closest to the pixel  $i$ . Also,  $y_i$  represents the pixel value of the  $i^{th}$  pixel. The MSE error function allows the pixels to be grouped successfully around the appropriate cluster centers with minimum error.

### 3. Simulation results

Figure 4 represents the resulting retinal images obtained after applying segmentation to the images Figures 1 (a) and (b) by using the clustering based ABC, Q-ABC and MR-

ABC algorithms. It is seen from the figures that some non-vessel regions with close pixel value to the real vessels have been segmented as vessel. Furthermore, factors such as low vessel contrast, irregular shaped lesions and vessels with low diameter reduce the clustering performance. Several post-processing approaches have been proposed to eliminate these regions. But in this work in order to represent the pure performance of the algorithms these post-processing methods have not been applied. It is clear from the figures that clustering based ABC, Q-ABC and MR-ABC algorithms are able to cluster close pixel values at high accuracy.

**3.1. Performance measures**

The statistical performances of the algorithms are evaluated in terms of sensitivity (Se), specificity (Sp) and accuracy (Acc). The expressions of these statistical measures are given in Table 2.

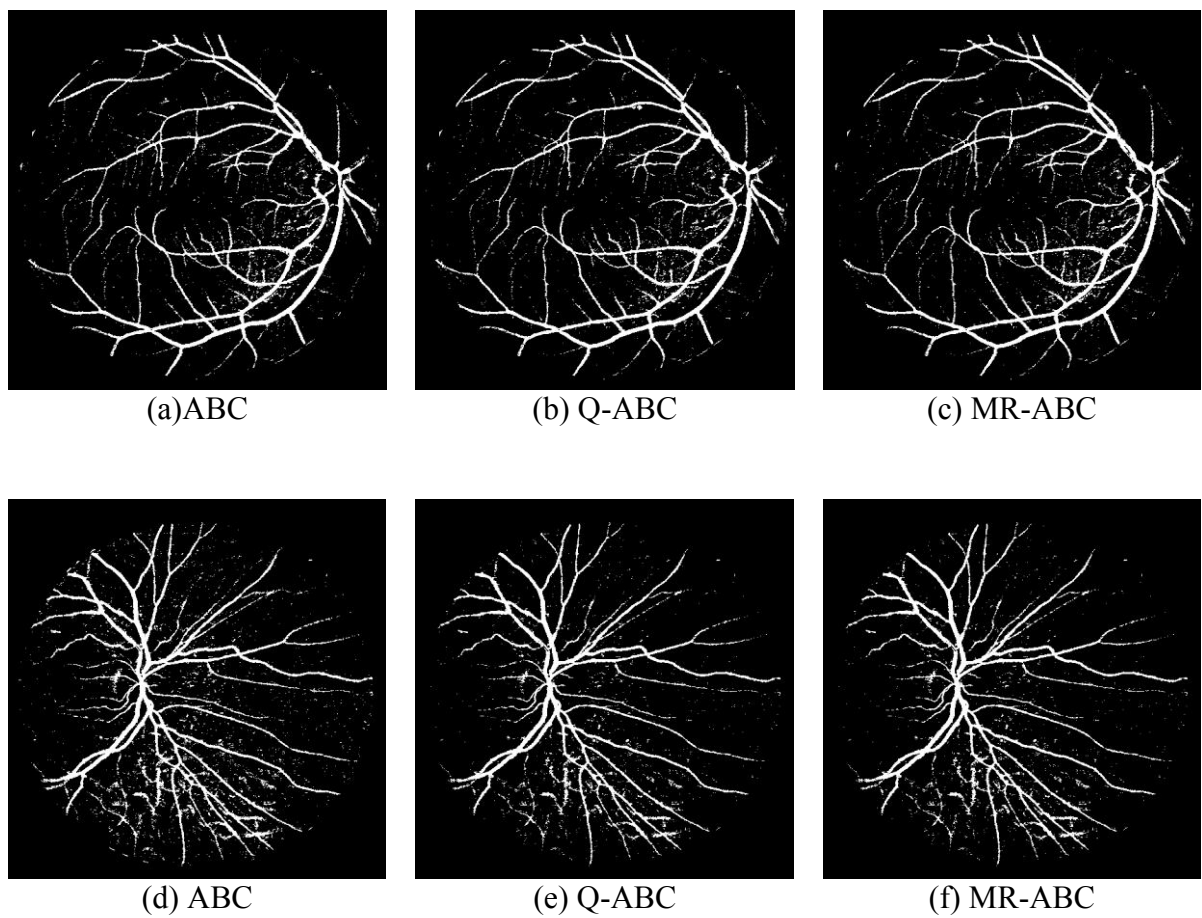


Figure 4. Retinal images obtained after applying segmentation to the images Figures 1 (a) and (b) by using the clustering based ABC, Q-ABC and MR-ABC algorithms.

Table 2. The expressions of the statistical measures used in the simulations.

Measure	Description
<i>Se (Sensitivity)</i>	$TP / (TP + FN)$
<i>Sp (Specificity)</i>	$TN / (TN + FP)$
<i>Acc (Accuracy)</i>	$(TP + TN) / (TP + FN + TN + FP)$

The true positive (TP) describes the number of correctly classified vessel pixels. The true negatives (TN) are the correctly classified background pixels and they can be considered as non-vessel pixels. The false positive (FP) represents the number of background pixels which are incorrectly classified as vessel pixels. The false negatives (FN) are the pixels which are actually vessel pixels but have been detected as background pixels. So the sensitivity (Se) is the ratio of correctly classified vessel pixels while specificity (Sp) is the ratio of correctly classified background pixels and accuracy (Acc) is the ratio of correctly classified both the vessels and background pixels.

**3.2. Performance analysis**

The simulations are realized on 20 retinal images taken from DRIVE database. The clustering performances of the algorithms are compared according to the statistical parameters of sensitivity, specificity and accuracy. The results obtained are given below with Table 3. From the results obtained for Se, it is seen that each algorithm is able to reach high performance in terms of the ratio of correctly classified vessel pixels. The Sp values reached represents that each algorithm can successfully distinguish the vessel pixels and background pixels. Finally, when the Acc values examined the results show that the ratio of correctly classified both the vessels and background pixels is very high for each algorithm. As seen from the results given in Table 3, although each algorithm produces similar results in terms of the mean values of the parameters, the MR-ABC has been performing the most successful clustering. In general, it can be said that the clustering performances of the ABC based algorithms are successful and close to each other.

Table 3. The performance measures of the 20 different images taken from DRIVE database.

Image	Sensitivity			Specificity			Accuracy		
	ABC	Quick ABC	MR ABC	ABC	Quick ABC	MR ABC	ABC	Quick ABC	MR ABC
1	0,8913	0,8913	0,8913	0,9884	0,9884	0,9884	0,9791	0,9791	0,9791
2	0,7857	0,7857	0,7857	0,9703	0,9703	0,9703	0,9479	0,9479	0,9479
3	0,8787	0,8787	0,8787	0,9867	0,9867	0,9867	0,9760	0,9760	0,9760
4	0,7230	0,7003	0,7520	0,9645	0,9605	0,9693	0,9371	0,9303	0,9454
5	0,9514	0,9514	0,9514	0,9955	0,9955	0,9955	0,9918	0,9918	0,9918
6	0,9572	0,9572	0,9572	0,9954	0,9954	0,9954	0,9917	0,9917	0,9917
7	0,8874	0,9593	0,9593	0,9903	0,9967	0,9967	0,9822	0,9940	0,9940
8	0,5506	0,5506	0,5506	0,9449	0,9449	0,9449	0,9019	0,9019	0,9019
9	0,7818	0,7818	0,7818	0,9761	0,9761	0,9761	0,9568	0,9568	0,9568
10	0,8932	0,8932	0,8932	0,9908	0,9908	0,9908	0,9831	0,9831	0,9831
11	0,7870	0,7870	0,8363	0,9760	0,9760	0,9825	0,9569	0,9569	0,9685
12	0,6624	0,8609	0,6624	0,9574	0,9861	0,9574	0,9243	0,9747	0,9243
13	0,7407	0,7992	0,7992	0,9621	0,9725	0,9725	0,9338	0,9516	0,9516
14	0,7439	0,7439	0,7439	0,9730	0,9730	0,9730	0,9511	0,9511	0,9511
15	0,8966	0,9440	0,9444	0,9908	0,9953	0,9953	0,9831	0,9913	0,9913
16	0,8387	0,8387	0,8387	0,9824	0,9824	0,9824	0,9683	0,9683	0,9683
17	0,7017	0,7017	0,8740	0,9672	0,9672	0,9886	0,9409	0,9409	0,9971
18	0,8972	0,8972	0,8972	0,9885	0,9885	0,9885	0,9794	0,9794	0,9794
19	0,8161	0,8161	0,8161	0,9758	0,9758	0,9758	0,9572	0,9572	0,9572
20	0,7477	0,9646	0,9646	0,9967	0,9963	0,9963	0,9412	0,9933	0,9933
<b>Mean</b>	<b>0,8066</b>	<b>0,8351</b>	<b>0,8389</b>	<b>0,9786</b>	<b>0,9809</b>	<b>0,9813</b>	<b>0,9591</b>	<b>0,9658</b>	<b>0,9674</b>

Another important performance criterion for heuristic algorithms is the standard deviation which determines the stability of the algorithm. The low standard deviation indicates that the algorithm approximates similar error values at each random run. Finally, the performances of the algorithms in terms of the CPU-time which represents the elapsed time in seconds to complete all cycles have been analyzed and compared. In Table 4, minimum MSE, standard deviation and CPU-time values obtained after 20 random runs for each algorithm have been given. A bit better standard deviation value obtained for MR-ABC proves that it is a little more stable in terms of clustering when compared to ABC and Q-ABC algorithms. On the other hand, from the minimum MSE values reached it can also be concluded that MR-ABC shows a bit better clustering performance than other two algorithms. The final performance metric analyzed in this section is the CPU-time. The hardware and software used in the simulations can be summarized as Intel i3 CPU with 2,13 GHz frequency, 3 GB RAM and 64 bit Windows 7 Ultimate. From CPU-time values obtained for the algorithms it is seen that MR-ABC is the slowest algorithm in terms of the time required in seconds.

Table 4. Performance comparison of ABC, Q-ABC and MR-ABC algorithms in terms of standart deviation, MSE and CPU-time values reached

Method	Minimum MSE	Standard Deviation	CPU-time (Seconds)
ABC	0,6145	0,281193844	30,81
Q-ABC	0,6417	0,222773107	30,40
MR-ABC	0,4696	0,16412588	31,74

In literature, there are several works [34-37] related to retinal vessel segmentation by using conventional gradient based algorithms. The statistical performances of these gradient based algorithms and ABC based heuristic algorithms have been compared in Table 5.

Table 5. Performance comparison of Gradient based and ABC based algorithms

Methods	Sensitivity	Specificity	Accuracy	
You et al. [34]	0,7410	0,9751	0,9434	
Imani et al. [35]	0,7524	0,9753	0,9523	
Mendonca et al. [36]	0,7344	0,9764	0,9452	
Azzopardi et al. [37]	0,7650	0,9700	0,9440	
Heuristic algorithms	ABC	0,8066	0,9786	0,9591
	Q-ABC	0,8351	0,9809	0,9658
	MR-ABC	0,8389	0,9813	0,9674

As seen from the table, ABC based heuristic algorithms have better performance than the classical approaches in terms of sensitivity. Especially, Q-ABC and MR-ABC algorithms improve the sensitivity of the clustering process. Although both the gradient based and ABC based algorithms produce similar specificity performances, it can be

said that ABC based heuristic algorithms have a bit better specificity performance. Finally, from the accuracy values obtained it can be concluded that the pixel classification performances of the ABC based heuristic methods are higher than or similar to the other methods in literature.

The convergence speeds obtained for the algorithms have been compared in Figure 5. As seen from the convergence figures, MR-ABC is reaching to the minimum error value at highest convergence rate. It is also seen that the Q-ABC algorithm produces better results than the ABC algorithm in terms of the MSE and convergence rate. In general, it can be concluded that the convergence speeds and MSE performances of the algorithms in terms of clustering is close to each other.

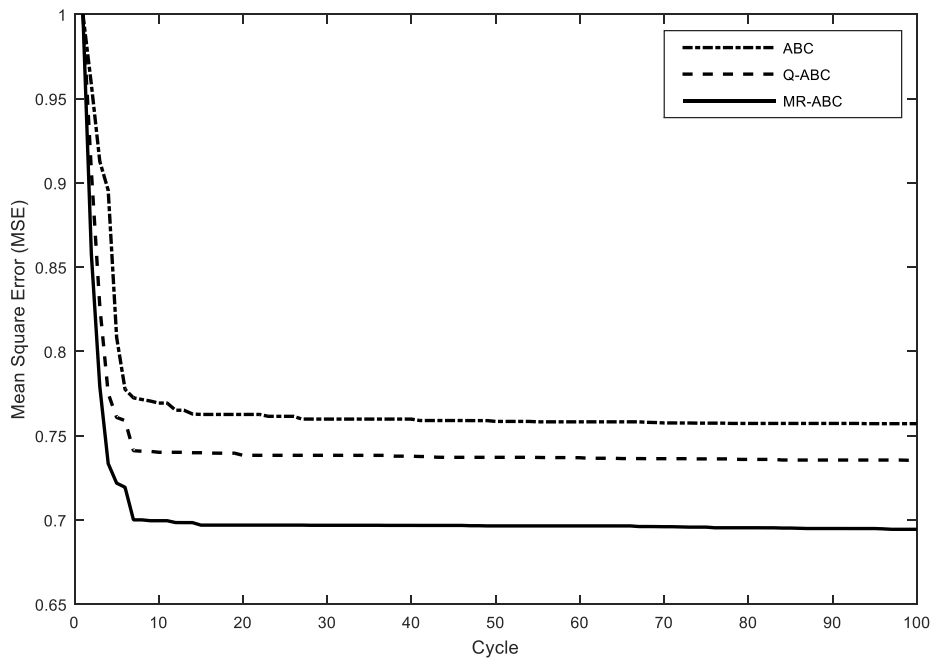


Figure 5. Performance comparison in terms of the convergence speeds

#### 4. Conclusion

In this work, novel approaches based on ABC, Q-ABC and MR-ABC algorithms for clustering based retinal vessel segmentation is described in the fundus fluorescein angiography retinal images. It is seen that the Q-ABC algorithm obtained by modifying the onlooker phase of ABC algorithm has a higher convergence speed and error performance than the ABC algorithm. Furthermore, the MR-ABC algorithm obtained by improving the process of producing neighbour solution in ABC algorithm has higher performance than the other two algorithms. Simulation results represent that each algorithm converges to the global solutions at similar cycles and the final MSE error values reached by the algorithms are close to each other. The statistical analyses based on the sensitivity, specificity and accuracy show that ABC, Q-ABC and MR-ABC algorithms can successfully be used in analyses of retinal images. When these statistical results are compared to that of conventional methods in literature, it is seen that ABC based approaches have similar but a bit better performance although their simple structure. On the other hand, since the standard deviation values of the MR-ABC

algorithm are lower than ABC and Q-ABC it can be concluded that MR-ABC is slightly more stable in terms of clustering based retinal vessel segmentation. As a result, ABC, Q-ABC and MR-ABC algorithms show similar performances in terms of clustering and they can successfully be used in retinal vessel segmentation.

## References

- [1] Uyen, T.V., Nguyen, A.B., Laurence, A.F.P. and Kotagiri, R., An effective retinal blood vessel segmentation method using multi-scale line detection, **Pattern Recognition**, 46, 3, 703–715, (2013).
- [2] Shuangling, W., Yilong, Y., Guibao, C., Benzhenq, W., Yuanjie, Z. and Gongping, Y., Hierarchical retinal blood vessel segmentation based on feature and ensemble learning, **Neurocomputing**, 149, Part B, 708–717, (2015).
- [3] Soares, J.V.B., Leandro, J.J.G., Cesar, J.R.M., Jelinek, H.F. and Cree, M.J., Retinal vessel segmentation using the 2-D Gabor wavelet and supervised classification, **IEEE Medical Imaging**, 25, 9, 1214–1222, (2006).
- [4] Frame, A.J., Undrill, P.E., Cree, M.J., Olson, J.A., McHardy, K.C., Sharp, P.F., et al., A comparison of computer based classification methods applied to the detection of microaneurysms in ophthalmic fluorescein angiograms, **Computers in Biology and Medicine**, 28, 3, 225–238, (1998).
- [5] Larsen, M., Godt, J., Larsen, N., Lund-Andersen, H., Sjølie, A.K., Agardh, E., et al., Automated detection of fundus photographic red lesions in diabetic retinopathy, **Invest Ophthalmol Visual Science**, 44, 2, 761–766, (2003).
- [6] Zana, F. and Klein, J.C., Segmentation of vessel-like patterns using mathematical morphology and curvature evaluation, **IEEE Transaction on Image Processing**, 10, 7, 1010–1019, (2001).
- [7] Jiang, X. and Mojon, D., Adaptive local thresholding by verification based multi threshold probing with application to vessel detection in retinal images, **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 25, 1, 131–137, (2003).
- [8] Mendonca, A.M. and Campilho, A., Segmentation of retinal blood vessels by combining the detection of centerlines and morphological reconstruction, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 25, 9, 1200–1213, (2006).
- [9] Chaudhuri, S., Chatterjee, S., Katz, N., Nelson, M. and Goldbaum, M., Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 8, 3, 263–269, (1989).
- [10] Hoover, A., Kouznetsova, V. and Goldbaum, M., Locating blood vessels in retinal images by piecewise threshold probing of a matched filter response, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 19, 3, 203–210, (2000).
- [11] Ng, J., Clay, S.T., Barman, S.A., Fielder, A.R., Moseley, M.J., Parker, K.H. and Paterson, C., Maximum likelihood estimation of vessel parameters from scale space analysis, **Image and Vision Computing**, 28, 1, 55–63, (2010).
- [12] Zhang, B., Zhang, L. and Karray, F., Retinal vessel extraction by matched filter with first-order derivative of Gaussian, **Computers in Biology and Medicine**, 40, 4, 438–445, (2010).
- [13] Narasimha-Iyer, H., Mahadevan, V., Beach, J.M. and Roysam, B., Improved detection of the central reflex in retinal vessels using a generalized dual-Gaussian model and robust hypothesis testing, **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**, 12, 3, 406–410, (2008).



- [14] Bankhead, P., Scholfield, C.N., McGeown, J.G. and Curties, T.M., Fast retinal vessel detection and measurement using wavelets and edge location refinement, **PLoS One**, 7, 3, e32435, (2012).
- [15] Zhou, L., Rzeszotarsk, M.S., Singerman, L.J. and Chokreff, J.M., The detection and quantification of retinopathy using digital angiograms, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 13, 4, 619–626, (1994).
- [16] Delibasis, K.K., Kechriniotis, A.I., Tsonos, C. and Assimakis, N., Automatic model based tracing algorithm for vessel segmentation and diameter estimation, **Computational Methods and Programs in Biomedicine**, 100, 2, 108-122, (2010).
- [17] Adel, M., Moussaoui, A., Rasigni, M., Bourennane, S. and Hamami, L., Statistical-based tracking technique for linear structures detection: application to vessel segmentation in medical images, **IEEE Signal Processing Letters**, 17, 6, 555–558, (2010).
- [18] Vlachos, M. and Dermatas, E., Multi-scale retinal vessel segmentation using line tracking, **Computerized Medical Imaging and Graphics**, 34, 3, 213–227, (2010).
- [19] Perfetti, R., Ricci, E., Casali, D. and Costantini, G., Cellular neural networks with virtual template expansion for retinal vessel segmentation, **IEEE Transactions on Circuits and Systems II**, 54, 2, 141–145, (2007).
- [20] Fathi, A. and Naghsh-Nilchi, A.R., General rotation-invariant local binary patterns operator with application to blood vessel detection in retinal images, **Pattern Analysis and Applications**, 17, 1, 69-81, (2014).
- [21] Marin, D., Aquino, A., Gegúndez-Arias, M.E. and Bravo, J.M., A new supervised method for blood vessel segmentation in retinal images by using gray-level and moment invariants-based features, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 30, 1, 146-158, (2011).
- [22] Staal, J.J., Abramoff, M.D., Niemeijer, M., Viergever, M.A. and VanGinneken, B., Ridge based vessel segmentation in color images of the retina, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 23, 4, 501–509, (2004).
- [23] Ricci, E. and Perfetti, R., Retinal blood vessel segmentation using line operators and support vector classification, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 26, 10, 1357–1365, (2007).
- [24] You, X., Peng, Q., Yaun, Y., Cheng, Y. and Lei, J., Segmentation of retinal blood vessels using the radial projection and semi-supervised approach, **Pattern Recognition**, 44, (11-10), 2314-2324, (2011).
- [25] Garg, S., Sivaswamy, J. and Chandra, S., Unsupervised curvature-based retinal vessel segmentation, **Proceedings of the IEEE International Symposium on Bio-Medical Imaging: From Nano to Macro**, 344–347, Hyderabad, (2007).
- [26] Palomera-Perez, M.A., Martinez-Perez, M.E., Benitez-Perez, H. and Ortega-Arjona, J.L, Parallel multiscale feature extraction and region growing: application in retinal blood vessel detection, **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**, 14, 2, 500–506, (2010).
- [27] Martinez-Perez, M.E., Hughes, A.D., Thom, S.A., Bharath, A.A. and Parker, K.H., Segmentation of blood vessels from red-free and fluorescein retinal images, **Medical Image Analysis**, 11, 1, 47–61, (2007).
- [28] Xu, X., Niemeijer, M., Song, Q., Sonka, M., Garvin, M.K., Reinhardt, J.M., et al., Vessel boundary delineation on fundus images using graph based approach, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 30, 6, 1184–1191, (2011).

- [29] Walter, T., Massin, P., Erginay, A., Ordonez, R., Jeulin, C. and Klein, J.C., Automatic detection of microaneurysms in color fundus images, **Medical Image Analysis**, 11, 6, 555-566, (2007).
- [30] Hassanien, A.E., Emary, E. and Zawbaa, H.M., Retinal blood vessel localization approach based on bee colony swarm optimization, fuzzy c-means and pattern search, **Journal of Visual Communication and Image Representation**, 31, 186-196, (2015).
- [31] Karaboga, D., An idea based on honey bee swar for numerical optimization, Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Kayseri, (2005).
- [32] Karaboga, D. and Gorkemli, B., A quick artificial bee colony (qABC) algorithm and its performance on optimization problems, **Applied Soft Computing**, 23, 227–238, (2014).
- [33] Karaboga, D. and Basturk, B., Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems, **LNCS: Advances in Soft Computing: Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing**, 4529,789-798, (2007).
- [34] You X, Peng Q, Yaun Y, Cheng Y, Lei J. Segmentation of retinal blood vessels using the radial projection and semi-supervised approach, **Pattern Recognition**, 44, 10, 2314-2324, (2011).
- [35] Imani E, Javidi M, Pourreza HR. Improvement of retinal blood vessel detection using morphological component analysis, **Computer Methods and Programs in Biomed**, 118, 3, 263–279, (2015).
- [36] Mendonca AM, Campilho A. Segmentation of retinal blood vessels by combining the detection of centerlines and morphological reconstruction, **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 25, 9, 1200–1213, (2006).
- [37] Azzopardi G, Strisciuglio N, Vento M, Petkov N. Trainable COSFIRE filters for vessel delineation with application to retinal images, **Medical Image Analysis**, 19, 1, 46-57, (2015).

# İnşaat mühendislerinin kariyer planlamaları üzerine bir araştırma

**Fehmi ÇİVİCİ\***

*Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çağış kampüsü, Balıkesir*

*Geliş Tarihi (Received Date): 11.01.2021  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.05.2021*

## Öz

*Fransızcadan dilimize geçen kariyer kelimesi; bir hedefe varmak için yürünen yol, başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki süreçtir. Bir başka deyişle; kişinin kendisini gelecekte nerede görmek istediğinin planlamasını yapmasıdır. Belirlenen hedefe ulaşma söz konusu sürecin doğru ve etkin bir şekilde yönetilmesiyle mümkündür. Bu olgu kariyer planlaması olarak bilinir. Mühendislik alanında çalışacak bireylerin iyi eğitim almış, iyi dil bilen, vizyonu yüksek ve ekip çalışmasına yatkın olma yeteneğine sahip olması gerekir. Çalışmada, BAUN, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun olup çalışma hayatına atılan iki yüz elli bireye Covid-19 pandemi süreci koşullarına bağlı olarak e-posta ile anket formu gönderilmiştir. Demografik yapı özellikleri çalışmada verilmiş yüz mezun katılımcı anketi cevaplayarak geri dönüş yapmıştır. Mezunların kariyer planlamalarındaki sahip oldukları kariyer bilincinin ölçülmesi ve bu planı etkileyen etmenlerin hangi oranda yer aldığı belirlenip, mezunların gelecekte nerede olmak istersiniz sorusuna verdikleri cevapların ışığında değerlendirilmesi yapılmıştır. Elde edilen verilere dayanarak; inşaat mühendisliği bölümü eğitimi, eğitimin sektörde uygulamadaki sorunları çözümedeki verimliliği, katılımcıların kariyer bilinçleri ve kariyer planlamalarındaki etkenler değerlendirilmiştir. Katılımcıların anket sorularına verdikleri cevaplardan elde edilen bulgular arasında; mesleki alanda kullanılan yazılımları öğrenme çabalarının büyük oranda kendi gayretleri ile olduğu, dil eğitiminin kariyerlerine katkısının önemi, meslek seçimlerinde önceden inşaat sektörü hakkında bilgi sahibi oldukları, mesleki gelişimi ile hedefledikleri kariyer basamaklarını aşacakları örnekleri göze çarpmaktadır. Çalışmanın İnşaat Mühendisliği Bölümlerinde hem okumakta olan öğrenciler hem de mezun durumundaki bireylerde kariyer bilinci farkındalığının oluşturulması ve kariyerlerini etkin bir şekilde planlamalarında/kariyer yönetiminde olumlu yönde yarar sağlayacağı düşünülmektedir.*

**Anahtar kelimeler:** *Kariyer, kariyer planlaması, inşaat mühendisliğinde kariyer.*

\* Fehmi ÇİVİCİ, fcivici@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-9957-1628>

## A research on the career planning of civil engineers

### Abstract

*The word career in French language; the path to reach a destination is the process between the start and end points. In other words; is to plan where the person wants to see him in the future. Achieving the specified goal is possible by managing the process in question correctly and effectively. This phenomenon is known as career planning. Individuals who will work in the field of engineering must have the ability to be well educated, fluent in the language, high vision and teamwork. In the study, a questionnaire form was sent by e-mail to two hundred and fifty individuals who graduated from BAUN, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering and started working life, depending on the conditions of the Covid-19 pandemic process. One hundred graduates, whose demographic structure features were given in the study, responded by answering the questionnaire. The career awareness of the graduates in their career planning was measured and the factors affecting this plan were determined and evaluated in the light of the answers given by the graduates to the question of where would you like to be in the future. Among the findings obtained from the answers given by the participants to the questionnaire questions; There are examples that the efforts to learn the software used in the professional field are largely through their own efforts, the importance of language education's contribution to their careers, they have knowledge about the construction sector in their career choices, and they will surpass the career steps they have targeted with their professional development. It is believed that the Civil Engineering Departments of the study will positively benefit both in the development of career awareness and career planning / career management for both graduate candidates and graduates.*

**Keywords:** Career, career planning, career in civil engineering.

### 1. Giriş

İnsanın geleceği ile alacağı kararlardan en önemlisi kariyeri ile ilgili olanlardır. İnsanlar, iş doyumunu sağlayabilecekleri, başarılı olacakları ve onları mutlu edeceğine inandıkları kariyer kararlarını okuldan işe geçiş dönemi olan yirmili yaşlarda vermektedirler [1]. Bu süreçte kariyer kararı yetkinliği yüksek olan kişilerin süreci yönetme başarılarının daha yüksek olduğu ve doğru kariyer seçimi yapabildikleri bilinmektedir.

Gelişen ekonomi ölçeğinde nitelikli çalışanlar ön plandadır. Bunu sağlayan; bu kişilerin kendilerine ait plan yapmaları ve bu plan doğrultusunda kendilerini geliştirmeleridir. Bir başka deyişle; kariyerlerine doğru yön vermeleridir.

Kariyer; insanların iş ve yaşam hedefleri tarafından yönlendirilen ve içinde çalıştıkları kurum tarafından yönetilen gelişim sürecindeki davranışları, tutumları ve duyguları içeren yaşam boyu süren bir çabadır [2]. Kariyer planlaması ve seçimi genelde üniversite mezuniyet aşamasında gündeme gelir. Ancak öğrenciler meslek seçimlerinde kariyerlerini hatta kariyer planlarını düşünmezler. Çoğunlukla kariyer planlaması mezuniyetten sonra başlar. Öğrencilerin kariyer planlama sürecinde birçok faktör

belirleyici olur. Bu faktörler; aile, yaş, cinsiyet, kişisel özellikler, yetenekler, yasal faktörler, sosyal faktörler ve eğitim kurumlarının etkisidir [2]. Öğrencilerin kariyer planlama sürecinde karşılaşılabilecekleri problemleri inceleyen çalışma azdır. Bu çalışma ile; inşaat mühendisliği bölümünden mezun bireylerin meslek seçimlerinde hangi unsurların etkisinin olduğu, ilgi alanlarının kariyer gelişimlerinin hangi dönemlerinde ön plana çıktığı, hedefi ile şu an buldukları konum arasındaki mesafenin boyutu ve bu hedefe ulaşırken ne tür izler bırakmak istedikleri ortaya konulmuştur. Bu çalışmanın, halihazırda öğrenimlerine devam eden öğrencilerin kariyer planlaması farkındalıklarını arttırmak ve mezun durumundaki bireylerin buldukları pozisyonlarına göre kariyer planlama hedefleri açısından bir değerlendirme yapma olanağı sağlayacağı düşünülmektedir.

## **2. İnşaat mühendisliği eğitimi alan bireylerin kariyer planlama süreçleri ve etki eden faktörler**

İnşaat Mühendisliği; yollar, köprüler, kanallar, barajlar ve binalar gibi işlerde dahil olmak üzere fiziksel ve doğal olarak inşa edilmiş ortamın tasarımı, yapımı ve bakımı ile ilgilenen profesyonel bir meslek disiplindir [3,4]. İnşaat sektörü; çok katılımcılı, dış çevreyle bağlantılı, insan odaklı ve ülke ekonomisine doğrudan katkı yapan lokomotif bir faaliyet alanıdır [5]. İnşaat mühendisliği birçok alt disiplini buldurmakla birlikte sektörel alanı oldukça geniştir. İnşaat sektöründeki yoğun iş imkanı, her yıl pek çok öğrencinin inşaat mühendisliği bölümünü seçmesinde önemli rol oynamaktadır[6].

Orijini Eski Mısır İndus vadisi uygarlığı ve Mezopotamya'da insanların göçebe yaşamdan vazgeçerek barınma ihtiyaçlarını karşılamak adına barınakların yapımına dayanmaktadır [7]. Sonrasında Mısır'da Piramitlerin yapımıyla devam eden süreç teknoloji ve malzeme bilimindeki gelişmeler doğrultusunda günümüzde gökdelenlerin, su altı tüp yapıların, barajların, otoyolların, nükleer santrallerin inşası ile altın çağını yaşamaktadır. Bu süreçte iyi kariyerli inşaat mühendislerinin aldığı rol önemlidir. Bu projelerde görev almalarını destekleyen; aldıkları eğitimin yeterliliği ile birlikte kariyerlerini iyi yönetebilmeleridir.

İnşaat Mühendisliği Eğitimi; ABD'de 1800'lü yıllarda kolejde başlamış daha sonra ilk mezuniyet derecesi 1835 yılında Rensselaer Politeknik Enstitüsü tarafından verilmiştir [8]. Ülkemizdeki varlığı ise; 1727 yılında Damat İbrahim Paşa tarafından açılan İTÜ İnşaat Fakültesinin başlangıcı olarak kabul edilen Humbarhane kurumu ile başlar [9]. Bugün inşaat mühendisliği bölümleri, 110' u devlet, 102'si vakıf ve 7'si Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde olmak üzere üniversitelerimizde örgün ve ikinci öğretim vb. programlarda eğitim ve öğretim hizmeti vermektedir [10]. Eğitim programlarının çıktısı olan mezunların sayıca fazlalığı istihdam problemlerini doğurmaktadır. Bu durumda; öğrencilik döneminde alınan eğitimin yeterliliği ve kariyer planlamasının doğru yapılması önemli etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir başka açıdan söylenmek istenirse; eğitim aşamasında kariyer basamaklarını etkin planlayan mezunlar istihdam durumunda avantajlı olabilmektedirler. Peki doğru kariyer planlaması nasıl yapılır ve kariyer planlamasında karşılaşılabileceğimiz engeller nelerdir? Kariyerin iki temel boyutu vardır; ilki kariyer planı yapacak bireyin bunu özümsemesi; diğeri iş ve çalışma hayatında yerini belirleme, ileride nerede olmak isteyeceğini planlamasıdır. Kariyer planlama aslında bir süreçtir. Bu planlama eğitimini bitiren bireyin işe başlangıç dönemi sonrasında bağımsız davranabileceği yeterli deneyime sahip olması, sorumluluk

üstlenmesi, iş hayatında yükselmesi ve yaşa bağlı olarak geri çekilme ile birlikte emeklilik dönemini kapsar [11]. Bu süreçte bölüm mezunlarının yaşayabileceği temel sorunlara bağlı kariyer planlarını etkileyen etmenler; okulda almış oldukları eğitimin sektördeki karşılığının yetersizliği, inşaat mühendisliği eğitimi veren fakülte sayısının fazlalığı doğrultusunda fazla mezun sayısı, eğitimci kişilerin/akademisyenlerin yeterliliği, mesleki örgütsüzlük, yabancı dil durumu, düşük ücretli iş veren vizyonsuz şirketler ve kendi özgüvenleri şeklinde ifade edilebilir [6,12].

### 3. Araştırma yöntemi

Mezunların kariyer planlamalarına yönelik verilerin toplanmasında anket yöntemi kullanılmıştır. Anket en genel tanımıyla cevaplandırıcının daha önce belirlenmiş bir sıralamada ve yapıda oluşturulan sorulara karşılık vermesiyle veri elde etme yöntemi olarak tanımlanabilir [13]. Bu çerçevede yapılmış olan çalışmalar; Janseen ve Chandler 'in [14] kariyer planlaması ile ilgili çalışması, İMO İnşaat Mühendisleri Eğitim Kurulu tarafından hazırlanan rapor [15] ve YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Mezun Anketi [16] dir. Bu kaynaklardan yararlanılarak soruların ve demografik bilgilerin yer aldığı anket formu geliştirilmiştir. Bu form Üniversitemiz etik kurulu onayı alınarak örneklemi temsil eden hemen ulaşılabilen %10 luk bir mezun grubu üzerinde uygulanmıştır. Daha sonra soruların anlaşılır olup olmadığı değerlendirilmesini yapılarak sanal ortamda e-posta yoluyla mezunlara ulaşılmıştır. Ankete katılıp geri dönüş yapan 100 katılımcı olmuştur. Katılımcıların demografik bilgileri tablo 1’de verilmiştir. Anket formu büyük çoğunluğu açık uçlu sorulardan oluşan 30 sorudan oluşmaktadır. Anket soruları hazırlanmadan önce literatür gözden geçirilerek katılımcıların profesyonel yaşamdaki donanımlarına ilişkin belirlenen yedi kriter tablo 2’de verilmiştir. Çalışmada, anket sorularının tamamını vermek yerine, soruları en iyi temsil eden belirlenmiş kriterler çatısında cevaplar değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Katılımcıların demografik yapısı.

Cinsiyet	Kadın		Erkek
		22	78
Mezuniyet yılı	1990 yılı öncesi	1990-2000 yılları arası	2000 yılı sonrası
	3	11	86
Çalışma alanı/sektör	Kamu		Özel(ofis/saha vd.)
	19		81

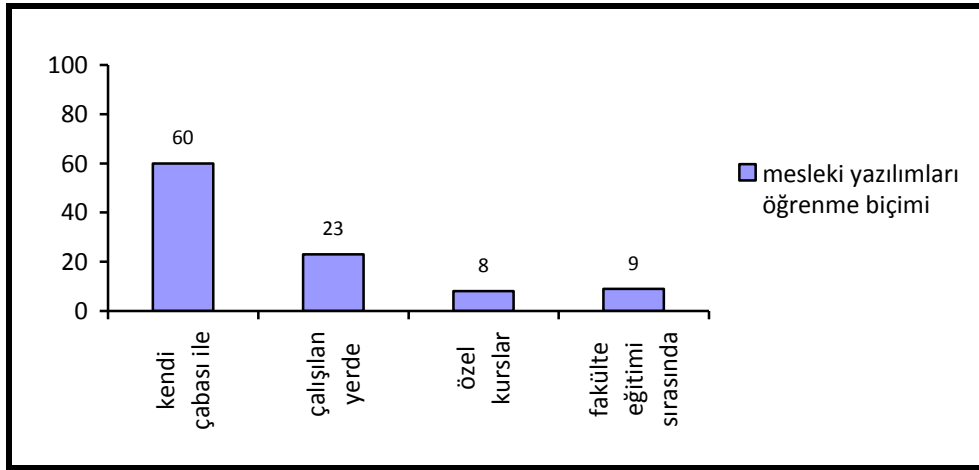
Tablo 2. Çalışmada kullanılan kriterler.

Kriter no	Kriter tanımı
1	Meslek icrasında kullanılan bilgisayar yazılımlarının hangi oranda olduğu, bu yazılımları nasıl öğrendikleri
2	Yabancı dilin meslekteki önemi, mevcut dil seviyelerini nasıl elde ettikleri
3	Mezun olmak için şart olan büro/şantiye stajlarının meslek hayatına katkıları
4	Almış oldukları mühendislik eğitiminin meslek icrası sahadaki yeterliliği
5	Son yıllarda üniversite öğrencileri arasında tercih belirlenmesinde inşaat mühendisliği bölümünün popülerliği ve kendilerinin bu eğitimi seçmeden önce farkındalıkları, bu eğitime yönlendirilmeleri
6	Kendilerini geliştirmek için kullandıkları yöntemler; seminer vb etkinliklere katılma, mesleki yayınları takip etme, mesleki bir konuda eğitim desteği
7	Mezunların mevcut pozisyonlarının değerlendirilmesi, hedefleri ve bu hedeflere ulaşmak için kullandıkları yöntemler

#### 4. Bulgular

Katılımcıların anket sorularına verdikleri cevaplar belirtilen yedi kriter açısından incelenmiştir.

Katılımcılara, kullanmakta olduğunuz mesleki bilgisayar yazılımlarını nasıl öğrendiniz? sorusunun cevabı olarak katılımcılardan 60'ı kendi çabasıyla, 23'ü çalıştığı yerde aldığı destek ile, 8'i özel kurslara giderek, 9'u ise fakülte eğitimi sırasında öğrendiklerini belirtmişlerdir (Şekil1). Bu soruyla ilişkili olarak katılımcılar bilgisayar yazılımlarını metraj/keşif, proje çizimi ve hak ediş işlerinde yoğun olarak kullandıklarını ifade etmişlerdir.



Şekil 1. Katılımcıların mühendislik yazılımlarını öğrenme yolları.

Katılımcılara hangi dil eğitimi aldıkları, almış oldukları dil eğitiminin mesleki katkısı ve inşaat mühendisliği eğitiminde yabancı dilin yeri konularında vermiş oldukları cevaplardan; büyük bir çoğunluğun İngilizce, Almanca dil eğitimi aldıkları görülmüştür. Bununla birlikte yurtdışı iş imkanları sebebiyle Rusça, Arapça dil eğitimi alanlar da olmuştur. Almış oldukları dil eğitiminin meslek icrasındaki katkısı olarak %60 ı olumlu, %40 ı olumsuz görüş vermişlerdir. Olumlu görüş verenler genelde; yabancı partnerler ile iletişimde, yabancı mesleki dergilerin takibinde ve lisansüstü eğitimleri sırasında faydalarını gördüklerini ifade etmişlerdir. İnşaat mühendisliği eğitiminde dilin yeri nedir? Sorusunun cevabı olarak; katılımcıların % 65'i eğitimin ana dilde olması, % 35'i ise yabancı dilde eğitim verilmeli demektedir. Ayrıca sadece meslek dersleri yabancı dilde verilsin ve sadece lisansüstü eğitim yabancı dilde olsun şeklinde görüşlerde mevcuttur.

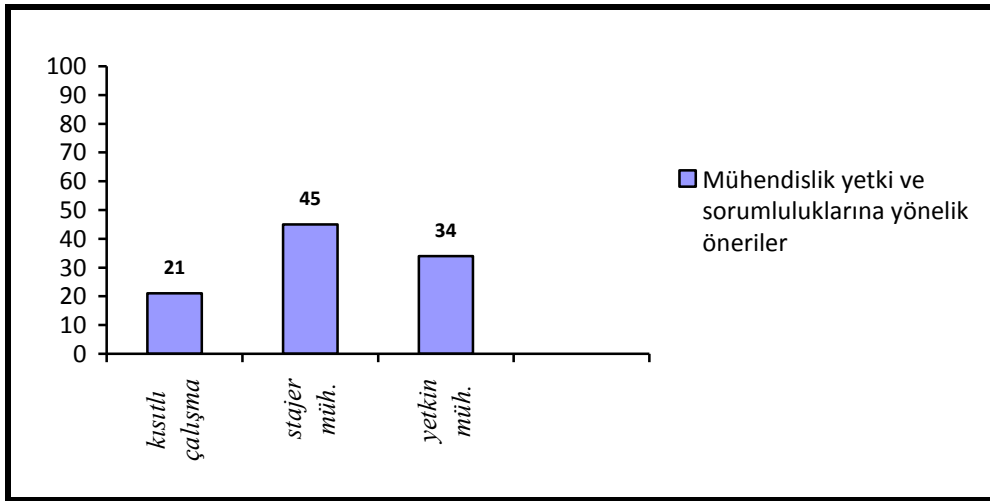
Öğrencilerin aldıkları teorik eğitiminin sahadaki karşılığını gördükleri büro/şantiye stajlarının meslek hayatında katkısı olmuş mudur? şeklindeki soruya cevaben; % 90'ı evet demiştir. İnşaat mühendisliği bölümünde 30 ar iş günü büro ve şantiye stajları zorunludur. Ayrıca stajlar meslek ile ilgili ilk tanışma alanlarıdır. Stajlar; adayın elde ettiği tecrübe ile sektörün hangi alanında çalışmak isteyeceğine karar vereceği; bir anlamda kariyer planlamasının bir evresini oluşturmaktadır. İş ortamı, işveren aktörlerini tanıma; mezuniyet sonrası istihdam açısından da olumlu bir süreçtir. Hatta katılımcıların birçoğu mezuniyet sonrası staj yaptıkları yerde çalışmaya başlamış olduklarını ifade etmişlerdir. Çok az katılımcının stajların verimli olmadığını

düşünmesi; araştırılmadan yanlış staj yeri seçiminden ve stajda sürekliliğin sağlanamamasından kaynaklandığı söylenebilir.

Katılımcıların almış oldukları mühendislik eğitiminin sahadaki karşılığı yeterli mi? ve eğitimin eksiklikleri nelerdir? soruları sorulmuştur. Katılımcıların %27 si teorik eğitimin uygulama da karşılığının yetmediğini, %21 i Yasa ve yönetmeliklerin yeterince anlatılmadığını ve %22 si güncel mesleki bilgisayar yazılımlarının anlatılmadığını belirtmiştir. İnşaat mühendisliği bölümleri son yıllarda artan kontenjanları ile dikkat çekmektedir. Kontenjan planlaması yapılırken fiziki imkanlar, öğretim üyesi sayısı, laboratuvar şartları vb. eğitimi doğrudan etkileyen faktörler dikkate alınmalıdır. Artan öğrenci sayısına bağlı olarak bölüm yeterlilikleri aynı oranda iyileştirilememektedir. Bu bağlamda bölümlerin akkreditasyon süreçlerinde de yeterlilikleri, yetenekleri ve mezunların kazanımları çok tartışılmaktadır.

Lisans eğitimini tamamlamak mühendislik yetki ve sorumluluklarını kullanmak için yeterli midir? Bu konudaki önerileri istenmiştir. Katılımcıların %88 si yeterli olmadığını söylemiştir. Katılımcıların; %21 i mezunların asgari deneyim elde edinceye kadar kısıtlı yetki ile çalışması, % 45 i belirli bir süre stajyer mühendis olarak çalışması ve %34 ü belirli bir süre sonunda elde edilen deneyim sonrası sınava girilerek yetkin mühendis ünvanının kazanılması şeklinde önerilerini sunmaktadırlar (Şekil 2). Ayrıca inşaat mühendisliği eğitim programlarının kalitesinin arttırılması ve kişisel gelişimlerin iyileştirilmesi ifade edilmektedir.

Adayların büyük çoğunluğu (%90) özel sektörde, diğerleri ise kendi işini kurmuş durumdadır. Ayrıca mezunların çok az oranı inşaat mühendisliği alanı ile birlikte ticaret amacıyla başka bir alanda faaliyet sürdürmektedir.

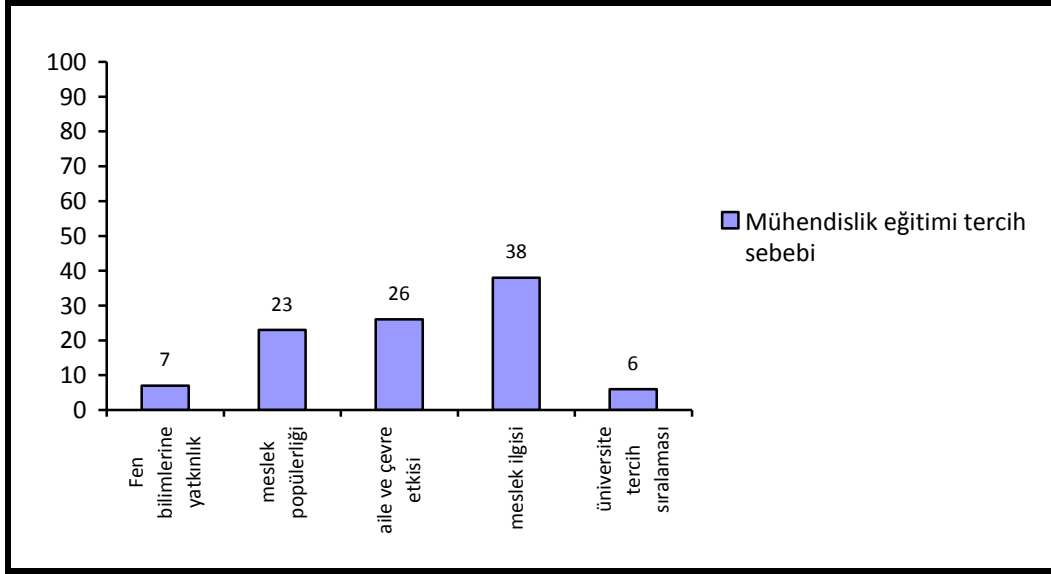


Şekil 2. Mühendislik yetki ve sorumluluklarının mezuniyet sonrası hemen kullanımı konusundaki öneriler.

Mezunların kariyer planlamaları sürecinin başlangıcı üniversite sınavına hazırlık aşamasındaki meslek seçimleri evresidir. Bu konuyla ilgili olarak inşaat mühendisliği eğitimi tercih sebepleri sorulmuştur. Katılımcıların %7 si fizik ve matematik alanına yatkınlıklarının, %23 ü popüler bir meslek dalı olmasının, %26 sı aileden gelen meslek geleneğinin, %38 i mesleğe karşı olan ilgilerinin ve %6 sı üniversite sıralamasının tercihlerinde etki ettiğini ifade etmiştir (Şekil3). Bu soruyla bağlantılı olarak meslek



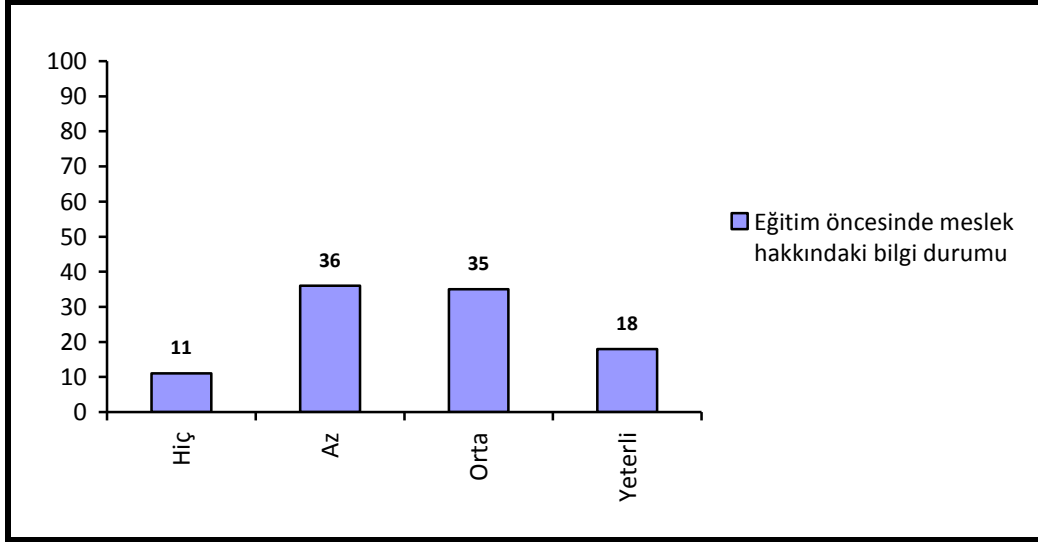
seçiminde aile ve çevrenizin yönlendirmesi var mıdır? sorusuna cevaben % 48'i evet demiştir.



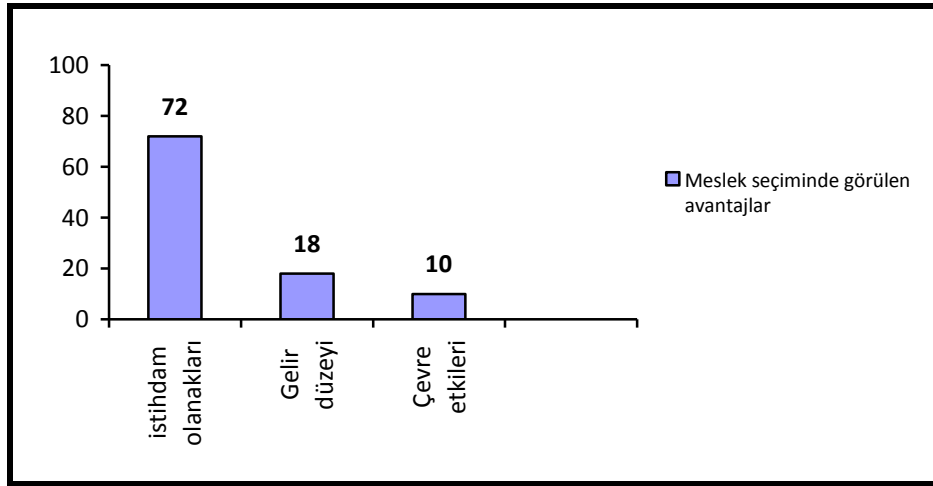
Şekil 3. Mühendislik eğitimi tercih sebebi.

Katılımcılara inşaat mühendisliği dışında farklı bir alanda eğitim görme isteğiniz var mıydı? Var ise; alan adı sorulmuştur. Mezunların %62 si hayır cevabı vermiştir. Evet diyenlerin %9'u mimarlık, %6'sı farklı mühendislik alanları, %3'ü tıp şeklinde oranlanmıştır. Büyük çoğunluğun kariyer planlama sürecinin şekillenmesinde inşaat mühendisliği yönünde kararlı olduklarını görmekteyiz. Bununla birlikte inşaat mühendisliği eğitimine başlamadan önce meslek hakkında bilgi durumları sorulmuştur. Alınan cevapların dökümü grafikte verilmiştir. (Şekil 4) katılımcıların meslek öncesi meslek hakkındaki bilgileri orta ve yeterli cevapları birlikte düşünülerek %53 dür. Katılımcıların meslek hakkındaki önceki ilgileri kariyer planlamalarında rol oynamıştır. Katılımcıların bu soruya verdikleri cevaplardan; mezuniyet sonrası meslek seçimlerinden ve meslek icrasından memnun olduklarını anlamaktayız.

Katılımcılara üniversite sınavları tercih aşamasında inşaat mühendisliği mesleğinin avantajları olarak neleri gördünüz? sorusu sorulmuştur. Alınan cevaplar doğrultusunda katılımcıların inşaat sektörünün lokomotif bir sektör olduğu, mezuniyet sonrası iş hacminin büyüklüğüne bağlı istihdam olanakları şeklinde cevaplandırılanlar %72 oranındadır. %18 i bu meslekten elde edebilecekleri kazanç miktarının önemli olduğunu ifade etmişlerdir. %10 luk kısım aile yönlendirmesi ve tercih formundaki kontenjan miktarı şeklinde görüş belirtmişlerdir (Şekil 5).



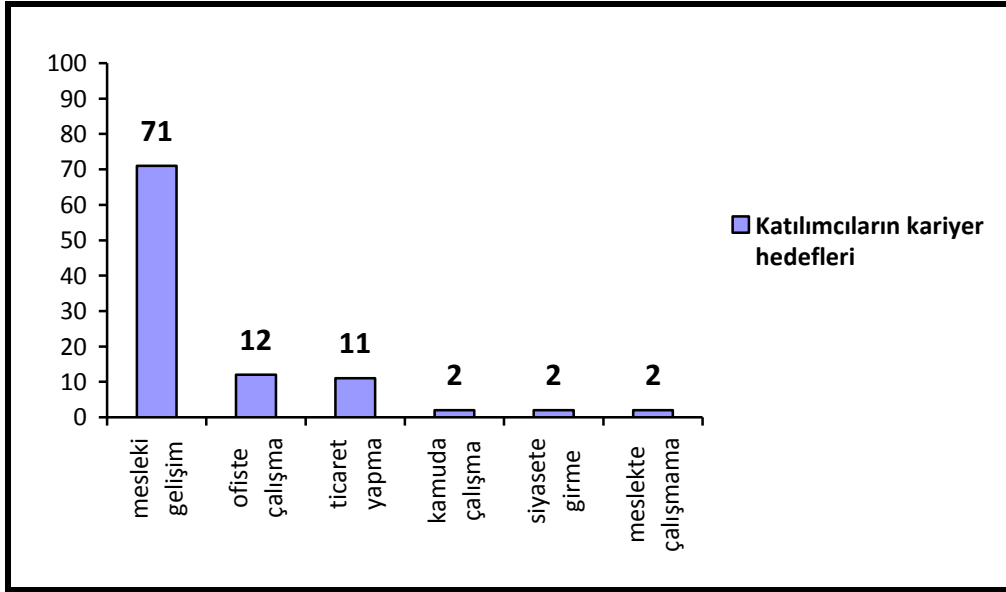
Şekil 4. Mühendislik eğitimi öncesinde meslek hakkındaki bilgi durumu.



Şekil 5. Meslek seçiminde görülen avantajlar.

Katılımcılara yöneltilen bir başka soru ise; kariyer planlamalarının bir aşaması olan ileride kendinizi nerede görmek istiyorsunuzdur? Katılımcıların %71'i meslekte kendini geliştirmek, %12'si kurumsal bir ofiste çalışmak, %11'i ticaret yapmak, %2'si devlet/kamuda çalışmak, %2'si siyaset alanında olmak, %2'side mühendislik yapmayacağım şeklinde cevap vermiştir(Şekil 6).

Katılımcıların büyük çoğunluğu lisansüstü eğitim desteği ile sahada tecrübeli proje mühendisleri olmak istediklerini belirtmişlerdir. Mesleki gelişim, farklı projelerde görev alma, kurumsal ofislerin yeteneklerinin, kariyerlerine olumlu etki edeceklerini düşünmektedirler.



Şekil 6. Katılımcıların kariyer hedefleri.

Katılımcılara mesleki alanda takip ettikleri süreli yayın, sempozyum, seminer, panel vb. etkinlikler sorulmuştur. Alınan cevaplar; katılımcıların %45'i seminer, sempozyum gibi İMO etkinliklerine katıldıklarını, %10'u mesleki dergileri takip ettiklerini, %7'si internet ortamından doküman inceleme yaptıkları, %38'i hiçbir şey yapmadıkları şeklindedir. Ancak mesleki anlamda gelişim için kendilerinden daha tecrübeli mühendisler ile paylaşımları olduğunu, bir kısmının lisansüstü eğitim ile destek aldıklarını söyleyebiliriz.

Katılımcılara birlikte çalıştığınız farklı meslek üyeleri ile iletişim bozukluğu, anlaşama mazlık yaşıyor musunuz? sorusuna verilen cevapların %85'i evet, %15'i hayır cevabı vermiştir. Evet cevabı verenler genelde farklı disiplinler arası, özellikle mimar ve belediyeler ile mesleki çatışma yaşadıklarını belirtmişlerdir.

Son olarak katılımcılara mezun olduğunuz bölümün ayrıcalıkları ve dezavantajları nelerdir? Bunları ifade eder misiniz şeklindeki sorunun cevabı; bölümün köklü olması, eğitim kalitesinin varlığı olarak avantajlarını, fiziki ve sosyal imkanların yetersizliği, dil eğitimi eksikliği ve teorinin uygulamada tıkanıp yeterli gelmediği şeklinde dezavantajlarını belirtmişlerdir. Bu olumsuzluklara rağmen çok çalışarak eksikliklerini giderip başarılı olduklarını ifade etmişlerdir.

## 5. Sonuçlar

Bireylerin yaşam öyküsünü aile yapısı, kişilerarası etkileşimler, tarihsel zaman, kültürel alt kimlikler, ekonomik nedenler oluşturmaktadır [17]. Bu çalışmada ele alınan bireyin kariyer gelişimi yaşam öyküsünde önemli bir evredir. Bu süreç; küçük yaşlardan başlayıp yaşadığı tecrübeler ışığında geleceğine yönelik planlamaları ve hedeflerine karar verdiği dönemlerdir. Bu çalışma ile katılımcılara gönderilen anket formundaki soruları, kendilerine hiçbir zorlama olmadan tamamen gönüllülük esasına dayalı olarak yanıtlamaları istenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ile inşaat mühendisliği bölümü mezunlarının kariyer gelişimlerine ait bakış açıları daha somut hale gelmiştir.

Kariyer planlama ve gelişimine; özellikle meslek seçiminde ebeveynlerin etkili olduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir [18]. Bu çalışma ile de katılımcıların meslek seçimlerinde aile ve çevrelerinde bulunan inşaat sektörü aktörlerinin yönlendirmede etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak kariyer gelişiminde aile etkisini ölçmenin; aile yapısında devam eden değişiklikler göz önüne alınarak yapıldığında teknik olarak zor olduğu bilinmektedir [18].

Mezunların kendini tanıma, iş ve meslek bilgisi, mesleki konuları takip etme, kariyer tercihi, planlama ve hedefleri konusunda yetkin oldukları araştırma da görülmüştür. Mezunların orta ve yeterli olarak verdikleri cevaplar birlikte düşünüldüğünde; %54 oranında inşaat mühendisliği mesleğine ve sektörüne uzak olmadıkları, daha önceden bilgilerinin var olduğu ölçülmüştür.

Geleceğin mühendisleri; çok dil konuşabilen, liderlik vasıfları olan, iyi eğitilmiş, takım çalışmasına yatkın kişiler olarak tanımlanabilir [19]. Bu tanımdaki yetenekleri ve yetkinliğe haiz mühendislerin varlığı kariyer gelişimleri sürecinin verimli bir şekilde yönetilmesi ile mümkün olacaktır. Kariyer gelişimine hem sosyal hem de iktisadi ve ekonomik faktörlerin etkisi bilinmektedir. Son günlerde dünyanın yaşadığı Covid-19 pandemi salgın süreci birçok alanda oluşan süreksizlikler sebebiyle bireylerin kariyer gelişimlerinde etkili olacağı beklenmektedir. Özellikle; inşaat sektörü gibi insan odaklı, dış çevre koşullarına bağlantılı, çok katımlı lokomotif vazifesi gören sektörlerin Covid-19 pandemi sürecinden önemli derecede etkilenmesi doğaldır. Bu anlamda kariyer planlaması yapan bireylerin bu süreçte dikkatli olması gerekir. Covid-19 pandemi salgın süreci dünya ülkelerinin ekonomik anlamda sıkıntılara götürmektedir. Dolayısı ile bireylerin mezuniyet sonrası istihdam hedeflerine yönelik gecikmeler, çalışanların mevcut durumlarını koruyabilme, sağlık sorunları vb. nedenler ile kariyer gelişimlerine ait dönemsel duraksamalar olabilir. Dünya çeşitli bedeller ödeyerek bu salgını bertaraf ettiğinde, bireylerin kariyer gelişimlerine olumsuz etki eden faktörler minimuma inecektir. Yapılan çalışmada; anket sorularını karşılayan yedi kritere bağlı elde edilen bulgulardan; mesleki gelişim sürecinin doğru ve verimli olması gerektiğini anlamaktayız. Katılımcıların, belirledikleri kariyer hedeflerine ulaşmada; yabancı dilin, yapılan stajların, bölümün eğitim-öğretim yeterliliğinin, mesleki alan seminerlerinin izlenmesinin olumlu bir etken olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın halen eğitim gören mühendis adayları için kariyer planlamaları ve kariyer hedeflerini belirleme konusunda farkındalık yaratacağı ve gelecek çalışmalarda ekonomik ve sosyal çevre açısından Covid-19 pandemi sürecine ait dönemsel kariyer gelişimin incelenmesi yapılabilir.

### **Teşekkür**

Anket çalışmasında görev alan İnş. Müh. Aslı Yılmaz ve İnş. Müh. Pelinsu Yüzer 'e teşekkür ederim.

### **Kaynaklar**

- [1] Ulaş, Ö., Yıldırım, İ., Kariyer Kararı Verme Yetkinliği Ölçeği'nin Geliştirilmesi, **Türk Psikolojik Danışma ve Rehberlik Dergisi**, 6(45), 77-90, 2016.
- [2] Sarıcı, S.H., Üniversite Öğrencilerinin Kariyer Planlama Faaliyetlerini Demografik Değişkenlere Göre İncelenmesi: Vaktif Üniversitesi Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Karatay Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya, (2020).

- [3] Joyner, J., Management Skills for Civil Engineer, erişim adresi: <https://work.chron.com/management-skills-civil-engineers-5882.html>.
- [4] Marino, G., Management Skills Crucial for Engineering Success, **The American Society of Mechanical Engineers**, December 28,2010.
- [5] Çivici, T., İnşaat Proje Organizasyonlarında Kişiler Arası Çatışma Çözüm Yaklaşımları ile Kişilik Özellikleri Arasındaki İlişki, **Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 34(3), 195-206, (2019).
- [6] Aydınli, S., Çelik, G.T., Bayram S., Oral, E., İnşaat Mühendisliği Öğrencilerinin Mesleki Beklentileri ve Kariyer Planları, **Yükseköğretim Dergisi**,10(1), 38-50, (2020)
- [7] History and Heritage of Civil Engineering, **ASCE**, retrieved 8 August 2007.
- [8] Griggs, Francis E Jr.,Amos Eaton was Right!, **Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice**, Vol. 123, No. 1, January 1997, pp. 30–34.
- [9] ITU. tarihçe,<http://insmuh.itu.edu.tr/hakkimizda/tarihce>, (02.01.2020).
- [10] Üniversitelerimiz, Yükseköğretim Program Atlası, <http://yokatlas.yok.gov.tr/universite.php>, (2020).
- [11] Uğurlu,P., Devlet ve Vakıf Üniversiteleri İşletme Lisans Öğrencilerinin Kariyer Bilinci ve Kariyer Planlama Konusundaki Farkındalıkları Üzerine Bir Değerlendirme, Yüksek Lisans Tezi, Ufuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, (2020).
- [12] Demir, K., İyi Bir Mühendislik Kariyerinin Önündeki 7 Engel, 21.03.2015, <https://tr.linkedin.com/pulse/türkiyede-inşaat-mühendisliği-kariyerinin-önündeki-demir-pmp-ccme>, (2020)
- [13] Altunışık, R. Coşkun, R. Bayraktaroğlu, S. Yıldırım, E., **Sosyal Bilimlerde AraştırmaYöntemleri**, Sakarya Yayıncılık, (2010).
- [14] Jansen E. & Chandler G. N., The Psychological contract between volunteers and not-for-profit organizations: A career perspective, Toward the 21 st century: Challenges For The Voluntary Sector. London Scholl of Economics, (1990).
- [15] İMO, Türkiye’de İnşaat Mühendisliği Eğitimine İnşaat Mühendisliği Bölümleri, İnşaat Mühendisliği Öğrencileri, İnşaat Mühendisleri ve İnşaat Sektörüyle Genel Bir Bakış Rapor (2017), <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/13848.pdf>
- [16] YTÜ, mezun anketi- İnşaat Mühendisliği Bölümündeki Eğitim Öğretim Faaliyetlerinin Mezunlarımıza kazandırdıkları Açısından Değerlendirilmesi, [http://www.inm.yildiz.edu.tr/images/files/Mezun\\_Anketi\\_sorulari.pdf](http://www.inm.yildiz.edu.tr/images/files/Mezun_Anketi_sorulari.pdf),(2020)
- [17] Kararırmak Ö., Bugay, Ö., Postmodern Diyalog: Öyküsel Psikolojik Danışma, **Türk Psikolojik Danışma ve Rehberlik Dergisi**. 4(33)24-36, (2010).
- [18] C. Chope, R., Qualitatively Assessing Family Influence in Career Decision Making”. **Journal of Career Assessment**. 395–414, (2005).
- [19] Pennoni, C.R., Managing Your Career In An Era Of Change, **Journal Of Professional Issues In Engineering Education And Practise**, July,1996.

# Confirmation of the experimentally measured cooling time of Polyethylene Terephthalate (PET) melt by ANSYS and FORTRAN

Bilal DEMİREL<sup>1,\*</sup>, Mustafa DANACI<sup>2</sup>, Fatih AKKURT<sup>3</sup>, Ali YARAŞ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Erciyes University, Department of Material Science and Engineering, Kayseri, Turkey

<sup>2</sup>Erciyes University, Department of Computer Engineering, Kayseri, Turkey.

<sup>3</sup>Gazi University, Department of Chemical Engineering, Ankara, Turkey.

<sup>4</sup>Bartın University, Department of Metallurgy and Material Engineering, Bartın, Turkey.

Geliş Tarihi (Received Date): 25.01.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.05.2021

## Abstract

*This study deals with confirmation of the experimentally measured cooling/solidification time of the Polyethylene Terephthalate (PET) melt by ANSYS and FORTRAN analysis programs. Therefore, a new code was written and run by using FORTRAN programming. With the ANSYS Thermal Transient module, cooling time and the injection conditions of PET into a cylindrical mold were simulated. Then, the experimental results and the analysis data were compared. It was determined that the results are in good agreement (100%) in case of heat capacity ( $C_p$ ) value is chosen depending on the temperature. The results show that the proposed new codes will contribute to the optimization of cooling/solidification time for industrial scale PET production.*

**Keywords:** Polyethylene Terephthalate (PET), solidification time, cooling time, FORTRAN, ANSYS.

---

\* Bilal DEMİREL, bilaldemirel@erciyes.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-5390-0630>  
Mustafa DANACI, danaci@erciyes.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-2430-6106>  
Fatih AKKURT, fatihakkurt@gazi.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3509-2246>  
Ali YARAŞ, aliyaras@bartin.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1725-7788>

# Polietilen Teraftalat (PET) eriyiğinin deneysel olarak ölçülen soğutma süresinin ANSYS ve FORTRAN tarafından doğrulanması

## Öz

*Bu çalışma, Polietilen Tereftalat (PET) eriyiğinin deneysel olarak ölçülen soğutma süresinin soğutma/katılma süresinin ANSYS ve FORTRAN analiz programları tarafından doğrulanması ile ilgilidir. Bunun için, FORTRAN programı kullanılarak, yeni bir kod yazıldı ve çalıştırıldı. ANSYS Thermal Transient modülü ile soğutma süresi ve PET'in silindirik kalıba enjeksiyon koşulları simüle edildi. Sonrasında, deneysel sonuçlar ve analiz verileri karşılaştırıldı. Isı kapasite ( $C_p$ ) değerinin sıcaklığa bağlı olarak seçilmesi durumunda sonuçların uyum içinde olduğu (%100) tespit edildi. Sonuçlar, önerilen yeni kodların endüstriyel ölçekte PET üretimi için soğutma/katılma süresinin optimizasyonuna katkıda bulunacağını göstermektedir.*

**Anahtar kelimeler:** Polietilen Teraftalat (PET), katılma süresi, soğutma zamanı, FORTRAN, ANSYS.

## 1. Introduction

The use of polymers such as PP, PET, PC, PMMA, PE, ABS, which are one of the most consumed materials in our daily life, is increasing day by day. The following four methods are generally preferred for processing polymers; injection, extrusion, blow moulding and rotational moulding. In the mentioned methods, the polymer is heated to its melting temperature to take the shape of the mould. The outer surface of the mould is cooled with cooling water under the glass transition temperature ( $T_g$ ) and the polymeric material is removed from the mould. The process parameters play a critical role on the physical and chemical properties of the produced polymeric material. One of these parameters is the residence time in the mould. If the product keeping time in the mould is too short, the product may be deformed while ejecting out of the mould. However, if the residence time is too long, both the production speed decreases and the energy cost increases. For optimum temperature for demoulding, the product surface temperature should be below  $T_g$ . The knowing the solidification temperature allows the on/off settings of the mould cooling water channels. The errors in the opening timing of the cooling channels cause the molten polymer to block the injection path and cause defective product to be produced because of insufficient cooling. Besides, material cooling time is a critical parameter to be known in machine efficiency calculations in injection moulding process. Although there are numerous experimental studies on the solidification/cooling time of polymers in injection moulding, differences between formulas used in calculations are remarkable. Stelson [1] calculated the cooling time according to the midplane and average temperature using the previous equations in literature. It was reported that most cooling time formulas for injection moulding contain errors, deviations occur for thin and thick materials. In recent years, a number of computer-based numerical models were improved for injection moulding process. However, due to simplicity and convenience, the closed form analytical expressions are still the preferred methods for calculating the cooling times in the initial process design and cost estimation [1]. Yu and Sunderland [2] and Liang and Ness [3] stated that several equations were used in the cooling time calculation

and this caused uncertainty. The cooling formulas of simple shapes such as spheres and cylinders are listed by Dietzel et al. [4] and Menges et al. [5]. They noted that the most commonly used formulas are for those with infinite width and finite thickness. The cooling time formulas for plates are generally as follows:

$$t_c = \frac{c_0 a^2}{\alpha} \ln \left[ c_1 \left( \frac{T_i - T_f}{T_e - T_f} \right) \right] \quad (1)$$

where  $t_c$  is the cooling time,  $a$  is the thickness,  $\alpha$  is the thermal diffusivity of the polymer,  $T_i$  is the initial temperature of the polymer melt,  $T_f$  is the mould temperature and  $T_e$  is the ejection temperature of the part. The heat detection temperature of the material is often taken as an acceptable value for  $T_e$  [1]. Equation (1) may be written in dimensionless form as follows:

$$F = c_0 \ln \left( \frac{c_1}{Y} \right) \quad (2)$$

where  $F = \left( \frac{t_c \alpha}{a^2} \right)$  is the dimensionless cooling time or Fourier number, and  $Y = \frac{T_e - T_f}{T_i - T_f}$  is the dimensionless ejection temperature [1]. The equation number 3 is a general and comprehensive one and was used as the basis for calculations in the present study. In this equation, the mould ( $T_f$ ) and polymer initial ( $T_i$ ) temperature are constant. It may be also assumed that thermal contact between the polymer and mould is perfect and thermal diffusivity of the cooling polymer is constant [6,7]:

$$\frac{T(y,t) - T_f}{T_i - T_f} = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1^n)}{(n+1/2)\pi} e^{(n+1/2)^2 \pi^2 a t / b^2} \cos \left( n + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi y}{b} \quad (3)$$

where  $T(y, t)$  is the temperature distribution within the polymer as a function of time,  $t$ , and position,  $y$ . The  $y$  axis has its origin at the mid-plane of the part, and  $b = a/2$  is the part half-thickness. In equation-3, the mold temperature ( $T_f$ ), PET temperature ( $T_i$ ) and  $\pi$  values were taken as 20°C, 260°C and 3.14, respectively. Thermal diffusivity ( $\alpha$ ) was calculated according to  $\alpha = \frac{\text{Thermal conductivity}}{\text{Density} \cdot C_p}$  equation. Thermal conductivity, density and  $C_p$  values for  $\alpha$  calculations were received as 0.225 W/ m.K, 1376 kg/m<sup>3</sup> and 816 J/kg.K, respectively.

$$T(y, t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4(T_i - T_f)}{\pi} e^{\pi^2 a t / a^2} \cos \frac{\pi y}{a} + T_f \quad (4)$$

$$t_c = \frac{a^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left[ \frac{4}{\pi} \left( \frac{T_i - T_f}{T_e - T_f} \right) \right] \quad (5)$$

$$t_c = \frac{a^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left[ \frac{8}{\pi^2} \left( \frac{T_i - T_f}{T_e - T_f} \right) \right] \quad (6)$$

Ballman and Shusman [8] state the cooling time equation as;

$$t_c = \frac{a^2}{2\pi \alpha} \ln \left[ \frac{\pi}{4} \left( \frac{T_e - T_f}{T_i - T_f} \right) \right] \quad (7)$$

It is essential to be known the cooling time for the effective cost analysis of the materials to be injection moulded. For this purpose, formulation that is basic but gives accurate result is required. The formulae derived so far contain some errors a certain extent.



Stelson has concluded that if the ejection criterion was based on mid-plane temperature, equation-5 was correct, but if the ejection criterion was based on average temperature, equation-6 was correct.

All other equations given in literature were investigated in reference [1] in detail. In each of them, thermal diffusivity was taken constant. However, this parameter depends on thermal heat capacity ( $C_p$ ).  $C_p$  value changes with the change of temperature. Therefore, the results for the above equations contain minor errors. That is why, to achieve more correct results,  $C_p$  value should be calculated for each temperature. To this end, in our calculations,  $C_p$  value was calculated for each temperature using FORTRAN programming.

Simulation and calculation methods were developed as a result of the theoretical and experimental studies carried out to determine the injection time. Some of the programs with commercial versions are; ANSYS, Moldflow, BlowView, BlowSim. However, it is not known exactly how well these programs are compatible with experimental data. In this study, it was aimed to write a code to obtain data on the cooling curve of PET. The obtained cooling curve data were compared with ANSYS results and experimental data. The number of studies on simulation of heating and cooling processes of injection moulded plastic materials is limited in literature. An automotive interior material's heating and cooling channels design and its evaluation in rapid heat cycle moulding were studied by Wang et al.[9]. Hassan et al. [10] reported that the design of the cooling system was not suitable for the minimum cooling time and caused non-uniform cooling throughout the mould. As for Li et al. [11], they have worked out about automatic layout design of cooling design of plastic parts to be injection moulded. Besides, the effect of the cooling system on the shrinkage and temperature of the moulded polymer injected into the cooling system was simulated by Li [12]. It was stated that the location of the cooling channels is important for the production of quality products and this greatly affects the final product temperature and shrinkage rate [12]. In another study, a simplified heat transfer model and equation for the calculation of cooling time in injection moulding is presented by Liang and Ness [3]. Bendada et al. [13] revealed that the thermal contact resistance between the mould and the polymer in injection moulding is not negligible, is related to processing conditions, and is not stable over time. Li and Li [14] analysed a plastic injection mould cooling system using the configuration space method. The accuracy of the formulas used in studies on the cooling time of polymers in injection moulding is a debatable issue. In addition, the number of studies on cooling time and solidification is also limited. In the present paper, equation number-3 was taken into consideration and the code written by FORTRAN programming was run. The injection of PET into a cylindrical mould and the cooling time were simulated using the ANSYS Thermal Transient module. Following that, the analysis results were compared with experimental data.

## 2. Experimental studies

### 2.1 Flow chart

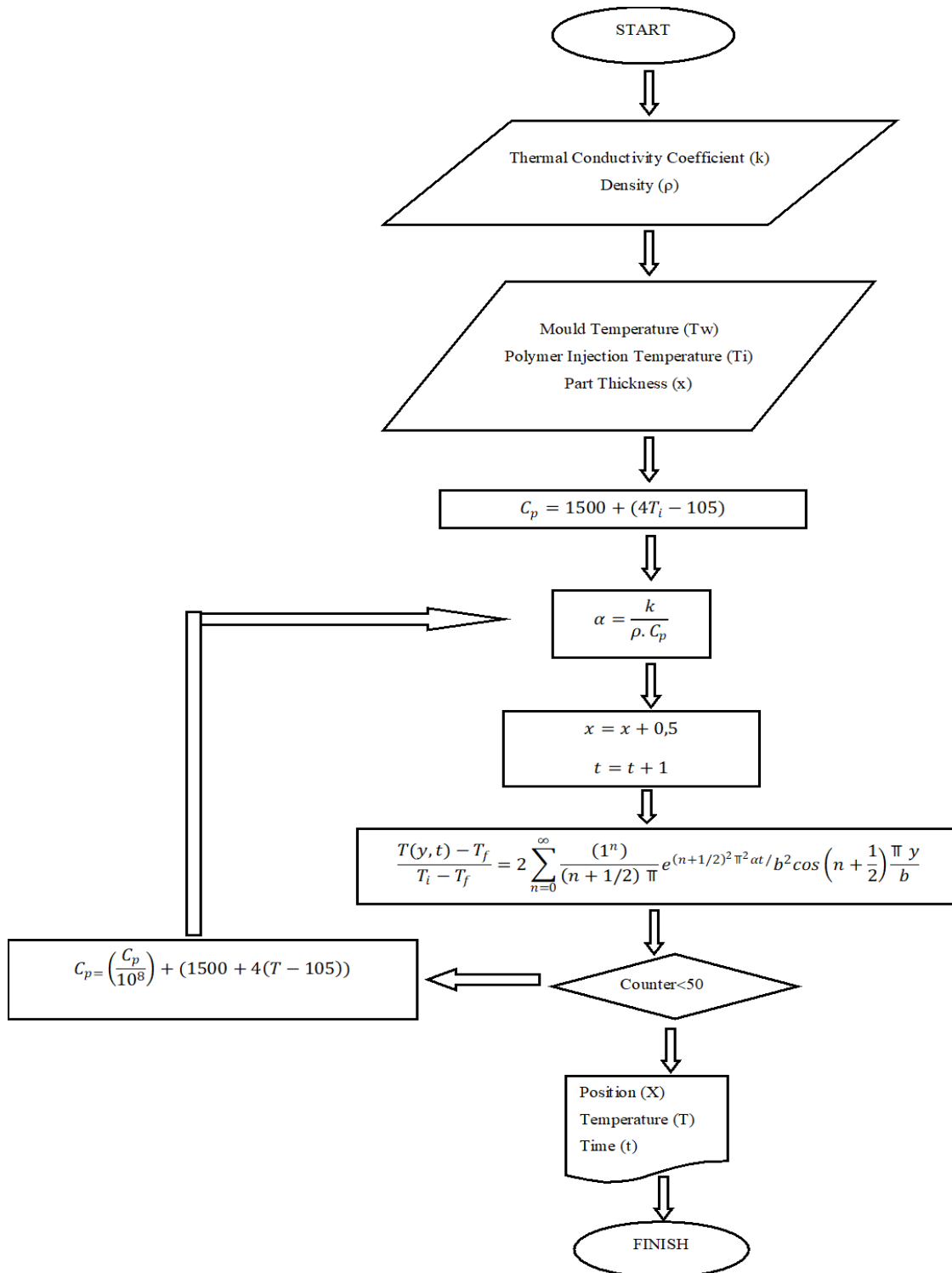


Figure 1. Algorithm used in writing code with FORTRAN.

The flow chart formed for the problem to be solved by a computer programming is given in Figure 1. As the  $C_p$  value of materials is dependent on temperature,  $C_p$  value of PET

was re-calculated in every cycle for changing temperature in this study. In every new calculation, a new value of the  $C_p$  was used corresponding to the related temperature.

### 2.2 Fortran code writing

FORTTRAN computer programming was used in the solution of the problem whose flow chart is given above. A small part of the written program is given below (pseudo code).

```

DO 40 X1=0,(X/2+0.01),0.4

L=L+1

FTOTAL=0

DIFF=TCOND/(DENSITY*CP)

DO 10 N=0,600

X2=(X*1E-3)/2

F1=(-1)**N/((N+(0.5))*PI)

F2=EXP(-1*(((N+(0.5))**2)*(PI**2)*DIFF*TIME)/(X2**2))

F3=(N+(0.5))*PI*((X1*1E-3)/X2)

F4=COS(F3)

FTOTAL1=F1*F2*F4

FTOTAL=FTOTAL+FTOTAL1

10 CONTINUE

IF (TIME.EQ.0)THEN

TEMP=TI

GOTO 90

```

Figure 2. Code written with FORTRAN for calculation of cooling time.

### 2.3 ANSYS analysis

Verification the results after processing the FORTRAN code given above was tested with the commercial version of the ANSYS Workbench program steady-state thermal module. Cylindrical mould design used in the experimental section of the study was drawn using Space-Claim Design Modeler and the analysis were carried out by the aforementioned program.

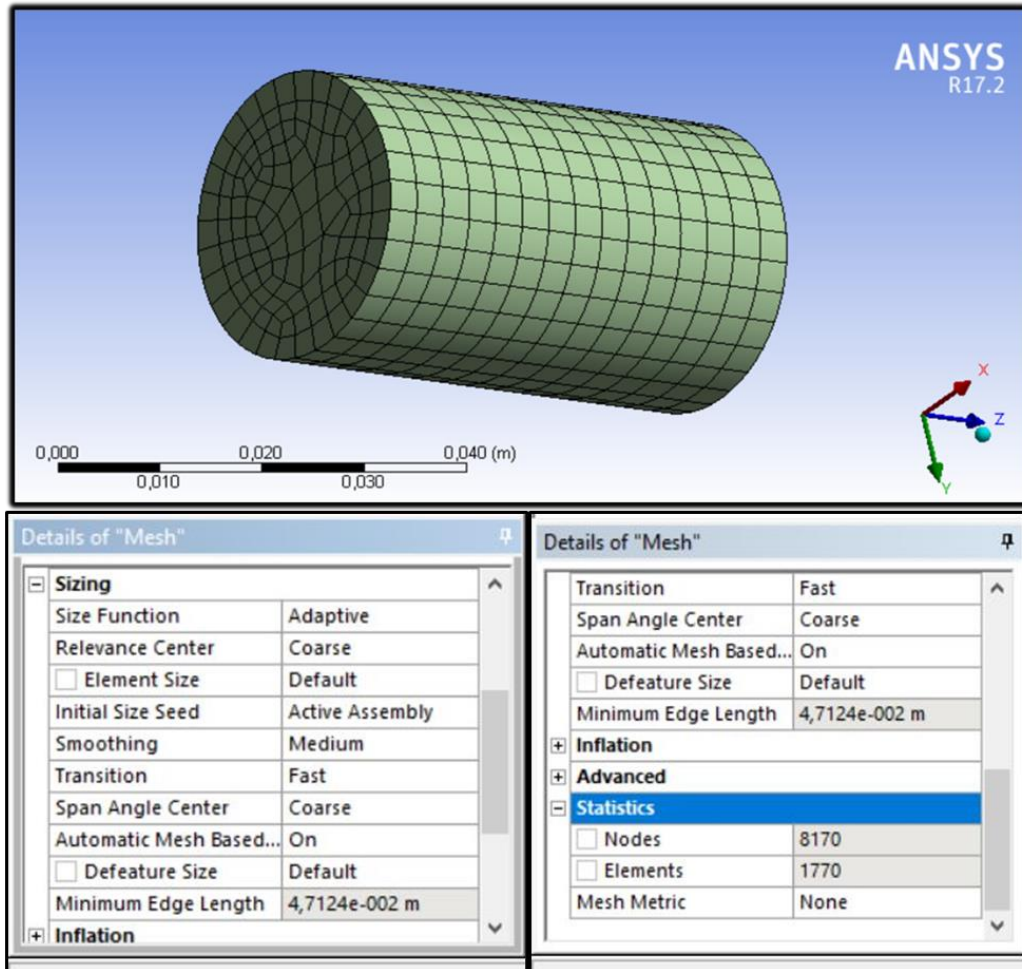


Figure 3. Mesh formed on the design with ANSYS Thermal Transient analysis.

In thermal analyses, injection temperature of the product inside the mould and the environment temperature were taken to be 260°C and 20°C, respectively. Due to the simplicity of the mould used in the study, coarse mesh type was selected. The mould and analysis application are shown in Figure 3.

#### 2.4 Practical application

In this study, a simple cylindrical tin mould with diameter of 30 mm and length of 100 mm was used. After filling the PET granules into the mould, the mould was placed in an oven to provide PET melt heating up to 260°C. To allow uniform temperature distribution in the mould, the PET melt was continuously stirred for a period of time. After obtaining a uniform temperature distribution, the mould was placed in a water bath with a constant temperature of 20°C to cool the PET melt and the temperature measurement was then performed with a wire thermometer from the centre of the mould depending on time. On the other hand, a second temperature control was provided by a thermal camera branded FLIR Thermal Camera.

### 3. Results and discussion

#### 3.1 FORTRAN programming results

Time-dependent temperature values taken from the centre of the cylindrical mould for PET sample are given in Table 1. Depending on the time, the temperature values of the points at a certain distance from the centre of the cylindrical part are given in Figure 4.

Table 1. Time-dependent temperature values taken from the centre of the mold.

No	Time (sec)	Temperature (°C)	No	Time (sec)	Temperature (°C)
1	0	260	11	300	210
2	30	258	12	330	202
3	60	258	13	360	194
4	90	257	14	390	187
5	120	255	15	420	180
6	150	248	16	450	173
7	180	242	17	480	165
8	210	235	18	510	158
9	240	227	19	540	150
10	270	219	20	570	145
			21	600	140

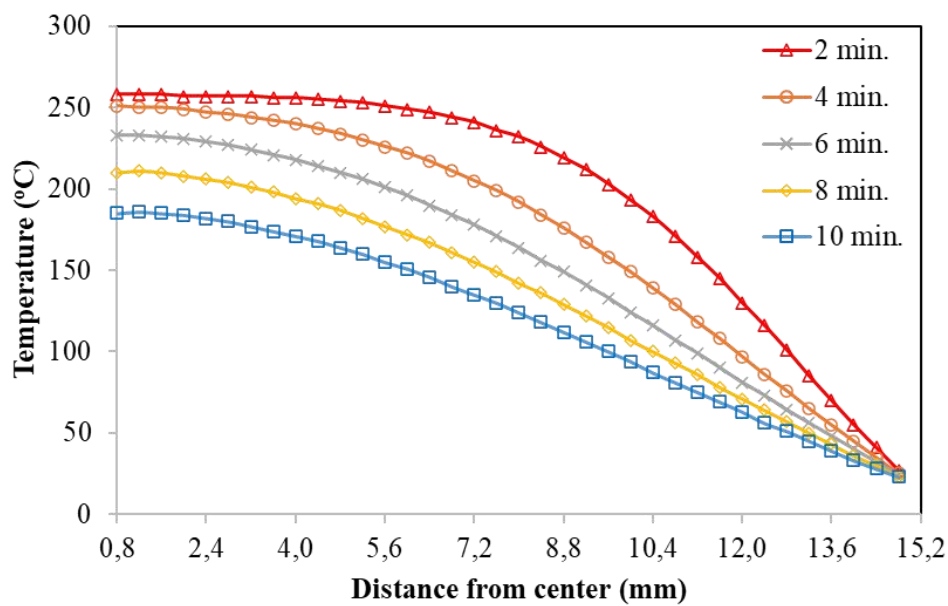


Figure 4. Temperature values at the certain distances from the centre of the part depending on time.

As seen from Figure 4, the temperature decreases as moving away from the centre of the part injected into mould, and at last reaches at mould surface temperature. On the other hand, the temperatures at the other points outside the centre of the part also decrease over time. According to the results, it is very difficult to produce a completely transparent material using PET. The parts contacting the surface of the mould will be transparent, but the centre of the part will turn into a crystalline structure due to the slow cooling.

### 3.2 ANSYS analysis results

Time-dependent temperature values taken from the centre of the cylindrical mold for PET sample are given in Table 2.

Table 2. Time-dependent temperature values taken from the centre of the mold.

No	Time (sec)	Temperature (°C)	No	Time (sec)	Temperature (°C)
1	0	260	11	300	220
2	30	258	12	330	212
3	60	258	13	360	220
4	90	257	14	390	196
5	120	257	15	420	188
6	150	251	16	450	181
7	180	247	17	480	173
8	210	241	18	510	166
9	240	234	19	540	157
10	270	227	20	570	152
			21	600	145

The results obtained by ANSYS Thermal Transient analysis method are given in Figure 5. As can be seen from Figure 5, while the regions near the centre of the part slowly cool down, the regions where the temperature is much lower will cool more rapidly, due to the equation-3 having an exponential factor.

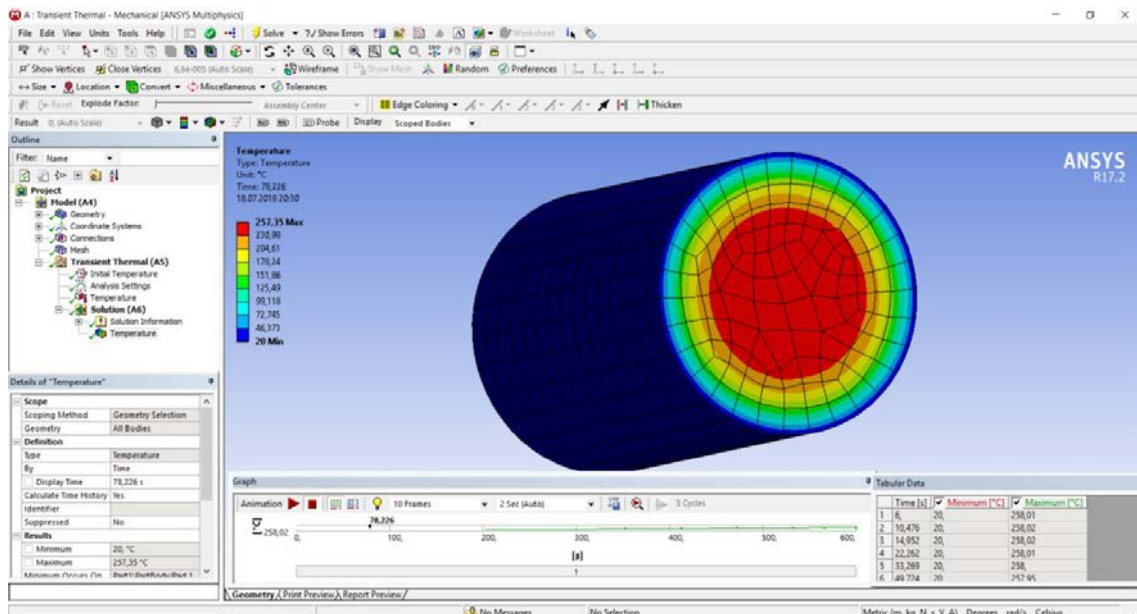


Figure 5. Screenshot for ANSYS thermal analysis.

### 3.3 Experimental test results

Time-dependent temperature values taken from the centre of the cylindrical mould for PET sample are given in Table 3. Temperature measurements have been carried out using thermal camera and wire thermometer. Measurements taken from different points by

thermal camera have been given in Figure 6. It is very important to adjust the thermal emission constant of the used thermal camera according to the material used to obtain the correct result.

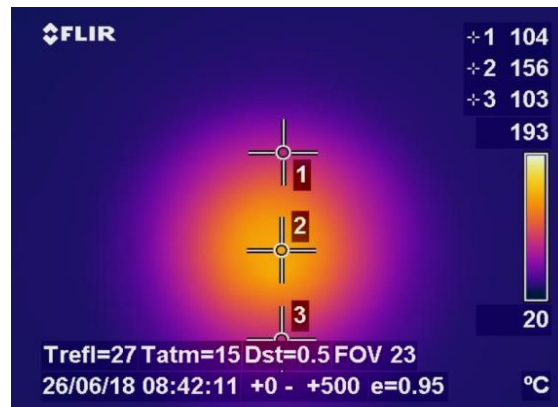


Figure 6. Measurement with the thermal camera used in the experiments.

Table 3. Time-dependent temperature values taken from the centre of the mold.

No	Time (sec)	Temperature (°C)	No	Time (sec)	Temperature (°C)
1	0	260	11	300	218
2	30	257	12	330	214
3	60	255	13	360	205
4	90	255	14	390	196
5	120	253	15	420	190
6	150	241	16	450	176
7	180	240	17	480	172
8	210	238	18	510	156
9	240	230	19	540	154
10	270	224	20	570	146
			21	600	144

### 3.4 Comparison of the studied three methods

The concentration point of the study carried out is the experimentally testing of the accuracy of both the commercially used ANSYS Transient Thermal analysis module and the theoretically derived equation. As seen in Figure 7, the values obtained by all three methods are in great agreement. However, it is seen that ANSYS values are slightly high, but this is too small.

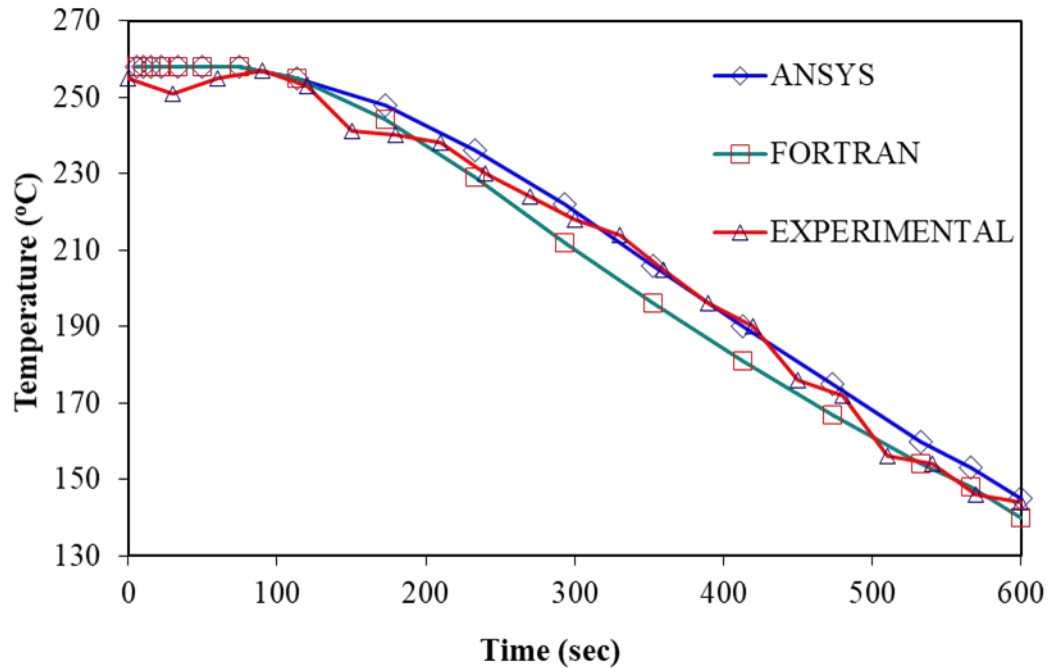


Figure 7. Comparison of experimental data with FORTRAN and ANSYS analysis results.

#### 4. Conclusion

In the present study, the accuracy of the data obtained with ANSYS Thermal Transient Module were compared and tested by the data obtained with both experimental study and FORTRAN programming written by using the equation, which has been derived for cooling time of the cylindrical parts in literature. FORTRAN code writing is based on the above-mentioned equation-3, which is the equation that gives the best relationship between position, time and temperature. In general, the  $C_p$  value has been taken to be constant in the calculations so far, but this has caused some degree of errors. In the present study, it was observed that the data obtained with ANSYS transient thermal were consistent with the experimental data and approach 100% in case  $C_p$  value in the equation number-3 was selected to be dependent on temperature. In this study, both the written code, ANSYS Transient module and equation-3 were found to be compatible with each other.

#### Acknowledgement

This paper is granted to Assist Dr. Mustafa DANACI who recently passed away and whom we respected and will always miss.

#### References

- [1] Stelson, K.A. Calculating cooling times for polymer injection moulding, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, 217, 5, 709–713, (2003)
- [2] Yu, C.J. and Sunderland, J.E. Determination of ejection temperature and cooling time in injection molding, **Polymer Engineering & Science**, 32, 3, 191–197, (1992)



- [3] Liang, J.Z. and Ness, J.N. The calculation of cooling time in injection moulding, **Journal of Materials Processing Technology**, 57, 62–64, (1996)
- [4] Dietzel, H. Schumann, J. Müller, K. Kühl-und Siegelzeit analytisch berechnen, **Kunststoffe**, 81, 1138–1140, (1991)
- [5] Menges, G. Michaeli, W. Mohren, P. How to make injection molds, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 271-283, (2013)
- [6] Bird, R.B. Stewart, W.E. Lightfoot, E.N. **Transport Phenomena**, John Wiley & Sons, New York, 413, 354-357, (1960)
- [7] Jaeger, J.C. and Carslaw, H.S. **Conduction of heat in solids**, Clarendon Press, Oxford, 100, (1959)
- [8] Ballman, R.L. and Shusman, T. Easy way to calculate injection molding set-up time, **Modern Plastics**, 194, 130-131, (1959)
- [9] Wang, G. Zhao, G. Wang, X. Heating/cooling channels design for an automotive interior part and its evaluation in rapid heat cycle molding, **Materials & Design**, 59, 310–322, (2014)
- [10] Hassan, H. Regnier, N. Lebot, C. Pujos, C. Defaye, G. Effect of cooling system on the polymer temperature and solidification during injection molding, **Applied Thermal Engineering**, 29, 1786–1791, (2009)
- [11] Li, C.L. Li, C.G. Mok, A.C.K. Automatic layout design of plastic injection mould cooling system, **Computer-Aided Design**, 37, 645–662, (2005)
- [12] Li, C.L. A feature-based approach to injection mould cooling system design, **Computer-Aided Design**, 33, 1073–1090, (2001)
- [13] Bendada, A. Derdouri, A. Lamontagne, M. Simard, Y. Analysis of thermal contact resistance between polymer and mold in injection molding, **Applied Thermal Engineering**, 24, 2029–2040, (2004)
- [14] Li, C.G. and Li, C.L. Plastic injection mould cooling system design by the configuration space method, **Computer-Aided Design**, 40, 334–349, (2008)

# Örüntüler konusunda 7.sınıf öğrencilerinin karşılaştıkları zorlukların incelenmesi

Burcu KOCAMAZ<sup>1</sup>, Nazlı Yıldız İKİKARDEŞ<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>İzmir Bornova Özel Rota Koleji, Bornova, İzmir

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi, Necatibey Eğitim Fakültesi, Matematik Eğitimi Anabilim Dalı, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 27.01.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 06.06.2021

## Öz

Bu çalışma ile ortaokul 7.sınıf öğrencilerinin örüntüler konusunda karşılaştıkları problemlerin ortaya çıkarılması ve bu problemlere çözüm önerilerinin sunulması amaçlanmıştır. Çalışma, nitel yöntemlerinden doküman incelemesi tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma, 2018-2019 öğretim yılında İzmir ili Bornova ilçesinde bulunan özel bir ortaokulda öğrenim gören 50 yedinci sınıf öğrencisi ile yürütülmüştür. Araştırmanın başlangıcında öğrencilere “Örüntü Ölçüm Testi” uygulanmış, sonrasında her bir öğrenciyle yarı yapılandırılmış görüşmeler yapılmıştır. Veriler toplandıktan sonra nicel verilerin analizinde betimsel istatistik araçları, nitel verilerin analizinde ise içerik analizi yöntemi kullanılarak çözümlene yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda öğrencilerin en çok verilen bir örüntünün herhangi bir elemanının, kaçınıcı adımda yer aldığını belirlemede zorlandıkları, örüntünün modellemesini yapmakta ise en başarılı oldukları gözlenmiştir. Bunun yanında örüntünün sunum şeklinin, öğrenci başarısını etkilediği sonucu elde edilmiştir. Özellikle problem ve tablo şeklinde verilen örüntü biçimlerinde öğrenci başarısının düşük, şekil ve sayı dizisi şeklindeki örüntü biçimlerinde başarının yüksek olduğu tespit edilmiştir. Öğrencilerin yaşadıkları bu zorlukların giderilmesi için örüntü konusu verilmeden önce öğrencilere denklem kurma, problem çözme konularının tekrarının yapılması ve öğrencilere tablo ve grafiklerle ilgili etkinlikler sunulması önerilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Örüntü, zorluk, matematik eğitimi, ortaöğretim.

Burcu KOCAMAZ, brcgrknkocamaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6052-1332>

\*Nazlı Yıldız İKİKARDEŞ, nyildiz@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8756-8085>

## Investigation of difficulties encountered by 7th grade students in learning of pattern subject

### Abstract

*With this study, it is aimed to reveal the problems that middle school 7th grade students encounter in patterns and to offer solutions to these problems. The study was carried out using one of the qualitative methods, document review technique. The research was conducted on 50 seventh grade students studying in a private secondary school in Bornova district of İzmir province in 2018-2019 academic year. At the beginning of the study, "The Pattern Measurement Test" was applied to the students, and then semi-structured interviews were held with each student. After the data were collected, analysis was made using descriptive statistics tools in the analysis of quantitative data and content analysis method in the analysis of qualitative data. As a result of the evaluation, it was observed that the students had difficulty in determining the step of a pattern, which was given the most, and that they were the most successful in modeling the pattern. In addition, it was obtained that the presentation of the pattern affects student achievement. It has been determined that student achievement is low especially in pattern forms given in the form of problems and tables, and high in pattern forms in the form of shape and number sequence. In order to overcome these difficulties of the students, it was suggested that the students will be given equations, problem solving and repetition of the tables and graphics before the subject of the pattern is given.*

**Keywords:** *Pattern, difficulty, mathematics education, secondary education.*

### 1. Giriş

Örüntü kelimesi, günlük dilde pek bilinen ve kullanılan bir kavram olmamakla beraber ilk kez 2004 yılında, yenilenmiş matematik programında, İngilizcedeki "pattern" sözcüğüne karşılık kullanılmıştır [1]. Bir örüntünün aranması, kavramların benzer ve farklı yönlerinin ortaya çıkartılıp, bunların açıklanması anlamına geldiğinden, matematik öğreniminde gerekli olan temel becerilerin başında gelmektedir. İlköğretim başlarında, somut nesnelere arasındaki ilişkiler örüntü kavramı ile öğrencilere kazandırılmakla beraber, öğrencilerin örüntü ve örüntü genelleme kavramlarını anlamada güçlük çektiği gözlemlenmektedir [2]. Başta fen ve teknoloji ile ilgili bilim dalları olmak üzere, gerçek dünyanın bizzat içinde uygulaması olan matematik bilimi, sadece sayılar ile yapılan işlemlerden ibaret bir bilim yerine, çoğu zaman bir örüntü bilimi olarak tanımlanmaktadır. Çünkü hava durumu tahmininden, bir bilgisayarın çalışmasına kadar günlük hayatla iç içe olan hemen her şeyin içinde bir örüntü mevcuttur. İşte hem günlük yaşamda hem de doğada mevcut olan bu ilişkileri, yani örüntüleri anlamak, kurallarını bulmak, matematiğin bir alt dalı olan cebirin görevidir [1]. Yalnızca ilk ya da orta öğretimde değil, daha küçük yaşta çocuklarda da sayılar ve işlemlerle tanışmak, sayı grupları arasındaki bağlantıları, örüntüleri fark etmek gibi cebirsel akıl yürütmeyi kullanmak teşvik edilmelidir. National Council of Teacher of Mathematics (NCTM) de (2000), matematik öğretiminde genelleme yapmanın özellikle üzerinde durulmakta ve tüm öğrencilerin matematiksel düşüncelerin yazımını cebirsel şekilde yapabilme ve birbirine dönüştürebilme becerisine sahip olmasının gerektiği belirtilmektedir [3].

Öğrencilere matematik dersini anlamalarını kolaylaştıran, ezbere dayalı olmayan, mantık muhakeme kuralları çerçevesinde düşünmelerini sağlayabilen, her zaman bütünün tamamını görmelerini yardımcı olan çalışmaların, ilkökul birinci sınıftan itibaren yapılması gerekir. Bu sayede düşünme sistemleri gelişecek ve parça-bütün, soyut-somut ilişkisi kurabileceklerdir. Örüntü konusu öğrencilere bu amaçla anlatılır [4]. Cebirsel düşünmede temel olan, verilen parçanın bütününe görebilmek, ne şekilde devam etmesi gerektiğinin farkına varmak, yani bir genellemeye, bir kurala ulaşabilmek ve bunu matematiksel bir dille cebirsel ifade olarak yazabilmektir [5]. Zaskis ve Liljedahl, cebiri örüntülerin oluşturduğu bir bütün olarak görürler, bu nedenle örüntüyü matematiğin merkezi olarak ifade ederler [6].

Örüntüler, öğretim programına 2005 yılı itibari ile girmiştir. 1.sınıftan 8.sınıfa her kademe için farklı zorluk düzeylerinde örüntü kazanımları öğrencilere verilmektedir. Örüntüler; akıl yürütme, kıvrak zekâ, terimler arası ilişki kurma, her terimi bir önceki ile karşılaştırıp bir sonrakini tahmin etme, genelleme yapma gibi hem matematiksel hem bilişsel düşünme gerektiren sorular içerdiğinden öğrenciler tarafından çok sevilmemektedir. Uluslararası Matematik ve Fen Eğilimleri Araştırması (TIMSS) ve Uluslararası Öğrenci Değerlendirme Programı (PISA) gibi değerlendirmelerden elde edilen veriler, öğrencilerin üst düzey düşünme gerektiren örüntü gibi konularda oldukça düşük ortalamalara sahip olduğunun ve zorlandıklarının bir göstergesidir [7, 8, 9]. Özellikle işlemleri yapıp sonucu bulmaya odaklı olan ve sorunun çözüm metodundan ziyade sayısal bir değere ulaşmaya odaklı öğrenciler, örüntü kuralını bulurken çok zorlanmaktadırlar. Eğer örüntüde hiçbir sayısal değer yoksa sadece şekillerden ibaretse bu öğrenciler için daha da zor olmaktadır.

Örüntüler sadece okulda öğrenilen bir konu olarak görülmemelidir. Gerçek hayatta da olaylar arası ilişki kurma, yaşananları değerlendirerek sonuçta olabilecekleri tahmin etme, bir sorun karşısında yorum ve çıkarım yapabilme, problemlere farklı açılardan yaklaşım birden çok çözüm yolu bulabilme gibi yaşamın her anında kolaylaştırıcı etki sağlayacak bir öğrenme alanıdır. Artık cep telefonları ya da bilgisayarlarda bile örüntü oyunları yer almaktadır. Dolayısıyla her bireyin örüntü öğrenmesi ve bunu öğrenirken tüm alt kazanımları da edinmesi çok önemlidir.

Öğrenciler genel anlamda dört işlem sorularını matematik olarak görmektedirler. Bunun haricinde ekstra düşünme, yorum yapma, sonuç çıkarma gerektiren durumlardan korkup, önyargıyla yaklaşarak öğrenmekten kaçmaktadırlar. Örüntü, matematiğin zor ve önemli konularından biridir. Öğretmene, öğrencinin matematik zekâsını, düşünme sistemini ve düzeyini gösterebilecek bir konudur. Bu anlamda örüntü konusuna dair öğrencilerin yaşadıkları zorluklar ve sebeplerinin belirlenmesi hedeflenen bu çalışma öğretmenlere rehberlik edebilir. Daha verimli ders işlenmesinde yol gösterici olabilir.

Bu çalışma ile 7.sınıf öğrencilerinin matematik dersi örüntüler konusunda yaşadıkları zorlukların belirlenmesi amaçlanmıştır [10]. Bu amaca ulaşmak için aşağıdaki sorulara yanıt aranmıştır:

1. Örüntünün genel terimini bulurken (örüntü kuralını harf ile ifade ederken) öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?
2. Örüntünün herhangi bir adımına ulaşırken öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?
3. Örüntüde verilen herhangi bir terimin kaçınıcı adımda olduğunu bulurken öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?
4. Verilen bir sayı örüntüsünü modellerken öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?
5. Örüntüler konusunda öğrencilerin yaşadığı temel zorluk nedir?

6. Örüntünün veriliş şekli öğrenci başarısını etkiliyor mu?

Literatür incelendiğinde 7.sınıflar için örüntüler konusunda yapılan çalışmalar az olduğundan dolayı bu çalışma önemlidir. Bu bağlamda örüntü konusuna dair öğrencilerin yaşadıkları zorluklar ve nedenleri belirlendikten sonra bu çalışma öğretmenlere rehberlik edebilir. Öğretmenlerin daha verimli ders işlenmesine yardımcı olabilir.

## 2. Yöntem

Bu bölümünde çalışmanın araştırma modeli, çalışma grubu, veri toplama araçları, veri toplama süreci ve verilerin analizine yer verilmiştir.

### 2.1. Araştırmanın modeli

Bu araştırmanın modeli, nitel araştırma yöntemlerinden doküman incelemesi tekniği şeklindedir. Doküman incelemesi; araştırmacının, araştırma konusunda yapılan çeşitli çalışmaları, dokümanları, basılı veya sanal ortam üzerinden toplayıp, gözden geçirip, düzenlemesi ve analiz etmesi anlamına gelir [11]. Bazen araştırmacılar, günlük yaşamda olan veya kasıtlı olarak bir araştırma için meydana getirilen dokümanları toplayıp inceleyerek gözlem ya da katılımcı gözlem yaparak görüşmeyi tamamlamış olurlar. Bu sebeple, doküman incelemesi, araştırma ortamındaki katılımcıların değerlerini ortaya çıkarmada zengin ve göze çarpmayan bir tekniktir [12]. Bu çalışmada, öğrencilere uygulanan testten elde edilen veriler doküman incelemesi tekniği yardımıyla analiz edilmiştir.

Yarı yapılandırılmış görüşme; araştırmacının soracağı tüm soruları önceden hazırlayıp, her katılımcıya aynı soruları sabit şekilde sorduğu görüşme çeşididir. Ancak yapılandırılmış görüşmeden farkı konuşma anında, sohbetin akışına göre ek sorular da sorulabilmektedir. Bu sayede verilen cevapların detaylandırılması sağlanabilir. Bu nedenle eğitim bilimi araştırmalarında oldukça fazla kullanılmaktadır [13]. Çalışmada yer alan öğrencilerin örüntü konusunda yaşadıkları zorluklar ile nedenlerini belirleyebilmek amacıyla öğrencilerle yarı yapılandırılmış görüşmeler yapılmıştır.

### 2.2. Çalışma grubu

Araştırmanın çalışma grubunu, 2018-2019 eğitim öğretim yılında İzmir ili Bornova ilçesinde bulunan özel bir ortaokulda öğrenim görmekte olan 50 yedinci sınıf öğrencisi oluşturmaktadır. Çalışma grubunun belirlendiği okul; seçkisiz olmayan örnekleme yöntemlerinden, uygun örnekleme yöntemiyle seçilmiştir. Uygun örnekleme ya da kolay ulaşılabilir durum örnekleme, çoğunlukla araştırmacının işgücü ve zaman gibi sınırlılıklar nedeni ile diğer örnekleme yöntemlerini kullanma imkânının olmadığı durumlarda kullanılır [14]. Çalışma grubunun belirlenmesinde uygun örnekleme yöntemi, işgücü ve zaman gibi var olan sınırlılıklar sebebiyle kolay ulaşılabilmesinden dolayı seçilmiştir. Ayrıca öğrenciler ile yapılacak yarı yapılandırılmış görüşmelerde, öğrencilerin daha rahat ve güvende hissetmeleri amacıyla araştırmacılarından birinin matematik öğretmeni olarak çalıştığı okul tercih edilmiştir. Milli Eğitim Bakanlığı'ndan gerekli izinler alınmış ve her başarı düzeyine sahip karışık sınıfların bulunduğu bu okuldan toplam elli, gönüllü ve veli izni alınan öğrenciye örüntü konusunu içeren test uygulanmıştır. Bu 50 öğrenciden 8 tanesi testteki tüm sorulara doğru yanıt vermiştir. Dolayısıyla yarı yapılandırılmış görüşmeler, kalan 42 öğrenci ile yapılmıştır.

### 2.3. Veri toplama araçları

Örüntü Ölçüm Testi'ni oluşturmak için öncelikle literatür çalışması yapılmıştır. Testin sınırlılıkları ve soruların zorluğunu belirlemek amacıyla 7.sınıf matematik dersi öğretim programındaki kazanımlar temel alınmıştır. Bu kazanımların her biri için farklı zorluk düzeylerinde pek çok problem hazırlanmıştır. Bunun yanında 2018-2019 eğitim öğretim döneminde kullanılan Milli Eğitim Bakanlığı tarafından verilmiş olan 7.sınıf matematik ders kitabındaki soru tipleri incelenmiştir. Tüm bu verilerle "Örüntü Ölçüm Testi" birinci araştırmacı tarafından hazırlanmıştır [10]. Test hazırlandıktan sonra farklı kurumlarda çalışan dört matematik öğretmeni ve iki akademisyenin uzman görüşüne başvurulmuştur. Ayrıca başka bir ortaokulda öğrenim gören üç yedinci sınıf öğrencisine test uygulanmış, böylece problemlerin anlaşılabilirliği kontrol edilmiştir. Örüntü Ölçüm Testi'nde yer alan problemlere aşağıda yer verilmiştir:

**Problem 1:** Yukarıda Güneş şekilleri yardımıyla bir örüntü oluşturulmuştur. Buna göre;

- Her adımdaki Güneş sayısını veren örüntünün genel terimini bulunuz.
- Her adımdaki Güneşlerin kolları olan doğru parçalarının oluşturduğu örüntünün genel terimini bulunuz.
- Her adımda Güneşlerin kollarındaki noktaların oluşturduğu örüntünün genel terimini bulunuz.

Şekil 1. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 1.

**Problem 2:** Yukarıda Güneş şekilleri yardımıyla bir örüntü oluşturulmuştur. Buna göre;

5. Adımda kaç adet Güneş olacağını bulunuz.
10. Adımda kaç adet doğru parçası olacağını bulunuz.
15. Adımda kaç adet nokta olacağını bulunuz.
1000. Adımda kaç adet Güneş olacağını bulunuz.
1000. Adımda kaç adet doğru parçası olacağını bulunuz.
1000. Adımda kaç adet nokta olacağını bulunuz.

Şekil 2. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 2.

**Problem 3:** Yukarıda Güneş şekilleri yardımıyla bir örüntü oluşturulmuştur. Buna göre;

- Örüntünün kaçınıcı adımında 23 tane Güneş vardır?
- Örüntünün kaçınıcı adımında 25 tane doğru parçası vardır?
- Örüntünün kaçınıcı adımında 34 tane nokta vardır?
- Örüntünün kaçınıcı adımında 500 Güneş vardır?
- Örüntünün kaçınıcı adımında 1601 adet doğru parçası vardır?
- Örüntünün kaçınıcı adımında 4002 tane nokta vardır?

Şekil 3. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 3.

**Problem 4:** Aşağıdaki tabloda bir örüntü verilmiştir. Tabloya göre aşağıdaki soruları cevaplayınız.

X	1	2	3	.....	■	.....	100
Y	5	17	29	.....	113	.....	▲

- Örüntünün genel terimi nedir?
- Sembolü ile gösterilen sayı kaçtır?
- ▲ Sembolü ile gösterilen sayı kaçtır?

Şekil 4. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 4.

**Problem 5:** 3 , 8 , 13, 18, 23, 28, ..... sayı örüntüsü veriliyor. Buna göre;

- Örüntünün ilk üç terimi için bir modelleme yapınız.
- Örüntünün kuralını “n” bilinmeyenini kullanarak ifade ediniz.
- Örüntünün 10. Adımındaki sayıyı bulunuz.
- Örüntünün 100. Adımındaki sayıyı bulunuz.
- Örüntünün kaçınıcı terimi 643 tür?

Şekil 5. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 5.

**Problem 6:** 29, 25, 21, 17, 13, ..... sayı örüntüsü veriliyor. Buna göre aşağıdakilerden hangisi bu örüntünün bir terimi olamaz?

- 5
- 3
- 15
- 9

Şekil 6. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 6.

**Problem 7:** Ogeday' ın birikmiş 5000 lirası vardır. 2019' un Ocak ayından itibaren her ay 500 lira daha biriktirmektedir. Araba alabilmek için para biriktirmekte ve beğendiği araba 34500 liradır. Buna göre;

- Ogeday ' ın her ay biriken toplam parasını gösteren genel ifadeyi bulunuz.
- Ogeday ' ın 20. Ayda toplam ne kadar parası olur?
- Ogeday ' ın 34500 liralık arabayı alabilmesi için kaç ay para biriktirmesi yeterlidir?
- Ogeday istediği arabayı hangi yılın hangi ayında alabilir?

Şekil 7. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 7.

- Problem 8:** Burcu öğretmen her hafta yapılan deneme sınavlarında ödül olarak 1., 2. ve 3. ye birer tane gofret vermeye karar verir. İlk üç gofreti birinci hafta dağıtır ve her hafta bu şekilde devam eder. Buna göre;
- Burcu öğretmenin dağıttığı gofret sayısını gösteren örüntünün kuralını bulunuz.
  23. Haftada Burcu öğretmen kaç tane gofret dağıtmış olur?
  90. gofreti kaçınıcı haftada dağıtmıştır?
  - İlk dört haftadaki dağıtılan gofret sayısını gösteren örüntünün modellenmesini yapınız

Şekil 8. Örüntü Ölçüm Testi - Problem 8.

Öğrencilere test uygulandıktan sonra araştırmanın nitel verilerine ulaşmak amacıyla yarı yapılandırılmış görüşmeler “Örüntü Ölçüm Testi Görüşme Formu” kullanılarak gerçekleştirilmiştir [10]. Görüşme formunda; öğrencilere örüntünün genel terimini bulurken, herhangi bir adımına ulaşırken, verilen herhangi bir terimin kaçınıcı adımda olduğunu bulurken ve örüntüyü modellerken zorluk yaşayıp yaşamadıklarını, varsa neler olduğunu belirlemek amacı ile sorulmuş sorulara yer verilmiştir. Nitel araştırmalardaki geçerlik, araştırmacının araştırdığı olguyu olabildiğince tarafsız betimlemesi olarak tanımlanır [15]. Araştırmanın geçerliğinin sağlanması için iki uzman matematik öğretmeni ile görüşme test edilmiştir.

#### 2.4. Veri toplama süreci

7.sınıf öğrencilerine “Örüntü Ölçüm Testi” yazılı olarak uygulanmıştır. Öğrencilere testi yanıtlamaları için 35-45 dakika süre verilmiştir. Testteki tüm soruları doğru yanıtlamamış olan 42 öğrenci ile “Örüntü Ölçüm Testi Görüşme Formu” kullanılarak yaklaşık 20 dakika süren görüşmeler yapılmıştır. Görüşmeler, hem form üzerine kısa notlar alınarak hem de ses kayıt cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kayıtlar ve öğrencilerin testteki yanıtları birleştirilerek veriler yazıya dökülmüştür.

#### 2.5. Verilerin analizi

Verilerin analizi aşamasında, içerik analizi kullanılmıştır. İçerik analizi, incelenen dokümanda anlatılmak istenen temel kavramı fark edip algılayabilmek ve açıklayabilmek için yapılan taramadır [15]. İçerik analizinde veriler, betimsel analize göre daha derin değerlendirilir. Betimsel analizde fark edilmeyen kavram ve temalar, içerik analizi ile keşfedilebilir [14]. Araştırmanın iç geçerliliğinin sağlanması için her başarı düzeyine sahip öğrencilerin katılımı sağlanmıştır. Test tüm öğrencilere aynı gün, aynı saatte ve eşit sürede uygulanmış, bu şekilde öğrencilerin test öncesinde ya da sonrasında birbirleriyle bilgi paylaşımı yapmaları ya da soruları paylaşmaları önlenmiştir. Ayrıca öğrencilerin örüntü konusundaki geçmişleri birbirleriyle aynı olup, her öğrenci daha önce konuyu aynı öğretmenden dinlemiş, her öğrenciye örüntü konusu aynı örnekler verilerek, aynı kitaplardan işlenerek anlatılmıştır. Daha önce de bu konuda yapılan sınav ya da etkinlikler, tüm öğrenciler için birebir aynıdır. Bu şekilde öğrencilerin örüntü konusundaki deneyimlerinde ya da hazırbulunuşluk seviyelerinde anlamlı farklılıkların olmaması sağlanmıştır. Araştırmada gönüllük esası olup, istemeyen ya da veli izni olmayan hiçbir öğrenci araştırmaya dâhil edilmemiştir. Buna ek olarak araştırma öncesinde öğrenci isimlerinin kullanılmayacağını bilgisi verilmiş, sorulara içtenlikle yanıt verebilecekleri belirtilmiştir. Bu şekilde öğrencilerin güvende ve rahat hissetmeleri amaçlanmıştır. Örüntü Ölçüm Testi’ndeki öğrencilerin yanıtları; doğru, işlem hatası, yanlış ve boş olmak üzere 4 farklı başlıkta sınıflandırılmıştır.



Öğrencilerin yanıtlarına ait frekans değerleri, sayısal olarak tablolar halinde oluşturulmuştur.

Her bir öğrenci numaralandırılarak yarı yapılandırılmış görüşmeler kayıt altına alınmış ve hiçbir değişiklik yapılmadan yazıya aktarılmıştır. Görüşmelerden elde edilen veriler, içerik analizi yapılarak çözümlenmiştir. Öğrencilerin sorulara verdikleri yanıtlar, 4 farklı tema altında değerlendirilmiştir:

- Kavramın kuralını bir değişken ile yazma: Örüntünün genel terimini bulabilme,
- Kavramın kuralını çözümleme: Örüntünün istenilen adımına ulaşabilme,
- Kavramın kuralını analiz etme: Örüntüde verilen terimin kaçınıcı adımda olduğunu ifade edebilme,
- Kavramı günlük hayatla ilişkilendirme: Sayı örüntüsünün modellenmesini yapabilme.

Ayrıca güvenilirliği belirlemek amacıyla veriler, bir akademisyen tarafından da kodlanmıştır. Kodlama yapanlar arası uyum “Güvenirlilik = Görüş Birliği / (Görüş Birliği + Görüş Ayrılığı) x 100” ile hesaplanarak %81 olarak bulunmuştur. Güvenirlilik için iki farklı kodlama yapan kişinin uyumu için %70’in üstündeki değerler yeterlidir [16].

### 3. Bulgular ve yorum

#### 3.1. Araştırmanın birinci sorusuna ilişkin bulgular ve yorum

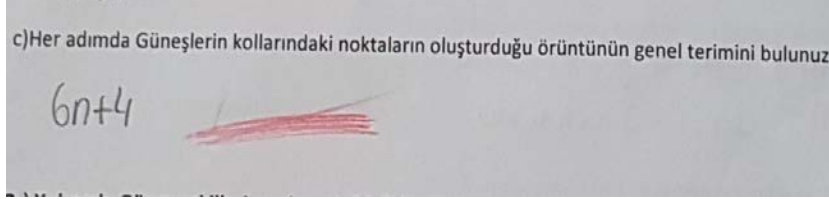
“Örüntünün genel terimini bulurken (örüntü kuralını harf ile ifade ederken) öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?” sorusuna yanıt almak için öğrencilere Örüntü Ölçüm Testi’ndeki 1a, 1b, 1c, 4a, 5b, 7a ve 8a soruları yöneltilmiştir. Burada öğrencilerin verilen bir örüntüyü kavramaları, örüntünün kuralını bulmaları ve bu kuralı harf ile ifade etmeleri beklenmektedir. Dolayısıyla öğrencilerin örüntüyü takip edip, örüntünün genel terimini yazma süreçlerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Tablo 1’de öğrencilerin yanıtlarının analizinden ortaya çıkan bulgulara ve sonra da bunların değerlendirilmesine yer verilmiştir.

Tablo 1. Araştırmanın birinci sorusuna ilişkin problemlere verilen yanıtların gruplanmış frekans dağılımı.

Problem	1a	1b	1c	4a	5b	7a	8a
<i>Doğru</i>	50	50	48	47	49	34	49
<i>İşlem Hatası</i>	-	-	-	-	1	1	-
<i>Yanlış</i>	-	-	2	1	-	13	1
<i>Boş</i>	-	-	-	2	-	2	-
<i>Toplam</i>	50	50	50	50	50	50	50

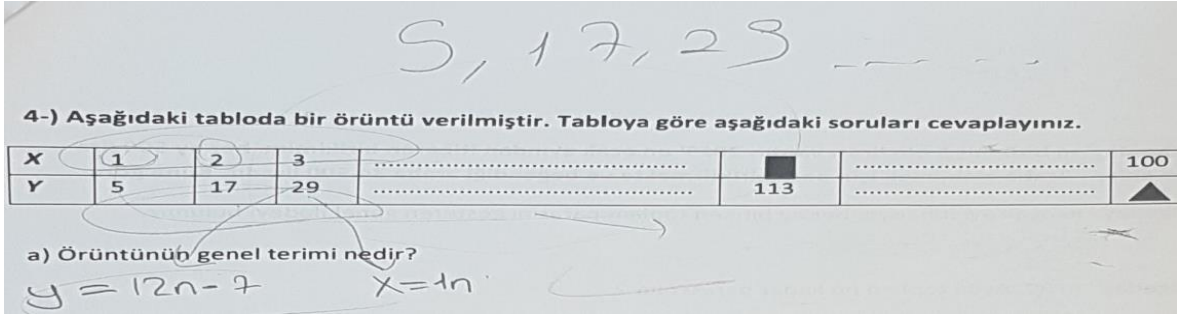
Problem 1'in a ve b maddeleri, öğrencilerin tümü tarafından doğru, c maddesi öğrencilerin büyük çoğunluğu tarafından doğru yanıtlanmıştır. Problem 4'ün a maddesi 47 öğrenci tarafından doğru yanıtlanmıştır. Yanlış yanıtlayan 1 öğrenci, boş bırakan ise 2 öğrenci vardır. Problem 5'in b maddesinde 1 öğrenci işlem hatası yapmış, diğerleri ise soruyu doğru yanıtlanmıştır. Yedinci problemin a maddesini 34 öğrenci doğru, 1 öğrenci işlem hatası, 13 öğrenci yanlış ve 2 öğrenci boş olacak şekilde yanıtlanmıştır. Sekizinci problemin a maddesini 49 öğrenci doğru, 1 öğrenci yanlış yanıtlanmıştır.

Sorulara yanlış yanıt veren öğrencilerle yapılan görüşmelerden elde edilenlere aşağıda yer verilmiştir.



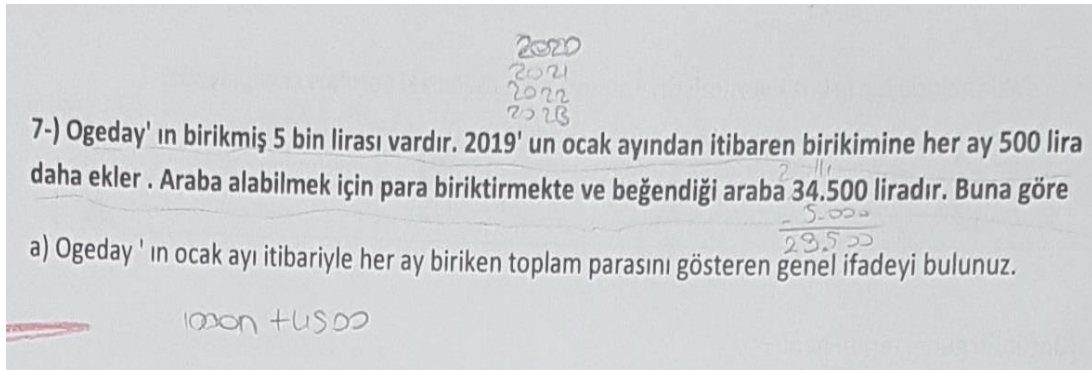
Şekil 9. Öğrenci Ö36'nın Problem 1'in c maddesine verdiği yanıt.

Görüşmeden Ö36 kodlu öğrencinin bu konuda güçlük yaşadığı ve farklı gösterim olduğunda örüntü ilişkisini kuramadığı ve genel terimi yanlış ifade ettiği bulgusuna ulaşılmıştır.



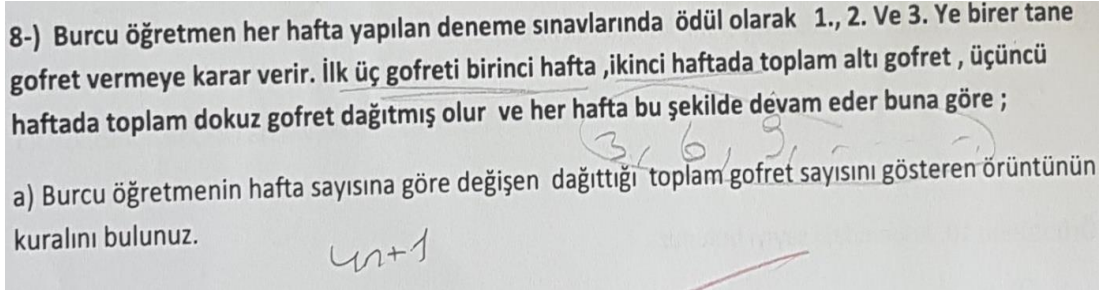
Şekil 10. Öğrenci Ö47'nin Problem 4'ün a maddesine verdiği yanıt.

Yapılan görüşmede Ö47 kodlu öğrencinin, örüntü tablo olarak gösterildiğinde kafasının karıştığı, dolayısıyla zorluk yaşadığı anlaşılmıştır. Sonuç olarak tablodaki örüntüyü doğru yorumlayamamıştır.



Şekil 11. Öğrenci Ö42'nin Problem 7'nin a maddesine verdiği yanıt.

Ö42 kodlu öğrenci ile yapılan görüşmede, öğrencinin problem çözümlerinde zorluk yaşadığı tespit edilmiştir. Öğrenci sorunun uzun olmasının kendisinde bir önyargı yarattığını ve yapamayacağı korkusu yaşadığını belirtmiştir. Öğrenciler genel olarak hep hazır şekilde verilen işlemlilerden hoşlanmaktadır. Burada olduğu gibi soruyu algılayıp matematiksel hale getirmeleri gereken soruları pek sevmemektedir.



Şekil 12. Öğrenci Ö47'nin Problem 8'in a maddesine verdiği yanıt.

Ö47 kodlu öğrenci ile yapılan görüşmede, öğrenci örüntü konusunu anladığını fakat problem çözmede zorluk yaşadığı için bu soruyu çözemediğini belirtmiştir. Matematikte konular birbiriyle ilişkili olduğundan Ö47 kodlu öğrencinin önceki konulardaki eksikliği, yeni konuların tam olarak öğrenilmesini de olumsuz etkilemektedir.

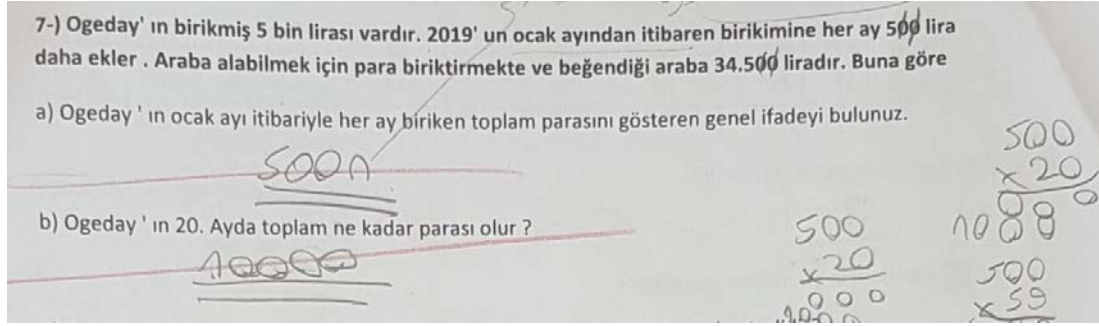
### 3.2. Araştırmanın ikinci sorusuna ilişkin bulgular ve yorum

"Örüntünün herhangi bir adımına ulaşırken öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?" sorusuna yanıt almak için öğrencilere Örüntü Ölçüm Testi'ndeki 2a, 2b, 2c, 2d, 2e, 2f, 4c, 5c, 5d, 6, 7b ve 8b soruları yöneltilmiştir. Burada öğrencilerden, örüntünün herhangi bir adımına ulaşmaları beklenmektedir. Öğrencilerin örüntüyü takip edip, örüntünün herhangi bir adımına ulaşma süreçlerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Tablo 2'de öğrencilerin yanıtlarının analizinden ortaya çıkan bulgulara ve sonra da bunların değerlendirilmesine yer verilmiştir.

Tablo 2. Araştırmanın ikinci sorusuna ilişkin problemlere verilen yanıtların gruplanmış frekans dağılımı.

Soru	2a	2b	2c	2d	2e	2f	4c	5c	5d	6	7b	8b
Doğru	50	49	44	50	49	48	42	49	46	47	35	47
İşlem Hatası	-	-	2	-	-	-	3	-	3	-	2	-
Yanlış	-	1	4	-	-	2	4	1	1	3	9	3
Boş	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	4	-
Toplam	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

İkinci problemin a maddesi ve d maddesi tüm öğrenciler tarafından doğru yanıtlanmıştır. Öğrenciler en çok yanlış yedinci problemin b maddesinde yapmıştır.



Şekil 13. Öğrenci Ö24'ün Problem 7'nin b maddesine verdiği yanıt.

Görüşme sonunda Ö24 kodlu öğrencinin sorunun genel terimini yanlış yazmasından dolayı örüntünün istenen adımına da ulaşamadığı görülmektedir. Problemden her adımı tek tek hesaplayarak çözmeye çalışmıştır. Ancak sayılar büyük olduğundan ve her seferinde miktar arttığından bu şekilde de verimli bir biçimde çözüme ulaşamamıştır.

### 3.3. Araştırmanın üçüncü sorusuna ilişkin bulgular ve yorum

"Örüntüde verilen herhangi bir terimin kaçınıcı adımda olduğunu bulurken öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?" sorusuna yanıt almak için öğrencilere Örüntü Ölçüm Testi'ndeki 3a, 3b, 3c, 3d, 3e, 3f, 4b, 5e, 7c, 7d ve 8c soruları yöneltilmiştir. Öğrencilerden verilen herhangi bir terimin, örüntünün kaçınıcı adımında yer aldığını bulmaları beklenmektedir. Öğrencilerin örüntüyü takip edip, örüntünün herhangi bir teriminin kaçınıcı adımda olduğuna ulaşma süreçlerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Tablo 3'te öğrencilerin yanıtlarının analizinden ortaya çıkan bulgulara ve sonra da bunların değerlendirilmesine yer verilmiştir.

Tablo 3. Araştırmanın üçüncü sorusuna ilişkin problemlere verilen yanıtların gruplanmış frekans dağılımı.

Soru	3a	3b	3c	3d	3e	3f	4b	5e	7c	7d	8c
Doğru	50	47	47	49	45	42	43	40	27	15	43
İşlem Hatası	-	-	-	-	-	1	-	3	2	1	-
Yanlış	-	2	2	1	2	3	3	3	15	27	5
Boş	-	1	1	-	3	3	4	4	6	7	2
Toplam	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Üçüncü problemin a maddesi öğrencilerin tümü tarafından doğru yanıtlanmıştır. Üçüncü problemin b, c d, e, f maddeleri ile dördüncü problemin b maddesi, beşinci problemin e maddesi ve sekizinci problemin c maddesi öğrencilerin çoğunluğu tarafından doğru yanıtlanmıştır. Ancak yedinci problemin c ve d maddelerinde yanlış yanıt veren öğrenci sayısı oldukça fazladır.

Yedinci sorunun c maddesi 27 öğrenci doğru, 2 öğrenci işlem hatası, 15 öğrenci yanlış ve 6 öğrenci boş olacak biçimde yanıtlanmıştır.

7-) Ogeday' in birikmiş 5 bin lirası vardır. 2019' un ocak ayından itibaren birikimine her ay 500 lira daha ekler . Araba alabilmek için para biriktirmekte ve beğendiği araba 34.500 liradır. Buna göre

a) Ogeday ' in ocak ayı itibariyle her ay biriken toplam parasını gösteren genel ifadeyi bulunuz.

$500n + 5\text{bin}$

b) Ogeday ' in 20. Ayda toplam ne kadar parası olur ?

$15.000$

c) Ogeday ' in 34.500 liralık arabayı alabilmesi için kaç ay para biriktirmesi yeterlidir?

$\rightarrow 15.000 = 20.\text{ay}$   
 $30.000 = 40.\text{ay}$   
 oran buldu

d) Ogeday istediği arabayı hangi yılın hangi ayında alabilir?

$12+12+12 = 36 + 12 = 48$

**2023 yılı Şubat ayı**

Şekil 14. Öğrenci Ö21'in Problem 7'nin c maddesine verdiği yanıt.

Ö21 kodlu öğrenci ile yapılan görüşmeden örüntünün ilerleyen adımlarını bulmak için doğru orantı kullandığı görülmektedir. Ancak örüntünün genel terimi ve ilerleyişi doğru orantı ile artmadığından hatalı sonuçlar bulmuştur. Öğrencinin oran ve orantı konusunda eksikliğinin olması bu problemde yanlış yapmasına neden olmuştur.

Problem 7'nin c maddesini yanıtlarken Ö34 ve Ö26 kodlu öğrenciler işlem hatası yapmıştır. Problem 7'nin c maddesini Ö31 kodlu öğrenci, genel terimi doğru bulmasına rağmen diğer soruları tek tek sayarak yapmaya çalıştığından karıştırmıştır. Başlangıçtaki 5000 liraya 500'er lira ekleye ekleye sorunun yanıtını bulmaya çalışmıştır ve bu şekilde 49 ay bulmuştur. Problem 7'nin c maddesini Ö2 kodlu öğrencinin yanıtlayamaması sorunun başında yaptığı hatadan kaynaklanmıştır. Genel terim için  $500n+5000$  yerine  $500n$  yazmıştır. Bu da sorunun devamının hatalı gitmesine sebep olmuştur. Benzer hatayı Ö38 kodlu öğrenci de yapmış, genel terimi  $1000n+4500$  olarak almış ve sorunun devamı da yanlış gitmiştir. Yine aynı hatayı Ö46 kodlu öğrenci genel terimi  $500n+4500$  olarak yapmıştır. Ö33 kodlu öğrenci ise genel terimi  $500n$  seçmiştir. Bunlardan farklı olarak Ö19 kodlu öğrenci yaşadığı dikkatsizlik sonucunda genel terimde  $500n+5000$  yerine  $500n+500$  yazmıştır. 5000 sayısında yer alan son sıfırı unutması, sorunun devamını da etkilemiştir.

Problem 7'nin d maddesini 15 öğrenci doğru, 1 öğrenci işlem hatası, 27 öğrenci yanlış ve 7 öğrenci boş olacak şekilde yanıtlanmıştır.

26200 - 5000 = 21.500 / 500 → ayı! 43

5000 6000 6500 7000 7500 8000 8500 9000

7-) Ogeday' in birikmiş 5 bin lirası vardır. 2019' un ocak ayından itibaren birikimine her ay 500 lira daha ekler . Araba alabilmek için para biriktirmekte ve beğendiği araba 34.500 liradır. Buna göre

a) Ogeday ' in ocak ayı itibariyle her ay biriken toplam parasını gösteren genel ifadeyi bulunuz.

$500n + 5000$

b) Ogeday ' in 20. Ayda toplam ne kadar parası olur ?

$15.000$

c) Ogeday ' in 34.500 liralık arabayı alabilmesi için kaç ay para biriktirmesi yeterlidir?

$49$

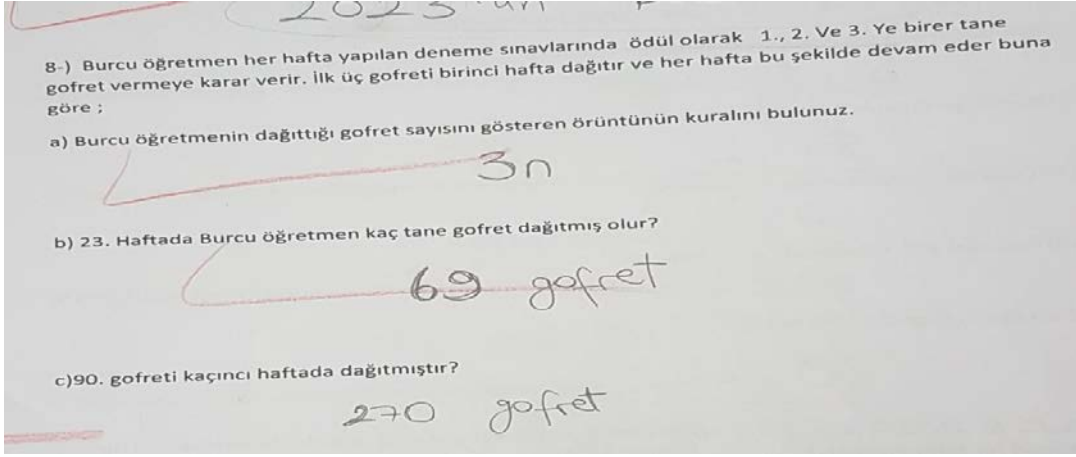
d) Ogeday istediği arabayı hangi yılın hangi ayında alabilir?

**2023- Ocak**

Şekil 15. Öğrenci Ö31'in Problem 7'nin d maddesine verdiği yanıt.

Öğrenci Ö31 geçen zamanı tek tek sayarak bulmaya çalışmıştır. Geçmesi gereken süreyi bir önceki seçenekte 59 yerine 49 ay olarak hesapladığı için yanıtı 2023 Ocak olarak vermiştir. Problem 7'nin c maddesinde anlatıldığına benzer bir hatayı, Ö40 kodlu öğrenci de yapmıştır. Geçmesi gereken süreyi 69 ay bulduğundan d maddesinde de yanlış yanıt bulmuştur. Problem 7'nin d maddesinde yapılan başlıca hatalardan biri de öğrencilerin elli dokuz ay geçmesi gerektiğini bulup bunu başlangıçtaki Ocak ayını hesaba katmadan hesaplamaları olmuştur. Yani sorunun bu noktaya kadar tüm seçeneklerini doğru yapmışlar ancak Ocak ayından sonra hesaplama yaptıkları için 2023 Kasım yerine 2023 Aralık olarak yanıt bulmuşlardır.

Sekizinci sorunun c maddesi 43 öğrenci doğru, 5 öğrenci yanlış ve 2 öğrenci boş olacak şekilde yanıtlanmıştır.



Şekil 16. Öğrenci Ö21'in Problem 8'in c maddesine verdiği yanıt.

Ö21 kodlu öğrenci ile yapılan görüşmeden öğrencinin soruyu doğru okumadığı anlaşılmıştır. Bazı öğrencilerin okuma alışkanlığının olmaması soruları okumayı anlamada güçlük çekmelerine sebep olabilmektedir. Yanlış okuma yapması örüntünün herhangi bir adımını bulur gibi işlem yapmasına ve yanlış sonuca ulaşmasına neden olmuştur. Ö14 kodlu öğrenciyle gerçekleştirilen görüşmeden öğrencinin denklem kurmayı gerektiren soru tiplerinde başarısız olduğu görülmektedir. Örüntünün istenen herhangi bir adımındaki elemanı bulabilmekte, ancak örüntüde verilen herhangi bir elemanın kaçinci adımda olduğunu bulması gerektiğinde denklem kuramadığı için zorlanmaktadır. Ayrıca Ö47 kodlu öğrenci, problem şeklindeki sorularda kafasının karıştığını ve hiçbir şey yapamadığını bu soruda da tekrar dile getirmiştir.

### 3.4. Araştırmanın dördüncü sorusuna ilişkin bulgular ve yorum

"Verilen bir sayı örüntüsünü modellerken öğrencilerin yaşadıkları zorluklar nelerdir?" sorusuna yanıt almak için öğrencilere Örüntü Ölçüm Testi'ndeki 5a ve 8d soruları yöneltilmiştir. Burada öğrencilerin verilen bir sayı örüntüsünü modelleme süreçleri ve bu süreçte yaşadıkları zorlukların gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Tablo 4'te öğrencilerin yanıtlarının analizinden ortaya çıkan bulgulara yer verilmiştir.

Tablo 4. Araştırmanın dördüncü sorusuna ilişkin problemlere verilen yanıtların gruplanmış frekans dağılımı.

Soru	5a	8d
<i>Doğru</i>	48	49
<i>İşlem Hatası</i>	-	-
<i>Yanlış</i>	-	-
<i>Boş</i>	2	1
<i>Toplam</i>	50	50

Öğrencilerin iki tanesi Problem 5'in a maddesini, bir tanesi de Problem 8'in d maddesini boş bırakmıştır. Bu problemleri yanlış yanıtlayan ya da işlem hatası yapan öğrenci olmamıştır. Ö18 kodlu öğrenci ile yapılan görüşmeden Problem 5'in a maddesi ve Problem 8'in d maddesinde yer alan modelleme kelimesinin anlamını bilmediği görülmektedir. Bu sebeple de soruları çözememiştir. Ö14 kodlu öğrenci ise sorunun çözümünü bilmesine rağmen dikkatsizce davranıp soruyu görmeden atlamıştır.

### 3.5. Araştırmanın beşinci sorusuna ilişkin bulgular ve yorum

“Örüntüler konusunda öğrencilerin yaşadığı temel zorluk nedir?” sorusuna yanıt alabilmek için araştırmanın ilk dört sorusuna ait olan öğrencilerin yanıtları dört tema altında gruplandırılmış ve başarı yüzdeleri hesaplanmıştır. Öğrencilerin verdikleri yanıtların temalara ilişkin bulguları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Öğrencilerin yanıtlarının temalara ilişkin bulguları.

Tema	Başarılı	Başarısız	Toplam	Başarı Yüzdesi
<i>Örüntünün genel terimini bulabilme</i>	327	23	350	%93,42
<i>Örüntünün istenilen adımına ulaşabilme</i>	556	44	600	%92,66
<i>Örüntüde verilen terimin kaçınıcı adımda olduğunu ifade edebilme</i>	448	102	550	%81,45
<i>Sayı örüntüsünün modellemesini yapabilme</i>	97	3	100	%97,00

Tablo incelendiğinde sayı örüntüsünün modellemesini yapabilme (%97,00), örüntünün genel terimini bulabilme (%93,42) ve örüntünün istenilen adımına ulaşabilme (%92,66) temalarında öğrencilerin oldukça başarılı iken örüntüde verilen terimin kaçınıcı adımda olduğunu ifade edebilme (%81,45) temasında öğrencilerin daha az başarılı olduğu görülmektedir. Tablo 5'e göre öğrenciler daha az başarılı oldukları, örüntüde verilen terimin kaçınıcı adımda olduğunu ifade edebilme temasında zorluk çekmektedirler. Öğrencilerle yapılan görüşmeler sonucu, sorunun yanıtının, denklem kurma ve çözüme gerektirmesi, öğrencilerin yaşadığı en temel zorluk olarak ortaya çıkmıştır. Bu temadaki soruları yanıtlayamayan ya da yanlış yanıtlayan öğrencilerin denklemler konusunda eksikleri tespit edilmiştir. Ayrıca örüntünün herhangi bir elemanını bulmak öğrenciler için basit bir işlem olduğu halde bunun tersi, yani verilen bir elemanın örüntünün kaçınıcı adımda olduğunun sorulması kafalarının karışmalarına sebep olmaktadır ve bu konuda zorluk çektikleri gözlenmiştir.

### 3.6. Araştırmanın altıncı sorusuna ilişkin bulgular ve yorum

“Örüntünün verilmiş şekli öğrenci başarısını etkiliyor mu?” sorusuna yanıt alabilmek için Örüntü Ölçüm Testi'nde dört farklı sunumda örüntü sorusuna yer verilmiştir. Bunlar:

- Örüntünün şekil ile sunulduğu soru tiplerindeki başarıyı değerlendirmek için 1a, 1b ve 1c soruları,
- Örüntünün tablo ile sunulduğu soru tiplerindeki başarıyı değerlendirmek için 4a sorusu,
- Örüntünün sayı örüntüsü ile sunulduğu soru tiplerindeki başarıyı değerlendirmek için 5b sorusu,
- Örüntünün bir problem ile sunulduğu soru tiplerindeki başarıyı değerlendirmek için 7a ve 8a sorularıdır.

Tablo 6. Örüntünün sunum şekline göre değişen öğrenci başarı yüzdeleri.

Örüntünün Sunumu	Soru Maddeleri	Başarı Yüzdesi
<i>Şekil</i>	1a	%98,66
	1b	
	1c	
<i>Tablo</i>	4a	%94,00
<i>Sayı Örüntüleri</i>	5b	%98,00
<i>Problem</i>	7a	<b>%83,00</b>
	8a	

Tablo 6'ya göre öğrenciler, örüntünün şekil ile sunulduğu soru tiplerinde (%98,66) en çok başarıyı göstermişlerdir. Örüntü sayı örüntüsü biçiminde sunulduğunda %98,00 ve tablo ile sunulduğunda %94,00 oranında başarı elde etmişlerdir. Öğrenciler, örüntü bir problem ile sunulduğunda daha düşük başarı göstermişler ve bu tip soruları çözerken zorlandıklarını ifade etmişlerdir.

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

Herhangi bir örüntü problemi ile karşılaşan bir öğrencinin yapması gereken en önemli ve ilk adım örüntüyü tanımlayabilmektir. Yani örüntünün gidişatını ve neye göre hangi şekilde ilerlediğini fark edip bunu matematiksel bir dille yazıya dökebilmesi atılacak ilk adımdır. Bu sayede üst düzey sorulara çözüm bulabilecektir.

Araştırma sonucunda öğrencilerin verilen bir örüntünün genel terimini bulabilmede elde ettikleri başarı %93,42'dir. Öğrenciler genel terimi bulurken, istenen başka bir terimi bulmaya ya da verilen bir terimin hangi adımda olduğunu bulmaya yönelik sorulardan çok daha fazla başarı göstermişlerdir. Öğrenciler; başarısızlık sebeplerini, genellikle verilen problemi anlayamama ya da verilen tabloyu yorumlayamama şeklinde ifade etmişlerdir. Dolayısıyla soruyu algılayamadıklarından örüntü kuralına da ulaşmayı becerememişlerdir. Gökçe ve Yeşildere-İmre'nin çalışmasında ise öğrenciler uzak adımlar için daha kullanışlı bir çözüm yolu geliştiremediklerinde sayma, bütüne genişletme ve farkın çarpılması gibi yöntemler kullanmışlardır. Terim sırası ile terim arasındaki ilişkiyi bir ortak özellik belirlemek için inceleyen öğrenciler ise lineer bir yaklaşım sergileyerek uzak adımları hesaplamada çoğunlukla başarılı olmuşlardır [17]. Yakut Çayır ve Akyüz'ün çalışmasında ise genel terimi bulamayan öğrenciler yanıtı boş bırakmayı tercih etmişlerdir [18].

Örüntüde istenen bir terimi bulmaya yönelik öğrenci başarıları %92,66 olarak hesaplanmıştır. Öğrencilerin en çok zorlandıkları ve en düşük başarıyı gösterdikleri soru



tipleri, herhangi bir örüntü elemanı verilmiş ve bu elemanın örüntünün kaçınıcı adımında yer aldığını bulmaları gereken sorulardır. Verilen bir örüntü elamanının hangi adıma ait olduğunu bulma konusunda öğrencilerin elde ettiği başarı %81,45 olmuştur. Öğrenciler ile yapılan görüşmeler değerlendirildiğinde temel problemin, öğrencilerin bu sorular için gereken denklemi kuramamaları ya da kursalar bile denklemi çözmekte zorlandıkları veya yanlış çözdükleri anlaşılmıştır. Çayir'in çalışmasında da olduğu gibi öğrenciler genel terimi rahatlıkla bulmuş, bunun yanında verilen bir adımdaki örüntü elemanını da sorun yaşamadan elde etmişlerdir [19]. Ancak örüntünün herhangi bir elemanı verilip bu elemanın örüntünün hangi adımında olduğunun bulunması istendiğinde, başka bir deyişle soru tersten sorulduğunda aynı başarıyı elde edememişlerdir.

Öğrenciler tarafından verilen örüntüyü modelleme, yani şekil ile ifade etme en az yanlış yapılan soru tipidir. Öğrenciler bu sorularda %97 başarı elde etmişlerdir. Başarılı olmayan öğrenciler ise modelleme hakkında bilgisi olmayan öğrencilerdir.

Bu araştırmada öğrencilerin örüntülerde en zorlandıkları konunun, problem ile verilen örüntü tipleri olduğu tespit edilmiştir. Problemdaki örüntüyü hiç keşfedemeyen, verilen problem için yorum yapamayan öğrenciler olduğu gibi, problemi anlasa da bunu yazıya dökmekte, yani istenen cebirsel ifadeye ulaşmakta güçlük çeken öğrenciler de vardır. Örüntünün ilk teriminde hata yapan bir öğrenci, diğer tüm işlemleri doğru yapsa da yanlış sonucu elde etmiştir. Bunların yanı sıra “problemse çözemem” önyargısından soruları yanıtlamayan öğrenciler de vardır. Evirgen'nin de çalışmasında belirttiği gibi hemen hemen her öğrencide küçük yaşlardan itibaren matematik dersi için problem içeren sorulardan korkma ve yapamayacağını düşünme önyargısı vardır [20]. Bu araştırmada da strese giren ve sonuçta verilen problemi keşfedemeyen öğrenciler yer almaktadır. Bunun temel sebebi öğrencilerin okumayı sevmemesi, kitap okuma alışkanlıklarının olmaması olarak görülmektedir. Bu da okumanın, Österholm çalışmasında da ifade ettiği gibi, problem çözümüne etkisini bir kez daha göstermektedir [21]. Araştırmada problem içeren örüntülerdeki öğrenci başarısı %83 olarak hesaplanmıştır ki bu diğerlerine göre en düşük olan başarı yüzdesidir.

Bu araştırmaya göre örüntü konusunda öğrenci başarısını etkileyen en önemli sebeplerden birinin örüntünün sunuluş şekli olduğu ortaya çıkmıştır. Sunum şekline göre öğrencilerin en çok başarı gösterdikleri tür, şekil ile verilen örüntüler olmuştur. Bu sonuç Chua ve Hoyles'un çalışmalarıyla da paralellik göstermektedir [22]. Bunun sebebi; öğrencilerin görsel şemalardan hoşlanması ve bunları daha kolay algılayıp, yönetebilmesi olarak gösterilebilir. Yaşları itibariyle sürekli oynadıkları bilgisayar, tablet ya da telefon oyunlarıyla, şekil ile verilen örüntüleri bağdaştırdıkları, bu yüzden de daha eğlenceli görüp, örüntünün sonraki adımlarını rahatlıkla buldukları düşünülebilir. Özdemir ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışmada ise tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Çalışmalarında örüntü kuralını bulmak için görsel stratejilerden herhangi birini kullanan öğrenciye rastlayamamışlardır ve öğrenciler soru çözümlerinde görsel ilişkilerden ziyade, sayısal ilişkilere odaklanmışlardır [23].

Araştırmada şekil ile sunulan örüntülerde öğrenci başarısı %98,66 olarak hesaplanmıştır. Şekil örüntülerinden sonra öğrencilerin en sevdiği tür, sayı örüntüleridir. Sayı örüntülerinde terimler açık şekilde, sırasıyla verildiğinden öğrenciler örüntünün terimleri arasındaki ilişkiyi kolayca fark edebilmektedirler. Öğrenciler, sayı örüntülerinde genel terime ulaşamamaları bile yakın adımları, örüntüye devam ederek kendileri bulabilmişlerdir. Araştırmada sayı örüntülerindeki öğrenci başarısı %98 olarak

hesaplanmıştır. Tablo ile verilen örüntülerde öğrenci başarısı daha düşüktür. Öğrenciler tabloları yorumlamakta ve örüntüyü fark etmekte oldukça zorlanmışlardır. Verilen tablonun tek bir örüntü değil de, birden çok örüntü içerdiğini düşünen öğrenciler olmuştur. Bunun yanı sıra tabloda bir örüntü olduğunu fark etseler bile bunu yazıya dökemeyen, genel terime ulaşmakta zorluk çeken öğrenciler de oldukça fazladır. Tablo ile verilen örüntü için öğrencilerin çoğu görüşme sırasında “Sayı örüntüsü şeklinde verilse ben bunu yapardım.” diye belirtmişlerdir. Tabloda terim sayılarının ve ilgili terimlerin yer aldığı sorular öğrenciler tarafından anlaşılammıştır. Araştırmada tablo ile sunulan örüntülerde öğrenci başarısı %94’dür. Bu sonuç Lannin, Barker ve Townsend’in çalışmalarındaki sonuçlarla benzerdir [24, 25]. Looney ise bir çalışmada öğrencilerin şekil örüntülerini, tablo örüntülerinden daha çok sevdiklerini, soruları daha kolay yanıtladıklarını ve bu yüzden başarılarının da daha yüksek olduğunu savunmuştur. Problem şeklinde sunulan örüntülerde genellikle örüntü bir sözel problemin içine gizlenmiştir. Bu tarz sorularda öğrencilerin öncelikle soruyu doğru algılamaları, daha sonra sorudaki örüntüyü fark etmeleri ve en sonunda bu örüntüyü çözüp sorunun yanıtına ulaşmaları gerekir [26]. Bu uzun adımlar sebebi ile öğrencilerin başarılarının en düşük olduğu örüntü sunum şekli Yaman'ın çalışmasında da belirtildiği gibi problem ile verilen örüntülerdir [5]. PISA sınavı sonuçları da bunu desteklemektedir [7, 8]. Öğrenciler ise problem tipinde sorular yerine işlem içeren soruları daha çok sevdiklerini belirtmişler ve bunları daha kolay yanıtlamışlardır.

Bir başka önemli sonuç ise öğrencilerin düşündüklerini matematiksel bir dille ifade edememesidir. Tabloda fark ettikleri bir kuralı sözel olarak söyleyebildikleri halde, cebirsel olarak yazmakta zorlanmaktadırlar. Yıldız ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da öğrencilerin verilen sözel ifadeyi cebirsel ifadeye çevirme sürecinde zorlandıkları dile getirilmektedir [27].

Bu araştırmada, öğrencilerin özellikle tablo ya da problem tipindeki örüntülerde zorlandığı tespit edildiğine göre, bir başka araştırmada, bu iki örüntü tipinde öğrencilerin başarısızlığının temel sebepleri incelenebilir. Öğrencilerin yaşadıkları bu zorlukların giderilmesi için örüntü konusu verilmeden önce öğrencilere denklem kurma ve problem çözme konularının küçük bir tekrarı yapılmalı ve öğrencilere tablo ve grafikler ile ilgili etkinlikler sunulmalıdır. Matematik dersinde, özellikle problem çözme işi, birçok öğrencinin korkulu rüyası olduğuna göre öğrencilerin bu önyargısını kırmaya yönelik çalışmalar yapılabilir. Problem çözmeyi sevdirecek etkinlikler derslerde kullanılabilir. Problem çözenin temel şartı, okuduğunu iyi anlama olduğundan her öğrencide okuma alışkanlığının olması gerekir. Öğrencilere bu alışkanlığı kazandırmak için hem okulda hem de evde geçirdikleri sürelerde okuma saatleri düzenlenebilir. Okumayı özendirilecek etkinlikler düzenlenebilir.

## Kaynaklar

- [1] Yaman, H. ve Umay, A., İlköğretim Öğrencilerinin Sunum Biçimlerine Göre Matematiksel Örüntüleri Algılayışları. **Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, 28(1), 405-416, (2013).
- [2] Yeşildere, S. ve Akkoç, H., Matematik Öğretmen Adaylarının Şekil Örüntülerini G Enelleme Süreçleri. **Pamukkale Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi**, 30(2), 141-153, (2011).

- [3] NCTM, National Council of Teacher of Mathematics, **Principles And Standards For School Mathematics**, Reston, VA-NCTM, (2000).
- [4] Blair, S. L., The Importance of Basic Facts In Mathematics. **Dissertation Abstracts International**, 62 (08), 2705A. (UMI No: 3022967), (2001).
- [5] Yaman, H., İlköğretim Öğrencilerinin Matematiksel Örüntülerdeki İlişkileri Algılayışları Üzerine Bir İnceleme. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, (2010).
- [6] Zaskis, R. ve Liljedahl, P., Generalization Of Patterns: The Tension Between Algebraic Thinking And Algebraic Notation. **Educational Studies In Mathematics**, 49, 379-402, (2002).
- [7] Millî Eğitim Bakanlığı, PISA 2012 Araştırması Ulusal Nihai Rapor. Ankara: Ölçme, Değerlendirme ve Sınav Hizmetleri Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: [ttkb.meb.gov.tr/](http://ttkb.meb.gov.tr/), (2015).
- [8] Millî Eğitim Bakanlığı, Uluslararası Öğrenci Değerlendirme Programı PISA 2015 Ulusal Raporu. Ankara: Ölçme, Değerlendirme ve Sınav Hizmetleri Genel Müdürlüğü. Erişim adresi: [ttkb.meb.gov.tr/](http://ttkb.meb.gov.tr/), (2016).
- [9] Kieran, C., **Learning and Teaching Algebra at the Middle School Through College Levels**, (Ed: F. K. Lester), Second Handbook Of Research On Mathematics Teaching And Learning, Charlotte, NC: Information Age Publishing, 707762, (2007).
- [10] Kocamaz, B., 7.sınıf Öğrencilerinin Örüntüler Konusunda Yaşadıkları Zorlukların Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2020).
- [11] Özkan, U.B., **Eğitim Bilimleri Araştırmaları için Doküman İnceleme Yöntemi**, Ankara: Pegem Akademi, (2019).
- [12] Marshall, C. ve Rossman, G.B., **Designing Qualitative Research**. (Fourth Edition). Thousand Oaks, California: Sage Publications, Inc. s.107, (2006).
- [13] Türnüklü, A., Eğitim Araştırmalarında Etkin Olarak Kullanılabilecek Nitel Bir Araştırma Tekniği: Görüşme. **Kuram ve Uygulamada Eğitim Yönetimi**, 24, 543-559, (2000).
- [14] Yıldırım, A. ve Şimşek, H., **Sosyal Bilimlerde Nitel Araştırma Yöntemleri**, Ankara: Seçkin Yayıncılık, (2008).
- [15] Karasar, N., **Bilimsel Araştırma Yöntemi: Kavramlar İlkeler Teknikler**, Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık, (2016).
- [16] Yıldırım A. ve Şimşek H., **Nitel Araştırma Yöntemleri**, Ankara, Seçkin Yayıncılık, (2003).
- [17] Gökçe, R. ve Yeşildere-İmre, S., The Role of Tasks That Supports Making Algebraic Generalisation in Forming 7th Grade Students' Ability to Generalise, **Gaziantep University Journal of Social Sciences**, 16(1), 194-194, (2017).
- [18] Yakut Çayır, M. ve Akyüz, G., 9.sınıf Öğrencilerinin Örüntü Genelleme Problemlerini Çözme Stratejilerinin Belirlenmesi, **Necatibey Faculty of Education, Electronic Journal of Science and Mathematics Education**, 9(2), 205-229, (2015).
- [19] Çayır, M., 9.sınıf Öğrencilerinin Örüntü Genelleme Problemlerini Çözme Başarılarının ve Kullandıkları Stratejilerin Belirlenmesi. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [20] Evirgen, O., İlköğretim 7.sınıf matematik öğretim programında zor olarak algılanan konular ve öğretmen, öğrenci görüşleri, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2014).

- [21] Österholm, M., A reading comprehension perspective on problem solving. Developing and researching quality in mathematics teaching and learning: proceedings of MADIF 5: **The 5th Swedish Mathematics Education Research Seminar**, Malmö, January 24-25, 2006/[ed] **Christer Bergsten and Barbro Grevholm, Linköping: Svensk förening för matematikdidaktisk forskning (SMDF)**, p.136-145, (2006).
- [22] Chua, B. L., ve Hoyles, C., Teacher And Student Choices Of Generalising Strategies: A Tale Of Two Views?, **5th East Asia Regional Conference on Mathematics Education**, Tokyo. (2010).
- [23] Özdemir, E., Dikici, R. ve Kültür, M.N., Öğrencilerin Örüntüleri Genelleme Süreçleri:7.sınıf Örneği, **K. Ü. Kastamonu Eğitim Dergisi**, 23(2), 523-548, (2015).
- [24] Lannin, J. K., Barker, D. D. ve Townsend, B.E., Recursive and Explicit Rules: How can We Build Student Algebraic Understanding? **Journal of Mathematical Behavior**, 25, 299-317, (2006).
- [25] Lannin, J. K., Barker, D. ve Townsend, B., Algebraic Generalization Strategies: Factors Influencing Student Strategy Selection, **Mathematics Education Research Journal**, 18(3), 3-28, (2006).
- [26] Looney, C. L., A Study of Students' Understanding Of Patterns And Functions In Grades 3-5. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Boston University, Boston. (2004).
- [27] Yıldız, P., Çiftçi, Ş.K., Şengil Akar, Ş., Sezer, E., Ortaokul 7.sınıf Öğrencilerinin Cebirsel İfadeleri ve Değişkenleri Yorumlama Sürecinde Yaptıkları Hatalar, **Hacettepe University Graduate School of Educational Sciences The Journal of Educational Research**, 1(1), 18-31, (2015).

# Approximation in Weighted Orlicz Spaces with a generating Young function that might be non-convex

Ali DOĞU<sup>1,\*</sup>, Yunus Emre YILDIRIR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Balıkesir University, Institute of Science, Cagis Campus, Balıkesir

<sup>2</sup> Balıkesir University Necatibey Faculty of Education, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 27.01.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.06.2021

## Abstract

The aim of this paper is to investigate the order of approximation by some linear summation methods of trigonometric Fourier series in weighted Orlicz spaces which have generating Young functions not necessary to be convex. Obtained estimations base on the fractional modulus of smoothness and the best approximation. Furthermore, a convolution type operator is defined and its estimation by the best approximation is obtained.

**Keywords:** Linear summation processes, Fourier series, trigonometric approximation, weighted Orlicz spaces, Muckenhoupt weight.

## Konveks olması gerekmeyen genelleştirilmiş Young fonksiyonu ile üretilen Ağırlıklı Orlicz Uzaylarında yaklaşım

### Öz

Bu çalışmada, konveks olması gerekmeyen Young fonksiyonları ile üretilen ağırlıklı Orlicz uzaylarında trigonometrik Fourier serilerinin bazı lineer toplam metodları ile yaklaşım problemleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kesirli düzgünlük modülüne ve en iyi yaklaşım sayısına dayanmaktadır. Ayrıca, konvolüsyon tipli dönüşüm tanımlayıp, bu dönüşüm ile en iyi yaklaşım sayısı arasındaki ilişki değerlendirilmiştir.

\* Ali DOĞU, dogualii19831227@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7848-4891>

Yunus Emre YILDIRIR, yildirir@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-5526-4263>

**Anahtar kelimeler:** Lineer toplam metodları, Fourier serileri, trigonometrik yaklaşım, ağırlıklı Orlicz uzayları, Muckenhoupt ağırlık fonksiyonu.

## 1.Introduction

The concept of Orlicz space expands the well-known concept of the space  $L_p$ ,  $p \geq 1$ . The function  $t^p$  in the definition of the space  $L_p$  is replaced by a more general convex function which is called a Young function. Further information about Orlicz space can be found in [11, 17]. Many applications of Orlicz spaces have emerged [16]. On the other hand, in the paper [3], a different approach to the Orlicz space appeared. In this study, Chen generalized the definition of Orlicz space saving almost all known properties of this space. In this generalization, Young function does not have to be convex. Later, in [1] this approach was developed with Muckenhoupt weights and was proved direct and inverse trigonometric approximation theorems in these spaces by Akgun. For the other papers about trigonometric approximation in these spaces, see [2, 12, 22, 4, 23]. We firstly introduce this space.

We denote by  $\Phi$  the class of the strictly increasing functions  $\phi: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$  such that  $\phi(\infty) = \infty$ . Let  $N[p, q]$  be denote the class of even functions  $\varphi \in \Phi$  such that  $\varphi(x)x^{-p}$  is non-decreasing and  $\varphi(x).x^{-q}$  is non-increasing when  $|x|$  is increasing  $(0, \infty)$ . By  $N < p, q >$ , we denote the class of function  $\varphi$  in  $N[p + \varepsilon, q - \delta]$  for some small number  $\varepsilon, \delta > 0$ . Suppose that  $\Phi_p$  denotes the class of function  $M$  in  $N < p, q >$  for some  $1 < p \leq q < \infty$ . We say that the function  $M$  satisfies the condition  $\Delta_2$  if there exists a constant  $c > 0$  and  $u_0 > 0$  such that  $M(2u) \leq cM(u)$  for  $u \geq u_0$ . In this case, we denote  $M \in \Delta_2$ . The functions in  $\Phi_p$ ,  $p > 1$ , are continuous and satisfy the conditions  $M(0) = 0$  and  $M \in \Delta_2$ . These functions may not be convex [3, p. 67-68].

Let  $T = [-\pi, \pi]$ . We say a nonnegative function  $\omega$  is a weight function if it is measurable and positive almost everywhere on  $T$ .

Let  $M \in \Phi_p$ ,  $p > 1$  and  $\omega$  be a weight function on  $T$ . We define  $\varphi_M(t) := M(t)/t$ . Since  $1 < p < \infty$ , we get  $\varphi_M(t) \rightarrow \infty$  as  $t \rightarrow \infty$ . Let  $\psi_M(t)$  be denote the inverse function of positive non-decreasing continuous function  $\varphi_M(t)$ . We set

$$\Phi_M(x) = \int_0^x \varphi_M(t) dt$$

and

$$\Psi_M(x) = \int_0^x \psi_M(t) dt.$$

$\Phi_M$  is a convex function and so  $\Psi_M(x)$  is the complementary function of  $\Phi_M$ , in the sense of Young. We define the weighted Orlicz space as

$$L_{M,\omega}(T) = \left\{ f: T \rightarrow R: f \text{ measurable function and } \int_T \Phi_M(|f(x)|)\omega(x) dx < \infty \right\}$$

On this space, we define Orlicz norm as

$$\|f\|_{M,\omega} := \sup_g \left\{ \int_T (|f(x)g(x)|)\omega(x)dx : \int_T \Psi_M(|g(x)|)\omega(x)dx \leq 1 \right\}$$

and the Luxemburg norm

$$\|f\|_{(M),\omega} := \inf \left\{ k > 0 : \int_T \Phi_M(k^{-1}|f(x)|)\omega(x)dx \leq 1 \right\}.$$

The equivalence

$$\|f\|_{(M),\omega} \sim \|f\|_{M,\omega}$$

is valid [1].

It is seen that  $L_{M,\omega}(T) \subset L^1(T)$  and  $L_{M,\omega}(T)$  is a Banach space with the above norms [1]. This space is called weighted Orlicz space. If we take  $M(x, p) := x^p, 1 < p < \infty$ , then this space becomes the weighted Lebesgue space  $L^p(T, \omega)$ .

A weight function  $\omega: T \rightarrow [0, \infty]$  belongs to the Muckenhoupt class  $A_p$ [14],  $1 < p < \infty$  if

$$\left( \frac{1}{|I|} \int_I \omega(x)dx \right) \left( \frac{1}{|I|} \int_I \omega^{1-p}(x)dx \right)^p \leq C,$$

with a finite constant  $C$  independent of the interval  $I$  with length  $\leq 2\pi$ , where  $|I|$  denotes the length of  $I$ .

Without losing generality, suppose that the Fourier series of  $f$  is

$$\sum_{k=1}^{\infty} c_k(f) e^{ikx} =: \sum_{k=1}^{\infty} A_k(f, x), \tag{1.1}$$

where  $c_k(f), a_v(f)$  and  $b_v(f)$  is the Fourier coefficients of the function  $f \in L_{M,\omega}(T)$ .

Let  $S_n(f, x), (n = 0,1,2, \dots)$  be the  $n$ th partial sum of the series (1.1) at the point  $x$ , that is,

$$S_n(f, x) := \sum_{k=1}^n A_k(f, x).$$

In [1], it was proved that the operator  $S_n: L_{M,\omega}(T) \rightarrow L_{M,\omega}(T)$  is bounded in  $L_{M,\omega}(T)$  if  $M \in \Phi_p, p > 1, \omega \in A_p$  and  $f \in L_{M,\omega}(T)$ . Hence we have [1]

$$\|S_n(f)\|_{(M),\omega} \leq C \|f\|_{(M),\omega} \quad n = 0,1,2, \dots$$

and

$$\|f - S_n(f)\|_{(M),\omega} \leq C \cdot E_n(f)_{(M),\omega} \quad n = 0,1,2, \dots$$

The set of trigonometric polynomials is a dense subset of  $L_{M,\omega}(T)$  since the hypothesis of Lemma 3 of [10] are fulfilled for  $M \in \Phi_p$ ,  $p > 1$ ,  $\omega \in A_p$ .

The well-known Steklov's mean operator is defined as

$$(\sigma_t f)(x) := \frac{1}{2t} \int_{-t}^t f(x+u) du, \quad 0 < t < \pi, x \in T.$$

If  $M \in \Phi_p$ ,  $p > 1$ ,  $\omega \in A_p$ , it was proved that the Hardy Littlewood Maximal function is bounded in  $L_{M,\omega}(T)$  [1]. So, the operator  $\sigma_t$  is bounded in  $L_{M,\omega}(T)$  under conditions  $M \in \Phi_p$ ,  $p > 1$ ,  $\omega \in A_p$ . For  $x, t \in T$ ,  $r > 0$  and  $L_{M,\omega}(T)$  we define

$$\sigma_t^r f(x) := (I - \sigma_t)^r f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k [C_k^r] \frac{1}{(2t)^k} \int_{-t}^t \dots \int_{-t}^t f(x + u_1 + u_2 + \dots + u_k) du_1 \dots du_k,$$

where  $[C_k^r] := \frac{r \cdot (r-1) \dots (r-k+1)}{k!}$  for  $k > 1$ ,  $[C_1^r] := r$  and  $[C_0^r] = 1$  are binomial coefficients. From the inequality

$$|[C_k^r]| \leq \frac{c}{k^{r+1}}, \quad k \in \mathbb{Z}^+$$

we get

$$\sum_{k=0}^{\infty} |[C_k^r]| < \infty$$

and we have

$$\|\sigma_t^r f(x)\|_{M,\omega} \leq c \|f\|_{M,\omega} < \infty$$

if  $M \in \Phi_p$ ,  $p > 1$  and  $\omega \in A_p$ .

The fractional modulus of smoothness of index  $r > 0$  for  $L_{M,\omega}(T)$  is defined as

$$\Omega_{M,\omega}^r(f, \delta) := \sup_{0 < h_i, t \leq \delta} \left\| \prod_{i=1}^{[r]} (I - \sigma_{t_i}) (I - \sigma_t)^{r-[r]} f \right\|_{M,\omega}$$

where  $[r]$  denotes the integer part of  $r$ . Since the operator  $\sigma_t$  is bounded in  $L_{M,\omega}(T)$  we have

$$\Omega_{M,\omega}^r(f, \delta) \leq c \|f\|_{M,\omega}$$

if  $\omega \in A_p$ ,  $1 < p < \infty$ .



The sequence of the best approximation number of  $f \in L_{M,\omega}(\mathbf{T})$  by trigonometric polynomials is defined by

$$E_n(f)_{M,\omega} = \inf_{T_n \in \tau_n} \|f - T_n\|_{M,\omega}$$

where  $\tau_n$  is the set of trigonometric polynomial of degree  $\leq n$ .

Let  $\alpha > 0$  be given. We define fractional derivative (in the sense of Weyl) of a function  $f \in L^1(T)$  as

$$f^{(\alpha)}(x) := \frac{a_0(f)}{2} + \sum_{v=1}^{\infty} v^\alpha A_v \left( f, x + \frac{\alpha\pi}{2v} \right) =: \sum_{v=0}^{\infty} A_v(f^{(\alpha)}, x).$$

Let  $W_{M,\omega}^\alpha, \alpha > 0$ , be the class of function  $f \in L_{M,\omega}(\mathbf{T})$  such that  $f^{(\alpha)} \in L_{M,\omega}(\mathbf{T})$ . If  $\alpha > 0, 1 < p < \infty$ , then  $W_{M,\omega}^\alpha$  becomes a Banach space with the norm

$$\|f\|_{W_{M,\omega}^\alpha} := \|f\|_{L_{M,\omega}} + \|f^{(\alpha)}\|_{L_{M,\omega}}.$$

Let  $\{\lambda_v^{(n)}\}, n = 0, 1, \dots, v = 0, 1, \dots, n$  be an arbitrary infinite triangular number matrix. We associate every function  $f \in L^1(T)$ , on the basis of its Fourier expansion, with a polynomial

$$R_n(f, \lambda) := \frac{a_0}{2} \lambda_0^{(n)} + \sum_{v=1}^n \lambda_v^{(n)} A_v(f, x).$$

Thus, any triangular matrix  $\{\lambda_v^{(n)}\}$  determines a method for constructing the polynomials  $R_n(f, \lambda)$  or, in other words, a specific sequence of polynomial operators  $R_n(f, \lambda)$  defined on the space  $L_1(T)$ . In this case, it is also said that the matrix  $\{\lambda_v^{(n)}\}$  determines a specific method for summation of Fourier series. It is clear that, for every fixed  $n$ , the operators  $R_n(f, \lambda)$  are linear. So, these methods are called linear methods (processes) of summation of Fourier series.

In this work, we investigate some problems about approximation to the derivatives of the functions in  $f \in L_{M,\omega}(\mathbf{T})$  by these linear methods. We estimate the rate of convergence of  $R_n(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}$  to zero in the  $L_{M,\omega}(\mathbf{T})$  norm by the fractional modulus of smoothness and the best approximation.

In this paper, we will use the following notation

$$A(x) \preceq B(x) \Leftrightarrow \exists c > 0: A(x) \leq cB(x).$$

## 2. Main results and discussion

**Theorem 2.1** Let  $M \in \Phi_p, p > 1$ ,  $\omega \in A_p(T)$ , and  $f \in L_{M,\omega}(T)$ . We assume that

$$\sum_{v=1}^{\infty} v^{\alpha-1} E_v(f)_{M,\omega} < \infty$$

for some  $\alpha \in (0, \infty)$ . Then for an arbitrary triangular matrix of the numbers  $\{\lambda_v^{(n)}\}$  ( $\lambda_0^{(n)} = 1, \lambda_v^{(n)} = 0, v > n, n = 0, 1, 2, \dots$ ), we have

$$\|R_n(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{M,\omega} \leq \Omega_{M,\omega}^r(f^{(\alpha)}, \frac{1}{n}).$$

**Theorem 2.2** Let  $M \in \Phi_p, p > 1$ ,  $\omega \in A_p(T)$ , and  $f \in L_{M,\omega}(T)$ . We assume that

$$\sum_{v=1}^{\infty} v^{\alpha-1} E_v(f)_{M,\omega} < \infty$$

for some  $\alpha \in (0, \infty)$ . Then for an arbitrary triangular matrix of the numbers  $\{\lambda_v^{(n)}\}$  ( $\lambda_0^{(n)} = 1, \lambda_v^{(n)} = 0, v > n, n = 0, 1, 2, \dots$ ), we have

$$\|R_n(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{M,\omega} \leq \left(E_{2^{\mu-1}}^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \delta_{2^\mu, n}^\gamma\right)^{\frac{1}{\gamma}} + E_n(f^{(\alpha)})_{M,\omega}$$

where  $\gamma = \min(2, p + \varepsilon)$  with a small positive number  $\varepsilon$  and

$$\delta_{2^\mu, n}^\gamma := \sum_{v=2^\mu}^{2^{\mu+1}-1} \left| \lambda_{v+1}^{(n)} - \lambda_v^{(n)} \right| + \left| 1 - \lambda_{2^{\mu+1}}^{(n)} \right|$$

$(2^m \leq n < 2^{m+1}).$

**Corollary 2.1** Let  $\lambda_v^{(n)} = 1 - \frac{v}{n+1}$  for  $0 \leq v \leq n$  and  $\lambda_v^{(n)} = 0$  for  $v > n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Then, for the Fejer means, we have

$$\|R_n(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{M,\omega} \leq \frac{1}{n+1} \left( \sum_{\mu=0}^m (\mu+1)^{\gamma-1} E_\mu^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \right)^{1/\gamma}.$$

**Corollary 2.2** Let  $\lambda_v^{(n)} = 1 - \frac{v^k}{(n+1)^k}$  for  $0 \leq v \leq n$  and  $\lambda_v^{(n)} = 0$  for  $v > n$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Then, for the Zygmund means, we have

$$\|R_n(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{pq,\omega} \leq \frac{1}{(n+1)^k} \left( \sum_{\mu=0}^m (\mu+1)^{\gamma k-1} E_\mu^\gamma(f^{(\alpha)})_{pq,\omega} \right)^{1/\gamma}.$$

For  $\lambda_\nu(r) = r^\nu$  ( $0 \leq r < 1, \nu = 0, 1, 2, \dots$ ) we define

$$R_r(f, \lambda) := \sum_{\nu=0}^{\infty} \lambda_\nu(r) A_\nu(f, x).$$

**Theorem 2.3** Let  $M \in \Phi_p, p > 1, \omega \in A_p(T)$  and  $f \in L_{M,\omega}(T)$ . We assume that

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \nu^{\alpha-1} E_\nu(f)_{M,\omega} < \infty$$

for some  $\alpha \in (0, \infty)$ . Then, for the Abel-Poisson means, we have

$$\| R_r(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)} \|_{M,\omega} \leq \left( (1-r) \sum_{\nu=0}^{\infty} r^\nu (\nu+1)^{\gamma-1} E_{2^\nu-1}^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

where  $\gamma = \min(2, p + \varepsilon)$  with a small positive number  $\varepsilon$ .

The similar theorems have been proved in different function spaces for  $\alpha = 0$  and  $\gamma = 1$  [5, 7, 8, 9, 13, 18, 19, 20, 21].

For the function  $f \in L_{M,\omega}(T)$ , we defined a mean value operator  $B_h f$

$$(B_h f)(x, u) := \frac{1}{2h} \int_{-h}^h f(x + tu) dt, \quad 0 < h < \pi, \quad x \in T, \quad -\infty < u < \infty.$$

For  $M \in \Phi_p, p > 1, \omega \in A_p(T)$ , this operator is a bounded linear operator [1]. By means of the operator  $B_h$  we define a convolution operator

$$\int_{-\infty}^{\infty} (B_h f)(\cdot, u) d\mu(u)$$

with a bounded variation function  $\mu(u)$  on the real line and denote

$$D(f, \mu, h, M) := \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (B_h f)(\cdot, u) d\mu(u) \right\|_{M,\omega}.$$

In the approximation theory, the convolution operators are widely used. This type operators have important applications in this theory. Especially, these operators are very useful in constructing approximating polynomials in trigonometric approximation. In different function spaces, evaluating these operators with the best approximation numbers is an important problem in the approximation theory. Now, we investigate the relations between these transforms and the best approximations in the weighted Orlicz spaces.

**Theorem 2.4** Let  $M \in \Phi_p, p > 1, \omega \in A_p(T)$ , and  $f \in L_{M,\omega}(T)$ . We assume that

$$\sum_{v=1}^{\infty} v^{\alpha-1} E_v(f)_{M,\omega} < \infty$$

for some  $\alpha \in (0, \infty)$ . Then, for every natural number  $m$

$$D(f^{(\alpha)}, \mu, h, M) \leq \sum_{r=0}^m \left( E_{2^r}^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \delta_{2^r,h}^\gamma \right)^{\frac{1}{\gamma}} + E_{2^{m+1}}(f^{(\alpha)})_{M,\omega}$$

where  $\gamma = (2, p + \varepsilon)$  with a small positive number  $\varepsilon$  and

$$\delta_{2^r,h}^\gamma := \sum_{l=2^r}^{2^{r+1}} |\hat{\mu}(lh) - \hat{\mu}((l+1)h) + \hat{\mu}(2^r h)|,$$

$$\hat{\mu}(x) := \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin ux}{ux} d\mu(u), \quad 0 < h \leq \pi.$$

**Theorem 2.5** Let  $M \in \Phi_p, p > 1$ ,  $\omega \in A_p(T)$ , and  $f \in L_{M,\omega}(T)$ . We assume that

$$\sum_{v=1}^{\infty} v^{\alpha-1} E_v(f)_{M,\omega} < \infty$$

for some  $\alpha \in (0, \infty)$ . Suppose that the function  $F(x)$  satisfies the conditions

$$\|F(x)\| \leq c_1, \quad \sum_{k=2^\mu}^{2^{\mu+1}-1} |F(kh) - F((k+1)h)| \leq c_2, \quad h \leq 2^{-\mu-1}$$

with some constants  $c_1, c_2$ . If  $\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2$  are the functions satisfying the condition

$$\hat{\mu}_1(x) = \hat{\mu}_2(x)F(x), \quad |x| < 1$$

then

$$D(f^{(\alpha)}, \mu_1, h, M) \leq D(f^{(\alpha)}, \mu_2, h, M) + E_{2^{m+1}}(f^{(\alpha)})_{M,\omega}.$$

In [15], the convolution operator was defined by means of the usual shift  $f(x+t)$  and these theorems were proved in Orlicz spaces with  $\alpha = 0, \gamma = 1$ . Using the operator  $B_h$  these theorems were proved in weighted Orlicz spaces, in which the Young function is convex, in [24] with  $\alpha = 0, \gamma = 1$ . This problem was also investigated in weighted Lorentz spaces [23] and variable exponent Lebesgue spaces [6] with  $\alpha = 0, \gamma = 1$ . The similar problem was investigated in [4] with  $\alpha = 0$ .

### 3. Auxiliary results

We give multiplier theorem and Littlewood-Paley theorem in the space  $L_{M,\omega}(\mathbf{T})$ .

**Theorem 3.1** [1] Let a sequence  $\xi_k$  satisfy the conditions

$$|\xi_k| \leq A, \quad \sum_{k=2^{j-1}}^{2^j-1} |\xi_k - \xi_{k+1}| \leq A$$

where  $A > 0$  is independent of  $k$  and  $j$ . If  $M \in \Phi_p, p > 1, \omega \in A_p(T)$ , and  $f \in L_{M,\omega}(\mathbf{T})$  then there exists a function  $F \in L_{M,\omega}(\mathbf{T})$  such that the series

$$\frac{\lambda_0 a_0}{2} + \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k (a_k(f) \cos kx + b_k(f) \sin kx)$$

is Fourier series for  $F$  and the inequality

$$\|F\|_{M,\omega} \leq CA \|f\|_{M,\omega}$$

holds with some constant  $C$  independent of  $f$ .

**Theorem 3.2** [1]  $M \in \Phi_p, p > 1, \omega \in A_p(T)$ , and  $f \in L_{M,\omega}(\mathbf{T})$  there exist constants  $C > 0$  and  $c > 0$  depending only on  $M$  and  $\omega$  such that

$$c \|f\|_{M,\omega} \leq \left\| \left( \sum_{j=0}^{\infty} \left| \sum_{k=2^{j-1}}^{2^j-1} A_k(x, f) \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\|_{M,\omega} \leq C \|f\|_{M,\omega}.$$

### 4. Proofs of main results

**Proof of Theorem 2.1** Let  $2^m \leq h < 2^{m+1}$ . Under the conditions of the theorem, we have  $f \in \mathcal{W}_{M,\omega}^{(\alpha)}(\mathbf{T})$  [1]. Let

$$S_n(f^{(\alpha)}, x) := \sum_{v=1}^n A_v(f^{(\alpha)}, x)$$

be the partial some of Fourier series of the function  $f^{(\alpha)}$ . By the properties of the norm, we have

$$\|R_n(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{M,\omega} = \left\| \sum_{v=0}^n \lambda_v^{(n)} A_v(f^{(\alpha)}, x) - f^{(\alpha)}(x) \right\|_{M,\omega}$$

$$\leq \left\| \sum_{v=0}^n (1 - \lambda_v^{(n)}) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega} + \left\| \sum_{v=n+1}^{\infty} A_v f^{(\alpha)}(x) \right\|_{M,\omega} =: I_1 + I_2.$$

From [4, Lemma 2.1] and [1, Th 1.5 and Th.1.1] we get

$$I_2 = \left\| \sum_{v=n+1}^{\infty} A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega} \leq E_n(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \leq \Omega_{M,\omega}^r(f^{(\alpha)}, \frac{1}{n}).$$

Now we estimate the norm

$$I_1 = \left\| \sum_{v=0}^n \frac{1 - \lambda_v^{(n)}}{\left(1 - \frac{\sin \frac{v}{n}}{v}\right)^r} A_v(f^{(\alpha)}, x) \left(1 - \frac{\sin \frac{v}{n}}{v}\right)^r \right\|_{M,\omega}.$$

Let

$$\mu_{v,r}^{(n)} := \begin{cases} \frac{(1 - \lambda_v^{(n)})}{\left(1 - \frac{\sin \frac{v}{n}}{v}\right)^r}, & v \leq n, \\ 0 & v > n. \end{cases}$$

For the sequence  $\{\mu_{v,r}^{(n)}\}$  the conditions of Theorem 3.1 are satisfied. Applying Theorem 3.1 and the proof method in [1, Th. 1.9] we get

$$\begin{aligned} I_1 &= \left\| \sum_{v=0}^n \mu_{v,r}^{(n)} A_v(f^{(\alpha)}, x) \left(1 - \frac{\sin \frac{v}{n}}{v}\right)^r \right\|_{M,\omega} \leq \left\| \sum_{v=0}^n A_v(f^{(\alpha)}, x) \left(1 - \frac{\sin \frac{v}{n}}{v}\right)^r \right\|_{M,\omega} \\ &\leq \|(I - \sigma_{1/n})^r f^{(\alpha)}\|_{M,\omega} = \left\| \sum_{v=0}^n (I - \sigma_{1/n})^{[r]} (I - \sigma_{1/n})^{r-[r]} f^{(\alpha)} \right\|_{M,\omega} \\ &\leq \sup_{0 < h_i, t \leq \frac{1}{n}} \left\| \prod_{i=1}^{[r]} (I - \sigma_{h_i}) (I - \sigma_t)^{r-[r]} f^{(\alpha)} \right\|_{M,\omega} \leq \Omega_{M,\omega}^r(f^{(\alpha)}, \frac{1}{n}) \end{aligned}$$

This proves Theorem 2.1.

**Proof of Theorem 2.2** Let  $2^m \leq h < 2^{m+1}$ . We have

$$\|R_n(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{M,\omega} = \left\| \sum_{v=0}^n \lambda_v^{(n)} A_v(f^{(\alpha)}, x) - (f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega}$$

$$\begin{aligned} &\leq \left\| \sum_{v=0}^n (1 - \lambda_v^{(n)}) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega} + \left\| \sum_{v=n+1}^{\infty} A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega} \\ &\leq \left\| \sum_{v=1}^n (1 - \lambda_v^{(n)}) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega} + E_n(f^{(\alpha)})_{M,\omega}. \end{aligned}$$

From Theorem 3.2, we get

$$\left\| \sum_{v=1}^n (1 - \lambda_v^{(n)}) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega} \leq c \left\| \left( \sum_{\mu=0}^m \left| \sum_{v=2^\mu}^{2^{\mu+1}-1} (1 - \lambda_v^{(n)}) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\|_{M,\omega}.$$

Using the Abel transformation, we obtain

$$\begin{aligned} \sigma_{n,\mu}(x) &:= \sum_{v=2^\mu}^{2^{\mu+1}-1} (1 - \lambda_v^{(n)}) A_v(f^{(\alpha)}, x) \\ &= \sum_{v=2^\mu}^{2^{\mu+1}-1} (S_v(f, x) - S_{2^\mu-1}(f, x)) (\lambda_{v+1}^{(n)} - \lambda_v^{(n)}) \\ &\quad + (S_{2^{\mu+1}-1}(f, x) - S_{2^\mu-1}(f, x)) (1 - \lambda_{2^{\mu+1}}^{(n)}). \end{aligned}$$

From Minkowski's inequality and the monotonicity of the sequence of the best approximation numbers, we get

$$\begin{aligned} \|\sigma_{n,\mu}(x)\|_{M,\omega} &\leq \sum_{v=2^\mu}^{2^{\mu+1}-1} \|S_v(f, x) - S_{2^\mu-1}(f, x)\|_{M,\omega} |\lambda_{v+1}^{(n)} - \lambda_v^{(n)}| \\ &\quad + \|S_{2^{\mu+1}-1}(f, x) - S_{2^\mu-1}(f, x)\|_{M,\omega} |1 - \lambda_{2^{\mu+1}}^{(n)}| \\ &\leq c E_{2^\mu-1}(f)_{M,\omega} \left( \sum_{v=2^\mu}^{2^{\mu+1}-1} |\lambda_{v+1}^{(n)} - \lambda_v^{(n)}| + |1 - \lambda_{2^{\mu+1}}^{(n)}| \right) \\ &\leq c E_{2^\mu-1}(f)_{M,\omega} \delta_{2^\mu, n}. \end{aligned}$$

On the other hand, we have [1]

$$\left\| \left( \sum_{\mu=0}^m |\sigma_{n,\mu}(x)|^2 \right)^{1/2} \right\|_{M,\omega} \leq c \left( \sum_{\mu=0}^m \|\sigma_{n,\mu}(x)\|^\gamma \right)^{1/\gamma}, \tag{4.1}$$

where  $\gamma = \min(2, p + \varepsilon)$  with a small positive number  $\varepsilon$ . Therefore, we obtain the required inequality

$$\left\| \sum_{v=0}^n (1 - \lambda_v^{(n)}) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M, \omega} \leq c \left( \sum_{\mu=0}^m E^\gamma_{2^{\mu-1}}(f^{(\alpha)})_{M, \omega} \cdot \delta^\gamma_{2^\mu, n} \right)^{1/\gamma}.$$

**Proof of Theorem 2.3** Let  $2^m \leq n = \left\lfloor \frac{1}{1-r} \right\rfloor < 2^{m+1}$  and  $\lambda_v(r) = r^v$ ,  $0 \leq r < 1$ ,  $v = 0, 1, 2, \dots$  We have

$$\begin{aligned} \|R_r(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{M, \omega} &= \left\| \sum_{v=0}^{\infty} (1 - r^v) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M, \omega} \\ &= \left\| \sum_{v=0}^{2^{m+1}-1} (1 - r^v) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M, \omega} + \left\| \sum_{v=2^{m+1}-1}^{\infty} (1 - r^v) A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M, \omega} =: I_1 + I_2. \end{aligned}$$

It is easily seen that the conditions of Theorem 3.1 are satisfied for the sequence  $\{1 - r^v\}$ . Then, by Theorem 3.1, [4, Lemma 2.1] and [1, Th.1.5] we have

$$I_2 \leq c \left\| \sum_{v=2^{m+1}}^{\infty} A_v(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M, \omega} \leq c E_n(f^{(\alpha)})_{M, \omega}.$$

From Theorem 3.2 and (4.1)

$$\begin{aligned} I_1 &\leq \left\| \left( \sum_{v=0}^m \left| \sum_{\mu=2^v}^{2^{v+1}-1} (1 - r^\mu) A_\mu(f^{(\alpha)}, x) \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\|_{M, \omega} \\ &\leq \left( \sum_{v=0}^m \left\| \sum_{\mu=2^v}^{2^{v+1}-1} (1 - r^\mu) A_\mu(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M, \omega}^\gamma \right)^{\frac{1}{\gamma}}. \end{aligned}$$

Applying Abel's transform and Theorem 3.1, we get

$$\begin{aligned} &\left\| \sum_{\mu=2^v}^{2^{v+1}-1} (1 - r^\mu) A_\mu(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M, \omega} \\ &\leq \sum_{\mu=2^v}^{2^{v+1}-1} \|S_\mu(f^{(\alpha)}, x) - S_{2^v-1}(f^{(\alpha)}, x)\|_{M, \omega} |r^{\mu+1} - r^\mu| \\ &\quad + \|S_{2^{v+1}-1}(f^{(\alpha)}, x) - S_{2^v-1}(f^{(\alpha)}, x)\|_{M, \omega} |1 - r^{2^{v+1}}| \\ &\leq c E_{2^v-1}(f^{(\alpha)})_{M, \omega} 2^{v+1} (1 - r). \end{aligned}$$

From the monotonicity of the best approximation, we have



$$\begin{aligned} & \left\| \sum_{\mu=2^v}^{2^{v+1}-1} (1-r^\mu) A_\mu(f^{(\alpha)}, x) \right\|_{M,\omega}^\gamma \leq c E_{2^{v-1}}^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} 2^{\gamma(v+1)} (1-r)^\gamma \\ & \leq c(1-r)^\gamma \sum_{\mu=2^{v-1}}^{2^v-1} E_{2^{v-1}}^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega}. \end{aligned}$$

Then we get

$$\begin{aligned} I_1 & \leq c \left( (1-r)^\gamma \|A_1(f^{(\alpha)}, x)\|_{M,\omega}^\gamma (1-r)^\gamma \sum_{\mu=2^{v-1}}^{2^v-1} \mu^{\gamma-1} E_\mu^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \\ & \leq c \left( (1-r) \sum_{\mu=0}^n (\mu+1)^{\gamma-1} E_\mu^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \right)^{1/\gamma}. \end{aligned}$$

Therefore, we have

$$\begin{aligned} \|R_r(f^{(\alpha)}, \lambda) - f^{(\alpha)}\|_{M,\omega} & \leq c(1-r) \left( \sum_{\mu=0}^n (\mu+1)^{\gamma-1} E_\mu^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \right)^{1/\gamma} + E_n(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \\ & \leq c(1-r) \left( \sum_{\mu=0}^n r^\mu (\mu+1)^{\gamma-1} E_\mu^\gamma(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \right)^{1/\gamma}. \end{aligned}$$

**Proof of Theorem 2.4** Let  $m \in \mathbb{N}$ ,  $2^m \leq h < 2^{m+1}$ . Under the conditions of the theorem, we have  $f \in \mathcal{W}_{M,\omega}^{(\alpha)}(\mathbf{T})$  [1]. We suppose that

$$S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)} := \sum_{k=1}^{2^{m+1}} c_k(f^{(\alpha)}) e^{ikx}$$

is the partial sum of Fourier series of the function  $f^{(\alpha)}$ . From the definition of the quantity  $D(f^{(\alpha)}, \mu, h, M)$  and the properties of the norm we have

$$\begin{aligned} D(f^{(\alpha)}, \mu, h, M) & = \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (B_h f^{(\alpha)})(x, u) d\mu(u) \right\|_{M,\omega} \\ & \leq \left\| \int_{-\infty}^{\infty} [(B_h f^{(\alpha)})(x, u) - (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u)] d\mu(u) \right\|_{M,\omega} \\ & + \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u) d\mu(u) \right\|_{M,\omega}. \end{aligned}$$

By the boundedness of the operator  $B_h$  and [1,Th.1.5], we obtain

$$\begin{aligned}
& \left\| \int_{-\infty}^{\infty} [(B_h f^{(\alpha)})(x, u) - (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u)] d\mu(u) \right\|_{M, \omega} \\
& \leq c \int_{-\infty}^{\infty} \|(B_h f^{(\alpha)})(x, u) - (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u)\|_{M, \omega} d\mu(u) \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \|(B_h (f^{(\alpha)} - \sigma_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)}))(x, u)\|_{M, \omega} d\mu(u) \\
& \leq c \int_{-\infty}^{\infty} \|f^{(\alpha)} - S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)}\|_{M, \omega} d\mu(u) \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \|f^{(\alpha)} - S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)}\|_{M, \omega} d\mu(u) \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \|f^{(\alpha)} - S_{2^{m+1}}^{(\alpha)}\|_{M, \omega} d\mu(u) \\
& \leq c E_{2^{m+1}}(f^{(\alpha)})_{M, \omega}.
\end{aligned}$$

So, we have

$$D(f^{(\alpha)}, \mu, h, M) \leq \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (\sigma_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u) d\mu(u) \right\|_{M, \omega} + c E_{2^{m+1}}(f^{(\alpha)})_{M, \omega}.$$

Then we get

$$\begin{aligned}
& \int_{-\infty}^{\infty} (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u) d\mu(u) = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{2h} \int_{-h}^h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)}(x + tu) dt \right) d\mu(u) \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \sum_{r=1}^{2^{m+1}} c_r(f^{(\alpha)}) e^{ir(x+tu)} dt \right) d\mu(u) \\
& = \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{2h} \sum_{r=1}^{2^{m+1}} c_r(f^{(\alpha)}) e^{irx} \int_{-h}^h e^{irtu} dt \right) d\mu(u) \\
& = \sum_{r=1}^{2^{m+1}} c_r(f^{(\alpha)}) e^{irx} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{irhu} - e^{-irhu}}{2irhu} d\mu(u) \\
& = \sum_{r=1}^{2^{m+1}} A_r(f^{(\alpha)}, x) \hat{\mu}(rh).
\end{aligned}$$

Therefore, we have

$$D(f^{(\alpha)}, \mu, h, M) \leq \left\| \sum_{r=1}^{2^{m+1}} A_r(f^{(\alpha)}, x) \hat{\mu}(rh) \right\|_{M,\omega} + E_{2^{m+1}}(f^{(\alpha)})_{M,\omega}.$$

From Theorem 3.2 and [1], we obtain

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{r=1}^{2^{m+1}} A_r(f^{(\alpha)}, x) \hat{\mu}(rh) \right\|_{M,\omega} &\leq \left\| \left( \sum_{r=0}^m \left| \sum_{l=2^r}^{2^{r+1}} A_l(x) \hat{\mu}(lh) \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\|_{M,\omega} \\ &:= c \left\| \left( \sum_{r=0}^m \Delta_{r,\mu}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\|_{M,\omega} \leq c \left\| \sum_{r=0}^m (\Delta_{r,\mu}^2)^{\frac{1}{2}} \right\|_{M,\omega} \\ &\left\| \left( \sum_{r=0}^m \Delta_{r,\mu}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\|_{M,\omega} \leq c \sum_{r=0}^m (\|\Delta_{r,\mu}^\gamma\|_{M,\omega})^{1/\gamma}. \end{aligned}$$

Applying the Abel transform to  $\Delta_{r,\mu}$ , we get

$$\begin{aligned} \Delta_{r,\mu} &= \sum_{l=2^r}^{2^{r+1}} [S_l f^{(\alpha)}(x) - S_{2^{r+1}} f^{(\alpha)}(x)] (\hat{\mu}(lh) - \hat{\mu}((l+1)h)) \\ &\quad + [S_{2^{r+1}} f^{(\alpha)}(x) - S_{2^r} f^{(\alpha)}(x)] \hat{\mu}(2^r h). \end{aligned}$$

From [1, Th. 1.5],

$$\begin{aligned} \|\Delta_{r,\mu}\|_{M,\omega} &= \sum_{l=2^r}^{2^{r+1}} \|S_l f^{(\alpha)}(x) - S_{2^{r+1}} f^{(\alpha)}(x)\|_{M,\omega} (\hat{\mu}(lh) - \hat{\mu}((l+1)h)) \\ &\quad + \|S_{2^{r+1}} f^{(\alpha)}(x) - S_{2^r} f^{(\alpha)}(x)\|_{M,\omega} \hat{\mu}(2^r h) \\ &\leq E^\gamma_{2^r}(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \cdot \delta^\gamma_{2^r,h}. \end{aligned}$$

Then

$$\left\| \sum_{r=1}^{2^{m+1}-1} A_r(f^{(\alpha)}) e^{irx} \hat{\mu}(rh) \right\|_{M,\omega} \leq c \left( \sum_{r=0}^m E^\gamma_{2^{r-1}}(f^{(\alpha)})_{M,\omega} \cdot \delta^\gamma_{2^r,h} \right)^{\frac{1}{\gamma}}.$$

This completes the proof.

**Proof of Theorem 2.5** Under the conditions of the theorem, we have  $f \in \mathcal{W}_{M,\omega}^{(\alpha)}(\mathbf{T})$  [1]. We have

$$D(f^{(\alpha)}, \mu_1, h, M) \leq \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u) d\mu(u) \right\|_{M, \omega} + E_{2^{m+1}}(f^{(\alpha)})_{M, \omega}$$

From the the properties of the function and Theorem 3.1, we obtain

$$\begin{aligned} & \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u) d\mu_1(u) \right\|_{M, \omega} = \left\| \sum_{r=1}^{2^{m+1}} c_r(f^{(\alpha)}) e^{irx} \mu_1(rh) \right\|_{M, \omega} \\ & = \left\| \sum_{r=1}^{2^{m+1}} c_r(f^{(\alpha)}) e^{irx} \mu_2(rh) F(rh) \right\|_{M, \omega} \\ & \leq c \left\| \sum_{r=1}^{2^{m+1}} c_r(f^{(\alpha)}) e^{irx} \mu_2(rh) \right\|_{M, \omega} = \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (B_h S_{2^{m+1}} f^{(\alpha)})(x, u) d\mu_2(u) \right\|_{M, \omega} \\ & = \left\| S_{2^{m+1}} \int_{-\infty}^{\infty} (B_h f^{(\alpha)})(x, u) d\mu_2(u) \right\|_{M, \omega} \leq c \left\| \int_{-\infty}^{\infty} (B_h f^{(\alpha)})(x, u) d\mu_2(u) \right\|_{M, \omega}. \end{aligned}$$

This completes the proof.

## References

- [1] Akgün, R., Some inequalities of trigonometric approximation in weighted Orlicz spaces, **Mathematica Slovaca**, 66, 1, 217-234, (2016).
- [2] Akgün, R. and Koç, H., Simultaneous approximation of functions in Orlicz spaces with Muckenhoupt weights, **Complex Variables and Elliptic Equations**, 61, 8, 1107-1115, (2016).
- [3] Chen, Y.M., On two-functional spaces, **Studia Mathematica**, 24, 61-88, (1964).
- [4] Dogu, A., Avsar, A.H. and Yildirim, Y.E., Some inequalities about convolution and trigonometric approximation in weighted Orlicz spaces. **Proceeding of the Institute of Mathematics and Mechanics National Academy of Sciences of Azerbaijan**, 44, 1, 107-115, (2018).
- [5] Gavriljuk, V.G., Linear summation methods for the Fourier series and best approximation, **Ukrainian Mathematical Journal**, 15, 4, 412-418, (1963).
- [6] Israfilov, D.M. and Yirtici, E., Convolutions and best approximations in variable exponent Lebesgue spaces, **Mathematical Reports (Bucuresti)**, 18(68), 4, 497-508, (2016).
- [7] Jafarov, S.Z., Linear methods of summing Fourier series and approximation in weight Orlicz spaces, **Turkish Journal of Mathematics**, 42, 6, 2916-2925, (2018).
- [8] Jafarov, S.Z., Approximation by linear means of Fourier series in weighted Orlicz spaces **Proceeding of the Institute of Mathematics and Mechanics National Academy of Sciences of Azerbaijan**, 43, 2, 175-187, (2017).
- [9] Jafarov, S.Z., Approximation by linear means of Fourier series in weighted Lebesgue spaces with variable exponents, **Ukrainian Mathematical Journal**, 66, 10, 1509-1518, (2015).

- [10] Khabazi, M., The mean convergence of trigonometric Fourier series in weighted Orlicz classes, **Proceedings of A. Razmadze Mathematical Institute**, 129, 65-75, (2002).
- [11] Krasnosel'ski, M.A. and Ruticki, Y.B., **Convex functions and Orlicz spaces**, Translated from the first Russian edition by Leo F. Boron, P. Noordho Ltd., Groningen, (1961).
- [12] Koç, H., Simultaneous approximation by polynomials in Orlicz spaces generated by quasiconvex Young functions. **Kuwait J. Science**, 43, 4, 18-31, (2016).
- [13] Kokilashvili, V. and Tsanava, T., "On the norm estimate of deviation by linear summability means and an extension of the Bernstein inequality, **Proceedings of A. Razmadze Mathematical Institute**, 154, 144-146 (2010).
- [14] Muckenhoupt, B., Weighted norm inequalities for the Hardy maximal function, **Transactions of the American Mathematical Society**, 165, 207-226, (1972).
- [15] Ponomarenko, V.G. and Timan, M.F., The properties of convolution type transforms in the Orlicz spaces, theory of approximation of functions, **Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics**, 3, Donetsk, (1998).
- [16] Rao, M.M. and Ren, Z.D., **Applications of Orlicz spaces**, Marcel Dekker Inc., New York, (2002).
- [17] Rao, M.M. and Ren, Z.D., **Theory of Orlicz spaces**, Marcel Dekker Inc., New York, (1991).
- [18] Stechkin, S.B., Approximation of periodic functions by Fejér sums, **Trudy Matematicheskogo Instituta imeni V. A. Steklova**, 2, 48-60, (1961).
- [19] Timan, M.F., Best approximation of a function and linear methods for the summation of Fourier series, **Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk Seriya Matematicheskaya**, 29, 587-604, (1965).
- [20] Timan, M.F., Approximation of continuous periodic functions by linear operators constructed on the basis of their Fourier series, **Doklady Akademii Nauk. SSSR**, 181, 1339-1342, (1968).
- [21] Timan, M.F., Some linear summation processes for the Fourier series and the best approximation, **Doklady Akademii Nauk. SSSR**, 145, 741-743, (1962).
- [22] Yildirim, Y.E. and Cetintas, R., Trigonometric approximation in weighted Orlicz spaces. **Proceeding of the Institute of Mathematics and Mechanics National Academy of Sciences of Azerbaijan**, 42, 1, 25-37, (2016).
- [23] Yildirim, Y.E. and Dogu, A., Approximation in weighted Lorentz spaces, **Journal Mathematical Science: Advances and Applications**, 54, 1-9, (2018).
- [24] Yildirim, Y.E. and Israfilov, D.M., The properties of convolution type transforms in weighted Orlicz spaces, **Glasnik Matematiki**, 65, 461-474, (2010).

# When some complement of a certain submodule is a summand

Yeliz KARA\*

Bursa Uludağ University Faculty of Art and Science, Department of Mathematics, Bursa.

Geliş Tarihi (Received Date): 10.03.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 01.06.2021

## Abstract

*In this study, the modules whose  $p$ -submodules have a complement which is a direct summand are explored. The module theoretical properties such as direct sums and summands are investigated. As opposed to direct sums, this condition does not transfer to the direct summands. Thus, it is examined that under what conditions the direct summands fulfill the property. Examples are given to demonstrate the results.*

**Keywords:** Complement submodule, extending module, projection invariant submodule.

## Belirli alt modüllerinin tümleyeni toplanan olan modüller

### Öz

*Bu çalışmada  $p$ -alt modüllerinin tümleyeni dik toplanan olan modüller araştırılmıştır. Dik toplam ve dik toplanan gibi modül teorik özellikler incelenmiştir. Dik toplamın aksine, bu modül özelliği dik toplananlara taşınmadığından, hangi koşullar altında ilgili özelliğin dik toplananlara aktarıldığı üzerinde çalışılmıştır. Elde edilen sonuçları niteleyen örneklere yer verilmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Tümleyen alt modül, genişleyen modül, projeksiyon değişmez alt modül.

### 1. Introduction

All rings are associative with unity and modules are unital right modules.  $\mathcal{R}$  and  $\mathcal{M}$  denote a ring and a module, respectively. Recall that a module is *extending* [1], if every submodule is essential in a direct summand. Many authors have studied assorted

\* Yeliz KARA, yelizkara@uludag.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-8001-6082>

generalizations of extending modules [2, 3, 4, 5, 6]. A submodule  $\mathcal{V}$  of  $\mathcal{M}$  is said to be *projection invariant* [7], if  $\chi\mathcal{V} \subseteq \mathcal{V}$ ,  $\forall \chi = \chi^2 \in \text{End}(\mathcal{M}_{\mathcal{R}})$ . A module is called  $\pi$ -*extending* [2], if every projection invariant submodule is essential in a direct summand. In this trend, a module  $\mathcal{M}$  is called *CLS* [5], if every  $z$ -closed submodule  $\mathcal{L}$  (i.e.,  $\mathcal{M}/\mathcal{L}$  is nonsingular) of  $\mathcal{M}$  is a direct summand. Motivated by the definition of  $z$ -closed submodules, a submodule  $\mathcal{X}$  of  $\mathcal{M}$  is called  *$p$ -submodule* [8], if  $\mathcal{X}$  is projection invariant submodule of  $\mathcal{M}$  such that  $\mathcal{M}/\mathcal{X}$  is nonsingular.

The purpose of this study is to examine the class of  $\pi^p$ -*module*, i.e., whose  $p$ -submodule has a complement which is a direct summand. Extending and  $\pi$ -extending modules are contained in  $\pi^p$ -modules. In Section 2, fundamental properties and connections between the  $\pi^p$  condition and related notions are obtained. In Section 3, we explore module theoretical properties encompassing direct sums and summands. The  $\pi^p$ -property is closed under direct sums. However, the forenamed condition does not transfer to the direct summands. Consequently, we explore under what conditions the module property transfers to the direct summands. We present examples to exhibit our results.

For the notation  $\mathcal{Y} \leq \mathcal{M}$ ,  $\mathcal{Y} \trianglelefteq_p \mathcal{M}$ ,  $\mathcal{Y} \leq_e \mathcal{M}$ ,  $\mathcal{Y} \leq^\oplus \mathcal{M}$ ,  $Z_2(\mathcal{Y})$  and  $\text{End}(\mathcal{M}_{\mathcal{R}})$ , we mean that  $\mathcal{Y}$  is a submodule of  $\mathcal{M}$ ,  $\mathcal{Y}$  is a projection invariant submodule of  $\mathcal{M}$ ,  $\mathcal{Y}$  is an essential submodule of  $\mathcal{M}$ ,  $\mathcal{Y}$  is a direct summand of  $\mathcal{M}$ , the second singular submodule of  $\mathcal{M}$  and the endomorphism ring of  $\mathcal{M}$ , respectively. See [1, 6, 9], for unfamiliar notation.

## 2. Preliminaries

Fundamental properties and connections between the  $\pi^p$  condition and related notions are obtained in this section. The first result is advantageous for the proof of our results.

**Lemma 2.1** *A module  $\mathcal{M}$  is a  $\pi^p$ -module iff for each  $p$ -submodule  $\mathcal{L}$  of  $\mathcal{M}$ ,  $\mathcal{L} \cap \mathcal{P} = 0$  and  $\mathcal{P} \oplus \mathcal{L} \leq_e \mathcal{M}$  for some  $\mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{M}$ .*

**Proof.** Clear.

**Proposition 2.2** *Assume the following conditions:*

- (a)  $\mathcal{M}$  is an extending module,
- (b)  $\mathcal{M}$  is a CLS-module,
- (c)  $\mathcal{M}$  is a  $\pi$ -extending module,
- (d)  $\mathcal{M}$  is a  $\pi^p$ -module.

Hence, (a)  $\Rightarrow$  (b)  $\Rightarrow$  (d) and (a)  $\Rightarrow$  (c)  $\Rightarrow$  (d). However, the implications are irreversible.

**Proof.** These implications hold from definitions.

(b)  $\not\Rightarrow$  (a). For any prime  $q$ , let  $\mathcal{A}_{\mathbb{Z}} = (\mathbb{Z}/\mathbb{Z}q) \oplus (\mathbb{Z}/\mathbb{Z}q^3)$ . By [5, Example 6],  $\mathcal{A}$  holds CLS property, but it does not fulfill the extending condition.

(c)  $\nRightarrow$  (a) Consider  $\mathcal{T} = \begin{bmatrix} \mathbb{Z} & \mathbb{Z} \\ 0 & \mathbb{Z} \end{bmatrix}$  as a right  $\mathcal{T}$ -module. It follows from [2, Proposition 3.7] that  $\mathcal{T}_{\mathcal{T}}$  is  $\pi$ -extending which it is not extending.

(d)  $\nRightarrow$  (b). Let  $\mathbb{Z}_{(2)} = \{\frac{s}{t} : s, t \in \mathbb{Z}, t \text{ is odd}\}$  and  $\mathcal{A}_{\mathbb{Z}} = \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}_{(2)}$ . Then,  $\mathcal{A}$  does not hold CLS property by [5, Example 15]. But, it is a  $\pi^p$ -module, as  $\mathcal{A}$  is  $\pi$ -extending.

(d)  $\nRightarrow$  (c). Assume  $\mathcal{S} = \begin{bmatrix} \mathcal{F} & \mathcal{V} \\ 0 & \mathcal{F} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \kappa & \omega \\ 0 & \kappa \end{bmatrix} : \kappa \in \mathcal{F}, \omega \in \mathcal{V} \right\}$ , where  $\mathcal{F}$  is a field and  $\mathcal{V}_{\mathcal{F}}$  is a vector space with  $\dim(\mathcal{V}_{\mathcal{F}}) \geq 2$ . Note that  $\mathcal{S}$  is an indecomposable  $\mathcal{S}$ -module. Hence, all submodules of  $\mathcal{S}$  is projection invariant. Thus,  $\mathcal{S}$  is the only  $p$ -submodule in itself. Hence,  $\mathcal{S}_{\mathcal{S}}$  is a  $\pi^p$ -module. Nevertheless,  $\mathcal{S}$  is not uniform, hence  $\mathcal{S}_{\mathcal{S}}$  is not  $\pi$ -extending.

**Proposition 2.3** (i) *Module properties of  $\pi^p$  and  $\pi$ -extending agree for a nonsingular module.*

(ii) Let  $\mathcal{A}$  be a nonsingular indecomposable module. Then  $\mathcal{A}$  is uniform  $\Leftrightarrow \mathcal{A}$  is extending  $\Leftrightarrow \mathcal{A}$  is  $\pi$ -extending  $\Leftrightarrow \mathcal{A}$  is a  $\pi^p$ -module.

**Proof.** (i) Suppose  $\mathcal{A}$  is a nonsingular  $\pi^p$ -module and  $\mathcal{L} \trianglelefteq_p \mathcal{A}$ . Thus, there is a complement submodule  $\mathcal{T}$  in  $\mathcal{A}$  such that  $\mathcal{L} \leq_e \mathcal{T}$ . Since  $\mathcal{A}$  is nonsingular,  $\mathcal{T} \trianglelefteq_p \mathcal{A}$  by [2, Lemma 2.3]. Consequently,  $\mathcal{A}/\mathcal{T}$  is nonsingular by [6, Lemma 5.58 (ii)]. So,  $\mathcal{T}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}$ . Then,  $\mathcal{T} \cap \mathcal{P} = 0$  and  $\mathcal{T} \oplus \mathcal{P} \leq_e \mathcal{A}$  for some  $\mathcal{P} \leq^{\oplus} \mathcal{A}$ , by Lemma 2.1. Then,  $\mathcal{L} \cap \mathcal{P} = 0$  and  $\mathcal{L} \oplus \mathcal{P} \leq_e \mathcal{A}$ . By [2, Corollary 3.2],  $\mathcal{A}$  is  $\pi$ -extending. Proposition 2.2 yields the converse.

(ii) Part (i), Proposition 2.2 and [2, Proposition 3.8 (1)] complete the proof.

Consider  $G_{\mathbb{Z}} = \mathbb{Z}^{\mathbb{N}}$  be the Specker group. Then, it is not  $\pi$ -extending by [4, Lemma 3.4]. Since  $G_{\mathbb{Z}}$  is nonsingular,  $G_{\mathbb{Z}}$  does not satisfy  $\pi^p$  property by Proposition 2.3(i). However, the injective hull of  $G_{\mathbb{Z}}$  fulfills  $\pi^p$  property. Therefore, the former module condition may not transfer to the submodules.

**Proposition 2.4** *Suppose  $\mathcal{M}$  is a  $\pi^p$ -module and  $\mathcal{L}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{M}$ . Thus,  $\mathcal{L}$  holds  $\pi^p$  property.*

**Proof.** Suppose  $\mathcal{L}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{M}$  and  $\mathcal{L}'$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{L}$ . By [8, Lemma 2.1],  $\mathcal{L}'$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{M}$ . Thereby,  $\mathcal{L}' \cap \mathcal{P} = 0$  and  $\mathcal{L}' \oplus \mathcal{P} \leq_e \mathcal{M}$ , for some  $\mathcal{P} \leq^{\oplus} \mathcal{M}$ . Accordingly  $\mathcal{M} = \mathcal{P} \oplus \mathcal{P}'$ , for some  $\mathcal{P}' \leq \mathcal{M}$ . Since  $\mathcal{L} \trianglelefteq_p \mathcal{M}$ ,  $\mathcal{L} = (\mathcal{L} \cap \mathcal{P}) \oplus (\mathcal{L} \cap \mathcal{P}')$  by [7, p.50]. Observe that  $\mathcal{L}' \cap (\mathcal{L} \cap \mathcal{P}) = 0$  and  $\mathcal{L} \cap (\mathcal{L}' \oplus \mathcal{P}) = \mathcal{L}' \oplus (\mathcal{L} \cap \mathcal{P}) \leq_e \mathcal{L}$ . Therefore,  $\mathcal{L}$  is a  $\pi^p$ -module.

### 3. Main results

The module theoretical properties such as direct sums and summands are examined, and examples are given to demonstrate former results.



**Theorem 3.1** Assume  $\mathcal{M} = \bigoplus_{\chi \in \Psi} \mathcal{M}_\chi$  such that  $\mathcal{M}_\chi$  is a  $\pi^p$ -module for all  $\chi \in \Psi$ . Then  $\mathcal{M}$  is a  $\pi^p$ -module.

**Proof.** Suppose  $\mathcal{Y}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{M}$  and  $\emptyset \neq \Psi' \subseteq \Psi$ . Thus, the set

$$\mathcal{B} = \{(\Psi', \mathcal{Y}, \mathcal{P}) \mid \Psi' \subseteq \Psi, \quad \mathcal{Y} \cap \mathcal{P} = 0 \text{ and } \mathcal{Y} \oplus \mathcal{P} \leq_e \mathcal{M}$$

where,  $\mathcal{Y}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{M}$  and  $\mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{M}\}$

is partially ordered by

$$(\Psi_1, \mathcal{Y}_1, \mathcal{P}_1) \leq (\Psi_2, \mathcal{Y}_2, \mathcal{P}_2) \Leftrightarrow \Psi_1 \subseteq \Psi_2, \mathcal{Y}_1 \leq \mathcal{Y}_2, \mathcal{P}_1 \leq \mathcal{P}_2.$$

Notice that  $\mathcal{B} \neq \emptyset$ . Thus, there exists a maximal member  $(\Psi_1, \mathcal{Y}_1, \mathcal{P}_1) \in \mathcal{B}$  by Zorn's Lemma. Assume  $\Psi \neq \Psi_1$ . Then, there is  $\psi \in \Psi$  such that  $\psi \notin \Psi_1$ . Let  $\Psi_2 = \Psi_1 \cup \{\psi\}$  and  $\mathcal{M}'' = \bigoplus_{\chi \in \Psi_2} \mathcal{M}_\chi = \bigoplus_{\chi \in \Psi_1} \mathcal{M}_\chi \oplus \mathcal{M}_\psi = \mathcal{M}_1 \oplus \mathcal{M}_\psi$ . Since  $\mathcal{M}_\chi$  is a  $\pi^p$ -module, there is a  $\mathcal{P}_\psi \leq^\oplus \mathcal{M}_\psi$  such that  $\mathcal{Y}_\psi \cap \mathcal{P}_\psi = 0$  and  $\mathcal{Y}_\psi \oplus \mathcal{P}_\psi \leq_e \mathcal{M}_\psi$  for  $p$ -submodule  $\mathcal{Y}_\psi$  of  $\mathcal{M}_\psi$ . Note that  $\mathcal{P}_\psi \cap \mathcal{P}_1 = 0$  and  $\mathcal{P}'' = \mathcal{P}_\psi \oplus \mathcal{P}_1 \leq^\oplus \mathcal{M}''$ . For  $p$ -submodule  $\mathcal{Y}_1$  of  $\mathcal{M}_1$  and  $\mathcal{Y}_\psi$  of  $\mathcal{M}_\psi$ , take  $\mathcal{Y}_1 \oplus \mathcal{Y}_\psi \leq \mathcal{M}''$ . Observe that  $\mathcal{Y}_1 \oplus \mathcal{Y}_\psi \trianglelefteq_p \mathcal{M}''$  and  $\frac{\mathcal{M}''}{\mathcal{Y}_1 \oplus \mathcal{Y}_\psi} \cong \frac{\mathcal{M}_1}{\mathcal{Y}_1} \oplus \frac{\mathcal{M}_\psi}{\mathcal{Y}_\psi}$ . It follows that  $\frac{\mathcal{M}''}{\mathcal{Y}_1 \oplus \mathcal{Y}_\psi}$  is nonsingular, so  $\mathcal{Y}'' = \mathcal{Y}_1 \oplus \mathcal{Y}_\psi$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{M}''$ . Thereby,  $\mathcal{Y}'' \cap \mathcal{P}'' = 0$  and  $\mathcal{Y}'' \oplus \mathcal{P}'' \leq_e \mathcal{M}''$ . Therefore,  $(\Psi_2, \mathcal{Y}'', \mathcal{P}'') \in \mathcal{B}$ . However,  $(\Psi_1, \mathcal{Y}_1, \mathcal{P}_1) \leq (\Psi_2, \mathcal{Y}'', \mathcal{P}'')$  which contradicts to the maximality of  $(\Psi_1, \mathcal{Y}_1, \mathcal{P}_1) \in \mathcal{B}$ . Therefore,  $\Psi = \Psi_1$ , so  $\mathcal{M}$  is a  $\pi^p$ -module.

As a consequence of above result, any direct sum of uniform (resp., extending, or  $\pi$ -extending) module and any free Abelian groups fulfill  $\pi^p$  property. The next result provides that  $\pi^p$  condition does not transfer to the direct summands, in general.

**Example 3.2** Assume  $T = \mathbb{R}[x_1, \dots, x_k]$  with indeterminates  $x_1, \dots, x_k$  over  $\mathbb{R}$ , where  $k$  is any odd integer with  $k \geq 3$ . Consider  $\mathcal{R} = T/Tt$  is a commutative Noetherian ring, where  $t = x_1^2 + \dots + x_k^2 - 1$ . Let  $M = \mathcal{R}^{(k)}$ . Thus,  $M_{\mathcal{R}}$  is  $\pi^p$ -module by Theorem 3.1. Observe from [2, Example 5.5] that  $M$  has a direct summand  $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$  which is not  $\pi$ -extending. Nonsingularity of  $\mathcal{R}$  yields that  $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$  is not a  $\pi^p$ -module by Proposition 2.3(ii).

We deal with when the former module property transfers to the direct summands.

**Proposition 3.3** Assume  $\mathcal{V}_1$  and  $\mathcal{V}_2$  are uniform modules such that  $\mathcal{A} = \mathcal{V}_1 \oplus \mathcal{V}_2$ . Hence every direct summand of  $\mathcal{A}$  holds  $\pi^p$  property.

**Proof.** Suppose  $0 \neq \mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{A}$ . By Theorem 3.1,  $\mathcal{P}$  holds  $\pi^p$  property when  $\mathcal{P} = \mathcal{A}$ . Assume  $\mathcal{P} \neq \mathcal{A}$ . Thus,  $\mathcal{P}$  is uniform, so it satisfies  $\pi^p$  property.

**Proposition 3.4** If  $\mathcal{A}_{\mathbb{Z}} = \bigoplus_{i \in I} \mathcal{V}_i$ , where  $\mathcal{V}_i$  ( $i \in I$ ) is uniform, then every direct summand of  $\mathcal{A}_{\mathbb{Z}}$  holds  $\pi^p$  property.

**Proof.** Suppose  $\mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{A}$ . By [4, Theorem 5.5],  $\mathcal{P} = \bigoplus_{i \in I} \mathcal{U}_i$ , where  $\mathcal{U}_i$  is uniform. Hence Theorem 3.1 yields that  $\mathcal{P}$  is a  $\pi^p$ -module.

Note that a module fulfills SSP provided that the sum of two direct summands is a direct summand.

**Proposition 3.5**  $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \oplus \mathcal{A}_2$  for some  $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2 \leq \mathcal{A}$  such that  $\mathcal{A}_2$  is projection invariant. If  $\mathcal{A}$  is a  $\pi^p$ -module with SSP, then  $\mathcal{A}_1$  a  $\pi^p$ -module.

**Proof.** Let  $\mathcal{L}$  be a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}_1$ . Thus,  $\mathcal{L} \trianglelefteq_p \mathcal{A}_1$  and  $\mathcal{A}_1/\mathcal{L}$  is nonsingular. Observe from [2, Lemma 4.12] that  $\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2 \trianglelefteq_p \mathcal{A}$  and  $\mathcal{A}/(\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2) \cong \mathcal{A}_1/\mathcal{L}$  which give that  $\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}$ . Then there is a  $\mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{A}$  such that  $(\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2) \cap \mathcal{P} = 0$  and  $(\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2) \oplus \mathcal{P} \leq_e \mathcal{A}$ . Note that  $\mathcal{A}_1 \cap [(\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2) \oplus \mathcal{P}] = \mathcal{L} \oplus [\mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P})] \leq_e \mathcal{A}_1$ . Since  $(\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2) \cap \mathcal{P} = 0$ ,  $\mathcal{L} \cap [\mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P})] = 0$ . Moreover,  $\mathcal{A}_2 \cap \mathcal{P} = 0$  and  $\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P} = \mathcal{A}_2 \oplus [\mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P})]$  by modular law. Then,  $\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{A}$  by SSP condition. It follows that  $\mathcal{A} = \mathcal{A}_2 \oplus [\mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P})] \oplus T$  for some  $T \leq \mathcal{A}$ . Hence,  $\mathcal{A}_1 = [\mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P})] \oplus [\mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{A}_2 \oplus T)]$  by modular law. Therefore,  $\mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{P}) \leq^\oplus \mathcal{A}_1$  which yields that  $\mathcal{A}_1$  is a  $\pi^p$ -module.

A ring is said to be *Abelian* if every idempotent element is central.

**Corollary 3.6** Suppose  $\mathcal{A}$  is a  $\pi^p$ -module and  $End(\mathcal{A}_R)$  is an Abelian ring with SSP. Then every direct summand of  $\mathcal{A}_R$  fulfills  $\pi^p$  condition.

**Proof.** Observe that  $K \trianglelefteq_p \mathcal{A}$  when  $K \leq^\oplus \mathcal{A}$  and  $End(\mathcal{A}_R)$  is Abelian. It follows from [10, Corollary 2.4] that  $\mathcal{A}$  has SSP. Thus, the proof is a consequent of Proposition 3.5.

**Lemma 3.7** Let  $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \oplus \mathcal{A}_2$  for some  $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2 \leq \mathcal{A}$ . Then  $\mathcal{A}_1$  is a  $\pi^p$ -module iff for all  $p$ -submodule  $\mathcal{Y}$  of  $\mathcal{A}_1$ ,  $\mathcal{A}_2 \subseteq \mathcal{P}$ ,  $\mathcal{P} \cap \mathcal{Y} = 0$  and  $\mathcal{P} \oplus \mathcal{Y} \leq_e \mathcal{A}$  for some  $\mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{A}$ .

**Proof.** Let  $\mathcal{A}_1$  provide  $\pi^p$  condition and  $\mathcal{Y}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}_1$ . Hence,  $\mathcal{Y} \cap \mathcal{P}_1 = 0$  and  $\mathcal{Y} \oplus \mathcal{P}_1 \leq_e \mathcal{A}_1$  for some  $\mathcal{P}_1 \leq^\oplus \mathcal{A}_1$ . It follows that  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{A}_2 \leq^\oplus \mathcal{A}$ . Note that  $\mathcal{A}_2 \subseteq \mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{A}_2$ ,  $(\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{A}_2) \cap \mathcal{Y} = 0$  and  $\mathcal{P}_1 \oplus \mathcal{A}_2 \oplus \mathcal{Y} \leq_e \mathcal{A}$ . Conversely, suppose  $\mathcal{A}_1$  fulfills the property. Take  $\mathcal{L}$  as a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}_1$ . Then,  $\mathcal{A}_2 \subseteq \mathcal{P}'$ ,  $\mathcal{P}' \cap \mathcal{L} = 0$  and  $\mathcal{P}' \oplus \mathcal{L} \leq_e \mathcal{A}$  for some  $\mathcal{P}' \leq^\oplus \mathcal{A}$ , by hypothesis. Observe that  $\mathcal{P}' \cap \mathcal{A}_1 \leq^\oplus \mathcal{A}_1$ . Thus,  $\mathcal{L} \cap (\mathcal{P}' \cap \mathcal{A}_1) = 0$  and  $\mathcal{L} \oplus (\mathcal{P}' \cap \mathcal{A}_1) = \mathcal{A}_1 \cap (\mathcal{L} \oplus \mathcal{P}') \leq_e \mathcal{A}_1$ . Therefore,  $\mathcal{A}_1$  is a  $\pi^p$ -module.

**Theorem 3.8** Let  $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \oplus \mathcal{A}_2$  is a  $\pi^p$ -module for some  $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2 \leq \mathcal{A}$  such that  $\mathcal{A}_2$  is projection invariant. Suppose  $\mathcal{D} \oplus \mathcal{A}_2 \leq^\oplus \mathcal{A}$ , for all  $\mathcal{D} \leq^\oplus \mathcal{A}$  with  $\mathcal{D} \cap \mathcal{A}_2 = 0$ . Then  $\mathcal{A}_1$  is a  $\pi^p$ -module.

**Proof.** Assume  $\mathcal{L}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}_1$ . Note that  $\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2 \trianglelefteq_p \mathcal{A}$  by [2, Lemma 4.12]. Moreover,  $\frac{\mathcal{A}}{\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2} \cong \frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{L}}$  is nonsingular, so  $\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}$ . Consequently,  $\mathcal{P} \cap (\mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2) = 0$ ,  $\mathcal{P} \oplus \mathcal{L} \oplus \mathcal{A}_2 \leq_e \mathcal{A}$  for some  $\mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{A}$ . Thus, Lemma 3.7 completes the proof.

**Theorem 3.9**  $\mathcal{A}$  is a  $\pi^p$ -module iff  $\mathcal{A} = \mathcal{Z}_2(\mathcal{A}) \oplus \mathcal{P}$  for some  $\mathcal{P} \leq \mathcal{A}$ , where  $\mathcal{Z}_2(\mathcal{A})$  and  $\mathcal{P}$  hold  $\pi^p$  condition.

**Proof.** Let  $\mathcal{A}$  satisfy  $\pi^p$  property and  $\mathcal{W} = \mathcal{Z}_2(\mathcal{A})$ . Observe that  $\mathcal{A}/\mathcal{W}$  is nonsingular, so  $\mathcal{W}$  is  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}$ . Hence,  $\mathcal{W} \cap \mathcal{P} = 0$  and  $\mathcal{W} \oplus \mathcal{P} \leq_e \mathcal{A}$  for some  $\mathcal{P} \leq^\oplus \mathcal{A}$ .

Thus,  $\mathcal{W} = \mathcal{Z}_2(\mathcal{A}) = \mathcal{Z}_2(\mathcal{P}) \oplus \mathcal{Z}_2(\mathcal{P}')$  for some  $\mathcal{P}' \leq \mathcal{A}$ . As  $\mathcal{W} \cap \mathcal{P} = 0$ ,  $\mathcal{Z}_2(\mathcal{P}) = 0$ . Then,  $\mathcal{W} = \mathcal{Z}_2(\mathcal{P}') \leq \mathcal{P}'$  which implies that  $\mathcal{W} \leq_e \mathcal{P}'$ , as  $\mathcal{W} \oplus \mathcal{P} \leq_e \mathcal{P}' \oplus \mathcal{P}$ . Therefore,  $\mathcal{P}'/\mathcal{W}$  is singular, so  $\mathcal{W} = \mathcal{P}'$  gives that  $\mathcal{A} = \mathcal{W} \oplus \mathcal{P}$  for some  $\mathcal{P} \leq \mathcal{A}$ .

It is clear from Proposition 2.4 that  $\mathcal{W}$  holds  $\pi^p$  property. Consider the projection map  $\pi: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{P}$ . Then  $\mathcal{W} \cap \mathcal{L} = 0$  for some  $p$ -submodule  $\mathcal{L}$  of  $\mathcal{P}$ . Observe that  $\mathcal{W} \oplus \mathcal{L} \leq_p \mathcal{A}$  by [2, Lemma 4.12], and  $\frac{\mathcal{A}}{\mathcal{W} \oplus \mathcal{L}} \cong \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{L}}$  which implies that  $\mathcal{W} \oplus \mathcal{L}$  is a  $p$ -submodule of  $\mathcal{A}$ . Hence,  $\mathcal{D} \cap (\mathcal{W} \oplus \mathcal{L}) = 0$ ,  $\mathcal{D} \oplus (\mathcal{W} \oplus \mathcal{L}) \leq_e \mathcal{A}$ , for some  $\mathcal{D} \leq^\oplus \mathcal{A}$ . Moreover,  $\mathcal{W} = \mathcal{Z}_2(\mathcal{A}) = \mathcal{Z}_2(\mathcal{D}) \oplus \mathcal{Z}_2(\mathcal{D}')$ , where  $\mathcal{A} = \mathcal{D} \oplus \mathcal{D}'$  for some  $\mathcal{D}' \leq \mathcal{A}$ . Hence  $\mathcal{Z}_2(\mathcal{D}) = 0$ , so  $\mathcal{W} = \mathcal{Z}_2(\mathcal{D}') \leq \mathcal{D}'$  and  $\mathcal{D}' = \mathcal{W} \oplus (\mathcal{D}' \cap \mathcal{P})$ . Thus,  $\mathcal{A} = \mathcal{D} \oplus \mathcal{D}' = \mathcal{D} \oplus \mathcal{W} \oplus (\mathcal{D}' \cap \mathcal{P})$ , so  $\mathcal{W} \oplus \mathcal{D} \leq^\oplus \mathcal{A}$ . Clearly,  $\mathcal{W} \oplus \mathcal{D} = \mathcal{W} \oplus \pi(\mathcal{D})$  for  $\pi(\mathcal{D}) \leq^\oplus \mathcal{P}$ . Since  $\mathcal{L} \oplus \pi(\mathcal{D}) \oplus \mathcal{W} \leq_e \mathcal{A}$ , we have  $\mathcal{L} \oplus \pi(\mathcal{D}) \leq_e \mathcal{P}$ . Therefore,  $\mathcal{P}$  is a  $\pi^p$ -module. Theorem 3.1 completes the converse.

We end up this section by the following example which exhibits Theorem 3.9 and the essential extensions of the  $\pi^p$ -modules.

**Example 3.10** (i) Let  $G = G_1 \oplus G_2$ , where  $G_1$  and  $G_2$  are Abelian groups with  $G_1$  divisible and  $G_2 = \mathbb{Z}/\mathbb{Z}q^s$  such that  $q$  is a prime,  $s$  is a positive integer. Note  $G_1 = J \oplus J'$ , where  $J$  is torsionfree,  $J'$  is torsion. Thus,  $G = J \oplus J' \oplus G_2$  and  $\mathcal{Z}_2(G) = J' \oplus G_2$ . By Theorem 3.1,  $G = \mathcal{Z}_2(G) \oplus J$  provides  $\pi^p$  condition.

(ii) Consider a principal ideal ring  $\mathcal{B}$  which is not a complete discrete valuation ring. By [3, Theorem 19], there is a  $\mathcal{B}$ -module  $\mathcal{A}$  such that  $\mathcal{A}$  is indecomposable torsionfree with rank 2. Thus,  $\mathcal{U}_1 \oplus \mathcal{U}_2 \leq_e \mathcal{A}$  for some uniform  $\mathcal{U}_1, \mathcal{U}_2 \leq \mathcal{A}$ . By Theorem 3.1,  $\mathcal{U}_1 \oplus \mathcal{U}_2$  is a  $\pi^p$ -module. However,  $\mathcal{A}_{\mathcal{B}}$  is not a  $\pi^p$ -module by Proposition 2.3 (ii).

## References

- [1] Dung, N. V., Huynh, D. V., Smith, P. F., Wisbauer, R., **Extending Modules**, Longman, Harlow, (1994).
- [2] Birkenmeier, G. F., Tercan, A., Yücel, C. C., The extending condition relative to sets of submodules, **Communications in Algebra** 42, 764-778, (2014).
- [3] Kaplansky, I., **Infinite Abelian Groups**, University of Michigan Press, (1969).
- [4] Smith, P. F., Tercan A., Generalizations of CS-modules, **Communications in Algebra** 21(6), 1809-1847, (1993).
- [5] Tercan, A., On CLS-modules, **Rocky Mountain Journal of Mathematics**, 25(4), 1557-1564, (1995).
- [6] Tercan, A., Yücel, C. C., Module Theory, **Extending Modules and Generalizations**, Birkhäuser, Basel, (2016).
- [7] Fuchs, L., **Infinite Abelian Groups I**, Academic Press, New York, (1970).
- [8] Kara, Y., Modules whose  $p$ -submodules are direct summands, **Turkish Journal of Mathematics**, 42 (1), 28-33, (2018).
- [9] Goodearl, K. R., **Ring Theory: Nonsingular Rings and Modules**, Dekker, New York, (1976).
- [10] Garcia, J. L., Properties of direct summands of modules, **Communications in Algebra**, 17(1), 73-92, (1989).

# Aza-18-crown-6 modifiye karbon nanotüplerin sentezi, karakterizasyonu ve adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesi

Baki ÇİÇEK\*

Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Çağış Kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 15.05.2021

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.06.2021

## Öz

Karbon nanotüpler (CNT) olağanüstü eşsiz özellikleri sebebiyle keşfinden günümüze birçok uygulama alanı bulmuştur. Yüzeylerinde gerçekleştirilen kovalent modifikasyonlarla kimyasal ve fiziksel özellikleri geliştirilebilmektedir. Bu çalışma ile 1-aza-18-crown-6 modifiye karbon nanotüpler Steglich esterleşmesi ile sentezlenmiştir. Sentezlenen bileşik FTIR, <sup>1</sup>H-NMR, <sup>13</sup>C-NMR, TGA ve TEM yöntemleriyle karakterize edilmiştir. Elde edilen bileşiğin ve modifiye edilmemiş CNT bileşiğinin Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> metal iyonlarını adsorpsiyonu incelenmiştir. Adsorpsiyon yüzdesi (% A.Y.), adsorpsiyon kapasitesi ( $q_e$ ), maksimum adsorpsiyon kapasitesi ( $q_{max}$ ), adsorpsiyon denge sabiti ( $K_d$ ), Serbest Gibbs Enerjisi ( $\Delta G^0$ ) ve izoterm türü belirlenmiştir. Adsorpsiyon çalışmalarına göre, monoaza-18-crown-6 modifiye edilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6)) bileşiği, tüm metal iyonlarını ham çok duvarlı karbon nanotüpten (MWCNT) çok daha iyi yüzdelerde adsorbe ettiği gözlenmiştir. MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği, çözelti içindeki Fe<sup>3+</sup> iyonlarının yaklaşık olarak tamamını (% 96.15) adsorbe etmiştir. Bu sonuçlar ışığında elde edilen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği metal iyonlarının sulu ortamlardan adsorpsiyonunda başarılı bir şekilde uygulanabileceği söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** MWCNT, modifikasyon, Steglich amit sentezi, karakterizasyon, adsorpsiyon.

\* Baki ÇİÇEK, bcicek@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-1257-1188>

# Synthesis and characterization determination aza-18-crown-6 modified carbon nanotubes and determination of adsorption capacity

## Abstract

*Carbon nanotubes (CNT) have found many applications since their discovery due to their extraordinary unique properties. Its chemical and physical properties can be improved by covalent modifications on its surfaces. In this study, 1-aza-18-crown-6 modified carbon nanotubes were synthesized by Steglich esterification. The synthesized compound was characterized by FTIR, <sup>1</sup>H-NMR, <sup>13</sup>C-NMR, TGA and TEM methods. The adsorption of Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> metal ions of the obtained compound and unmodified CNT compound was investigated. Adsorption percentage (A.Y.%), adsorption capacity (q<sub>e</sub>), maximum adsorption capacity (q<sub>max</sub>), adsorption equilibrium constant (K<sub>a</sub>), Free Gibbs Energy (ΔG<sup>0</sup>) and isotherm type were determined. According to adsorption studies, for the monoaza-18-crown-6 modified multi-walled carbon nanotube (MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6)) compound has adsorbed all metal ions much better percentages than crude multi-walled carbon nanotube (MWCNT). MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) compound has adsorbed approximately all of the Fe<sup>3+</sup> ions in solution (96.15%). In the light of these results, it can be said that the MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) compound can be successfully applied in the adsorption of metal ions from aqueous environments.*

**Keywords:** MWCNT, modification, Steglich amide synthesis, characterization, adsorption.

## 1. Giriş

Karbon materyallerinin fiziksel, kimyasal, mekanik ve elektronik özellikleri sebebiyle (özellikle grafit) günümüzde kullanımı oldukça fazladır. Bu ilgi benzer özelliklere sahip karbon nanotüplere olan ilgiyi de günden güne artmaktadır [1-5]. Bununla beraber karbon materyallerinin yüzeylerinin kimyasal veya fiziksel olarak modifikasyonu ile elde edilen organik formulu ve inorganik formulu yapılar, nanoyapıların farklı alanlardaki kullanım potansiyelini artırmaktadır. Kondensatör, yakıt hücreleri, adsorpsiyon sanayi, her türlü sensör imalatı, her türlü metal-seramik-plastik nano-kompozit materyal imalatı, gaz depolama sanayi, nanoparçalar ve sistemler, vb. nanomateryallerin kullanıldığı bazı alanlardan birkaçıdır [6-10]. Karbon nanotüpler üzerindeki modifikasyonlar kovalent ve kovalent olmayan modifikasyonlar olabilir [11]. Kovalent modifikasyonlara oksidasyon (karboksilasyon), amit sentezi, esterleşme, halojenizasyon, katılma reaksiyonları, vb. örnek verilebilir [11-16]. Özellikle karboksilasyon ile karbon nanotüplerin modifikasyonu birçok materyalin sentezlenmesinde öncü olarak kullanılmaktadır. Nitrik asit-sülfürik asit karışımı en fazla kullanılan oksidanlardandır [17]. Amit sentezi de karboksillenmiş karbon nanotüp üzerinden gerçekleştirilmektedir [13]. Elde edilen glikol, tiyol, amit modifiye karbon nanotüpler metal absorbanı olarak oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Amit fonksiyonel grubu içeren ve sterik açıdan gerçekleşmesi pek mümkün olmayan bileşiklerin sentezinde Steglich esterleşmesi sık sık kullanılmaktadır. Çünkü Steglich esterleşmesi aminlerle çok hızlı gerçekleşmektedir. MWCNT-(-CO-NH-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub>)<sub>n</sub> ve MWCNT-(2-aminobenzotiyazol)<sub>n</sub> bu yöntemle sentezlenen bazı

nanomateryallerdir [2, 19-20]. 1,12-diaminododekan gibi uzun kuyruklu diaminler ve elektron iletken polimerler olan politiyofen ve poliprol türevi polimerler ile modifiye edilmiş nanomalzemeler, metal iyonlarının yanı sıra bazı küçük organik bileşiklere ve anyonlara ilgi gösterdiği bildirilmiştir [20]. Sanayi ve endüstride meydana gelen tehlikeli kirliliklerin arıtılmasında, klasik arıtma teknolojilerine alternatif olarak adsorpsiyon gibi arıtım teknolojilerinin geliştirilmesi yapılmaktadır [21-22]. Adsorpsiyon yöntemi de ekstraksiyon, potansiyometri, kondüktometri gibi bu ağır toksik materyallerin arıtılmasında önemli bir yere sahiptir [23-27]. Atık sulardan istenmeyen madde gideriminde hatta son yıllarda çözültiden seçimli olarak uzaklaştırmak istenen maddenin (ağır metal, organik maddeler, boyalar ve toksik elementler, vb.) arıtımında başarılı bir şekilde uygulanmaya başlanmıştır [28-32]. Adsorpsiyon izotermi bir adsorban-adsorbat arasındaki denge halini göstermek için kullanılan denklemler olup adsorpsiyon izotermi, adsorpsiyon ısı, adsorpsiyon yoğunluğu, boyutsuz dağılma sabiti, maksimum adsorpsiyon kapasitesi ve gözenek hacminin belirlenmesi amacıyla kullanılırlar. En çok kullanılan izotermi Langmuir ve Freundlich izotermidir [33-39]. MWCNT-kitosan, 2-aminobenzotiyazol modifiye MWCNT, iminodiasetik asit modifiye MWCNT, etilendiamin modifiye MWCNT, amonyum 1-pirolidin ditiyo-karboksilat modifiye MWCNT, D2EHFA-TOPO s modifiye MWCNT, o-kresolftalyn kompleksi modifiye MWCNT, ÇDKNT-COOH, amino/tiyol modifiye MWCNT bileşikleri biyolojik ve çevre numunelerinden krom, demir, arsenik, vanadyum, kadmiyum, bakır, kobalt, nikel, mangan, çinko, kurşun, cıva adsorpsiyonunda başarılı bir şekilde kullanılmıştır [2, 18-19, 22, 41-45]. Bu çalışmada Steglich amit sentezi ile sentezlenen 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiği FTIR, NMR, TEM, TGA teknikleriyle karakterize edilmiştir. Elde edilen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği ve MWCNT bileşiğinin  $Co^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  iyonlarını adsorpsiyonunda kullanılmıştır. Freundlich ve Langmuir izotermi ile adsorpsiyon sabitleri belirlenmiştir.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Kullanılan cihazlar ve kimyasal malzemeler

Bu çalışmada kullanılan MWCNT (Ürün özellikleri; saflık:% 92, ortalama çap: 8-10 nm, ortalama uzunluk: 1-3  $\mu m$ , karbon saflığı: % 92, metal oksit: % 8, elektriksel iletkenlik: 98 S/cm, yüzey alanı: 290  $m^2/g$ ) Sigma Aldrich firmasından temin edildi. Kullanılan kimyasal malzemeler yüksek saflıkta ( $\geq$  % 97.5) olup ticari olarak (Merck, Sigma Aldrich, Carlo Erba, Roth, vb.) temin edilmiştir. Süzme işlemlerinde, vakumlu cam filtrasyon sistemi (İnterlab) ve 0,45  $\mu m$  naylon süzme kâğıtları kullanılmıştır. Kurutma işleminde Memmert marka etüv kullanılmıştır. FT-IR spektrumu Perkin Elmer BX 2 FTIR Infrared Spektrofotometresi ile kaydedilmiştir. NMR analizleri (Agilent Technologies 400 MHz) Atatürk Üniversitesi Kimya Bölümü'nde hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik analizler (TGA, Perkin Elmer Pyris 1) Siirt Üniversitesi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM, Hitachi HT7700) ile TEM görüntüleri Atatürk Üniversitesi DAYTAM'da hizmet alımı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (120 KV ve High Resolution). Tuz çözültülerinde kullanılan ultra saf su, New Human Power I S-UV cihazından elde edilmiş olup iletkenliği 18.3  $M\Omega/cm$ 'dir. Deneylede KERN ABJ marka hassas terazi ( $d=0.1$  mg), Bandolin marka ultrasonik banyo, IKA C-MAG HS-7 marka manyetik karıştırıcı, Hanna HI 2211 model pH metre (HI1131) kullanılmıştır. Son olarak metal adsorpsiyonu çalışmalarında İndüktif Olarak Eşleşmiş Plazma – Optik Emisyon Spektrometresi (ICP-OES, Perkin Elmer Optima 2200 DV) kullanılmıştır.

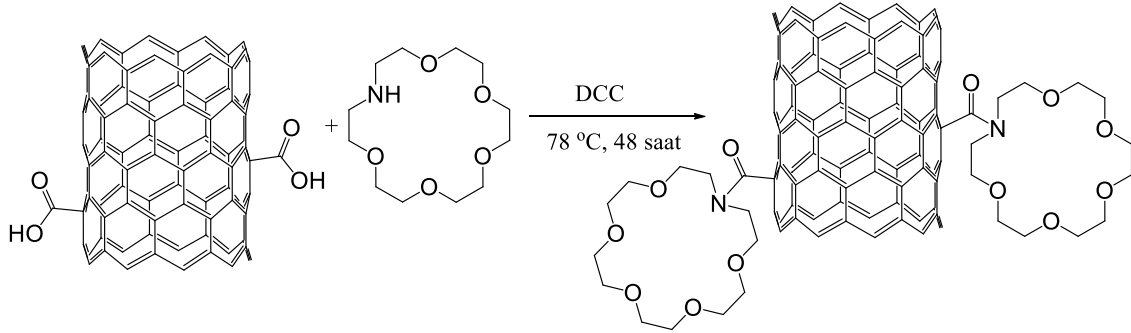
## 2.2. Sentez

### 2.2.1 Karboksillenmiş MWCNT'lerin sentezi

MWCNT içerdiği safsızlıklardan kurtulmak amacıyla % 10 HCl çözeltisi ile yıkandı. Saflaştırılmış MWCNT (1.0 g), 20 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HNO<sub>3</sub> karışımına (3:1 v/v) ilave edildi. Süspansiyon karışımı 30 dakika ultrasonik banyoya bırakıldı. Geri soğutucu altında 24 saat kaynatıldı. Karboksillenmiş MWCNT santrifüj ile yıkama işlemi ile asidik çözeltiden ayrıldı (30 dakika 5000 rpm ve 15 °C). Karboksillenmiş MWCNT 60 °C'lik etüvde 24 saat kurutuldu [15].

### 2.2.2. 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT sentezi

0.374 g 1-aza-18-crown-6, 50 mL etanol (absolute) içerisinde ultrasonik banyonun yardımıyla 2 boyunlu reaksiyon balonunda çözüldü. 0.5 g karboksilli asit modifiye MWCNT ilave edildi. Ultrasonik banyoda 30 dakika dispersiyeye edildi. Geri soğutucu altında kaynatma düzeneğine bağlandı. 45 dakika ısıtılarak ve karıştırılarak iyice dispersiyeye olması sağlandı. 0.88 g N,N-disiklohegzilkarbodiimit (DCC) yan koldan reaksiyon balonuna eklenerek 48 saat 78-80 °C'de geri soğutucu altında kaynatıldı. Ürün 0.45 µm fitre kâğıdından süzüldü. 4 defa etanol ile yıkandı. Etüvde 60 °C'de 48 saat kurutuldu. (Verim, 0.375 g)



Şekil 1. 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiğinin sentezi.

## 2.3. Crown eter modifiye MWCNT bileşiğinin adsorpsiyon sabitlerinin belirlenmesi

### 2.3.1. Formülasyon

Adsorpsiyon için kullanılan bazı formüller aşağıda verilmiştir [46]:

$$\% AY = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada C<sub>0</sub> başlangıç konsantrasyonu (mg/L), C<sub>e</sub> ise ilgili prosedür takip edildikten sonra elde edilen dengedeki iyon konsantrasyonu (mg/L) temsil etmektedir.

$$q_e = (C_0 - C_e) \times \frac{V}{W} \quad (2)$$

Burada V ilave edilen tuz karışımının hacmini (L), W ise adsorbent madde miktarını (g) temsil etmektedir.

Denge sabiti K<sub>c</sub> şu şekilde hesaplanabilir;

$$K_c = \frac{C_a}{C_e} \quad (3)$$

Burada  $C_a$  adsorban tarafından tutulan madde konsantrasyonu (mg/L) simgelemektedir. Bu eşitlik (3) kullanılarak hesaplanan  $K_c$  denge sabiti değerlerinin başlangıç tuz konsantrasyonlarına karşı grafiğe geçirilmesiyle oluşan doğrunun kesim noktası  $K_c^0$  değerini verecektir. Elde edilen  $K_c^0$  değeri Eşitlik 4'de yazılırsa adsorbanların serbest Gibbs enerjileri elde edilir.

$$\Delta G^0 = R \cdot T \cdot \ln(K_c^0) \quad (4)$$

Langmuir İzotermi denkleminin lineer formu,

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L \cdot q_{max}} + \frac{1}{q_{max}} \cdot C_e \quad (5)$$

şeklindedir. Lineer Langmuir denklemindeki  $C_e/q_e$  değerleri,  $C_e$  değerlerine karşı grafiğe geçirilirse, grafiğin kayım değeri  $1/(K_L \cdot q_{max})$ , grafiğin eğimi ise  $1/q_{max}$  olur.  $K_L$  ve  $q_{max}$  değerlerinin belirlenmesi adsorpsiyonun doğasının belirlenmesi için önemlidir. Bu denklemde;  $q_{max}$  adsorbent maksimum adsorplama kapasitesini (mg/g),  $K_L$  adsorpsiyon entalpisine ve sıcaklığa bağlı Langmuir izotermi sabitini (L/mol) ifade etmektedir. Langmuir izoterminin elverişliliğini bulmak için boyutsuz dağılma sabiti  $R_L$  sabiti şu şekilde hesaplanabilir:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0} \quad (6)$$

Freundlich İzotermi denkleminin lineer formu şu şekilde yazılabilir:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \cdot \ln C_e \quad (7)$$

Bu lineer denklemde  $\ln q_e$  değerlerinin  $\ln C_e$  değerlerine karşı grafiği çizilirse elde edilen doğrunun denkleminin kayımı  $\ln K_F$  değerini, eğimi ise  $1/n$  değerini verir.  $n$  ifadesi birimsiz bir sabit olup adsorpsiyon yoğunluğunun bir ölçüsünü vermektedir.  $K_F$  deneysel olarak elde edilen Freundlich izotermi sabiti (L/g) olup adsorpsiyon kapasitesine ait bir sabittir.

### 2.3.2. Yöntem

Adsorpsiyon yüzdesi (%A.Y.), adsorpsiyon kapasitesi ( $q_e$ ), maksimum adsorpsiyon kapasitesi ( $q_{max}$ ), adsorpsiyon denge sabiti ( $K_c$ ), adsorpsiyon serbest Gibbs enerjisini ( $\Delta G^0$ ) ve adsorpsiyon türünün belirlenmesi amacıyla  $0.5 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-4}$ ,  $10 \times 10^{-4}$  tekli tuz çözeltileri hazırlandı. Bu çözeltilerin pH'ları, doğal pH'ları olup değişkendir.

10 mg MWCNT türevi 50 mL'lik falkon tüpe alındı. Hazırlanan tuz çözeltisinden 20 mL falkon tüpe ilave edildi. 20 dakika ultrasonik banyoda dispersiyeye edildi. 300 rpm karıştırma hızında  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 3 saat çalkalandı. Dinlenmesi için 1 gece bırakıldı.  $0.45 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik şırınga ucu PTFE filtre ile süzülerek ICP-OES'de miktar belirlenmesi yapıldı [46].

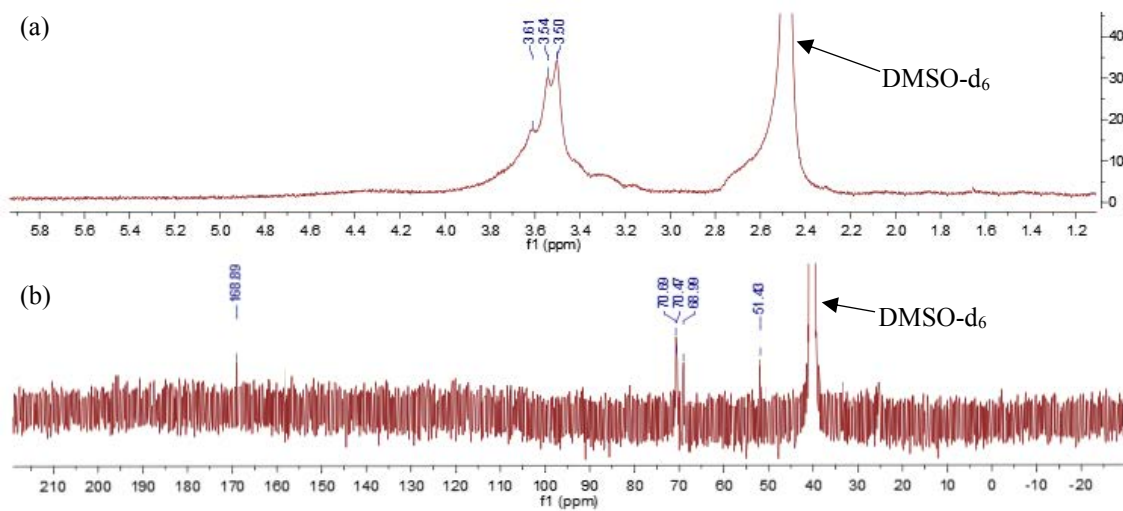


ICP-OES parametreleri: Source Equilibration Delay (sec):15, Plasma Conditions: Same For All Elements, Plasma Aerosol Type: Wet, Nebuliser Start-up: Instant, Plasma (L/min): 15, Aux (L/min): 0.2, Nebuliser (L/min): 0.80, Power: 1300, View Dist.: 15.0, Plasma View: Axial, Sample Flow Rate (mL/min): 1.50. Dalgaboyları (nm): Co 228.616, Cr 267.716, Cu 327.393, Fe 238.204, Mn 257.610, Zn 206.200. Korelasyon katsayıları ( $R^2$ ): Co 0.999927, Cr 0.998509, Cu 0.997842, Fe 0.998399, Mn 0.999904, Zn 0.999751.

### 3. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışma kapsamında 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiği Steglich esterleşmesi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak saflaştırılan MWCNT bileşikler  $H_2SO_4/HNO_3$  asit karışımı ile oksidasyona maruz bırakılmıştır. Karboksillenmiş MWCNT bileşikler Steglich amit sentezi yöntemi ile sentezlenmiştir. Elde edilen 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiğinin yapısal karakterizasyonu  $^1H$ -NMR,  $^{13}C$ -NMR, FT-IR, TGA ve TEM teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca seçilen bazı metal nitrat tuzları ile sentezlenen 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiği arasındaki adsorbsiyon türü ve mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır. Adsorpsiyon yüzdesi, adsorpsiyon denge sabiti, serbest Gibbs enerjisi, adsorpsiyon türü gibi bazı adsorpsiyon parametreleri belirlenmiştir.

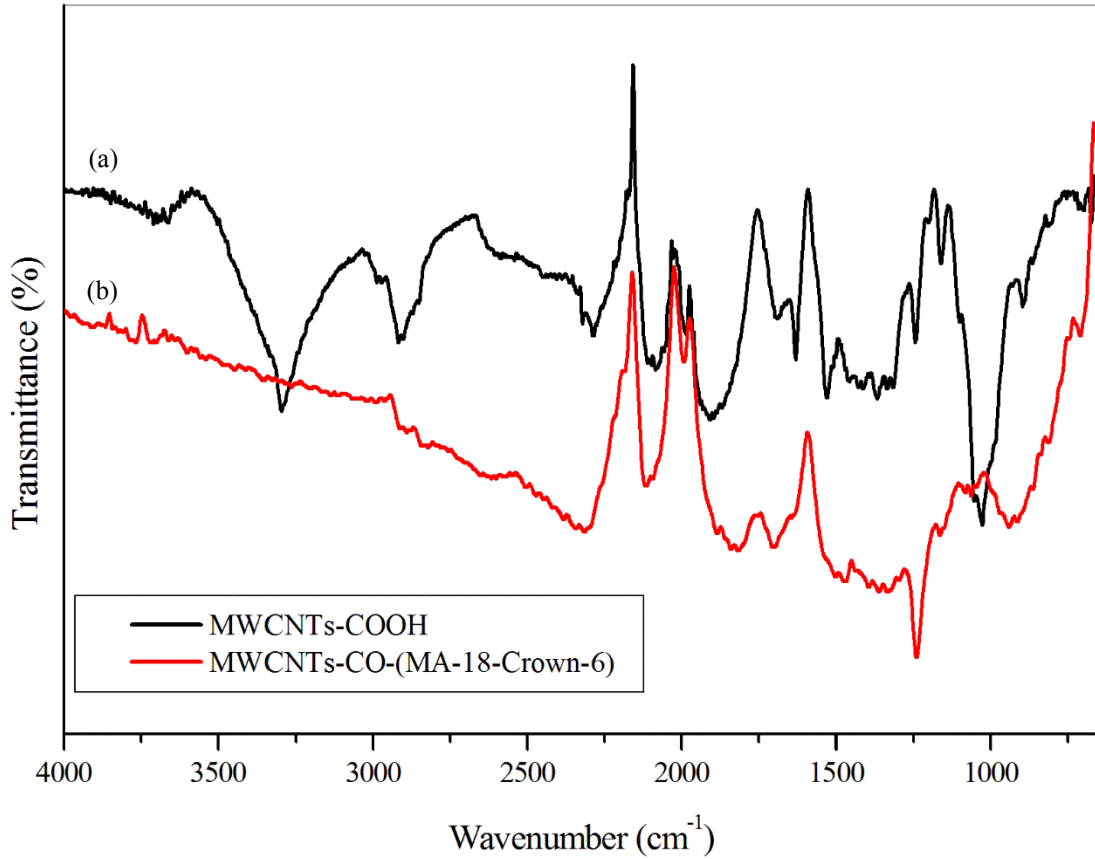
MWCNT'lerin oksidasyonu için  $HNO_3/H_2SO_4$  yöntemi kullanılmıştır [15]. Saflaştırılmış MWCNT, hacimce 1/3 oranında  $HNO_3/H_2SO_4$  ile oksidasyona maruz bırakılarak karboksilli asit modifiye MWCNT bileşiği elde edilmiştir. MWCNT-COOH bileşiği FT-IR spektrumu incelendiğinde, karboksilli asit  $-C(O)-OH$  gerilmesi ( $3267\text{ cm}^{-1}$ ) ve  $C=O$  karbonil gerilmesi ( $1631\text{ cm}^{-1}$ ) bileşik kontrol edilmiştir. Karboksillenmiş MWCNT bileşiği Steglich esterleşme-amit sentezi reaksiyonu ile 1-aza-18-crown-6 bileşiğinin amin grubu üzerinden disiklohegzilkarbodiimit (DCC) kullanılarak amit oluşturmuştur. Steglich esterleşmesi kullanılarak kısa sürede daha kararlı bileşikler üzerinden ve hacimli reaktantların kullanılmasıyla sterik engel sebebiyle ana ürün olarak eldesi zor olan 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiği elde edilmiştir.



Şekil 2. Sentezlenen 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiğinin  $^1H$ -NMR (a) ve  $^{13}C$ -NMR (b) spektrumu.

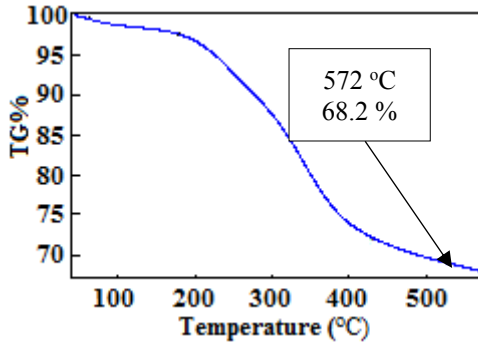
Sentezlenen bileşiğin  $^1\text{H-NMR}$  spektrumu Şekil 2(a) incelendiğinde crown eter halkası üzerinde yer alan azota bağlı metilen protonları ( $\text{N-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$ ) 3.62 ppm'de gözlenmiştir. Ayrıca diğer metilen protonları sırasıyla 3.54 ppm ( $\text{N-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$ ) ve 3.50 ppm'de ( $\text{O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$ ) gözlenmiştir.  $^{13}\text{C-NMR}$  spektrumu Şekil 2(b)'de 168.9 ppm'de karbonil karbonuna ( $\text{-N-C=O}$ ) ait kimyasal kayma gözlenmiştir. Bununla beraber 51 ppm'de ( $\text{CO-N-CH}_2$ ), 69 ppm'de ( $\text{CO-N-CH}_2\text{-CH}_2$ ), 70.3 ppm'de ( $\text{O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$ ), 70.6 ppm'de ( $\text{O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O}$ ) metilen karbonlarına ait kimyasal kaymalar tespit edilmiştir.

Bileşiğin FTIR spektrumunda (Şekil 3(a)) karboksilli aside ait  $\text{-C(O)-OH}$  gerilmesinin ( $3267\text{ cm}^{-1}$ ) kaybolması ve  $\text{C=O}$  karbonil gerilmesi'nin ( $1631\text{ cm}^{-1}$ ),  $1700\text{ cm}^{-1}$  deki  $\text{O=C-N}$  gerilmesine kayması bileşiğin kovalent modifikasyonla modifiye edildiğini göstermektedir. Ayrıca, Şekil 3(b)'de  $2914\text{-}2841\text{ cm}^{-1}$   $\text{CH}_2$  gruplarının asimetrik ve simetrik gerilmeleri,  $1241\text{-}1472\text{ cm}^{-1}$  amite bağlı metilenin ( $\text{O=C-N-CH}_2$ ) simetrik ve asimetrik eğilmeleri,  $1163$  eter eğilmesi,  $814\text{ cm}^{-1}$  eter eğilmesi gözlenmiştir.

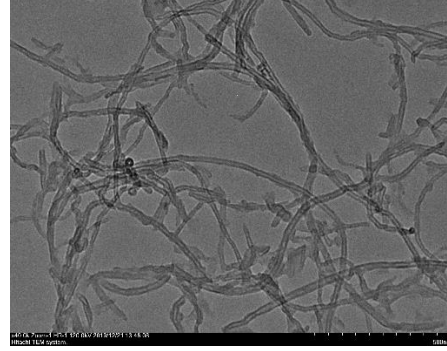


Şekil 3. MWCNT-COOH bileşiğinin (a) ve sentezlenen 1-aza-18-crown-6 modifiye MWCNT bileşiğinin (b) FTIR spektrumu.

TGA spektrumu (Şekil 4) incelendiğinde  $572\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar % 31.8'inin bozunduğu gözlenmiştir. Ancak MWCNT bileşiğinin  $595\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye dek sadece %3.6'sı ve MWCNT-COOH bileşiğinin de  $595\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar %22.8'inin bozunduğu literatür verilerinde yer almaktadır [15]. Bununla beraber TEM görüntüsü (Şekil 5) incelendiğinde nanotüp yapısının korunduğu gözlenmiştir.



Şekil 4: MWCNT-CO-(MA-18-CROWN-6) bileşiğinin termogram değerlendirmesi.



Şekil 5: MWCNT-CO-(MA-18-CROWN-6) bileşiğinin TEM görüntüsü (x40.0k Zoom-1 HR-1 120.0 kV ve 500 nm).

Karakterize edilen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği metal adsorpsiyonu çalışmalarında kullanılmıştır. Bu amaçla farklı konsantrasyonlarda ( $0.5 \times 10^{-4}$  M,  $1.0 \times 10^{-4}$  M,  $5.0 \times 10^{-4}$  M,  $10.0 \times 10^{-4}$  M) hazırlanan  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  tuz çözeltileri hem MWCNT hem de MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğine uygulanmıştır. İşlem sonunda sulu çözeltide kalan tuz konsantrasyonu ICP-OES ile belirlenmiştir (Tablo 1).

Dört farklı konsantrasyonda gerçekleştirilen deneylerde genel olarak konsantrasyon artışının adsorpsiyon yüzdesini azalttığı gözlenmiştir.  $\text{Co}^{2+}$  iyonu MWCNT bileşiği tarafından çok az adsorbe edilirken (% 0.38) MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin % 16.33 oranında daha iyi adsorbe ettiği gözlenmiştir.  $\text{Cr}^{3+}$  iyonu MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği, fonksiyonel grup içermeyen MWCNT bileşiğine göre dört kat daha fazla adsorbe ettiği gözlenmiştir (% 66.24 > % 17.54).  $\text{Cu}^{2+}$  iyonu da benzer şekilde modifiye edilen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği tarafından yaklaşık 8 kat daha iyi adsorplanmıştır (% 41.09 > % 5.94). Demir (III) iyonunun karbon nanotüp türevleri tarafından çok iyi adsorplandığı bilinmektedir [46]. Ayrıca crown eter türevleri de metal iyonlarına ilgi göstermektedir [47-51].  $\text{Fe}^{3+}$  iyonu, hem MWCNT bileşiği tarafından (% 84.41) hem de MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği tarafından (% 96.15) yüksek oranlarda adsorbe edilmiştir.  $\text{Mn}^{2+}$  iyonu, her iki adsorban tarafından artan konsantrasyonlarla daha iyi yüzdeyle adsorbe edilmiştir. Ancak adsorbanlar arasında adsorpsiyon oranında pek fark olmadığı, çok az bir farkla sentezlenen crown eter modifiye MWCNT bileşiğinin yüksek verimle adsorpsiyon yaptığı olduğu gözlenmiştir (% 37.42 > % 36.11). Son olarak çinko (II) iyonun, sentezlenen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği tarafından ham karbon nanotüpüne göre yaklaşık altı kat oranla daha iyi adsorbe edildiği tespit edilmiştir. (% 5.43 < % 29.40). Sentezlenen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) adsorbanı için adsorpsiyon yüzdesi büyükten küçüğe sıralanırsa  $\text{Fe}^{3+} > \text{Cr}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+}$  şeklindedir.

Modifiye olmamış CNT'e göre crown eter modifiye olmuş CNT'lerin yüksek seviyede adsorbe etmesinin iki sebebi vardır. Birincisi modifiye edilmiş MWCNT bileşiğinin yüksek fiziksel adsorpsiyonu; diğer önemli sebep ise crown eter kimyasının temeli olan iyon-dipol etkileşimiyle kompleksleşme özelliğini sergilemesidir [27]. Bu da literatüre yenilik katmaktadır.

Eşitlik (3) ve (4) kullanılarak  $\Delta G^\circ$  değerleri hesaplanmıştır. Serbest Gibbs enerjisinin negatif işaretli olması adsorpsiyonun kendiliğinden (istemli) gerçekleştiğini, pozitif işaretli olması ise adsorpsiyonun gerçekleşmesi için enerjiye ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Buna göre Tablo 1 incelendiğinde demir (III) iyonunun her iki adsorban tarafından adsorpsiyonunun istemli olduğu, diğer tuzların enerjiye ihtiyaç duyduğu gözlenmiştir.

Tablo 1. MWCNT ve MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiklerinin, 25 °C'de  $Co^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  iyonlarını adsorpsiyonu için bulunan veya hesaplanan % A.Y.,  $C_0$ ,  $C_e$ ,  $q_e$ ,  $C_e/q_e$ ,  $\ln q_e$ ,  $\ln C_e$  ve  $\Delta G^\circ$  değerleri.

	$C_0$ (mg/L)	$C_e$ (mg/L)	A.Y. (%)	$q_e$ (mg/g)	$C_e/q_e$ (g/L)	$\ln q_e$	$\ln C_e$	$\Delta G^\circ$ (kJ/mol)	
$Co^{2+}$	MWCNT	2.99	2.98	0.38	0.02	129.57	-3.772	1.092	13742.2
		5.98	5.96	0.38	0.05	129.57	-3.079	1.785	
		29.92	29.82	0.32	0.19	156.95	-1.661	3.395	
		59.83	59.66	0.28	0.34	175.47	-1.079	4.089	
	MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6)	2.99	2.50	16.33	0.98	2.56	-0.023	0.917	4246.6
		5.98	5.14	14.16	1.69	3.03	0.527	1.636	
		29.92	28.95	3.23	1.93	15.00	0.658	3.366	
		59.83	58.83	1.67	2.00	29.42	0.693	4.075	
$Cr^{3+}$	MWCNT	2.88	2.38	17.54	1.01	2.35	0.011	0.866	3897.76
		5.77	4.78	17.09	1.97	2.43	0.678	1.564	
		28.83	27.08	6.05	3.49	7.76	1.250	3.299	
		57.65	54.47	5.52	6.36	8.56	1.850	3.998	
	MWCNT-CO-(MA-18-CROWN-6)	2.88	0.97	66.24	3.82	0.25	1.340	-0.027	-839.61
		5.77	3.14	45.60	5.26	0.60	1.660	1.143	
		28.83	25.13	12.82	7.39	3.40	2.000	3.224	
		57.65	53.03	8.01	9.24	5.74	2.224	3.971	
$Cu^{2+}$	MWCNT	2.928	2.75	5.94	0.35	7.91	-1.056	1.013	6928.96
		5.856	5.54	5.40	0.63	8.77	-0.459	1.712	
		29.28	28.08	4.10	2.40	11.70	0.875	3.335	
		58.56	56.54	3.45	4.04	14.00	1.396	4.035	
	MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6)	2.928	1.73	41.09	2.41	0.72	0.878	0.545	1356.21
		5.856	3.99	31.88	3.73	1.07	1.317	1.384	
		29.28	26.87	8.23	4.82	5.57	1.573	3.291	
		58.56	54.42	7.07	8.28	6.57	2.114	3.997	
$Fe^{3+}$	MWCNT	3.04	1.30	57.10	3.47	0.38	1.244	0.265	-1850.09
		6.08	2.17	64.26	7.81	0.28	2.055	0.775	
		30.38	4.74	84.41	51.28	0.09	3.937	1.555	
		60.75	16.94	72.12	87.62	0.19	4.473	2.830	
	MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6)	3.04	0.12	96.15	5.84	0.02	1.765	-2.146	-7133.82
		6.08	0.53	91.28	11.09	0.05	2.406	-0.635	
		30.38	8.12	73.27	44.51	0.18	3.796	2.094	
		60.75	21.65	64.36	78.20	0.28	4.359	3.075	
$Mn^{2+}$	MWCNT	1.91	1.88	1.54	0.06	31.86	-2.830	0.631	3755.86
		3.82	2.68	29.96	2.29	1.17	0.828	0.984	
		19.10	12.29	35.64	13.61	0.90	2.611	2.509	
		38.19	24.40	36.11	27.58	0.88	3.317	3.195	
	MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6)	1.91	1.58	17.05	0.65	2.43	-0.429	0.460	4387.27
		3.82	3.33	12.86	0.98	3.39	-0.018	1.202	
		19.10	12.64	33.80	12.91	0.98	2.558	2.537	
		38.19	23.90	37.42	28.58	0.84	3.353	3.174	

Tablo 1. (Devamı).

		3.07	2.98	2.97	0.18	16.36	-1.704	1.091	
	MWCNT	6.14	6.12	0.26	0.03	191.25	-3.442	1.812	11511.68
		30.68	30.29	1.27	0.78	38.83	-0.248	3.411	
Zn <sup>2+</sup>		61.36	58.03	5.43	6.66	8.71	1.896	4.061	
	MWCNT-	3.07	2.17	29.40	1.80	1.20	0.590	0.773	
	CO-(MA-	6.14	5.03	17.96	2.20	2.28	0.790	1.616	2845.94
	18-Crown-	30.68	28.36	7.56	4.64	6.11	1.535	3.345	
	6)	61.36	57.02	7.07	8.68	6.57	2.161	4.043	

Co<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> iyonları için Tablo 1’de yer alan C<sub>0</sub>, C<sub>e</sub>, q<sub>e</sub>, C<sub>e</sub>/q<sub>e</sub>, Ln q<sub>e</sub>, Ln C<sub>e</sub> değerleri kullanılarak adsorpsiyon türü belirlenmeye çalışılmıştır. Adsorpsiyonların Langmuir izotermine ya da Freundlich izotermine göre gerçekleştiği Eşitlik (5), (6) ve (7) kullanılarak elde edilen adsorpsiyon sabitlerine göre belirlenmiştir (Tablo 2).

İlk olarak adsorpsiyonun hangi izoterm göre gerçekleştiğinin belirlenmesi amacıyla Langmuir ve Freundlich izoterm grafiklerinin korelasyon sabitleri (R<sup>2</sup> değerleri) incelenmiştir. Adsorpsiyon, daha yüksek korelasyon sabitine sahip olan izoterm göre gerçekleşmektedir (eğer izotermelerin her ikisi de 0.95 üzeri korelasyon sabitine sahipse adsorpsiyon her iki izoterm göre gerçekleşebilir). MWCNT bileşiğinin R<sup>2</sup> değerleri incelendiğinde kobalt, krom (III), bakır, demir, mangan (II) ve çinko iyonları için adsorpsiyonunun Freundlich izotermine (Tablo 1) göre gerçekleştiği söylenebilir. Sentezlenen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin seçilen metal iyonlarını adsorpsiyonları incelendiğinde; kobalt, krom (III), demir (III) iyonları için adsorpsiyonunun büyük oranda Langmuir izotermine (Tablo 1); bakır, mangan (II), çinko iyonları için adsorpsiyonunun Freundlich izotermine (Tablo 1) göre gerçekleşmektedir. Bu sonuçlara göre MWCNT bileşiğinin Co<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> iyonlarını adsorpsiyonu Freundlich izotermine göre, sentezlenen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin uygulanan metal iyonlarını adsorpsiyonu Freundlich ya da Langmuir izotermine göre gerçekleşmektedir.

Langmuir izotermine ait sabitlerden olan q<sub>max</sub> değerlerinin pozitif olması çizilen Langmuir izotermine uygun olduğunu göstermektedir. Adsorbent q<sub>max</sub> değerinin artması, adsorpsiyonun artması demektir. Ayrıca q<sub>max</sub> değerlerinin pozitif olması adsorban-metal iyonu kompleksleri için Langmuir izotermine uygun olduğunu göstermektedir. Modifiye edilen MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin Fe<sup>3+</sup> iyonu ile adsorpsiyonuna ait q<sub>max</sub> değerinin diğer iyonlara göre yaklaşık 8-10 kat büyük olması adsorpsiyonunun Langmuir izotermine göre gerçekleştiğini (86.89) ve Fe<sup>3+</sup> iyonunun adsorpsiyonu için oldukça iyi bir adsorban olduğunu göstermektedir.

Ayrıca Langmuir izotermine göre adsorpsiyonu gerçekleştiren iyonların elverişliliğinin belirlenmesi amacıyla boyutsuz dağılma sabiti (R<sub>L</sub>) hesaplanmıştır. MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin Co<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup> ve Fe<sup>3+</sup> iyonlarıyla, Langmuir izotermine göre gerçekleşen adsorpsiyonu için boyutsuz dağılma sabiti değerleri incelendiğinde R<sub>L</sub> değerinin 0 < R<sub>L</sub> < 1 olması (sırasıyla 0.0004, 0.0006, 0.0008) adsorpsiyonun elverişli olduğunu göstermektedir.

Buna bağlı olarak, Langmuir izotermi kullanılarak hesaplanan K<sub>L</sub> sabitinin büyüklüğü, adsorbantın ne kadar iyi bir adsorban olduğunu da göstermektedir. MWCNT-CO-(MA-18-

Crown-6) bileşiğinin, Langmuir izotermine elverişli olan  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  ve  $\text{Fe}^{3+}$  iyonlarıyla adsorpsiyonu için Tablo 2’de verilen  $K_L$  değerleri incelendiğinde iyi bir adsorban olduğu söylenebilir.

Bununla beraber Freundlich izoterminin elverişli olduğu izotermlerden elde edilen adsorpsiyon yoğunluğu değerinin (n), -bu değer adsorban yüzeylerindeki bağlanmaların gerçekleşebileceği aktif yerlerin bir ölçüsüdür-, birden büyük ise ( $n > 1$ ) adsorpsiyonun elverişli olduğunu ve fiziksel adsorpsiyon olduğunu, birden küçük ise ( $n < 1$ ) adsorpsiyonun kimyasal olduğunu göstermektedir [46]. Tablo 2 incelendiğinde MWCNT bileşiğinin demir (III), mangan (II), çinko iyonlarına ve MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin mangan (II) iyonuna karşı Freundlich izotermine göre iyi birer adsorban oldukları gözlenmektedir. Adsorpsiyonları ise Freundlich izotermine göre fizikseldir. Ayrıca Freundlich izotermi kullanılarak hesaplanan adsorpsiyon kapasitesi ( $K_F$ ) sabitinin büyük olması istenilen bir durumdur. Korelasyon sabitine ( $R^2$ ) göre MWCNT bileşiğinin tüm adsorpsiyonları Freundlich izotermine göre gerçekleşmekte olduğu belirlenmişti. Aynı zamanda  $K_F$  değerlerinin de oldukça büyük olması bu durumu desteklemektedir. MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin Langmuir izotermine göre gerçekleşen  $\text{Cr}^{3+}$  ve  $\text{Fe}^{3+}$  iyonlarını adsorpsiyonu için bu değer oldukça düşüktür.

Tablo 2. MWCNT ve MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiklerinin 25 °C’de  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  iyonlarını adsorpsiyonu için Langmuir ve Freundlich izotermleri sabitleri.

	Langmuir İzotermi				Freundlich İzotermi			İzoterm Türü	
	$q_{\max}$	$K_L$	$R^2$	$R_L$	n	$K_F$	$R^2$		
MWCNT	$\text{Co}^{2+}$	1.1823	0.0067	0.9786	0.0292	0.8955	194.6517	0.9993	Freundlich
	$\text{Cr}^{3+}$	7.7995	0.0527	0.8604	0.0038	0.5497	2.0321	0.9583	Freundlich
	$\text{Cu}^{2+}$	9.0603	0.0137	0.9745	0.0143	0.8141	9.9012	0.9996	Freundlich
	$\text{Fe}^{3+}$	-143.2848	-0.0250	0.1757	-0.0081	1.4523	0.5169	0.8879	Freundlich
	$\text{Mn}^{2+}$	-1.2600	-0.0470	0.2922	-0.0043	2.5202	4.2256	0.7973	Freundlich
	$\text{Zn}^{2+}$	-0.5912	-0.0161	0.2530	-0.0126	1.9599	20.9408	0.7022	Freundlich
MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6)	$\text{Co}^{2+}$	2.0684	0.4988	0.9993	0.0004	0.2662	2.1322	0.7219	Langmuir
	$\text{Cr}^{3+}$	9.4532	0.3285	0.9877	0.0006	0.2115	0.0016	0.9875	Langmuir
	$\text{Cu}^{2+}$	8.6223	0.1208	0.8885	0.0017	0.3367	0.1268	0.9060	Freundlich
	$\text{Fe}^{3+}$	86.8907	0.2600	0.9320	0.0008	0.4992	0.0038	0.9979	Langmuir
	$\text{Mn}^{2+}$	-9.9516	-0.0341	0.7099	-0.0059	1.5359	2.5976	0.9734	Freundlich
	$\text{Zn}^{2+}$	10.3426	0.0536	0.8318	0.0037	0.4869	0.8502	0.9590	Freundlich

Sonuç olarak bu çalışmada Steglich esterleşmesi / amit sentezi hacimli ve sterik açıdan pek mümkün olmayan amitlerin sentezinde başarıyla uygulanmıştır. MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği; MWCNT bileşiğinin karboksilasyonu ve karboksillenmiş MWCNT-COOH bileşiğinin 1-aza-18-crown-6 bileşiğiyle Steglich amit sentezi reaksiyonu üzerinden başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Yapısal karakterizasyonları, FTIR, NMR, TGA ve TEM teknikleri kullanılarak başarılı bir şekilde yapılmıştır. Modifiye edilmiş MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiğinin adsorpsiyon çalışmaları sonucunda ilginç bulgular elde edilmiştir. Adsorpsiyon sonuçları incelendiğinde, uygulanan tüm iyonların MWCNT-CO-(MA-18-Crown-6) bileşiği tarafından MWCNT bileşiğine göre daha fazla adsorbe edildiği tespit edilmiştir. Bu durum yüzey modifikasyonu ile moleküle kovalent olarak bağlanan 1-aza-18-crown-6 grubunun metal iyonlarına olan ilgisiyle açıklanabilir. Crown eter modifiye MWCNT bileşiğinin yüksek seviyede adsorpsiyon göstermesinin sebebi crown eterle metal iyonları arasındaki kuvvetli iyon-dipol etkileşmesine dayanan kompleksleşme sonucunda olduğu gözlenmektedir. Elde edilen crown eter modifiye MWCNT bileşiği  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,

Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> iyonlarının sulu ortamlardan adsorpsiyonu için başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

### Teşekkür

Bu çalışma Balıkesir Üniversitesi BAP birimi tarafından BAP:2019/066 ve BAP:2020/053 numaralı projelerle desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Hong, C. Y., You, Y. Z. ve Pan, C. Y., Synthesis of water-soluble multiwalled carbon nanotubes with grafted temperature-responsive shells by surface RAFT polymerization, **Chemistry of Materials**, 17, 9, 2247–2254, (2005).
- [2] Hadavifar, M., Bahramifar, N., Younesi, H. ve Li, Q., Adsorption of mercury ions from synthetic and real wastewater aqueous solution by functionalized multiwalled carbon nanotube with both amino and thiolated groups, **Chemical Engineering Journal**, 237, 217–228, (2014).
- [3] Mormann, W., Lu, Y., Zou, X. ve Berger, R., Modification and grafting of multiwalled carbon nanotubes with bisphenol-A- polycarbonate, **Macromolecular Chemistry and Physics**, 209, 2113–2121, (2008).
- [4] Li, Z., *et al.*, Chemically-modified activated carbon with ethylenediamine for selective solid-phase extraction and preconcentration of metal ions, **Analytica Chimica Acta**, 632, 2, 272–277, (2009).
- [5] Wang, Y., Iqbal, Z. ve Malhotra, S. V., Functionalization of carbon nanotubes with amines and enzymes, **Chemical Physics Letters**, 402, 96–101, (2005).
- [6] Jiang, G., Wang, L., Chen, C., Dong, X., Chen, T. ve Yu, H., Study on attachment of highly branched molecules onto multiwalled carbon nanotubes, **Materials Letters**, 59, 2085–2089, (2005).
- [7] Wu, T. ve Yuan, Y. J., Alkynylation of carbon nanotube by a peptide bond, **Materials Letters**, 133, 64–66, (2014).
- [8] Profumo, A., *et al.*, Multiwalled carbon nanotube chemically modified gold electrode for inorganic as speciation and Bi(III) determination, **Analytical Chemistry**, 78, 12, 4194–4199, (2006).
- [9] Lim, J. K., *et al.*, Selective thiolation of single-walled carbon nanotubes, **Synthetic Metals**, 139, 2, 521–527, (2003).
- [10] Lin, Y., Zhou, B., Fernando, K. A. S., Liu, P., Allard, L. F. ve Sun, Y. P., Polymeric carbon nanocomposites from carbon nanotubes functionalized with matrix polymer, **Macromolecules**, 36, 19, 7199–7204, (2003).
- [11] Karousis, N., Tagmatarchis, N. ve Tasis, D., Current progress on the chemical modification of carbon nanotubes, **Chemical Reviews**, 110, 9, 5366–5397, (2010).
- [12] Kim, S. W., *et al.*, Surface modifications for the effective dispersion of carbon nanotubes in solvents and polymers, **Carbon N. Y.**, 501, 3–33, (2012).
- [13] Xing, L. ve Imae, T., Size-controlled in situ synthesis of metal nanoparticles on dendrimer-modified carbon nanotubes, **The Journal of Physical Chemistry C**, 111, 6, 2416–2420, (2007).
- [14] Zeynalov, E., *et al.*, The peculiar behavior of functionalized carbon nanotubes in hydrocarbons and polymeric oxidation environments, **Journal of Adhesion Science and Technology**, 31, 9, 988–1006, (2017).
- [15] Çalışır, Ü., Çiçek, B., Synthesis of thiol-glycol-functionalized carbon nanotubes and characterization with FTIR, TEM, TGA, and NMR technics, **Chemical**

- Papers**, 74, 10, 3293-3302, (2020).
- [16] Çalışır, Ü., Çiçek, B., Doğan, M., Microwave-assisted cross-coupling synthesis of aryl functionalized MWCNTs and investigation of hydrogen storage properties, **Chemical Papers**, 1-8, (2021).
- [17] Xue, W. and Li, P., **dielectrophoretic deposition and alignment of carbon nanotubes** in Yellampalli, D. S., *Carbon nanotubes - synthesis, characterization, applications*, Intech, 171–190, London, (2011).
- [18] Li, R., *et al.*, Multiwalled carbon nanotubes modified with 2-aminobenzothiazole modified for uniquely selective solid-phase extraction and determination of Pb(II) ion in water samples, **Microchimica Acta**, 172, 3–4, 269–276, (2011).
- [19] Zang, Z., Hu, Z., Li, Z., He, Q. and Chang, X., Synthesis, characterization and application of ethylenediamine-modified multiwalled carbon nanotubes for selective solid-phase extraction and preconcentration of metal ions, **Journal of Hazardous Materials**, 172, 2–3, 958–963, (2009).
- [20] Santhosh, P., Manesh, K. M., Gopalan, A. ve Lee, K. P., Novel amperometric carbon monoxide sensor based on multi-wall carbon nanotubes grafted with polydiphenylamine-Fabrication and performance, **Sensors & Actuators, B: Chemical**, 125, 1, 92–99, (2007).
- [21] Kumar, S., Upadhyay, S. N. ve Upadhya, Y. D., Removal of copper by adsorption on fly ash, **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, 37, 4, 281–290, (1987).
- [22] Dai, B., *et al.*, Schiff base-chitosan grafted multiwalled carbon nanotubes as a novel solid-phase extraction adsorbent for determination of heavy metal by ICP-MS, **Journal of Hazardous Materials**, 219–220, 103–110, (2012).
- [23] Erk, Ç., Çakır, U., Cicek, B., Estimation of  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  complexation with 12 crown-4, 15 crown-5 and 18 crown-6 using a  $\text{Na}^+$ ISE in dioxane-water, part IV - Cation equilibrium constants of macrocyclic ethers with ion selective electrodes, **Mikrochimica Acta**, 132, 79–82, (1999).
- [24] Çalışır, Ü., Çiçek, B., Taç eterlerin metal iyonları ile kompleksleşmesinin kondüktometriye Job's Plot yönteminin uygulanması ile belirlenmesi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 21, 2, 840-854, (2019).
- [25] Çiçek, B., Çakır, Ü., Azizoglu, A., The associations of macrocyclic ethers with cations in 1,4-dioxane/ water mixtures; Potentiometric  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  binding measurements and computational study, **Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry**, 72,121–125, (2012).
- [26] Çalışır, U., Çiçek, B., Comparison of classic and microwave-assisted synthesis of benzo-thio crown ethers, and investigation of their ion pair extractions, **Journal of Molecular Structure**, 1148, 505–511, (2017).
- [27] Çiçek, B., Çakır, Ü., Erk, Ç., The determination of crown–cation complexation behavior in dioxane/water mixtures by conductometric studies, **Polymers for Advanced Technologies**, 836, 831–836, (1998).
- [28] Çiçek, B. ve Çalışır, Ü., Bazı karbazol schiff bazlarının katyon bağlama özelliklerinin kondüktometrik incelenmesi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 19, 2, 246–256, (2017).
- [29] Czikkely, M., Neubauer, E., Fekete, I., Ymeri, P. ve Fogarassy, C., Review of heavy metal adsorption processes by several organic matters from wastewaters, **Water (Switzerland)**, 10, 10, 1–15, (2018).
- [30] Ali, J., *et al.*, Efficient, stable and selective adsorption of heavy metals by thio-functionalized layered double hydroxide in diverse types of water, **International Journal of Chemical Engineering**, 332, September 2017, 387–397, (2018).



- [31] Sun, D. T., *et al.*, Rapid, selective heavy metal removal from water by a metal-organic framework/polydopamine composite, **ACS Central Science**, 4, 3, 349–356, (2018).
- [32] Tizaoui, K., Benguella, B., ve Makhoukhi, B., “Selective adsorption of heavy metals ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , and  $\text{Cr}^{3+}$ ) from aqueous solutions onto natural marne clay, **Desalination and Water Treatment**, 142, 252–259, (2019).
- [33] Kayacan, S., Kömür ve koklarla sulu çözeltilerden boyar maddelerin uzaklaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, (2007).
- [34] Balcı, A., Astrazon kırmızısı ve astrazon mavisinin ticari aktif karbon üzerine adsorpsiyonu ve adsorpsiyon prosesinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, (2018).
- [35] Orbak, İ., Aktif karbon ile çevre kirletici bazı unsurların giderilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (2009).
- [36] Swenson, H. ve Stadie, N. P., Langmuir’s theory of adsorption: A centennial review, **Langmuir**, 35, 16, 5409–5426, (2019).
- [37] Langmuir, I., The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids., **Journal of the American Chemical Society**, 38, 11, 2221–2295, (1916).
- [38] Tümsek, F. ve Karabacakoğlu, B., Nikel ( II ) iyonlarının sulu çözeltiden granül aktif karbon üzerine adsorpsiyonu, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 14, 2, 1–6, (2012).
- [39] Alkan, M. ve Dogan, M., Adsorption of copper (II) onto perlite, **Journal of Colloid and Interface Science**, 243, pp. 280–291, (2001).
- [40] Wang, J., Ma, X., Fang, G., Pan, M., Ye, X. ve Wang, S., Preparation of iminodiacetic acid functionalized multi-walled carbon nanotubes and its application as sorbent for separation and preconcentration of heavy metal ions, **Journal of Hazardous Materials**, 186, 2–3, 1985–1992, (2011).
- [41] Duran, A., Tuzen, M. ve Soylak, M., Preconcentration of some trace elements via using multiwalled carbon nanotubes as solid phase extraction adsorbent, **Journal of Hazardous Materials**, 169, 1–3, 466–471, (2009).
- [42] Li, L., Huang, Y., Wang, Y. ve Wang, W., Hemimicelle capped functionalized carbon nanotubes-based nanosized solid-phase extraction of arsenic from environmental water samples, **Analytica Chimica Acta**, 631, 2, 182–188, (2015).
- [43] Tuzen, M., Saygi, K. O. ve Soylak, M., Solid phase extraction of heavy metal ions in environmental samples on multiwalled carbon nanotubes, **Journal of Hazardous Materials**, 152, 2, 632–639, (2008).
- [44] Vellaichamy, S. ve Palanivelu, K., Preconcentration and separation of copper, nickel and zinc in aqueous samples by flame atomic absorption spectrometry after column solid-phase extraction onto MWCNTs impregnated with D2EHPA-TOPO mixture, **Journal of Hazardous Materials**, 185, 2–3, 1131–1139, (2011).
- [45] Zhao, X., Song, N. ve Jia, Q., Determination of Cu, Zn, Mn, and Pb by microcolumn packed with multiwalled carbon nanotubes on-line coupled with flame atomic absorption spectrometry, **Microchimica Acta**, 166, 329–335, (2009).
- [46] Çalışır, Ü., Organo-modifiye karbon nanotüplerin sentezi, karakterizasyonu ve bazı uygulama alanları, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, (2020).
- [47] Çakır, Ü., Çiçek, B., Yıldız, Y.K., Alkan, M., Solvent effect upon ion-pair extraction of different sodium dyes using some crown ethers, **Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry**, 34, 153–165, (1999).
- [48] Çakır, Ü., Çiçek, B., Extraction-ability and -selectivity of tetra-aza-crown ethers

- for transition metal cations, **Transition Metal Chemistry**, 29, 263–268, (2004).
- [49] Çiçek, B., Yıldız, A., Synthesis, Metal ion complexation and computational studies of thio oxocrown ethers, **Molecules**, 16, 8670–8683, (2011).
- [50] Çiçek, B., Onbaşıoğlu, Z., Synthesis and characterization of 1,3,4-thiadiazole-2,5-dithio crown ethers, **Heterocyclic Communication**, 22, 329–332, (2016).
- [51] Çiçek, B., Çalışır, Ü., The investigation of complexation properties and hard-soft acid-base relationship between thiocrown ethers and metal ions, **Letters in Organic Chemistry**, 13, 572–577, (2016).

---

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ  
MAKALE YAZIM KURALLARI

---

- Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology) bütün Fen, Mühendislik ve Mimarlık Anabilim Dallarını ilgilendiren konulardaki önemli, özgün, kaliteli araştırma ve çalışma makalelerini yayımlayan **hakemli ve bilimsel** bir dergidir. Ocak ve Temmuz aylarında olmak üzere yılda iki kez yayınlanır.
- Dergide yayımlanan makaleler başka hiçbir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Kısmen veya tamamen yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden hiçbir yerde kullanılamaz. Dergiye gönderilen makalelerin içerikleri özgün, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Değerlendirmeye sunulacak çalışmaların bir başka dergiye gönderilmediği veya basılmadığı ön yazı ile **mutlaka belirtilmelidir**.
- **Dergi yazım kuralları aynı zamanda baskı formatıdır.** Bu nedenle yazım kurallarının yazar veya yazarlarca dikkatle uygulanması gerekmektedir. Yazım kurallarına uygun olmayan yazılar, yazarlara geri gönderilecektir. **Göstereceğiniz ilgi için teşekkür ederiz.**

<b>Sayfa boyutu, sayısı ve kenar boşlukları</b>	A4 formatında, en fazla (eğer mümkünse) 12 sayfa olmalıdır. Sol ve Sağ : 3 cm, Üst ve Alt: 2,5 cm.
<b>Sayfa numaraları</b>	Sayfa numaraları sayfa altında ve ortada verilmelidir.
<b>Satır boşlukları</b>	Bütün satır boşlukları Times New Roman karakterinde ve 12 punto olmalıdır.
<b>Metin</b>	Times New Roman karakterinde 12 punto ile, sağa ve sola dayalı olarak tek aralıklı yazılmalıdır. Noktadan sonra 2 boşluk, virgülden sonra 1 boşluk bırakılmalıdır.

---

<b>Paragraf</b>	Her paragraf arasında bir satır boşluk bırakılmalı, paragraf başlarında içerden başlanmamalıdır (Tab tuşu kullanılmamalıdır).
<b>Makale başlığı</b>	Sayfa başından 5 satır boşluk bırakıldıktan sonra, Times New Roman, 20 punto (koyu olmayacak) ile başlığın sadece ilk harfi büyük olacak şekilde sayfa ortalanarak yazılmalıdır.
<b>Yazar adı veya adları</b>	Başlıktan sonra 2 satır boşluk bırakılarak, ünvan belirtilmeden, Adın ilk harfi ve SOYAD'ın tamamı büyük harf ile, birden fazla yazarlarda aralarına virgöl konularak, Times New Roman, 12 punto, <b>koyu</b> ve sayfa ortalanarak yazılmalıdır.
<b>Yazarın/ların adresi/leri</b>	Yazar adının hemen altına boşluk bırakılmadan, Times New Roman, 10 punto ve <i>italik</i> olarak yazılmalıdır. Adresleri aynı olan yazarlar için tek adres, farklı yazar adresleri alt alta boşluk bırakılmadan yazılmalıdır.
<b>İletişim yazarının bilgileri</b>	Bütün yazarlar için Sorumlu yazar ilk sırada olacak şekilde; Ünvensiz Ad SOYAD, e-mail adresi, ORCID ID numarası ( <a href="http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx">http://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx</a> .) aralarına virgöl konularak 1. sayfanın altına dipnot olarak, Times New Roman, 10 punto ile yazılmalıdır.
<b>Türkçe özet</b>	Adres/ler den 3 satır boşluk bırakıldıktan sonra, <b>Özet</b> kelimesi Times New Roman yazı karakterinde, 12 punto, <b>koyu</b> ve sola dayalı olarak yazılmalıdır. <i>Özet metni</i> Times New Roman yazı karakterinde, 12 punto ve <i>italik</i> olarak yazılmalıdır. Özet metninin 200 kelimeyi geçmemesine özen gösterilmelidir. Özet kelimesi ile özet metni arasında bir satır boşluk bırakılmalıdır.
<b>Anahtar kelimeler Keywords</b>	<b>Anahtar kelimeler:</b> ve <b>Keywords:</b> kelimeleri Türkçe özetin ve İngilizce özetin altına bir satır boşluk bırakılarak, Times New Roman, 12 punto, <b>koyu</b> ve <i>italik</i> olarak yazılmalıdır. En az 3 en fazla 6 adet anahtar kelime verilmeli, anahtar kelimelerin birincisinin ilk harfi büyük diğerleri küçük harfle ve aralarına virgöl konularak verilmelidir.

---

<b>İngilizce başlık ve Abstract</b>	Türkçe anahtar kelimelerin altına 2 satır boşluk bırakılarak, Times New Roman, 16 punto (koyu olmayacak) ile başlığın sadece ilk harfi büyük olacak şekilde sayfa ortalanarak yazılmalıdır. Abstract, Türkçe özet formatında yazılmalıdır.
<b>Ana başlıklar</b>	Ana Başlıklar sırasıyla numaralandırılmalıdır ( <b>1. Giriş</b> <b>2. Deneysel çalışmalar</b> gibi). <b>Tüm başlıklar</b> sola dayalı Times New Roman, 12 punto, <b>koyu</b> ve sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olacak şekilde yazılmalıdır. Ana başlıklardan önce 2 satır, sonra 1 satır boşluk bırakılmalıdır.
<b>Alt başlıklar</b>	Alt başlıklar ana başlık numarasına uygun olarak numaralandırılmalıdır. <b>Tüm alt başlıklar</b> sola dayalı Times New Roman, 12 punto, <b>koyu</b> ve <b>italik</b> olarak sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olacak şekilde yazılmalıdır ( <b>2.1. Malzeme</b> <b>2.2. Isıl işlemler</b> gibi). Alt başlıklardan önce tek satır boşluk bırakılmalı, sonra ise boşluk bırakılmadan metine geçilmelidir.
<b>Şekiller Resimler Fotoğraflar</b>	Sayfa sınırlarını aşmayacak şekilde ortalanarak, net ve okunaklı olmalıdır. Sıra ile numaralandırılmalıdır. Şekil no ve adları şeklin altında ortalanarak ve sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olarak verilmelidir. Şekiller ya bir çizim programı ile çizilmiş olmalı ya da en az 300 dpi çözünürlükte taranmış olmalıdır. Şekil olarak gösterilen grafik, resim ve metin kutularında yer alan yazı ve sayıların büyüklüğü makale içinde Times New Roman karakteri ile yazılmış 9 punto boyutundaki bir yazının büyüklüğünden az olmamalıdır. Şekilden önce, şekil adından önce ve sonra birer satır boşluk bırakılmalıdır. Şekiller metin içine yerleştirilirken mutlaka şekilden önce atıfta bulunulmalıdır.

---

---

<b>Tablolar</b>	<p>Sayfa sınırlarını aşmayacak şekilde ortalanarak konulmalıdır. Sıra ile numaralandırılmalıdır. Tablo no ve adları, tablonun üstünde tek satır boşluk ile sadece ilk kelimenin ilk harfi büyük olacak şekilde ortalanarak yazılmalıdır. Tablo adı yazılırken üstte ve altta birer satır, tablodan sonra yine bir satır boşluk bırakılmalıdır. Tablolara tablodan önce mutlaka metin içerisinde atıfta bulunulmalıdır. Tablo satır ve sütunlarındaki rakam ve yazılar Times New Roman 12 punto ile yazılmalıdır. Ancak zorunlu kalınan durumlarda yazı boyutu yazı sınırlarını geçmeyecek şekilde en az 9 puntoya kadar düşürülebilir.</p>
<b>Denklemler</b>	<p>Metin içerisine yazılacak denklemler, word yazım programındaki denklem editörü ile sola dayalı olarak yazılmalı ve eşitliklere sağa dayalı olarak parantez içerisinde sıra ile numara verilmelidir.</p>
<b>Semboller</b>	<p>Makale çok sayıda sembol içeriyor ya da makaledeki sembollerin açıklanması gerekiyorsa uluslararası standarda uygun olarak, semboller, kaynaklardan önce, Times New Roman 12 punto ile italik yazılmalıdır. Makalede ondalık gösterimde nokta kullanılmalı, binlikleri ayırırken virgül veya nokta kullanılmamalı gerekiyorsa tek boşluk kullanılmalıdır.</p>
<b>Kaynaklar</b>	<p>Kaynaklar metin içerisinde sıra ile numaralandırılmalıdır. Makalenin sonunda bulunan kaynaklar bölümündeki sıralama, metinde verilen sıraya uygun olarak yapılmalıdır.</p> <p>Atıfta bulunulan kaynaklar; ya ..... [1]. şeklinde cümlelerin sonunda ya da ..... [1], ..... şeklinde cümle içinde verilmelidir. İki veya daha fazla kaynak yazarken verilecek kaynaklar sıralı ise [1,2,3,4] şeklinde değil, [1-4] şeklinde verilmelidir. Sıralı değil ise [8,11,15] şeklinde verilmelidir.</p> <p>Kaynaklar, Times New Roman 12 punto ile yazılmalı, sadece dergi, kitap ya da sempozyum adı kalın yazılmalıdır. Kaynaklar kısmında yer alan ulusal-uluslararası makalelerin yer aldığı dergi adları kısaltılmış halleriyle değil, açık olarak yazılmalıdır (örnek: dergi adı Wat. Res. şeklinde değil Water Resources şeklinde yazılmalı).</p>

---

---

### **Ulusal - Uluslararası Makaleler**

- [1] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flocculation and sedimentation of high turbidity water, **Water Resources**, 25, 9, 1137-1143, (1998).

### **Ulusal - Uluslararası Bildiriler**

- [2] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flocculation and sedimentation of high turbidity waters, **Proceedings, 9th Biennial Conference**, International Association on Water Quality, 1137-1143, Vancouver, (1998).

### **Ulusal - Uluslararası Kitap**

- [3] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., **Flocculation and sedimentation**, 295, Technomics Press, Lancaster PA, (1998).

### **Kitap İçinde Bölüm**

- [4] Blackburn, T., **Flocculation and sedimentation** in Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Physical Processes, Technomics Press, 29-45, Lancaster PA, (1998).

### **Editörlük**

- [5] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., **Flocculation and sedimentation**, 295, Technomics Press, Lancaster PA, (1998).

### **Makaleler**

- [6] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, **Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi**, 7, 4, 26-32, (1998).
- [7] Snell, F. D. ve Ettre, L. S., **Encyclopedia of Industrial Chemical Analysis**, 14, Interscience, New York, (1971).

### **Basılmış Bilimsel Rapor**

- [8] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., The effect of velocity gradient in flocculation, Technical Report, NATO Science for Stability Programme, 150, Brussels, (1998).

### **Mesleki Teknik Rapor**

- [9] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, Teknik Rapor 45, İTÜ Geliştirme Vakfı, İstanbul, (1998).
-

---

## **Doktora, Y.Lisans Tezi**

- [10] Türker, K., Yapıların deprem davranışının belirlenmesi için çok modlu uyarlamalı yük artımı yöntemi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2005).

## **Standartlar**

- [11] TS825, Binalarda ısı yalıtım kuralları, **Türk Standartları**, Ankara, (1998).

## **Güncel Yazı**

- [12] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, **Bilim ve Teknik**, 363, 8, 23–45, (1998).
- [13] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, **Milliyet Gazetesi**, sf.2, 3, 24, (1998).

## **Web adresleri**

- [14] Li, G., Hart, A. ve Gregory, J., Flokülasyona hız gradyanı etkisi, (1998). <http://www.server.com/projects/paper2.html>, (20.05.2004).
-