

# Balıkesir Üniversitesi FBE Dergisi

ISSN : 1301-7985  
e-ISSN : 2536-5142

Balıkesir Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Cilt:21 Sayı:2 Aralık 2019

JOURNAL OF BALIKESIR UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Volume : 21 Number : 2 December 2019

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ | Cilt : 21 Sayı : 2 Aralık 2019

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 21 Sayı 2 Aralık 2019

ISSN 1301-7985  
eISSN 2536-5142



Journal of Balıkesir University  
Institute of Science and Technology

Volume 21 Number 2 December 2019

ISSN 1301-7985  
eISSN 2536-5142



# BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 21 SAYI: 2

Aralık 2019

ISSN 1301-7985  
eISSN 2536-5142

---

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

---

## **Baş Editör :**

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

Balıkesir Üniversitesi

---

## **Alan Editörleri :**

### **Eğitim Bilimleri**

Prof. Dr. Hüseyin KÜÇÜKÖZER

Balıkesir Üniversitesi

### **Temel Bilimler**

Doç. Dr. Fırat EVİRGEN

Balıkesir Üniversitesi

### **Mühendislik Bilimleri**

Doç. Dr. Nuray GEDİK

Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Umut OKKAN

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 GÜNEY

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

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

# BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

CİLT: 21 SAYI: 2

Aralık 2019

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 (haziran ve aralık 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

**Metil paration bileşiğinin paraoksonaz enzimi üzerine inhibisyon etkisinin araştırılması**

Investigation of the effect of methyl parathion on the paraoxonase enzyme 488-493

**Nahit GENÇER**

**Laguerre wavelet method for solving Troesch equation**

Troesch denkleminin çözümü için Laguerre dalgacık yöntemi 494-502

**Sevin GÜMGÜM**

**New mixed-dark soliton solutions to the hyperbolic generalization of the Burgers equation**

Genelleştirilmiş hiperbolik Burgers denkleminin yeni mixed-dark soliton çözümleri 503-511

**Faruk DUSUNCELI, Hacı Mehmet BASKONUS, Alaattin ESEN, Hasan BULUT**

**Polyvinyl alcohol/CuO nanocomposite hydrogels: facile synthesis and long-term stability**

Polivinil alkol/CuO nanokompozit hidrojel: kolay sentezi ve uzun-sürelili kararlılığı 512-530

**Filiz BORAN, Çiğdem KARAKAYA**

**Schottky diyot tabanlı UV detektörlerde seri direnç etkileri**

Serial resistance effects on Schotky diode based UV dedectors 531-538

**Şadan ÖZDEN**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Basık yörüngeli erken B tipi örten çift sistemlerin eksen dönmesi analizi: V466 Car, V529 Car ve MN Tra**

Apsidal motion analysis of early B-type eclipsing binary systems: V466 Car, V529 Car and MN Tra 539-545

**Ahmet BULUT, İbrahim BULUT**

**Investigation effects of some anthraquinones on human paraoxonase 1 (hPON1)**

Bazı antrakinonların insan paraoksonaz 1 (hPON1) üzerine etkilerinin incelenmesi 546-553

**Başak GÖKÇE**

**Maden ocaklarında insansız hava aracı kullanımı: örnek bir saha çalışması**

Usage of unmanned aircraft in mining quarries: a sample field study 554-564

**Mete KUN, Berk ÖZCAN**

**Üç hücreli motif genelleme ile oluşturulan küçük ölçekli biyolojik sinir ağlarının bellek davranışı**

Memory behavior of small-scale biological neural networks generated by generalization of a three-cell motif 565-577

**Ahmet TURAN, Temel KAYIKÇIOĞLU**

**Opacity tables for using in Paczynski stellar modelling and their effects on stellar evolutions**

Paczynski yıldız modellemesinde kullanılmak için opaklık tabloları ve onların yıldız evrimlerine etkileri 578-589

**Gülay İNLEK**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Complex hyperbolic traveling wave solutions of Kuramoto-Sivashinsky equation using  $(1/G')$ -expansion method for nonlinear dynamic theory**

Lineer olmayan dinamik teorisi için  $(1/G')$ -açılım metodunu kullanarak Kuramoto-Sivashinsky denkleminin karmaşık hiperbolik yürüyen dalga çözümleri 590-599

**Asif YOKUŞ, Hülya DURUR**

**İki hidrodinamik programın karşılaştırılması**

A Comparison of two hydrodynamic programmes 600-609

**Elif OĞUZ**

**Ters sarkacın uyarlamalı kazançlı bağımsız yüzeyli kayan kip yöntemi ile denetimi**

Adaptive gain decoupled sliding mode control of inverted pendulum 610-622

**Fuat KILIÇ, Sabri BİÇAKCI, Hüseyin GÜNEŞ**

**Zeytinyağı tesislerinde oluşan karasuyun bertaraf alternatiflerinin maliyet açısından karşılaştırılması**

Comparison of disposal alternatives for olive mill wastewater in terms of cost 623-637

**Selda MURAT HOCAOĞLU, B. Hande GÜRSOY  
HAKSEVENLER, İrfan BAŞTÜRK, Şeyla ERGENEKON**

**Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda yüksek halka katkılı Standart Model Higgs sektörü**

Standard Model Higgs sector with high loop contributions at Large Hadron Collider 638-656

**Yaşar HİÇYILMAZ**



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Omega invariant of the line graphs of tricyclic graphs**

Üç yüzlü grafların doğru graflarının omega invaryantı

657-665

**Hacer ÖZDEN AYNA**

**On the new travelling wave solution of a neural communication model**

Bir sinirsel iletişim modelinin yeni salınımlı dalga çözümleri üzerinde

666-678

**Gülnur YEL**

**Balıkesir ilinde farklı iki GES tesisinin panel yerleşimi açısından verimliliklerinin karşılaştırılması**

Comparison of efficiency of different two solar energy systems in terms of panel settlement in Balıkesir

679-696

**Fatih ATILIM, Bayram ESEN, Metin DEMİRTAŞ**

**Bazalt tozu katkı harçların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması**

Investigation of the mechanical and permeability properties of mortars containing basalt powder

697-707

**Veysel AKYÜNCÜ, Mehmet Timur CİHAN**

**Determination of insecticide imidacloprid residues in Tokat city water by using enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA)**

Tokat ili su örneklerinde insektisit imidacloprid kalıntılarının enzim-bağımlı immunosorbent analizi (ELISA) ile belirlenmesi

708-715

**Meryem Şenay ŞENGÜL DEMİRAC**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Masere sarımsak (*Allium sativum* Limne) ve Tunceli sarımsağı (*Allium tuncelianum* Kollman) yağlarının yoğun stoklanmış gökkuşağı alabalıklarının (*Oncorhynchus mykiss* W.) bazı kan parametrelerine ve NBT (Nitroblue Tetrazolium) seviyelerine etkileri**

Effects of oils of macerated garlic (*Allium sativum* Limne) and macerated Tunceli garlic (*Allium tuncelianum* Kollman) on some hematological parameters and NBT (NitroblueTetrazolium) levels of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* W.) at high stocking density

716-723

**Başar ALTINTERİM, Önder AKSU**

**Yay katsayısı sürekli değiştirilebilen seri elastik aktüatör tasarımı ve imalatı**

Design and production of continuously variable series elastic actuator

724-738

**Ömer PEKDUR, Davut AKDAŞ**

**Su örneklerindeki Cu(II), Co(II), Fe(III) ve Ni(II) iyonlarının Schiff bazı komplekslerinin katı-faz ekstraksiyonu yönteminden sonra ICP-OES ile tayini**

Determination of Cu (II), Co (II), Fe (III) and Ni (II) ions by ICP-OES after solid-phase extraction of their Schiff complexes in water samples

739-755

**Mustafa Umut KONANÇ, Mustafa Kemal GÜMÜŞ**

**Karasal algılayıcı ağlarda gözlemlene için enerji etkin TDMA erişim tekniği**

Energy efficient TDMA access technique for surveillance in terrestrial sensor networks

756-765

**Muhammed Enes BAYRAKDAR**

**Amorf ve nano-boyutlu HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O bileşiğinin sentezi ve karakterizasyonu**

Synthesis and characterization of amorphous and nano-sized HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O compound

766-776

**Berna BÜLBÜL**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makalesi / Research Article

**Comparative skeletal osteology of Darevskia parvula (Lantz & Cyren, 1913) and Darevskia adjarica (Darevsky & Eiselt, 1980) (Squamata: Lacertidae)**

Darevskia parvula (Lantz & Cyren, 1913) ve Darevskia adjarica (Darevsky & Eiselt, 1980)'nın karşılaştırmalı iskelet osteolojisi (Squamata: Lacertidae) 777-790

**Elif YILDIRIM, Oscar ARRIBAS, Yusuf KUMLUTAŞ,  
Çetin ILGAZ**

**Improving in vitro seed sprouting on legume of Indigofera zollingeriana stored seed**

Baklagil bitkisi Indigofera zollingeriana'nın depolanmış tohumların in vitro koşullarda çimlendirilmesi ve geliştirilmesi 791-803

**Siti MAESAROH, Çiğdem Alev ÖZEL**

**Dolu rezervuar durumdaki barajların sismik davranış tahminlerine seçilen nümerik model tipinin etkisi**

Effect of the selected numerical model on the prediction of seismic behaviour of dams with full reservoir conditions 804-821

**Alper ALDEMİR**

**Danışmanlı ve yarı danışmanlı öğrenme kullanarak doküman vektörleri tabanlı tweetlerin duygu analizi**

Sentiment analysis of tweets based on document vectors using supervised learning and semi-supervised learning 822-839

**Metin BİLGİN, İzzet Fatih ŞENTÜRK**

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

**Araştırma Makalesi / Research Article**

**Taç eterlerin metal iyonları ile kompleksleşmesinin  
kondüktometriye Job's Plot yönteminin uygulanması ile  
belirlenmesi**

Determination of crown ether complexation with metal ions by application Job's Plot method to conductometry 840-854

**Ümit ÇALIŞIR, Baki ÇİÇEK**

**Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerinin bileşikleri için  
kütle soğurma katsayıları, atomik, moleküler ve elektronik tesir  
kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarının  
deneysel incelenmesi**

Experimental investigation of the mass attenuation coefficients, atomic, molecular and electronic cross-sections, effective atomic numbers, and electron densities for compounds of Mn, Co, Ni, Cu and Zn essential-trace elements 855-867

**Burcu AKÇA**

**Farklı yanlışlık düzeltme yöntemlerinin istatistiksel ölçüğe  
indirgenmiş yağış projeksiyonlarına uygulanması**

Implementation of different bias correction methods to statistically downscaled precipitation projections 868-881

**Umut KIRDEMİR, Umut OKKAN**

**Derleme Makalesi / Review Article**

**Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri (FV-DÜB): güç kalitesine  
etkileri, uluslararası güç kalitesi standartları ve FV-DÜB  
barındıran dağıtım sistemleri için güç kalitesi iyileştirme yöntemleri**

Photovoltaic distributed generation units (PV-DGU): impacts on power quality, international power quality standards and power quality improvement methods for the systems with PV-DGU 882-903

**Alp KARADENİZ, Murat Erhan BALCI**



# Metil paration bileşiminin paraoksonaz enzimi üzerine inhibisyon etkisinin araştırılması

**Nahit GENÇER\***

*Balıkesir Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Çağış Kampüsü, Balıkesir*

*Geliş Tarihi (Received Date): 07.02.2019  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 14.03.2019*

## Özet

*Bu çalışmada, amonyum sülfat çöktürmesi ve Sepharose-4B-L-tirosin-1-aminoantresen jelini içeren hidrofobik etkileşim kromatografisi tekniği kullanılarak insan paraoksonaz (PONI) enzimi saflaştırılmıştır. Saflaştırılan PONI enziminin saflık kontrolü SDS poliakrilamid jel elektroforezi ile yapılmıştır. Saflaştırma oranı 663 olarak bulunmuştur. Daha sonra saf enzim üzerine metil paration zirai ilacının inhibisyon etkisi incelenmiştir. Söz konusu ilacın IC<sub>50</sub> değeri 1,41 mM bulunmuştur.*

**Anahtar kelimeler:** Paraoksonaz, saflaştırma, metil paration.

## Investigation of the effect of methyl parathion on the paraoxonase enzyme

### Abstract

*In this study, human paraoxonase (PONI) enzyme was purified by using the hydrophobic interaction chromatography technique including ammonium sulfate precipitation and Sepharose-4B-L-tyrosine-1-aminoantresan gel. The purity control of purified PONI enzyme was performed by SDS polyacrylamide gel electrophoresis. Purification rate was found to be 663. Then, the inhibition effect of methyl parathion on pure enzyme was investigated. The IC<sub>50</sub> value of this compound was 1.41 mM.*

**Keywords:** Paraoxonase, purification, methyl parathion.

---

\*Nahit GENÇER, ngencer@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-7092-8857>

## 1.Giriş

Paraoksonaz enzimi (EC 3.1.8.1, PON1) karaciğer tarafından sentezlenmektedir. Yapısal ve katalitik kalsiyum olmak üzere iki adet metal iyonu içeren bir esterazdır. Serumda, yüksek yoğunluktaki lipoproteinlere bağlı olarak bulunur [1]. PON1 enziminin şimdiye kadar üç farklı fonksiyona sahip olduğu tespit edilmiştir. Birincisi; PON1 enzimi organofosfat ajanları ve sinir gazlarını hidroliz ederek detoksifikasyonda önemli rol oynar. İkincisi; LDL'nin oksidasyonu ile lipit peroksidlerin oluşumuna karşı koruyucu etkisi ile antioksidan özelliği vardır. Üçüncüsü; bakterilerin birbiri ile iletişimini sağlayan lakton bileşiklerini hidroliz ettiği için laktonaz aktivitesi ile ayrıca önem taşımaktadır [2, 3].

Zirai tarım ilacı olarak da bilinen pestisit deyimi, 1-insektisit (böcek öldürücü), 2-herbisit (yabani ot öldürücü), 3-fungusit (küf öldürücü), 4-rodentisit (kemirgen öldürücü) vb. şeklinde sınıflandırılmaktadır. Bilinçsiz pestisit kullanımının sonucunda gıdalarda pestisit kalıntıları olur ve bunlar insanlar üzerinde olumsuz etkiler gösterebilir. Pestisitlerin kanserojen etkileri olduğu saptanmıştır [4].

Metil paration, tarım alanında ve zararlı böceklerin yok edilmesinde geniş çapta kullanılan bir insektisit olup her yıl çok sayıda insan çeşitli sebeplerden dolayı metil parationa maruz kalmaktadır. Bu bileşik Akdeniz Bölgesi'nde özellikle tarımsal alanda çok fazla miktarda kullanılan bir insektisittir [5].

Bu çalışmada, amonyum sülfat çöktürmesi ve Sepharose-4B-L-tirosin-1-aminoantresen jelinden oluşan hidrofobik etkileşim kromatografisi (HEK) tekniği kullanılarak PON1 enziminin saflaştırılması ve metil parationun bu enzim üzerine inhibisyon etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal metod

### 2.1. Kan serumunun ayrılması

Gönüllü kişilerden alınan kanlar 5000 rpm'de, +4°C'de ve 15 dakika santrifüj edilerek serumları ayrıldı. Bu serumlar deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

### 2.2. Enzim aktivite tayini

Aktivite ölçümü için 50 µL enzimi tampon çözeltisine (900 µL, 0,1 M trise-baz, pH:8,0 ve 100 µL, 1 mM paraoksan) çabuk bir şekilde eklendikten sonra 412 nm'de bir dakikadaki absorbansta meydana gelen artış tespit edildi [6]. Bu sayede paraoksan substratının hidroliz hızı tespit edildi. Aynı işlem enzim olmadan tekrarlandı ve aradaki fark enzim aktivitesi olarak hesaplandı. Bir dakikada oluşan p-nitrofenolün mikromolü bir ünite olarak kabul edildi.

### 2.3. Amonyum sülfat çöktürmesi (AMS)

Bu amaçla literatürde daha önce belirlenmiş olan %60-80 aralığında amonyum sülfat çöktürme işlemi gerçekleştirildi [7].

#### **2.4. Hidrofobik jel sentezi**

Enzimi saflaştırmak için kullanılan hidrofobik jel üç aşamada sentezlendi. İlk olarak, Sepharose 4B üzerindeki hidroksil grupları siyanojen bromür ile aktive edildi. Bir sonraki aşamada, CNBr kullanılarak aktive edilen Sepharose-4B ile L-tirozin'in reaksiyonu sonucu Sepharose-4B-L-tirozin jeli elde edildi. Son olarak, diazolanmış 1-aminoantresan Sepharose 4B- L-tirozine bağlanmasıyla hidrofobik matris sentezlendi.

#### **2.5. Enzimin saflaştırılması**

Sepharose-4B-L-tirosin-1-aminoantresan jeli içeren kolon 1 M (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> içeren 0,1 M Tris-HCl (pH:8,0) çözeltilisiyle dengelendi ve bu kolona sözkonusu enzimi içeren serum örneği tatbik edildi. Kolona yüksek tuz konsantrasyonundan düşük tuz konsantrasyonuna doğru tuz gradienti uygulandı. PON1 enzimi 0,1 M Tris-HCl pH:8,0 solüsyonu ile 1,5 mL'lik fraksiyonlar şeklinde elue edildi.

#### **2.6 Bradford yöntemiyle kantitatif protein tayini**

Protein miktarları Bradford metoduna göre 595 nm'de spektrofotometrik olarak belirlendi. Bu işlemde serum albumin standart olarak kullanıldı [8].

#### **2.7 SDS poliakrilamid jel elektroforezi (SDS-PAGE)**

PON1 enziminin HEK ile saflaştırılmasından sonra iki farklı akrilamid derişiminde; yığma jeli % 3 ve ayırma jeli % 10 olacak şekilde SDSPAGE Laemmlı yöntemi ile enzimin saflık derecesi kontrol edildi [9].

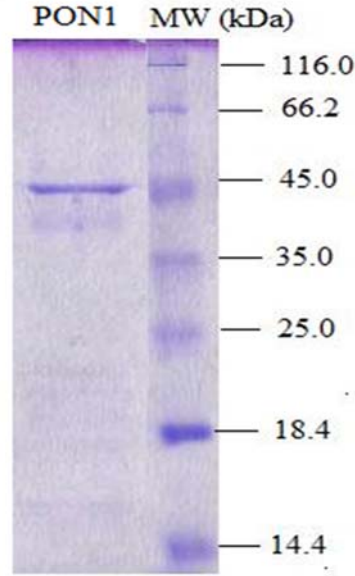
#### **2.7 Metil parationun IC<sub>50</sub> değerlerinin bulunması**

Bu bileşiğin IC<sub>50</sub> değerini bulmak için, 2 mM paraoksan substratı ile çalışıldı. Pestisit çözeltilisinden ise değişik hacimlerde alınarak toplam 1,05 ml' lik bir reaksiyon hacmi oluşturuldu. Önce inhibitörsüz ortamda enzim aktivitesi bulundu. Bu değer %100 aktivite olarak kullanıldı. Daha sonra optimum pH ve sıcaklıkta 0,05 ml enzim çözeltilisi alınıp 1 ml (tampon + substrat + pestisit) çözeltilisine çabuk bir şekilde eklendikten sonra 412 nm' de bir dakikada absorbans da meydana gelen değişme okundu. Elde edilen absorbans değerlerinden % aktiviter hesaplandı. % Aktivite -[I] grafikleri çizildi.

### **3. Sonuç ve tartışma**

Çalışmamızda, detoksifikasyon ve antioksidan aktivitesi ile metabolizmada önemli fizyolojik fonksiyona sahip PON1 enziminin HEK tekniği ile saflaştırılması gerçeleştirilmiş ve saflık kontrolü elektroforez ile yapılmıştır. PON1'in moleköl ağırlığı yaklaşık 43 kDa olarak tek bant şeklinde SDS-PAGE jelinde gözlenmiştir. (şekil 1). Elde edilen bu sonuç literatürdeki sonuçlar ile uyumludur [7].





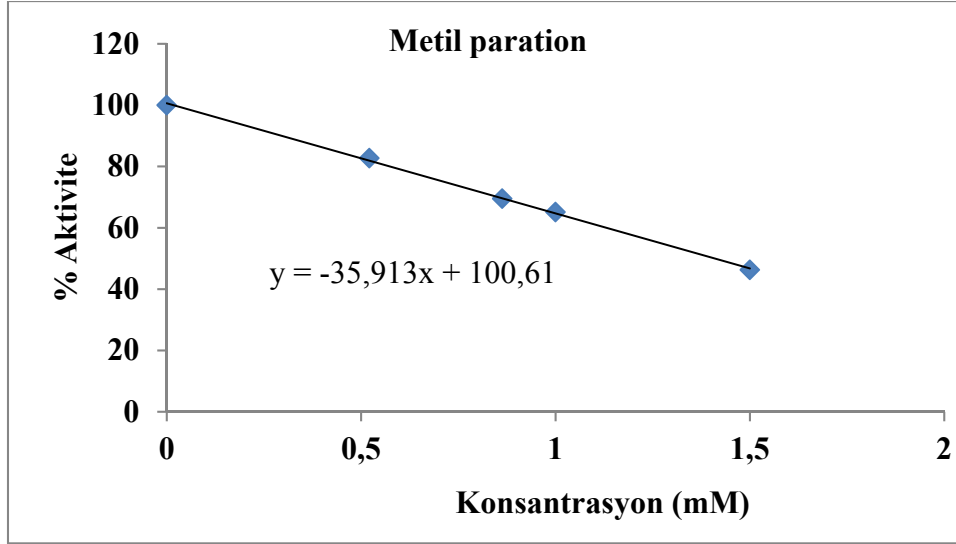
Şekil 1. PON1 enziminin SDS-PAGE görüntüsü.

Saflaştırma basamaklarının her bir aşamasında enzim aktiviteleri ve protein tayıleri yapıldı. Bu veriler kullanılarak söz konusu enzimin saflaştırma tablosu oluşturuldu. (Tablo 1). Tablo'da görüldüğü gibi 663 kat saflaştırma elde edildi. PON1 enziminin HEK yöntemi ile saflaştırılması ilk olarak Sinan ve arkadaşları tarafından yapılmıştır ve bu enzim 227 kat saflaştırılmıştır [7]. Yapılan bir diğer çalışmada Sepharose-4B-L-tirozin-1-naftilamin jeli modifiye edilmiş ve saflaştırma işlemi sırasında, ek olarak uygulanan iki basamak sonucunda enzim 302 kat saflaştırılmıştır [10]. Basit kromatografik yöntemler kullanılan bir başka çalışmada iyon değişim ve jel filtrasyon kromatografisi kullanılırken enzim yaklaşık 225 kat saflaştırılmıştır [11].

Tablo 1. PON1 enziminin saflaştırma tablosu.

Saflaştırma Basamağı	Hacim (ml)	Aktivite (U/ml)	Protein (mg)	Spesifik Aktivite (U/mg)	% Verim	Saflaştırma Derecesi
Serum	30	915	1015	0,90	100	-
AMS	10	498	396	1,26	54	1,4
HEK	2	132	0,221	597	14	663

Çalışmamızın diğer aşamasında saf enzim üzerine metil paration zirai ilacının inhibisyon etkisi incelenmiştir. Söz konusu ilacın IC<sub>50</sub> değeri çizilen grafikten (Şekil:2) 1,41 mM bulunmuştur. Enzimatik aktivitenin inhibisyonu üç farklı sebepten dolayı son derece önemli bir konudur; 1-biyolojik sistemlerde başlı başına bir kontrol mekanizmasıdır, 2- birçok ilaç ve zehirli bileşikler mekanizmalarını bu yolla gerçekleştirir, 3-inhibisyon olayı aynı zamanda enzimlerin etki mekanizmasının aydınlatılmasında oldukça önemlidir.



Şekil 2. İnhibisyon grafiği.

Çoğu pestisitler verimi artırma amacıyla tarımcılıkta kullanılır. Bu kimyasalların kullanımı ekinlerin gelişimine pozitif etki göstermelerine rağmen, bazı pestisitler, kalıntıları, metabolitleri ve/veya atıkları çevre üzerine umulmayan ters etkilere sebep olabilir [12]. Pestisitler, balık yemleri, dezenfektanlar gibi kullanımlarının yanı sıra tarımda verimi etkileyen zararlı bitki, hayvan ya da mikroorganizmalara karşı savaşta da önemli bir yere sahiptirler. Ancak bu faydalarına rağmen pestisitler insan sağlığına zararlı pek çok etkiye de sahiptirler [13]. Yüksek nörotoksik tarımsal kimyasal özellikleriyle bilinen çok yaygın bir pestisit olan metil paration, böcek haşerelerini yok etmek için dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. İnsan sağlığını içeren çevre, topraktaki kalıntıları nedeniyle ölümcül tehlikesiyle karşı karşıyadır [14].

## Kaynaklar

- [1] Azarsız, E., Sözmen, E.Y., Paraoksonaz ve klinik önemi, **Türk Biyokimya Dergisi**, 25(3), 109-119, (2000).
- [2] Durrington, P.N., Mackness, B., Mackness, M.I., Paraoxonase and atherosclerosis. **Arteriosclerosis, Thrombosis, And Vascular Biology**, 21(4), 473-480, (2001).
- [3] Ng, C. J., D. M. Shih, S. Y. Hama, N. Villa, M. Navab, and S. T. Reddy, The paraoxonase gene family and atherosclerosis, **Free Radical Biology and Medicine**, 38(2), 153-163, (2005).
- [4] Gencer, N., Paraoksonaz Q ve R izoenzimlerinin saflaştırılması ve bazı çevre kirleticilere karşı afinitesinin araştırılması, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2008).
- [5] Dalkılıç, S., Metil paration ile muamele edilen sıçan dokularında sülfidril grubu konsantrasyonu değişimlerinin tespit edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [6] Gan, K.N., Smolen A., Eckerson HW., La Du BN., Purification of human serum paraoksonase/arylesterase, evidence for one esterase catalyzing both activities, **Drug Metabolism and Disposition**, 19(1), (1991), 100-6

- [7] Sinan, S., Kockar, F., Arslan, O., Novel purification strategy for human PON1 and inhibition of the activity by cephalosporin and aminoglikozide derived antibiotics. **Biochimie**, 88(5), 565-574, (2006).
- [8] Bradford M., A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, **Analytical Biochemistry**, 72, 248–254, (1976).
- [9] Laemmli, D. K., Cleavage of structural proteins during in assembly of the head of bacteriophage T4, **Nature**, London, 227, 680, (1970).
- [10] Ekinci, D., Şentürk, M., Beydemir, Ş., Küfrevioğlu, Ö. İ., Supuran, C., T., An alternative purification method for human serum paraoxonase 1 and its interactions with sulfonamides” **Chemical Biology & Drug Design**, 76, 552–558, (2010).
- [11] Ekinci, D., Beydemir, Ş., Ateş, O., In vitro effects of dexamethasone on human serum paraoxonase-1 (PON1) activity, **Hacettepe Journal of Biology and Chemistry**, 37(3), 197-205, (2009).
- [12] Isik, S., Kockar, F., Ozensoy, O., Arslan, O., Differential in vitro effects of some pesticides on CA activities from some freshwater and seawater fish erythrocytes, **Fresenius Environmental Bulletin**, 13(1), 25–29, (2004).
- [13] Karakoç, Ö., Nakiboğlu, N., Ditiyokarbamat pestisitleri ve tayin yöntemleri, **Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 12(1), 112-135, (2010).
- [14] Pattanayak, S., Chakraborty, S., Biswas, S., Chattopadhyay, D., Chakraborty, M., Degradation of methyl parathion, a common pesticide and fluorescence quenching of Rhodamine B, a carcinogen using  $\beta$ -d glucan stabilized gold nanoparticles. **Journal of Saudi Chemical Society**, 22(8), 937-948, (2018).

# Laguerre wavelet method for solving Troesch equation

Sevin GÜMGÜM\*

*Izmir University of Economics, Department of Mathematics, 35330 Izmir, Turkey*

*Geliş Tarihi (Received Date): 06.05.2019*

*Kabul Tarihi (Accepted Date): 01.07.2019*

## Abstract

*The purpose of this paper is to illustrate the use of the Laguerre wavelet method in the solution of Troesch's equation, which is a stiff nonlinear equation. The unknown function is approximated by Laguerre wavelets and the equation is transformed into a system of algebraic equations. One of the advantages of the method is that it does not require the linearization of the nonlinear term. The problem is solved for different values of Troesch's parameter ( $\mu$ ) and the results are compared with both the analytical and other numerical results to validate the accuracy of the method.*

**Keywords:** *Laguerre Wavelet method, Troesch equation, Laguerre polynomial, Nonlinear differential equation.*

## Troesch denkleminin çözümü için Laguerre dalgacık yöntemi

### Özet

*Bu makalenin amacı lineer olmayan Troesch denklemini Laguerre dalgacık yöntemini kullanarak çözmektir. Bilinmeyen fonksiyon Laguerre dalgacıkları ile yaklaştırılarak denklem bir cebirsel denklem sistemine dönüştürülür. Bu yöntemin avantajlarından biri, lineer olmayan terimin lineer hale dönüştürülmesine gerek kalmamasıdır. Denklem Troesch parametresinin farklı değerleri için çözülmüştür. Yöntemin etkin olduğunu göstermek için elde edilen sonuçlar gerek gerçek gerekse literatürdeki diğer sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** *Laguerre dalgacık yöntemi, Troesch denklemi, Laguerre polinomu, Lineer olmayan diferensiyel denklem.*

---

\* Sevin GÜMGÜM, sevin.gumgum@izmirekonomi.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-0594-2377>

## 1. Introduction

Boundary value problems are used in several fields such as chemical physics, chemistry, biology, nanotechnology, natural science, and engineering. One of the important problem is the well known Troesch's problem which comes from the theory of gas porous electrodes. This problem arises in some chemical reaction-diffusion and heat transfer processes as well as a plasma column under radiation pressure.

In literature, several numerical methods have been employed to solve this nonlinear problem. We can list these methods as: Finite difference method [1], Chebyshev wavelet method [2], Chebyshev collocation method [3], A finite-element approach based on cubic B-spline collocation [4], An accurate asymptotic approximation [5], Adomian decomposition method and the reproducing kernel method [6], Christov rational functions [7], Decomposition method [8], Differential transform method [9], High-Order Difference Schemes [10], Homotopy perturbation method [11], Hybrid heuristic computing [12], Jacobi-Gauss collocation method [13], Laplace transform and a modified decomposition technique [14], Modified Homotopy perturbation method [15], Newton-Raphson-Kantorovich approximation method [16], Optimal Homotopy asymptotic method [17], Perturbation Method and Laplace-Padé Approximation [18], Scott and the Kagiwada-Kalaba algorithms [19], Modified nonlinear Shooting method [20], Sinc-Collocation Method [21], sinc-Galerkin method [22], Variational iteration method [23, 24].

Laguerre series are used in the solution of delayed single degree-of-Freedom oscillator problem [25], high-order linear Fredholm integro-differential equations [26], and pantograph-type Volterra integro-differential equations [27].

In this study, Laguerre wavelets is used in the solution of the Troesch's problem. The unknown function and its derivatives are approximated by the Laguerre wavelets and the nonlinear differential equation is transformed into a system of nonlinear system of equations. The paper is organized as follows. In Section 2, we introduce wavelets, the Laguerre wavelets and their properties. In Section 3, we introduce the method of solving Troesch's problem by Laguerre wavelets. In Section 4, numerical results are presented. Some conclusions are drawn in Section 5.

## 2. Laguerre wavelets

### 2.1. Wavelets

A single function  $\varphi(t)$  which is called mother wavelet is dilated (scaled) and translated by the parameters  $a$  and  $b$ , respectively in order to generate a family of functions of the form [28]

$$\varphi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R, a \neq 0. \quad (1)$$

If the dilation parameter  $a$  and translation parameter  $b$  is restricted to  $a = 2^{-k}$  and  $b = n2^{-k}$ , then the wavelets

$$\varphi_{k,n}(t) = 2^{k/2} \varphi(2^k t - n)$$

form an orthonormal basis in Hilbert space  $L^2(R)$ .

Due to the main advantages, different wavelet types such as Haar wavelet [29], Chebyshev wavelet [30], Legendre wavelet [31-34] now attract great attention of researchers. One of these advantages is that the wavelets are not periodic and do not continue to the infinity. Additionally, the wavelets with compact support are compatible to model localized features in applications.

**2.2. Laguerre wavelets and properties**

If the dilation and translation parameters in Eq. (1) are chosen respectively as  $a = 2^{-(k+1)}$  and  $b = (2n + 1)2^{-(k+1)}$ , then the Laguerre wavelets  $\varphi_{nm}(t) = \varphi_{nm}(t; k; n; m)$  can be defined on  $[0, 1)$  for integers  $k \geq 0$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots, 2^k - 1$ ;

$$\varphi_{nm}(t) = \begin{cases} 2^{(k+1)/2} L_m(2^{k+1}t - 2n - 1), & \text{if } \frac{n}{2^k} \leq t < \frac{n+1}{2^k} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

where  $t$  is the normalized time and  $m = 0, 1, 2, \dots, M$  is the order of very well known Laguerre polynomials  $L_m(t)$ ; the dilation and translation parameters in Eq. (1) are respectively  $a = 2^{-(k+1)}$  and  $b = (2n + 1)2^{-(k+1)}$ .

The Laguerre polynomials are  $m$ -th degree polynomials which satisfy the differential equation

$$xy''(x) + (1 - x)y'(x) + my(x) = 0, \quad x \in (0, \infty)$$

and can be explicitly determined by the recurrence relation

$$(m + 2)L_{(m+2)}(x) = (2m + 3 - x)L_{(m+1)}(x) - (m + 1)L_m(x)$$

with  $L_0(x) = 1$  and  $L_1(x) = 1 - x$ , [35]. The first few Laguerre polynomials are listed as

$$L_0(x) = 1,$$

$$L_1(x) = 1 - x,$$

$$L_2(x) = \frac{1}{2!}(x^2 - 4x + 2),$$

$$L_3(x) = \frac{1}{3!}(-x^3 + 9x^2 - 18x + 6),$$

$$L_4(x) = \frac{1}{4!}(x^4 - 16x^3 + 72x^2 - 96x + 24),$$

$$L_5(x) = \frac{1}{5!}(-x^5 + 25x^4 - 200x^3 + 600x^2 - 600x + 120),$$

$$L_6(x) = \frac{1}{6!}(x^6 - 36x^5 + 450x^4 - 2400x^3 + 5400x^2 - 4320x + 720).$$

As a natural result of the orthogonality of the Laguerre polynomials over the interval  $(0, \infty)$ , the Laguerre wavelets  $\varphi_{nm}(t)$  are orthogonal with respect to the dilated and translated weight function  $w_n(t) = w(2^{k+1}t - 2n - 1) = e^{-(2^{k+1}t - 2n - 1)}$ . This is an essential property to expand a function  $f(t)$ , defined on  $[0,1)$  as the infinite series of Laguerre wavelets

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} A_{nm} \varphi_{nm}(t),$$

where  $A_{nm}$  are coefficients obtained by the inner product  $A_{nm} = \langle f(t), \varphi_{nm}(t) \rangle = \int_0^{\infty} w_n(t) f(t) \varphi_{nm}(t) dt$ . If the series is truncated then it can be written as

$$f(t) \approx \sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi_{nm}(t).$$

### 3. Application to Troesch's problem

In this section, we consider Troesch's problem and discuss the implementation of the Laguerre wavelet method.

A boundary value problem (BVP) of Troesch's equation is introduced by the second order nonlinear differential equation and boundary conditions

$$u''(t) = \mu \sinh(\mu u(t)), \quad t \in [0,1], \quad (2)$$

$$u(0) = 0, \quad u(1) = 1. \quad (3)$$

Here, positive constant  $\mu$  is called Troesch's parameter. The closed form solution of Eq. (2) and Eq. (3) is given by means of Jacobian elliptic function  $sc(\mu|r)$  as

$$u(t) = \frac{2}{\mu} \sinh^{-1} \left[ \frac{u'(0)}{2} sc(\mu t|r) \right]$$

where  $r = 1 - \frac{1}{4} (u'(0))^2$  and  $sc(\mu|r)(1-r)^{\frac{1}{2}} = \sinh(\frac{\mu}{2})$  [36]. In order to solve Troesch's problem, we expand the solution of Eq. (2) in terms of Laguerre wavelets in the form

$$u(t) = \sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi_{nm}(t) \quad (4)$$

where  $A_{nm}$  are unknown coefficients to be determined. In order to find these coefficients we express the boundary conditions in Eq. (3) by using Eq. (4) as

$$u(0) = \sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi_{nm}(0) = 0 \quad (5)$$

$$u(1) = \sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi_{nm}(0) = 1 \quad (6)$$

These boundary conditions provide two algebraic equations to be solved for  $2^k(M + 1)$  unknown coefficients  $A_{nm}$ . For other  $2^k(M + 1) - 2$  equations, we rewrite the differential equation in Eq.(2) in the form

$$\sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi''_{nm}(t) - \mu \sinh \left[ \mu \sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi_{nm}(t) \right] = 0 \tag{7}$$

and we use the roots,  $t_i$ , of shifted Chebyshev polynomials  $U_{2^k(M+1)}$  as collocation points in Eq. (7)

$$\sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi''_{nm}(t_i) - \mu \sinh \left[ \mu \sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi_{nm}(t_i) \right] = 0 \tag{8}$$

for  $i = 1, 2, \dots, 2^k(M + 1) - 2$ . The system of algebraic equations in Eqs. (5), (6) and (8) can be solved for the same number of unknown coefficients for  $A_{nm}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, 2^k - 1$ ;  $m = 0, 1, 2, \dots, M$  by using MATLAB tools. The approximate solution of BVP in Eqs. (2)-(3) is determined with the obtained values of  $A_{nm}$ , by  $u(t) = \sum_{n=0}^{2^k-1} \sum_{m=0}^M A_{nm} \varphi_{nm}(t)$ .

**4. Results and discussion**

In this Section, the problem given in Eqs. (2)-(3) is solved for two values of Troesch’s parameter. Table 1 presents the absolute errors obtained by taking  $M = 4, 5$  and  $6$ . We can see that the maximum absolute error for  $M = 4$  is  $10^{-4}$ , and for  $M = 6$  maximum absolute error is obtained as  $10^{-7}$ . One can say that the method yields high accuracy even with low degree polynomials.

Table 1. Absolute errors for different values of M.

$t_i$	Error for M = 6	Error for M = 5	Error for M = 4
0.1	1.02705262211567e-07	6.50748263789081e-07	1.50597029199839e-05
0.2	2.04455795155267e-07	1.31084622134736e-06	2.99308713823387e-05
0.3	3.08525196668352e-07	1.97144941621596e-06	4.45469093270368e-05
0.4	4.13512608266053e-07	2.62164521075414e-06	5.97260537494315e-05
0.5	5.16097657887737e-07	3.28527395815348e-06	7.59601747001293e-05
0.6	6.20768004666594e-07	3.99985017496274e-06	9.21456752845939e-05
0.7	7.37419484031499e-07	4.71848371341732e-06	1.04237391663986e-04
0.8	8.40628852527559e-07	5.10860093361210e-06	1.03799293054374e-04
0.9	7.64399135100291e-07	4.22126587584781e-06	7.64257817268410e-05

Table 2 presents the comparison of the numerical results of the proposed method taking  $M=6$  with the Homotopy perturbation method (HPM) [11], Perturbation method with Pade approximation [18], Modified nonlinear shooting method (MNLSM) [20], and Variational iteration method (VIM) [24], as well as the analytical solution. One can see that even with a low degree polynomial, the proposed method has a better accuracy than these methods.



Table 2. Comparison of the present method with exact and other numerical solutions for  $\mu = 0.5$ .

$t_i$	Exact Sln.	Present Method	HPM[11]	PM-Pade [18]	MNLSM[20]	VIM [24]
0.1	0.095944	0.095944	0.095948	0.095941	0.095972	0.100042
0.2	0.192128	0.192128	0.192135	0.192123	0.192185	0.200334
0.3	0.288794	0.288794	0.288804	0.288786	0.288879	0.301128
0.4	0.386184	0.386185	0.386196	0.386174	0.386298	0.402677
0.5	0.484547	0.484547	0.484559	0.484534	0.484416	0.505241
0.6	0.584133	0.584133	0.584145	0.584117	0.584281	0.609082
0.7	0.685201	0.685201	0.685212	0.685182	0.685256	0.714470
0.8	0.788016	0.788017	0.788025	0.787994	0.788079	0.821682
0.9	0.892854	0.892854	0.892859	0.892829	0.892926	0.931008

Table 3 presents the numerical results of the present method and the same numerical methods used in the previous comparison for  $\mu = 1$ . We again observe that the present method has a better accuracy for increasing value of the Troesch's parameter.

Table 3. Comparison of the present method with exact and other numerical solutions for  $\mu = 1$ .

$t_i$	Exact Sln.	Present Method	HPM[11]	PM-Pade[18]	MNLSM[20]	VIM [24]
0.1	0.084661	0.084668	0.084934	0.871733	0.084730	0.100167
0.2	0.170171	0.170186	0.170697	0.170260	0.170310	0.201339
0.3	0.257393	0.257417	0.258133	0.257531	0.257603	0.304541
0.4	0.347222	0.347254	0.348116	0.347413	0.347506	0.410841
0.5	0.440599	0.440639	0.44157	0.440849	0.439937	0.521373
0.6	0.538534	0.538582	0.539498	0.538848	0.538905	0.637362
0.7	0.642128	0.642187	0.642987	0.642508	0.642093	0.760162
0.8	0.752608	0.752676	0.753267	0.753043	0.752558	0.891287
0.9	0.871362	0.871426	0.871733	0.871811	0.871310	1.032460

## 5. Conclusion

In this study, Laguerre wavelets are used to solve the nonlinear Troesch problem. The results are presented for several values of  $M$  and  $\mu$ , and we observed that accurate numerical results are obtained by using quite small values of  $M$ . Compared with other numerical results, it has seen that the present method has a better accuracy. Furthermore, the application of the method does not require the approximation of the nonlinear terms, it is efficient and easy to implement.

## References

- [1] Temimi, H., Ben-Romdhane, M., Ansari, A.R. and Shishkin, G.I., Finite difference numerical solution of Troesch's problem on a piecewise uniform Shishkin mesh, **Calcolo**, 54, 225–242, (2017).
- [2] Kazemi Nasab, A., Pashazadeh Atabakan, Z. and Kılıçman, A., An Efficient Approach for Solving Nonlinear Troesch's and Bratu's Problems by Wavelet Analysis Method, **Mathematical Problems in Engineering**, 2013, 10 pages, (2013).
- [3] El-Gamel, M. and Sameeh, M., A Chebyshev collocation method for solving Troesch's problem, **International Journal of Mathematics and Computer Applications Research**, 3(2), 23-32, (2013).
- [4] Khuri, S.A. and Sayfy, A., Troesch's problem: A B-spline collocation approach, **Mathematical and Computer Modelling**, 54, 1907–1918, (2011).
- [5] Temimi, H. and Kürkçü, H., An accurate asymptotic approximation and precise numerical solution of highly sensitive Troesch's problem, **Applied Mathematics and Computation**, 235, 253–260, (2014).
- [6] Geng, F. and Cui, M., A novel method for nonlinear two-point boundary value problems: Combination of ADM and RKM, **Applied Mathematics and Computation**, 217, 4676–4681, (2011).
- [7] Saadatmandi, A. and Abdolahi-Niasar, T., Numerical solution of Troesch's problem using Christov rational functions, **Computational Methods for Differential Equations**, 3(4), 247-257, (2015).
- [8] Deeba, E., Khuri, S.A. and Xie, S., An Algorithm for Solving Boundary Value Problems, **Journal of Computational Physics**, 159, 125–138, (2000).
- [9] Chang, S.H. and Chang, I.L., A new algorithm for calculating one-dimensional differential transform of nonlinear functions, **Applied Mathematics and Computation**, 195, 799–808, (2008).
- [10] Bisheh-Niasar, M., Saadatmandi, A. and Akrami-Arani, M., A New Family of High-Order Difference Schemes for the Solution of Second Order Boundary Value Problems, **Iranian Journal of Mathematical Chemistry**, 9(3), 187 – 199, (2018).
- [11] Mirmoradi, S.H., Hosseinpour, I., Ghanbarpour, S., Barari, A., Application of an Approximate Analytical Method to Nonlinear Troesch's Problem, **Applied Mathematical Sciences**, 3, 32, 1579 – 1585, (2009).
- [12] Malik, S.A., Qureshi, I.M., Zubair, M. and Amir, M., Numerical Solution to Troesch's Problem Using Hybrid Heuristic Computing, **Journal of Basic and Applied Scientific Research**, 3(7), 10-16, (2013).
- [13] Doha, E.H., Baleanu, D., Bhrawi, A.H. and Hafez, R.M., A Jacobi collocation method for Troesch's problem in plasma physics, **Proceedings of the Romanian Academy, Series A**, 15(2), 130–138, (2014).
- [14] Khuri, S.A., A numerical algorithm for solving Troesch's problem, **International Journal of Computer Mathematics**, 80(4), 493–498, (2003).
- [15] Feng, X., Mei, L. and He, G., An efficient algorithm for solving Troesch's problem, **Applied Mathematics and Computation**, 189, 500–507, (2007).
- [16] Ben-Romdhane, M. and Temimi, H., A novel computational method for solving Troesch's problem with high-sensitivity parameter, **International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics**, 18(4-5), 230-237, (2017).

- [17] Khalid, M., Zaidi, F., Sultana, M. and Aurangzaib, A Numerical Solution of Troesch's Problem via Optimal Homotopy Asymptotic Method, **International Journal of Computer Applications**, 140(5), 1-5, (2016).
- [18] Filobello-Nino, U., Vázquez-Leal, H., Benhammouda, B., Pérez-Sesma, A., Cervantes-Pérez, J., Jiménez-Fernández, V.M., Díaz-Sánchez, A., Herrera-May, A., Pereyra-Díaz, D., Marín-Hernández, A., Huerta-Chua, J. and Sánchez-Orea, J., Perturbation Method and Laplace-Padé Approximation as a novel tool to find approximate solutions for Troesch's problem, **Revista Electrónica Nova Scientia**, 14, 7, 2, 57 – 73, (2015).
- [19] Scott, M.R. and Vandevender, W.H., A comparison of several invariant imbedding algorithms for the solution of two-point boundary-value problems, **Applied Mathematics and Computation**, 1, 187-218, (1975).
- [20] Alias, N., Manaf, A., Ali, A. and Habib, M., Solving Troesch's problem by using modified nonlinear shooting method, **Jurnal Teknologi**, 78, 4-4, 45-52, (2016).
- [21] El-Gamel, M., Numerical Solution of Troesch's Problem by Sinc-Collocation Method, **Applied Mathematics**, 4, 707-712, (2013).
- [22] Zarebnia, M. and Sajjadian, M., The sinc-Galerkin method for solving Troesch's problem, **Mathematical and Computer Modelling**, 56, 218-228, (2012).
- [23] Chang, S.H., A variational iteration method for solving Troesch's problem, **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 234, 3043-3047, (2010).
- [24] Momani, S., Abuasad, S. and Odibat, Z., Variational iteration method for solving nonlinear boundary value problems, **Applied Mathematics and Computation**, 183, 1351-1358, (2006).
- [25] Savaseneril, N., Laguerre Series Solutions of the Delayed Single Degree-of-Freedom Oscillator Excited by an External Excitation and Controlled by a Control Force, **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, 15, 1-5, (2018).
- [26] Savaseneril, N. and Sezer, M., Laguerre Polynomial Solution of High- Order Linear Fredholm Integro-Differential Equations, **New Trends in Mathematical Sciences**, 4, 2, 273-284, (2016).
- [27] Yüzbaşı, Ş., Laguerre approach for solving pantograph-type Volterra integro-differential equations, **Applied Mathematics and Computation**, 232, 1183-1199, (2014).
- [28] Goswami, J.C. and Chan, A.K., **Fundamentals of Wavelets, Theory, Algorithms and Applications**, 2nd edition, John Wiley and Sons Inc., New York, 72-97, (2011).
- [29] Gu, J.S. and Jiang, W.S., The Haar wavelets operational matrix of integration, **International Journal of Systems Science**, 27, 7, 623-628, (1996).
- [30] Babolian, E. and Fattahzadeh, F., Numerical solution of differential equations by using Chebyshev wavelet operational matrix of integration, **Applied Mathematics and Computation**, 188, 417-426, (2007).
- [31] Razzaghi, M. and Yousefi, S., Legendre wavelets operational matrix of integration, **International Journal of Systems Science**, 32, 495-502, (2001).
- [32] Mohammadi, F. and Hosseini, M.M., Legendre wavelet method for solving linear stiff systems, **Journal of Advanced Research in Differential Equations**, 2, 47-57, (2010).

- [33] Mohammadi, F., Hosseini, M.M. and Mohyud-Din, S.T., Legendre wavelet Galerkin method for solving ordinary differential equations with nonanalytic solution, **International Journal of Systems Science**, 42, 579-585, (2011).
- [34] Mohammadi, F. and Hosseini, M.M., A new Legendre wavelet operational matrix of derivative and its applications in solving the singular ordinary differential equations. **Journal of Franklin Institute**, 348, 1787-1796, (2011).
- [35] Arfken, G.B. and Weber, H.J., **Mathematical Methods for Physicists**, 6th edition, Elsevier Academic Press, London, 837-845, (2005).
- [36] Roberts, S.M. and Shipman, J.S., On the closed form solution of Troesch's problem, **Journal of Computational Pyhsics**, 21, 291-304, (1976).

# New mixed-dark soliton solutions to the hyperbolic generalization of the Burgers equation

Faruk DUSUNCELI\*<sup>1</sup>, Hacı Mehmet BASKONUS<sup>2</sup>, Alaattin ESEN<sup>3</sup>,  
Hasan BULUT<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mardin Artuklu University, Mardin, Turkey,

<sup>2</sup>University of Harran, Faculty of Education, Sanliurfa, Turkey,

<sup>3</sup>Inönü University, Faculty of Science, Malatya, Turkey

<sup>4</sup>Firat University, Faculty of Science, Elazig, Turkey,

Geliş Tarihi (Received Date): 07.02.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 31.05.2019

## Abstract

*In this paper, we apply the exponential function method to find mixed-dark, exponential and singular soliton solutions in the hyperbolic generalization of the Burgers equation. We obtain some entirely new mixed singular and dark soliton solutions. Under the suitable values of parameters, various dimensional simulations of results are plotted. Finally, we present a conclusion by giving novelties of paper.*

**Keywords:** Exponential function method, Hyperbolic Generalization of the Burgers equation, mixed-dark and singular soliton solutions.

## Genelleştirilmiş hiperbolik Burgers denkleminin yeni mixed-dark soliton çözümleri

## Özet

*Bu yazıda, Burgers denkleminin hiperbolik genelleştirilmesinde mixed-dark, üstel ve tekil çözümleri bulmak için üstel fonksiyon yöntemini kullanıyoruz. Tamamen yeni karışık tekil (mixed singular) ve dark soliton çözümleri elde ediyoruz. Parametrelerin uygun değerleri altında, sonuçların çeşitli boyutsal simülasyonları çizilmiştir. Son olarak, makalemizde yeni bir sonuç sunuyoruz.*

---

\* Faruk DÜŞÜNCELİ, farukdusunceli@artuklu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-2368-7963>  
Hacı Mehmet BAŞKONUŞ, hmbaskonus@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4085-3625>  
Alaattin ESEN, alaattin.esen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7927-5941>  
Hasan BULUT, hbulut@firat.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-6089-1517>

**Anahtar kelimeler:** Üstel fonksiyon metodu, Burgers denkleminin hiperbolik genelleştirilmesi, mixed-dark ve tekil çözümleri.

## 1.Introduction

In recent several decades, nonlinear evolution equations (NLEEs) arising in optical fiber, applied sciences, plane of symmetry, nonsymmetry and antisymmetry, and nonlinear algebraic structures, supergravitational field have been used to symbolize real world problem in the point of mathematical views. For the last few years, many scientist have converted NLEEs, especially, real word problems, into nonlinear ordinary differential equations (NODEs) to find new soliton solutions [1-3]. Such as the improved Bernoulli sub-equation function method [4-7], the extended sinh-Gordon equation expansion method [8-11] the exponential function method[12], the modified  $\exp(-\phi(\eta))$ -expansion function [13] the implicit finite difference scheme and the Dufort–Frankel finite difference scheme methods [14] and the difference schemes method [15]. Therefore, papers conducted on travelling wave solutions along with important partial differential equations have attracted attention of researchers from all over the world . Moreover, these models symbolize the surfaces of wave from time to time. One of these models is the hyperbolic generalized Burgers equation (GBE) defined as [16]

$$\tau u_{tt} + u_t + uu_x + Bu_x - \kappa u_{xx} - \lambda u(u-s)(u+q) = 0, \quad (1)$$

where  $\tau, B, \kappa, \lambda, s, q$  are real numbers with non-zero. Eq.(1) is hyperbolic model under the terms of  $\kappa > 0$ . Eq.(1) is used to describe interaction of the wave fronts [16]. V. A. Vladimirov *et al* have applied Hirota method and found exact solutions to the model. Moreover, some significant physical properties of the Burgers and its generalized versions have been presented by A. S. Makarenko and et al [17,18].

## 2.General properties of EFM

Here, we shortly give the main steps of the EFM. Let us consider the nonlinear partial differential equation (NPDE)

$$P(u, u_t, u_x, u^2, u_u^3, L) = 0, \quad (2)$$

where  $u = u(x, t)$  is the unknown function, and  $P$  is a polynomial in  $u$ .

**Step 1:** By taking the transformation as:

$$u(x, t) = U(\xi), \quad \xi = kx - ct, \quad (3)$$

from Eq.(2), we obtain the nonlinear ordinary differential equation (NODE)

$$N(U, U', U'', L) = 0, \quad (4)$$

which  $N$  is a polynomial of  $U$ .

**Step 2:** Let us now assume the solution of equation (4) to have the form:

$$U = U(\xi) = \sum_{i=0}^N A_i \left[ e^{-\Omega(\xi)} \right]^i, \tag{5}$$

where  $A_i, (0 \leq i \leq N)$  are constants to be obtained later, such that  $A_N \neq 0$ , and  $\Omega = \Omega(\xi)$  solves the following ODE;

$$\Omega' = \exp(-\Omega) + \mu \exp(\Omega) + w. \tag{6}$$

Eq.(6) is of the following set of solutions;

*Family-1:* When  $\mu \neq 0, w^2 - 4\mu > 0$ ,

$$\Omega(\xi) = \ln \left( \frac{-\sqrt{w^2 - 4\mu}}{2\mu} \tanh \left( \frac{\sqrt{w^2 - 4\mu}}{2} (\xi + E) \right) - \frac{w}{2\mu} \right), \tag{7}$$

*Family-2:* When  $\mu \neq 0, w^2 - 4\mu < 0$ ,

$$\Omega(\xi) = \ln \left( \frac{\sqrt{-w^2 + 4\mu}}{2\mu} \tan \left( \frac{\sqrt{-w^2 + 4\mu}}{2} (\xi + E) \right) - \frac{w}{2\mu} \right), \tag{8}$$

*Family-3:* When  $\mu = 0, w \neq 0$ , and  $w^2 - 4\mu > 0$ ,

$$\Omega(\xi) = -\ln \left( \frac{w}{\exp(w(\xi + E)) - 1} \right), \tag{9}$$

*Family-4:* When  $\mu \neq 0, \lambda \neq 0$ , and  $w^2 - 4\mu = 0$ ,

$$\Omega(\xi) = \ln \left( -\frac{2w(\xi + E) + 4}{w^2(\xi + E)} \right), \tag{10}$$

*Family-5:* When  $\mu = 0, \lambda = 0$ , and  $w^2 - 4\mu = 0$ ,

$$\Omega(\xi) = \ln(\xi + E), \tag{11}$$

$A_i, (0 \leq i \leq N), E, w, \mu$  are coefficients to be obtained later.

**Step 3:** Putting Eq.(5) along with its derivatives together with the Eq.(6) and simplifying, we find a polynomial of  $\exp(-\Omega(\xi))$ . When we solve this, we find the values of the coefficients. By putting the values of the coefficients with one of Eqs. (7-11) into Eq.(5), we can obtain the new solitons to the NPDE equation (2).

### 3. Implementation of the EFM

In here, we use the EFM to gain various new mixed-dark, exponential and singular soliton solutions of equation (1). Substituting  $u(x,t) = U(\xi)$ ,  $\xi = kx - ct$  into equation (1), produces the following NODE;

$$(\tau c^2 - \kappa k^2)U'' + (kB - c)U' + kUU' - \lambda U^3 + (s\lambda - q\lambda)U^2 + s\lambda qU = 0, \tag{12}$$

Considering the balance principle, the value of  $N$  can be found as

$$N = 1. \tag{13}$$

Using  $N = 1$ , along with Eq.(5), yields;

$$U = A_0 + A_1 \exp(-\Omega(\xi)), \tag{14}$$

$$U' = -A_1 \exp(-\Omega(\xi))\Omega', \tag{15}$$

$$U'' = L \tag{16}$$

where  $A_1 \neq 0$ . Using equations (14-16) into equation (12), produces a polynomial equation in  $e^{-\Omega(\xi)}$ . We collect an algebraic equations from this polynomials by equating to zero. To obtain the solutions of Eq.(1), we put the values of the coefficients into Eq. (14) along with *Family-1* condition.

#### Case 1

$$A_0 = \frac{1}{2}(-q + wA_1), \quad s = -\frac{2c - 2Bk + kq + q\lambda A_1}{2\lambda A_1}, \quad \tau = \frac{2k^2\kappa + (k + \lambda A_1)A_1}{2c^2}, \quad \mu = \frac{1}{4}\left(w^2 - \frac{q^2}{A_1^2}\right),$$

with these coefficients, when  $\mu \neq 0$ ,  $w^2 - 4\mu > 0$ , Eq.(1.1) gives the following singular soliton solution

$$u_1(x,t) = \frac{-q + wA_1}{2} + \frac{(q^2 - w^2 A_1^2) \coth(k\varpi x - \varpi ct + \varpi E)}{2q + 2wA_1 \coth(k\varpi x - \varpi ct + \varpi E)}, \tag{17}$$

where  $q^2/A_1^2 > 0$  and  $\varpi = q/2A_1$ .



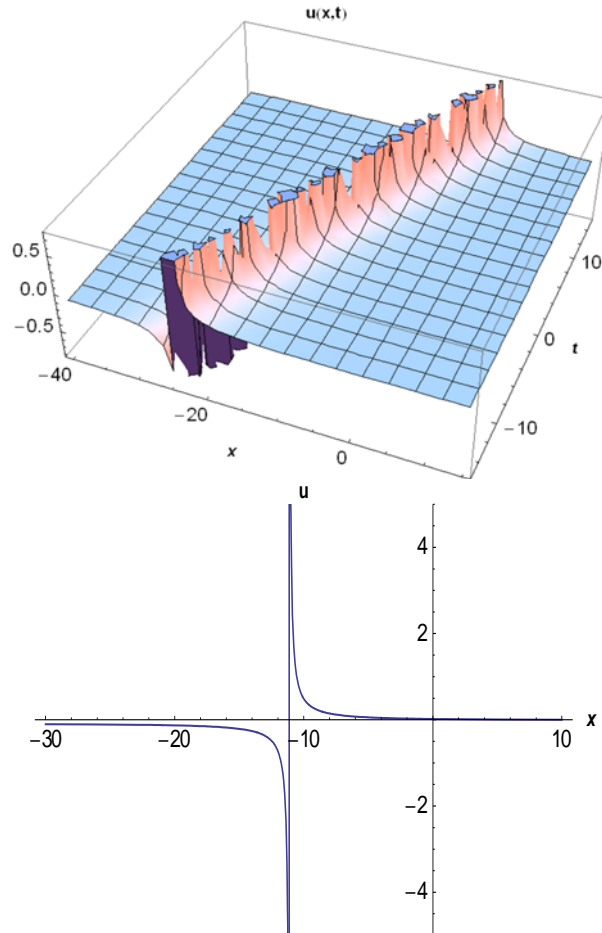


Figure 1. The 2D and 1D surfaces of Eq.(17) and  $t = 1.5$  for 1D graphics.

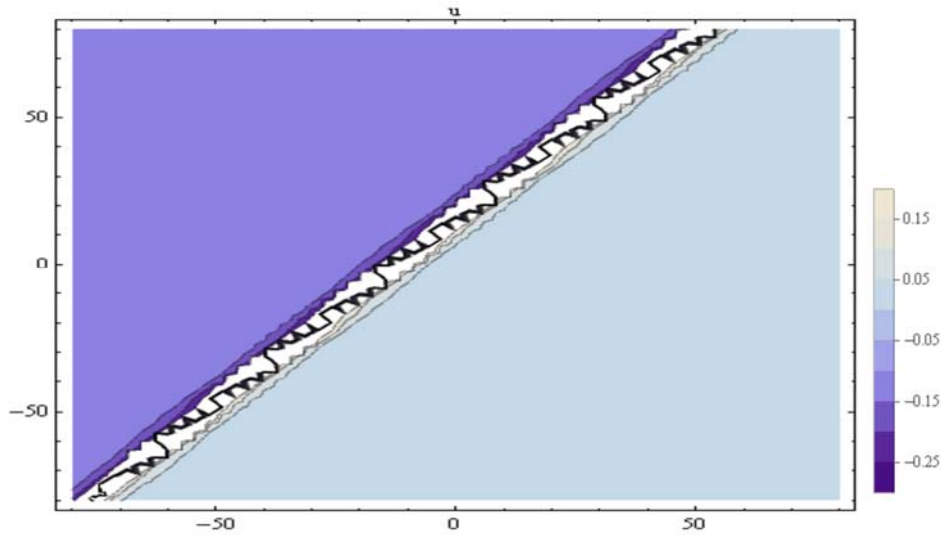


Figure 2. Contour graphs of Eq.(17).

**Case 2** When

$$A_0 = \frac{1}{2}(-q - \sqrt{q^2 + 4\mu A_1^2}), \quad w = -\frac{\sqrt{q^2 + 4\mu A_1^2}}{A_1}, \quad s = -\frac{2c - 2Bk + kq + q\lambda A_1}{2\lambda A_1}, \quad \tau = \frac{2k^2\kappa + (k + \lambda A_1)A_1}{2c^2},$$

along with  $\mu \neq 0, w^2 - 4\mu > 0$ , Eq.(1.1) is of the following mixed dark soliton solution

$$u_2(x,t) = \frac{-\omega + \omega \tanh(k\varpi x - \varpi ct + \varpi E)}{\nu - 2q \tanh(k\varpi x - \varpi ct + \varpi E)}, \quad (18)$$

where  $-4\mu + (q^2 + 4\mu A_1^2)/A_1^2 > 0$  for validity condition of Eq.(18) and  $\omega = q^2 + q\sqrt{q^2 + 4\mu A_1^2}$ ,  $\nu = 2\sqrt{q^2 + 4\mu A_1^2}$ ,  $\varpi = q/2A_1$ .

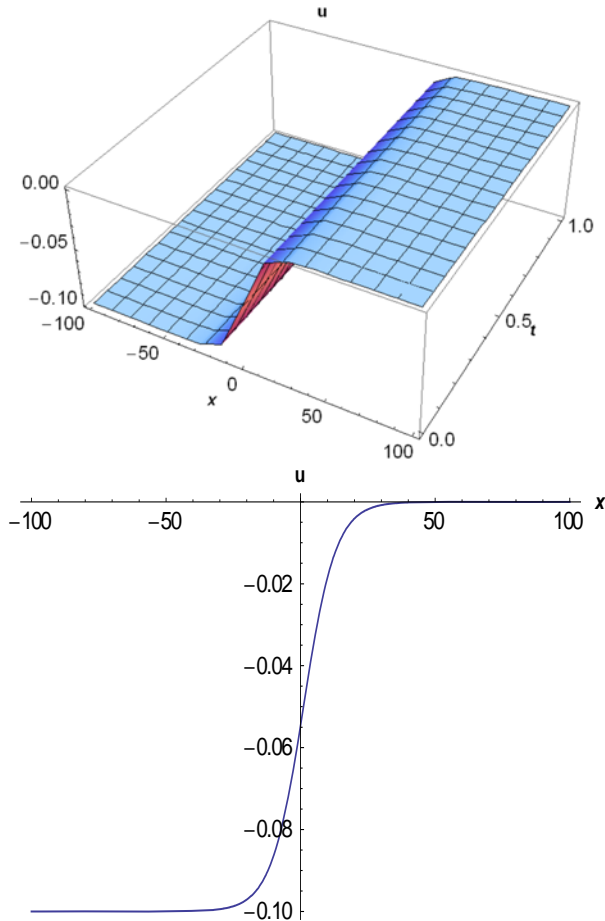


Figure 3. The 2D and 1D surfaces of Eq.(18) and  $t = 0.85$  for 1D graphics.

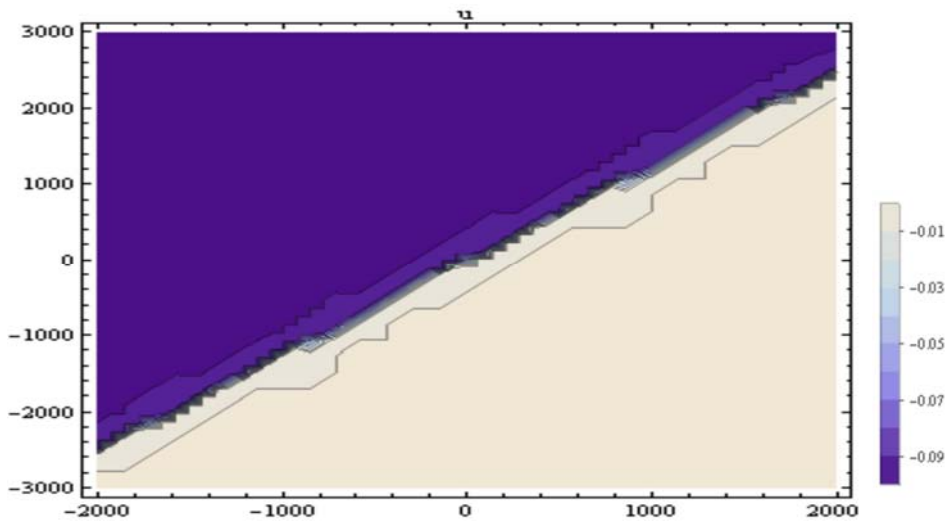


Figure 4. Contour graphs of Eq.(18).

**Case 3 If**

$$A_0 = \frac{1}{w}(q + 2A_0), s = -\frac{q}{2} - \frac{2cw - 2Bkw + kqw}{2q\lambda + 4\lambda A_0}, \kappa = -\frac{q(kw + q\lambda) - 2c^2w^2\tau + 2A_0(kw + 2q\lambda + 2\lambda A_0)}{2k^2w^2},$$

$\mu = \frac{w^2 A_0 (q + A_0)}{(q + 2A_0)^2}$ , we find the following new exponential solution

$$u_3(x, t) = A_0 - \frac{2A_0(q + A_0)(e^{2(k\varpi x - \varpi ct + \varpi E)} + 1)}{2A_0 + (q + 2A_0)e^{2(k\varpi x - \varpi ct + \varpi E)} + qe^{2(k\varpi x - \varpi ct + \varpi E)}}, \tag{19}$$

where  $w^2 - (4w^2 A_0 (q + A_0)) / (q + 2A_0)^2 > 0$  and  $\varpi = (qw) / (2q + 2A_0)$ .

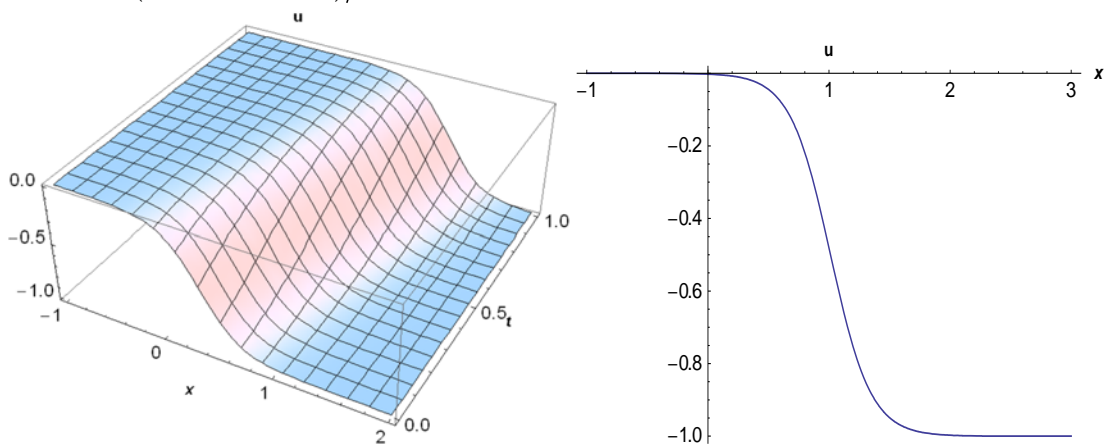


Figure 5. The 2D and 1D surfaces of Eq.(19) and  $t = 0.85$  for 1D graphics.

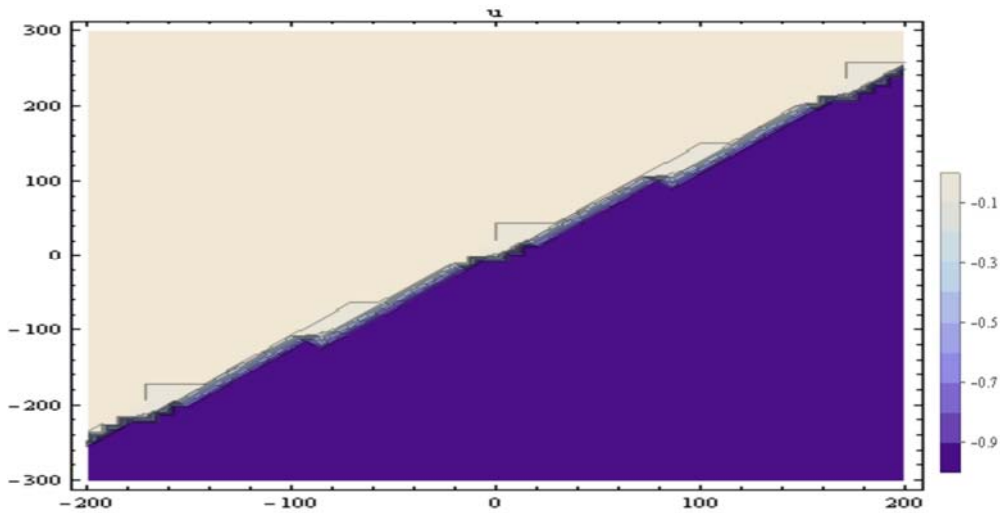


Figure 6. Contour graphs of Eq.(19).

**4. Conclusion**

In this paper, the EFM has been successfully used in finding mixed-dark, exponential and singular soliton results to the hyperbolic generalization of the Burgers equation (1). The constraint conditions for the existence of valid soliton solutions where necessary

are also given. The physical properties of the hyperbolic generalization of the Burgers model (1) are given as well. Solutions (17), (18) and (19) belong to mixed-dark, exponential and singular soliton solutions, respectively.

When it comes to the solution of Family-2 in Case-1 being  $\mu \neq 0$ ,  $-w^2 + 4\mu < 0$ , is not satisfied the constraint conditions because it is always negative as  $-w^2 + 4\mu = -q^2/A_1^2 < 0$ .

The soliton solutions obtained in this manuscript might be physically beneficial in expressing how interaction of the wave fronts and also could be viewed from Figures (1-6). We observe that our result may be useful in detecting some soliton wave behaviors.

The results found in here are entirely new when comparing the results presented in [16]. Finally, one can be inferred from results that the  $e^{-\Omega(\xi)}$ -exponential function method is a powerful and efficient mathematical tool that can be used to find many soliton solutions such as mixed-dark, exponential and singular soliton solutions to various nonlinear partial differential equations with high nonlinearity.

## References

- [1] Arshad, M., Seadawy, A. R., Lu, D., Bright-dark solitary wave solutions of generalized higher-order nonlinear Schrödinger equation and its applications in optics, **Journal of Electromagnetic Waves and Applications** 31, 1711-1721, (2017).
- [2] Yokus, A., Sulaiman, T. A., Bulut, H., On the analytical and numerical solutions of the Benjamin–Bona–Mahony equation. **Optical and Quantum Electronics**, 50,1, 31, (2018).
- [3] Arshad, M., Seadawy, A. R., Lu, D., Exact bright-dark solitary wave solutions of the higher-order cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation and its stability, **Optik** 138, 40-49, (2017).
- [4] Baskonus, H. M., Bulut, H., New wave behaviors of the system of equations for the Ion Sound and Langmuir waves, **Waves in Random and Complex Media**, 26,4, 613-625, (2016).
- [5] Dusunceli, F., Solutions for the Drinfeld-Sokolov equation using an ibsefm method, **MSU Journal of Science**, 6, 1, 505-510, (2018). doi : 10.18586/msufbd.403217
- [6] Baskonus, H. M., Complex soliton solutions to the Gilson-Pickering model, **Axioms**, 8, 1, 18, (2019).
- [7] Dusunceli, F., New exponential and complex traveling wave solutions to the Konopelchenko-Dubrovsy model, **Advances in Mathematical Physics**, 2019, Article ID 7801247, 9, (2019).
- [8] Cattani, C., Sulaiman, T. A., Baskonus, H.M., Bulut, H., Solitons in an inhomogeneous Murnaghan's rod, **European Physical Journal Plus**, 133, 228, 1-12, (2018).
- [9] Cattani, C., Sulaiman, T. A., Baskonus, H. M., Bulut, H., On the soliton solutions to the Nizhnik-Novikov-Veselov and the Drinfel'd-Sokolov systems, **Optical and Quantum Electronics**, 50, 3, 138, (2018).
- [10] Ilhan, O. A., Sulaiman, T. A., Bulut, H., Baskonus, H. M., On the New Wave

- Solutions to a Nonlinear Model Arising in Plasma Physics, **European Physical Journal Plus**, 133, 27, 1-6, (2018).
- [11] Yel, G., Baskonus, H. M., Bulut, H., Novel archetypes of new coupled Konno–Oono equation by using sine–Gordon expansion method, **Optical and Quantum Electronics**, 49, 285, 1-10, (2017).
- [12] Ilhan, O. A., Esen, A., Bulut, H., Baskonus, H.M., Singular solitons in the pseudo-parabolic model arising in nonlinear surface waves, **Results in Physics**, 12, 1712–1715, (2019).
- [13] Ciancio, A., Baskonus, H. M., Sulaiman, T. A., Bulut, H., New structural dynamics of isolated waves via the coupled nonlinear Maccari's System with complex structure, **Indian Journal of Physics**, 92, 10, 1281–1290, (2018).
- [14] Modanlı, M., Two numerical methods for fractional partial differential equation with nonlocal boundary value problem, **Advances in Difference Equations**, 2018, 333 (2018).
- [15] Modanlı, M., Difference schemes methods for the fractional order differential equation sense of caputo derivative, **International Journal of Innovative Engineering Applications**, 2, 53-56, (2018).
- [16] Vladimirov, V. A., Maczka, C., Exact solutions of generalized Burgers equation describing travelling fronts and their interaction, **Reports on Mathematical Physics**, 60, 2, 317-328, (2007).
- [17] Makarenko, A. S., Moskalkov, A. S., Levkov, A. S., On blow-up solutions in turbulence, **Physics Letters A**, 235,4, 391-397, (1997).
- [18] Makarenko, A. S., New differential equation model for hydrodynamics with memory effects, **Reports on Mathematical Physics**, 46, 183-190, (2000).

# Polyvinyl alcohol/CuO nanocomposite hydrogels: facile synthesis and long-term stability

Filiz BORAN\*, Çiğdem KARAKAYA

Hitit University Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Kuzey Campus, Çorum.

Geliş Tarihi (Received Date): 12.12.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 20.06.2019

## Abstract

*Within this study, Polyvinyl alcohol/CuO nanocomposite hydrogels were synthesized through dispersing CuO nanoparticles in a PVA solution, using the freeze-thawing procedure in order for physically crosslinking. The average particle size of CuO nanoparticles which was added to the hydrogel was determined as 3.51 nm according to the XRD analysis after the ball milling process. The presence of CuO nanoparticles in nanocomposite hydrogels was determined by UV-vis spectroscopy, FESEM, EDS, and FTIR analysis. Also, the rheological properties of neat hydrogel and PVA/CuO nanocomposite hydrogels were examined. The addition of CuO nanoparticles to the polymer structure develops rheological features of PVA hydrogels. The Effect of CuO content of nanocomposite hydrogels on the swelling behavior and long term stability was investigated. These nanocomposite hydrogels demonstrated unique properties for biomedical applications due to their high swellability at pH 2.1 as the pH values of the stomach and long term stability. According to these results, the addition of CuO to the hydrogel structure improved the swelling characteristics of neat PVA hydrogel.*

**Keywords:** Long-term stability, swelling behavior, PVA, CuO nanoparticles, ball milled.

## Polivinil alkol/CuO nanokompozit hidrojel: kolay sentezi ve uzun-sürelili kararlılığı

\* Filiz BORAN, filizbektas@hitit.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4315-9949>

Çiğdem KARAKAYA, cgdm\_karakaya@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8814-0360>

## Özet

*Bu çalışmada, polivinil alkol/CuO nanokompozit hidrojel, fiziksel olarak çapraz bağlanma için donma-çözme prosedürü kullanılarak PVA çözeltisi içinde CuO nanopartiküllerin dağıtılması yoluyla sentezlenmiştir. Hidrojele eklenen CuO nanopartiküllerinin ortalama partikül boyutu bilyalı öğütme işleminden sonra yapılan XRD analiz sonuçlarına göre 3,51 nm olarak belirlenmiştir. Nanokompozit hidrojellerde CuO nanopartiküllerin varlığı UV-vis spektroskopi, FESEM, EDS ve FTIR analizi ile belirlenmiştir. Ayrıca saf hidrojin ve PVA/CuO nanokompozit hidrojellerinin reolojik özellikleri incelenmiştir. Polimer yapısına CuO nanopartiküllerinin ilave edilmesi, PVA hidrojellerinin reolojik özelliklerini geliştirmiştir. Nanokompozit hidrojellerin CuO içeriğinin, nanokompozitlerin şişme davranışı ve uzun süre kararlılığı üzerine etkisi araştırıldı. Bu nanokompozit hidrojel, pH 2.1' deki yüksek şişebilirliklerinden dolayı, mide pH'ları ve uzun süreli kararlılıkları nedeniyle biyomedikal uygulamalar için benzersiz özellikler göstermiştir. Bu sonuçlara göre, CuO'nun hidrojel yapısına eklenmesi, saf PVA hidrojinin şişme özelliklerini geliştirmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Uzun süreli kararlılık, şişme davranışı, PVA, CuO nanopartiküller, bilyalı öğütme.

## 1. Introduction

Hydrogels are physically or chemically cross-linked three-dimensional hydrophilic, linear, or branched polymers that are insoluble in aqueous solutions, which can absorb and retain liquid in large quantities. Hydrogels have excellent hydrophilic properties with a high swelling rate and biocompatibility, the ability to respond to external stimuli such as temperature, pH, salt, light, electric field, and absorb different contaminants such as dyes, metal ions, and proteins. Thanks to these excellent properties, they are widely used in biomedical fields such as hydrogels, drug, and cell distribution system, enzyme immobilization, antibacterial, tissue engineering, and biosensors. Hydrogels have also found widespread use as sorbents for the removal of various contaminants from agriculture and from aqueous solutions [1-3]. Among the polymers, Poly (vinyl alcohol) (PVA) is an easily processable inert polymer, which is a kind of hydrophilic semi-crystalline widely used because of the toxicity, biocompatibility, excellent chemical resistance and mechanical strength in biomedical applications [4, 5].

Recently, various fillers have been incorporated into the hydrogels to improve the properties of hydrogels for use in various applications [3]. In the last few years, inorganic nanoparticles (NPs) among these reinforcing materials have received intense interest in polymeric nanocomposites due to their high homogeneity, flexible machinability, adjustable physical properties, and unique properties. Among these materials, metal nanoparticles and oxides with naturally antimicrobial and anticancer activity have tremendous application in biomedical and surgical applications such as wound healing ointments, dental work, food processing and packaging, water treatment, synthetic textiles. In addition, composites prepared using metal nanoparticles and polymers are also requested, due to improved antimicrobial activity [6, 7]. As a p-type semiconductor with a narrow band gap (1.2 eV), among the metal nanoparticles, copper

oxide (CuO) has unique properties such as significant antibacterial properties, easy synthesis, photoconductivity, high thermal and electrical conductivity, high mechanical strength and high-temperature resistance features as well as being easily removed from the human body. Due to these unique properties, copper oxide nanostructures are of considerable interest in many important scientific fields such as gas sensors, magnetic phase transitions, catalysts, superconductors, pollution control, and nano-toxicology, cellular imaging, photothermal therapy and biocides [2, 6, 8]. For these reasons, copper oxide is widely used in the preparation of a wide variety of organic-inorganic nanostructured composites [6].

Recently, copper oxide nanocomposite hydrogels with various polymers such as carboxymethylcellulose [2] chitosan [9] poly (N-iso propyl acrylamide-allyl acetic acid) copolymer microgel [6] have been studied. However, nanocomposites of CuO with polyvinyl alcohol have rarely been studied. In their study, nanocomposites of CuO with chitosan and poly (vinyl alcohol) were prepared and investigated to remove Pb (II) [4]. Nevertheless, there were no studies investigating the long-term stability of CuO and polyvinyl alcohol hydrogel nanocomposites. It has also been reported in the literature, that further work is needed in many issues such as long term stability and so on [10]. For these reasons, in this work, Polyvinyl alcohol/CuO Nanocomposite Hydrogels were synthesized using mechanically treated CuO nanomaterials and polyvinyl alcohol. Also, the swelling properties and long term stability of these samples at different pHs were examined.

## **2. Materials and method**

### **2.1. Materials**

Polyvinyl alcohol (PVA, Mw:85,000–124,000) with a hydrolysis degree higher than 99% and copper chloride (CuCl<sub>2</sub>) were purchased from Sigma Aldrich and used without purification.

### **2.2. Preparation of m-CuO nanoparticles**

CuO nanoparticles were prepared from CuCl<sub>2</sub>, using the identical procedure defined in our previous publication. The size and morphology of CuO nanoparticles were determined as 5.18 nm flower-like nanostructure in our previous study [11]. Finally, the CuO sample was subjected to freeze-drying processes for 14 h at -45°C. Afterward the prepared CuO nanoparticles were ball milled in a Mixer Mill MM 400 (Retsch, Germany) at 30 Hz-speed for 60 min (Fig. 1). The sample was labeled m-CuO.

### **2.3. Preparation of Polyvinyl alcohol/CuO nanocomposite hydrogels**

For preparing PVA (5 wt%) solution, 1g of PVA was dissolved in 20 mL ultra-distilled water and stirred for 4h at 90°C. After the obtained solution was cooled to room temperature, certain amounts of m-CuO were dispersed in the obtained solution with a magnetic stirrer for 16h. At the end of this period, the PVA/CuO solutions were sonicated for 1h at 0°C (sweep function, 100 W, 37 kHz), and the PVA/CuO solutions were poured into a petri dish and kept at -24°C for 16h. In order to carry out the freezing-thawing (F/T) process the samples were kept at room temperature for 8h, this cycle was repeated five times. After F/T process, all products were freeze-dried during 14 h at 4°C and stored for characterization (Fig. 1). The polyvinyl alcohol/CuO



nanocomposites (PVA/CuO) were denoted being PVA (0 g of m-CuO), PVA/CuO-0.05 (0.05 g of m-CuO) and PVA/CuO-0.15 (0.15 g of m-CuO).

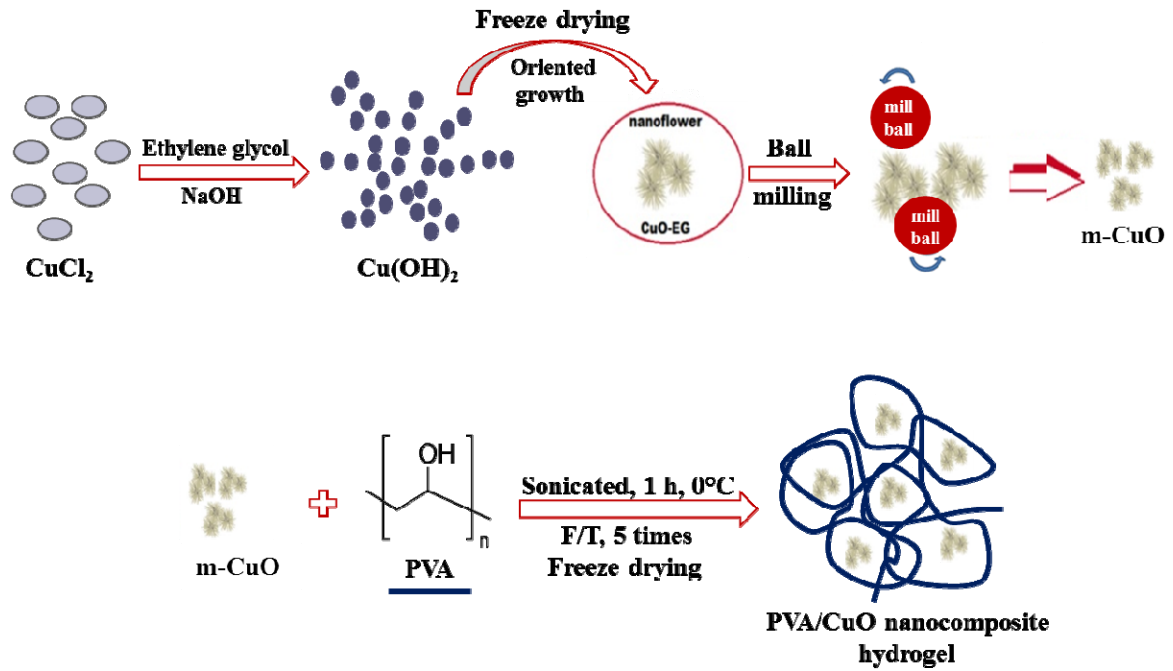


Figure 1. Schematic illustration of the synthesis of m-CuO nanoparticles and PVA/CuO nanocomposite hydrogel.

#### 2.4. Characterization

The internal morphology and energy dispersive X-ray spectrum analysis (EDS) of m-CuO and PVA/CuO nanocomposite hydrogels was observed by field-emission-scanning electron microscopy (FESEM: FEI Quanta 450 FEG, 20-30 kV). The samples were gold-plated with a thin layer using five mA sputter current for the 60's before FESEM measurements. The Fourier transform infrared (FTIR) spectra of samples was recorded on a Thermo Scientific Nicolet IS10 model FTIR spectrometer using an ATR equipment (Attenuated Total Reflectance) over a range from 450 to 4000  $\text{cm}^{-1}$ . These analyzes were conducted at Hitit University Scientific Technical Application and Research Center (HÜBTÜAM).

The rheological characterization, to observe the variation of storage modulus ( $G'$ ), loss modulus ( $G''$ ) and viscosity ( $\eta$ ) of PVA based nanocomposite hydrogels were performed by a Malvern Gemini II rheometer. Rheometry experiments were carried out on the nanocomposite hydrogels after addition of the m-CuO nanoparticles to aqueous PVA solutions before F/T process. The viscosity tests were carried out at a constant shear rate of 100  $\text{s}^{-1}$ , at 20 °C by using cone-plate (CP 4°/40 mm measuring system). The sweep oscillatory shear measurements were performed using a parallel plate (PP 20 measuring system) at 25°C in a frequency ranging from 10 Hz to 0.1 Hz with a shear stress of 2 Pa and a gap of 1 mm to measure storage ( $G'$ ) and loss modulus ( $G''$ ). These analyzes were conducted at Hitit University Scientific Technical Application and Research Center (HÜBTÜAM).

The optical absorbance of PVA based nanocomposite hydrogels was recorded on Genesys 10S-Thermo USA using UV-visible spectrophotometer in the range 200-800 nm. Samples for the optical absorption study were prepared in the same way as in the rheometry experiment.

XRD analysis of the synthesized m-CuO nanoparticles was performed at a scanning speed of 2°/min using a Rigaku DMAX IIIC model X-ray diffractometer (35 kW, 15 mA, CuK $\alpha$ , 1.541871 Å). XRD analysis was used to calculate the mean crystallite grain size of m-CuO nanoparticles which were used as ready in the study and determined as 5.18 nm particle size by SEM analysis in our previous study [11]. The mean m-CuO crystallite size was calculated from the Scherrer equation (Eq. (1)) using full widths ( $\beta$ ) of the peak ( $2\theta$ ) half height of the reflection planes (-111), (-202), (020), (202), (-311), (220) and (004) and the 0.9 K factor:

$$d_{XRD} = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta}$$

(1)

where  $\lambda$ : X-ray Wavelength (1.541871 Å),  $\beta$ : peak half height full widths,  $\theta$ : Bragg angle [12].

### 2.5. Swelling ability and long-term stability

The swelling ability (water uptake) of the dried neat hydrogel and nanocomposite hydrogel were determined by immersing samples (~0.1 g) in 25 mL different buffer solutions (pH = 2.1, 3, 5.5, 7.4 and 10) at room temperature until equilibrium swelling was reached (~7 days). The excess water on the surface of swollen samples was blotted and then re-weighed. The percentage of swelling degree (SD %) was calculated using the equation below:

$$\%SD = \frac{M_t - M_0}{M_0} * 100$$

(2)

where  $M_0$  is the initial weight of samples in the dry state (g) before swelling and  $M_t$  is the swollen weight at various time points of samples (g) [13].

The long-term stability of samples was also studied in the same buffer solution by allowing 70 days of swelling at room temperature [5]. After the swelling ability study, a measurement was performed by weighing the samples for every week throughout the study. At the end of immersion for 70 days, the swollen samples were dried by lyophilization, and the final weight was denoted as  $M_f$  (g). After reaching the equilibrium, any weight loss indicates that the polymer chain and nanoparticles have moved away from the network structure [5, 13, 14]. Hereby, the percentage of nanocomposites hydrogel mass losses can be defined as shown in Eq. (3):

$$\% \text{ mass loss} = \frac{M_0 - M_f}{M_0} * 100$$

(3)

where  $M_0$  is the initial weight of samples in the dry state (g).

### 3. Results and discussion

In our work, PVA/CuO nanocomposite hydrogels were prepared by F/T process to obtain high long term stability. PVA and CuO were used due to their distinctive features such as biodegradability, hydrophilicity and large specific surface area, high reactivity, respectively.

#### 3.1. Characterization

##### 3.1.1. XRD analysis of m-CuO nanoparticles

The x-ray diffraction pattern of m-CuO is presented in Fig. 2. The diffraction peaks at around  $32.5^\circ$ ,  $35.5^\circ$ ,  $38.7^\circ$ ,  $48.7^\circ$ ,  $53.4^\circ$ ,  $58.3^\circ$ ,  $61.5^\circ$ ,  $66.2^\circ$ ,  $72.4^\circ$  and  $75.2^\circ$  are associated with (110), (-111), (-202), (020), (202), (-113), (-311), (220), (311) and (004) reflection planes of CuO according to JCPDS 97-009-2367, respectively. The XRD spectrum of m-CuO shows that the synthesized m-CuO is in a monoclinic phase without observable impurity peaks [11,15]. In addition, the mean particle size of CuO nanoparticles was determined as 3.51 nm according to XRD analysis results (Table 1).

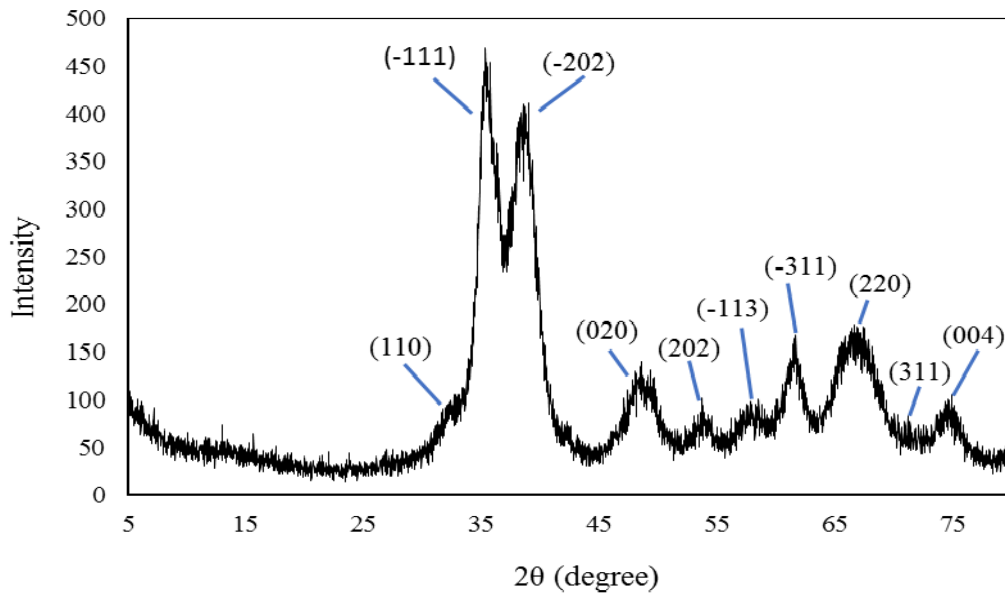


Figure 2. XRD pattern of m-CuO nanoparticles

Table 1. Parameters obtained from XRD analysis results of m-CuO nanoparticles

(hkl) reflection planes	$2\theta$ ( $^\circ$ )	FWHM ( $^\circ$ )	Particle size (nm)
(-111)	35.5	2.52	3.31
(-202)	38.7	1.88	4.48
(020)	48.7	3.86	2.26
(202)	53.4	1.84	4.84

(-311)	61.5	2.14	4.32
(220)	66.2	4.78	1.99
(004)	75.2	2.98	3.37
Average particle size (nm):			3.51

### 3.1.2. Rheological characterization of the hydrogel solutions

Rheometry was used to observe the storage modulus ( $G'$ , elastic property), loss modulus ( $G''$ , viscous) and complex viscosity ( $\eta^*$ , the overall change in the viscoelastic property) of nanocomposite hydrogel [16, 17].

For the rheological characterization, the viscosity measurements of the solutions were primarily performed, and the results are given in Table 2. The neat PVA hydrogel solution has demonstrated lower viscosity as compared to PVA/CuO nanocomposite hydrogel solutions, that was possible because of the interactions between the CuO nanoparticles and polymer chains [18].

Table 2. The solution compositions and viscosity of neat PVA hydrogel solution and PVA/CuO nanocomposite hydrogel solutions

Solutions	% PVA (w/v)	CuO nanoparticles (g)	Viscosity (Pa.s)
Neat PVA	5	0	0.0535
PVA/CuO-0.05	5	0.05	0.0610
PVA/CuO-0.15	5	0.15	0.0666

For representing the elastic and viscous behavior of nanocomposite hydrogels prepared using different CuO contents ( 0.05 and 0.15 g),  $G'$  and  $G''$  plots are shown in Fig. 3. The  $G'$  of all samples were much larger than their  $G''$  at all frequencies, which is a typical property of a “strong” hydrogel. This means that PVA/CuO nanocomposite hydrogels have more strength [19]. As a result,  $G'$  considerably increased with the increase of CuO nanoparticles content. Also,  $G'$  of PVA/CuO-0.15 nanocomposite hydrogel solution indicated just about no dependence on frequency and showed the highest  $G'$ . This indicates that this nanocomposite hydrogel has good stability [20].

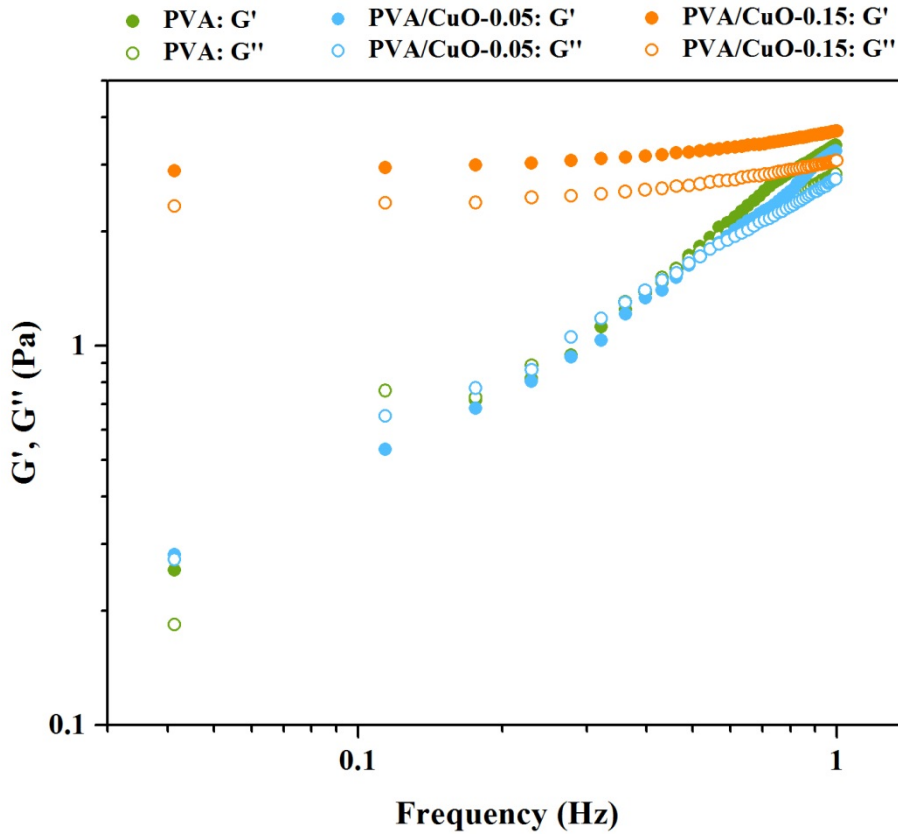


Figure 3. Frequency-dependent of rheometry studies for neat PVA hydrogel solution and PVA/CuO nanocomposite hydrogel solutions

### 3.1.3. UV-Visible Spectroscopy

The UV-visible absorption spectrum of neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogel solutions shows successful interaction of PVA and CuO nanoparticles as can be seen from Fig. 4. A broad absorption peak at 275 nm is for the PVA solution whereas PVA/CuO-0.05 and PVA/CuO-0.15 nanocomposite hydrogel solutions exhibit broad absorption peaks at 282 nm and 300 nm because of the intrinsic transition of CuO, respectively [21, 22]. The spectrum of nanocomposite hydrogel solution also demonstrates that the absorption peak shifted toward a longer wavelength (300 nm), and the intensity of this peak increased with the increasing loading content of CuO nanoparticles in a polymer solution that may be based on the homogeneous dispersion of the nanoparticles in PVA matrix [23]. According to the UV-visible absorption results, CuO nanoparticles gets embedded in the PVA matrix and interacts mightily with hydroxyl groups of PVA by way of hydrogen bonding [24].

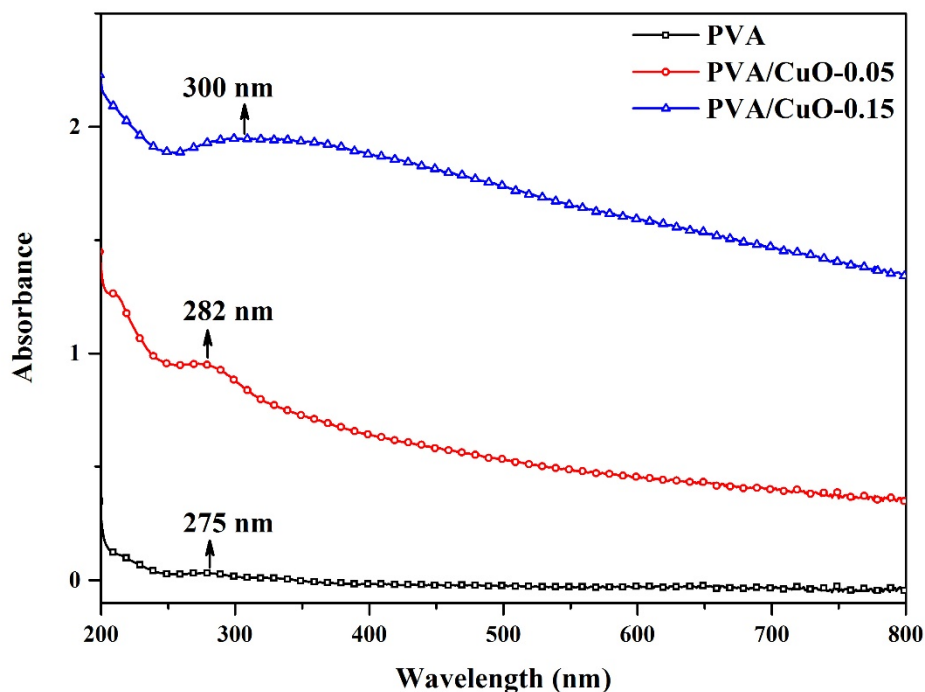


Figure 4. UV-visible Spectra of neat PVA hydrogel solution and PVA/CuO nanocomposite hydrogel solutions

### 3.1.4. FTIR

The FTIR spectra of m-CuO, neat PVA and nanocomposite hydrogels with different content of CuO is shown in Fig. 5. In all of the FTIR spectrums of nanocomposite hydrogels, the O-H stretching band in the polymer which is the characteristic peak of alcohols is observed near  $3274\text{ cm}^{-1}$ . The characteristic bands at  $2940\text{ cm}^{-1}$  and  $2904\text{ cm}^{-1}$  is due to the C-H stretching vibration of -CH and -CH<sub>2</sub> and C-O stretching of PVA, respectively. The peaks at  $1422\text{ cm}^{-1}$ ,  $1329\text{ cm}^{-1}$ ,  $1093\text{ cm}^{-1}$ ,  $916\text{ cm}^{-1}$ , and  $850\text{ cm}^{-1}$  are attributed to a CH<sub>2</sub> scissoring mode, the CH<sub>2</sub> deformation, the C-O stretching vibrations, C-C stretching vibrations and the CH<sub>2</sub> rocking mode, respectively. The peak at  $1658\text{ cm}^{-1}$  corresponds to the O-H bending of the -OH groups in PVA, while the peaks at  $1235\text{ cm}^{-1}$  and  $1143\text{ cm}^{-1}$  are attributed to the C-O-C vibration in the vinyl acetate group and the C-O stretching vibration in crystalline phase of PVA, respectively [25, 26]. In the FTIR spectra of m-CuO, the peaks observed near  $538$  and  $587\text{ cm}^{-1}$  are observed for CuO nanocrystals which are assigned to the  $n(\text{Cu-O})$  stretching vibration of CuO [4]. The presence of the peaks corresponding to CuO nanoparticles and PVA in the spectrums of nanocomposite hydrogels can confirm the existence of an interaction between CuO nanoparticles and polymers. Also, their stabilization is the realization of interplay such as chelation between some hydroxyl ions of hydrogel networks and CuO nanoparticles [27].

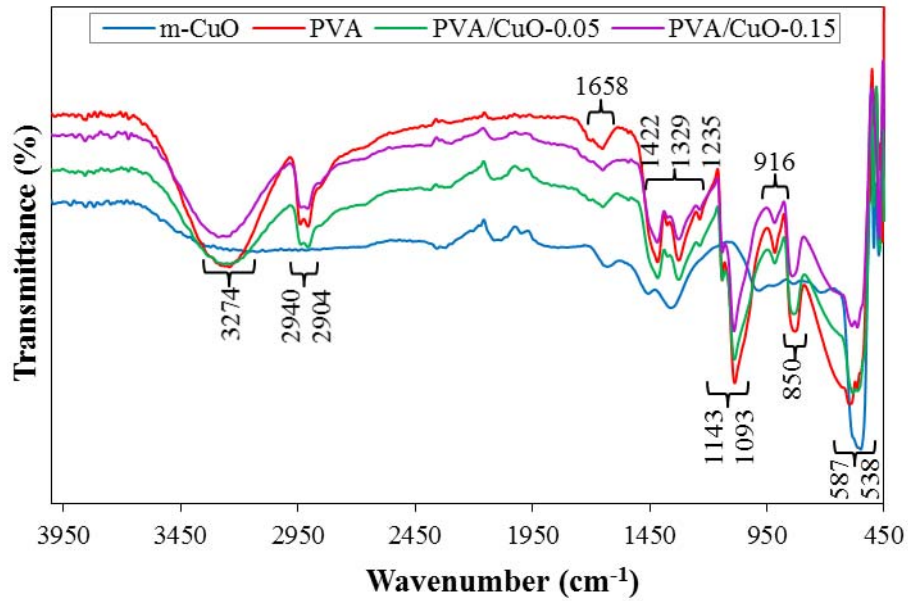


Figure 5. FTIR spectra of m-CuO, neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels

### 3.1.5. Morphology studies

The surface morphologies of the nanocomposite hydrogels were prepared using different CuO contents ( 0.05 and 0.15 g) are shown in Fig. 6. Based on the inset FESEM image of CuO placed inside Fig. 6a, non-uniform CuO nanoparticles shows flower-like nanostructure. As can be seen from the FESEM images, the surface microstructure of the hydrogels was influenced by the addition of semiconductor material. Fig. 6c and 6d show that the hydrogel nets are not as pronounced when the CuO is added to the structure, while a porous honeycomb-like structure for neat PVA is shown in Fig. 6b. This may be due to the ability of CuO nanoparticles to function as cross-linkers [1, 9].

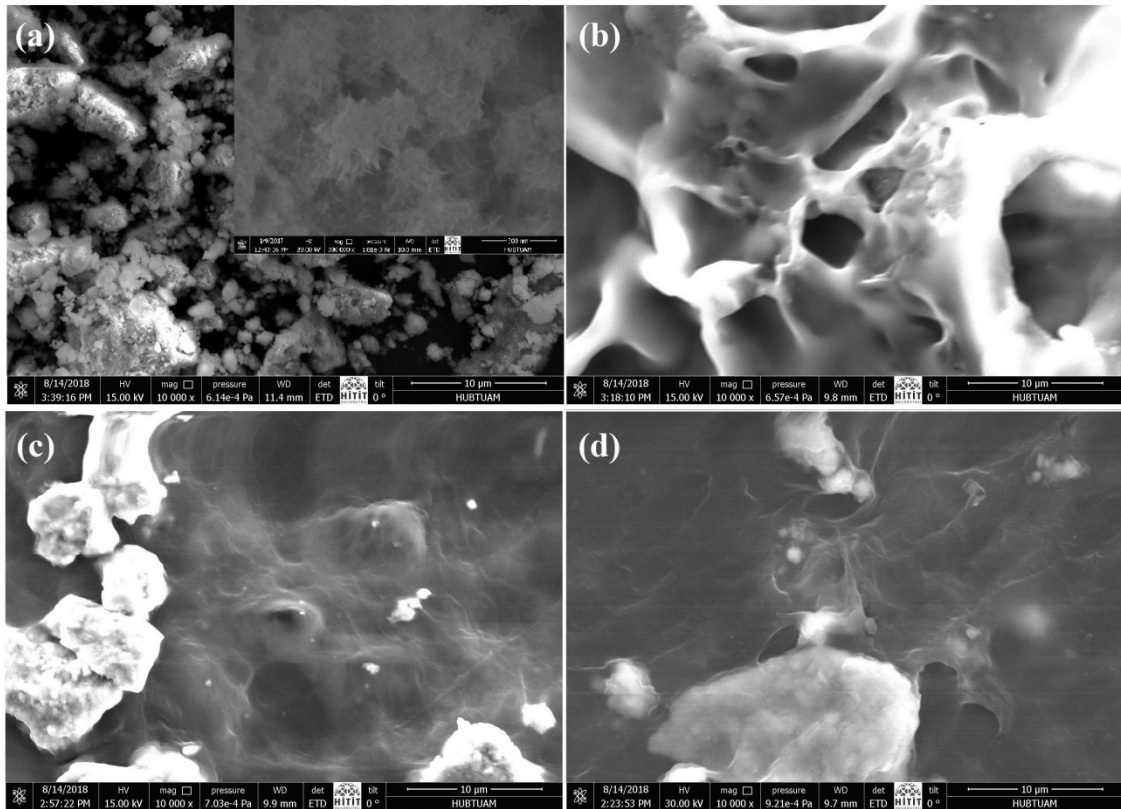


Figure 6. FESEM images of (a) m-CuO (a magnification of 10000× and inset: a magnification of 300000×) (b) neat PVA hydrogels (a magnification of 10000×) (c) PVA/CuO-0.05 nanocomposite hydrogel (a magnification of 10000×) and (d) PVA/CuO-0.15 nanocomposite hydrogels (a magnification of 10000×)

Fig. 7 shows the EDS analysis of all prepared samples. The EDS spectrums demonstrate that elemental Cu is found in the nanocomposite hydrogels, which represents that the CuO nanoparticles were accomplishedly loaded into the hydrogel nets.



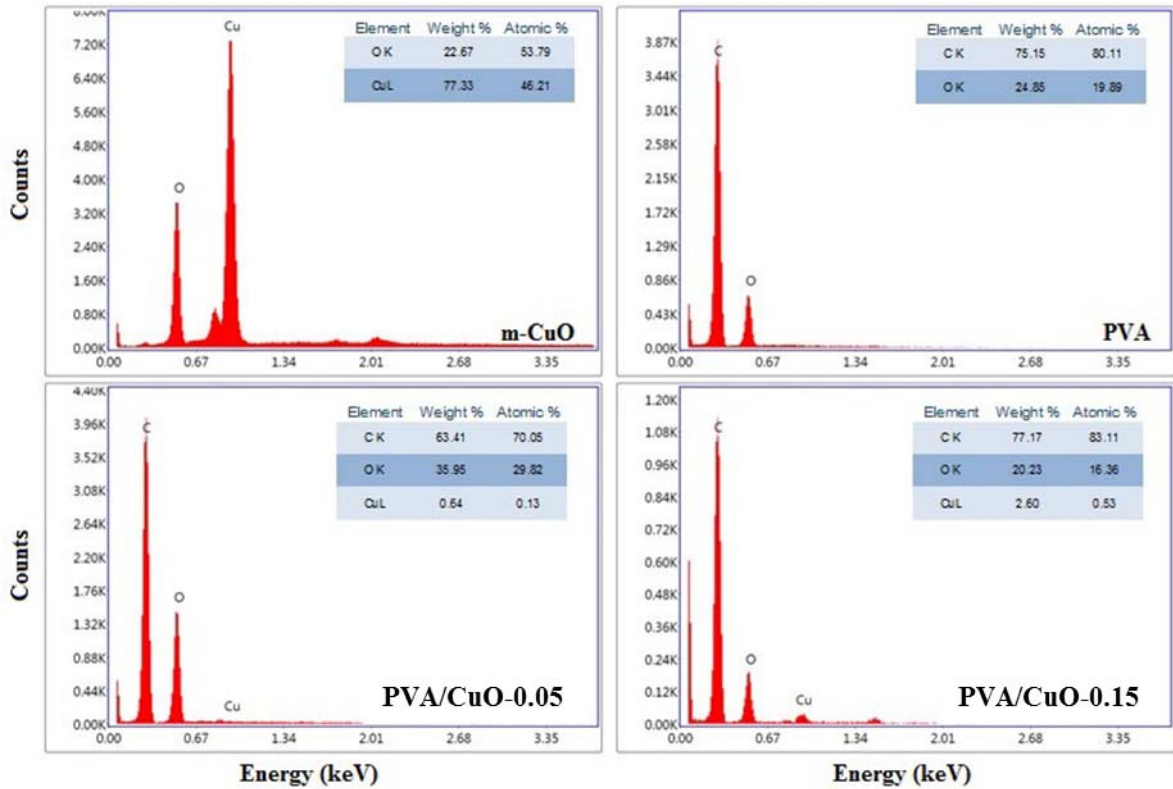


Figure 7. EDS spectrums of m-CuO, neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels with elemental composition

### 3.2. The swelling ability of the hydrogels

The Swelling ability is prominent to designate the end-use applications. Because it is associated with increased swelling properties of improved drug delivery [5] and the pH of each region in the body is different. For instance, the pH values of stomach, blood, and dermis are 2.1, 5.5 and 7.4 pHs, respectively. For this purpose, the swelling behavior of the nanocomposite hydrogels prepared with two different mass ratios of m-CuO nanoparticles were examined at different pH values of 2.1, 3, 5.5, 7.4 and 10 so as to examine the pH sensitivity in Fig. 8, 9, 10, 11 and 12, respectively. The swelling degree of all hydrogels is rapidly increased within four hours and reached equilibrium in about seven days except for the PVA/CuO-0.15 nanocomposite hydrogel at pH 5.5. As shown in Fig. 10, the PVA/CuO-0.15 nanocomposite hydrogel did not reach equilibrium at pH 5.5 within seven days. Based on this, we can say that the PVA/CuO-0.15 nanocomposite hydrogel will give a higher swelling degree at pH 5.5 than the other samples, given that more time is given for the swelling grade. As illustrated in Fig. 11 and 12, the swelling degrees of nanocomposite hydrogels decreased with increasing CuO addition. This decline may be attributed to chelating of some of the hydroxyl groups of the hydrogel networks with nanoparticles, which lead to the knot tying function of CuO or more cross-linking points [1, 9].

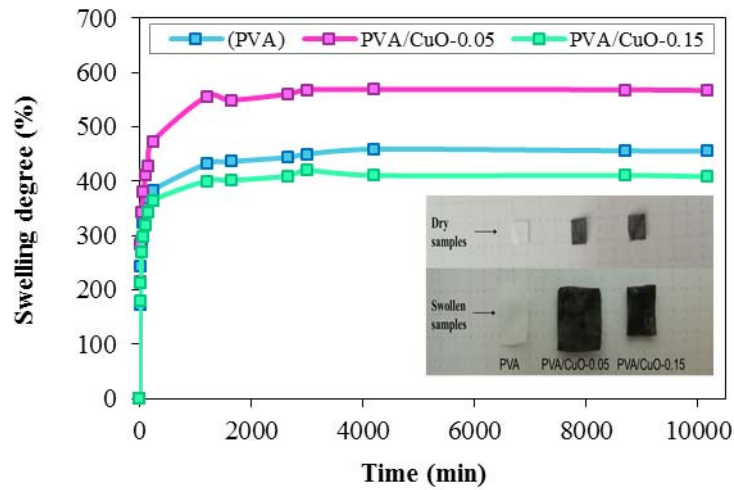


Figure 8. Swelling degree of neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels in pH 2.1 (Inset: photographs of dry and swollen samples in pH 2.1)

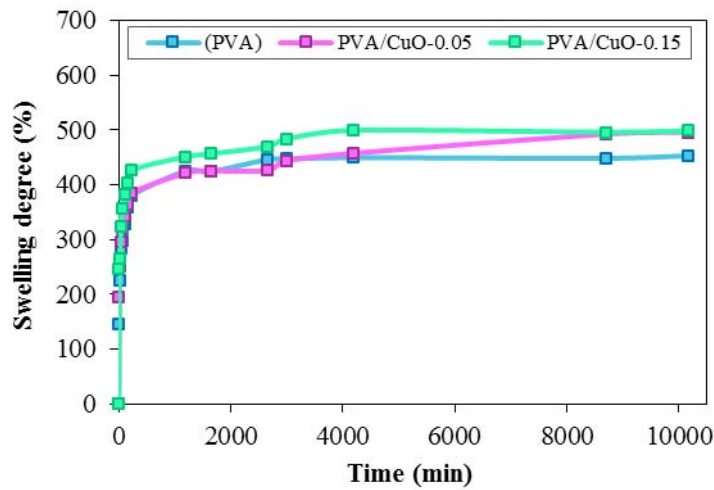


Figure 9. Swelling degree of neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels in pH 3

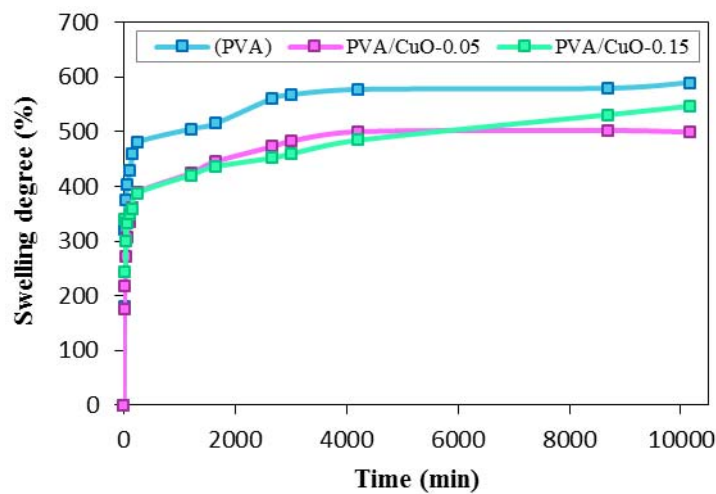


Figure 10. Swelling degree of neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels in pH 5.5

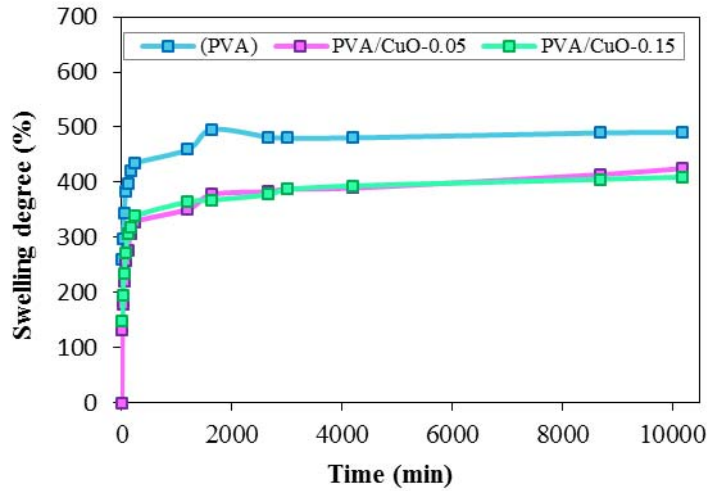


Figure 11. Swelling degree of neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels in pH 7.4

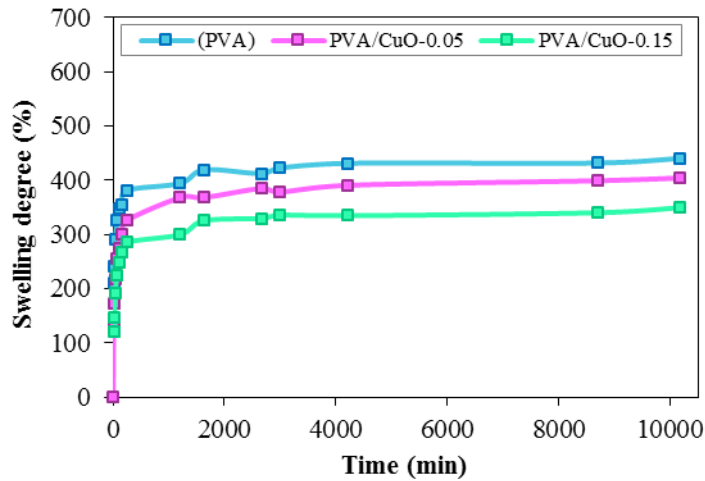


Figure 12. Swelling degree of neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels in pH 10

Fig. 13 clearly shows that the swelling degree of nanocomposite hydrogels increased with the presence of CuO nanomaterial content in the hydrogel at low pHs up to 3. As seen in the photos of swollen and dry samples shown in Fig. 8, PVA/CuO-0.05 revealed a higher swelling degree, compared to the neat PVA and PVA/CuO-0.15 at pH value of 2.1 that is an appropriate value for stomach pH. This indicates that the beneficial effect of the addition of CuO on swellability is only at a low pH, and there is no general tendency. We can explain that the swelling mechanism at low pH includes the protonation of PVA hydroxyl groups leading to chain repulsion which result in diffusion of protons and counter ions together with water in the hydrogel [9, 28]. However, the addition of CuO nanomaterial reduced the swelling degree at higher pH values ( $\text{pH} > 3$ ) as seen in Fig. 10, 11 and 12. With higher CuO content, it can be assumed that the interaction between nanoparticles and polymeric chains leads to more cross-linking points and low free space to enlarge inside the nanocomposites, so swelling capacity is reduced [1]. The highest swelling degree was obtained with PVA/CuO-0.05 nanocomposite hydrogel containing 0.05 g CuO and neat PVA after seven days. The swelling degree of PVA/CuO-0.05 nanocomposite hydrogel and neat

PVA reached a maximum value of around 570% at pH 2.1 and 590% at pH 5.5, respectively.

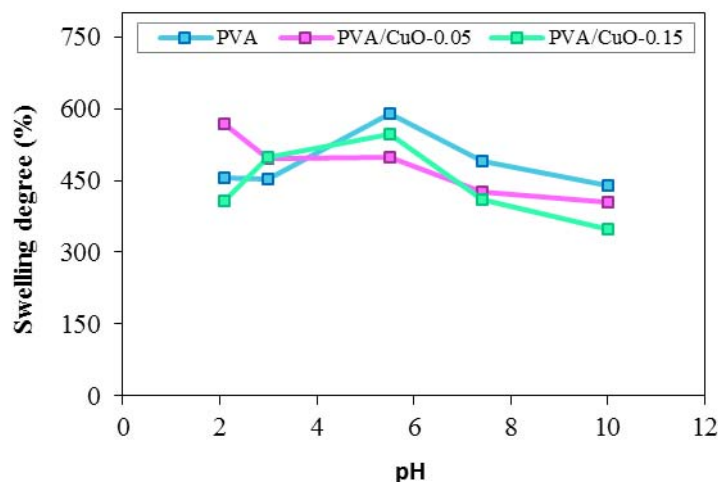


Figure 13. The effect of pH on the swelling degree of neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels

### 3.3. Long-term stability of the hydrogels

Table 3 shows the percentage of the polymer mass losses for neat PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels. Long-term stability of neat PVA was also studied to compare with the stability of the nanocomposite hydrogels. In this case, the hydrogel samples were immersed in buffer solutions at different pHs and room temperature for 70 days. It was clearly seen that the less CuO nanoparticles addition (0.05 g) determined the most stable nanocomposites hydrogels for all pHs. As a result, the polymer mass loss is reduced to less than about 5% by decreasing the CuO nanoparticle content in hydrogel from 0.15 to 0.05.

Table 3. Long-term stability of PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogels at different pHs

pHs	Initial dry weight (g)	Highest swollen weight (g)	Weight afterwards 70 days (g)	Final dry weight after 70 days (g)	The mass Loss (%)
<b>neat PVA</b>					
2.1	0.109	0.604	0.544	0.099	9.12
3	0.123	0.681	0.639	0.116	6.05
5.5	0.116	0.823	0.741	0.105	9.48
7.4	0.115	0.678	0.613	0.104	9.21
10	0.118	0.647	0.596	0.110	6.98
<b>PVA/CuO-0.05</b>					
2.1	0.103	0.688	0.660	0.099	3.78
3	0.118	0.705	0.675	0.113	4.01

5.5	0.111	0.667	0.633	0.106	4.92
7.4	0.109	0.584	0.549	0.103	5.25
10	0.111	0.589	0.568	0.108	2.87
PVA/CuO-0.15					
2.1	0.109	0.561	0.520	0.101	7.13
3	0.101	0.616	0.602	0.096	5.25
5.5	0.109	0.718	0.650	0.100	8.69
7.4	0.111	0.594	0.557	0.104	6.02
10	0.106	0.541	0.521	0.102	3.57

#### 4. Conclusions

The PVA/CuO nanocomposite hydrogels were successfully synthesized by the freeze/thawing procedure to obtain high long term stability using different content of CuO nanoparticles. The results of XRD analyses of m-CuO nanoparticles showed that the mean particle size was 3.51 nm. According to the results of the rheological analysis of PVA and PVA/CuO nanocomposite hydrogel solutions, the viscosity and strength of the PVA polymer solution were increased with the addition of CuO nanoparticles. The results of UV-vis spectroscopy, FTIR, FESEM, and EDS analyses showed that there was the existence of an interaction between CuO nanoparticles and PVA and the CuO nanoparticles were successfully loaded into the hydrogel networks. The highest swelling degree was achieved with PVA/CuO-0.05 nanocomposite hydrogel containing 0.05 g CuO and PVA/CuO-0.05 nanocomposite hydrogel reached a maximum value of around 570% at pH 2.1. The hydrogels with higher stability were obtained with the addition of 0.05 g CuO to the hydrogel network. Therefore, we can say that the addition of CuO nanoparticles to the hydrogel network improved the swellability and long term stability of neat PVA hydrogel for biomedical application.

#### References

- [1] Mahdavinia, G.R., Soleymani, M., Sabzi, M., Azimi, H. and Atlasi, Z., Novel magnetic polyvinyl alcohol/laponite RD nanocomposite hydrogels for efficient removal of methylene blue, **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 5, 2617-2630, (2017).
- [2] Yadollahi, M., Gholamali, I., Namazi, H. and Aghazadeh, M., Synthesis and characterization of antibacterial carboxymethylcellulose/CuO bio-nanocomposite hydrogels, **International Journal of Biological Macromolecules**, 73, 109-114, (2015).
- [3] Dai, H., Huang, Y. and Huang, H., Eco-friendly polyvinyl alcohol/carboxymethyl cellulose hydrogels reinforced with graphene oxide and bentonite for enhanced adsorption of methylene blue, **Carbohydrate Polymers**, 185, 1-11, (2018).
- [4] Xu, J., Yuvaraja, G. and Zhang, W., Application of chitosan/poly(vinyl alcohol)/CuO (CS/PVA/CuO) beads as an adsorbent material for the removal of Pb(II) from aqueous environment, **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, 14, 184-195, (2017).
- [5] Peppas, N.A. and Tennenhouse, D., Semicrystalline poly(vinyl alcohol) films and their blends with poly(acrylic acid) and poly(ethylene glycol) for drug

- delivery applications, **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, 14, 4, 291-297, (2004).
- [6] Khan, J., Siddiq, M., Akram, B. and Ashraf, M.A., In-situ synthesis of CuO nanoparticles in P(NIPAM-co-AAA) microgel, structural characterization, catalytic and biological applications, **Arabian Journal of Chemistry**, an article in press, <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.12.018>, (2018).
- [7] Kiran Kumar, S.R., Mamatha, G.P., Muralidhara, H.B., Anantha, M.S., Yallappa, S., Hungund, B.S. and Yogesh Kumar, K., Highly efficient multipurpose graphene oxide embedded with copper oxide nanohybrid for electrochemical sensors and biomedical applications, **Journal of Science: Advanced Materials and Devices**, 2, 493-500, (2017).
- [8] Devi, A.B., Moirangthem, D.S., Talukdar, N.C., Devi, M.D. and Singh, N.R. and Luwang, M.N., Novel synthesis and characterization of CuO nanomaterials: Biological applications, **Chinese Chemical Letters**, 25, 1615-1619, (2014).
- [9] Farhoudian, S., Yadollahi, M., and Namazi, H., Facile synthesis of antibacterial chitosan/CuO bio-nanocomposite hydrogel beads, **International Journal of Biological Macromolecules**, 82, 837-843, (2016).
- [10] An, K. and Hyeon, T., Synthesis and biomedical applications of hollow nanostructures, **Nano Today**, 4, 359-373, (2009).
- [11] Candemir, D. and Boran, F., Size Controllable Synthesis and Characterization of CuO Nanostructure, **Materials Science Forum**, 915, 98-103, (2018).
- [12] Zamand, N., Pour, A.N., Housaindokht, M.R. and Izadyar, M., Size-controlled synthesis of SnO<sub>2</sub> nanoparticles using reverse microemulsion method, **Solid State Sciences**, 33, 6-11, (2014).
- [13] Morariu, S., Bercea, M., Teodorescu, M., and Avadanei, M., Tailoring the properties of poly(vinyl alcohol)/poly(vinylpyrrolidone) hydrogels for biomedical applications, **European Polymer Journal**, 84, 313-325, (2016).
- [14] Martens, P.J., Bryant S.J. and Anseth K.S., Tailoring the degradation of hydrogels formed from multi-vinyl poly(ethylene glycol) and poly(vinyl alcohol) macromers for cartilage tissue engineering, **Biomacromolecules**, 4, 283-292, (2003).
- [15] Zhang, X., Hu, Y., Zhu, D., Xie A., and Shen Y., A novel porous CuO nanorod/rGO composite as a high stability anode material for lithium-ion batteries, **Ceramics International**, 42, 1833-1839, (2016).
- [16] Martin, J.E., Patil, A.J., Butler, M.F. and Mann, S., Guest-Molecule-Directed Assembly of Mesoporous Nanocomposite Polymer/Organoclay Hydrogels, **Advanced Functional Materials**, 21, 674-681, (2011).
- [17] Sivaraman A., Ganti, S.S., Nguyen, H.X., Birk, G., Wieber, A., Lubda, D. and Banga, A.K., Development, and evaluation of polyvinyl alcohol-based topical gel, **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, 39, 210-216, (2017).
- [18] Kayaci, F. and Uyar, T., Encapsulation of vanillin/cyclodextrin inclusion complex in electrospun polyvinyl alcohol (PVA) nanowebs: Prolonged shelf-life and high-temperature stability of vanillin, **Food Chemistry**, 133, 641-649, (2012).
- [19] Shi, Y., Xiong, D., Liu, Y., Wang, N. and Zhao, X., Swelling, mechanical and friction properties of PVA/PVP hydrogels after swelling in osmotic pressure solution, **Materials Science and Engineering C**, 65, 172-180, (2016).
- [20] Park, H.-H., Ko, S.-C., Oh, G.-W., Jang, Y.-M., Kim, Y.-M., Park, W. S., Choi, I.-W. and Jung, W.-K., Characterization and biological activity of PVA hydrogel

- containing chitooligosaccharides conjugated with gallic acid, **Carbohydrate Polymers**, 198, 197-205, (2018).
- [21] Raut, A.R. and Murhekar, G.H., Optical and Morphological study of modified polyvinyl alcohol conjugates, **International Journal of Chemical Studies**, 2, 1, 19-24, (2014).
- [22] Felix, S., Praveen Chakkravarthy, R.B. and Grace, A.N., Microwave-assisted synthesis of copper oxide and its application in electrochemical sensing, **Proceedings, International Conference on Materials Science and Technology**, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 73, 012115, (2015).
- [23] Dutta, B., Kar, E., Bose, N. and Mukherjee, S., Significant enhancement of the electroactive  $\beta$ -phase of PVDF by incorporating hydrothermally synthesized copper oxide nanoparticles, **The Royal Society of Chemistry**, 5, 105422-105434, (2015).
- [24] Mohanapriya, S., Mumjitha, M., PurnaSai, K. and Raj, V., Fabrication, and characterization of poly(vinyl alcohol)-TiO<sub>2</sub> nanocomposite films for orthopedic applications, **Journal of the mechanical behavior of biomedical materials**, 63, 141-156, (2016).
- [25] Hussain, R., Tabassum, S., Gilani, M.A., Ahmed, E., Sharif, A., Manzoor, F., Shah, A.T., Asif, A., Sharif, F., Iqbal, F. and Siddiqi, S.A., In situ synthesis of mesoporous polyvinyl alcohol/hydroxyapatite composites for better biomedical coating adhesion, **Applied Surface Science**, 364, 117–123, (2016).
- [26] Gong, X., Tang, C.Y., Pan, L., Hao, Z. and Tsui, C.P., Characterization of poly(vinyl alcohol) (PVA)/ZnO nanocomposites prepared by a one-pot method, **Composites: Part B**, 60, 144–149, (2014).
- [27] Berdous, D. and Ferfera-Harrar, H., Green Synthesis of Nanosilver-Loaded Hydrogel Nanocomposites for Antibacterial Application, **International Journal of Pharmacological and Pharmaceutical Sciences**, 10, 8, 543-550, (2016).
- [28] Akkaya, R. and Ulusoy, U., Preparation and Characterization of Poly(acrylamide/maleic acid)-based hydrogels Composites, **Hacettepe Journal of Biology and Chemistry**, 39, 4, 359-370, (2011).

# Schottky diyot tabanlı UV detektörlerde seri direnç etkileri

Şadan ÖZDEN\*

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik. Bölümü, Kötekli, Muğla

Geliş Tarihi (Received Date): 12.08.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 22.03.2019

## Özet

*Bu çalışmada GaN tabanlı UV algılayıcı GUYA S12SD Schottky diyotun sıcaklık bağımlı akım – voltaj karakteristikleri seri direnç etkileri yönünden incelenmiştir. Bu amaçla FPGA tabanlı, basit ve düşük maliyetli bir ölçüm sistemi hazırlanarak, başarıyla kullanılmıştır. Sonuçlar, aygıtın akım iletim mekanizmasının termiyonik yayılımla açıklanabileceğini göstermektedir. Seri direnç hesapları için iki farklı yöntem kullanılmış ve birbiri ile büyük uyuma sahip sonuçlar elde edilmiştir. İdealite faktörü ve seri direncin sıcaklık bağımlılığından, ara yüzeydeki durumların ve buradaki yük taşıyıcılarının aygıt karakteristikleri üzerinde etkin olduğu belirlenmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** UV, Schottky diyot, GaN, seri direnç, FPGA.

## Serial resistance effects on Schottky diode based UV detectors

### Abstract

*In this study, the temperature dependent current - voltage characteristics of GaN based UV sensor GUYA S12SD Schottky diode were investigated in terms of series resistance effects. For this purpose, a FPGA based simple and low cost measurement system has been prepared and employed successfully. The results show that the current transport mechanism of the device can be explained by means of thermionic emission. Two different methods were used for the series resistance calculations and their results were consistent with each other. According to the temperature dependent ideality factor and series resistance, it has been determined that interface states and charge carriers on the states effect on device characteristics.*

**Keywords:** UV, Schottky diode, GaN, serial resistance, FPGA.

\* Şadan ÖZDEN, sozden@mu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0716-9194>

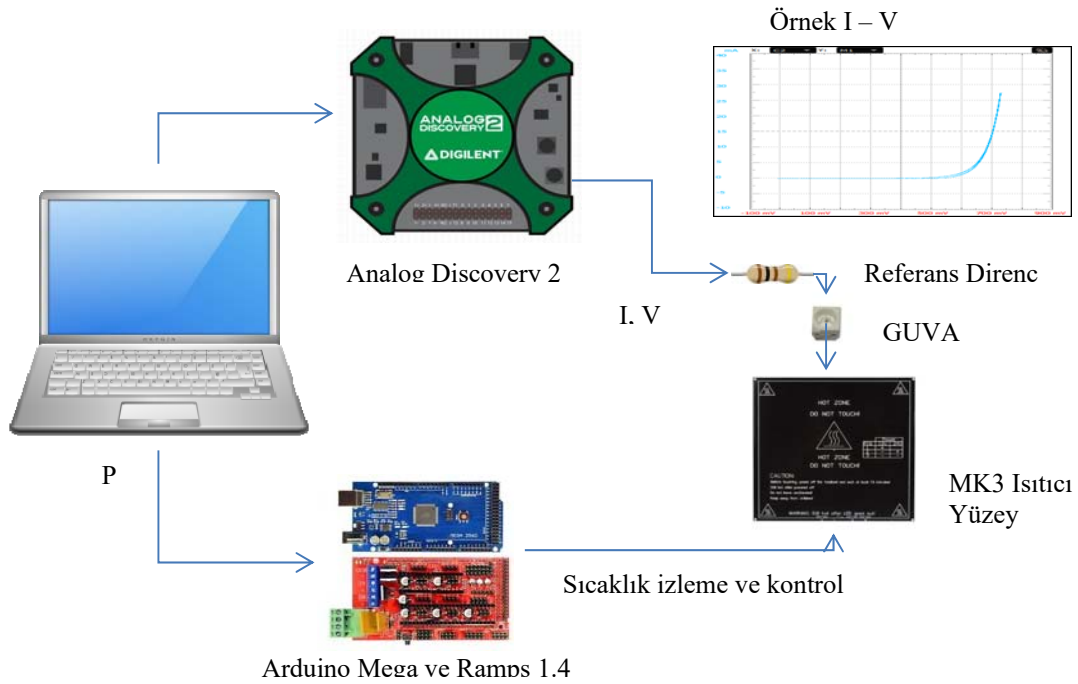


## 1. Giriş

Gelişen sanayileşmenin sonucunda, değişen atmosferik koşullara bağlı olarak yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarında da bir artış söz konusudur. Bu artış küresel ısınmanın yanı sıra mor ötesi (UV) ışığın etkilerinde de değişiklikleri beraberinde getirmektedir. İnsan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden kaçınmak amacıyla bu ışınların UV endeksinin doğru belirlenmesi de bu nedenle daha çok önem kazanmaktadır. Ayrıca UV ışınlar; kimyadan, sterilizasyona, tıptan, test – ölçüm sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Dolayısıyla UV ışınların belirlenmesi ve ölçülmesi günümüzde popüler araştırma alanlarından biridir [1]. Bu amaçla geliştirilen GaN ve AlGaN tabanlı aygıtlar sırasıyla spektrumun görünür ve güneş ışığı bölgelerine gösterdikleri körlük nedeniyle maliyeti arttırıcı UV filtreleme ihtiyacı duymazlar. Diğer yandan basit yapıları ve düşük maliyetli üretime olanak sağlamaları nedeniyle de UV kaynak veya algılayıcı üretimi için öne çıkmaktadırlar. UV algılayıcı sistemler arasında GaN tabanlı Schottky eklem aygıtlar son yıllarda yaygın bir şekilde üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır [2]. Her p – n veya Schottky tabanlı eklem aygıt içerisinde, akım iletimini etkileyen parametrelerin doğru belirlenmesi uygulama açısından önemlidir. Bu çalışmada UV algılayıcı GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabanlı Schottky eklem aygıtı olan GUYA S12SD'nin akım – voltaj karakteristiklerine yüksek sıcaklık bölgesindeki seri direnç etkisi incelenmiştir. Ölçümler için de alternatif ve düşük maliyetli bir sistem önerilmiştir.

## 2. Deneysel

Bu çalışmada kullanılan GUYA S12SD UV algılayıcısı yüzey montaj (SMD) yapıda GaN tabanlı bir Schottky diyottur ve ticari olarak temin edilmiştir. Aygıt, GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> eklemi içermektedir. Üst kontak altın (Au) ve alt kontak gümüş pasta (Ag) ile sağlanmıştır [3]. Yine üzerinde pencere olarak Si koruyucu tabaka bulunmaktadır.

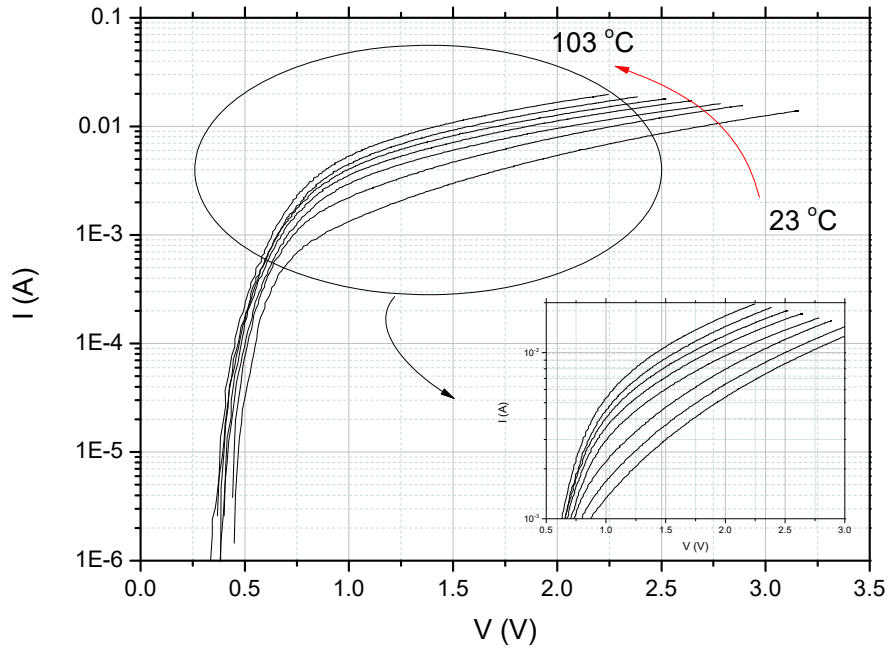


Şekil 1. Çalışmada kullanılan ölçüm sistemi ve örnek I – V grafiği.

Aygıtın elektriksel karakterizasyonu için geleneksel cihazlardan farklı olarak basit ve düşük maliyetli iki sistem kullanılmıştır. Bunlardan ilki akım – voltaj karakteristiklerini elde etmek için kullanılan eğri izleme (curve tracer) sistemidir. Bu amaçla iki kanallı osiloskop ve sinyal jeneratörünü tek bir FPGA tabanlı devre içinde sunan Analog Discovery 2 cihazı kullanılmıştır. Ölçümü yapılan aygıt üzerine referans bir direnç üzerinden uygulanan 400 Hz 5 V<sub>p-p</sub> üçgen dalga formundaki sinyal için cihazın programı aracılığı ile akım ve voltaj ölçümleri gerçekleştirilerek direkt I–V karakteristiği elde edilmiştir [4]. Sıcaklık kontrolü ve ölçümü için ise 3D yazıcılarda kullanılan ısıtıcı yüzeyden yararlanılmıştır. 10 cm x 10 cm alana sahip ısıtıcı rezistans kaplı bu yüzeye yerleştirilen örneğin sıcaklığı, 100kΩ NTC (sıcaklıkla direnci azalan termistör) algılayıcılarla ölçülmüş ve bilgisayara bağlı Arduino Mega + Ramps 1.4 kartlarıyla da kontrol edilmiştir. Bu sistem aracılığı ile 0,1 C hassasiyetle sıcaklık ölçüm ve kontrolü yapılabilmektedir. Tüm ölçüm sisteminin blok şeması ve programdan alınan örnek I – V grafiği Şekil 1’de verilmiştir.

### 3. Araştırma bulguları

GUVA S12SD UV Schottky diyot için karanlıkta, 23 – 103 °C sıcaklık aralığında ölçülen akım - voltaj karakteristikleri Şekil 2’de verilmiştir. Düşük voltajlarda benzer karakteristiğe sahip olan akım eğrilerinin 0,7V üzerindeki ileri besleme voltajlarında, seri direnç etkisine bağlı olarak sınırlandığı ve sıcaklığa kuvvetle bağlı hale geldiği görülmektedir.



Şekil 2. GUVA S12SD Schottky diyot için karanlıkta ölçülmüş sıcaklık bağımlı I – V karakteristikleri.

Metal – yarıiletken (MS) ve metal – oksit – yarıiletken (MOS) aygıtlar için ileri besleme altındaki akım iletimini açıklayan termiyonik yayılım mekanizması, seri direnç etkisi de göz önüne alınarak,

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $I_0$  ters besleme doyuma akımı,  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  mutlak sıcaklık,  $R_s$  seri direnç etkileri ve  $n$  diyot için ideal davranıştan ne kadar uzak olduğunu gösteren idealite faktörüdür [5-8]. Bu ifade göz önüne alınarak yüksek voltajlardaki seri direnç etkilerinin belirlenmesi için Norde'den başlayarak farklı yöntemler geliştirilmiş ve kullanılmıştır [9-10]. Bu yöntemlerin en yaygın kullanılanlarından biri Cheung yöntemidir [11] ve

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + n \left( \frac{kT}{q} \right) \quad (2)$$

ifadesi kullanılarak seri direnç ifadesi elde edilebilir. Buradan görüleceği üzere akımın doğal logaritmasının voltaja karşı türevi alınır ve akıma karşı çizilirse elde edilen değişim doğrusal olacak ve eğimi direkt  $R_s$  değerini verecektir. Yine bu doğrunun  $dV/(d(\ln I))$  eksenini kestiği noktadan yüksek voltajlardaki  $n$  değerleri hesaplanabilir. Farklı sıcaklıklarda (2) ifadesini kullanılarak hesaplanan seri direnç değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Yine Şekil 3'de sıcaklığa bağlı olarak  $n$  faktörünün nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Tablo 1. GUYA S12S Schottky diyot için farklı sıcaklıklarda Cheung yöntemine göre hesaplanan seri direnç  $R_s$  değerleri.

Sıcaklık (°C)	23	33	43	63	73	83	93	103
$R_s$ (Ω)	72,5	74,18	93,22	111,05	104,49	97,00	94,26	86,60

Bu değişim incelendiğinde artan sıcaklıkla birlikte  $n$  faktörünün azaldığı görülmektedir. Ayrıca idealite faktörü  $n$ 'in 1'den çok büyük değerler aldığı da izlenmektedir. Bu durum termiyonik yayılım mekanizmasından sapmalara işaret etmektedir. Bu sapmanın nedeninin belirlenmesi için sıcaklık bağımlılığına daha yakından bakıldığında  $n$  idealite faktörünün

$$n(T) = n_0 + \frac{T_0}{T} \quad (3)$$

şeklinde verilebileceği belirlenmiştir.  $n_0$  ve  $T_0$  sabitler olmak üzere bu ifade Şekil 3'de görülebileceği gibi deneysel verilere tam fit etmektedir. Bu durum da aygıt üzerinden geçen akım ifadesini termiyonik alan yayılım mekanizmasıyla ifade edilebileceğini ve etkin yüzey durumları ile metal yarıiletken arasındaki yalıtkan tabakanın konumsal dağılımının aygıt üzerinde etkin olduğunu göstermektedir [12-13].

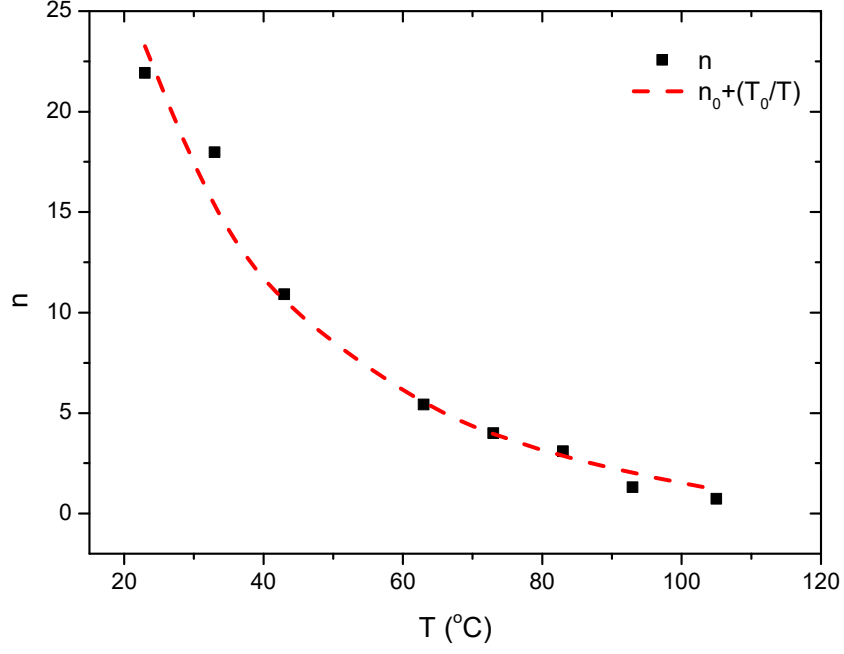
$n$  idealite faktörü kullanılarak seri direnç etkisinin hesaplanması için Cheung tarafından önerilen diğer bir yöntem  $H$  fonksiyonun kullanılmasıdır ve

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4)$$

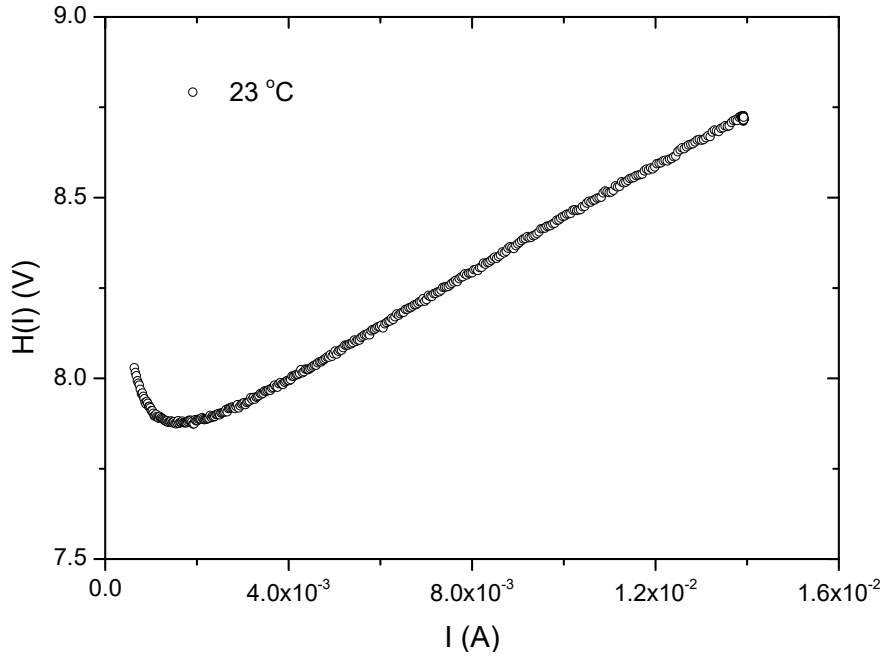
ile

$$H(I) = IR_s + n\phi_{b0} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $\phi_{b0}$ , besleme voltajı sıfır olduğunda eklem engel yüksekliğidir [11]. Buradan görüleceği üzere akıma ( $I$ ) karşı çizilen  $H(I)$  grafiğinin eğimi direkt seri direnç değerini,  $R_s$  verecektir. Örnek bir  $H(I)$ -  $I$  grafiği 23 °C için Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. Diyot idealite faktörü,  $n$ 'in sıcaklıkla değişimi

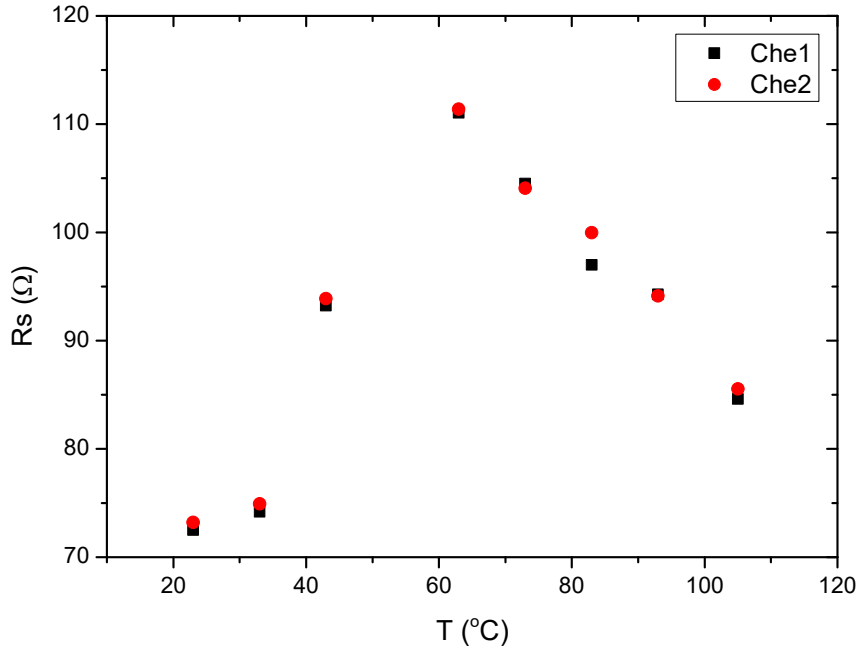


Şekil 4. 23 °C sıcaklıkta  $H(I)$ -  $I$  değişimi grafiği.

23 – 103 °C arasındaki tüm sıcaklıklarda çizilen  $H(I)-I$  grafiklerindeki doğrusal bölgeler için seri direnç,  $R_s$  değerleri hesaplanmış ve Cheung'ın ilk modelinden hesaplanan değerlerle birlikte Şekil 5'deki grafikte sıcaklığa bağlı olarak gösterilmiştir.

Grafik incelendiğinde seri direnç,  $R_s$  değerlerinin 70 – 110  $\Omega$  arasında değerler aldığı ve iki farklı Cheung modelinin neredeyse tüm sıcaklıklarda aynı  $R_s$  değerlerini verdiği görülmektedir. Metal yarıiletken yapılarla ilgili yapılan önceki pek çok çalışmada bu uyum yöntemin güvenilirliği ve elde edilen değerlerin doğruluğuyla ilişkilendirilmiştir [14]. Dolayısıyla ölçüm yönteminin ve elde edilen değerlerin ele alınan aygıtın seri direnç değerlerini vermede büyük bir doğruluğa sahip olduğu söylenebilir.

Grafikte gözlenen bir diğer durum sıcaklığa bağlı olarak artan  $R_s$  değerlerinin belirli bir sıcaklıktan (60 °C) sonra düşmeye başlamasıdır. Diyot idealite faktörünün,  $n$  sıcaklığa bağlı değişiminde (Şekil 2) akım iletim mekanizmasında belirgin bir değişim görülmemektedir. Dolayısıyla  $R_s$ 'teki bu değişime daha yakından bakılmıştır.



Şekil 5. Seri direnç,  $R_s$ 'in iki farklı Cheung yaklaşımına göre sıcaklıkla değişimi

Schottky diyotlarda seri direncin akım – voltaj ve frekans bağımlı kapasitans, kondüktans ölçümlerinden hesaplanması konusunda literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır. Sıcaklık veya frekansa bağlı seri dirençteki değişimler bu çalışmalarda da elde edilmiştir [15, 16]. Bülbul ve arkadaşları tarafından Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-Si aygıtlar üzerine yapılan çalışmada [16] hesaplanan sıcaklık bağımlı  $R_s$  değerlerinde bir pik gözlenmiş ve bu durum metal – yarıiletken ara yüzeyinde tuzak seviyelerindeki yüklerin, sıcaklıkla yeterli enerjiye sahip olunca serbest hale geçmesiyle açıklanmıştır. Yine Korucu ve Duman tarafından Au/SiO<sub>2</sub>/p-Si aygıtlar üzerine yapılan çalışmada  $R_s$  değerlerinde sıcaklığa bağlı bir pik belirlenmiş ve yazarlar tarafından diyotdan ara yüzeydeki durumların dağılımıyla ilişkilendirilmiştir [17]. Dolayısıyla literatürde çoğu örnekte görülebileceği ve idealite faktörünün sıcaklıkla değişiminde de gözlemlendiği üzere metal – yarıiletken ara yüzeyindeki durumlar ve buradaki yük taşıyıcıları aygıt davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.

#### 4. Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada UV ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan GUVA S12SD Schottky diyotun karanlıkta sıcaklık bağımlı akım – voltaj ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sistemi olarak uygun maliyetli ve nispeten kolay uygulanabilir bir yöntem önerilmiş ve başarıyla uygulanmıştır. Ölçümler sonucunda aygıtın diyot idealite faktörü belirlenmiş ve akım iletiminin termiyonik alan yayılım mekanizmasıyla açıklanabileceği görülmüştür. Yine iki farklı yöntemle sıcaklık bağımlı seri direnç değerleri hesaplanmış ve bu değerlerde sıcaklığa bağımlı bir değişim gözlenmiştir. Tüm sonuçlar ortak değerlendirildiğinde aygıtın metal – yarıiletken ara yüzündeki durumların aygıtın davranışı üzerinde önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Özellikle artan sıcaklıkla seri dirençteki önce artış ve sonra azalma şeklindeki davranış aygıtın yüksek sıcaklıklarda kullanımında göz önüne alınması gereken bir durum olarak ortaya çıkmaktadır.

#### Kaynaklar

- [1] Patel, M., Kim, H.S., Park, H.H. ve Kim J., Active adoption of void formation in metal-oxide for all transparent super-performing photodetectors, **Scientific Reports**, 6(1), 25461, (2016).
- [2] Muñoz, E., (Al,In,Ga)N-Based photodetectors. some materials issues, **Physica Status Solidi (B)**, 244(8), 2859-77, (2007).
- [3] GUVA-S12SD SMD type UV sensor data sheet, Genicom Co., Korea, (2010).
- [4] Brmarcum, Semiconductor curve trace with the analog discovery 2 <http://www.instructables.com/id/Semiconductor-Curve-Tracer-With-the-Analog-Discove/> (erişim tarihi: 03.09.2018)
- [5] Sze, S.M., **Physics of Semiconductor Devices**, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, (1981).
- [6] Rhoderick E.H. ve Williams, R.H., **Metal – Semiconductor Contacts**, Second Edition, Clarendon Press, Oxford, (1988).
- [7] Aydın, M.E., Yakuphanoglu, F., Eom, J-H. ve Hwang D-H., Electrical characterization of Al/MEH-PPV/p-Si Schottky diode by current–voltage and capacitance–voltage methods, **Physica B**, 387, 239 – 244, (2007).
- [8] Kavasoglu, N., Tozlu, C., Pakma, O., Kavasoglu, A.S., Ozden, S., Metin, B., Birgi, O. ve Oktik, S., Room-temperature interface state analysis of Au/Poly(4-vinyl phenol)/p-Si structure, **Synthetic Metals**, 159 (17-18), 1880-1884, (2009).
- [9] Norde, H., A modified forward I –V plot for Schottky diodes with high series resistance, **Journal of Applied Physics**, 50, 5052, (1979).
- [10] Aubry, V. ve Meyer, F., Schottky diodes with high series resistance: Limitations of forward IV methods, **Journal of Applied Physics**, 76, 7973, (1994).
- [11] Cheung S.K. ve Cheung N.W., Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics, **Applied Physics Letters**, 49 (2), 85 – 87, (1986).
- [12] Altındal, Ş., Kanbur, H., Yıldız, D.E. ve Parlak, M., Current conduction mechanism in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer at low temperatures, **Applied Surface Science**, 217 (11), 5056 – 5061, (2007).
- [13] Aboelfotoh, M.O., Cros A., Svensson B.G. ve Tu, K.N., Schottky-barrier behavior of copper and copper silicide on n-type and p-type silicon, **Physical Review B**, 41(14), 9819 – 9827, (1990).

- [14] Tataroğlu, A. ve Altındal, Ş., The analysis of the series resistance and interface states of MIS Schottky diodes at high temperatures using I–V characteristics, **Journal of Alloys and Compounds**, 484, 405 – 409, (2009).
- [15] Afandiyeva, İ.M., Dökme, İ., Altındal, Ş., Abdullayeva, L.K. ve Askerov, Sh. G., The frequency and voltage dependent electrical characteristics of Al–TiW–Pd<sub>2</sub>Si/n-Si structure using I–V, C–V and G/ω–V measurements, **Microelectronic Engineering**, 85(2), 365 – 370, (2008).
- [16] Bülbül, M.M., Zeyrek, S., Altındal, Ş. and Yüzer, H., On the profile of temperature dependent series resistance in Al/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/p-Si (MIS) Schottky diodes, **Microelectronic Engineering**, 83(3), 577 – 581, (2006).
- [17] Korucu, D., Duman S., Frequency and temperature dependent interface states and series resistance in Au/SiO<sub>2</sub>/p -Si (MIS) diode, **Science of Advanced Materials**, 7(7), 1291 – 1297, (2015).

# Basık yörüngeli erken B tipi örten çift sistemlerin eksen dönmesi analizi: V466 Car, V529 Car ve MN Tra

Ahmet BULUT<sup>1,\*</sup>, İbrahim BULUT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, Terzioğlu Kampüsü, Çanakkale.

<sup>2</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Bölümü, Terzioğlu Kampüsü, Çanakkale.

Geliş Tarihi (Received Date): 14.11.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 14.05.2019

## Özet

Bu çalışmada, basık yörüngeli örten çift sistemler içinden seçilen V466 Car, V529 Car ve MN Tra sistemlerinin eksen dönmesi analizleri (O-C) diyagramları kullanılarak yapılmış, eksen dönme parametreleri ilk kez hesaplanmıştır. Eksen dönmesi analizi için kullanılan minimum zamanları (O-C) Gateway veri tabanından alınmıştır. Analizler sonucunda V466 Car, V529 Car ve MN Tra sistemlerinin yörünge dış merkezlikleri, sırasıyla,  $0.205 \pm 0.035$ ,  $0.497 \pm 0.077$ ,  $0.282 \pm 0.042$ , enberi noktasının boylamındaki ilerlemelerin hızı  $0.0194 \pm 0.0013$ ,  $0.0055 \pm 0.0016$ ,  $0.0026 \pm 0.0007$  %çevrim, bunlara karşılık gelen eksen dönme dönemleri ise  $175 \pm 12$ ,  $858 \pm 203$ ,  $894 \pm 204$  yıl, olarak elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Örten çift yıldızlar, eksen dönmesi, V466 Car, V529 Car, MN Tra.

## Apsidal motion analysis of early B-type eclipsing binary systems: V466 Car, V529 Car and MN Tra

### Abstract

In the present study, the eclipsing binaries which displaying apsidal motion effect in their orbits, V466 Car, V529 Car and MN Tra were analyzed by using (O-C) diagrams to obtain the parameters of apsidal motion. The minima times taken from (O-C) Gateway database were used for the apsidal motion analysis. We found the orbital

\* Ahmet BULUT, abulut@comu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7215-926X>  
İbrahim BULUT, ibulut@comu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-7128-8887>



*eccentricities*  $0.205 \pm 0.035$ ,  $0.497 \pm 0.077$  and  $0.282 \pm 0.042$ , *the rates of change of the longitude of periastron*  $0.0194 \pm 0.0013$ ,  $0.0055 \pm 0.0016$ ,  $0.0026 \pm 0.0007$  %cycle, *corresponding to the apsidal motion periods of about*  $175 \pm 12$ ,  $858 \pm 203$  and  $894 \pm 204$  years, *for V466 Car, V529 Car and MN Tra, respectively.*

**Keywords:** *Eclipsing binaries, apsidal motion, V466 Car, V529 Car, MN Tra.*

## 1. Giriş

Çift yıldız sistemleri, yıldızlara ait çok sayıda fiziksel (kütle, yarıçap, sıcaklık, ışınım gücü gibi) ve yörünge parametresinin bulunması için önemli sistemlerdir. Basık yörüngeli örten çift yıldızlarda gözlenen ve yörünge asal eksenin uzayda dönmesi olarak tanımlanan *eksen dönmesi* üzerine yapılan çalışmalar, yıldızların içyapılarına ve evrimine ilişkin önemli sonuçlara ulaşılmasını sağlar [1, 2]. Ayrıca eksen dönmesi çalışmaları görecelik kuramının Güneş Sistemi dışında test edilmesine de olanak sunar. Bu çalışmaların duyarlılığı, eksen dönmesi parametreleri iyi bilinen çift sistemlerin sayısına bağlıdır.

Bu çalışmada, üç basık yörüngeli örten çift sistemin (V466 Car, V529 Car ve MN Tra) eksen dönmesi analizi ilk kez yapılarak sunulmuştur. Bu sistemler, [3], tarafından yayınlanan basık yörüngeli örten çift yıldızlar kataloğunda yer almaktadır. Her üç sistem içinde şimdiye kadar hiçbir tayfsal çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma basık yörüngeli yeni örten çift yıldızların eksen dönmesi analizleri üzerine yaptığımız çalışmaların (örneğin bkz. [4]) bir devamıdır.

## 2. Eksen dönmesi analizleri

Basık yörüngeli örten çift yıldız sistemlerinin birinci ve ikinci minimum zamanları ile oluşturulan ( $O-C$ ) diyagramları zıt fazlı iki sinüs eğrisi oluşturur. Sinüs eğrisinin dönemi eksen dönmesi dönemini verir. Çift yıldızlara ilişkin eksen dönme hareketinin dönemleri birkaç yıldan binlerce yıla kadar değişen geniş bir aralıkta olabilir.

Bu çalışmadaki üç sisteminde eksen dönmesi parametreleri ( $O-C$ ) diyagramlarının analiziyle hesaplanmıştır. Eksen dönmesi analizi için [5, 6], tarafından geliştirilen yöntemi temel alan [7], tarafında yazılan bilgisayar programı kullanılmıştır. Bu yöntemde dış merkezliğin beşinci dereceden terimlerini içeren [6], tarafından verilen denkleme en küçük kareler yöntemiyle ardışık işlemler (iterasyonlar) yapılarak çözüm gerçekleştirilmektedir. Böylelikle beş temel değişen ( $T_0$ ,  $P_s$ ,  $e$ ,  $\omega_0$ ,  $\dot{\omega}$ ) hesaplanmaktadır. Bunlardan enberi noktasının boylamı ( $\omega$ ) aşağıdaki doğrusal ifadeyle tanımlanmaktadır.

$$\omega = \omega_0 + \dot{\omega}E \quad (1)$$

Burada ( $\dot{\omega}$ ) enberi notasının boylamındaki ilerleme miktarını, ( $T_0$ ) başlangıç zamanını, ( $\omega_0$ ) ise başlangıç zamanındaki enberi noktasının boylamını göstermektedir. Yıldızıl dönem ( $P_s$ ) ile kavuşum (anomalistik) dönemi ( $P_a$ ) arasındaki ilişki

$$P_s = P_a \left(1 - \dot{\omega} / 360^\circ\right) \quad (2)$$

ifadesiyle verilir. Buradan eksen dönmesi dönemi ( $U$ ) ise aşağıdaki ifadeyle hesaplanır.

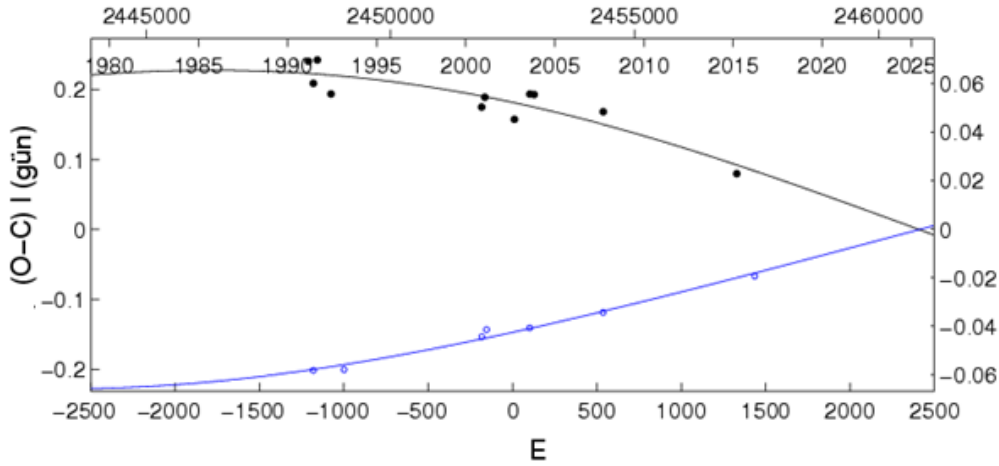
$$U = 360^\circ P_a / \dot{\omega} \quad (3)$$

Eksen dönmesi analizi yapılan 3 sisteme ilişkin minimum zamanları ( $O-C$ ) Gateway [8], veri tabanından alınmıştır.

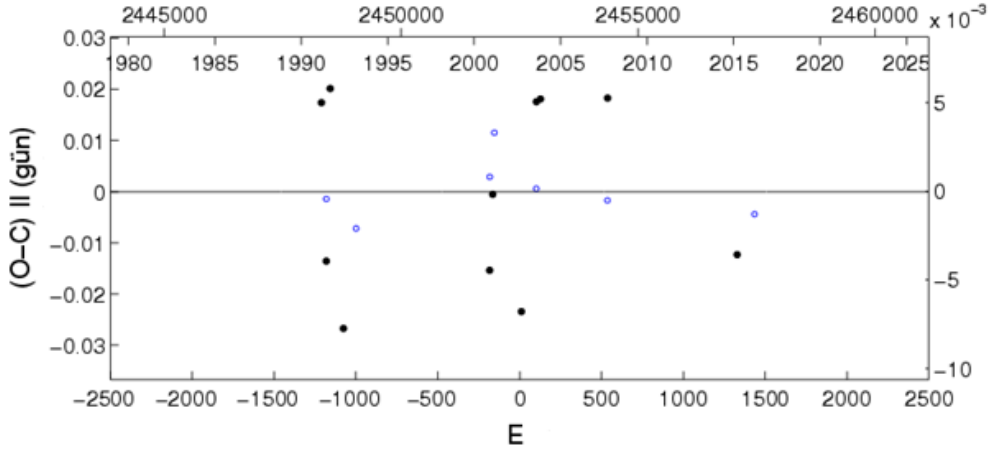
### 2.1. V466 Car

V466 Car (GSC 08925-02854, HD 70333, HIP 40666, NSV 4003, PPM 356626, SAO 250181, TYC 8925-2856-1,  $\alpha_{2000} = 08^h 18^m 5^s.024$ ,  $\delta_{2000} = -60^\circ 18' 50''.02$ ,  $V_{mak} = 7^m.29$ ,  $P = 3.455887$  gün, tayf türü B8/9V) olan sistemin ilk gözlemleri [9], tarafından yapılmıştır. Değişen olduğu ise Hipparcos uydusu gözlemleriyle belirlenmiştir. Tayf türü [10], tarafından B8/9V olarak vermiştir. Sistemin Hipparcos uydusu [11], gözlemlerinden elde edilen ışık eğrisi [12], tarafından analiz edilmiştir. Bu analizlerde yan minimumun  $\sim 0.37$  evresinde, yörünge dış merkezliğinin ise 0.235 olduğu hesaplanmıştır.

V466 Car'ın eksen dönmesi analizinde, ( $O-C$ ) Gateway veri tabanından alınan, 11 tanesi birinci minimum olmak üzere, toplam 18 tane fotometrik minimum zamanı kullanılmıştır. Analizlerde yörünge eğimi için [12]'nin verdiği ( $i = 81^\circ.18$ ) değer alınmıştır. Analizle sonucu elde edilen eksen dönmesi parametreleri Tablo 1'de, sistemin ( $O-C$ ) eğrisi ve ona yapılan fit eğrisi Şekil 1'de kuramsal eğriden olan farklar ise Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. V466 Car'ın ( $O-C$ ) diyagramı. Semboller gözlenen ( $O-C$ ) değerlerini sürekli çizgiler ise kuramsal eğrileri göstermektedir (Sembollerde içi dolu olan I minimum ve boş olan II minimum dairelerle gösterilmiştir).

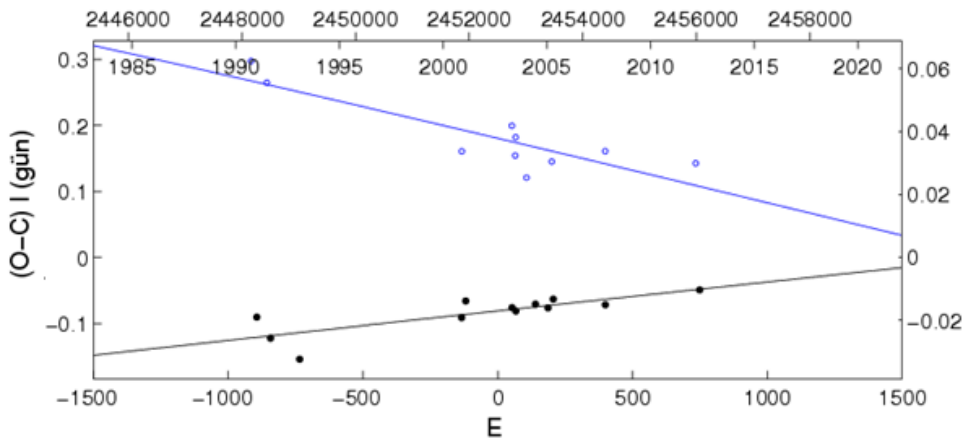


Şekil 2. V466 Car Cas'ın  $(O-C)$  değişiminin eksen dönmesi temsilinden olan farklar.

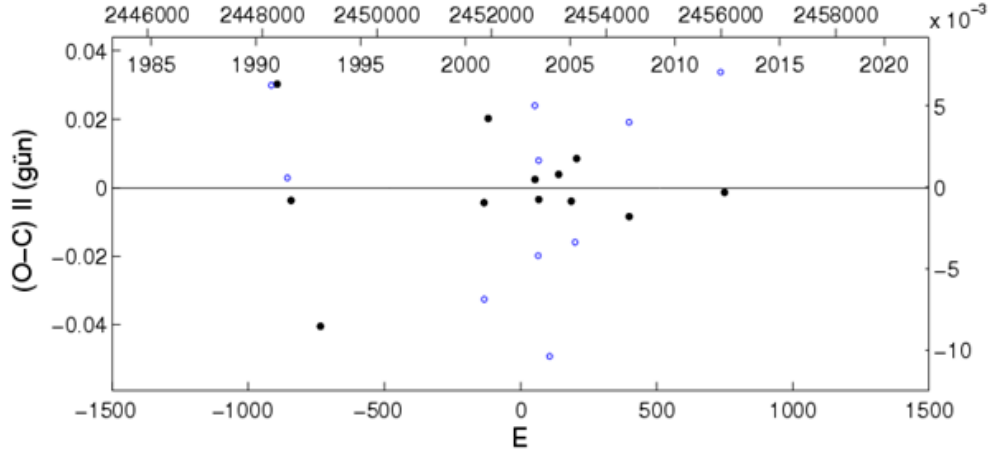
## 2.2. V529 Car

V529 Car (CD-62 492, HD 95993, HIP 54026, 2MASS J11031282-6303598, SAO 251240, TYC 8962-344-1, Gaia DR1 5240908657258193536,  $\alpha_{2000} = 11^{\text{h}} 03^{\text{m}} 12^{\text{s}}.835$ ,  $\delta_{2000} = -63^{\circ} 03' 59''.848$ ,  $V_{\text{mak}} = 8^{\text{m}}.18$ , tayf türü = B8V ve  $P = 4.74449$  gün) güney yarımkürede yer alan basık yörüngeli bir çift yıldız sistemidir. V529 Car sisteminin değişen olduğu Hipparcos uydusu tarafından keşfedilmiştir. Çift yıldızın tayf türün B8V olarak vermiştir [10]. Sistemin Hipparcos uydusu gözlemlerinden elde edilen ışık eğrisi [12], tarafından analiz edilerek fotometrik parametreleri belirlenmiştir. Buna göre yörünge dış merkezliği ( $e = 0.133$ ) ve yörünge eğim açısı ( $i = 79^{\circ}.85$ ) olarak bulunmuştur.

V529 Car'ın  $(O-C)$  Gateway veri tabanında 22 tane fotometrik minimum zamanı yer almaktadır. Bunlardan 12 tanesi birinci minimum, 10 tanesi de ikinci minimumdur. Sistemin eksen dönmesi analizinde bu minimum zamanları kullanılmıştır. Sistemin yörünge eğiminin değeri [12]'den alınmıştır. Analizler sonucunda hesaplanan eksen dönmesi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Sistemin  $(O-C)$  eğrisi ve onun eksen dönmesi ile temsili Şekil 3'de kuramsal eğriden olan farklar ise Şekil 4'de gösterilmiştir. Analizler sistemin yörüngesinin oldukça basık ( $e = 0.497 \pm 0.077$ ) olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. V529 Car'ın  $(O-C)$  değişimi ve bu değişimi temsil eden eğri.

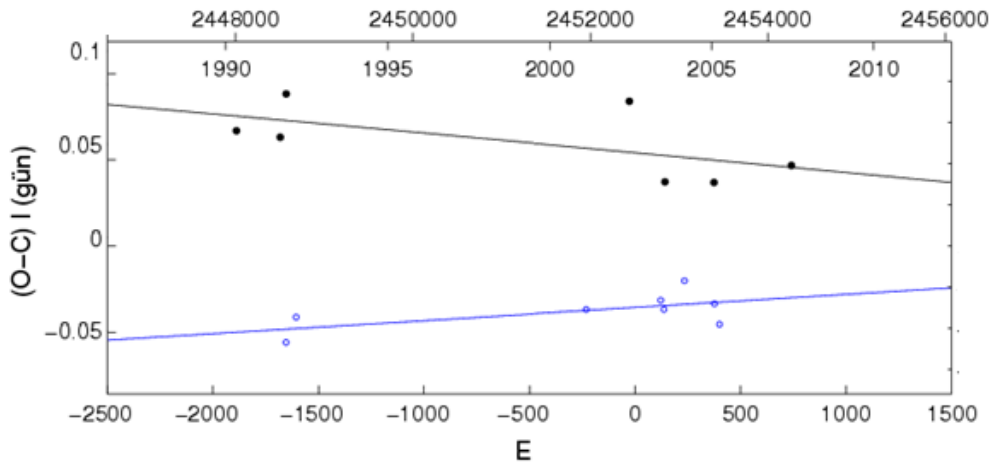


Şekil 4. V529 Car'ın  $(O-C)$  değişiminin eksen dönmesi temsilinden olan farklar.

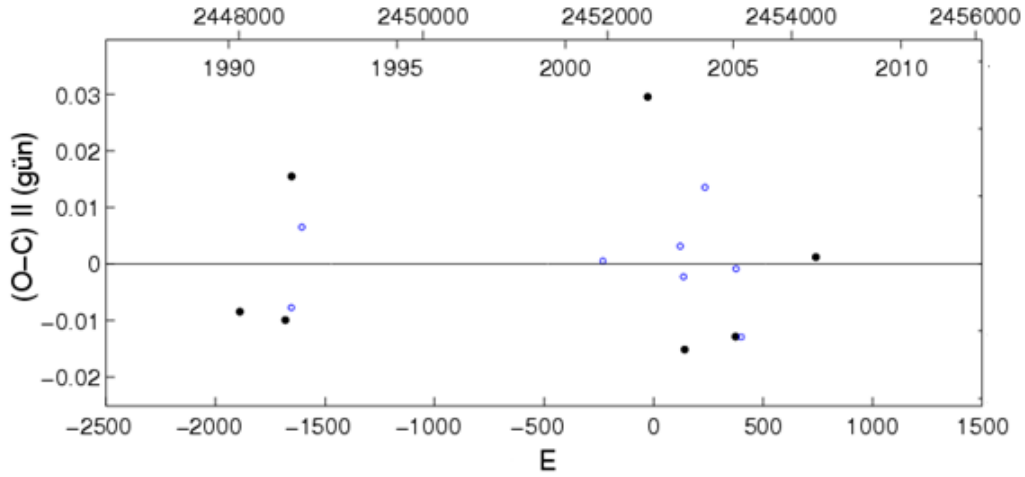
### 2.3. MN Tra

MN Tra (CPD-61 5428, GSC 09027-05249, HIC 78231, HIP 78231, NSV 7349, PPM 361769, SAO 253361, TD1 18670,  $\alpha_{2000} = 15^{\text{h}} 58^{\text{m}} 28^{\text{s}}.328$ ,  $\delta_{2000} = -62^{\circ} 03' 37''.664$ ,  $V_{\text{mak}} = 8^{\text{m}}.55$ , tayf türü = B9V ve  $P = 2.379833$  gün) Hipparcos uydusu [13], tarafından keşfedilen Algol türü bir örten çift yıldız sistemidir. Sistemin Hipparcos gözlemlerinden elde edilen ışık eğrisi [12], tarafında analiz edilerek fotometrik parametreler belirlemiştir. Bu çalışmada yörünge dış merkezliği ( $e = 0.081$ ) ve yörünge eğim açısı ( $i = 88^{\circ}.84$ ) derece bulunmuştur.

MN Tra'nın eksen dönmesi analizinde 8 tanesi ikinci minimum olmak üzere, toplam 16 tane fotometrik/CCD minimum zamanı kullanılmıştır. Bu minimum zamanları da  $(O-C)$  Gateway veri tabanından alınmıştır. Sistemin  $(O-C)$  eğrisinin ve onun eksen dönmesi ile temsili Şekil 5'de kuramsal eğriden olan farklar ise Şekil 6'de gösterilmiştir. Elde edilen eksen dönmesi parametreleri Tablo 1'te verilmiştir. Yapılan analizlerde sistemin eksen dönme dönemi  $894 \pm 204$  yıl, yörünge dışmerkezliği ise  $0.282 \pm 0.042$  olarak bulunmuştur. Sonuçlar MN Tra'nın yörüngesinin oldukça basık olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. MN Tra'nın  $(O-C)$  değişimi ve bu değişimi eksen dönmesi ile temsil eden eğri.



Şekil 6. MN Tra'nın ( $O-C$ ) verilerinin kuramsal değerlerden olan fark dağılımları.

Tablo 1. V466 Car, V529 Car ve MN Tra'nın yeni ışık elemanları ve eksen dönmesi parametreleri.

Parametre	V466 Car	V529 Car	MN Tra
$T_0$ (HJD)	$2452501.6814 \pm 0.0452$	$2452503.3649 \pm 0.0324$	$2452501.7761 \pm 0.0157$
$P_s$ (gün)	$3.455833 \pm 0.000055$	$4.744583 \pm 0.000066$	$2.379821 \pm 0.000015$
$P_a$ (gün)	$3.4560195 \pm 0.0000547$	$4.7446543 \pm 0.0000663$	$2.3798379 \pm 0.0000154$
$e$	$0.205 \pm 0.035$	$0.497 \pm 0.077$	$0.282 \pm 0.042$
$\dot{\omega}$ (°/çevrim)	$0.0194 \pm 0.0013$	$0.0055 \pm 0.0016$	$0.0026 \pm 0.0007$
$\omega_0$ (°)	$223 \pm 2$	$80 \pm 2$	$258 \pm 2$
$U$ (yıl)	$175 \pm 12$	$858 \pm 203$	$894 \pm 204$

### 3. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada, [3], kataloğundan eksen dönmesi gösterdiği bildirilen örten çift yıldız sistemlerinden V466 Car, V529 Car ve MN Tra için eksen dönmesi analizi ilk kez yapılmıştır. Bunun için sistemlerin literatürde mevcut olan minimum zamanları toplanarak, ( $O-C$ ) eğrileri oluşturulmuş ve analizleri yapılmıştır. Sistemlerin hesaplanan eksen dönmesi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. V466 Car, V529 Car ve MN Tra sistemlerinin eksen dönme dönemleri sırasıyla  $175 \pm 12$ ,  $858 \pm 203$  ve  $894 \pm 204$  yıl olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre V466 Car'ın eksen dönmesi kısa dönemli diğer sistemlerin ise uzun dönemlidir. Her üç sistemin de yörünge dış merkezliğinin oldukça büyük olduğu görülmektedir.

Çift yıldızlara ilişkin eksen dönme hareketinin dönemleri uzun süreleri kapsamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada analizleri yapılan tüm sistemlerin gelecekte yapılacak yeni minimum zamanı gözlemleri, eksen dönmesi dönemlerinin daha duyarlı biçimde belirlenmesi açısından önemlidir. Yıldızlara ilişkin içyapı sabitlerinin hesaplanması için bileşenlerin mutlak parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Gelecekte yapılacak tayfsal çalışmalarla sistemlerin mutlak parametreleri belirlenirse, bileşenlerin gözlemsel içyapı sabiti değerleri bulunup kuramsal yıldız modelleriyle karşılaştırılabilir.

## Kaynaklar

- [1] Claret, A. ve Giménez, A., Apsidal motion test: confrontation between theory and observations, Inside the stars; **Proceedings of the 137<sup>th</sup> IAU Colloquium**, Univ. of Vienna, Austria, Apr. 13-18, 1992. Astronomical Society of the Pacific (ASP Conference Series. Vol. 40), Edited by Werner W. Weiss and Annie Baglin, 469, (1993).
- [2] Claret, A. ve Willems, B., New results on the apsidal-motion test to stellar structure and evolution including the effects of dynamic tides, **Astronomy and Astrophysics**, 388, 518-530 (2002).
- [3] Bulut, İ. ve Demircan, O., A new catalogue of eclipsing binary stars with eccentric orbits\*, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 378, 1, 179-181, (2007).
- [4] Bulut I. ve Bulut A., BVR Photometric Analysis of GSC 4277-0586 and GSC 3152-1202, **Acta Astronomica**, 65, 127-138, (2015).
- [5] Gimenez, A. ve Garcia-Pelayo, J. M., A new method for the analysis of apsidal motions in eclipsing binaries, **Astrophysics and Space Science**, 92, 1, 203-222, (1983).
- [6] Giménez, A. ve Bastero, M., A Revision of the Ephemeris-Curve Equations for Eclipsing Binaries with Apsidal Motion, **Astrophysics and Space Science**, 226, 1, 99-107, (1995).
- [7] Zasche, P., Liakos, A., Niarchos, P., Wolf, M ve Gazeas, K., Period changes in six contact binaries: WZ And, V803 Aql, DF Hya, PY Lyr, FZ Ori, and AH Tau, **New Astronomy**, 14, 2, 121-128, (2009).
- [8] O-C gateway Database of times of minima (E) and maxima (RR), <http://var2.astro.cz/ocgate/>, (19.05.2017).
- [9] Strohmeier, W., New Southern Variables, **Information Bulletin on Variable Stars**, 158, 1, (1966).
- [10] Houk, N. ve Cowley, A. P., University of Michigan Catalogue of two-dimensional spectral types for the HD stars. Volume I. Declinations -90\_ to -53\_f0., University of Michigan Catalogue of two-dimensional spectral types for the HD stars. Volume I. Declinations -90\_ to -53\_f0., by Houk, N.; Cowley, A. P.. Ann Arbor, MI (USA): Department of Astronomy, University of Michigan, 19 + 452 , (1975).
- [11] ESA, The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission, The Hipparcos and Tycho catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission, Publisher: Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 1997, Series: ESA SP Series, 1200, (1997).
- [12] Bulut, İ. ve Demircan, O., Light curve analyses of new eclipsing binary systems with eccentric orbits, **New Astronomy**, 13, 4, 252-254, (2008).
- [13] Perryman, M. A. C., Lindegren, L., Kovalevsky, J., Hoeg, E., Bastian, U., Bernacca, P. L., Crézè, M., Donati, F., Grenon, M., Grewing, M., van Leeuwen, F., van der Marel, H., Mignard, F., Murray, C. A., Le Poole, R. S., Schrijver, H., Turon, C., Arenou, F., Froeschlé, M. ve Petersen, C. S., The HIPPARCOS Catalogue, **Astronomy and Astrophysics**, 323, L49-L52, (1997).

# Investigation effects of some anthraquinones on human paraoxonase 1 (hPON1)

Başak GÖKÇE\*

Suleyman Demirel University Faculty of Pharmacy, Department Biochemistry, East Campus, Isparta.

Geliş Tarihi (Received Date): 21.11.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 25.04.2019

## Abstract

The *in vitro* effects of the some dihydroxyanthraquinone derivates, anthrorufin, xanthopurpurin, chrysazin and chrysaphanol which are commonly used as anticancer antibiotics, on the activity of purified serum paraoxonase 1 (PON1) (EC 3.1.8.1.) were investigated. Paraoxonase 1 was purified from human blood serum 355,12 fold with 55 % yield with use of ammonium sulphate precipitation and Sepharose-4B-L-tyrozine-1-naphthylamine HIC (hydrophobic interaction chromatography) coloumn in return. Sodium Dodecyl Sulphate -polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) analysis of purified enzyme showed a single band belong to human serum PON1, 43 kDa. The four anthraquinones inhibited PON activity strongly, with  $IC_{50}$  values for anthrorufin, xanthopurpurin, chrysazin and chrysaphanol of 73, 72.25, 75.19 and 105.53  $\mu M$  respectively.  $K_i$  constants were determined 34.64, 39.51, 39.73 and 63.59  $\mu M$ , respectively. All anthraquinones showed inhibition in competitive manner.

**Keywords:** Paraoxonase, inhibition, anthraquinones.

## Bazı antrakinonların insan paraoksonaz 1 (hPON1) üzerine etkilerinin incelenmesi

### Özet

Antikanser antibiyotikler olarak yaygın kullanılan bazı dihidroksiantrakinon türevlerinin (antrorufin, ksantopurpirin, krisazin ve krizofanol) saflaştırılmış serum paraoksonaz 1 (PON1) aktivitesi üzerine (EC 3.1.8.1) *in vitro* etkileri araştırıldı. Paraoksonaz 1, insan kan serumundan 355,12 kat, % 55 verimle, amonyum sülfat çöktürmesi ve Sepharose 4B-L-tirozin-1-naftilamin hidrofobik etkileşim kromatografisi kullanılarak saflaştırılmıştır. Saflaştırılmış enzimin Sodyum Dodesil Sülfat-

\* Başak GÖKÇE, basak1984@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8548-9703>

*poliakrilamid jel elektroforezi (SDS-PAGE), insan serum PON1'e ait 43 kDa'lık tek bant gösterdi. Dört antrakinon bileşiği, PON1 aktivitesini, sırasıyla antrorufin, ksantopurpirin, krisazin ve krizofanol için 73, 72.25, 75.19 ve 105.53  $\mu$ M değerleri ile güçlü bir şekilde inhibe etmiştir. Ki sabitleri sırasıyla 34.64, 39.51, 39.73 ve 63.59  $\mu$ M olarak bulunmuştur. Tüm antrakinonlar yarışmalı bir şekilde inhibisyon göstermiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Paraoksonaz, inhibisyon, antrokinonlar.

## 1. Introduction

There has been a growing interest to understand physiological functions of multiple functional paraoxonase 1 (PON1) in last decades. PON1 is one of HDL associated enzymes, both capable of inhibiting LDL and cellular oxidation [1]. In addition recent studies show PON1 prevents infection cause of quorum sensing bacteria via its lactonase activity [2]. So that paraoxonase 1 play role in several type diseases such as; atherosclerosis, diabetes, inflammation, immune system disorders, ageing and cancer [3].

Also human serum paraoxonase-1 (PON1) capable of catalyzing a wide range of substrates; aryl esters, cyclic carbonate esters, aromatic esters, lactones, number of pharmaceutical agents, thiolactones, organophosphates, highly toxic nerve gases (sarin and soman) [4].

X-ray crystallography show that the structure of PON1 has three carbohydrate chains where in two calcium ions, one essential for catalytic, the other one for structural. Paraoxonase1 is a glycoprotein that consists of 354 amino acids with 43 kDa molecular weight. Human serum paraoxonase-1 (hPON1), produced mainly in the liver then secreted into blood serum connected to high density lipoprotein (HDL), which also contains ApoA1 [5].

Paraoxonase (PON) gene has three isoenzymes, PON1, PON2 and PON3, located next to each other on chromosome 7q21.3-22 in humans (6 in mice), which are all widely expressed in mammalian tissues [6]. The PON1 promoter region has two binding sites both specificity protein 1 (Sp-1), which approximately up regulate PON1 in the presence of statins and sterol regulatory binding protein 2 (SREBP2). PON1 has many regulatory factors; listed as diet, smoking, inflammation and diabetes [7].

However there has little studies about paraoxonase's physiological properties still in the literature. For this reason there are needed drug interaction experiments on PON1 much more. In present study it was investigated in vitro the effects of four different dihydroxy anthraquinone derivates (Figure 1) on purified human serum paraoxonase 1 activity.

Anthraquinones (AQs) are aromatic compounds which both synthetically occurring from quinones and naturally occurring from fungi, lichen, root. AQ or derivatives are using as dyestuffs in foods, drugs, and cosmetics [8,9]. As well as the importance of the AQs cause of widely applications in commercial, they also demonstrate many biological functions including bone cancer therapy, antienflamatuar, antimicrobial, antigenotoxic, phytoestrogen, diuretic and vasorelaxing through the literature. However, there is need



to be more information about biological properties [10,11]. From this point of view, in this study focused on biological effects of these anthraquinones (anthrorufin, xanthopurpurin, chrysazin and chrysaphanol) via interactions with PON1.

## 2. Experimental

### 1.1. Materials

The compounds used in this research, consist of Sepharose 4B, CNBr, 1-naphthylamine, paraoxon-ethyl, chemicals for electrophoresis and anthraquinones (anthrorufin, xanthopurpurin, chrysazin and chrysaphanol) were purchased from Sigma Chemical Co or Merck. For the inhibition studies, it was used a BIOTEK UV-VIS spectrophotometer.

### 1.2. Purification of human serum paraoxonase 1 from chromatographic method

50 ml fresh human blood was put into centrifuge tube. The blood sample was centrifuged at 5000 rpm for 20 min and serum was isolated. Firstly, serum was precipitated with 60-80 % ammonium sulphate and the fractionation was collected by centrifugation at 15000 rpm for 45 time, and dissolved in 1 M ammonium sulphate (pH 8.0). Secondly, it was used the hydrophobic gel Sepharose 4B-L-tyrosine-1-naphthylamine which synthesized in our laboratory before [12], for purification of paraoxonase1. The column was equilibrated with buffer mix consist of 0.1 M Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (pH 8.00) and 1 M (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH 8.00). The paraoxonase was eluted and purified PON1 enzyme was kepted in +4 °C.

### 1.3. Paraoxonase enzyme activity assay

The enzyme activity was studied at with paraoxon substrate (2 mM diethyl p-nitrophenyl phosphate) and 0.1 M Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> buffer (pH 8.00). The paraoxonase enzyme assay was obtained from paraoxon's hydrolysis to p-nitrophenol at 412 nm at 37 °C [13]. The assays were determined via BIOTEK UV-VIS spectrophotometer.

### 1.4. Ammonium sulphate precipitation

Human serum paraoxonase was precipitated with 60–80 % (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, as in previous study [14]. The precipitate was obtained after centrifugation at 15000 rpm for 50 min and dissolved in 1 M (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> buffer (pH 8.00).

### 1.5. Protein determination

During the purification steps, quantitative protein assay was determined according to the Bradford method at 595 nm by spectrophotometer [15].

### 1.6. SDS-PAGE gel electrophoresis

SDS-PAGE gel electrophoresis was applied according to Laemmli's procedure [16] to purified hPON1 from HIC column including Sepharose 4B-L-Tirozin-1-naptylamine. The single protein band belong to paraoxonase 1 was photographed after electrophoresis (Figure 2).

### 1.7. in vitro drug studies and calculation of kinetic values

It was performed the inhibitory efficacy of four different anthraquinone derivates including anthrorufin, xanthopurpurin, chrysazin and chrysaphanol on paraoxonase 1. At each concentration used, all measurements were repeated three times. The PON1

activities were measured in the presence of different compounds concentrations. The control activity was assumed to be 100 % in the absence of an inhibitor. For each anthraquinone compounds, the percent activity graph as a function of the drug concentration was drawn in excel (Figure 3). To determine the values of  $K_i$ , two different inhibitor concentrations were examined for each dye. All these experiments, paraoxon was used as substrate at different concentrations. The resulting Lineweaver–Burk curves were used to determine the value of  $K_i$  and the inhibitor type (Figure 4) [17].

### 3. Results and discussions

Human PON1 was purified by 1-naphthylamine-L-tyrosine-Sepharose 4B gel affinity column [12]. Specific activity was calculated for the serum and ammonium precipitation purified enzyme solution as 65.71 EU/mg protein, a yield of 45 % and a purification coefficient of 355.12-fold. Purification steps were controlled by SDS-PAGE (Figure 2).

The number of studies with paraoxonase inhibition has increased in the last decade [18-20]. In this study four anthraquinones compounds showed potent inhibitory effects on paraoxonase activity. The obtained  $IC_{50}$  values for anthrorufin, xanthopurpurin, chrysazin and chrysaphanol were 72.25, 73, 75.19, and 105.53  $\mu$ M, respectively (Table 1).  $K_i$  values were calculated from Lineweaver-Burk graphs.  $K_i$  constants for the drugs were 34.64, 39.51, 39.73 and 63.59  $\mu$ M respectively (Table 1). Inhibition types were found as competitive for the all dyes (Table 1).

Anthraquinones are the most general group, naturally derivate from quinones. Synthetically and natural AQs are using as dyestuffs in food, drugs, and cosmetic areas [8-11]. However, there is really very little information about biological functions of these compounds. Anthrarufin is a natural anthraquinone, occurring from some kind of fungi and bacteria. Xanthopurpurin obtained from tea, herbs and spices. Chrysazin found in dried leaves and stems of *Xyris semifuscata*, a specie of plant in Madagascar [21]. Chrysophanol like anthrarufin extracted from fungi, also called chrysophanic acid [22- 24].

Anthraquinones have ability of binding calcium makes AQs useful in biochemical studies involving bone growth and osteoporosis, gene expression and tissue engineering [21]. Human serum PON1 is a calcium-dependent enzyme that hydrolyzes esters such as organophosphate and lactone. Anthraquinones may be able to inhibit the enzyme by complexing with the calcium required for enzyme activity.

**Hata! Bağlantı geçersiz.Hata! Bağlantı geçersiz. Hata! Bağlantı geçersiz.**

1) Antrorufin      2) Xanthopurpurin      3) Chrysazin      4) Chrysaphanol

Figure 1. Structures of (1)anthrorufin, (2)xanthopurpurin, (3)chrysazin and (4)chrysaphanol.

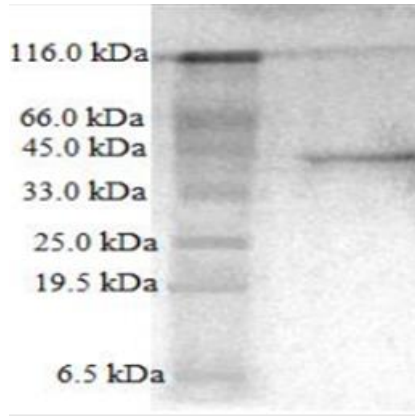


Figure 2. Sodium dodecyl sulphate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) analysis of purified human serum paraoxonase 1 (hPON1).

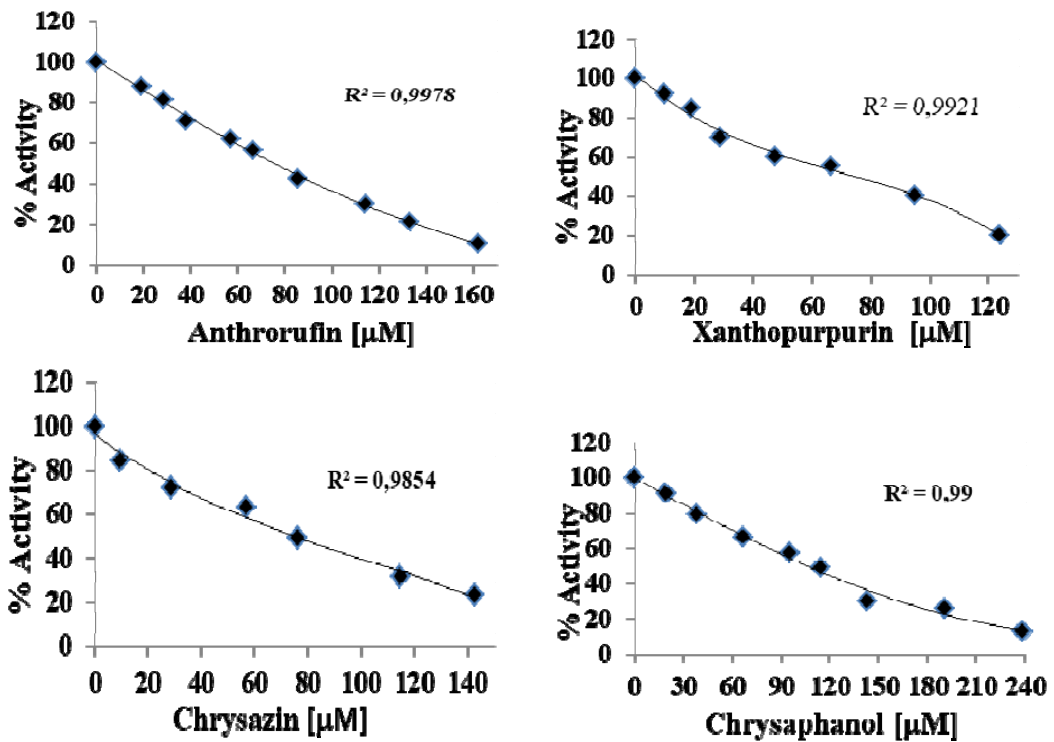


Figure 3. Investigation of IC<sub>50</sub> values of each AQ compounds obtained by drawn % Activity against inhibitor concentration graphs in Excel.

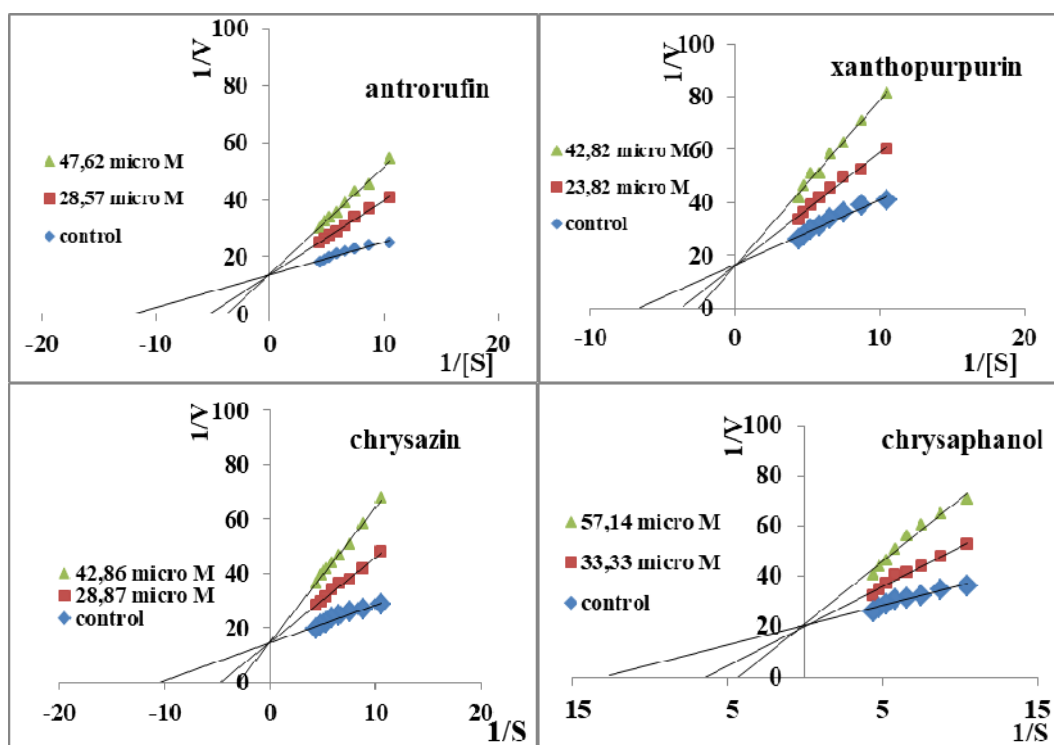


Figure 4. Investigation of inhibition types and  $K_i$  values of the AQs by using Lineweaver–Burk curves.

Table 1 .  $IC_{50}$ ,  $R^2$ ,  $K_i$  values and inhibition types for four AQ derivatives.

Anthraquinones	$IC_{50}$ ( $\mu$ M)	$R^2$	$K_i$ ( $\mu$ M)	Inhibition type
Anthrorufin	73	0.998	34.64	Competitive
Xanthopurpurin	72.25	0.992	39.51	Competitive
Chrysazin	75.19	0.985	39.73	Competitive
Chrysaphanol	105.53	0.990	63.59	Competitive

#### 4. Conclusions

In conclusion, it was purified human serum PON1 enzyme using two simple purification steps and investigated the in vitro effects of some AQs, namely anthrorufin, xanthopurpurin, chrysazin and chrysaphanol on the enzyme activity.

These naturally occurring AQs have been used in therapeutic applications such as, anticancer, anti-inflammatory, antimicrobial, diuretic, and phytoestrogen activities like many diseases. PON1 is critical in cardiovascular diseases and detoxification metabolism. Due to this reason, it is important to examine the effects of these compounds interaction with PON1 activity. All anthraquinones compounds inhibited the enzyme activity potently in competitive manner. Studies on the effects of drugs on the paraoxonase 1 enzyme should be investigate more also in clinical and genetic.

### **Acknowledgements**

The author thanks to the Balikesir University Biochemistry Research Laboratory for the use of equipments and thanks to Prof. Dr. Oktay Arslan and Assoc. Prof. Dr. Nahit Gencer for their helpful and constructive suggestion.

### **References**

- [1] Aviram, M., Rosenblat, M., Bisgaier, CL., Newton, RS., Primo-Parmo, SL., La, Du BN. Paraoxonase inhibits high-density lipoprotein oxidation and preserves its functions. A possible peroxidative role for paraoxonase. **Journal of Clinical Investigation** 101, 1581–90 (1998)
- [2] Aybey, A. and Demirkan E., Inhibition of quorum sensing-controlled virulence factors in *Pseudomonas aeruginosa* by human serum paraoxonase. **Journal of Medical Microbiology**, 65, 105-113, (2016)
- [3] Mackness, M., and Mackness, B., Human paraoxonase-1 (PON1): Gene structure and expression, promiscuous activities and multiple physiological roles. **Gene**, 567, 12–21(2015)
- [4] Rajkovic, M.G., Rumora, L., Barisic, K., The paraoxonase 1, 2 and 3 in humans. **Biochemical Medicine**, 21, 122–130 (2011).
- [5] She Z.G, Zheng W, Wei Y.S, Chen H.Z, Wang A.B, Li H.L, et al. Human paraoxonase gene cluster transgenic overexpression represses atherogenesis and promotes atherosclerotic plaque stability in ApoE-null mice. **Circulation Research** 104,1160–8 (2009).
- [6] Draganov, D.I., Teiber, J.F., Speelman, A., Osawa, Y., Sunahara, R., La Du, B.N., Human paraoxonases (PON1, PON2 and PON3 are lactonases with overlapping and distinct substrate specificities. **Journal of Lipid Research** 46, 1239–1247 (2005).
- [7] Durrington, P.N., Mackness, B., Mackness, M.I., The hunt for nutritional and pharmacologicalmodulators of paraoxonase. **Arteriosclerosis Thrombosis and Vascular Biology**. 22, 1248–1250 (2012).
- [8] Agarwal SK, Singh SS, Verma S, et al. Antifungal activity of anthraquinone derivatives from *Rheum emodi*. **Journal of Ethnopharmacology** 72: 43–46 (2008)
- [9] Yen, G.C., Duh, P.D., and Chuang, D.Y., Antioxidant activity of anthraquinones and anthrone. **Food Chemistry** 70: 437–441. (2000)
- [10] William P, Sorribas A, and Howes MJR. Natural products as a source of Alzheimer’s drug leads. **Natural Product Reports** 28: 48–77. (2010)
- [11] Rossi, S., Tabolacci, C., Lentini, A., et al. Anthraquinones danthron and quinizarin exert antiproliferative and antimetastatic activity on murine B16-F10 melanoma cells. **Anticancer Research** 30(2): 445–449 (2010)
- [12] Sinan, S., Kockar, F., Arslan, O., Novel purification strategy for humanPON1 and inhibition of the activity by cephalosporin andaminoglikozide derived antibiotics. **Biochimie** 88:565–74 (2006).
- [13] Gan, K.N., Smolen A, Eckerson HW, La Du BN. Purification of human serum paraoxonase/arylesterase. Evidence for one esterase catalyzing both activities. **Drug Metabolism Disposition** 19:100–6 (1991).
- [14] Gencer, N., and Arslan, O., Purification human PON1Q192 and PON1R192 isoenzymes by hydrophobic interaction chromatography and investigation of the inhibition by metals. **Journal of Chromatography B**, 877:134–140 (2009).

- [15] Bradford, M.M., A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, 72:248–51(1976).
- [16] Laemmli, U.K., Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. **Nature**, 227:680–5 (1970).
- [17] Lineweaver H, Burk D, The determination of enzyme dissociation constants. **Journal of American Chemical Society**; 57:685 (1934).
- [18] Dilek, E., Caglar, S., Erdogan, K., Caglar, B., Sahin, O., Synthesis and characterization of four novel palladium(II) and platinum(II) complexes with 1-(2-aminoethyl) pyrrolidine, diclofenac and mefenamic acid: In vitro effect of these complexes on human serum paraoxanase I activity. **Journal of Biochemical and Molecular Toxicology**. 32:4 (2018)
- [19] Alim, Z, Kilic D, Koksals Z, Beydemir S, Ozdemir H. Assessment of the inhibitory effects and molecular docking of some sulfonamides on human serum paraoxanase I. **Journal of Biochemical and Molecular Toxicology**. 31:10 (2017).
- [20] Gençer N, Yavuz E. An alternative purification method for human serum paraoxanase I and its interaction with methidathion. **Archives Physiology Biochemistry**. 123(3):159-164 (2017).
- [21] Everett, C. Cogbill John H. Yoe Derivatives of anthrarufin, chrysazin and quinizarin as colorimetric reagents for boron. **Analytica Chimica Acta**; 12: 455-463 (1955).
- [22] Zhang, J; Yan, C; Wang, S; Hou, Y; Xue, G; Zhang, L Chrysophanol attenuates lead exposure-induced injury to hippocampal neurons in neonatal mice. **Neural Regeneration Research**. 9 (9): 924–30 (2014).
- [23] Chien, S., Wu Y., Chen Z., Yang, W., Naturally Occurring Anthraquinones: Chemistry and Therapeutic Potential in Autoimmune Diabetes Review Article, **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine** 13: 357-357 (2015).
- [24] Fotia, C., Avnet, S. Granchi, D., Baldini N., The Natural Compound Alizarin as an Osteotropic Drug for the Treatment of Bone Tumors, **Journal of Orthopaedic Research** 1486-1492 (2012)

# Maden ocaklarında insansız hava aracı kullanımı: örnek bir saha çalışması

Mete KUN<sup>1,\*</sup>, Berk ÖZCAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir.

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Geliş Tarihi (Received Date): 27.11.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 22.03.2019

## Özet

Günümüzde boyutu hızla küçülen ve özellikleri artan kamera, batarya ve küresel konumlama sistemleri sayesinde insansız hava araçları (İHA) ve modern fotogrametrik metotları kullanan görsel işleme yazılımları hızla gelişmektedir. İHA destekli görsel işleme yazılımları endüstrinin birçok alanında kendine yer bulmuş ve madencilik alanında da, süregelen klasik metotları geliştirmeye başlamıştır. Özellikle maden sahalarının geniş alanlar kaplaması, ölçümlerinin uzun zaman alması ve maliyetli olması, İHA'lar ile birlikte fotogrametrik görsel işleme yazılımlarının kullanımını ihtiyaç haline getirmektedir. Hazırlanan çalışma, örnek bir maden sahasında gerçekleşen hacim, alan ve kabarma faktörü gibi, özellikle açık işletme madenciliğinde planlama ve hesaplamalarda kullanılan bazı verilerin, İHA kullanımı ile hızlı ve güvenilir bir biçimde eldesini konu almaktadır. Çalışma sonucunda, ele alınan sahada klasik metotlarla yapılan hesaplamaları ile İHA'lar ile elde edilen verilerin, uyumlu ve birbirlerine oldukça yakın değerler verdiği saptanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** İnsansız hava aracı, açık işletme madenciliği, hacim hesabı, kabarma faktörü.

## Usage of unmanned aircraft in mining quarries: a sample field study

### Abstract

Nowadays, thanks to the rapidly shrinking and increasingly featured camera, battery and global positioning systems, one of the premier of these fields is visual processing

\*Mete KUN, mete.kun@deu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-2042-3401>

Berk ÖZCAN, berk.ozcan@ogr.deu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-3560-0597>

*software using modern photogrammetric methods supported by unmanned aerial vehicles (UAVs). UAV supported visual processing software has found itself in many areas and has begun to develop ongoing methods in the field of mining. Especially the large area coverage of mine sites, their long time taking and costly measurements make the use of photogrammetric image processing software a necessity. In this study; fast and reliable use of unmanned aerial vehicles, such as in-situ volume, area and swell factor, which are used in planning and calculations, especially in open pit mining, taking place in a sample mine excavation area. As a result of the study, the data both obtained by the conventional methods and with the UAVs in the study area were found to be compatible and very close to each other.*

**Keywords:** *Unmanned aerial vehicles, open pit mining, volume, swell factor.*

## 1. Giriş

2000’li yılların başından itibaren kullanımı ve teknolojileri hızla gelişen insansız hava araçlarının (İHA) dünya genelinde, özellikle uzaktan algılama ve yerbilimleri alanlarında kullanımı giderek artmıştır. İHA’lar ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görseller, bilgisayar destekli görsel işleme yazılımlarının da gelişimini desteklemiş ve daha ayrıntılı sayısal arazi modeli (SAM), sayısal yüzey modeli (SYM) ve nokta bulutu üretimini mümkün kılmıştır.

İHA yardımıyla gerçekleştirilen çalışmalar yersel fotogramrideki hassasiyete yaklaşmakta ve çalışmaları kısa sürede tamamlayabilmesi açısından birçok farklı alanda uygulanma olanağı bulmaktadır [1]. Son 10 yıllık süreçte bir çok araştırmacı; heyelanların izlenmesi ve yüksek çözünürlüklü görüntülerinin elde edilmesinde [2], orman arazilerinin yüzeylerin çıkarılmasında ve bitki gelişiminin incelenmesinde [3], İHA görüntülerinin haritalama çalışmalarında kullanılmasında [4], İHA’ların geniş ölçekli afet çalışmalarında iletişim sağlamasında [5], yüksek hassasiyetli sayısal yükseklik modeli üretilmesi ve ormancılık alanlarında kullanılmasında [6], tarihi eserlerin ve alanların röleve ve modellerinin çıkartılması [7] gibi pek çok disiplinde etkin çalışmalar yapılmakta ve olumlu sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca Tekirdağ yöresinde, yaklaşık 12 adet farklı ocağın incelendiği çalışmada, İHA’lar ile alınan görüntülerin işlenmesi ile elde edilen sonuçların başarısı ve uydu fotoğraflarına göre üstünlükleri belirtilmiştir [8]. İnsansız hava araçlarının başarısını ve maden sahalarında kullanımını ele alan bir diğer çalışmada ise İHA fotogrametrisinin, açık maden işletmelerinde kullanımının gerek emek-zaman gerek iş güvenliği gerekse maliyet açısından büyük avantajlar sağladığı net olarak ortaya konulmuştur [9].

Madencilik endüstrisinde de özellikle açık işletme maden planlarının her aşamasında, imalat haritalarının çıkarılmasında, basamak geometrilerinin ve stabilitesinin kontrolünden, saha rehabilitasyon çalışmalarına kadar bir madencilik girişiminin her aşamasında kullanılan İHA’lar, son zamanlarda sahalardaki hassas ve kısa zamanlı alan ve hacim ölçümlerinin yapılmasında aktif halde kullanılmaktadır. Hacim ve alanlar hem yerinde hem de stok sahasında ölçülebilmekte bu sayede nakliye planlaması için kullanılacak miktar, kabarma faktörü ve/veya sıkışma faktörü gibi parametreler sağlıklı şekilde ortaya koyulabilmektedir.



Bu çalışmada üzerinde durulduğu gibi, insansız hava araçlarının, uygun yazılımlar ile madencilik operasyonlarında ya da herhangi bir kazı alanında kullanımı, geleneksel yöntemlerden farklı olarak birkaç yüz nokta ile değil, milyonlarca noktalık yoğun nokta bulutlarıyla oluşturulabilmektedir. Bu sayede alınan ölçüm ve belirlenen hacimsel veriler çok daha hassas tamamlanmakta ve elde edilen verilerin hata payları da bir o kadar düşük tutulmaktadır. İHA'ların önceden öngörülebilir uçuş planına bağlı olarak otomatik uçabilmesi, alınan ölçümlerdeki insan hatalarını en aza indirmekte ayrıca doğru açı ve sistematik görsel eldesi, geniş çalışma alanlarında dahi hassas ölçümleri de mümkün kılmaktadır.

## 2. Materyal ve metod

Alan çalışmasında kullanılan İHA, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) nün yayınladığı ve Tablo 1'de gösterildiği gibi azami kalkış ağırlığı 1388 gram olan, İHA-0 sınıfına dahildir [11].

1 inçlik 20 MP CMOS sensörü ve 35 mm'lik odak uzaklığı olan tek parça lensi ile 5472 × 3648 pixel çözünürlükle JPG ve RAW formatında görsel eldesi yapabilen 4 pervaneli İHA, havada tek bir batarya ile 27 dakika kalabilmektedir [10]. Çalışma kapsamında 2 yedek batarya ile kullanılan cihazın, değişmeyen hava koşullarında stabil olarak çalışması ve dolayısı ile aynı koşullarda veri üretmesi sağlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Saha çalışmalarında kullanılan İHA ve alan kontrol noktası örneği.

Tablo 1. İnsansız hava araçları sınıfları [11].

Sınıf Kodu	Sınıf Özelliği
İHA-0	Azami kalkış ağırlığı 500 gr (dâhil) – 4kg aralığında olan İHA'lar
İHA-1	Azami kalkış ağırlığı 4 kg (dâhil) – 25 kg aralığında olan İHA'lar
İHA-2	Azami kalkış ağırlığı 25 kg (dâhil) – 150 kg aralığında olan İHA'lar
İHA-3	Azami kalkış ağırlığı 150 kg (dâhil) ve daha fazla olan İHA'lar

Ek olarak GLONASS ve GPS uydu desteği olan konumlandırma modülü, 10 m/s'lik rüzgar direnci, 7 km yatay, 500 m dikey kumanda kontrol mesafesi, 0 – 40 C°'lik ısı toleransı, 2.4 ve 5.8 Ghz frekans kanalları arasında ihtiyaç durumunda geçiş

yapabilmesi ve ön, arka, yan ve alt sensörleri sayesinde, maden sahalarında kullanılmak üzere bu çalışma için tercih edilmiştir.

### **2.1. Küresel konumlama sistemi**

Çalışma içerisinde kullanılan İHA'ya ek olarak, konumlandırma sistemi olarak, Ashtech Promark 800 GNSS cihazı kullanılmıştır. Üretici firmanın Z-Blade teknolojisi ile GNSS performansı optimize edilmiş sistem 120 adet GNSS kanalına sahiptir. Gerçek zamanlı konumlamada yatayda en iyi  $10 \text{ mm} \pm 1,0 \text{ ppm}$  ve dikeyde  $20 \text{ mm} \pm 1,0 \text{ pmm}$ . hassasiyetle çalışmakta olan sistem 20 Hz'e kadar gerçek zamanlı ham data ve konum çıktısı verebilmektedir [12].

### **2.2. Kullanılan fotogrametri yazılımı ve yazılımın android uygulaması**

İHA'lar için geliştirilen ve kullanım alanı bulan birçok farklı görüntü işleme yazılımı bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan Pix4D capture uygulaması, çalışma yapılacak alanda uçuş planını ve uçuş öncesinde kapsamlı bir biçimde ön izlemeyi sağlamaktadır. Bu yazılım sayesinde verilerin işleneceği ana yazılıma görseller doğru, sabit ve üst üste bindirme oranlarıyla aktarılır. Uygulama sayesinde uçuşa başlamadan üst üste bindirme oranları (ön ve yan olarak), uçuş yüksekliği, uçuş süresi, uçuş güzergahı, kalkış ve iniş noktaları belirlenebilir.

Ayrıca çalışma içerisinde, İHA ile eldesi sağlanan görselleri girdi olarak kullanan yazılım SAM, SYM, ortofoto, yoğun nokta bulutu, indeks haritası, üç boyutlu (3B) model, kontur haritası gibi çıktılar veren Pix4D mapper yazılımlarından da yararlanılmıştır. Tercih edilen yazılım, diğer fotogrametrik yazılımlardan kendine özgü algoritması, koordinatlı veya koordinatsız çalışabilmesi, nokta üretiminde ikiden fazla görseli aynı anda kullanabilmesi ve çalışma alanının genişliği göz önüne alındığında, ayrılmaktadır.

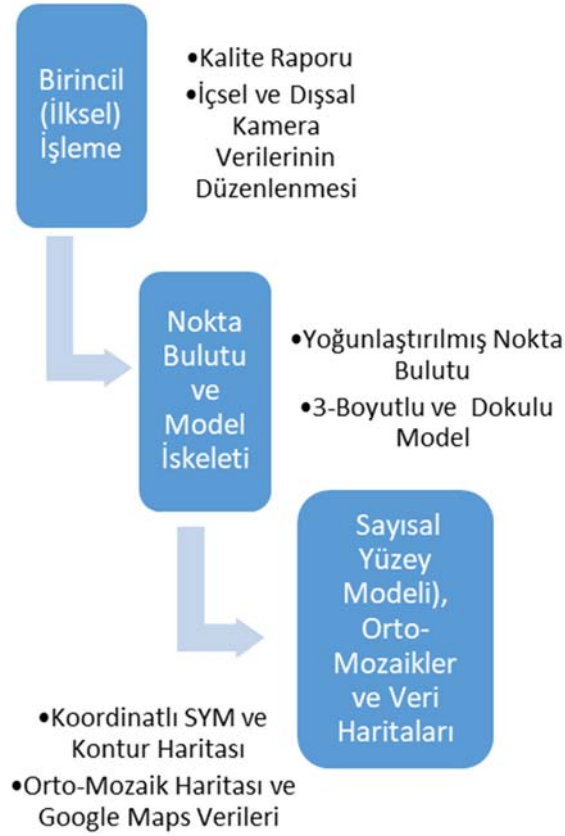
### **2.3. Metodoloji**

Görsel işleme yazılımlarından en verimli şekilde yararlanmak amacıyla çalışma yapılacak arazinin detaylı olarak incelenmesi kritik önem taşımaktadır. İHA havalanmadan önce alanın içeriğine göre, alan içerisinde yerüstü kontrol noktaları belirlenmelidir. Görsellerin işlenmesi aşamasında kullanılacak olan bu yerüstü kontrol noktaları, hata payını azaltmak ve görüntüler arası bağlantıyı güçlendirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca alan içerisinde bulunan belirgin kayaçları ve binaları önceden belirlemek ve uçuş planını bu noktaları kapsayacak şekilde gerçekleştirmek, çıkacak olan nihai sonucun hata payını önemli ölçüde azaltmaktadır. Alan büyüklüğüne ve yapısına (özellikle nehir veya göl bulunuyorsa) göre fotoğrafların üst üste bindirme oranının tespiti ve fotoğraf çekme sıklığının ayarlanması da, çıkacak sonuç için hayati önem taşımaktadır.

Uçuş planının dizaynı için, çalışma yapılacak alanın büyüklüğüne istenen detay seviyesine bağlı olarak seçilir. İHA ile uzaktan bağlantı kuran yer istasyonu (tablet veya akıllı telefon) üzerinde kurulu olan yardımcı yazılım aracılığı ile uçuş planı ayarları toplanan bilgiler ışığında belirlenir. Bu aşamada yapılacak olan uçuşun kalitesi, toplanan bilgiler kapsamında oluşturulan ayarlar ile belirlenmelidir. Şekil 2'de gösterildiği gibi fotogrametri yazılımının üç temel aşaması bulunmaktadır. İlk aşama olan ilksel işleme aşamasında yazılım İHA ile eldesi sağlanan görsellerin içine gömülü olan içsel ve dışsal kamera verilerini çıkarır ve düzenler. Işın demetinin de şekillendiği bu aşamada öncü ve seyrek bir nokta bulutu oluşturulur.

İkinci aşamada ise nokta bulutu yoğunlaştırılması ve filtrelenmesi yapılır. Yoğun nokta bulutunun şekillendiği bu aşamada üçgenleme veya nokta bulutu sınıflandırması yapılması isteğe bağlıdır.

Üçüncü ve son aşamada SYM, SAM ve ortofoto oluşumu yapılmaktadır. Ayrıca kontur haritası ve Google Maps için koordinatlı ortofoto oluşumu yapılabilir. Ayrıca yine jeoreferanslama ve bütünlüklü model eldesi de bu aşamada tamamlanır. Kullanılan yazılıma bağlı olarak katı yüzey modeli veya nokta bulutu oluşturulur. Hizalanmış nokta bulutları ile sonunda bir SAM (Sayısal Arazi Modeli) ve orto-görüntü üretmek mümkündür [13].



Şekil 2. Fotogrametri yazılımının çalışma aşamaları.

### 2.3.1. Alan ve hacim hesaplamaları

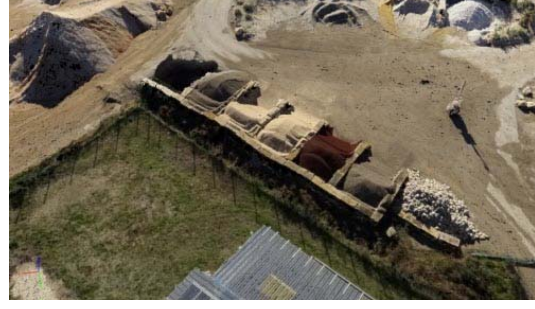
Alan ve hacim ölçümlerinin fotogrametri yazılımlarında uygulanması genellikle oluşturulan SAM ve SYM üzerinden yapılabilmektedir. Ancak bu çalışmada daha hassas ölçümler alınması için yoğun nokta bulutu üzerinden hareket edilecektir. Ölçüm için öncelikle sahanın taban sınırları belirlenmelidir. Bu sebepten, öncelikle sahanın çalışma için uygun yönteminin net olarak ortaya konması gerekmektedir [14].

Şekil 3’de görsellendiği gibi, taban sınırları net olarak görülen ve düz bir zeminde olan sahaların taban sınırları kolayca belirlenerek, yazılım içerisinde hacim ve alan ölçümü etkili bir şekilde yapılabilmektedir. Bu tarz alanlarda taban sınırları kolayca çizilebildiğinden, alınan hacim ve alan verileri de buna paralel olarak hassas olarak

ortaya konabilmektedir. Taban ve üst yüzey belirlendikten sonra iki yüzey arasındaki hacim ve yüzey alanı neredeyse hatasız olarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 3. Taban sınırları net görünen stok sahası örneği.



Şekil 4. Taban sınırları kısmen görünen stok sahası örneği.

Şekil 4’de gösterildiği gibi saha sınırlarının bir kısmı görünür diğer kısmı ise net olarak belirlenemeyen alanlarda, alan ve hacim ölçümü yapabilmek için yazılım içerisinde opsiyon olarak, taban kotunu sabitleme ya da yapılan çizime göre optimize etme işlemleri bulunmaktadır. Bu tarz sahalarda sınırlar, net olan yerler, normal olarak kalan kısımlar taban kotuna izdüşüm olarak optimize edilir. Böylece taban sınırları doğru şekilde belirlenebilir. Sonuç olarak, taban ve üst yüzeyin kesin olarak net bir biçimde belirlenmesi alan ve hacim ölçüm sistematığının öncelikli şartıdır.



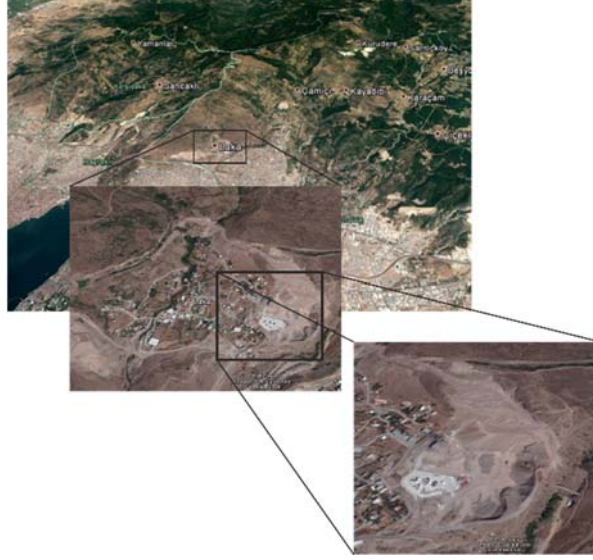
Şekil 5. Taban sınırları net olarak görünmeyen harfiyat sahası örneği.

Şekil 5’de görsellenen harfiyat alanı gibi, döküm yapılan alanlarda, döküm öncesine ait bilgi mevcut değil ise, taban sınırları gerçeğe yakın olarak çizilebilir. Bu durumda yapılan ölçüm tam net olmamakla birlikte, gerçekliği çok yüksek bir yaklaşım olarak kalır. Bu tarz durumlarda sahanın döküm öncesi ölçümü ve döküm sonrası ölçümü yapılarak, hassas bir şekilde alan ve hacim ölçümlerinin alınması çok daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

### 3. Saha çalışmaları ve bulgular

Çalışma alanı şekil 6’da gösterildiği üzere İzmir/Bornova Laka köyü adresinde bulunan harfiyat sahasıdır. Alan çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Öncelikli olarak yerinde

hacim ölçümü için belirlenen alanda kazı çalışması ve gevşemiş malzemenin hacmini ölçmek için döküm çalışmasıdır. İki alanda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler birkaç gün süren işleme sürecinden geçmiştir. Veri işleme çalışmalarının tamamı İHA destekli fotogrametri yazılımında yapılmış ve başka herhangi bir ara yazılım kullanılmamıştır.



Şekil 6. Çalışma alanı lokasyonu (İzmir / Bornova).

### 3.1. Kazı Çalışmaları

Kazı alanı içerisinde özellikle düzensiz seçilmiş olan yaklaşık 10 x 8 metrelik bir alan iş makinaları yardımıyla kazılmıştır (Şekil 7). Kazı çalışması özellikle alan, hacim veya ağırlık vb. herhangi bir parametreye bağlı olarak yapılmamıştır.



Şekil 7. Ölçümler için sahada yapılan kazı çalışması.

Kazı çalışması öncesinde İHA ile kısa süreli planlı otomatik ve manuel olmak üzere toplam iki uçuş, kazı sonrasında ise manuel olarak bir uçuş daha yapılmıştır. Şekil 8'de kazılmış alan, nokta bulutu olarak görsellenmiştir. Şekil 9'da ise kazılan alanın yan duvarlarından biri yine nokta bulutu üzerinden gösterilmiştir. Ayrıca sahada kazısı yaptırılan alan GNSS cihazı ile ölçülmüş ve Şekil 10'da ölçüm yapılan noktalar üçgenlemeleriyle birlikte verilmiştir. Bu işlem ölçüm ekibi tarafından kontrol amaçlı

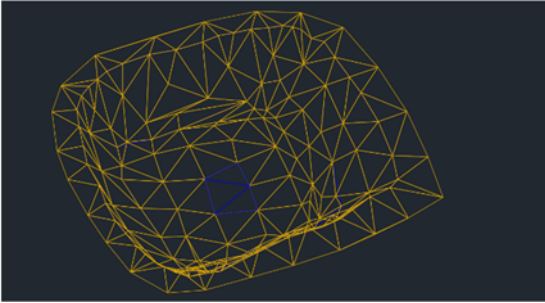
yapılmış olup, daha sonra karşılaştırma için kullanılacaktır. Şekil 11’ de ise kazı alanının nokta bulutu görüntüsü, aşağıdan bakışla verilmektedir.



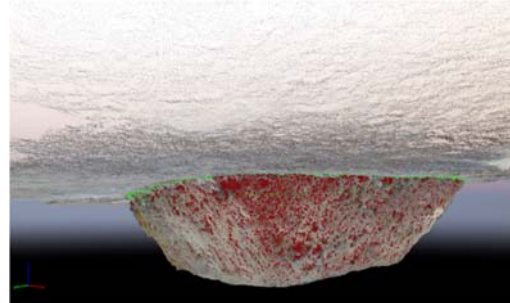
Şekil 8. Kazı alanı nokta bulutu görüntüsü.



Şekil 9. Kazı alanı nokta bulutu görüntüsü (İçten).



Şekil 10. Geleneksel Ölçüm methoduyla alınan noktalar ve üçgenlemeleri.



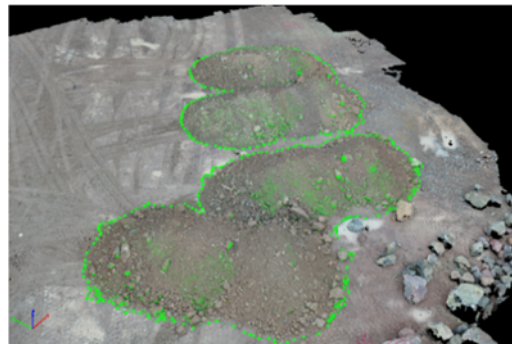
Şekil 11. IHA ile kazı alanı ölçümü üçgenleme aşamasının nokta bulutu üzerinden görüntüsü (alt görünüş).

### 3.2 Döküm çalışmaları

Kazı alanından boşaltılan hacmi yüklenerek çıkan kamyonlar, kantarda tartılarak, önceden belirlenen döküm alanına malzemenin dökümünü yapmıştır. Döküm öncesi ve sonrasında birer manuel uçuş yapılmış ve Şekil 12’de, döküm yapılacak alan nokta bulutu üzerinde gösterilmiştir (döküm öncesi). Şekil 13’de ise döküm sonrası alan, taban sınırları ile nokta bulutu üzerinde görsellenmiştir.



Şekil 12. Döküm alanı nokta bulutu görüntüsü.



Şekil 13. Döküm sonrası, döküm alanı nokta bulutu görüntüsü.

Kazı ve döküm alanında gerçekleştirilmiş olan dört nokta bulutu için ön bilgiler (kullanılan görsel ve nokta sayıları ile nokta yoğunlukları) tablo 2, tablo 3, tablo 4 ve tablo 5'te verilmiştir. Her bir işlem için 100 ile 450 arasında görsel kullanılarak yapılan çalışmada nokta yoğunlukları adet/m<sup>3</sup> olarak verilmektedir.

Tablo 2. Kazı öncesi uçuş için ön bilgi.

Proje İsmi	Kazı Öncesi
Kullanılan görsel sayısı	439
Koordinatlı nokta sayısı	~55 Milyon
Nokta yoğunluğu	6.859,27

Tablo 3. Kazı sonrası uçuş için ön bilgi.

Proje İsmi	Kazı Sonrası
Kullanılan görsel sayısı	95
Koordinatlı nokta sayısı	~13 Milyon
Nokta yoğunluğu	848.220,00

Tablo 4. Döküm öncesi uçuş ön bilgi

Proje İsmi	Kazı Öncesi
Kullanılan görsel sayısı	241
Koordinatlı nokta sayısı	~29 Milyon
Nokta yoğunluğu	48.911,60

Tablo 5. Döküm sonrası uçuş ön bilgi

Proje İsmi	Kazı Sonrası
Kullanılan görsel sayısı	287
Koordinatlı nokta sayısı	~42 Milyon
Nokta yoğunluğu	669.509,00

Geleneksel ölçüm metodu ile (GNSS kullanımı ile) yapılan ölçüm sonrasında, kazı alanında Tablo 6' da verilen bilgiler elde edilmiştir. İki yöntemi kıyaslamak adına İHA ile elde edilen hesaplamalardan elde edilen sonuçlar da Tablo 6'de gösterilmektedir.

Tablo 6. Ölçüm sonuçlarının gösterimi.

	Geleneksel metodlar ile kazı sonrası ölçüm sonuçları	İHA ile yapılan ölçüm ve hesaplama sonuçları
Ölçülen Hacim (m <sup>3</sup> )	86,77	87,13
Hata Payı (m <sup>3</sup> )	Belirtilmedi	±0,17
Koordinatlı nokta sayısı (adet)	262	~12 Milyon 675 Bin

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

İnsansız hava araçlarının (İHA) madencilik uygulamalarına dahil edilmesi ve kullanım potansiyelinin ortaya çıkarılması amacı ile hazırlanan çalışmada, açık işletme yoğunluklu olarak çalışan ülkemiz madencilik sektöründe, daha kısa sürelerde, daha hatasız ve daha pratik ölçüm ve buna bağlı olarak hesaplamaların yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada, insansız hava aracı ve uygun yazılım kullanımı ile; özellikle hacim, kütle, ve kabarma faktörü gibi kavramların, hesaplanması zor alanlarda, yerinde tespitine yönelik olarak çalışılmıştır. Maden işletmelerinde özellikle üretilen malzemenin nakliyesi sırasında yerinde belirlenmesi gereken bu parametrelerin, tam ve kesin olarak bilinmesi gerek makine ekipman seçimi gerekse maliyetlerin belirlenmesindeki rolü büyüktür.

İHA destekli fotogrametri yazılımları ile yapılan ölçüm ve bilgisayar destekli hesaplamalar sonucunda, döküm alanı basamağında, rastantısal olarak yaklaşık  $8 \times 10 \times 1$  m. (en, boy, yükseklik) ebatlarında belirlenen kazı geometrisinin hacmi belirlenmeye çalışılmıştır.

İnsansız hava aracı kullanımı ile, 15-20 metreden alınan 100 adet koordinatlı görsel üzerinde yaklaşık 12 Milyon koordinatlı nokta kullanılarak belirlenen alandaki hacim  $87.13 \text{ m}^3$  olarak  $\pm 0,17$  m. lik bir hata payı ile hesaplanmıştır. Aynı değer topograflar tarafından klasik metotlar kullanılarak (GNSS yardımı ile) yapılan ölçümler sonucunda  $86,77 \text{ m}^3$  olarak ölçülmüştür. Kazı işleminden sonra yapılan tartım ve kantar bilgileri de göz önüne alınarak (kazılan hacim 154.04 ton), ele alınan döküm alanı üzerindeki malzemenin yerindeki birim hacim ağırlığı yaklaşık  $1,77 \text{ ton/m}^3$  olarak belirlenmiştir.

Benzer biçimde kazısı yapılan ve kazı hacmi belirlenen malzemenin, döküm alanındaki hacminin belirlenebilmesi için 287 adet koordinatlı görsel alımı yapılarak yaklaşık 41 Milyon nokta üzerinde çalışılmıştır. Hesaplamalar sonucunda dökümün hacmi  $89,11 \text{ m}^3$  olarak elde edilmiştir. Buradan hareketle döküm alanından alınarak, yığın yapılan malzemenin kabarma faktörü (k) 1,02 olarak belirlenmiştir. Bu değer işletmeden işletmeye farklı formasyonların kendine has özellikleri nedeni ile değişeceğinden her işletme için ayrı ayrı belirlenmelidir.

Yukarda sayılan tüm çalışmalar iki ayrı uçuş planı ile yaklaşık bir saatlik toplam uçuş süresinde alınmıştır. Alınan koordinatlı görsellerin işlenmesi, düzenlenmesi ve yorumlanması işlemleri de göz önüne alındığında ilksel sonuçlar 6-7 saat gibi kısa bir sürede ortaya konulmaktadır. Bu durum İHA lar ile yapılacak olan hesaplama ve ölçüm işlerinin güvenilirliğinin yanı sıra, hesaplamaların çok kısa sürede tamamlanabilmesi açısından da önemlidir.

Bunlardan bağımsız olarak, özellikle iş sağlığı ve güvenliği gereksinimleri içerisinde, özellikle ulaşılması zor ve riskli olan alanlarda ölçümlerin bu denli hassas ve yüksek doğruluk payı ile alınabilmesi gerek insan gerekse işletme makine ekipman emniyet ve sağlığı için vazgeçilmez bir unsurdur. Özellikle dünya ölçeğinde aktif ve hızla artan bir oranda kullanım alanı bulan İHA' ların ülkemizde de, giderek artan iş hacimleri ve özellikle açık maden sahalarının kontrolü göz önüne alındığında, ileriki yıllarda çok daha yaygın ve farklı amaçlar için kullanılacağı açıktır.

## Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmanın yapılmasında 2017.KB.FEN.021 nolu projeye olan desteği nedeni ile, DEU Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğüne teşekkür eder.

## 5. Kaynaklar

- [1] Öztürk, O., Bilgilioğlu, B.B., Çelik, F.M., Bilgilioğlu, S.S. ve Uluğ, R., İnsansız hava aracı (iha) görüntüleri ile ortogörüntü üretiminde yükseklik ve kamera açısının doğruluğa etkisinin araştırılması, **Journal of Geomatics**, 2(3),135-141, (2017).
- [2] Niethammer, U., Rothmund, S. ve Joswig, M., UAV-based remote sensing of the lowmoving landslide Super-Sauze, **Proceedings, International Conference**



- on Landslide Processes**, International Ass. from Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling CERG, 69-74, Strasbourg, (2009).
- [3] Wing, M.G., Burnett, J., Johnson, S., Akay, A.E. ve Sessions, J., A low-cost unmanned aerial system for remote sensing of forested landscapes, **International Journal of Remote Sensing Applications**, 4(3), 113-120, (2014).
- [4] Döner, F., Özdemir, S. ve Ceylan, M., Use of unmanned aircraft vehicle systems in data acquisition and mapping studies, **Proceedings, 5<sup>th</sup> Remote Sensing-GIS Symposium**, 14-17 İstanbul, (2014).
- [5] Mesas-Carrascosa, F.J., Notario-García, M.D., Larriva, J.E.M., Orden, M.S., ve Porras, A.G.F., Validation of measurements of land plot area using UAV imagery, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 33, 270 - 279, (2014).
- [6] Akgül, M., Yurtseven, H., Demir, M., Akay, A.E., Gülci, S. ve Öztürk, T., Production of high precision digital elevation model with unmanned aerial vehicles and use in forestry, **Journal of the Faculty of Forestry**, 66, 1,104-118, (2016).
- [7] Yakar, M. ve Mırdan, Ö., Problems encountered in the modeling of historical monuments with unmanned aerial vehicle, **Journal of Geomatics**, 2(3), 118-125, (2017).
- [8] Sarı, H ve Özcan, O., Determining the spatial effects of quarries using a drone: the case of the Süleymanpaşa-Tekirdağ quarries, **Fresenius Environmental Bulletin**, 28, 1, 53-61, (2019).
- [9] Gül, Y., Açık maden işletmelerinde insansız hava aracı (İHA) uygulamaları, **Türkiye Jeoloji Bülteni**, 62, 99-112, (2019).
- [10] <https://www.dji.com/phantom-4-pro/info>, (01.10.2018).
- [11] <https://www.iha.sghm.gov.tr>, (01.10.2017).
- [12] <http://geoconnect.com.au/spectra-precision-promark-800/>, (01.11.2018).
- [13] Kim, J.O., ve Lee, J.K., UAV application for process control of the reclamation, **Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Water Safety Symposium Journal of Coastal Research**, 309–313, Florida, (2017).
- [14] <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/217114246>, (12.10.2017).

# Üç hücreli motif genelleme ile oluşturulan küçük ölçekli biyolojik sinir ağlarının bellek davranışı

Ahmet TURAN<sup>\*1,\*</sup>, Temel KAYIKÇIOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kastamonu

<sup>2</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kanuni Kampüsü, Trabzon

Geliş Tarihi (Received Date): 29.11.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 04.03.2019

## Özet

Biyolojik bellek yapısını ve fonksiyonlarını anlamak için teorik ve deneysel pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda biyolojik ağların, özel hücreler arası bağlantılardan (motifler) oluştuğu görülmüştür. Deneysel çalışmalar ışığında oluşturulan modeller üzerinde, biyolojik ağlardan oluşan bellek yapıları ve bu yapıların temel yapı taşı olan motifler incelenmektedir. Çalışmamızda sinir hücresi, sadece soma bölümünden oluşan ve tek bölmeli hücre şeklinde modellendi. Hücreler arası iletişim kimyasal sinaps şeklinde tercih edildi ve modelde hücreler arası iletişim incelendi. Hücre rolleri giriş, ara ve çıkış olarak düşünülen üç hücreli motiflerde, uzun -ve kısa dönem bellek davranışı çalışıldı. Üç hücreli motiflerin giriş, ara ve çıkış hücrelerinin çoklanma yöntemiyle oluşturulan (motif genelleme) küçük ölçekli biyolojik ağların, uzun -ve kısa dönem bellek davranışları tespit edildi. Motiflerde ve motiflerden oluşan ağlarda yaptığımız çalışmalardan elde edilen bulgular karşılaştırıldı. Biyolojik ağın, kendisini oluşturan motiflerle aynı bellek davranışını sergilediği gösterildi. Böylece biyolojik ağların bellek davranışlarını anlayabilmek için öncelikle ağda bulunan motifler üzerinde daha detaylı çalışılması gerektiği ortaya konuldu.

**Anahtar Kelimeler:** Biyolojik ağ, kısa-dönem bellek, sinaptik iletişim, uzun-dönem bellek, uyarıcı ve engelleyici uyaran, üç hücreli motif.

\* Ahmet TURAN, aturan@kastamonu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5653-9695>

Temel KAYIKÇIOĞLU, tkayikci@ktu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-6787-2415>

## Memory behavior of small-scale biological neural networks generated by generalization of a three-cell motif

### Abstract

*Many theoretical and experimental studies are performed to understand the structure and functions of biological memory. In these studies, it was seen that biological networks consisted of special intercellular connection (motifs). On the models created in the light of experimental studies, the memory structures composed of biological networks and the basic building blocks of these structures are examined. In our study, the nerve cell was modeled as a single compartment cell consisting only of soma section. Intercellular communication was preferred in the form of chemical synapses and the intercellular communication was examined in the model. Long-and short-term memory behavior was studied in three-cell motifs which were thought to be input, intermediate and output of cell roles. Long-term and short-term memory behaviors of small-scale biological networks which were formed by multiplexing of input, intermediate and output cells (motif generalization) of three-cell motifs were determined. The results of our studies in the networks consisting of motifs and motifs were compared. It was shown that the biological network exhibited the same memory behavior as its motifs. Thus, in order to understand the memory behaviors of the biological networks, it was revealed that the motifs in the network should be studied in more detail.*

**Keywords:** *Biological network, short-term memory, synaptic communication, long-term memory, excitatory and inhibitory stimuli, three-cell motif,*

### 1. Giriş

Bilgiler, beyindeki sinir hücrelerinin oluşturduğu, ağ ortamında tutulmaktadır. Fakat nasıl tutulduğu henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Biyolojik sinir ağ yapılarını tanımlamak için, deneysel ortamlarda, bazı canlıların nöral bağlantı haritaları oluşturulmuştur [1-6]. Sinir ağları; ağ motifi olarak tanımlanan ve ağda çokça görülen, özel fonksiyonlu alt ağ'lardan meydana gelir [2,3,5,7-11]. Öğrenme sürecinde, hücreler arasında yeni bağlantılar kurulmakta, bunların bazıları geçici bazıları kalıcı olmaktadır [12-16]. Öğrenme sürecini anlamak için, biyolojik çalışmalardan elde edilen veriler, hesapsal sinir bilimi tarafından kullanılmaktadır. Hesapsal nöroloji, biyolojik sinir ağlarını modellemek için, hesapsal teknikleri kullanmaktadır. Birçok çalışmada, biyolojik çalışmalardan elde edilen verilere uygun modeller kullanılmaktadır [17-19].

Biyolojik ağlardaki bellek sistemlerinin, temelde bellek yeteneğine sahip motiflerden oluştuğuna dair bulgular vardır. Bu motiflerin fonksiyonlarının anlaşılması, tüm ağların davranışlarının anlaşılması için bir adım olacaktır [15,20]. Bellek yapılarından özellikle, kısa- ve uzun dönem bellek davranışları araştırılmaktadır. Kısa dönem belleğin işleyişinden; sinir hücresi grupları arasındaki uyarı yapısının sorumlu olduğu düşünülmektedir. Bilginin uzun dönem bellekte saklanması ise; beyindeki nöral bağlantılarda meydana gelen, kalıcı, fonksiyonel, biyokimyasal ve yapısal değişikliklerle mümkün olabileceği düşünülmektedir [12,21-23]. Biyolojik ağlar, ağ motiflerinin giriş, çıkış ve ara hücrelerinin çoğullanması mantığına dayalı, “motif genelleme” şeklinde tanımlanan sistematik bir yaklaşımla, ortak mimari yapıya sahip,

farklı büyüklükteki motif bağlantıları şeklinde oluşturulmaktadır [24]. Amacımız; beyinde kısa veya uzun süreli bilgi tutmanın ne şekilde gerçekleştiğini, motiflerden oluşturduğumuz ağ modeli üzerinde göstermektir. Daha gerçekçi olması için, Hodgkin-Huxley hücre modeli ve kimyasal sinaptik iletişim modelini tercih ettik. Literatürde, bu alanda yapılmış çalışmalarda motifler incelenirken, basitlik olması açısından motifleri oluşturan hücreler, topla-ateşle gibi basit yöntemlerle modellenmiştir. Ayrıca hücreler arası sinaptik bağ kullanılmayıp, dışarıdan gelen uyarı, hücreye gürültü akımı şeklinde uygulanmıştır [3,25]. Literatürde çalışılmış sınırlı sayıda motif yerine, Tablo 1’de görülen ve çizge topolojisi kullanılarak sistematik şekilde oluşturduğumuz, üç hücreli tüm motifler üzerinde çalıştık. Bu üç hücreli motiflerden, uzun dönem ve kısa dönem bellek davranışı gösterenlerden seçtiğimiz bir kaçıyla, motif genelleme yapılarak oluşturulan, küçük ölçekli biyolojik ağ yapısının bellek davranışı incelendi. Tablo 2 ve Tablo 3’de görüldüğü gibi, motif genelleme yaklaşımı ile oluşturduğumuz biyolojik ağ yapılarını, uzun -ve kısa dönem bellek davranışı açısından değerlendirdik. Motiflerin ve küçük ölçekli ağların bellek davranışı gösterme durumları karşılaştırıldı.

## 2. Veri ve yöntemler

Çalışmamızda, motifleri oluşturan hücreler ve aralarındaki iletişim için, Hodgkin-Huxley’in deterministic bölmeli model yapısı tercih edildi [26,27]. Hücreler arası iletişim, güçlü bağlantılı sinaptik iletkenlik fonksiyonu ile modellendi. Hücreler arası uyarımlar; uyarıcı (excitatory-E) ve engelleyici (inhibitory-I) potansiyel değerlerine sahip kimyasal sinaps [25,28-32] şeklinde çalışıldı. Motifleri oluşturan hücreler, soma kısmına ait tek bölme şeklinde modellendi [32,33]. Hücreler, aldıkları uyarılara göre Şekil 1’de görülen farklı modellenir [28]. Şekil 1(a)’da görülen ve sadece dışarıdan harici akım uyarımı alan hücrenin, devre modeline ait çözüm, denklem 1’de verilmiştir [32].

$$C_m \frac{dV_m}{dt} = -G_L(V_m - E_L) - \bar{G}_{Na}m^3h(V_m - E_{Na}) - \bar{G}_Kn^4(V_m - E_K) + I_{uyg}(t) \quad (1)$$

Çalışmalarda, sinaptik uyarı geldiğinde açılan transmitter-aktivasyonlu iyon kanalları, denklem 2’de görülen zaman bağımlı  $g_{syn}(t)$  iletkenliği ile tanımlanmıştır. Diğer hücrelerden gelen uyarımın, modele eklendiği devre koluna ait akım ve birden çok uyarı alması durumundaki çözüm, denklem 3 ve 4’de gösterildi [28].

$$g_{syn}(t) = g_{max} \frac{t}{\tau} e^{(1-\frac{t}{\tau})} \quad (2)$$

$$I_{syn}(t) = g_{syn}(t)(V_m - E_{syn}) \quad (3)$$

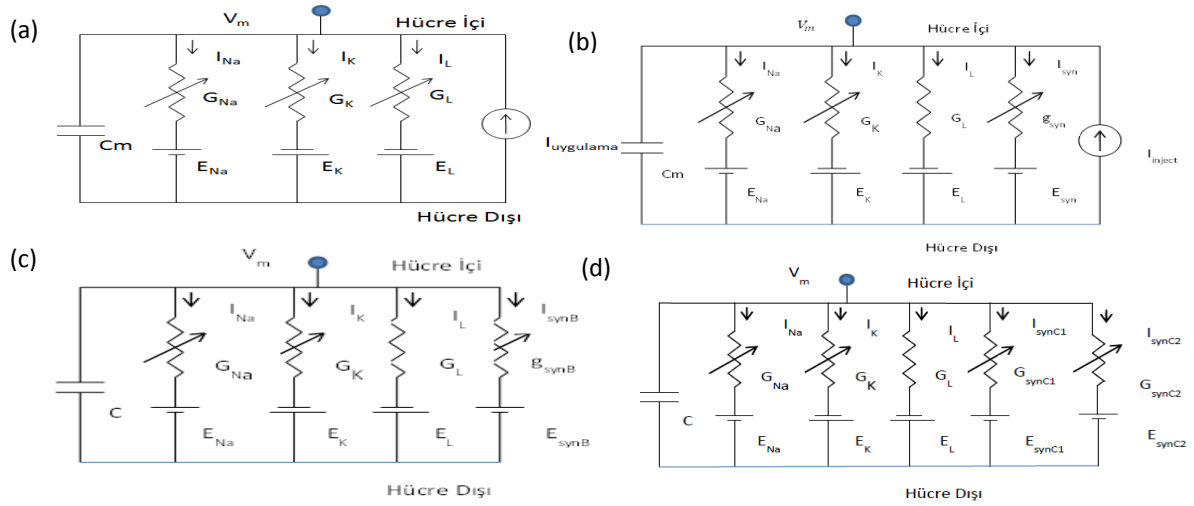
$$C_m \frac{dV_m}{dt} + g_{rest}V_m + g_{syn}^{(1)}(t)(V_m - E_{syn}^{(1)}) + g_{syn}^{(2)}(t)(V_m - E_{syn}^{(2)}) + \dots = 0 \quad (4)$$

Çalışmamızda, Hodgkin-Huxley’in, sinir hücresinin soma bölümünde, hücre zarı parçacığı üzerinde yaptıkları biyolojik çalışmalardan elde edilen ve yaygın bir şekilde tercih edilen parametre değerlerini kullandık. İyon kanal iletkenlikleri ( $\bar{G}_{Na} = 120 \text{ mS/cm}^2$ ,  $\bar{G}_K = 36 \text{ mS/cm}^2$ ,  $G_L = 0.3 \text{ mS/cm}^2$ ), denge potansiyelleri ( $E_{Na} = 50 \text{ mV}$ ,  $E_K = -77 \text{ mV}$ ,  $E_L = -54.4 \text{ mV}$ ), hücre zarı kapasitansı ( $C_m = 1 \mu\text{F/cm}^2$ ), hücre zarı dinlenme gerilimi ( $V_r = -65 \text{ mV}$ ), sinaptik denge potansiyelleri (engelleyici için  $E_{syn} = -70 \text{ mV}$ , uyarıcı için  $E_{syn} = -10 \text{ mV}$ ), hücreler arası maksimum sinaptik iletkenlik ( $g_{max} = 64 \text{ nS}$ ), sinaptik iletkenlik zaman sabiti ( $\tau = 25 \text{ ms}$ ) [26,28,29] ve

sayısal diferansiyel denklem çözümleri için zaman adım aralığı ( $\Delta t = 10\mu s$ ) şeklinde seçildi. Çalışmalarda genellikle, üç sinir hücresinden oluşan motiflerin uzun –ve kısa dönem bellek davranışı incelenmiştir [34,35]. Bu çalışmada üç hücreli yönlendirilmiş tüm motiflerin elde edilmesinde, çizge topolojisi [3,24] kullanıldı. Hücrelerin; giriş (A), ara (B) ve çıkış(C) olarak değerlendirilmesi çalışmalarda kabul görmüştür [24,32]. Topolojik yöntemle elde edilen ve bu özellikleri taşıyan 42 adet motif Tablo 1’de gösterildi ve çalışmamızda değerlendirildi. Çalışmalarda kolaylık olması açısından motifler isimlendirildi, motiflerin sinaptik bağlantı yönü ve sıralaması belirtildi.

Tablo 1. Üç hücreli tüm motifler.

Motif Adı ve bağlantı şekli	Motif Şekli (hücrelerin uyarı yönü)	Motif Adı ve bağlantı şekli	Motif Şekli (hücrelerin uyarı yönü)	Motif Adı ve bağlantı şekli	Motif Şekli (hücrelerin uyarı yönü)	Motif Adı ve bağlantı şekli	Motif Şekli (hücrelerin uyarı yönü)
MTF1 B-C, A-C		MTF2 A-B, B-C		MTF3 A-B, A-C		MTF4 C-A, A-C B-C	
MTF5 A-B, A-C B-C		MTF6 C-B, A-C C-A		MTF7 C-B, A-C B-C		MTF8 C-B, A-B A-C, B-C	
MTF9 C-B, A-C B-C, C-A		MTF10 A-B, A-C B-C, C-A		MTF11 A-B, A-C B-C, B-A		MTF12 C-B, A-C B-C, C-A, B-A	
MTF13 C-B, A-B, A-C B-C, C-A, B-A		MTF14 A-B, A-C B-A		MTF15 A-B, A-C C-A, B-A		MTF16 C-B, A-B A-C, B-A	
MTF17 A-B, A-C B-C, C-A, B-A		MTF18 A-C, B-A		MTF19 A-B, B-C C-A		MTF20 A-B, B-C B-A	
MTF21 C-B, A-B B-C		MTF22 C-B, A-C B-C		MTF23 C-B, A-B A-C		MTF24 A-B, A-C C-A	
MTF25 C-B, A-C		MTF26 A-C, B-A C-A		MTF27 C-B, A-B B-C, B-A		MTF28 C-B, A-B A-C, B-C, C-A	
MTF29 C-B, A-B A-C, B-C, B-A		MTF30 C-B, A-B A-C, C-A		MTF31 C-B, A-B A-C, C-A, B-A		MTF32 C-B, A-B B-C, C-A	
MTF33 C-B, A-B B-C, C-A, B-A		MTF34 A-B, B-C C-A, B-A		MTF35 C-B, A-C C-A, B-A		MTF36 C-B, A-C B-C, B-A	
MTF37 B-C, C-A B-A		MTF38 A-C, B-C C-A, B-A		MTF39 C-B, B-C C-A, B-A		MTF40 A-C, B-C B-A	
TMTF1 A-B		TMTF2 A-B B-A					



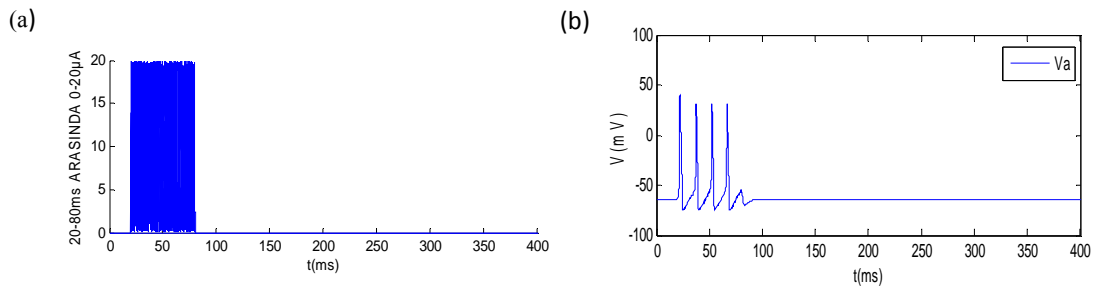
Şekil 1. (a) Harici akım uygulanan hücre modeli, (b) harici akım uygulanan ve tek sinaptik giriş alan hücre modeli, (c) sadece tek sinaptik giriş alan hücre modeli, (d) iki sinaptik giriş alan hücre modeli.

### 3. Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada amacımız, motiflerin ve motiflerden oluşan küçük ölçekli ağların bellek özelliklerinin benzerliğini belirlemektir. Bu amaçla tek hücre modelinden, motif ve biyolojik ağ yapısı modeline devam eden çeşitli uygulamalar yapıldı. Hücrenin, harici akım uyarısına cevabı, hücrelerin birbirlerini uyarma durumları, motiflerde hücrelerin birbirlerini (E veya I) uyarma şekillerinin değişken olması durumları ve motif genelleme ile oluşturulan biyolojik ağların, uzun- ve kısa dönem bellek davranışları incelendi.

#### 3.1. Hodgkin–Huxley sinir hücresi modelinin uyarımlara cevabının incelenmesi

Tek bölmeli Hodgkin–Huxley hücre modeline, hücreye birçok kaynaktan gelen ve uyarıların toplamını temsil eden, düzgün dağılımlı rastlantısal akım uyarımı yapıldı. Şekil 2(a)'da görülen böyle bir akım 0 – 20µA arasında rastlantısal değerler alır. Akım Şekil 1(a)'daki modele uygulandığında, Şekil 2(b)'deki gibi uyarı akımının belli seviyelerinde, hücrede aksiyon potansiyelleri oluştu. Akım uygulaması kesildiğinde aksiyon potansiyeli üretimi de kesildi.

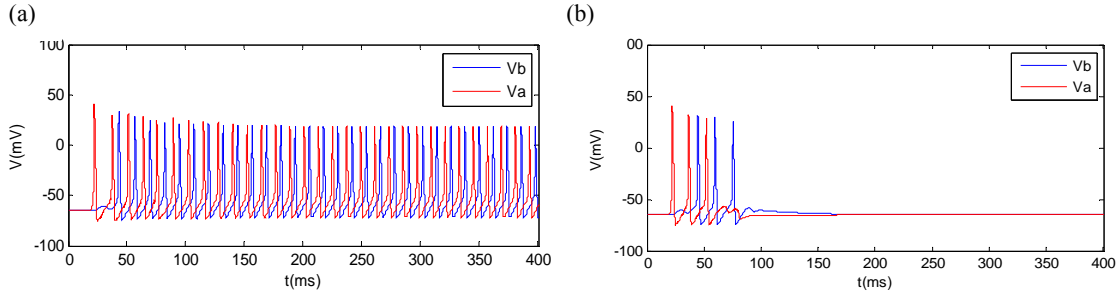


Şekil 2. (a) 0 – 20µA düzgün dağılımlı rastlantısal akım, Şekil 1-a'daki hücre modeline uygulandığında (b) hücre modelinin ürettiği aksiyon potansiyelleri dizisi.

### 3.2. Karşılıklı etkileşimli iki sinir hücresi modelinin uyarımlara cevabının incelenmesi

Tablo 1’de gösterilen TMTF2 isimli, karşılıklı etkileşimli iki sinir hücresi bağlantısı, birçok üç hücreli motif yapısı içinde görülür [3]. Böyle iki hücrenin elektriksel modeli, Şekil 1(b) ve Şekil 1(c) gösterilmiştir. Şekil 1b’deki modelde A hücresi, hem harici akım, hemde B hücresi tarafından uyarılmaktadır. Şekil 1c’deki modelde ise, B hücresi sadece A hücresi tarafından uyarılmaktadır. A hücresine Şekil 2(a)’da görülen harici akım uygulandı ve A hücresinde aksiyon potansiyelleri oluştu. Bu durumda B hücresinde denklem 2’de görülen zaman bağımlı  $g_{synB}$  iletkenliği aktif oldu. Uyarım türü (AB-EE) olduğunda B hücresinde aksiyon potansiyelleri oluştu. B hücresinde oluşan aksiyon potansiyellerinin A hücresini uyarmasından  $g_{synA}$  iletkenliği aktif oldu. Uyarım türü (uyarıcı-E) olduğunda A hücresinde aksiyon potansiyellerinin desteklendiği gözlemlendi. A ve B hücrelerinin sürekli karşılıklı uyarımı nedeniyle, harici akım uyarımı kesilse de, aksiyon potansiyellerinin Şekil 3(a)’da görüldüğü gibi sürekli devam ettiği görüldü.

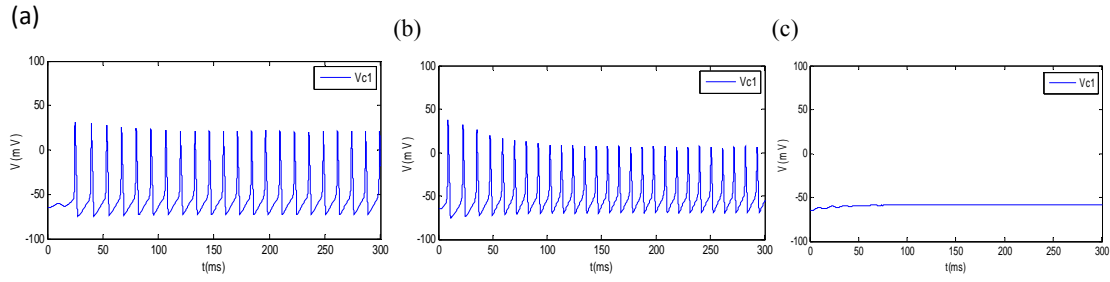
Bu durum, öğrenme uyarısı kesildikten sonra, bilginin bellekte tutulmaya devam ettiği, uzun-dönem bellek davranışının bir örneğidir. Şekil 3(b)’de hücreler arası uyarım (AB-EI) olduğunda, A ve B hücrelerinde oluşan aksiyon potansiyellerinin, A hücresine yapılan harici akım uyarımı sona erince kesildiği gösterildi. Hücreler arası uyarım (AB-IE, II) olduğunda, B hücresinde aksiyon potansiyeli üretilmedi. Bu bölümde hücreler arası uyarı türünün (E,I) etkisi değerlendirildi. Uyarı türünün bellek yapısının oluşumunda önemli rol oynadığı gösterildi.



Şekil 3. TMTF2’de A hücresine Şekil 2(a)’da görülen akım uygulandığında ve uyarım türü (a) EE ve (b) EI olduğunda, A ve B hücrelerinde oluşan aksiyon potansiyelleri.

### 3.3. Hücre modelinin birden fazla uyarıya cevabının incelenmesi

Tablo 1’deki MTF1 motifinde, C hücresinin elektriksel modeli Şekil 1(d)’de gösterilmiştir. Bu bağlantı şekli de birçok motif yapısı içinde görülmektedir [28,36,37]. Bu bölümde; A ve B hücrelerine yapılan harici akım uyarımları sonucu, hücrelerde oluşan aksiyon potansiyelleriyle uyarılan C hücresinde, birden fazla sinaptik uyarımın etkisi incelendi. Şekil 4(a)’da, sadece A hücresine  $10\mu A$  DC akım uygulandı ve C hücresinde, frekansı  $68Hz$  olan aksiyon potansiyelleri gözlemlendi (C hücresini uyarım türü, AB-EE). Aynı akım, A ve B hücrelerinin her ikisine uygulandığında, C hücresinde, iki sinaptik uyarımın toplamı etkisinden, Şekil 4(b)’de görülen, frekansı  $72Hz$  olan bir cevap oluştu. Uyarı arttıkça oluşan aksiyon potansiyellerinin frekansı artarken genliği düşmektedir. Çoklu uyarı sayısı arttıkça, çıkışta, aksiyon potansiyeli özelliği taşımayacak şekilde genlik değeri düşmektedir. Şekil 4(c)’de C hücresini uyarı türü (AB-EI) olduğunda iki uyarımın birbirini söndürdüğü görüldü.

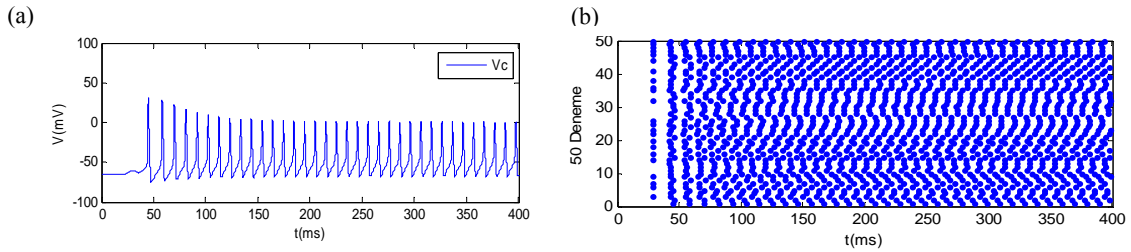


Şekil 4. MTF1’de  $10\mu A$ ’lık DC akım (a) A hücrelerine (b) A ve B hücrelerine (uyarım, AB-EE) (c) A ve B hücrelerine (uyarım, AB-EI) uygulandığında, C hücrelerinin cevabı.

Bu çalışmada, birden fazla uyarı alan C hücresi, (uyarım-E olduğunda) daha yüksek frekanslarda çıkış üretti. Farklı tür uyarımlarda (E,I) ise birbirlerinin söndürecek şekilde sönümleştirdiği gösterildi.

### 3.4. Üç hücreli motif’lerde uzun- ve kısa dönem bellek davranışının incelenmesi

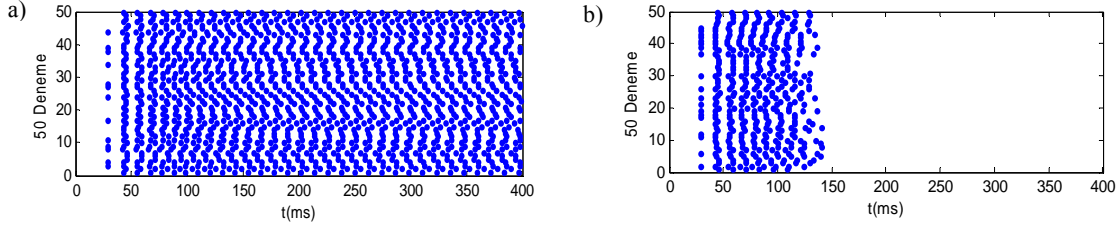
Tablo 1’deki tüm motifler, kısa –ve uzun dönem bellek davranışı yönünden incelendi. MTF11 ve MTF8 üzerinde yapılan bazı uygulamalar, Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterildi. **Bu çalışma tüm motiflere uygulandı.** MTF11’de tüm sinaptik uyarımlar (E) seçildi ve A hücrelerine, Şekil 2(a)’daki akım uygulandı. Akım uygulaması  $80\text{ ms}$  sonunda kesilse de, C çıkış hücresinde, Şekil 5(a)’da görülen aksiyon potansiyelleri oluşmaya devam etti. Motif, veriyi sürekli hafızasında tutarak uzun-dönem bellek davranışı gösterdi. Uyarı akımı rastlantısal olduğundan, her uyarımda aksiyon potansiyeli üretme zamanları farklılık gösterdi. Bu farklılığı ortaya koymak için 50 kez aynı uygulama tekrar edildi ve her denemede C hücresinde oluşan aksiyon potansiyeli oluşma zamanları grafik üzerinde gösterildi.



Şekil 5. MTF11’de C hücrelerine (uyarım-E) seçilerek, A hücrelerine Şekil 2.a’deki akım uygulandığında (a) C hücrelerinde oluşan aksiyon potansiyelleri (b) 50 deneyin her biri için C hücrelerinde aksiyon potansiyeli tepe değerlerinin zamanları.

MTF8’de, A hücrelerine Şekil 2(a)’da görülen akım  $400\text{ms}$  süreyle, 50 kez tekrarlanarak uygulandığında (uyarım-E), C hücrelerinde Şekil 6(a)’da görülen aksiyon potansiyel dizileri üretildi. Bu şartlarda motif uzun-dönem bellek davranışı gösterdi. Aynı motifte hücre uyarımları (ABC-EEI) yapıldığında, Şekil 6(b)’de görüldüğü gibi, harici akım uyarımı  $80\text{ ms}$  sonunda kesildikten sonra, yaklaşık  $60\text{ms}$  süreyle C hücrelerinde aksiyon potansiyeli üretilmeye devam etti.





Şekil 6. MTF8’de A hücresine Şekil 2(a)’daki akım uygulandığında; (a) (Uyarımlar-E) olduğunda ve (b) (Uyarımlar, ABC-EEI) olduğunda C hücresinde 50 deneyin her biri için aksiyon potansiyeli zamanları.

Dikkat edilirse motif, uyarı bittikten sonra bilginin bir süre daha tutulup unutulması şeklinde davranan, kısa-dönem bellek özeliği göstermiş oldu. Uyarı türünün değişimiyle motifin hem uzun hem de kısa dönem bellek olabildiği ortaya konuldu.

### 3.5. Uzun – ve Kısa dönem bellek davranışı gösteren motifler

Tablo 1’de görülen motiflerin tümüne, Bölüm 3.4’deki çalışmalar uygulandı. Hücrelerin uyarıcı (E) veya engelleyici (I) uyarması durumlarının tüm olasılıkları çalışıldı. Bazı motiflerin uyarı türüne bağlı olarak uzun-dönem bellek davranışı sergilediği gözlemlendi. (TMTF2, MTF4, MTF6-MTF17, MTF19-MTF22, MTF24, MTF26-MTF36 aralığı ve MTF38 motifleri). Bu motiflerin ortak yanı, üç hücre arasında C hücresine varan kapalı bir döngü olmasıdır (A-C, B-C, A-B-C şeklinde). Bu şekilde üç hücreli uzun dönem bellek davranışı gösteren motifler ve özellikleri belirlendi.

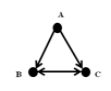
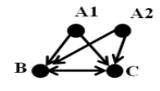
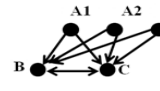
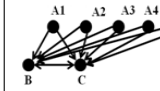

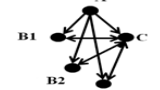

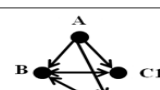
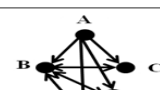
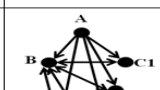
Tablo 1’deki motiflerde, tüm uyarı türleri (E,I) için kısa-dönem bellek davranışı incelendi. Bazı motiflerin uyarı türüne bağlı olarak kısa dönem bellek davranışı gösterdiği belirlendi. (MTF5-MTF7, MTF9, MTF11-MTF13, MTF15, MTF17, MTF19, MTF20, MTF22, MTF26, MTF28-MTF31, MTF33-MTF36, MTF38 ve MTF40 motifleri).

Çalışmamızda; bazı motiflerin, uyarım türüne bağlı olarak, hem uzun hem de kısa dönem bellek özeliği göstermesi, uyarım türünün bellek yapılarında çok önemli bir parametre olduğunu göstermiş oldu.

### 3.6. Motif genelleme ile oluşturulan, küçük ölçekli biyolojik sinir ağlarının, bellek davranışının incelenmesi

Motiflerin, ağ içerisinde aynı davranışları sergilediğini göstermek için, önceki çalışmadan uzun –ve kısa dönem bellek davranışı gösterdiği belirlenen MTF8, MTF32 ve MTF35 motifleri, sistematik bir yöntemle Tablo 2’de görüldüğü gibi genellendi. Elde edilen küçük ölçekli ağların bellek davranışını belirlemek için, motiflere yapılan çalışmalar tekralandı. Motif genelleme yapılırken, A,B,C hücreleri 2,3,5 adet şeklinde çoklandı. Küçük ölçekli ağlar üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular Tablo 3 ve Tablo 4’de gösterildi.

Tablo 2. Tablo 1’deki MTF8 ve MTF32’in giriş, ara ve çıkış hücrelerinin 2, 3 ve 5 hücre olacak şekilde çoğullanmış şekli.



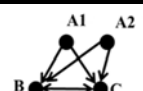
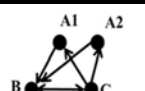
Temel Motif MTF8	Motif Adı	Motif Şekli	Motif Adı	Motif Şekli	Motif Adı	Motif Şekli
	MTFG1-8-G		MTFG2-8-G		MTFG3-8-G	
	MTFG1-8-A		MTFG2-8-A		MTFG3-8-A	
	MTFG1-8-Ç		MTFG2-8-Ç		MTFG3-8-Ç	

### 3.6.1. Uzun dönem bellek davranışının incelenmesi

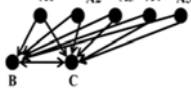
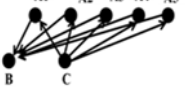
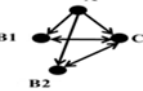

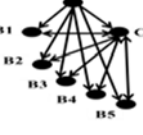
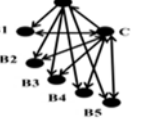
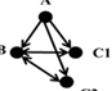
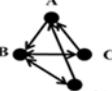
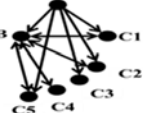
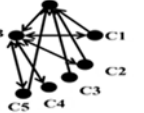
MTF8 ve MTF32’nin geliştirilmiş modellerinde, motiflere yapılan çalışmalar tekrarlandı. Şekil 1(a)’da görülen akım, farklı büyüklüklerde, A hücrelerine uygulandı (uyarım türü-E). Bu şartlarda birçok akım değerinde biyolojik ağ yapılarının uzun dönem bellek davranışı sergilediği gözlemlendi. Tablo 3’de; 2 ve 5 hücre şeklinde çoğullanmış motif tabanlı ağ yapısının, uzun dönem bellek davranışı sergilediği akım değerleri verildi. MTF8’in, giriş hücreleri 2 ve 5 hücre şeklinde çoğullanmış ağ yapısıyla, oldukça ortak davranışlar sergilediği görüldü.

Tablo 3’den de görüleceği gibi, girişler çoğaldığında daha düşük akımlarda da, hücreler toplamsallık etkisiyle aksiyon potansiyelleri üretebilmektedir. MTF32’de olduğu gibi A giriş hücresine geri besleme olduğunda, çok yüksek akımlarda yığılma olduğundan aksiyon potansiyeli üretilememektedir. Ayrıca hücreye aynı anda gelen çok fazla uyarıdan kaynaklanan kayıplar gözlemlendi. Bunun nedeni; modele verdiğimiz uyarıların, bir hücrenin dentritlerine gelen toplam uyarıyı ifade eden akımlar olmasıdır. Bu uyarılardan çok sayıda uyguladığımızda, modeldeki paralel kol sayısının artmasından dolayı, bir doyum oluşmakta ve frekans aşırı derecede artıp genlik düşmektedir. Siyallerin genliği aksiyon potansiyeli olma eşliğinin altına düşmektedir. Bu durumda deneylerde giriş akım büyüklüğü önem arz etmektedir. Bu nedenle bazı çalışmalarda, akım genliği düşürülerek uygulandı.

Tablo 3. MTF8, MTF32 motiflerinin geliştirilmiş modellerinde uzun-dönem bellek davranışı görülen durumlar( A hücresine 5-85  $\mu$ A arasında 2,5  $\mu$ A artan değerlerde harici akımlar uygulandı)

Motif Adı: MTF8	Uzun Dönem Bellek davranışı görülen harici akım büyüklüğü	Motif Adı: MTF32	Uzun Dönem Bellek davranışı görülen harici akım büyüklüğü
	15-50,55-62.5 $\mu$ A Arası		15-20,30-35 $\mu$ A Arası
<b>GİRİŞ HÜCRESİ ÇOĞULLAMA</b>			
	5-75,80,85 $\mu$ A Arası		5-60,67.5 $\mu$ A Arası

Tablo 3. (Devamı).

	5-75,80,85 $\mu$ A Arası		5-15,20,22.5,37.5 $\mu$ A Arası
<b>ARA HÜCRE ÇOĞULLAMA</b>			
	22.5,27.5-32.5,55,62.5 $\mu$ A Arası		10,15-37.5,42.5,47.5,50-55 $\mu$ A Arası
	22.5,32.5-37.5, $\mu$ A Arası		12.5-45,50-55, 70 $\mu$ A Arası
<b>ÇIKIŞ HÜCRESİ ÇOĞULLAMA</b>			
	15-52.5 $\mu$ A		20,30-32.5,42.5-45,50,52.5,57.5, 65,70,77.5, $\mu$ A Arası
	15,17.5,20,32.5, 42.5,60 $\mu$ A		15-20,22.5,32.5, 37.5,42.5,47.5,52.5,60 $\mu$ A Arası

Çalışmanın bu bölümünde, birçok harici akım değerinde, motifle küçük ölçekli ağ'ın aynı davranışı sergilediği görüldü.

### 3.6.2. Kısa dönem bellek davranışının incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, MTF8 ve MTF35'in genelleştirilmiş modellerinde, bölüm 3.4'deki motiflere uygulanan çalışmalar tekrarlandı. Hücrelerin uyarı şekli, Tablo 4'deki gibi seçilerek, Şekil 1(a)'da görülen akım, (genlik  $30\mu A$ ) girişe uygulandı ve genelleştirilmiş biyolojik ağ yapılarının kısa-dönem bellek davranışı incelendi. Tablo 4'de biyolojik ağ yapısının ve motif'in; C Çıkış hücresinde oluşan aksiyon potansiyeli sayısı (AKPS), aksiyon potansiyeli frekansı (AKPSF) ve aksiyon potansiyeli standart sapma değerleri karşılaştırıldı. Bu verilerin yakınlığı; motif ve küçük ölçekli ağ yapısının, kısa-dönem bellek davranışlarının benzer olduğunu gösterdi. Motifin yapısına bağlı olarak, özellikle giriş hücreleri çoklandığında ortaya çıkan en büyük sorun, fazla uyarının oluşturduğu yığılmadır (Motif 35'de iki geri besleme olduğundan, çıkış hücre çoğullaması olduğunda da bu durum oluşmaktadır). Bu etkiden dolayı, motifin yapısına da bağlı olarak, aksiyon potansiyeli özelliği olmayan çıkışlar oluşmaktadır. Tablo 4'de artan standart sapma değerleri, bu kayıplar nedeniyle oluşmuştur. Bu problemi çözmek için, uyarı adediyle orantılı olarak uyarı büyüklüğünde oransal düşmeler yapılmasının, daha doğru olacağı değerlendirildi. Buna örnek olarak, MTF8 hücresinin giriş çoğullama çalışmasında, giriş hücre sayısı arttıkça uyarı genliğini düşürdük.

Tablo 4. MTF8, MTF35'in ve bu motiflerin geliştirilmiş modellerinin, kısa-dönem bellek davranışı gösterdiği durumlar.

MOTİFLER	Uyarı durumu	Akım ( $\mu$ A)	AKPS	AKPF(Hz)	STDS
<b>MTF8</b>	IIEE	<b>30</b>	<b>9</b>	<b>79</b>	<b>0.99</b>
<b>Giriş hücre genelleme</b>					
MTF8GG 3-H	IIEE	30	10	76	1.2
MTF8GG 5-H	IIEE	20	12	69	1.39
MTF8GG 8-H	IIEE	20	10	88	3.4
<b>Ara hücre genelleme</b>					
MTF8GA 3-H	IIEE	30	11	74	1.35
MTF8GA 5-H	IIEE	30	7	77	0.64
MTF8GA 8-H	IIEE	30	11	68	1.5
<b>Çıkış hücre genelleme</b>					
MTF8GC 3 H	IIEE	30	12	78	1.87
MTF8GC 5 H	IIEE	30	12	75	1.75
MTF8GC 8 H	IIEE	30	10	75	1.07
<b>MTF35</b>	EEEE	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>80</b>	<b>0.78</b>
<b>Giriş hücre genelleme</b>					
MTF35GG 3-H	EEEE	30	8	83	1
MTF35GG 5-H	EEEE	30	9	89	1.2
MTF35GG 8-H	EEEE	30	6	91	0.97
<b>Ara hücre genelleme</b>					
MTF35GA 3-H	EEEE	30	7	74	0.8
MTF35GA 5-H	EEEE	30	6	68	1.17
MTF35GA 8-H	EEEE	30	7	69	1.75
<b>Çıkış hücre genelleme</b>					
MTF35GC 3 H	EEEE	30	15	74	0.82
MTF35GC 5 H	EEEE	30	10	69	1.2
MTF35GC 8 H	EEEE	30	18	75	5.7

Tüm bu çalışmalarda elde edilen sonuçlardan, motiflerin yapılarına bağlı olarak, çoğullama ile oluşturulan ağ yapılarının bellek davranışları gösterildi. Bilginin saklandığı beyin bölümleriyle ilgili bir yorum ortaya konuldu. Literatürde yapılmış çalışmalar motif yapıları üzerindedir. Çalışmamızda, beyinde bilgi tutan en küçük birim olduğu düşünülen motiflerin, ağ ortamında aynı özelliklere sahip oldukları gösterildi. Ayrıca bu modeller çok daha büyütülerek bilgi tutulması esnasında beyindeki hücreler arası iletişim modellenebilecektir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, üç hücreli motifler ve motiflerden oluşan küçük ölçekli ağlar üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular değerlendirildi. Motiflerin kısa- ve uzun dönem bellek davranışının, hücrelerin uyarıcı (E) veya engelleyici (I) uyarımına ve motifin yapısına bağlı olduğu ortaya konuldu. Ardından, motiflerin, dışarıdan bir süre uygulanıp kesilen bilgiyi tutma zamanları değerlendirilerek, kısa- ve uzun dönem bellek davranışı gösterdikleri durumlar tespit edildi. Ayrıca, üç hücreli motiflerden hangilerinin, hangi şartlarda bellek davranışı sergiledikleri tespit edilerek sınıflandırıldı. Bu motiflerin tespitinden sonra, bellek davranışı gösteren motiflerden, motif genelleme ile elde edilen küçük ölçekli biyolojik ağların bellek davranışları incelendi. Motiflerin, tek olarak gösterdikleri bellek davranışlarını, biyolojik ağ ortamında da sergilediği gösterildi. Oluşturulan yazılım modellemesiyle, biyolojik ağların ve onları oluşturan motiflerin, aynı şartlarda kısa- ve uzun dönem bellek davranışı sergilediği gösterildi. Bu çalışmayla; tüm üç hücreli motiflerin ve motif genelleme ile oluşturulan küçük

ölçekli ağların modellerinde, motif-ağ ilişkisi ortaya konularak, literatüre katkıda bulunuldu.

(Kısa-ve uzun dönem bellek davranışı gösteren motiflerle ilgili çalışmamız 2014 yılında “Uzun dönem ve kısa dönem bellek davranışı gösteren nöronal motifler” ismiyle bildiriler olarak sunulmuştur.)

## Kaynaklar

- [1] Humphries, M. D., Dynamical networks: Finding, measuring, and tracking neural population activity, **Massachusetts Institute of Technology**, 1,4, 324-338, (2017).
- [2] Cornelia, I.B. ve Eve, M., **From the connectome to brain function**, Nature America, (2013).
- [3] Li, C., Functions of neuronal network motifs, **Physical review E**, 037101, (2008).
- [4] Prill, R.J, Iglesias, P.A. ve Levchenko, A., Dynamic properties of network motifs contribute to biological network organization, **PLOS Biology**, (2005).
- [5] Sporns, O. ve Kotter, R., Motifs in Brain Networks, **PLOS Biology**, (2004).
- [6] Goroehowski T.E., Grierson, C.S., Bernardo, M., Organisation of feed-forward loop motifs reveals architectural principles in natural and engineered networks, **Biorxiv The preprint server for biology**, (2017).
- [7] Dong, C.Y., Lim, J., Nam, Y. ve Cho, K.H., Systematic analysis of synchronized oscillatory neuronal networks reveals an enrichment for coupled direct and indirect feedback motifs, **Bioinformatics**, 25, 13, 1680–1685, (2009).
- [8] Heinz, K. ve Stefan, H., Motifs, algebraic connectivity and computational performance of two data-based cortical circuit templates, **International Workshop on Computational Systems Biology**, (2009).
- [9] Kim, J.R., Yoon, Y. ve Cho, K.H., Coupled feedback loops form dynamic motifs of cellular networks, **Biophysical Journal** 94, 359–365, (2008).
- [10] Song, S., Sjöström, P.J., Reigl, M., Nelson, S. ve Chklovskii, D.B., Highly nonrandom features of synaptic connectivity in local cortical circuits, **PLOS Biology**, (2005).
- [11] Feldmeyer, D., Qi, G., Emmenegger, E. ve Staiger, J.F., Inhibitory Interneurons and their Circuit Motifs in the Many Layers of the Barrel Cortex, **Neuroscience, Published by Elsevier Ltd**, (2018).
- [12] Chenkov, N., Sprekeler, H. ve Kempter, R., Memory replay in balanced recurrent networks, **PLoS Computational Biology**, 13(1): e1005359, (2017).
- [13] Dong, C.Y., Lim, J., Nam, Y. ve Cho, K.H., Systematic analysis of synchronized oscillatory neuronal networks reveals an enrichment for coupled direct and indirect feedback motifs, **Bioinformatics**, 25, 13, 1680–1685, (2009).
- [14] Elodie, B.J., Sabrina, D. ve Serge, L., Brain plasticity mechanisms and memory, **A Party of Four Neuroscientist**, 13, 492, (2007).
- [15] Kaiser, T.F. ve Peters, F.J., Synaptic Plasticity, **Nova science publishers**, New York, (2009).
- [16] Mark, M., Steven, A.S. ve Eric, R.K., Synapses and memory storage, **Cold Spring Harb Perspect Biology**, (2012).
- [17] Arbib, M.A., **The handbook of brain theory and neural network**, (Second edition), (2003).

- [18] Bassett, D.S. ve Bullmore E., Small-World Brain Networks Revisited, **The Neuroscientist**, 23(5), 499–516, (2017).
- [19] Khambhati, A.N, Sizemore, A.E., Betzel, R.F. ve Bassett, D.S, Modelling and Interpreting Network Dynamics, **Biorxiv The preprint server for biology**, (2017).
- [20] Tang, E., Bassett, D.S, Control of Dynamics in Brain Networks, **Reviews of modern physics**, (2017).
- [21] Keleş, E. ve Çepni, S., Beyin ve Öğrenme, **Journal of Turkish Science**, (2006).
- [22] Mirisis, A.A., Alexandrescu, A., Carew, T.J. ve Kopec A.M., The Contribution of Spatial and Temporal Molecular Networks in the Induction of Long-term Memory and Its Underlying Synaptic Plasticity, **Neuroscience**, (2016).
- [23] Spiegler, A., Hansen E., Bernard, C., McIntosh, A.R. ve Jirsa, V.K., Selective Activation of Resting-State Networks following Focal Stimulation in a Connectome-Based Network Model of the Human Brain, **Eneuro**, (2016).
- [24] Junker, B.H. ve Schreiber, F., **Analysis of biological networks**, (2008).
- [25] Thurley, K., Wu, L.F. ve Altschuler, S.J., Response-time behaviors of intercellular communication network motifs, **Biorxiv The preprint server for biology**, (2017).
- [26] Wang, J., Jianming, G.J. ve Fei, X., Two-parameters hopf bifurcation in the Hodgkin–Huxley model, **Chaos, Solitons & Fractals: X**, 23, 973–980, (2005).
- [27] Schachinger, D., Simulation of extracellularly recorded activities from small nerve formations in the brain, Thesis, Wien, Mai, (2003).
- [28] Bower, J.M. ve Beeman, D., **The Book of GENESIS (Second edition)**, Springer-Verlag, (1998).
- [29] Gerstner, W. ve Kistler, W.M., Spiking neuron models, **Cambridge University Press**, (2002).
- [30] Keener, J. ve Sneyd, J., **Mathematical physiology (Second Edition)**, (2009).
- [31] Jackman S.L., Regehr W.G., The Mechanisms and Functions of Synaptic Facilitation, **Neuron**, 94,3,447-464, (2017).
- [32] Dayan, P. ve Abbott, L.F., **Theoretical neuroscience**, (2002).
- [33] Izhikevich, E.M., Dynamical systems in neuroscience, **The MIT Press Cambridge**, 16-17, (2007).
- [34] Milo, R., Shen, O.S., Itzkovitz, S., Kashtan, N., Chklovskii, D. ve Alon, U., Network motifs simple building blocks of complex networks, **Science**, 298, 824-827, (2002).
- [35] Bassett, D.S. ve Bullmore, E., Small-world brain networks, **The Neuroscientist**, 512-523, (2006).
- [36] Han, Z., Vondriska, T.M., Yang, L., Maclellan, W.R., Weissa, J.N. ve Qu, Z., Signal transduction network motifs and biological memory, **Journal of Theoretical Biology**, 246, 755–761, (2007).
- [37] Navlakha, S., Joseph, Z.B. ve Barth, A.L., Network Design and the Brain, **Trends in cognitive sciences**, 64-78, 22, 1, 67-78, (2018).

# Opacity tables for using in Paczynski stellar modelling and their effects on stellar evolutions

Gülay İNLEK\*

Balikesir University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Physics, Cagis Campus, Balikesir

Geliş Tarihi (Received Date): 27.12.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 13.02.2019

## Abstract

We have constructed opacity tables for using in stellar modelling in a format particularly applicable to the Paczynski freeware program GOB. Our tables are derived from those of Allard and Weiss for lower metal content envelopes, using the Lagrange interpolation method. This allows accurate opacities to be given as numerical functions of density and temperature with given proportions of hydrogen (X), helium (Y), and 'metals' (Z). Inlek et al. showed that it is possible independently to check opacity effects from modern high-quality observational data. These tables will be useful for such purposes.

**Keywords:** Stars, general-structure, opacity tables.

## Paczynski yıldız modellemesinde kullanılmak için opaklık tabloları ve onların yıldız evrimlerine etkileri

## Özet

Yıldız modellemede Paczynski 'nin ücretsiz programı GOB'a uygulanabilir bir formatta kullanmak için opaklık tabloları oluşturduk. Tablolarımız, Lagrange interpolasyon yöntemi kullanılarak düşük metal içerikli zarflar için Allard ve Weiss 'in tablolarından elde edilmiştir. Bu, verilen hidrojen (X), helyum (Y) ve metallerin (Z) oranları ile yoğunluk ve sıcaklığın sayısal bir fonksiyonu olarak doğru opaklıkların elde edilmesini sağlar. Inlek ve grubu opaklık etkilerini yüksek kalitede modern gözlemsel verilerden kontrol etmenin bağımsız olarak mümkün olduğunu göstermiştir. Bu tablolar bu tarz amaçlar için yararlı olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Yıldızlar, genel-yapı, opaklık tabloları.

\* Gülay İNLEK, inlek@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4884-1437>

## 1. Introduction

It is well known that radiative transport plays a major role in shaping the structure and evolution of stars; however, direct measurements of the opacity of matter to radiation in stellar interiors are not possible. Therefore, theoretical calculations are the main sources of opacity evaluation. Characterizing the radiative transport opacities are basic components for stellar structure and evolution modelling. Over the years, various opacity formulae and tables have been applied to structural and evolution models of stars. Schwarzschild [1] discussed in his seminal book the effects associated with the ionization of different atomic species, i.e. bound-free transitions, free-free absorption and electron scattering. Carson [2], Iglesias and Rogers [3] and Kurucz [4] have shown that the bound-bound (line) absorptions make an important contribution to opacity. Various theoretical methods have been developed to calculate opacities. Rogers and Iglesias [5] and Iglesias and Rogers [3] used the OPAL opacity code to calculate stellar opacities. The other code OP to calculate opacity tables has been used by Badnell et al. [6]. Blancard et al. [7] studied OP and OPAL codes compared by opacity model OPAS for the solar mixture. Mondet et al. [8] computed the opacities for various hydrogen and metallic element mass fractions according to the recent chemical composition of the solar photosphere. They discussed possible sources of uncertainty in their calculations and also compared Rosseland opacities to OPAL and OP data.

Our aim is examine the effect of varying opacities on the envelope structure with the aid of Paczynski's codes. In this study, we collected opacity data that were calculated using the OPAL code in the study of Allard [9] and Weiss [10]. Inlek et al [11] worked with the stellar model codes GOB (generates outer boundary conditions) and SCH (generates zero age main sequence star models) of Paczynski [12] and applied these programs to real observational data. They discussed the use of such sources as the OPAL code. It is well-known that opacity effects are strongest in the outer parts of the star, where the temperature gradient steepens as the major constituent elements start to recombine (cf. e.g. Young et al., 2001 [13]). In order to tailor recent detailed calculations of opacity values for low metallicity envelopes (e.g. those of Allard, [9]; Weiss, [10]) to the format required by GOB, we used four-point Lagrange interpolation [14]. Our results set out values of  $\log \kappa$  for (envelope)  $\log$  density values in the range -12 to +3 and  $\log$  temperature in the range 3.25 to 7.00.

## 2. The tables

The element abundances included in the Allard [9] and Weiss [10] compositions are as follows: H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co and Ni. Relative element abundances are usually specified simply by X (hydrogen), Y (helium) and Z (total mass fraction of the other elements), where  $X+Y+Z=1$ . The relative proportions of the metals in the mixture for these calculations were given by Iglesias and Rogers [3]. The source data allow for accurate interpolation in temperature, density and composition. Those data were specified in terms of an additional parameter R, where  $\log R = \log (\rho/T_6^3)$ ,  $\rho$  being the mass density in  $\text{g/cm}^3$ , and  $T_6=10^{-6} T$ , the temperature in kelvins [3]. The ranges of R and temperature seem to cover typical stellar conditions from the interior through the envelope extending towards outer regions. The new source data ranges are  $3.75 \leq \log T \leq 8.7$  and  $-8 \leq \log R \leq +1$  [3].



We present suitably formatted tables for  $X = 0.7$  and  $Z = 0.01$  from Allard [9] and  $X = 0.7$ ; metal mass fractions  $Z = 0.001, 0.002, 0.004$  from Weiss[10] calculations, respectively. To create the full two-dimensional tables needed for the Paczynski [12] programs, a two-step procedure is required: firstly, we interpolated density values from the source to the required table format. These opacities were then interpolated to the required temperatures at the new densities. We thus had the logarithm of the opacity,  $\kappa(\text{cm}^2/\text{g})$ , as a function of  $\log T$  for columns of constant  $\log \rho$ .  $\log \kappa$  is given for 31 values of  $\log \rho$  in the range of  $-12$  to  $+3$  in steps of  $0.5$ , and 51 values of  $\log T$  from  $3.25$  in steps of  $0.075$ .

### 3. Remarks

The main opacity changes in more recent calculations are due to additional metals in the mixture; for this reason, opacity enhancements are smaller for the lower metallicity mixture [3]. We studied the effects of lower metallicity mixture opacity tables in some stellar modelling examples for intermediate-low mass stars. Inlek et al. [11] showed that increases of the radius are associated with increasing envelope opacity. In their study, changes from the earlier LAOL opacity tables [15] to later ones that included more detailed line absorption effects changed with the radii up to  $\sim 5\text{-}10\%$ . In our examples, we have found an increase in the radius ( $1 - 3\%$ ) for the opacities with different  $Z$  value. This can be seen in Table 1.

Table 1: GOB results for radii using opacity tables with different  $Z$  value.

Parameter	Value				
M (Sun)	0.6	1	2.5	5	10
R (Weiss $Z=0.001$ )	0.3434	0.5195	1.0118	1.7219	2.3571
R (Weiss $Z=0.002$ )	0.3480	0.5220	1.0127	1.7500	2.3584
R (Weiss $Z=0.004$ )	0.3491	0.5272	1.0194	1.7552	2.3601
R (Allard $Z=0.01$ )	0.3532	0.5300	1.0228	1.7656	2.3781
$\log L$	-0.8276	0.0409	1.6068	2.8296	3.6749
$\log T_e$	3.6520	3.7692	4.0115	4.2085	4.3545

We anticipate that our low metallicity opacity tables may be useful in the tests of luminosity values for Population II stars, in the studies on globular clusters, and on the Bulge or nearby galaxies. Our results are very usefull for testing eclipsing binary data and in the near future observational data for the new planetary systems.

Since the early twenties many opacity calculations have been published. The opacity theory has not been static. For example stellar structure coefficient  $k_2$  has been calculated as theoretical and has been derived by observationally. For the eclipsing binary stars components it is impossible derived by observationally at the same time. The benefical of the theoretical calculations is the possibility for this purpose.

#### 4. Conclusion

The present study presents the opacity tables for different metallicity for Paczynski [12] codes GOB and SCH in Tables 2-5. These results are very beneficial for astrophysical modelling programs. Our next step is conducting a study with the new tables from Colgan et al. [16] and checking the results with observational data on GOB and SCH.

#### References

- [1] Schwarzschild, M., Structure and evolution of the stars, **Princeton University Press**, New Jersey, (1958).
- [2] Carson, T.R., Analytic formulae for Coulomb dipole transitions, **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**,75, 385-389, (1988).
- [3] Iglesias, C. A., Rogers, F. J., Updated opal opacities, **The Astrophysical Journal**, 464, 943-953, ( 1996).
- [4] Peter L. Smith, Claas Heise, Jim R. Esmond, Robert L. Kurucz <https://www.cfa.harvard.edu/amp/ampdata/kurucz23/sekur.html>, (29.01.2019)
- [5] Rogers, F.J.& Iglesias, C. A., Radiative atomic Rosseland mean opacity tables, **The Astrophysical Journal Supplement Series**,79, 507-568, (1992).
- [6] Badnell, N.R., Bautista, M.A., Bulter, K., Delahaye, F., Mendoza, C., Palmeri, P., Zeippen, C.J., Seaton, M.J., Updated opacities from the opacity project, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 360, 458-464, ( 2005).
- [7] Blancard, C., Cosse, P., Faussurier,G., Solar mixture opacity calculations using detailed configuration and level accounting treatments, **The Astrophysical Journal**, 745, 10, (2012).
- [8] Mondet,G., Blancard, C., Cosse, P., Faussurier,G., Opacity calculations for solar mixtures, **The Astrophysical Journal Supplement Series**, **220**, 2, ( 2015).
- [9] Allard, F., <https://opalopacity.llnl.gov/existing.html>, (29.01.2019).
- [10] Weiss, A., <https://opalopacity.llnl.gov/existing.html>, (29.01.2019).
- [11] Inlek, 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).
- [12] Paczynski,B., **Acta Astronomica**, 2, 20, (1970).
- [13] Young, P. A., Mamajek, E. E., Arnett, D., Liebert, J., Observational Tests and Predictive Stellar Evolution, **The Astrophysical Journal**, 556, 230-244, ( 2001).
- [14] Mathews, J.H., **Numerical Methods For Mathematics Science and Engineering**, **A Simon and Schuster Co.**, New Jersey, (1992).
- [15] Huebner, W. F., Merts, A. L., Magee, N. H., and Argo, M. F., Los Alamos Scientific Report LA-6760., (1977).
- [16] Colgan, J., Kilcrease,D.P., Magee, N.H., et al., A New Generation of Los Alamos Opacity Tables, **The Astrophysical Journal**, 817, 116, ( 2016).

Table 2. OPAL opacity table interpolated for X=0.7 and Z=0.01 with metal distribution from Allard (1996).

<b>log T</b>	<b>log ρ=</b>																														
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
3.250	-4.48	-3.80	-3.20	-2.86	-2.72	-2.67	-2.64	-2.63	-2.63	-2.62	-2.62	-2.62	-2.61	-2.60	-2.60	-2.59	-2.58	-2.56	-2.54	-2.52	-2.49	-2.46	-2.42	-5.54	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59
3.325	-4.73	-4.71	-4.59	-4.14	-3.52	-3.04	-2.80	-2.69	-2.65	-2.63	-2.61	-2.60	-2.59	-2.57	-2.55	-2.52	-2.49	-2.44	-2.39	-2.33	-2.26	-2.18	-2.09	-5.32	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41
3.400	-4.53	-4.51	-4.48	-4.41	-4.29	-4.05	-3.60	-3.12	-2.83	-2.69	-2.62	-2.57	-2.53	-2.48	-2.43	-2.36	-2.29	-2.20	-2.09	-1.98	-1.85	-1.72	-1.58	-5.09	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23
3.475	-4.44	-4.41	-4.38	-4.31	-4.21	-4.08	-3.90	-3.64	-3.28	-2.90	-2.60	-2.41	-2.25	-2.13	-2.01	-1.88	-1.73	-1.59	-1.43	-1.28	-1.12	-.96	-.80	-4.87	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05
3.550	-4.31	-4.29	-4.32	-4.24	-4.10	-3.92	-3.68	-3.39	-3.06	-2.72	-2.38	-2.07	-1.82	-1.62	-1.45	-1.27	-1.08	-.90	-.71	-.52	-.33	-.14	.00	-4.65	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87
3.625	-4.13	-4.14	-4.23	-4.12	-3.94	-3.68	-3.37	-3.04	-2.69	-2.35	-2.03	-1.72	-1.44	-1.20	-.98	-.76	-.53	-.30	-.08	.15	.38	.61	.66	-4.43	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70
3.700	-3.96	-3.99	-4.03	-3.92	-3.71	-3.39	-3.03	-2.69	-2.35	-2.04	-1.73	-1.43	-1.13	-.86	-.60	-.33	-.06	.21	.47	.74	1.01	1.26	1.06	-4.21	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52
3.775	-1.49	-1.67	-1.82	-1.90	-1.88	-1.78	-1.62	-1.42	-1.21	-.97	-.71	-.44	-.80	-.51	-.24	.05	.33	.61	.89	1.17	1.46	1.72	1.25	-3.99	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34
3.850	-.59	-.64	-.71	-.74	-.73	-.68	-.58	-.44	-.28	-.10	.09	.31	.53	.77	.08	.37	.66	.96	1.25	1.54	1.83	2.08	1.39	-3.77	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16
3.925	-.36	-.21	-.04	.13	.28	.39	.49	.59	.69	.81	.94	1.10	1.27	1.45	.36	.67	.98	1.29	1.60	1.91	2.22	2.45	1.51	-3.55	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98
4.000	-.43	-.29	-.06	.26	.63	.97	1.24	1.43	1.56	1.67	1.77	1.87	1.99	2.12	2.28	.97	1.28	1.58	1.88	2.18	2.47	2.66	1.61	-3.33	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80
4.075	-.45	-.37	-.21	.06	.42	.86	1.30	1.70	2.02	2.25	2.41	2.53	2.63	2.74	2.85	1.32	1.59	1.85	2.12	2.38	2.64	2.78	1.71	-3.11	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62
4.150	-.44	-.40	-.29	-.11	.17	.53	.97	1.46	1.93	2.35	2.69	2.93	3.10	3.24	3.36	1.76	2.01	2.25	2.49	2.73	2.96	3.01	1.82	-2.89	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44
4.225	-.45	-.41	-.34	-.21	.00	.30	.68	1.13	1.61	2.11	2.58	3.01	3.33	3.57	3.76	3.91	2.40	2.62	2.83	3.05	3.25	3.19	1.92	-2.66	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26
4.300	-.45	-.42	-.38	-.28	-.13	.12	.45	.88	1.35	1.84	2.34	2.85	3.31	3.71	4.01	4.24	2.78	2.97	3.17	3.36	3.52	3.35	2.02	-2.44	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08
4.375	-.45	-.42	-.38	-.31	-.20	-.01	.28	.67	1.13	1.63	2.15	2.67	3.19	3.68	4.10	4.44	4.70	3.31	3.49	3.67	3.80	3.49	2.12	-2.22	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90
4.450	-.42	-.40	-.37	-.30	-.20	-.06	.18	.52	.96	1.45	1.98	2.51	3.05	3.59	4.08	4.50	4.85	3.60	3.78	3.97	4.07	3.62	2.23	-2.00	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72
4.525	-.42	-.40	-.37	-.31	-.20	-.05	.16	.45	.85	1.31	1.83	2.37	2.92	3.48	4.01	4.49	4.90	5.22	4.04	4.23	4.30	3.73	2.33	-1.78	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54
4.600	-.43	-.41	-.39	-.34	-.25	-.10	.14	.46	.83	1.26	1.74	2.25	2.78	3.33	3.88	4.39	4.84	5.20	4.28	4.43	4.43	3.80	2.43	-1.56	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36
4.675	-.47	-.42	-.40	-.37	-.31	-.20	.00	.30	.70	1.16	1.64	2.13	2.63	3.15	3.67	4.18	4.64	5.02	4.50	4.57	4.49	3.86	2.52	-1.34	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19
4.750	-.47	-.42	-.40	-.38	-.35	-.27	-.13	.10	.44	.86	1.34	1.86	2.38	2.89	3.39	3.88	4.34	4.74	5.08	4.70	4.53	3.92	2.62	-1.12	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01
4.825	-.47	-.47	-.41	-.40	-.37	-.32	-.22	-.05	.21	.57	1.00	1.48	2.00	2.53	3.05	3.55	4.02	4.44	4.80	4.94	4.72	4.02	2.72	-.90	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83
4.900	-.47	-.47	-.42	-.40	-.38	-.34	-.28	-.15	.05	.34	.72	1.16	1.66	2.18	2.71	3.23	3.73	4.17	4.55	4.86	4.87	4.11	2.82	-.68	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65
4.975	-.47	-.47	-.40	-.39	-.38	-.35	-.30	-.21	-.06	.18	.52	.93	1.39	1.89	2.42	2.95	3.46	3.94	4.34	4.65	5.00	4.19	2.93	-.46	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47
5.050	-.47	-.47	-.47	-.34	-.34	-.32	-.29	-.22	-.11	.08	.37	.75	1.19	1.67	2.18	2.70	3.22	3.70	4.12	4.44	4.67	4.27	3.03	-.24	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29
5.125	-.47	-.47	-.47	-.29	-.27	-.25	-.22	-.17	-.09	.05	.27	.59	1.00	1.47	1.96	2.47	2.97	3.44	3.85	4.17	4.41	4.33	3.12	-.01	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11
5.200	-.47	-.47	-.47	-.46	-.25	-.22	-.18	-.12	-.05	.07	.25	.51	.86	1.28	1.75	2.24	2.70	3.13	3.51	3.84	4.08	4.30	3.22	.21	.07	.07	.07	.07	.07	.07	.07
5.275	-.47	-.47	-.47	-.47	-.32	-.28	-.23	-.17	-.08	.03	.19	.42	.71	1.08	1.51	1.97	2.41	2.81	3.15	3.46	3.73	3.99	3.32	.43	.25	.25	.25	.25	.25	.25	.25
5.350	-.47	-.47	-.47	-.49	-.47	-.37	-.33	-.27	-.20	-.09	.05	.26	.53	.86	1.25	1.67	2.09	2.48	2.81	3.10	3.38	3.63	3.41	.65	.43	.43	.43	.43	.43	.43	.43
5.425	-.47	-.47	-.47	-.49	-.48	-.44	-.42	-.38	-.33	-.25	-.13	.05	.29	.61	.98	1.38	1.78	2.16	2.49	2.77	3.04	3.30	3.51	.87	.61	.61	.61	.61	.61	.61	.61

Table 2. (Continued).

log T	log ρ=																																
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0		
5.500	-.47	-.47	-.47	-.49	-.48	-.46	-.46	-.44	-.42	-.37	-.29	-.15	.06	.35	.71	1.10	1.49	1.87	2.20	2.47	2.72	2.99	3.24	3.47	.79	.79	.79	.79	.79	.79	.79		
5.575	-.47	-.47	-.47	-.48	-.47	-.44	-.47	-.46	-.45	-.43	-.40	-.32	-.17	.09	.43	.83	1.22	1.59	2.49	2.20	2.45	2.70	2.96	3.21	.97	.97	.97	.97	.97	.97	.97		
5.650	-.47	-.47	-.47	-.48	-.47	-.46	-.47	-.47	-.46	-.45	-.44	-.40	-.33	-.17	.12	.51	.94	1.33	1.68	1.96	2.20	2.44	2.70	2.96	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15		
5.725	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.44	-.47	-.46	-.46	-.45	-.43	-.40	-.32	-.14	.18	.61	1.05	1.43	1.74	1.99	2.22	2.46	2.71	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32		
5.800	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.49	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.43	-.38	-.28	-.08	.27	.72	1.16	1.51	1.78	2.01	2.25	2.49	1.50	1.20	.71	-.27	-1.20	-2.29	-3.39		
5.875	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.48	-.49	-.46	-.47	-.47	-.46	-.45	-.44	-.41	-.35	-.23	.02	.40	.85	1.25	1.56	1.82	2.06	2.30	2.55	1.75	1.19	.24	-.70	-1.77	-2.86		
5.950	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.43	-.39	-.31	-.15	.14	.55	.98	1.34	1.63	1.89	2.13	2.37	2.27	1.67	.74	-.19	-1.25	-2.33		
6.025	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.48	-.48	-.46	-.46	-.46	-.45	-.44	-.42	-.36	-.25	-.04	.30	.73	1.13	1.45	1.73	1.98	2.21	2.43	2.68	1.25	.32	-.74	-1.81		
6.100	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.44	-.42	-.39	-.32	-.18	.09	.47	.90	1.27	1.58	1.84	2.05	2.25	2.48	1.74	.81	-.24	-1.29		
6.175	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.44	-.43	-.40	-.35	-.25	-.06	.25	.65	1.06	1.41	1.68	1.88	2.06	2.27	2.12	1.29	.26	-.79		
6.250	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.44	-.42	-.37	-.29	-.15	.09	.44	.84	1.21	1.49	1.70	1.86	2.06	2.28	1.70	.75	-.30		
6.325	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.41	-.34	-.23	-.03	.26	.62	.99	1.27	1.49	1.66	1.84	2.08	1.84	1.18	.19		
6.400	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.45	-.41	-.32	-.15	.10	.42	.75	1.03	1.25	1.43	1.62	1.86	2.14	1.41	.65		
6.475	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.45	-.40	-.29	-.08	.21	.52	.79	1.01	1.20	1.40	1.64	1.92	1.15	.97
6.550	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	.86	
6.625	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.43	-.36	-.20	.04	.30	.53	.73	.93	1.17	1.46	1.77	.43
6.700	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.45	-.42	-.33	-.15	.08	.30	.51	.71	.94	1.22	1.54	1.84	
6.775	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.45	-.40	-.29	-.12	.09	.29	.49	.71	.99	1.31	1.62
6.850	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.46	-.44	-.38	-.26	-.09	.09	.29	.50	.77	1.08	1.39	
6.925	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.46	-.43	-.35	-.23	-.07	.10	.31	.56	.86	1.17	
7.000	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.45	-.41	-.33	-.21	-.05	.14	.37	.64	.95	

Table 3. OPAL opacity table interpolated for X=0.7 and Z=0.001 with metal distribution from Weiss (1995).

log T	log ρ=																														
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
3.250	-4.48	-3.80	-3.20	-2.86	-2.72	-2.67	-2.64	-2.63	-2.63	-2.62	-2.62	-2.62	-2.61	-2.60	-2.60	-2.59	-2.58	-2.56	-2.54	-2.52	-2.49	-2.46	-2.42	-5.54	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59
3.325	-4.73	-4.71	-4.59	-4.14	-3.52	-3.04	-2.80	-2.69	-2.65	-2.63	-2.61	-2.60	-2.59	-2.57	-2.55	-2.52	-2.49	-2.44	-2.39	-2.33	-2.26	-2.18	-2.09	-5.32	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41
3.400	-4.53	-4.51	-4.48	-4.41	-4.29	-4.05	-3.60	-3.12	-2.83	-2.69	-2.62	-2.57	-2.53	-2.48	-2.43	-2.36	-2.29	-2.20	-2.09	-1.98	-1.85	-1.72	-1.58	-5.09	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23
3.475	-4.44	-4.41	-4.38	-4.31	-4.21	-4.08	-3.90	-3.64	-3.28	-2.90	-2.60	-2.41	-2.25	-2.13	-2.01	-1.88	-1.73	-1.59	-1.43	-1.28	-1.12	-.96	-.80	-4.87	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05
3.550	-4.31	-4.29	-4.32	-4.24	-4.10	-3.92	-3.68	-3.39	-3.06	-2.72	-2.38	-2.07	-1.82	-1.62	-1.45	-1.27	-1.08	-.90	-.71	-.52	-.33	-.14	.00	-4.65	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87
3.625	-4.13	-4.14	-4.23	-4.12	-3.94	-3.68	-3.37	-3.04	-2.69	-2.35	-2.03	-1.72	-1.44	-1.20	-.98	-.76	-.53	-.30	-.08	.15	.38	.61	.66	-4.43	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70
3.700	-3.96	-3.99	-4.03	-3.92	-3.71	-3.39	-3.03	-2.69	-2.35	-2.04	-1.73	-1.43	-1.13	-.86	-.60	-.33	-.06	.21	.47	.74	1.01	1.26	1.06	-4.21	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52
3.775	-1.50	-1.68	-1.83	-1.91	-1.90	-1.80	-1.65	-1.46	-1.25	-1.04	-.81	-.58	-.80	-.51	-.24	.05	.33	.61	.89	1.17	1.46	1.72	1.25	-3.99	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34
3.850	-.60	-.65	-.72	-.76	-.75	-.70	-.60	-.47	-.31	-.14	.04	.24	.45	.67	.08	.37	.66	.96	1.25	1.54	1.83	2.08	1.39	-3.77	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16
3.925	-.37	-.23	-.05	.12	.27	.38	.47	.57	.66	.77	.90	1.05	1.20	1.38	.36	.67	.98	1.29	1.60	1.91	2.22	2.45	1.51	-3.55	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98
4.000	-.45	-.32	-.09	.23	.60	.95	1.22	1.41	1.54	1.64	1.74	1.82	1.93	2.05	2.20	.97	1.28	1.58	1.88	2.18	2.47	2.66	1.61	-3.33	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80
4.075	-.48	-.40	-.25	.00	.36	.80	1.25	1.65	1.98	2.21	2.36	2.47	2.57	2.67	2.78	1.32	1.59	1.85	2.12	2.38	2.64	2.78	1.71	-3.11	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62
4.150	-.47	-.43	-.33	-.16	.10	.46	.90	1.39	1.87	2.30	2.64	2.89	3.06	3.19	3.32	1.76	2.01	2.25	2.49	2.73	2.96	3.01	1.82	-2.89	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44
4.225	-.47	-.45	-.39	-.27	-.07	.23	.61	1.06	1.55	2.05	2.53	2.96	3.30	3.54	3.73	3.89	2.40	2.62	2.83	3.05	3.25	3.19	1.92	-2.66	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26
4.300	-.48	-.45	-.41	-.34	-.20	.04	.38	.81	1.29	1.78	2.29	2.80	3.28	3.68	3.99	4.22	2.78	2.97	3.17	3.36	3.52	3.35	2.02	-2.44	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08
4.375	-.48	-.45	-.42	-.36	-.26	-.08	.20	.59	1.07	1.57	2.10	2.62	3.15	3.65	4.08	4.42	4.69	3.31	3.49	3.67	3.80	3.49	2.12	-2.22	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90
4.450	-.45	-.44	-.41	-.35	-.26	-.13	.10	.44	.89	1.39	1.92	2.46	3.01	3.56	4.06	4.49	4.84	3.60	3.78	3.97	4.07	3.62	2.23	-2.00	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72
4.525	-.45	-.44	-.42	-.36	-.26	-.11	.09	.38	.78	1.25	1.78	2.32	2.88	3.45	3.99	4.48	4.89	3.52	4.04	4.23	4.30	3.73	2.33	-1.78	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54
4.600	-.46	-.45	-.43	-.40	-.32	-.17	.07	.38	.76	1.19	1.68	2.20	2.74	3.30	3.86	4.38	4.83	3.52	4.28	4.43	4.43	3.80	2.43	-1.56	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36
4.675	-.47	-.45	-.44	-.42	-.38	-.28	-.09	.21	.61	1.08	1.57	2.08	2.59	3.11	3.64	4.16	4.63	3.52	4.50	4.57	4.49	3.86	2.52	-1.34	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19
4.750	-.47	-.45	-.44	-.43	-.41	-.35	-.23	-.01	.31	.73	1.23	1.76	2.31	2.83	3.35	3.85	4.32	3.47	5.07	4.70	4.53	3.92	2.62	-1.12	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01
4.825	-.47	-.47	-.45	-.44	-.42	-.39	-.31	-.16	.08	.42	.85	1.34	1.88	2.43	2.98	3.50	3.98	3.42	4.79	4.94	4.72	4.02	2.72	-.90	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83
4.900	-.47	-.47	-.45	-.44	-.43	-.40	-.35	-.25	-.08	.19	.57	1.02	1.52	2.06	2.61	3.15	3.68	3.15	4.54	4.86	4.87	4.11	2.82	-.68	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65
4.975	-.47	-.47	-.45	-.45	-.44	-.42	-.38	-.30	-.17	.04	.36	.77	1.25	1.77	2.31	2.86	3.40	3.90	4.33	4.65	5.00	4.19	2.93	-.46	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47
5.050	-.47	-.47	-.47	-.43	-.43	-.42	-.40	-.34	-.23	-.06	.21	.58	1.04	1.54	2.07	2.61	3.15	3.66	4.10	4.43	4.67	4.27	3.03	-.24	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29
5.125	-.47	-.47	-.47	-.42	-.41	-.40	-.39	-.36	-.29	-.15	.08	.42	.85	1.33	1.84	2.36	2.88	3.38	3.82	4.15	4.40	4.33	3.12	-.01	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11
5.200	-.47	-.47	-.47	-.46	-.40	-.39	-.38	-.36	-.31	-.21	-.04	.25	.63	1.09	1.57	2.05	2.53	3.00	3.43	3.79	4.06	4.28	3.22	.21	.07	.07	.07	.07	.07	.07	.07
5.275	-.47	-.47	-.47	-.47	-.43	-.41	-.40	-.38	-.34	-.28	-.15	.06	.37	.78	1.22	1.68	2.12	2.56	2.98	3.36	3.68	3.96	3.32	.43	.25	.25	.25	.25	.25	.25	.25
5.350	-.47	-.47	-.47	-.49	-.47	-.44	-.43	-.41	-.38	-.34	-.25	-.11	.14	.47	.86	1.28	1.70	2.12	2.53	2.92	3.28	3.57	3.41	.65	.43	.43	.43	.43	.43	.43	.43
5.425	-.47	-.47	-.47	-.49	-.48	-.46	-.46	-.45	-.43	-.40	-.34	-.24	-.06	.20	.53	.91	1.31	1.70	2.10	2.49	2.87	3.21	3.51	.87	.61	.61	.61	.61	.61	.61	.61

Table 3. (Continued).

log T	log ρ=																																
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0		
5.500	-.47	-.47	-.47	-.49	-.48	-.47	-.47	-.46	-.46	-.44	-.41	-.34	-.22	-.02	.26	.60	.96	1.33	1.71	2.09	2.48	2.84	3.16	3.42	.79	.79	.79	.79	.79	.79	.79		
5.575	-.47	-.47	-.47	-.48	-.47	-.44	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.41	-.34	-.20	.02	.32	.66	1.01	1.37	1.73	2.11	2.55	2.83	3.12	.97	.97	.97	.97	.97	.97	.97		
5.650	-.47	-.47	-.47	-.48	-.47	-.46	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.44	-.41	-.33	-.18	.06	.38	.72	1.06	1.41	1.77	1.15	2.52	2.83	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15		
5.725	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.44	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.44	-.40	-.31	-.15	.12	.45	.79	1.12	1.47	1.90	2.21	2.55	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32		
5.800	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.49	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.43	-.38	-.28	-.09	.19	.52	.86	1.19	1.55	1.92	2.27	1.50	1.20	.71	-.27	-1.20	-2.29	-3.39		
5.875	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.48	-.49	-.46	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.42	-.36	-.23	-.02	.28	.61	.95	1.30	1.66	2.01	2.34	1.75	1.19	.24	-.70	-1.77	-2.86			
5.950	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.44	-.40	-.32	-.16	.08	.39	.74	1.08	1.43	1.77	2.09	2.27	1.67	.74	-.19	-1.25	-2.33			
6.025	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.43	-.37	-.27	-.07	.21	.54	.89	1.23	1.54	1.85	2.18	2.53	1.25	.32	-.74	-1.81		
6.100	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.44	-.41	-.34	-.20	.04	.36	.71	1.03	1.31	1.60	1.93	2.28	1.74	.81	-.24	-1.29			
6.175	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.42	-.38	-.28	-.10	.17	.50	.81	1.09	1.36	1.68	2.03	2.12	1.29	.26	-.79			
6.250	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.44	-.41	-.34	-.21	.00	.29	.58	.85	1.12	1.43	1.78	2.14	1.70	.75	-.30		
6.325	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.43	-.39	-.29	-.14	.09	.35	.61	.87	1.18	1.53	1.91	1.84	1.18	.19		
6.400	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.43	-.37	-.25	-.08	.14	.38	.64	.93	1.28	1.67	2.05	1.41	.65		
6.475	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.45	-.42	-.34	-.22	-.04	.17	.41	.70	1.03	1.42	1.81	1.15	.97		
6.550	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.40	-.32	-.18	.00	.21	.47	.79	1.17	1.56	1.93	.86		
6.625	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.44	-.38	-.29	-.14	.04	.27	.57	.93	1.32	1.69	.43		
6.700	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.45	-.42	-.36	-.25	-.10	.10	.36	.70	1.08	1.45	1.79			
6.775	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.45	-.41	-.33	-.21	-.05	.18	.48	.84	1.22	1.57		
6.850	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.46	-.44	-.39	-.30	-.17	.03	.29	.62	.99	1.34		
6.925	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.45	-.42	-.36	-.26	-.11	.12	.41	.76	1.11		
7.000	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.44	-.40	-.33	-.21	-.03	.23	.55	.89		

Table 4. OPAL opacity table interpolated for X=0.7 and Z=0.002 with metal distribution from Weiss (1995).

<b>log T</b>	<b>log ρ=</b>																															
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
3.250	-4.48	-3.80	-3.20	-2.86	-2.72	-2.67	-2.64	-2.63	-2.63	-2.62	-2.62	-2.62	-2.61	-2.60	-2.60	-2.59	-2.58	-2.56	-2.54	-2.52	-2.49	-2.46	-2.42	-2.42	-5.54	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59
3.325	-4.73	-4.71	-4.59	-4.14	-3.52	-3.04	-2.80	-2.69	-2.65	-2.63	-2.61	-2.60	-2.59	-2.57	-2.55	-2.52	-2.49	-2.44	-2.39	-2.33	-2.26	-2.18	-2.09	-5.32	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	
3.400	-4.53	-4.51	-4.48	-4.41	-4.29	-4.05	-3.60	-3.12	-2.83	-2.69	-2.62	-2.57	-2.53	-2.48	-2.43	-2.36	-2.29	-2.20	-2.09	-1.98	-1.85	-1.72	-1.58	-5.09	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	
3.475	-4.44	-4.41	-4.38	-4.31	-4.21	-4.08	-3.90	-3.64	-3.28	-2.90	-2.60	-2.41	-2.25	-2.13	-2.01	-1.88	-1.73	-1.59	-1.43	-1.28	-1.12	-.96	-.80	-4.87	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	
3.550	-4.31	-4.29	-4.32	-4.24	-4.10	-3.92	-3.68	-3.39	-3.06	-2.72	-2.38	-2.07	-1.82	-1.62	-1.45	-1.27	-1.08	-.90	-.71	-.52	-.33	-.14	.00	-4.65	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	
3.625	-4.13	-4.14	-4.23	-4.12	-3.94	-3.68	-3.37	-3.04	-2.69	-2.35	-2.03	-1.72	-1.44	-1.20	-.98	-.76	-.53	-.30	-.08	.15	.38	.61	.66	-4.43	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	
3.700	-3.96	-3.99	-4.03	-3.92	-3.71	-3.39	-3.03	-2.69	-2.35	-2.04	-1.73	-1.43	-1.13	-.86	-.60	-.33	-.06	.21	.47	.74	1.01	1.26	1.06	-4.21	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	
3.775	-1.50	-1.68	-1.83	-1.91	-1.89	-1.80	-1.64	-1.45	-1.25	-1.03	-.80	-.56	-.80	-.51	-.24	.05	.33	.61	.89	1.17	1.46	1.72	1.25	-3.99	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	
3.850	-.59	-.65	-.72	-.75	-.74	-.70	-.59	-.46	-.31	-.13	.05	.25	.47	.69	.08	.37	.66	.96	1.25	1.54	1.83	2.08	1.39	-3.77	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	
3.925	-.37	-.23	-.05	.12	.27	.38	.47	.57	.67	.78	.91	1.05	1.21	1.39	.36	.67	.98	1.29	1.60	1.91	2.22	2.45	1.51	-3.55	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	
4.000	-.45	-.31	-.09	.24	.60	.95	1.22	1.41	1.54	1.65	1.74	1.83	1.94	2.06	2.21	.97	1.28	1.58	1.88	2.18	2.47	2.66	1.61	-3.33	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	
4.075	-.47	-.40	-.24	.01	.37	.81	1.25	1.66	1.99	2.21	2.37	2.48	2.58	2.68	2.79	1.32	1.59	1.85	2.12	2.38	2.64	2.78	1.71	-3.11	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	
4.150	-.47	-.42	-.33	-.15	.11	.47	.91	1.40	1.88	2.31	2.65	2.89	3.06	3.20	3.32	1.76	2.01	2.25	2.49	2.73	2.96	3.01	1.82	-2.89	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	
4.225	-.47	-.44	-.38	-.26	-.06	.24	.62	1.07	1.56	2.05	2.54	2.97	3.30	3.55	3.73	3.89	2.40	2.62	2.83	3.05	3.25	3.19	1.92	-2.66	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	
4.300	-.47	-.45	-.41	-.33	-.18	.05	.39	.82	1.30	1.79	2.30	2.81	3.28	3.68	3.99	4.23	2.78	2.97	3.17	3.36	3.52	3.35	2.02	-2.44	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	
4.375	-.47	-.45	-.41	-.35	-.25	-.07	.21	.61	1.08	1.58	2.10	2.63	3.15	3.65	4.08	4.42	4.69	3.31	3.49	3.67	3.80	3.49	2.12	-2.22	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	
4.450	-.45	-.43	-.40	-.34	-.25	-.12	.11	.46	.90	1.40	1.93	2.47	3.02	3.56	4.06	4.49	4.84	3.60	3.78	3.97	4.07	3.62	2.23	-2.00	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	
4.525	-.45	-.44	-.41	-.35	-.25	-.10	.10	.39	.79	1.26	1.78	2.32	2.88	3.45	3.99	4.48	4.89	3.78	3.96	4.14	4.23	4.30	3.73	2.33	-1.78	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54
4.600	-.45	-.44	-.43	-.39	-.31	-.15	.08	.39	.77	1.20	1.69	2.21	2.75	3.31	3.86	4.38	4.83	3.86	4.03	4.20	4.28	4.43	4.43	3.80	2.43	-1.56	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36
4.675	-.47	-.44	-.43	-.41	-.37	-.26	-.07	.22	.62	1.09	1.58	2.08	2.59	3.12	3.65	4.16	4.63	3.91	4.08	4.25	4.32	4.39	3.86	2.52	-1.34	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19
4.750	-.47	-.44	-.44	-.42	-.40	-.34	-.21	.01	.34	.76	1.25	1.78	2.32	2.84	3.35	3.85	4.32	4.03	4.20	4.37	4.44	4.51	3.92	2.62	-1.12	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01
4.825	-.47	-.47	-.44	-.43	-.41	-.37	-.29	-.15	.10	.45	.88	1.37	1.90	2.45	2.99	3.51	3.99	4.43	4.79	4.94	4.72	4.02	2.72	-.90	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	
4.900	-.47	-.47	-.44	-.44	-.42	-.39	-.34	-.24	-.06	.22	.59	1.04	1.54	2.08	2.62	3.17	3.68	4.15	4.54	4.86	4.87	4.11	2.82	-.68	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	
4.975	-.47	-.47	-.44	-.44	-.43	-.40	-.36	-.28	-.15	.07	.39	.80	1.27	1.79	2.33	2.87	3.41	3.91	4.33	4.65	5.00	4.19	2.93	-.46	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	
5.050	-.47	-.47	-.47	-.42	-.41	-.40	-.38	-.32	-.21	-.03	.24	.61	1.06	1.56	2.09	2.63	3.16	3.67	4.11	4.43	4.67	4.27	3.03	-.24	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	
5.125	-.47	-.47	-.47	-.39	-.39	-.38	-.36	-.32	-.25	-.11	.12	.45	.87	1.36	1.86	2.38	2.90	3.39	3.82	4.16	4.40	4.33	3.12	-.01	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	
5.200	-.47	-.47	-.47	-.46	-.38	-.36	-.34	-.31	-.26	-.16	.01	.29	.67	1.12	1.61	2.09	2.57	3.02	3.44	3.80	4.06	4.28	3.22	.21	.07	.07	.07	.07	.07	.07	.07	
5.275	-.47	-.47	-.47	-.47	-.41	-.39	-.37	-.34	-.29	-.22	-.09	.12	.44	.84	1.29	1.74	2.18	2.60	3.01	3.38	3.69	3.97	3.32	.43	.25	.25	.25	.25	.25	.25	.25	
5.350	-.47	-.47	-.47	-.49	-.47	-.43	-.41	-.39	-.35	-.29	-.20	-.04	.21	.55	.95	1.37	1.79	2.19	2.57	2.95	3.29	3.58	3.41	.65	.43	.43	.43	.43	.43	.43	.43	
5.425	-.47	-.47	-.47	-.49	-.48	-.46	-.44	-.41	-.37	-.30	-.18	.01	.29	.63	1.02	1.42	1.80	2.17	2.53	2.89	3.22	3.51	.87	.61	.61	.61	.61	.61	.61	.61	.61	

Table 4. (Continued).

log T	log ρ=																														
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
5.500	-.47	-.47	-.47	-.49	-.48	-.47	-.46	-.46	-.45	-.43	-.39	-.31	-.17	.06	.36	.71	1.08	1.45	1.80	2.15	2.51	2.86	3.17	3.43	.79	.79	.79	.79	.79	.79	.79
5.575	-.47	-.47	-.47	-.48	-.47	-.44	-.47	-.47	-.46	-.45	-.44	-.40	-.31	-.15	.11	.43	.79	1.14	1.48	1.81	2.16	2.52	2.85	3.13	.97	.97	.97	.97	.97	.97	.97
5.650	-.47	-.47	-.47	-.48	-.47	-.46	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.44	-.40	-.30	-.13	.15	.50	.86	1.20	1.52	1.84	2.19	2.54	2.85	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
5.725	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.44	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.43	-.39	-.29	-.09	.22	.58	.93	1.25	1.56	1.90	2.25	2.57	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
5.800	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.49	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.42	-.37	-.25	-.02	.30	.66	.99	1.31	1.63	1.98	2.31	1.50	1.20	.71	-.27	-1.20	-2.29	-3.39
5.875	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.48	-.49	-.46	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.44	-.41	-.34	-.19	.06	.40	.75	1.07	1.40	1.74	2.07	2.38	1.75	1.19	.24	-.70	-1.77	-2.86
5.950	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.43	-.38	-.29	-.11	.17	.51	.86	1.19	1.52	1.84	2.15	2.27	1.67	.74	-.19	-1.25	-2.33
6.025	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.44	-.41	-.35	-.23	.00	.31	.67	1.01	1.34	1.64	1.92	2.22	2.55	1.25	.32	-.74	-1.81
6.100	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.46	-.45	-.43	-.39	-.31	-.14	.13	.48	.84	1.16	1.45	1.70	1.99	2.31	1.74	.81	-.24	-1.29	
6.175	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.44	-.41	-.35	-.24	-.03	.28	.64	.97	1.24	1.48	1.75	2.07	2.12	1.29	.26	-.79	
6.250	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.43	-.38	-.30	-.15	.11	.43	.75	1.01	1.25	1.51	1.83	2.16	1.70	.75	-.30	
6.325	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.42	-.36	-.24	-.05	.22	.51	.77	1.01	1.27	1.58	1.93	1.84	1.18	.19	
6.400	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.41	-.33	-.18	.03	.28	.52	.76	1.03	1.34	1.69	2.06	1.41	.65	
6.475	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.45	-.40	-.30	-.14	.07	.30	.53	.79	1.09	1.45	1.82	1.15	.97	
6.550	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.44	-.38	-.27	-.10	.10	.31	.56	.85	1.20	1.58	1.93	.86
6.625	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.49	-.47	-.47	-.47	-.47	-.46	-.43	-.36	-.24	-.07	.12	.34	.62	.96	1.34	1.70	.43	
6.700	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.50	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.47	-.45	-.41	-.33	-.21	-.04	.16	.41	.73	1.10	1.46	1.80	
6.775	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.51	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.46	-.44	-.39	-.30	-.18	.00	.22	.51	.86	1.22	1.56	
6.850	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.53	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.47	-.46	-.42	-.36	-.25	-.10	.09	.35	.68	1.04	1.39
6.925	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.56	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.46	-.44	-.39	-.31	-.18	-.01	.22	.51	.86	1.23
7.000	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.61	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.48	-.47	-.46	-.44	-.37	-.28	-.15	.05	.31	.63	.99



Table 5. OPAL opacity table interpolated for X=0.7 and Z=0.004 with metal distribution from Weiss (1995).

<b>log T</b>	<b>log ρ=</b>																														
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
3.250	-4.48	-3.80	-3.20	-2.86	-2.72	-2.67	-2.64	-2.63	-2.63	-2.62	-2.62	-2.62	-2.61	-2.60	-2.60	-2.59	-2.58	-2.56	-2.54	-2.52	-2.49	-2.46	-2.42	-5.54	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59	-4.59
3.325	-4.73	-4.71	-4.59	-4.14	-3.52	-3.04	-2.80	-2.69	-2.65	-2.63	-2.61	-2.60	-2.59	-2.57	-2.55	-2.52	-2.49	-2.44	-2.39	-2.33	-2.26	-2.18	-2.09	-5.32	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41	-4.41
3.400	-4.53	-4.51	-4.48	-4.41	-4.29	-4.05	-3.60	-3.12	-2.83	-2.69	-2.62	-2.57	-2.53	-2.48	-2.43	-2.36	-2.29	-2.20	-2.09	-1.98	-1.85	-1.72	-1.58	-5.09	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23	-4.23
3.475	-4.44	-4.41	-4.38	-4.31	-4.21	-4.08	-3.90	-3.64	-3.28	-2.90	-2.60	-2.41	-2.25	-2.13	-2.01	-1.88	-1.73	-1.59	-1.43	-1.28	-1.12	-.96	-.80	-4.87	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05	-4.05
3.550	-4.31	-4.29	-4.32	-4.24	-4.10	-3.92	-3.68	-3.39	-3.06	-2.72	-2.38	-2.07	-1.82	-1.62	-1.45	-1.27	-1.08	-.90	-.71	-.52	-.33	-.14	.00	-4.65	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87	-3.87
3.625	-4.13	-4.14	-4.23	-4.12	-3.94	-3.68	-3.37	-3.04	-2.69	-2.35	-2.03	-1.72	-1.44	-1.20	-.98	-.76	-.53	-.30	-.08	.15	.38	.61	.66	-4.43	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70	-3.70
3.700	-3.96	-3.99	-4.03	-3.92	-3.71	-3.39	-3.03	-2.69	-2.35	-2.04	-1.73	-1.43	-1.13	-.86	-.60	-.33	-.06	.21	.47	.74	1.01	1.26	1.06	-4.21	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52	-3.52
3.775	-1.49	-1.68	-1.82	-1.90	-1.89	-1.79	-1.64	-1.44	-1.24	-1.01	-.78	-.53	-.80	-.51	-.24	.05	.33	.61	.89	1.17	1.46	1.72	1.25	-3.99	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34	-3.34
3.850	-.59	-.65	-.72	-.75	-.74	-.69	-.59	-.46	-.30	-.12	.06	.27	.48	.71	.08	.37	.66	.96	1.25	1.54	1.83	2.08	1.39	-3.77	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16	-3.16
3.925	-.37	-.22	-.05	.13	.27	.38	.48	.57	.67	.79	.92	1.07	1.23	1.41	.36	.67	.98	1.29	1.60	1.91	2.22	2.45	1.51	-3.55	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98	-2.98
4.000	-.44	-.31	-.08	.24	.61	.96	1.23	1.42	1.55	1.65	1.75	1.84	1.95	2.08	2.23	.97	1.28	1.58	1.88	2.18	2.47	2.66	1.61	-3.33	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80	-2.80
4.075	-.47	-.39	-.24	.03	.39	.82	1.27	1.67	2.00	2.22	2.38	2.49	2.59	2.70	2.81	1.32	1.59	1.85	2.12	2.38	2.64	2.78	1.71	-3.11	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62	-2.62
4.150	-.46	-.42	-.32	-.14	.13	.49	.93	1.42	1.90	2.32	2.66	2.90	3.07	3.21	3.33	1.76	2.01	2.25	2.49	2.73	2.96	3.01	1.82	-2.89	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44	-2.44
4.225	-.46	-.43	-.37	-.25	-.04	.26	.64	1.09	1.57	2.07	2.55	2.98	3.31	3.55	3.74	3.89	2.40	2.62	2.83	3.05	3.25	3.19	1.92	-2.66	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26	-2.26
4.300	-.47	-.44	-.40	-.32	-.17	.07	.41	.83	1.31	1.81	2.31	2.82	3.29	3.69	3.99	4.23	2.78	2.97	3.17	3.36	3.52	3.35	2.02	-2.44	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08	-2.08
4.375	-.46	-.44	-.40	-.34	-.24	-.06	.23	.62	1.09	1.60	2.12	2.64	3.16	3.66	4.08	4.43	4.69	3.31	3.49	3.67	3.80	3.49	2.12	-2.22	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90
4.450	-.44	-.43	-.39	-.33	-.24	-.10	.13	.47	.92	1.41	1.94	2.48	3.03	3.57	4.07	4.50	4.84	3.60	3.78	3.97	4.07	3.62	2.23	-2.00	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72	-1.72
4.525	-.44	-.43	-.40	-.34	-.23	-.09	.12	.41	.80	1.28	1.80	2.33	2.89	3.46	4.00	4.49	4.89	5.22	4.04	4.23	4.30	3.73	2.33	-1.78	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54	-1.54
4.600	-.44	-.43	-.42	-.38	-.29	-.14	.10	.41	.79	1.22	1.70	2.22	2.76	3.31	3.87	4.38	4.83	5.20	4.28	4.43	4.43	3.80	2.43	-1.56	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36	-1.36
4.675	-.47	-.44	-.42	-.40	-.35	-.24	-.05	.25	.65	1.11	1.60	2.10	2.60	3.12	3.65	4.17	4.63	5.02	4.50	4.57	4.49	3.86	2.52	-1.34	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19	-1.19
4.750	-.47	-.44	-.43	-.41	-.38	-.32	-.19	.04	.37	.79	1.27	1.80	2.34	2.86	3.36	3.86	4.32	4.74	5.07	4.70	4.53	3.92	2.62	-1.12	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01	-1.01
4.825	-.47	-.47	-.43	-.42	-.40	-.36	-.27	-.12	.14	.49	.91	1.40	1.93	2.47	3.01	3.52	4.00	4.43	4.79	4.94	4.72	4.02	2.72	-.90	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83	-.83
4.900	-.47	-.47	-.44	-.43	-.41	-.38	-.32	-.21	-.02	.26	.63	1.08	1.58	2.11	2.65	3.19	3.70	4.16	4.55	4.86	4.87	4.11	2.82	-.68	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65	-.65
4.975	-.47	-.47	-.43	-.42	-.41	-.39	-.34	-.26	-.12	.10	.43	.84	1.31	1.82	2.35	2.89	3.42	3.91	4.33	4.65	5.00	4.19	2.93	-.46	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47	-.47
5.050	-.47	-.47	-.47	-.40	-.39	-.38	-.35	-.29	-.18	.00	.28	.66	1.10	1.60	2.12	2.65	3.18	3.68	4.11	4.43	4.67	4.27	3.03	-.24	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29	-.29
5.125	-.47	-.47	-.47	-.36	-.35	-.34	-.32	-.28	-.20	-.07	.16	.49	.91	1.39	1.89	2.41	2.92	3.40	3.83	4.16	4.41	4.33	3.12	-.01	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11	-.11
5.200	-.47	-.47	-.47	-.46	-.34	-.32	-.29	-.26	-.20	-.09	.08	.36	.73	1.18	1.66	2.14	2.61	3.06	3.46	3.81	4.07	4.29	3.22	.21	.07	.07	.07	.07	.07	.07	.07
5.275	-.47	-.47	-.47	-.47	-.38	-.36	-.33	-.29	-.23	-.15	-.01	.21	.52	.92	1.36	1.82	2.26	2.67	3.05	3.40	3.70	3.97	3.32	.43	.25	.25	.25	.25	.25	.25	.25
5.350	-.47	-.47	-.47	-.49	-.47	-.42	-.39	-.35	-.30	-.23	-.12	.05	.31	.65	1.05	1.48	1.90	2.29	2.64	2.99	3.31	3.59	3.41	.65	.43	.43	.43	.43	.43	.43	.43
5.425	-.47	-.47	-.47	-.49	-.48	-.45	-.44	-.42	-.39	-.33	-.25	-.11	.10	.39	.75	1.15	1.55	1.92	2.27	2.60	2.93	3.24	3.51	.87	.61	.61	.61	.61	.61	.61	.61

Table 5. (Continued)

<b>log T</b>	<b>log ρ=</b>																															
	-12.0	-11.5	-11	-10.5	-10.0	-9.5	-9.0	-8.5	-8.0	-7.5	-7.0	-6.5	-6.0	-5.5	-5.0	-4.5	-4.0	-3.5	-3.0	-2.5	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	
5.500	-47	-47	-47	-49	-48	-47	-46	-45	-44	-41	-36	-26	-10	.15	.48	.85	1.23	1.60	1.93	2.25	2.57	2.89	3.19	3.44	.79	.79	.79	.79	.79	.79	.79	
5.575	-47	-47	-47	-48	-47	-44	-47	-47	-46	-45	-43	-37	-27	-.08	.22	.57	.94	1.30	1.63	1.93	2.24	2.56	2.87	3.15	.97	.97	.97	.97	.97	.97	.97	
5.650	-47	-47	-47	-48	-47	-46	-47	-47	-47	-46	-45	-43	-38	-.27	-.05	.27	.65	1.02	1.36	1.66	1.95	2.26	2.58	2.87	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	
5.725	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-44	-47	-47	-46	-46	-45	-42	-.37	-.25	-.01	.34	.73	1.10	1.41	1.69	1.99	2.30	2.61	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	
5.800	-47	-47	-47	-47	-47	-49	-47	-47	-47	-47	-46	-46	-44	-41	-.34	-.20	.06	.43	.82	1.16	1.46	1.75	2.05	2.36	1.50	1.20	.71	-.27	-1.20	-2.29	-3.39	
5.875	-47	-47	-47	-47	-47	-48	-49	-46	-47	-47	-47	-46	-45	-43	-.39	-.31	-.13	.17	.54	.91	1.23	1.53	1.83	2.14	2.43	1.75	1.19	.24	-.70	-1.77	-2.86	
5.950	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-46	-45	-42	-.36	-.25	-.04	.29	.66	1.02	1.33	1.64	1.94	2.23	2.27	1.67	.74	-.19	-1.25	-2.33	
6.025	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-48	-48	-47	-47	-46	-46	-45	-43	-.40	-.32	-.17	.09	.44	.82	1.16	1.48	1.77	2.03	2.29	2.59	1.25	.32	-.74	-1.81	
6.100	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-46	-45	-44	-.42	-.37	-.27	-.07	.24	.62	.99	1.32	1.60	1.83	2.08	2.37	1.74	.81	-.24	-1.29	
6.175	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-46	-44	-.42	-.39	-.32	-.18	.06	.41	.80	1.14	1.41	1.63	1.86	2.14	2.12	1.29	.26	-.79		
6.250	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-.44	-.41	-.36	-.25	-.07	.23	.59	.93	1.20	1.42	1.63	1.90	2.19	1.70	.75	-.30	
6.325	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-.44	-.40	-.32	-.17	.06	.37	.69	.97	1.19	1.40	1.66	1.97	1.84	1.18	.19		
6.400	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-.44	-.39	-.28	-.09	.17	.45	.71	.94	1.17	1.43	1.74	2.08	1.41	.65		
6.475	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-.43	-.37	-.24	-.03	.22	.47	.69	.92	1.18	1.50	1.85	1.15	.97	
6.550	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-.43	-.35	-.20	.01	.24	.46	.68	.94	1.26	1.61	1.95	.86	
6.625	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-47	-47	-47	-47	-47	-47	-45	-.41	-.32	-.16	.04	.24	.46	.71	1.02	1.37	1.71	.43
6.700	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-48	-48	-48	-48	-47	-47	-46	-.44	-.39	-.29	-.13	.06	.26	.49	.78	1.13	1.48	1.81		
6.775	-51	-51	-51	-51	-51	-51	-51	-51	-51	-51	-51	-51	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-47	-46	-.43	-.37	-.26	-.10	.08	.29	.56	.89	1.25	1.58		
6.850	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-53	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-47	-.45	-.42	-.34	-.23	-.08	.12	.36	.67	1.02	1.36	
6.925	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-56	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-.47	-.45	-.40	-.32	-.20	-.04	.18	.46	.79	1.13	
7.000	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-61	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-.47	-.46	-.43	-.38	-.29	-.16	.03	.27	.58	.91	

# Complex hyperbolic traveling wave solutions of Kuramoto-Sivashinsky equation using $(1/G')$ –expansion method for nonlinear dynamic theory

Asif YOKUŞ<sup>\*,1</sup>, Hülya DURUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Actuary, Faculty of Science, Firat University, Elazig, 23200, Turkey

<sup>2</sup>Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Ardahan University, Ardahan, 75000, Turkey

Geliş Tarihi (Received Date): 07.04.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 10.07.2019

## Abstract

In this paper, it is  $(1/G')$ –expansion method which are used to obtain new complex hyperbolic traveling wave solutions of the non-linear Kuramoto-Sivashinsky equation. Special values are given to the parameters in the solutions obtained and graphs are drawn. These graphs are presented using special package program. This method is employed to achieve the goals set for this study.

**Keywords:** Kuramoto-Sivashinsky equation,  $(1/G')$ -expansion method, complex hyperbolic traveling wave solutions.

## Lineer olmayan dinamik teorisi için $(1/G')$ -açılım metodunu kullanarak Kuramoto-Sivashinsky denkleminin karmaşık hiperbolik yürüyen dalga çözümleri

## Özet

Bu makalede lineer olmayan Kuramoto-Sivashinsky denkleminin yeni karmaşık hiperbolik yürüyen dalga çözümlerini elde etmek için  $(1/G')$  metodunu kullanılmıştır. Elde edilen çözümlerdeki parametrelere özel değerler verilmiş ve grafikler çizilmiştir. Bu grafikler özel paket programı kullanılarak sunulmuştur. Bu yöntem, bu çalışma için belirlenen hedeflere ulaşmak için kullanılmıştır.

\* Asif YOKUŞ, asfyokus@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-1460-8573>

Hülya DURUR, hulyadurur@ardahan.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-9297-6873>

**Anahtar Kelimeler:** Kuramoto-Sivashinsky denklemi,  $(1/G')$ -açılım metodu, karmaşık hiperbolik yürüyen dalga çözümleri.

## 1. Introduction

Nonlinear partial differential equations have been studied in many areas in recent years, such as in physics, engineering, fluid dynamics, plasma physics and chemistry, the search of exact solutions of PDEs which appeared. The exact solution have been proposed for solving PDEs. For this aim many variety analytical methods are used such as  $(G'/G)$ -expansion method, jacobi elliptic function expansion method, homotopy analysis method, extended trial equation method, auxiliary equation method, the functional variable method, generalized auxiliary equation method, the first integral method [1-8],  $(1/G')$ -expansion method [9-11], inverse Laplace homotopy technique [12], solutions of partial differential equations [13-16], the homotopy perturbation method (HPM) [17], multistage Adomian decomposition method (MADM)[18] and so on.

The Kuramoto-Sivashinsky (K-S) equation appears in many work such as Weiss-Tabor-Carnevale method [19], extensive numerical simulation [20], several alternative methods for the approximation of inertial manifolds [21], “viscous shocks” and periodic solutions [22], the Painleve test [23], a new topological method [24], a generalized tanh function method [25], the normal form analysis of nonlinear dynamic theory [26], detailed crossover analysis [27], the homotopy analysis method (HAM) [28], galerkin method [29] and so on.

In this study, our aim is to obtain the traveling wave solution of the Kuramoto-Sivashinsky equation by using  $(1/G')$ -expansion method. The K-S equation can be shown in the form of

$$u_t - \alpha u^2 u_x - \gamma u_{xx} - \beta u^3 u_x + u_{xxx} = 0, \quad (1.1)$$

where  $\alpha, \gamma, \beta$  arbitrary constants.

The KS equation is derived from many physical events. These physical phenomena are mainly: plasma instabilities in the diffusion system in the reaction, heat dissipation, phase turbulence, etc. [30].

## 2. $(1/G')$ -expansion method

Firstly, in order to explain this method, think two-variable general form of NPDEs

$$F\left(u, \frac{\partial^\alpha u}{\partial t^\alpha}, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \dots\right) = 0, \quad (2.1)$$

in the general form. Here, let  $u = u(x, t) = u(\xi)$ ,  $\xi = x + vt$ ,  $v \neq 0$ , and where  $v$  is a constant. Then, we can be converted into following nonlinear ODE for  $u(\xi)$ :

$$\Omega(u', u'', u''', \dots) = 0. \tag{2.2}$$

The solution of (2. 2) Eq. is assumed to have the form

$$u(\xi) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \left( \frac{1}{G'} \right)^i, \tag{2.3}$$

where  $a_i$  are constants,  $m$  is a pozitiv integer which is balancing term. This term is found in the Eq. (2.2) by equalizing the linear terms with the largest order and the non-linear terms having the largest order.  $G = G(\xi)$  is also considered as the solution of the following differential equation

$$G'' + \lambda G' + \mu = 0, \tag{2.4}$$

where  $\lambda$  and  $\mu$  represent the fixed number. If the desired derivatives of the Eq. (2.3) are calculated and replaced in the equation (2.2), a polynomial with the argument  $(1/G')$  is obtained. An algebraic equation system is created by equalizing the coefficients of this polynomial to zero. This equation system is solved with the help of the computer package program and put into place in the default (2.2) solution function. As a result, the solution of the Eq. (1.1) is found.

### 3. Solution of Kuramoto-Sivashinsky equation

We consider Kuramoto-Sivashinsky Eq. (1.1). Therefore, using transformation  $u = u(x, t) = u(\xi)$ ,  $\xi = x + vt, v \neq 0$ , of Eq. (1.1) we obtain

$$vu' - \alpha u^2 u' - \gamma u'' - \beta u^3 u' + u^{(4)} = 0, \tag{3.1}$$

where  $v$  represents the speed of the wave. Considering the Eq. (3.1), balancing  $u^{(4)}$  with  $u^3 u'$  gives  $m = 1$ , and we obtain the following form of the solution

$$u = u(\xi) = a_0 + a_1 \left( \frac{1}{G'} \right). \tag{3.2}$$

If we replace the Eq. (3.2) in the Eq. (3.1) and the coefficients of the algebraic equation are equal to zero, we can construct the following algebraic equation system.

$$\frac{1}{G'[\xi]} : \quad v\lambda a_1 - \gamma\lambda^2 a_1 + \lambda^4 a_1 - \alpha\lambda a_0^2 a_1 - \beta\lambda a_0^3 a_1 = 0,$$

$$\frac{1}{G'[\xi]^2} : \quad v\mu a_1 - 3\gamma\lambda\mu a_1 + 15\lambda^3\mu a_1 - \alpha\mu a_0^2 a_1 - \beta\mu a_0^3 a_1 - 2\alpha\lambda a_0 a_1^2 - 3\beta\lambda a_0^2 a_1^2 = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{G'[\xi]^3} : & -2\gamma\mu^2 a_1 + 50\lambda^2 \mu^2 a_1 - 2\alpha\mu a_0 a_1^2 - 3\beta\mu a_0^2 a_1^2 - \alpha\lambda a_1^3 - 3\beta\lambda a_0 a_1^3 = 0, \\ \frac{1}{G'[\xi]^4} : & 60\lambda\mu^3 a_1 - \alpha\mu a_1^3 - 3\beta\mu a_0 a_1^3 - \beta\lambda a_1^4 = 0, \\ \frac{1}{G'[\xi]^5} : & 24\mu^4 a_1 - \beta\mu a_1^4 = 0, \end{aligned} \quad (3.3)$$

where  $a_0, a_1, \alpha, \gamma, \beta$  and  $v$  are constants, aim with computer package program, finding the solutions of system (3.3) and we obtained the following stations.

**Case 1.** If

$$\begin{aligned} v &= \frac{2\left(\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} + 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2}, \\ a_0 &= \frac{-\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{3}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}}{3\mu^3}, \\ a_1 &= -\frac{2\sqrt{3}\left(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}}, \quad \beta = \frac{\alpha^{3/2}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{3}\left(-\gamma\mu - 2\lambda^2\mu\right)}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

substituting values (3.4) into (3.2) and we have the following wave solutions for Eq. (1.1):

$$\begin{aligned} \xi &= x + \left( \frac{2\left(\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} + 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2} \right) t, \\ u_1(x,t) &= \frac{-\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{3}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}}{3\mu^3} \\ &\quad - \frac{2\sqrt{3}\left(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}\left(-\frac{\mu}{\lambda} + A \cosh[\lambda\xi] - A \sinh[\lambda\xi]\right)}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

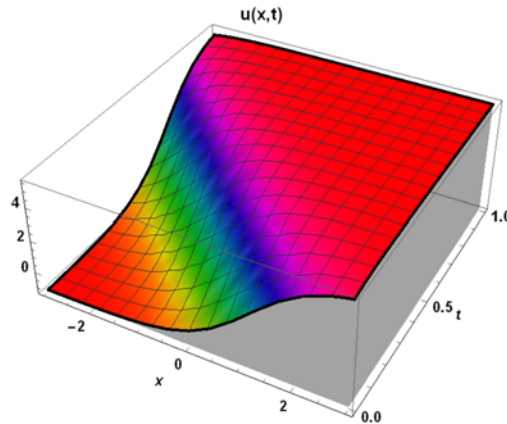


Figure 1. The solution representing the stationary *hyperbolic traveling wave solution* in the  $u_1(x,t)$  obtained of the Eq. (1.1) for  $\lambda = 1.6$ ,  $\mu = 1$ ,  $\gamma = 4$ ,  $\alpha = 2$ ,  $A = -4$ .

**Case 2.** If

$$v = \frac{2\left(-\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} - 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2},$$

$$a_0 = -\frac{i\left(\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{3}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}\right)}{3\mu^3}, \tag{3.6}$$

$$a_1 = -\frac{2i\sqrt{3}\left(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}}, \quad \beta = -\frac{i\alpha^{3/2}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{3}\left(\gamma\mu + 2\lambda^2\mu\right)},$$

substitute (3.6) into (3.2), obtain two types of traveling wave solutions of Eq. (1.1):

$$\xi = x + \left(\frac{2\left(-\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} - 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2}\right)t,$$

$$u_2(x,t) = -\frac{i\left(\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{3}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}\right)}{3\mu^3}$$

$$-\frac{2i\sqrt{3}\left(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}\left(-\frac{\mu}{\lambda} + A\cosh[\lambda\xi] - A\sinh[\lambda\xi]\right)}, \tag{3.7}$$

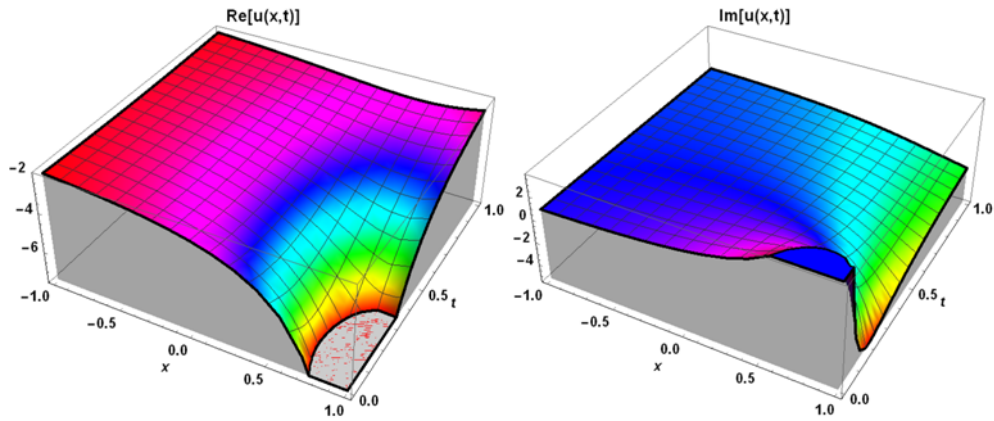


Figure 2. The solution representing the stationary *complex hyperbolic traveling wave solution* in the  $u_2(x,t)$  obtained of the Eq. (1.1) for  $\lambda = 1, \mu = -1, \gamma = -5, \alpha = 2, A = -3$ .

**Case 3.** If

$$v = \frac{2\left(-\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} - 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2},$$

$$a_0 = \frac{i\left(\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2((\gamma+2\lambda^2)\mu^4)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{3}((\gamma+2\lambda^2)\mu^4)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}\right)}{3\mu^3}, \tag{3.8}$$

$$a_1 = \frac{2i\sqrt{3}(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}}, \quad \beta = \frac{i\alpha^{3/2}((\gamma+2\lambda^2)\mu^4)^{1/4}}{\sqrt{3}(\gamma\mu + 2\lambda^2\mu)}$$

substituting values found (3.8) into (3.2), obtain two types of wave solutions for Eq. (1.1):

$$\xi = x + \left(\frac{2\left(-\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} - 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2}\right)t, \tag{3.9}$$

$$u_3(x,t) = \frac{i\left(\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2((\gamma+2\lambda^2)\mu^4)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} + \frac{\sqrt{3}((\gamma+2\lambda^2)\mu^4)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}\right)}{3\mu^3} + \frac{2i\sqrt{3}(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}\left(-\frac{\mu}{\lambda} + A\cosh[\lambda\xi] - A\sinh[\lambda\xi]\right)},$$



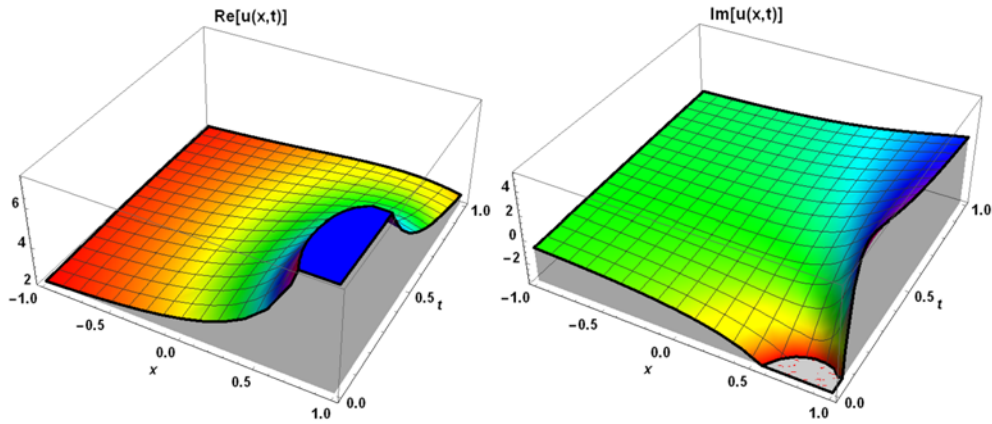


Figure 3. The solution representing the stationary *complex hyperbolic traveling wave solution* in the  $u_3(x,t)$  obtained of the Eq. (1.1) for  $\lambda = 1, \mu = -1, \gamma = -5, \alpha = 2, A = -3$ .

**Case 4.** If

$$v = \frac{2\left(\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} + 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2},$$

$$a_0 = \frac{\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} - \frac{\sqrt{3}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}}{3\mu^3}, \tag{3.10}$$

$$a_1 = \frac{2\sqrt{3}\left(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}}, \quad \beta = \frac{\alpha^{3/2}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{3}\left(\gamma\mu + 2\lambda^2\mu\right)},$$

substituting values found (3.10) into (3.2), obtain two types of wave solutions for Eq. (1.1):

$$\xi = x + \left( \frac{2\left(\gamma\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4} + 2\lambda^2\sqrt{(\gamma+2\lambda^2)\mu^4}\right)}{9\mu^2} \right) t,$$

$$u_4(x,t) = \frac{\frac{3\sqrt{3}\lambda\mu^2\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}} - \frac{\sqrt{3}\left((\gamma+2\lambda^2)\mu^4\right)^{3/4}}{\sqrt{\alpha}}}{3\mu^3} \tag{3.11}$$

$$+ \frac{2\sqrt{3}\left(\gamma\mu^4 + 2\lambda^2\mu^4\right)^{1/4}}{\sqrt{\alpha}\left(-\frac{\mu}{\lambda} + A\cosh[\lambda\xi] - A\sinh[\lambda\xi]\right)},$$

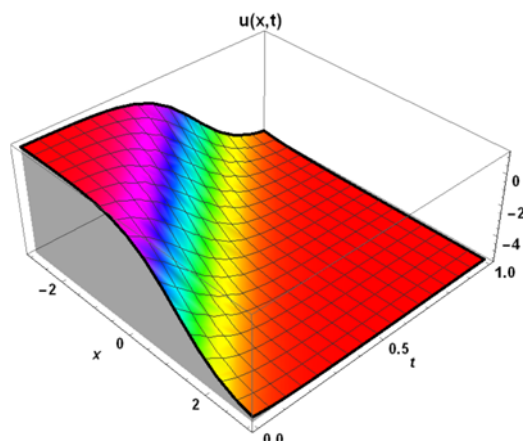


Figure 4. The solution representing the stationary *hyperbolic traveling wave solution* in the  $u_4(x,t)$  obtained of the Eq. (1.1) for  $\lambda = 1.6$ ,  $\mu = 1$ ,  $\gamma = 4$ ,  $\alpha = 2$ ,  $A = -4$ .

#### 4. Conclusion

In this study,  $(1/G')$ -expansion method is successfully employed to establish a series of new exact travelling wave solutions for K-S equation. The shock wave structure is obtained by the  $(1/G')$ - expansion method, in particular the wave solutions exhibiting asymptotic behavior are obtained. The process is less complicated than other methods. As a result, new series of exact traveling wave solutions are obtained. These solutions include  $(1/G')$ -expansion method, which may be useful to further understand the mechanisms of PDEs. Also, Mathematica has been used for computations and programming in this paper. The results obtained here show that the method is effective and reliable, can be further used applied to other PDE's.

#### References

- [1] Zhang, S., and Xia, T., A generalized new auxiliary equation method and its applications to nonlinear partial differential equations, **Physics Letters A**, 363 (5-6), 356-360, (2007).
- [2] Wang, M., Li, X., and Zhang, J., The  $(G' G)$ -expansion method and travelling wave solutions of nonlinear evolution equations in mathematical physics, **Physics Letters A**, 372 (4), 417-423, (2008).
- [3] Liao, S., On the homotopy analysis method for nonlinear problems, **Applied Mathematics and Computation**, 147 (2), 499-513, (2004).
- [4] Jiong, S., Auxiliary equation method for solving nonlinear partial differential equations, **Physics Letters A**, 309 (5-6), 387-396, (2003).
- [5] Raslan, K. R., The first integral method for solving some important nonlinear partial differential equations, **Nonlinear Dynamics**, 53 (4), 281-286, (2008).
- [6] Gurefe, Y., Misirli, E., Sonmezoglu, A., and Ekici, M., Extended trial equation method to generalized nonlinear partial differential equations, **Applied Mathematics and Computation**, 219 (10), 5253-5260, (2013).

- [7] Liu, S., Fu, Z., Liu, S., and Zhao, Q., Jacobi elliptic function expansion method and periodic wave solutions of nonlinear wave equations, **Physics Letters A**, 289 (1-2), 69-74, (2001).
- [8] Liu, W., and Chen, K., The functional variable method for finding exact solutions of some nonlinear time-fractional differential equations, **Pramana**, 81 (3), 377-384, (2013).
- [9] Yokuş, A., Comparison of caputo and conformable derivatives for time-fractional Korteweg–de Vries equation via the finite difference method, **International Journal of Modern Physics B**, 32 (29), 1850365, (2018).
- [10] Yokus, A., and Kaya, D., Numerical and exact solutions for time fractional Burgers' equation, **Journal of Nonlinear Sciences and Applications**, 3419-3428, 10 (2017).
- [11] Yokuş, A., An expansion method for finding traveling wave solutions to nonlinear pdes, **İstanbul Ticaret Üniversitesi**, (2015).
- [12] Yavuz, M., and Ozdemir, N., Numerical inverse Laplace homotopy technique for fractional heat equations, **Thermal Science**, 22 (1), 185-194, (2018).
- [13] Yavuz, M., Ozdemir, N., and Baskonus, H. M., Solutions of partial differential equations using the fractional operator involving Mittag-Leffler kernel, **The European Physical Journal Plus**, 133 (6), 215 (2018).
- [14] Kaya, D., An explicit solution of coupled viscous Burger' equation by the decomposition method, **International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences**, 27 (11), 675-680, (2001).
- [15] Aziz, I., and Ahmad, M., Numerical solution of two-dimensional elliptic PDEs with nonlocal boundary conditions, **Computers Mathematics with Applications**, 69 (3), 180-205, (2015).
- [16] Esen, A., Sulaiman, T. A., Bulut, H., and Baskonus, H. M., Optical solitons to the space-time fractional (1+1)-dimensional coupled nonlinear Schrödinger equation, **Optik**, 150-156, 167 (2018).
- [17] Evirgen, F., and Özdemir, N. A fractional order dynamical trajectory approach for optimization problem with HPM. In **Fractional Dynamics and Control** (pp. 145-155). Springer, New York, NY., (2012).
- [18] Evirgen, F., and Özdemir, N. Multistage adomian decomposition method for solving NLP problems over a nonlinear fractional dynamical system. **Journal of Computational and Nonlinear Dynamics**, 6(2), 021003, (2011).
- [19] Kudryashov, N. A., Exact solutions of the generalized Kuramoto-Sivashinsky equation, **Physics Letters A**, 147 (5-6), 287-291, (1990).
- [20] Hyman, J. M., and Nicolaenko, B., The Kuramoto-Sivashinsky equation: a bridge between PDE's and dynamical systems, **Physica D: Nonlinear Phenomena**, 18 (1-3), 113-126, (1986).
- [21] Jolly, M. S., Kevrekidis, I. G., and Titi, E. S., Approximate inertial manifolds for the Kuramoto-Sivashinsky equation: analysis and computations, **Physica D: Nonlinear Phenomena**, 44 (1-2), 38-60, (1990).
- [22] Rademacher, J. D., and Wittenberg, R. W., Viscous shocks in the destabilized Kuramoto-Sivashinsky equation, **Journal of computational and nonlinear Dynamics**, 1 (4), 336-347, (2006).
- [23] Conte, R., and Musette, M., Painleve analysis and Backlund transformation in the Kuramoto-Sivashinsky equation, **Journal of Physics A: Mathematical and General**, 22 (2), 169, (1989).

- [24] Zgliczynski, P., and Mischaikow, K., Rigorous numerics for partial differential equations: The Kuramoto-Sivashinsky equation, **Foundations of Computational Mathematics**, 1 (3), 255-288, (2001).
- [25] Chen, H., and Zhang, H., New multiple soliton solutions to the general Burgers–Fisher equation and the Kuramoto–Sivashinsky equation, **Chaos, Solitons & Fractals**, 19 (1), 71-76, (2004).
- [26] Chang, H. C., Traveling waves on fluid interfaces: normal form analysis of the Kuramoto–Sivashinsky equation, **The Physics of fluids**, 29 (10), 3142-3147, (1986).
- [27] Sneppen, K., Krug, J., Jensen, M. H., Jayaprakash, C., and Bohr, T., Dynamic scaling and crossover analysis for the Kuramoto-Sivashinsky equation. **Physical Review A**, 46 (12), R7351, (1992).
- [28] Abbasbandy, S., Solitary wave solutions to the Kuramoto–Sivashinsky equation by means of the homotopy analysis method, **Nonlinear Dynamics**, 52 (1-2), 35-40, (2008).
- [29] Xu, Y., and Shu, C. W., Local discontinuous Galerkin methods for the Kuramoto–Sivashinsky equations and the Ito-type coupled KdV equations, **Computer methods in applied mechanics and engineering**, 195 (25-28), 3430-3447, (2006).
- [30] Rademacher, J. D., & Wittenberg, R. W. (2006). Viscous shocks in the destabilized Kuramoto-Sivashinsky equation. **Journal of computational and nonlinear dynamics**, 1(4), 336-347.

# İki hidrodinamik programın karşılaştırılması

Elif OĞUZ<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarı

<sup>2</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Rüzgar Enerji Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM)

Geliş Tarihi (Received Date): 26.02.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 13.09.2019

## Özet

Açık deniz yapılarının zaman ve maliyet kısıtlamaları sebebiyle, tasarımın ilk aşamasında sayısal metotlara ihtiyaç duyulur. Modellemenin güvenilir şekilde yapılabileceğini anlamak için tasarıma başlamadan önce kıyaslama çalışmaları yürütülmektedir. Karşılaştırma çalışması için, genellikle, üzerinde çalışılan tasarıma geometrik olarak en yakın yapı seçilir. Geometrik benzerliğin yanı sıra seçilecek karşılaştırma çalışmasının gerekli verilerine rahatlıkla ulaşılabileceği önemlidir. Sonrasında, yayınlanmış olan bu karşılaştırma çalışması yeniden modellenip sonuçları ile kıyaslanır. Seçilen yazılımlar ya da açık kaynaklı kodlar bazı teorik kabullere ve bazen basitleştirmelere dayandığından, çoğu zaman araştırmacılar farklı sayısal programlar kullanmayı tercih ederler. Bu çalışmada açıkdeniz yapılarının hidrodinamik analizinde yaygın olarak kullanılan MIT tarafından geliştirilmiş WAMIT programı ile Fransa'daki Nantes laboratuvarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilen açık kaynaklı kod NEMOH kullanılarak silindirik bir yapı modellenmiş ve her iki yazılımın avantajları ile dezavantajları tartışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Hidrodinamik, sayısal modelleme, açık kaynaklı kod.

## A Comparison of two hydrodynamic programmes

### Abstract

Due to time and cost restraints the first stage of design of offshore structures requires a numerical approach. Benchmark studies are carried out prior to actual design in order to determine whether the numerical modelling can be performed reliably. Generally, a benchmark case is selected considering structural similarities. Apart from geometric similarities, it is important to consider whether there is publicly available data. Following this, the results of regenerated benchmark case is compared with the original

\* Elif OĞUZ, elifoguz@metu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-3574-9436>

*benchmark study. Since software or open-source code used for the study includes some theoretical assumptions as well as a number of simplifications, usually, researchers prefer to use comparison using different numerical tools. In this study, a cylinder was modelled using WAMIT software (which was developed by MIT's researchers and used commonly in hydrodynamic analysis of offshore wind systems) and NEMOH (which was developed by Nantes laboratory researchers) and the benefits and the drawbacks of both software was discussed.*

**Keywords:** *Hydrodynamics, numerical modeling, open-source code.*

## 1. Giriş

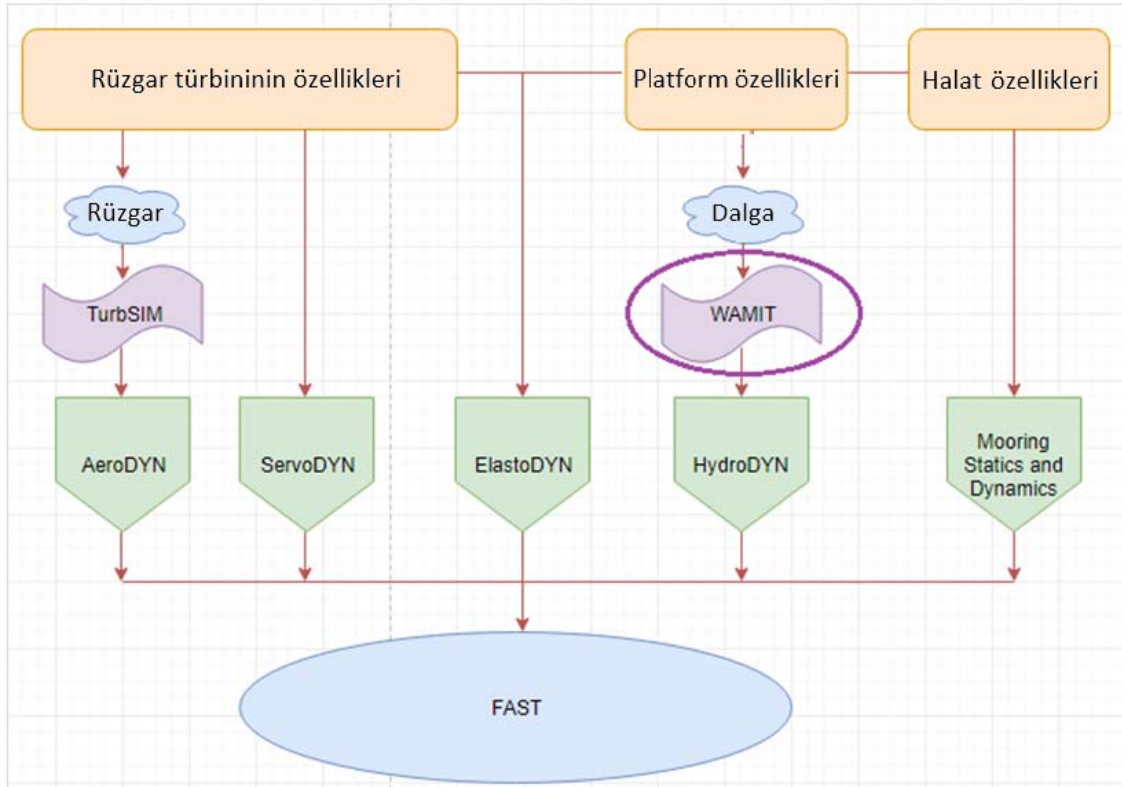
Son yıllarda karada kurulu rüzgar santrallerinin sayısında önemli oranda artış görülmektedir. Ancak, bu sistemlerin kuş yaşamını olumsuz etkileyip kuş ölümlerine sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca yaşam alanlarında gürültü, gölge ve benzeri istenmeyen görsel “etkiler yaratması, enerji sektörünü başka alternatifleri araştırmaya yönlendirmiştir. Karada kurulu olanlarla kıyaslandığında açık deniz rüzgar türbinlerinin yüksek ve sürekli rüzgar hızı, yaşam alanları üzerindeki düşük görsel ve işitsel etkiler vb. avantajları göz önüne alındığından teknolojik gelişmeler o yönde ilerlemiştir [1]. Rüzgardan elektrik üretme fikrinin açık denizde ilk uygulaması 1991 yılında Danimarka’da Vindeby Rüzgar santrali ile gerçekleşmiştir [2]. Rüzgar türbininin açık denize taşınabilmesi için iki yol vardır. Birinci yol tekil kazık temel vb. sabit yapıları kullanmak, ikinci yol ise yüzer platformlardan yararlanmaktır. Bu ikisi arasındaki en önemli fark uygulama bölgesi olup, deniz derinliği burada en belirleyici faktör olarak bilinmektedir. Günümüze kadar edinilen deneyimler, sabit temelli uygulamaların 40 metre su derinliğine kadar hem teknik, hem maliyet bakımından uygun olduğunu göstermektedir [3]. Açıkdeniz rüzgar türbini için deniz tabanına tekil kazık gibi temellerle sabitlenenyapılar her ne kadar Birleşik Krallık (UK), Almanya ve Danimarka gibi ülkelerde her geçen gün yaygınlaşsa da bu yapılar, yukarıda da belirtildiği gibi, su derinliği ile kısıtlanmaktadır [4, 5]. Aniden derinleşen ve dik kıta sahanlığına sahip birçok ülke için sabit temelli açıkdeniz rüzgar türbinleri uygulanabilir değildir. Ayrıca, su derinliğinin 50 metrenin üzerinde olması halinde bu yapılar çok pahalıya mal olmakta ve uygulanabilir olmaktan epey uzaklaşmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, son yıllarda yatırımcıların yüzer açıkdeniz rüzgar türbinlerine olan ilgisi ve beraberinde bu konuda yapılan araştırma geliştirme faaliyetleri ciddi oranda artış göstermektedir.

Genelde, karada karşımıza çıkan bina ve benzeri engeller yüzey pürüzlülüğünü arttırarak elektriğe dönüştürülecek rüzgar enerji miktarını azaltmaktadır. Açıkdenizde yüzey sürtünmelerinin karaya nazaran çok az olması, rüzgar hızının açıkdenizde yüksek olmasına sebep olur ki; bu da yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini arttırır [6]. Rüzgardan elde edilecek enerji miktarı rüzgar hızının küpü ile orantılıdır. Bu sebeple kıyıda ne kadar açıkdenize gidersek o kadar fazla enerji üretme imkanımız olmaktadır. Ancak kıyıda olan mesafenin gerektiğinden fazla olması ise bakım-onarım maliyetlerini arttıracaktır.

Bu sistemler hayata geçmeden evvel birçok mühendislik yapısında olduğu gibi önce sayısal olarak modellenmekte, ardından yapının fiziksel model performansı laboratuvar ortamında incelenmektedir. Hatta bazı durumlarda kurulumdan önce bir pilot bölge seçilip, yakın kıyıda bir süre sistemin performansı incelenmektedir. Deneysel çalışma

için her zaman laboratuvar olanakları uygun olmayabilir. Ayrıca araştırmacılar sayısal modellemelerden laboratuvar ortamındaki fiziksel model testlerine kıyasla çok daha kısa sürede sonuç aldıkları için sayısal modellemelerin güvenilirliğinin gösterilmesi büyük önem taşır. Sıralanan sebeplerden ötürü açıkdeniz rüzgar türbinlerinin gerçek deniz koşullarındaki davranışlarının sayısal olarak modellemesinde kullanılan teknikler bu sektörün gelişimi için kritik bir öneme sahiptir. Sınırlı eleman yöntemi yenilenebilir enerji sistemlerinin sayısal modellemesinde ve denizcilik sektöründe belki de en yaygın kullanılan metotlardan biridir. Potansiyel teorinin lineer tabiatı sebebiyle her ne kadar kısıtlansa da, sayısal çözümler için gerekli simülasyon süresi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği gibi diğer sayısal metotlara kıyasla çok kısadır. Bu sebeple sınırlı eleman yönteminin yenilenebilir enerji sistemleri geliştirilirken özellikle tasarımın ilk aşamalarında sıklıkla tercih edildiği görülmektedir [7,8].

Bu tip yapıların gerçek deniz koşullarındaki davranışlarının sayısal modellemeleri yapılırken yapının hidro, aero, elastik analizlerini entegre eden açık kaynaklı kodlar kullanılır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı, Amerika Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (National Renewable Energy Laboratory- NREL) araştırmacıları tarafından geliştirilen FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) açık kaynaklı kodudur. Bu kodun yaygın kullanılmasının en önemli sebebi gerekli validasyonlar için çok geniş araştırma ekibinin çalışıyor olması, bu açık kaynaklı kodun ücretsiz olması ve daha da önemlisi bu kod kullanılarak yapılmış birçok örneğin ulaşılır olmasıdır. Birçok mühendislik problemini çözmek için geliştirilmeye uygun olması bu tip açık kaynaklı kodların yaygın kullanılmasına sebebiyet vermektedir. Yenilenebilir enerji sistemlerinin doğası gereği çok disiplinli çalışılmaktadır. Genelde her disiplin, kendi uzmanlık alanına giren kısım için gerekli hassasiyeti göstermekte ve analizlerinin güvenilirliğini ispatlamak durumundadır.



Şekil 1. FAST ve entegrasyonu yapılan tüm programlar.

Açıkdeniz yüzer rüzgar türbinlerinin suyun altında kalan kısımlarının hidrodinamik modellemesi yapılmalı, ardından da bu sonuçların diğer sonuçlarla entegrasyonunu sağlayacak olan FAST açık kaynaklı koduna veri olarak aktarılması gerekmektedir. Şekil 1’de FAST programı ve çıktılarını girdi verisi olarak alacağı tüm alt programlar gösterilmiştir. WAMIT ile elde edilen hidrodinamik katsayıların direkt FAST’a aktarılıp entegrasyonu mümkündür. Ancak WAMIT, lisansına her zaman belirli bir bedel ödenmesi gereken bir program olduğundan, bu çalışmada WAMIT ile hesaplanması istenen katsayıların belirlenmesinin NEMOH ile yapılması hedeflenmiş ve FAST’a uyumlu olup olmayacağı incelenmiştir.

Bu çalışmada iki hidrodinamik programın karşılaştırılması amaçlanmış olduğundan su altında kalan sistem basitleştirilmiştir. Programların analizi için gerekli parametrik çalışmaları arttırmak için 9m çapında silindir bir geometri seçilmiştir ve bu yapının hidrodinamik modellemesi iki ayrı program kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan programlardan ilki akademik ve ticari amaçlarla kullanılabilen WAMIT yazılımıdır ki, kullanıcıların lisans için ücret ödemesi gerekmektedir. Hidrodinamik kuvvetlerin ve katsayıların hesabında alternatif olarak açık kaynaklı kod NEMOH kullanılmıştır ki, bu durumda kullanıcıların herhangi bir ücret ödemelerine gerek yoktur. Bu çalışmada her iki programdan alınan sonuçların, entegrasyonu sağlayacak olan programa (FAST) olan uyumu ve açık kaynaklı koddaki uyumsuzluğun nasıl giderileceği anlatılmıştır.

## 2. Yöntem

NEMOH, Ecole de Centrale de Nantes laboratuvarındaki araştırmacılar tarafından yaklaşık 30 sene önce geliştirilmesine rağmen halen birçok araştırma projesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Başlangıçta dalga enerji dönüştürücülerinin hidrodinamik davranışının analizini yapmak üzere hazırlanmış bir açık kaynaklı kod olsa da son yıllarda açıkdeniz yüzer yapılarının davranışını belirlemek için de tercih edilmektedir [8]. 2015 yılında 11.’si düzenlenen Avrupa Dalga ve Gelgit Enerji Konferansının bildiri kitabındaki bildirimler incelendiğinde hangi sınırlı eleman yönteminin ne sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. İlgili veriler aşağıda Tablo 1’de gösterilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere dalga enerji dönüştürücü sistemlerinin sayısal modellemelerinde en yaygın kullanılan sınırlı eleman yöntemleri WAMIT ve NEMOH programlarıdır [9].

Tablo 1. Mevcut programlar ve özellikleri [7].

Program	Frekans temelli analiz	Zaman temelli analiz	Açık kaynaklı kod	Kullanım (%)*
WAMIT	+	-	+	80.5
NEMOH	+	-	-	19.5
AQWA	+	-	-	22.0
Aquaplus	+	-	-	9.80
ACHIL3D	-	+	-	4.90
WADAM	+	-	-	7.30

\*[7]’de yayınlanan istatistiklere dayanır

NEMOH dalga enerji dönüştürücü sistemlerin hidrodinamik analizini yapmak üzere geliştirilen açık kaynaklı kod olduğundan araştırmacılar tarafından uzun yıllardır kullanılmasına rağmen literatür incelendiğinde yayınlanmış çalışmalara pek

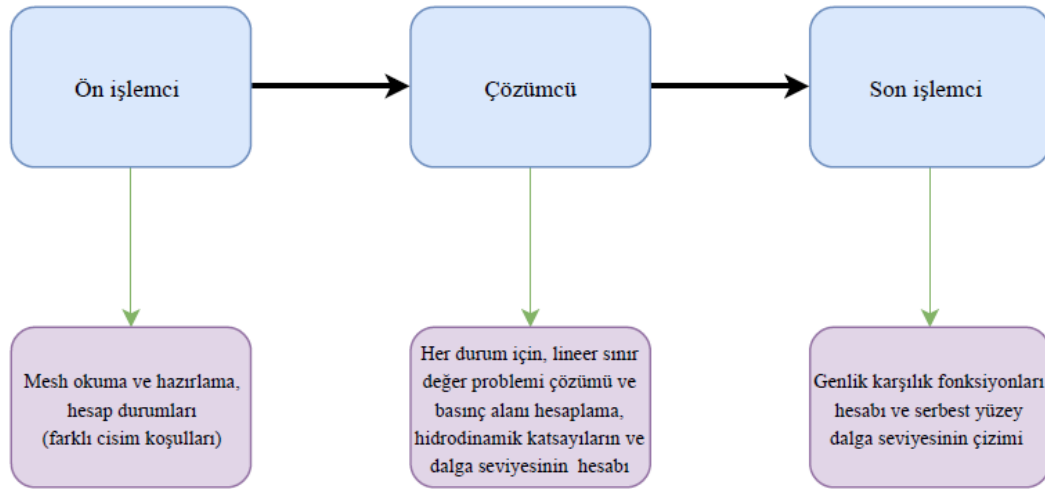


rastlanmamaktadır. Bunun bir sebebi, yenilenebilir enerji sistemi geliştirilirken patent kaygıları sebebiyle araştırmacıların mecburen göstermek durumunda kaldığı özene, hassasiyete dayanır. Parisella ve Gourlay (2016) NEMOH ve WAMIT kullanarak kargo gemileri için yaptıkları hidrodinamik analizleri karşılaştırmıştır [9]. Ancak, bu açık kaynaklı kodun, başka hangi yenilenebilir enerji sistemlerinin analizinde ve hangi şartlarda kullanılabilmesine; kullanıldığında yaygın olarak tercih edilen WAMIT'e kıyasla ne gibi artılarının ve eksilerinin olduğuna literatürde rastlanmamıştır.

NEMOH dünyadaki ilk açık kaynaklı sınırlı eleman yöntemi kodu olarak bilinmektedir. Diğer sınırlı eleman yöntemlerinden farklı olarak, NEMOH lineer serbest yüzey sınır değer probleminin çözümlülüğü ile kütleli sınır koşulu tanımını ayırtmaktadır. Bu özellik esnek yapılar, hidroelastisite ve alışılmadık serbestlik dereceleri için çözüm sağlanmasına olanak tanır.

Bu çalışma birinci derece kuvvetler ile sınırlandırılmıştır ve ikinci derece (sürüklenme kuvvetleri gibi non-lineer) etkiler hesaba katılmamıştır. Ayrıca adil bir karşılaştırma yapabilmek için, simülasyonlarda Rhino ile oluşturulan aynı geometri dosyası kullanılmıştır.

NEMOH ve WAMIT sırayla çalışan üç ana programdan oluşmaktadır : Ön işlemci, Çözümcü ve Son işlemci. Aşağıda Şekil 2'de NEMOH içinde çalışan programlar gösterilmiştir.



Şekil 2. NEMOH içinde çalışan programlar.

### 3. İki yazılımın karşılaştırılması

#### 3.1. Ön işlemci

Ön işlemcide kullanıcı tarafından hazırlanan veri dosyaları program tarafından okunur ve simülasyon için gerekli ağ oluşturulur. Genelde veriler çevre koşullarını tanıtmaya yarayan parametrelerdir; örneğin su derinliği, deniz suyu yoğunluğu, dalga periyodu ve yönü gibi. Ya da yapı durumlarına ait parametrelerdir; örneğin serbestlik derecesi, panel sayısı gibi. WAMIT boyutsuz sonuçlar verdiği için başlangıçta veri olarak yerçekimi, deniz suyunun yoğunluğu gibi parametrelerin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır.

### 3.1.1. Programın Kullanım Rahatlığı

WAMIT ile bir simülasyon çalıştırabilmek için birden fazla veri dosyası hazırlamak gerekmektedir. En basit bir simülasyon için genelde beş farklı veri dosyası hazırlanır. WAMIT'in en temel veri dosyaları ve kapsamaları aşağıda Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. WAMIT'in en temel veri dosyaları [10]

Veri dosyasının ismi	Kapsamı
<i>config.wam</i>	Çeşitli parametrelerin ve seçeneklerin tanımlandığı veri dosyasıdır.
<i>SIM.cfg</i>	<i>config.wam</i> dosyasında tanımlanan parametrelerin neredeyse hepsini kapsar. Farklı olarak, paralel hesaplamada ihtiyaç duyulan parametreler bu veri dosyasında tanımlanır.
<i>SIM.pot</i>	Çevre koşullarının tanımlandığı veri dosyası. Ağ dosyasını çağırır. Serbestlik derecesi ve yapının sabit koordinat düzlemi burada tanımlanır.
<i>SIM.gdf</i>	Analizi yapılacak yapı geometrisinin ıslak yüzeyi burada tanımlanır.
<i>SIM.frc</i>	Kütle matrisinin, ağırlık merkezinin tanımlandığı veri dosyasıdır. Ayrıca o simülasyon sunucunda alınması istenen çıktıların tanımlandığı veri dosyasıdır.

NEMOH'a baktığımızda benzer veri girişinin WAMIT'e kıyasla çok daha basit olduğunu söyleyebiliriz. Çünkü sadece bir tane veri dosyası (*Nemoh.cal*) ile simülasyon için gerekli olan tüm veriler çağrılabilir. Ayrıca, *ID.dat* ve *input.txt* dosyaları çalışılan klasörün içine kopyalanmalıdır.

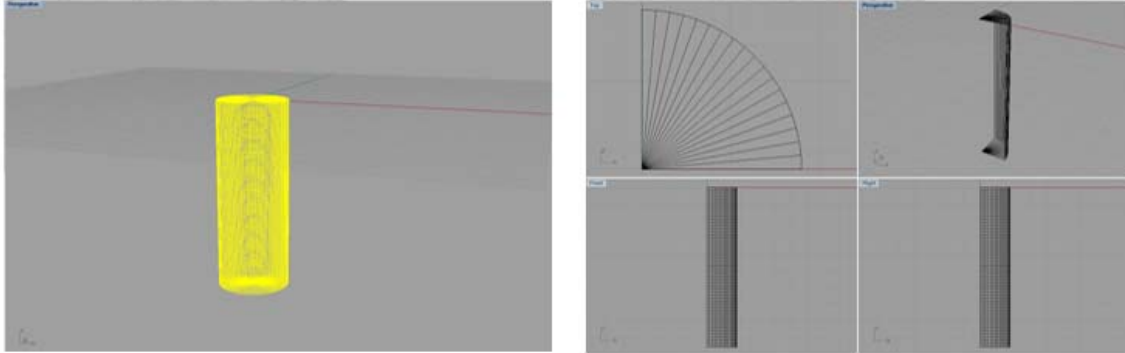
NEMOH, simülasyonları çalıştırmak için kullanıcılarına *Matlab* ve *Fortran* olmak üzere iki ayrı seçenek sunmaktadır. Dolayısıyla *Fortran*'a ya da *Matlab*'e hakim olan bir kullanıcı NEMOH ile hidrodinamik modelleme yapabilmektedir. Ayrıca *Matlab* ile NEMOH çalıştıranlar isterlerse önceden oluşturdukları ağ dosyasını aktarabilirler; isterlerse ağ oluşturmak için *Matlab*'te tanımlanan alt fonksiyon yardımıyla ağ oluşturabilmektedirler. Bu programlardan herhangi biri ile NEMOH'u çalıştırmak sonuç almak için yeterlidir.

### 3.1.2. Kullanma kılavuzu ve Örnekler

İki program arasındaki en büyük farklardan biri, geliştiren kurumlar tarafından sağlanan kullanma kılavuzu ve örneklerdir. WAMIT'in biri programın temelde dayandığı teorilerin ve kabullerin anlatıldığı çok kapsamlı teorik kılavuzu, diğeri ise tamamen programın nasıl kullanılacağını anlatan iki ayrı kullanma kılavuzu vardır. Diğer yandan NEMOH'un takip edilecek kullanma kılavuzu ise epey sınırlı olup, oldukça kısa tutulmuştur. Ayrıca WAMIT kılavuzunda kullanıcıların yararlanabileceği 25 adet örnekte tüm olasılıklar açıkça gösterilmiştir. Hatta kullanım kılavuzunun ek bölümünde bu örneklerin detaylı açıklamaları bulunmaktadır. NEMOH kullanıcılarının yararlanabileceği herhangi bir örnek bulunmamaktadır. Aradaki bu ciddi fark NEMOH'un yaygın olarak kullanımının önündeki bir engeli işaret etmektedir.

### 3.1.3. Ağ oluşturma

Bilindiği üzere, herhangi bir yapının sayısal olarak hidrodinamik analizinin yapılabilmesi için ilk aşamada tüm yüzeyler belirli hacimlere ayrılmalıdır, yani ağ oluşturulmalıdır. Aşağıdaki şekilde bu çalışmada modellenen silindirik yapının geometrisi ve analizde kullanılan ağ görülmektedir. Karşılaştırma çalışması dikkate alınarak yapının yarıçapı 9m olarak alınırken, yapının suyun altında kalan kısmı ise 47.86m olarak alınmıştır. Sistemin toplam yer değiştirmesi 12171.1 m<sup>3</sup> olarak verilmiştir. Analizler üzerinde herhangi bir etkisinin olup olmadığını anlamak için ilk etapta tam silindirik ağ kullanılmıştır. Sonra çeyrek silindirik için ağ oluşturup aradaki hassasiyet kontrol edilmiştir. Bu çalışmada yapıya dair detaylardan ve parametrik çalışmalardan çok, iki programın benzer ve farklı özellikleri üzerinde durulmuştur.



Şekil 3. Yapı geometrisi ve kullanılan ağ.

WAMIT'in içinde herhangi bir ağ üretici olmadığından, analizi yapılacak yapı için başka bir yazılım ile ağ üretilip geometri dosyası çağrılmalıdır. NEMOH'da başka bir yazılım ile oluşturulan geometri dosyası kullanılabildiği gibi Matlab'teki alt fonksiyon ile ağ kolaylıkla oluşturulabilmektedir.

Ağ konusunda WAMIT ile NEMOH arasındaki en belirgin fark simetri düzlemidir. WAMIT iki simetri düzleminde (x0z ve y0z) hesaba izin verirken, NEMOH ise sadece bir simetri düzlemine (x0z) izin vermektedir ki bu da simülasyonun gerekli hesaplarını bazı durumlarda etkileyebilmektedir.

Sadece birkaç programda oluşturulan ağ dosyaları WAMIT'in kabul ettiği .gdf uzantılı veya NEMOH'un kabul ettiği .mar uzantılı olarak kaydedilebilmektedir. O yüzden WAMIT kullanıcılarının *Multisurf*, *Rhino* gibi programlarla gerekli dosyaları oluşturmaları gerekmektedir. Bu noktada NEMOH ile ağ dosyasının oluşturulabilmesi kullanıcıya bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, NEMOH içerdiği bazı alt fonksiyonlar yardımıyla NEMOH'ta oluşturulmuş ağ dosyalarını WAMIT'in kabul ettiği formata .gdf formuna ya da direkt okunabilen *GDFmesh.m* formuna dönüştürebilmektedir.

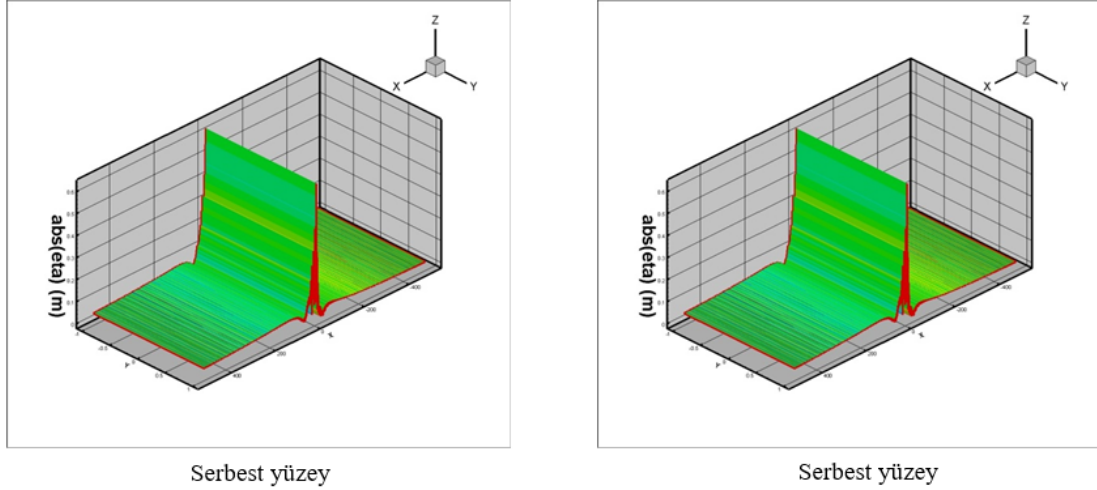
### 3.2. Çözücü

Bilindiği üzere, çözücü sınır değer problemini ön işlemcide tanımlanan her durum için çözer ve sonuçların olduğu çıktı dosyalarını oluşturur.

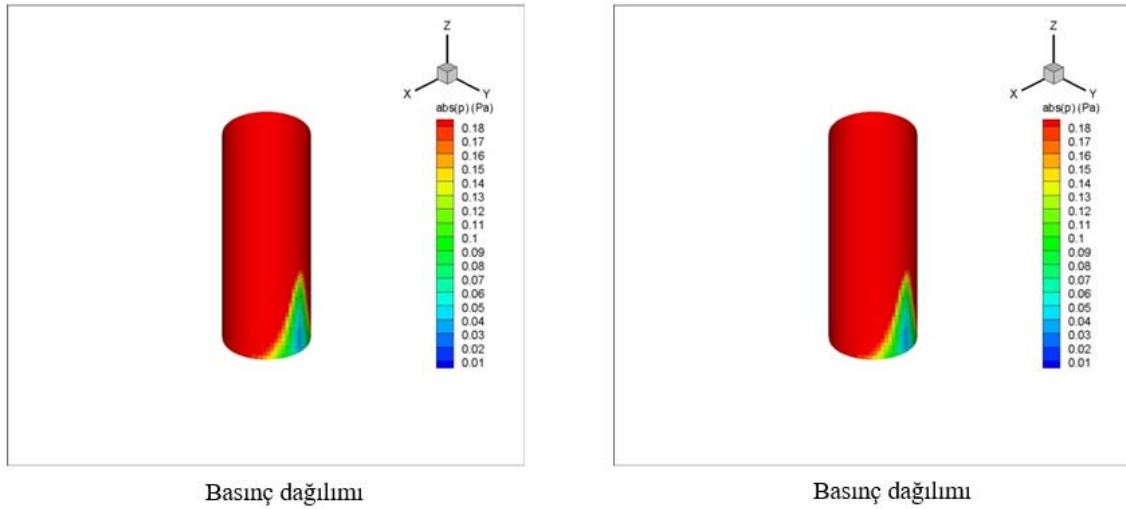
### 3.3. Son işlemci

Hidrodinamik katsayıların belirlenmesiyle bulunmuş olan hız potansiyeli, akışkanın her noktasında hidrodinamik basıncın bulunmasını sağlar. Cismin üzerine etkiyen lineer basıncın cisim cidarı boyunca integrali alınırsa hidrodinamik kuvvet bulunmuş olur. Bu

bölümde silindir için elde edilen serbest su yüzey profili ve basınç dağılımları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Techplot kullanılarak grafikler çizdirilmiştir. Ayrıca, NEMOH hem Matlab hem Fortran ile çalıştırılmış olup beklendiği üzere arada herhangi bir fark olmadığı görülmüştür. NEMOH'da farklı dalga periyotlarını kapsayacak şekilde çalışma yapmak WAMIT'e kıyasla çok daha uzun sürmüştür. Sonraki çalışmalarda buna dair iyileştirme NEMOH için yapılırsa simülasyon süresini kısaltmak mümkün olabilecektir..



Şekil 4. Serbest su yüzeyi profili.



Şekil 5. Basınç dağılımı.

Son işlemci çözücünden gelen sonuçların sunumuyla ilgili olan bölümdür. Bu bağlamda, sınırlı eleman yöntemi çözücülerinin sonuçları için çok sayıda son işlemci mevcuttur. Ancak bazıları bu çalışmada karşılaştırılan her iki program için kullanılabilir de bazıları kullanılamamaktadır. Açıkdeniz yapısının sayısal modelinin entegrasyonunda FAST, Hydrodyn kullanılmaktadır ki sadece WAMIT ile üretilen hidrodinamik katsayıları direkt veri olarak kabul edebilmektedir [11]. NEMOH sonuçları ise direkt veri olarak kullanılamamaktadır. Ancak her iki yazılım da (WAMIT ve NEMOH) sonuçlarını text formatında verdiği için, kullanıcıların yeterli vakti olması halinde sonuçları bir diğerinin okuyabildiği formata getirmek için ayrı bir kod yazılabilir. Her iki program ile

yapının hidrodinamik katsayıları hesaplanmıştır. Ancak sonuçlar aynı formda olmadığından burada gösterilememektedir. Sonuçların Hydrodyn'in de kabul edeceği forma getirilmesi gelecekteki çalışmalar için çok faydalı olacaktır.

Parametrik çalışma avantajı ile hem farklı programlar karşılaştırılmış, hem de her birinin hassasiyeti incelenmiştir. Açık kaynaklı kodun avantajı, elde edilen hidrodinamik katsayıların Hydrodyn'in kabul edeceği forma getirilmesi ve böylece açıkdeniz yapılarının hidrodinamik performansının analizinde kolaylık sağlayacak olmasıdır. NEMOH ve WAMIT'in avantajları ve dezavantajları aşağıdaki tabloda sıralanmıştır.

Tablo 3. WAMIT ve NEMOH karşılaştırılması.

WAMIT		NEMOH	
Avantajlar	Dezavantajlar	Avantajlar	Dezavantajlar
Aynı simülasyonda geniş bir frekans aralığı ve farklı dalga yönü için analiz yapılabilir [10]	Lisanslı ücretli olan bir program	Açık kaynaklı kod	Girdi dosyaları farklı dalga frekansları veya farklı dalga yönleri için geliştirilmelidir. Ya da farklı dalga yönleri için ayrı ayrı çalıştırılmalıdır ki bu da zaman alıcıdır.
Sonuçları direkt FAST yazılımında kullanılabilir.		Görsel sonuçlar Techplot yardımıyla çizilebilir.	Sonuçları direkt FAST'da kullanılamaz.
Validasyon başarılı şekilde yapılabilir.			Fortran ve Matlab kullanılarak çalıştırılsa da aynı formda sonuç vermediğinden FAST yazılımında girdi olarak kullanılması için yeni kod yazılmasına ihtiyaç vardır.

#### 4. Sonuç ve öneriler

Silindirin hidrodinamik analizinden elde edilen grafikler sonucunda, kullanılan açık kaynaklı kod sonuçlarının yazılım sonuçları ile uyum gösterdiği görülmektedir. Bu çalışma ile daire kesitli yüzer cismin hem hidrodinamik katsayıları hem de radyasyon ve difraksiyon katsayıları elde edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada ticari bir yazılım ile açık kaynaklı kodun karşılaştırılması ve açıkdeniz yüzer sistemlerin hidrodinamik performansının belirlenmesinde kullanılan FAST ile uyumlu çalışıp çalışmayacağı

tartışılmıştır. NEMOH gibi açık kaynaklı kodların çıktılarının başka bir programda girdi olarak kullanılması için bazı kodlar yazılıp, gerekli düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. NEMOH hem Fortran, hem Matlab ile çalıştırılabildiğinden kullanıcılara esneklik sağlamaktadır. Bu sebeple, Fortran’da yazılmış olan FAST ile uyumlu çalışabilmesi için bahsedilen kod hazırlığı yakın gelecekte yapılması planlanan bir çalışmadır.

### Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan WAMIT programı yazarın Strathclyde Üniversitesi’nde çalıştığı dönemde lisanslı olarak kullanılmıştır, yazar Strathclyde Üniversitesi’ne teşekkür eder.

### Kaynaklar

- [1] Bachynski, E.E., Design and Dynamic Analysis of Tension Leg Platform Wind Turbines, Doctoral Theses at NTNU, 2014 : 86.
- [2] Leite, O.B., Review of Design Procedures for Monopile Offshore Wind Structures, Thesis of Master in Science, University of Porto Department of Civil Engineering, 2015.
- [3] Oh, K.Y., Nam, W., Ryu, M.S., Kim, J.Y., Epureanu, B.I., A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives, **Renewable and Sustainability Energy Reviews**, 88, 16-36, (2018).
- [4] O’Kelly, B.C., Arshad, M., Offshore wind turbine foundations-analysis and design, **Offshore Wind Farms**, 589-610, (2016).
- [5] Wu, X., Hu, Y., Li, Y., Yang, J., Duan, L., Wang, T., Adcock, T., Jiang, Z., Gao, Z., Lin, Z., Borthwick, A., Liao, S., Foundations offshore wind turbines: A review, **Renewable and Sustainability Energy Reviews**, 104, 379-393, (2019).
- [6] Henderson, A.R., Morgan, C.S., Smith, B., Sorensen, H.C., Barthelmie, R.J. & Boemans, B., Offshore Wind Energy in Europe, A Review of the State-of-the-Art, **Wind Energy**, 6, 35-52, (2003).
- [7] Babarit, A., Delhommeau, G., Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH, **Proceedings of the 11<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference**, Nantes (2015).
- [8] Day, A.H., Babarit, A., Fontaine, A., He, Y.P., Kraskowski, M., Murai, M., Penesis, I., Salvatore, F., Shin, H.K., Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices : A state of the art review, **Ocean Engineering**, 108, 46-69, (2015)
- [9] Parisella, G., Gourlay, T., Comparison of open-source code nemoh with wamit for cargo ship motions in shallow water, Technical Report, 23, Centre for Marine Science and Technology, Curtin University, (2016).
- [10] Lee, C.H., Newman, J.N., WAMIT User Manual, WAMIT, Inc.:Chestnut Hill, MA, (2006).
- [11] Jonkman, J.M., Buhl, M.L., FAST’s user’s guide. NREL/EL-500-38230. NREL: Golden, CO, (2005).

# Ters sarkacın uyarlamalı kazançlı bağımsız yüzeyli kayan kip yöntemi ile denetimi

Fuat KILIÇ\*, Sabri BİCAKCI, Hüseyin GÜNEŞ

Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü,  
Çağış kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 02.08.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 18.09.2019

## Özet

*Bu çalışmada gerçek bir ters sarkaç sistemi için yeni bir uyarlamalı kazançlı, bağımsız yüzeyli kayan kip denetim tekniği (UKKKD) önerilmektedir. Böylece modellenemeyen ve üst sınır değerleri belirli olmayan bozucu etkilere karşı dayanıklı bir denetim yapısı elde edilmektedir. Önerilen denetim yöntemi ile dayanıklılık özelliği en küçük kazanç değerlerinde dahi korunmakta ve böylece kayan kip denetimin temel problemi olan çattırma etkisi de azaltılmaktadır. Çalışmada, ters sarkaç ve denetim sisteminin MATLAB/SIMULINK benzetim ile uygulama grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiş ve denetimin olumlu etkisi doğrulanmıştır.*

**Anahtar kelimeler:** Ters sarkaç, kayan kip, uyarlamalı kazanç, dayanıklı denetim.

## Adaptive gain decoupled sliding mode control of inverted pendulum

### Abstract

*In this study, a new adaptive gain, decoupled surface sliding mode control technique is proposed for a real inverted pendulum system. Thus a robust control structure against unmodeled and uncertain upper limit valued disturbances is developed. With the proposed control method, the robustness property is preserved even at the smallest gain values and thus the chattering effect, which is the main problem of the sliding mode control, is reduced. In this study, MATLAB / SIMULINK simulations and experimental*

\* Fuat KILIÇ, fuatkilic@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-2502-3789>

Sabri BİCAKCI, sbicakci@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-2334-8515>

Hüseyin GÜNEŞ, hgunes@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-6927-5123>

*results of the inverted pendulum control system are compared and the positive effect of the proposed control method is confirmed.*

**Keywords:** *Inverted pendulum, sliding mode, adaptive gain, robust control.*

## 1. Giriş

Ters sarkaç sistemi, bir hareketli araba üzerinde yer alan açık çevrim kararsız yüksek dereceli doğrusal olmayan, eksik eyleyicili bir sistemdir. Ters sarkaç sisteminin modellenmesi ve denetimi, kontrol sistemleri mühendisliği alanında kalite ölçüt testi olarak kullanılmasının yanında, askeri endüstri, uzay bilimleri, insansız robotlar, personel taşıyıcı sistemler, kendi kendini dengeleyen araçlar ve medikal sistemler gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır [1-4]. Sarkaç çubuğunun dikey konumda tutulması ve arabanın sistem girişine uygulanan referansı takip etmesi amaçlanan iki önemli kontrol problemidir.

Literatürde, sarkacı dikeyde tutmak ve arabanın sistem girişine uygulanan referansı takip etmesi için bang-bang denetim, bulanık mantık, PID, dayanıklı denetim, öngörülü denetim, yapay sinir ağları (YSA), doğrusal karesel regülatör (DKR) , doğrusal Gaussian regülatör (DGR), pasivite tabanlı denetim ve geri adımli denetim gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır [4-8]. PID denetim en çok kullanılan yöntemlerden biri olmakla birlikte arzu edilen denetim cevapları elde edilememiştir. Kayan kesirli çift PID nin kazanç optimizasyonu için parçacık sürü optimizasyonu (PSO), genetik algoritmalar (GA), karınca kolonisi (KK) optimizasyonu gibi teknikler kullanılmaktadır [5,6]. Ancak sistem parametrelerin sıcaklık vb. etkiler altında değişimi ve belirsiz iç ve dış bozucu etkilerin olduğu durumda PID denetim yöntemi arzu edilen denetim cevaplarını sağlayamamaktadır. PSO, GA ve YSA tabanlı denetim teknikleri yoğun matematiksel işlemlere ihtiyaç duyulması ve mikrodenetleyici hafızasında oldukça büyük yer işgal etmesinden dolayı uygulama zorluklarına sahiptirler. Sistemin doğrusal olmayan yapısı, doğrusal denetim yapısına sahip olan DKR ve DGR yöntemleriyle istenilen denetim başarımını elde etmeyi zorlaştırır. Geri adımli denetimin de benzer şekilde yoğun matematiksel denklemler gerektirmesi, anılan yöntemlerin ters sarkaç sistemi denetiminde dezavantajlar meydana getirmektedir.

Kayan kipli denetim (KKD), dayanıklı değişken yapıli denetim olarak sistem belirsizliklerine ve bozucu etkilere karşı çok az etkilenmektedir [9]. Kayan kip denetimin üstün olan diğer yönleri ise hızlı cevaba sahip olması ve kayan kipte belirsizlikleri kompanze etmesidir [10]. Ancak, elektromekanik sistemlerde modellenemeyen dinamiklerin bulunduğu durumlarda; kayan kip denetimin en büyük dezavantajı olan çatırtı etkisinin bastırılması ve denetimin dayanıklılık özelliğinin korunması istenen iki ana hedefdir [11]. KKD, elektromekanik sistemlerde süreksiz fonksiyon diğer bir ifade ile işaret fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilir. Bu durumda çatırtı etkisi ortaya çıkmaktadır. Yüksek frekanslı anahtarlama fonksiyonu, mekatronik sistemlere doğrudan uygulandığında sistemin denetim başarımını azaltabildiği gibi kararlılığı da kötüleştirir [12].

Literatürde çatırtı problemi, hala çözülmesi gereken bir problem olarak önemini korumaktadır. Çatırtı azaltma yöntemleri arasında doyma fonksiyonu kullanımı, sigmoid fonksiyonu kullanımı, bozucu etki gözetleyicisi, uyarlamalı kazanç yöntemi en

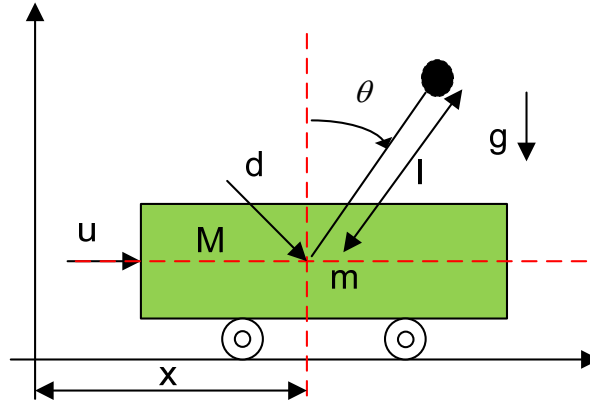


çok kullanılan yöntemlerdendir [13-18]. Bu yöntemler arasında çartırtının genliğini en çok etkileyebilecek parametre anahtarlama fonksiyonunun çarpanıdır. Bu çarpanın genliğinin değişmesi doğrudan çartırtının azaltılmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, sarkacın dikey konumda kalmasını ve arabanın yatay hareketinde referans değeri takip etmesini sağlamak için iki farklı kayan kip yüzey ve uyarlamalı kayan kip denetim kazancını hata bileşenlerine göre tasarlayarak, çartırtı etkisi bastırılmış dayanıklı denetim cevabı elde edilmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde literatürde yer alan çalışmalar ve içerikleri sunulmuştur. Bundan sonraki ikinci bölümde ters sarkaç sisteminin modellenmesi ve eşitlikleri, üçüncü bölümde uyarlamalı kazançlı kayan kip denetim ve kararlılık analizi ve son bölümde benzetim ve uygulama sonuçları yer almaktadır.

## 2. Ters sarkaç sistemi ve matematiksel modeli

Şekil 1’de ters sarkaç sisteminin şematik bir gösterimi verilmiştir. X eksenini boyunca araba sınırlı bir harekete sahiptir. Z eksenini etrafında serbest dönen ve kararsız olan sarkacı Y eksenine paralel dik konumda tutabilmek için araba bir motor yardımıyla hareket ettirilir. Arabanın izlenmesi gereken yatay yörünge üzerinde merkez noktadan uzaklığı  $x$  ile, sarkaç çubuğunun dikey konumda Y eksenine göre yaptığı açı ise  $\theta$  ile ifade edilmektedir.



Şekil 1. Ters sarkaç sistemi.

Ters sarkaç sisteminin dinamik modeli Lagrange yönteminden yararlanılarak elde edilebilmektedir. Bunun için sistemin kinetik enerjisi  $K_e$ ,

$$K_e = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m [\dot{x}^2 + 2l\dot{x} \cos \theta + \dot{x}^2 l^2] \quad (1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada;  $M$  araba kütlesi (kg),  $m$  sarkaç kütlesi (kg),  $l$  sarkaç çubuğunun uzunluğu (m),  $\theta$  sarkaç çubuğunun dikey eksenle yaptığı açı (rad),  $g$  yerçekimi ivmesini simgelemektedir. Potansiyel enerji,

$$P_e = -mgl \cos \theta \quad (2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Lagrange eşitliği,

$$L = K_e - P_e \quad (3)$$

şeklinde verilmektedir. Lagrange eşitliği kullanılarak ters sarkaç sisteminin doğrusal olmayan matematiksel modeli,

$$\begin{aligned} (m + M)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta}\cos(\theta) - ml\dot{\theta}^2\sin(\theta) &= u \\ ml\ddot{x}\cos(\theta) + (I + ml^2)\ddot{\theta} - mgl\sin(\theta) + d\dot{\theta} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

eşitlikleri ile ifade edilebilir.  $d$  sarkaç sönümlenme katsayısı (Nms/rad),  $I$  sarkacın atalet momentidir ( $\text{kgm}^2$ ). Durum uzay modelini oluşturmak için ters sarkaç sisteminde kullanılan parametreler,

$$X = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)' = (x \ \theta \ \dot{x} \ \dot{\theta})' \quad (5)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Buna göre ters sarkaç sisteminin durum uzay modeli [19]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(x) + \Delta f_1(x) + (g_1(x) + \Delta g_1(x))u \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(X) + \Delta f_2(X) + (g_2(x) + \Delta g_2(x))\Delta u \end{cases} \quad (6)$$

denklem takımı halinde yazılabilir. Burada;  $f_1$ ,  $g_1$ ,  $f_2$ ,  $g_2$  doğrusal olmayan fonksiyonlar ve  $u$  denetim girişidir. Ters sarkaç sisteminin fiziksel parametreleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Ters sarkacın fiziksel parametreleri

Sembol	Büyüklik	Değer
$m$	Sarkacın kütlesi	2.09838 kg
$l$	Ağırlık merkezinin uzunluğu	0.25535 m
$I$	Sarkacın atalet momentini	0.05052 $\text{kg.m}^2$
$g$	Yer çekimi ivmesi	9.81 $\text{m/s}^2$
$M$	Arabanın kütlesi	1.70411 kg
$r$	Kasnak yarıçapı	0.012415 m
$N$	Dişli oranı	8
$\eta$	DC motorun verimi	0.90
$K_t$	Tork sabiti	0.0385 N.m/A
$K_b$	Ters elektro motor kuvvet katsayısı	0.0385 V.s/rad
$R_a$	Armatür direnci	0.103 ohm
$J_m$	Motorun atalet momentini	6.03e-5 $\text{kg.m}^2$
$F_{fp}$	Sarkacın viskoz sürtünme sabiti	0
$F_{fc}$	Arabanın viskoz sürtünme sabiti	72.49 N.s/m

İlgili değerler ve doğrusal olmayan ters sarkaç denklemlerinden,

$$f_1(x) = 0.6061 \cdot x_2 - 219.7351 \cdot x_3 \quad (7)$$

$$g_1(x) = 8.7394 \quad (8)$$

$$f_2(x) = 29.7913 \cdot x_2 - 628.4698 \cdot x_3 \quad (9)$$

$$g_2(x) = 24.9957 \quad (10)$$

eşitlikleri kolaylıkla çıkartılır.

### 3. Uyarlamalı kazançlı arık yüzeyli kayan kip denetim

Kayan kipli denetim (KKD), hassasiyet, denetim sisteminin çalışmasına olumsuz etkileri olabilecek tüm bozucu etkilere karşı dayanıklılık, kolay denetim ayarı ve uygulanma özelliklerini hedefleyen doğrusal olmayan bir denetim tekniğidir. KKD' de amaç durum değişkenlerini durum uzayının içerisinde özel olarak seçilen bir alana sürmektir. Bu alanın diğer ismi kayma yüzeyidir. Durum değişkenlerini kayma yüzeyine ulaştırmak ikinci aşamada da kayma yüzeyinin etrafında küçük zikzaklar yaptırarak hedefe ulaşmak tasarımın bir parçasıdır. Tasarımın diğer amacı ise denetim amaçlarını sağlayacak uygun bir denetim kanunu seçmektir [21].

Ters sarkacın bağımsız kayma yüzeyli denetimindeki temel amaç, yatay eksen de arabanın denetimi, dikey eksen de ise sarkacın dengede tutulmasının sağlanmasıdır. Bu durum iki farklı kayma yüzeyi oluşturulabileceği anlamına gelir. Bu yüzeyler temelde ters sarkacın doğrusal olmayan denklem sistemine bakıldığında dolaylı olarak birbirleri ile ilgilidir. Buna göre, kayma yüzeyleri  $s_1$  ve  $s_2$  durum değişkenlerine bağlı olarak tasarlanabilir. Kayma yüzeyleri ise parametrelere bağlı olarak tekrar düzenlenirse,

$$s_1 = c_1(e_1 - z) + \dot{e}_1 \quad (11)$$

$$e_1 = \theta - \theta_{ref} \quad (12)$$

$$s_2 = c_2 e_2 + \dot{e}_2 \quad (13)$$

$$e_2 = x - x_{ref} \quad (14)$$

eşitlikleri elde edilir.  $z$  ara değişkeni ile kayma yüzeyleri arasındaki denetim ilişkisi sağlanır.  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $\beta$  ve  $\phi$  sabit katsayılarıdır.

$$z = \beta \text{sign}\left(\frac{s_2}{\phi}\right) \cong \beta \text{sat}\left(\frac{s_2}{\phi}\right) \quad (15)$$

Sürekli işaret fonksiyonu (İngilizce kısaltma sign) diğer bir ifade ile anahtarlama fonksiyonu elektriksel sistemler için uygun olsa da ters sarkaç gibi mekanik sistemlerde titreşim ve istenmeyen başka durumlara yol açabilir. Çatırdama olarak da adlandırılan istenmeyen etkileri azaltmak için seçilen yöntemlerden bir tanesi sürekli işaret fonksiyonu yerine doyum fonksiyonu kullanmaktır. Bundan sonraki aşama denetim kanununu seçmektir.

$$u = u_{ed} + u_{an} \quad (16)$$

Denetim kanunu, iki bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar Eş. 16-18'de verilen  $u_{ed}$  eşdeğer denetim ve  $u_{an}$  anahtarlama terimi bileşenleridir. Eşdeğer denetim bileşeni kayma yüzeyinin türevinin sıfıra eşitlenmesinden elde edilmektedir.

$$u_{ed} = \frac{-c_1 x_2 - f_1(x)}{g_1(x)} \quad (17)$$

$$u_{an} = \frac{-\lambda sat(s_1)}{g_1(x)} \quad (18)$$

Herhangi bir uyarılama tasarımı yapılmadan kullanılan kayan kipli denetim kanunları parametre değişimi ve belirsizliklere karşı duyarsızdır [22]. Kayan kipin uygulanmasındaki temel sorun, süreksiz işaret fonksiyonunun yani anahtarlama fonksiyonunun genliği ile orantılı olan çatırdama ve denetim tepkisi frekansının yüksek oluşudur. Çatırdama etkisini azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri sınır katmanı uygulamasıdır. Bir diğer yaklaşım ise yüksek dereceli kayan kip denetim uygulamasıdır. Ancak bu teknikte belirsizlikleri oluşturan etkilerin sınırlarının bilinmesi gereklidir. Bu sebeple amaç belirsizlik sınırlarının bilinmesini gerektirmeyen buna ilave olarak ani olarak ortaya çıkabilecek bozucu etkilere karşı dayanıklı bir denetim yapısı oluşturmaktır [23]. Özet olarak amaç, her iki problemi en az düzeye indirmek için kayan kipin var olduğu durumda süreksiz fonksiyon genliğini kararlılık sınırları içinde en az düzeye indirmektir. Bunun için de en iyi yol anahtarlama fonksiyonunun genliğini değiştiren kazancı en düşük seviyeye uyarlamalı olarak indirmektir. Uyarlamalı denetimin temel amacı belirsizlik durumlarına karşı sabit kazançla aynı dinamik cevabı verebilecek denetim sistemi tasarlamaktır. Bu amaçla elde edilecek uyarlamalı kazanç dinamiklerinin mevcut denetim sistemi dinamiklerine en az düzeyde etki edecek şekilde tasarlanması gereklidir.

Dinamik uyarlamalı kazanç kanununun yukarıda bahsedilen şartlar çerçevesinde kayan kip denetim tabanlı oluşturulabilmesi gerekir. Bu nedenle temel kayan kip denetim kanunu olan,

$$u = -\lambda \text{sign}(s(x,t)) \quad (19)$$

eşitliğinden hareketle  $s \neq 0$  olduğu durumda, uyarlamalı kazanç  $\dot{\lambda} = \lambda_1 |s(x,t)|$  ile verilebilir.  $\lambda_1 > 0$  iken uyarlamalı kazanç değişse de  $s = 0$  olana kadar sürekli artış gösterir. Kayan kip durumu devam ettiği için çatırtının azaltılması için istenen amaçlar sağlanamaz. Bunun için istenen amaçlara uygun hem ani bozucu etkilere karşı dinamik değişen kazanç olup hem de kayan kipin devam ettiği durumda çatırtı etkisini en aza indirecek kazanç eşitliği,

$$\dot{\lambda} = \begin{cases} \lambda_1 |s(x,t)| \text{sign}(|s(x,t)| - \mu) & \text{eğer } \lambda > \varepsilon \\ \varepsilon & \text{eğer } \lambda < \varepsilon \end{cases} \quad (20)$$

olarak yazılabilir. Burada  $\mu$  kayan kip evresine ulaşıldığında dinamik kazanç değerine azaltıcı etki yapan sabit katsayıdır. Bağımsız yüzeyler için uyarlamalı kazanç eşitliği hatanın her var olduğu durumda artmakta veya azalmaktadır. Hatanın artması ile kazanç değeri büyümekte ve kalıcı durum hatasının azaltılması sağlanmaktadır. Hatanın azaldığı durumda ise kazanç genliği azalmakta bu durumda anahtarlama genliği de

azalmakta ve çatırdama etkisi de azalmaktadır. Ters sarkaç sisteminin denetiminde dıştan gelebilecek ani bozucu etkilere karşı da kazanç dinamik olarak hızlıca değişmekte ve bu bozucu etkilere karşı da dayanıklı bir denetim sağlanmaktadır. Kayan kip evresinin devam ettiği sürece kayma yüzeyinin etrafındaki ufak salınımlar devam ettiği için kazanç sabit kalmaktadır. Bozucu etkilerin var olmadığı durumda, kayan kip evresinin devam edebilmesi için en küçük değerine inen kazanç sıfırdan büyük sınır değer,  $\varepsilon$  değerinde tutulur.

### 3.1. Kararlılık analizi

Uyarlamalı kazanç ve sistem denetim girişinin Lyapunov tabanlı kararlılık analizinin yapılması için aday fonksiyon,

$$V(s) = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}(\lambda - \lambda^*)^2 \quad (21)$$

şeklinde seçilebilir. Seçilen Lyapunov aday fonksiyonu karesel bir fonksiyon ve türevi negatif olmalıdır.  $\lambda^*$ ,  $\lambda$  uyarlamalı kazancının en üst sınır değerleridir. Sistemde meydana gelebilecek belirsizlikler sınırlı olduğundan kazanç değeri de sınırlıdır.  $V(s)$  aday fonksiyonunun türevi alınır,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \dot{\lambda}(\lambda - \lambda^*) \\ &= s\dot{s} + \bar{\lambda}|s(x,t)|\text{sign}(|s(x,t)| - \mu)(\lambda - \lambda^*) \end{aligned} \quad (22)$$

$\text{sign}(|s(x,t)| - \mu)$  terimi sürekli pozitif değerler alır. Bu sebeple kaynak giriş terimi,

$$u = -\eta_1 \text{sign}(s,t) \quad (23)$$

formunda yazılabilir.  $\eta_2 = -\bar{\lambda}|s(x,t)|$  alınır,

$$\dot{V} \leq -\eta_1 |s| - \eta_2 (\lambda - \lambda^*) \quad (24)$$

eşitliği elde edilir. Elde edilen eşitlik normu alınarak,

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\eta \left( \frac{s^2}{2} + \frac{|\lambda - \lambda^*|^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq -\eta V^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (25)$$

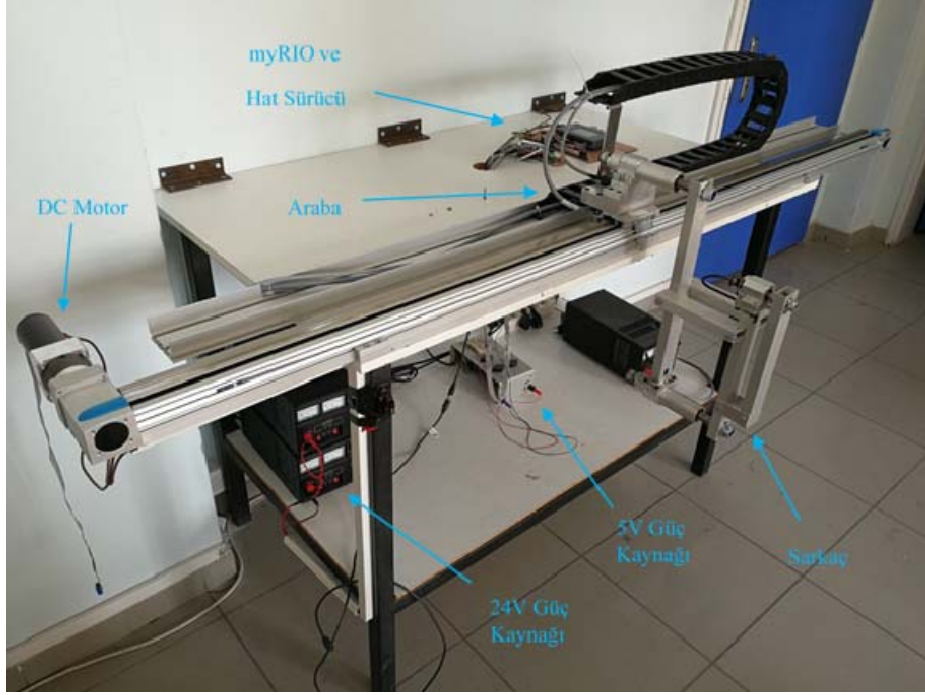
eşitsizliği ile sınırlı zaman yakınsaması sağlanır. Burada  $\eta_1$  ve  $\eta_2$  sabit sayılardır.

$$\eta = \min(\sqrt{2}\eta_1, \sqrt{2}\eta_2) \quad (26)$$

## 4. Benzetim ve deneysel sonuçlar

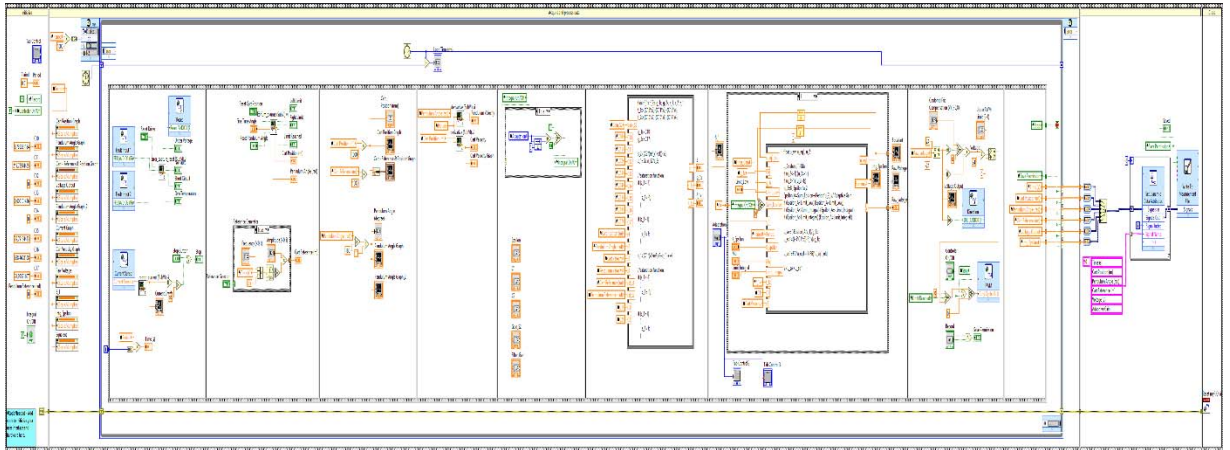
Bu çalışmada deney platformu olarak Şekil 2 de fotoğrafı verilen ters sarkaç mekanizması kullanılmıştır. Sarkacın üzerine tutturulduğu araba, 1.8m hareket mesafesi bulunan bir doğrusal kızak üzerinde bağlanmış kayış kasnak mekanizması ile hareket etmektedir. Kayış kasnak mekanizmasının hareketi Maxon marka RE50 model,

200Watt, 24V luk DC motor ile sağlanmaktadır. Sarkaç araba üzerine tutturulmuş bir şaft ile serbestçe dönmektedir.

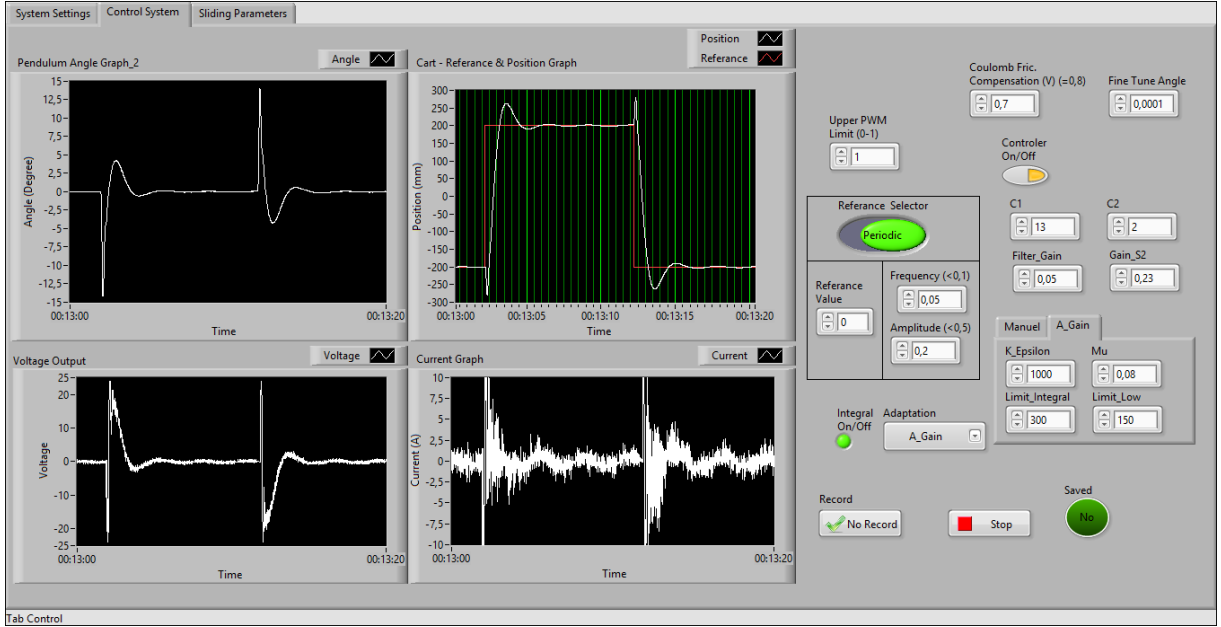


Şekil 2. Deney düzeneği.

Arabanın konumu 0.025mm çözünürlüklü doğrusal artımlı enkoder ile ve sarkacın açısı ise  $3.142e-4$  (0.018 derece) çözünürlüklü dönel artımlı enkoder ile ölçülmektedir. Motor sürücü olarak Pololu marka 24v23 CS model 24V, 500 Watt lık tam köprü PWM sürücüsü kullanılmıştır. Geliştirilen kontrol sistemlerinin gerçekleştirilmesi ve deneysel düzenek üzerinde test edilebilmesi için ARM Cortex A9 işlemciye ve Xilinx Zynq 7 FPGA e sahip olan myRIO gömülü sistemi kullanılmıştır. myRIO nun programlanmasında grafiksel programlama arayüzü olan Labview programı kullanılmıştır. Geliştirilen uyarlamalı kazançlı ayırık yüzeyli kayan kip denetleyici için oluşturulan Labview yazılımının blok şeması Şekil 3'de ve deney esnasında alınan ön panel görüntüsü ise Şekil 4'de verilmiştir.



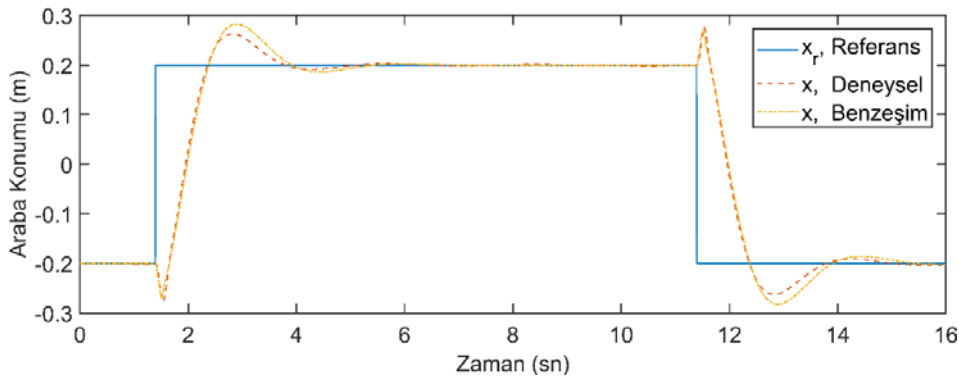
Şekil 3. Labview blok şeması.



Şekil 4. Labview ön paneli.

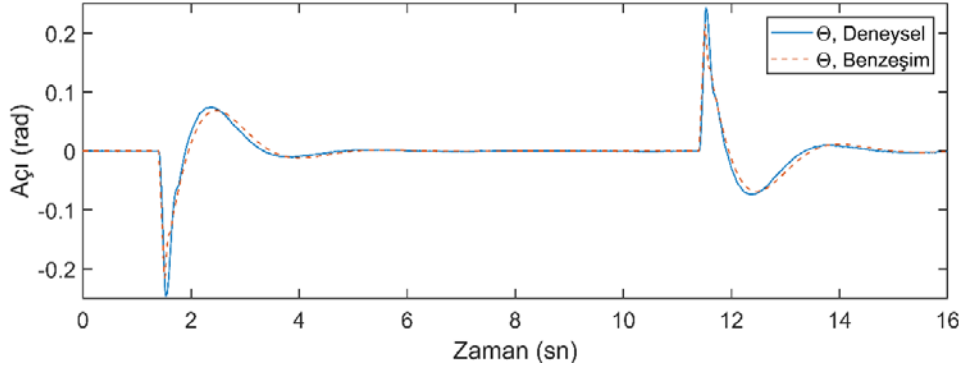
Kontrol sisteminin performansının belirlenmesi için yapılan deney ve benzetim testlerinde arabaya uygulanan referans sinyali  $\pm 0.2$ m genliğe ve 20 sn periyota sahiptir.

Şekil 5'te deneysel düzenek ve benzetim modeli üzerinde arabanın x eksenindeki konum denetimi için uygulanan referans ve elde edilen konum grafikleri görülmektedir. Sarkacı düşürmeden arabayı hareket ettirebilmek için sarkacın araba hareketinin sağlanacağı yöne eğilmesi yani araba hareketinden doğan ters momentin yerçekimi ivmesi ile dengelenmesi gerekir. Bu nedenle referans sinyalin başlangıç anında denetim sistemi, sarkacı arabanın gitmesi istenen yönde eğebilmek için arabayı istenen konuma ters yönde hareket ettirmektedir. Denetim sistemi hareketin devamında eğilen sarkacın düşmesini engellemek için arabayı istenen konuma doğru sürmektedir. Kayan kip denetiminde, arabanın ve sarkacın konumları için bağımsız olarak oluşturulan kayma yüzeyleri ve hata bileşenleri Eş. 11-14'te görülmektedir. Araba için oluşturulan ( $s_2$ ) kayma yüzeyi üzerinde kayma kipine ulaşıldığında hata sıfıra eşit olur.



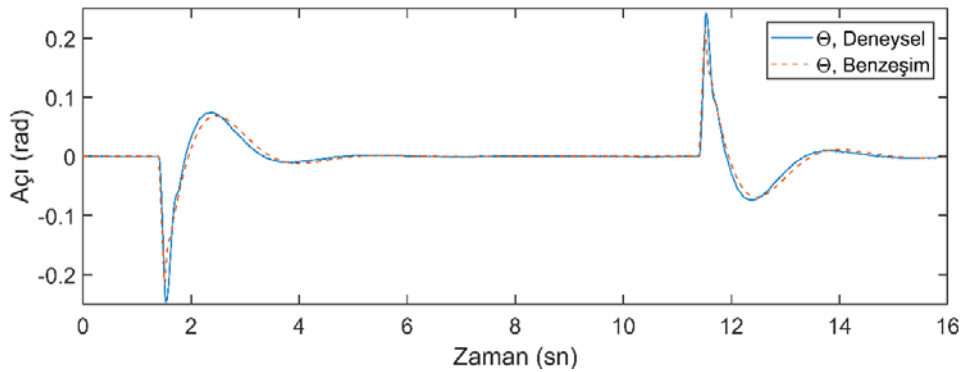
Şekil 5. Araba için deneysel ve benzetim çizgisel konum zaman grafiği.

Şekil 6’da deneysel düzenek ve benzetim modeli üzerinde arabanın çizgisel konum denetimi yapılırken sarkacın z eksenindeki dengeleme denetim sisteminin cevabını gösteren açısal konum-zaman grafikleri verilmektedir. Arabanın istenilen konuma hareket ettirilebilmesi için gerçekleşen eğilme hareketi ve sonrasında araba istenilen konuma yaklaştıkça sarkacın denge konumuna geldiği gözlemlenmektedir. Hareket esnasında sarkacın istenmeyen geri dönüşler diğer bir deyişle salınım hareketleri yapmadığı görülmektedir. Şekil 5 ve 6’dan gözlemlenen denetim sistemi cevapları geliştirilen uyarlamalı kazançlı kayan kip denetimin başarımını ortaya koymaktadır.



Şekil 6. Sarkaç için deneysel ve benzetim açısal konum zaman grafiği.

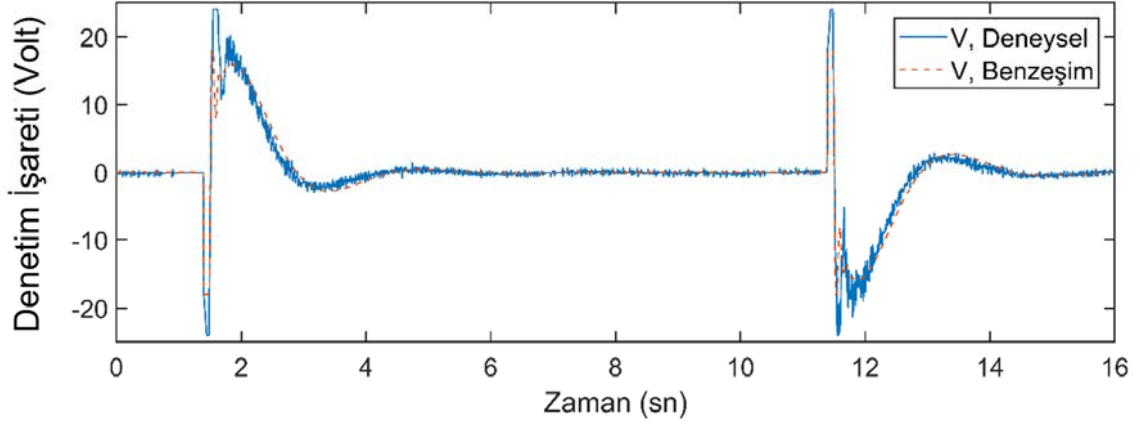
Şekil 7’de verilen grafikte anahtarlama fonksiyonunun genliğini belirleyen uyarlamalı kazanç değişimi görülmektedir. Araba konum referansının  $\pm 0.2$  m genlikli adım fonksiyonu olarak verildiği durumda, denetim sisteminin kazancı kayma yüzeylerini oluşturan hataları sıfıra götürebilmek için artmaktadır. Kayma kipine ulaşıldığında kazanç sabit kalmakta ve sonrasında mümkün olan en küçük değerine ulaşmaktadır. Böylece çatırdama etkisi ile doğrudan ilişkili olan kazanç sayesinde çatırdama etkisi de en aza indirilmektedir.



Şekil 7. Uyarlamalı kazanç değişim grafiği.

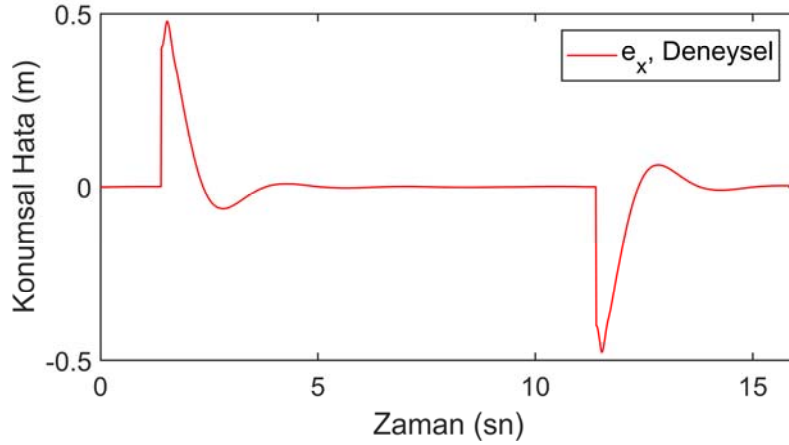
Şekil 8’de, eksik eyleyicili yani tek motorla iki eksenin denetlendiği sistemde motora uygulanan gerilime ait değişimler görülmektedir. Şekil 8’de verilen açısal konum ve çizgisel konum grafikleri ile uyumlu olarak gerilim değişimi gözlenmektedir. Her iki eksen için referans değerlere ulaşıldığında gerilim değişimi yaklaşık sıfır olmaktadır.



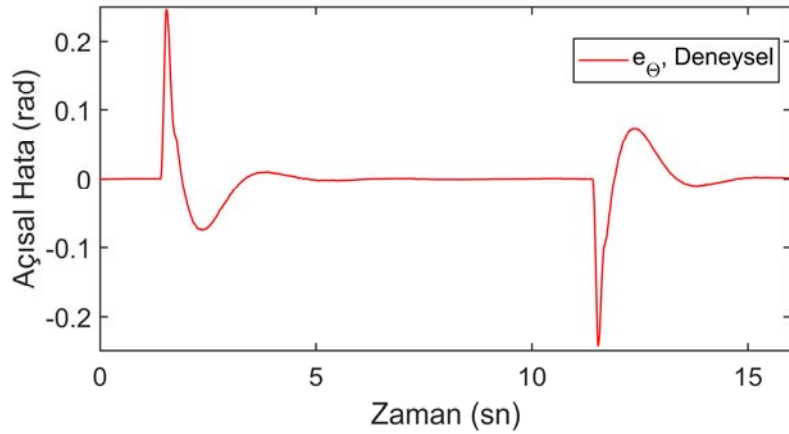


Şekil 8. Sisteme uygulanan gerilimin değişim grafiği.

Şekil 9'da araba ve sarkaç için hata grafikleri verilmiştir.



a) Araba için konumsal hata grafiği



b) Sarkaç için açısal hata grafiği

Şekil 9. Araba ve sarkaç için hata grafikleri

Şekil 5-9'da verilen grafiklerde Labview programı ile yapılan deneylerin ölçümleri myRIO denetim kartı üzerinde bulunan USB belleğe kaydedilmiştir. Daha sonra MATLAB/Simulink programından elde edilen grafik bilgileri ile bir araya getirilmiştir.

## 5. Sonuç

Uyarmalı kazançlı bağımsız yüzeyli kayan kip yöntemi ile ters sarkacın denetimi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla MATLAB/Simulink programı kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan karşılaştırmalı sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bozucu etkilerin sisteme etki ettiği durumlarda sabit kazançlı kayan kip denetimin çatırdama etkisini arttırdığı bilinmektedir. Buna göre uyarlamalı kazançlı kayan kip denetimle hem çatırdama etkisi azaltılmış hem de bozucu etkilere karşı daha dayanıklı bir denetim yapısı elde edilmiştir. İlgili sonuçlar denetim sisteminin başarımının yüksek olduğunu doğrulamaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Mahapatra, C., Chauhan, S. ve Hemakumar, B., Servo control and stabilization of linear inverted pendulum on a cart using LQG, **2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)**, 783-788, India, (2018).
- [2] Mobara, M., Karimpour, A., Ahamadian, H. M. ve Pahnabi, A., Modeling control of inverted pendulum based on PWA-fuzzy approach, **Second International Congress on Technology, Communication and Knowledge(ICTK 2015)**,112-116, Iran, (2015).
- [3] Brill, A., Frank, J. A. ve Kapila V., Visual servoing of an inverted pendulum on cart using a mounted smartphone, **American Control Conference (ACC)**,1323-1328, Boston, (2016).
- [4] Bakarac, P., Klauco, M. ve Fikar, M., Comparison of inverted pendulum stabilization with PID, LQ, and MPC control, **Proceeding of the 29th International Conference 2018 Cybernetics&Informatics (K&I)**, 1-6, Slovakia, (2018).
- [5] Nath, K. ve Dewan, L., Control of rotary inverted pendulum via adaptive techniques, **International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies (ICETCCT)**,1-6, India, (2017).
- [6] Mahaaptra, C. ve Chauhan, S., Tracking control of inverted pendulum on a cart with disturbance using pole placement and LQR, **International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies (ICETCCT)**, 1-6, India, 2017.
- [7] Sarkar, T. T. ve Dewan, L., Application of LQR and MRAC for swing up Control of inverted Pendulum, **4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems (ICPCES)**, 1-6, India, (2017).
- [8] Gautam, P., Optimal control of inverted pendulum system using ADALINE artificial neural network with LQR, **IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)**, 1-6, Jaipur, (2016).
- [9] Wang, J. ve Kumbasar, T., Big Bang-Big Crunch optimized hierarchical sliding-mode control of X-Z inverted pendulum, **Simulation Modelling Practice and Theory**, 86, 25–35, (2018).
- [10] Wanga, Y., Xia, Y., Li, H. ve Zhou, P., A new integral sliding mode design method for nonlinear stochastic systems, **Automatica**, 90, 304–309, (2018).

- [11] Khan, Q., Akmeliawati, R., Bhatti, A. I. ve Khan, M. A., Robust stabilization of under actuated nonlinear systems: A fast terminal sliding mode approach, **ISA Transactions**, 66, 241–248, (2017).
- [12] Li, P., Yu, X. ve Xiao, B., Adaptive quasi-optimal higher order sliding-mode control without gain overestimation, **IEEE Transactions On Industrial Informatics**, 14, 9, 3881-3891, (2018).
- [13] Baek, S., Baek J. ve Han, S., An adaptive sliding mode control with effective switching gain tuning near the sliding surface, **IEEE Access**, 7, 155563-15572, (2019).
- [14] Shi, S., Li, J. ve Fang, Y., Extended-state-observer-based chattering free sliding mode control for nonlinear systems with mismatched disturbance, **IEEE Access**, 6, 22952-22957, (2018).
- [15] Repecho, V., Biel, D., Lara R. R. ve Vega, P. G., Fixed-switching frequency interleaved sliding mode eight-phase synchronous buck converter, **IEEE Transactions On Power Electronics**, 33, 1, 666-688, (2018).
- [16] Guo, Y., Ma, B., Chen, L. ve Wu, R., Adaptive sliding mode control for a class of Caputo type fractional-order interval systems with perturbation, **IET Control Theory & Applications**, 11, 1, 57-65, (2017).
- [17] Van, M., Ge, S. S., ve Ren H., Robust fault-tolerant control for a class of second-order nonlinear systems using an adaptive third-order sliding mode control, **IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics: Systems**, 47, 2, 221-228, (2017).
- [18] Baek, J., Jin, M., ve Han S., A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators, **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, 63, 6, 3628-3637, (2016).
- [19] Tiga, A., Ghorbel, B. ve Braiek, B., Performance comparison of backstepping and sliding mode controllers, **International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET)**, 461-466, Tunisia, (2018).
- [20] Muhammad, S. ve Idrees, M., Comparative study of hierarchical sliding mode control and decoupled sliding mode control, **IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)**, 818-823, Cambodia, (2017).
- [21] Utkin, V. I., Variable Structure systems with Sliding Modes. **IEEE Transaction on Automatic Control**, 22, 2, 212-222, (1977).
- [22] Utkin, V. I. ve Poznyak, A. S., Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: Equivalent control method, **Automatica**, 49, 39–47, (2013).
- [23] Plestan, F., Shtessel, Y., Bregeault, V. ve Poznyak, A., Sliding mode control with gain adaptation-Application to an electropneumatic actuator, **Control Engineering Practice**, 21, 679–688, (2013).

# Zeytinyağı tesislerinde oluşan karasuyun bertaraf alternatiflerinin maliyet açısından karşılaştırılması

Selda MURAT HOCAOĞLU<sup>1,\*</sup>, B. Hande GÜRSOY HAKSEVENLER<sup>2</sup>,  
İrfan BAŞTÜRK<sup>1</sup>, Şeyla ERGENEKON<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TUBITAK Marmara Araştırma Merkezi, Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, 41470, Kocaeli

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Siyasal Bilgiler Fakültesi, Kamu Yönetimi Bölümü, 34820, İstanbul

<sup>3</sup>Ergenekon Yönetim Danışmanlık Ltd. Şti, Ataşehir Bulvarı No:23, Evinpark Rezidans, İstanbul

Geliş Tarihi (Received Date): 04.06.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 06.08.2019

## Özet

Bu çalışmada, zeytinyağı işletmelerinin karasu probleminin çözülmesine yönelik bertaraf alternatifleri, maliyet açısından karşılaştırılmıştır. İncelenen alternatifler; proses değişikliği (3 fazlı üretimden 2 fazlıya geçiş), lagünlerin iyileştirilmesi, yerinde arıtma yapılması ve merkezi arıtma uygulanmasıdır. Buna göre, ortalama 2.000 ton/sezon kapasiteli bir zeytinyağı işletmesi için, yatırım ve 10 yıllık işletme maliyetleri toplamının net bugünkü değeri (NBD); proses değişikliği için ortalama -130.860 TL, yerinde arıtma için -899.853 TL, merkezi arıtma için -814.489 TL, arazi maliyetinin olmadığı durumda lagünün iyileştirilmesi için ise -110.682 TL'dir. Buna göre, zeytinyağı işletmeleri açısından en ekonomik çözüm, proses değişikliği ve işletmenin yeterli arazisinin olması durumunda lagünlerin iyileştirilmesidir. Merkezi arıtma alternatifinde, nakliye maliyeti önemli bir maliyet kalemi olarak bulunmuştur. Ancak işletmelerin OSB'ye taşınması ve arıtma maliyetinin 3 TL/m<sup>3</sup> altında olması durumunda, merkezi arıtma alternatifi de maliyet açısından anlamlı olabilir. Proses değişikliği alternatifinde, maliyete etki eden en önemli etkenin pirina bedeli olduğu belirlenmiştir. Buna göre,, 3 fazlı pirina bedeli 80 TL/ton iken, 25-35 TL/ton olan 2 fazlı pirina bedelinin, 50 TL/ton değerine çıkması durumunda, dönüşümün zeytinyağı tesislerine olan maliyetinin ortadan kalkacağı görülmüştür. Dolayısıyla, pirina üstünden sağlanacak teşvikler dönüşüme katkı sağlayabilir.

**Anahtar kelimeler:** 2 fazlı üretim, 3 fazlı üretim, karasuyun uzaklaştırılması, maliyet analizi, net bugünkü değer (NBD), karasu.

\*Selda MURAT HOCAOĞLU, selda.muratl@tubitak.gov.tr, <https://orcid.org/0000-0003-4015-0399>

B. Hande GÜRSOY HAKSEVENLER, hande.gursoy@marmara.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-3711-5058>

İrfan BAŞTÜRK, irfan.basturk@tubitak.gov.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4330-5264>

Şeyla ERGENEKON, ergenekons@superonline.com, <https://orcid.org/0000-0003-2066-8932>

## Comparison of disposal alternatives for olive mill wastewater in terms of cost

### Abstract

*In this study, disposal alternatives for discarding the olive-mill wastewater (OMW) problem have been compared in terms of costs. Investigated alternatives were; process change (modification of production process from 3-phase to 2-phase), renovation of lagoons in accordance with the regulation, on-site treatment of the OMW and centralized treatment of OMW. Accordingly; for an average capacity of 2,000 tonnes/season olive mill, net present value (NPV) of total investment and 10-year operating costs were estimated as follows; -130.860 TL in the case of process modification from 3-phase to 2-phase, - 899.853 TL in the case of on-site wastewater treatment and -814.489 TL in the case of centralized wastewater treatment and - 110.682 TL in the case of the renovation of the lagoons when there is no purchasing cost for the land. As a result, the most economical solution is estimated to be modification of technology from 3-phase to 2-phase and renovation of the lagoon (when there is no purchasing cost for the land). For the case of centralized treatment alternative, transportation cost was found to be significant. Therefore, centralized treatment may only be an economically viable solution, if the sector is in an organized industrial zone and the operation cost of the wastewater treatment is lower than 3 TL/m<sup>3</sup>. In the case of process change alternative, the unit cost of pomace is found to be a significant parameter affecting the NPV. If the unit price of 2 phase pomace, which is 25-35 TL/tonne can be raised up to 50 TL/ton, while 3-phase pomace is 80 TL/tonne, the NPV value may turn to positive. Hence, it is estimated that any subsidy that can be provided for pomace could accelerate technology transformation.*

**Keywords:** 2-phase production, 3-phase production, removal of olive oil mill wastewater, cost, net present value (NPV), olive mill wastewater.

### 1. Giriş

Zeytinyağı sektörü, sağlıklı yağ üretimi açısından Türkiye ekonomisinde önemli bir yere sahiptir. Zeytinyağı üretimi sırasında, zeytinyağı ile birlikte, pirina ve asidik özellikte, organik madde ve fenolik bileşik içeriği yüksek atıksu oluşmaktadır. Oluşan atıksuların kontrolsüz bir şekilde alıcı ortama ulaşması sonucunda ciddi çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır [1-2]. Karasuyun arıtımı konusunda uzun yıllardır çalışmalar yapılmasına karşın, teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir ve sektör özellikleri doğrultusunda sürdürülebilir arıtma yöntemleri henüz mevcut değildir [3-7]. Zeytinyağı üretiminin sezonluk olması, işletmelerin çoğunlukla küçük ölçekli olması ve tesislerin birbirinden uzak noktalarda yer alması, merkezi arıtma yaklaşımının uygulanmasını güçleştirmektedir. Arıtmanın dışında, atıksuyun bertarafı veya değerlendirilmesi için pilot ölçekte gazlaştırma [8], distilasyon [9], yakma [10], piroliz [11] ve kompost [12] gibi pek çok çalışma yürütülmektedir.

Zeytinyağı üretimi sırasında oluşan diğer atık ise zeytinin posası, bir diğer ifadeyle pirinadır. Pirina, biyoyakıt, gübre, yem katkı maddesi ve bitümlerle birlikte yol yapımında

katkı malzemesi olarak kullanılabilir [13-20]. Türkiye’de, pirinanın en yaygın kullanım alanı, yağın alındıktan sonra, biyoyakıt olarak kullanımınıdır. Pirinadan solvent ekstraksiyonu ile elde edilen yağ; sabun üretiminde, yağ asidi üretiminde ve evaporasyon kazanlarında köpük giderici olarak, değerlendirildiği görülmektedir [21-22].

Özellikle son on yılda, zeytinyağı üretim tesislerinin çevreye etkilerinin en aza indirilmesi için, 2 fazlı üretim, önemli bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. 2 fazlı zeytinyağı üretim sisteminde, yağ ve pirina olmak üzere iki kademeli ayırım sağlanmaktadır. Bu sistemlerde, dekantasyon aşamasında proses suyu kullanılmamakta, dolayısıyla dekantasyon aşamasında atıksu oluşmamakta ve sonuç olarak sektörden kaynaklanan atıksu kirlilik yükü çok önemli oranlarda azalmaktadır. İhtiyaç halinde zeytin hamurunun kıvamına göre, malaksöre 1/10 gibi düşük oranlarda su ilave edilebilmektedir, eklenen az miktarda su ve zeytinin özsu, pirina ile birlikte sistemden ayrılmaktadır.

Türkiye’de faaliyet gösteren yaklaşık 1031 zeytinyağı tesisinin (2015 yılı verilerine göre) yaklaşık 742’sinin (%72) 3 fazlı, 273’ünün 2 fazlı ve 16’sının ise taş baskı olarak üretim yaptığı belirlenmiştir. Ortalama değer üzerinden 1.000.000 ton/sezon zeytin (yağlık) işlendiği tahmin edilmektedir [23]. Son yıllarda, Tarım ve Orman Bakanlığı’nın teşvik amaçlı sağladığı Kırsal Kalkınma Destekleri ile 2 fazlı üretime geçiş yönünde bir meyil olmakla birlikte, Türkiye genelinde, zeytinyağı üretimi 3 fazlı olarak yapılmakta ve üretim sonunda çıkan atıksu lagünlerde buharlaştırılmaktadır. Mevcut durumda, lagünlerin çoğunun sızdırmazlıklarının sağlanmadığı ve buharlaşma için yeterli yüzey alanına sahip olmadıkları bilinmektedir. Bu nedenlerle, özellikle yağışın veya üretimin yoğun olduğu dönemlerde atıksular, alıcı ortama ulaşmaktadır. 3 fazlı üretimden 2 fazlı üretime geçiş için, tesis içinde çeşitli düzenlemeler yapılmasına ihtiyaç olduğu gibi, mevcut teknolojinin uygunluğuna bağlı olarak yeni dekantör yatırımı gerekebilmektedir. Türkiye’deki işletmelerin sahip oldukları dekantör teknolojisi göz önüne alındığında, mevcut dekantörlerin önemli bir kısmının (%78), üretim veriminde değişiklik olmadan dönüşebilir nitelikte olduğu, bir kısmının (%20) dönüştüğünde üretim kapasitesinde bir miktar kayıp olabileceği, sadece %2’sinin ise dönüşmez özellikte olduğu görülmektedir [23]. 2 fazlı üretimde su kullanımı, atıksu miktarı ve kirlilik yükü önemli oranlarda azalmakta, ancak oluşan pirinanın nem içeriği ve miktarı artmaktadır [24]. 2 fazlı pirinanın nem içeriğinin 3 fazlı pirinaya kıyasla daha yüksek olması, pirinanın kurutma maliyetini arttırmaktadır. Bu durum, pirina tesisleri tarafından 2 fazlı pirina için ödenen birim fiyatının 3 fazlı pirinaya göre düşük olmasına yol açmaktadır ve sektörün 2 fazlı üretime geçiş eğilimini etkilemektedir [25]. Hâlihazırda literatürde, üretim prosesi değişikliği ve karasuyun alternatif bertaraf yöntemlerinin sektöre getireceği maliyetin karşılaştırıldığı bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, karasu probleminin çözümüne yönelik olarak, Türkiye’deki 3 fazlı işletmelerin 2 fazlı üretime geçmesi, lagünlerin iyileştirilmesi, yerinde arıtma ve merkezi arıtma uygulanması alternatiflerinin maliyet analizleri yapılmış ve zeytinyağı tesislerine olan toplam maliyetleri, yatırım ve 10 yıllık işletme maliyetleri toplamının net bugünkü değeri açısından karşılaştırılmıştır. Maliyet analizleri, Türkiye’deki zeytinyağı tesislerinin kapasite kullanımları göz önüne alınarak, üç farklı kapasite için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Türkiye’deki zeytinyağı tesislerinin sahip oldukları dekantör tipleri ve dönüşüme uygunlukları da (dönüşebilir, kısmen dönüşebilir ve dönüşmez) dikkate alınarak ayrı ayrı hesap yapılmıştır.

## 2. Materyal ve metot

3 fazlı zeytinyağı üretim tesislerinde oluşan karasuyun, çevreye olan zararının azaltılabilmesine yönelik mevcut yöntemlerin sektöre olan maliyetleri Net Bugünkü Değer (NBD) bazında karşılaştırılmıştır. Zeytinyağı tesislerinin genelini yansıtmaması bakımından, sezonda 1.000 ton, 2.000 ton ve 4.000 ton zeytin işleme kapasitesi olmak üzere, 3 farklı kapasite için ayrı ayrı hesap yapılmıştır. NBD hesaplanan yöntemler arasında i) üretim prosesi değişikliği: 3 fazlı üretimden 2 fazlı üretime geçilmesi (dekantörlerin dönüşebilir, kısmen dönüşebilir ve dönüşemez olması dikkate alınarak ayrı ayrı hesaplanmıştır); ii) lagünlerin Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan Genelge 10 [26] kriterlerine uygun hale getirilmesi ve atıksu deşarjının önlenmesi, iii) her bir işletmenin arıtma tesisi kurması ve yerinde arıtma yapması, iv) merkezi arıtma tesisi kurulması ve zeytinyağı tesislerinde oluşan atıksuların taşınarak merkezi tesiste arıtılması, yer almıştır.

Finansal analizde kullanılan yatırım maliyetleri ve NBD hesap yöntemi detayları aşağıda sunulmuştur.

### 2.1. Finansal analiz

Maliyet analizinde, referans seviye olarak, mevcut durumda 3 fazlı olarak çalışan bir tesis ele alınmış, karasu için herhangi bir bertaraf yöntemi uygulamadığı ve lagününün kriterlere uygun olmadığı kabul edilmiştir.

Finansal analizde kullanılan genel varsayımlar şu şekildedir, (i) 1 yıllık yatırım ve 10 yıllık işletme dönemi olmak üzere toplam 11 yıllık dönem için hesap yapılmıştır, (ii) hesaplar reel olarak ve 2015 TL fiyatları üzerinden yapılmıştır, (iii) enflasyona dayalı fiyat yükselişleri dikkate alınmamıştır, (iv) KDV ve diğer vergiler hesapların dışında tutulmuştur, (v) reel iskonto oranı %5 olarak alınmıştır.

Mevcut bilgilerle, alternatiflerin çevresel etkilerinin karşılaştırılmasının mümkün olmaması ve çevresel faydanın mali karşılığının tahmin edilmesine yönelik literatürde kısıtlı sayıda çalışma bulunması sebebiyle, çevre kirlenmesinin önlenmesinden sağlanacak çevresel faydanın maliyeti finansal analiz hesabına dâhil edilmemiştir.

Üretim prosesi değişikliği alternatifinde giderler, i) dönüşüm giderleri, ii) birim pirina fiyatının düşmesi sebebiyle pirina gelirinde kayıp ve iii) 2 fazlı üretimde oluşan karasuyun kanalizasyona deşarj bedelidir. Proses değişikliği alternatifinde fayda ise, işletmede daha az su kullanması sebebiyle su giderlerinde oluşacak azalma olarak dikkate alınmıştır. Dönüşüm, yatırım harcaması olup bir seferlik harcamadır, su giderlerindeki azalma, atıksuyun kanalizasyona deşarj bedeli (bertaraf gideri) ve pirina gelirinin azalması ise, her yıl tekrar eden maliyet kalemleridir ve 10 yıl süresince değişmeyecekleri kabulüyle hesap yapılmıştır.

Su ve atıksu bedellerinin belirlenmesinde, zeytinyağı işletmelerinin yoğun olduğu Aydın ili su tarifesi dikkate alınmıştır. Zeytinyağı ve pirina tesislerine ait bilgiler, zeytinyağı işletmelerinin üretim yöntemi, işletmelerde kullanılan dekantör özellikleri ve kapasite bilgileri, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından desteklenmiş olan “Zeytin Sektörü Atıklarının Yönetimi (ZEYTİNAY)” projesinden alınmıştır. 1.000 ton zeytin

işlenmesi için kullanılan toplam su miktarı 2 fazlı üretimde 310 m<sup>3</sup>, 3 fazlı üretimde 940 m<sup>3</sup>; oluşan atıksu miktarı 2 fazlı üretimde 180 m<sup>3</sup>, 3 fazlı üretimde ise 1.200 m<sup>3</sup> olarak ele alınmıştır [23-24, 27].

2 fazlı pirina bedeli için tek bir fiyat olmadığı, pirinanın içeriğindeki neme ve transfer maliyetine yani zeytinyağı işletmesinin pirina tesisine olan mesafesine göre değiştiği görülmektedir. Yüksek nem içeriğine sahip ve/veya pirina işleme tesisine olan mesafenin arttığı lokasyonlardan taşınan 2 fazlı pirina için ödenen bedelin 25 TL/ton mertebelerinde olduğu, buna karşın, nem oranının düşük olduğu ve/veya pirina işleme tesisine olan mesafenin az olduğu tesislerden alınan 2 fazlı pirina için ödenen bedelin 35 TL/ton değerine kadar çıktığı bilinmektedir. Maliyet analizinde, 2 fazlı üretime dönüşüm alternatifinde, pirinaya ödenen birim fiyattaki farktan kaynaklanacak gelir kaybı hesaba dâhil edilmiştir. Bunun için, ekonomik finansal analiz, 3 fazlı pirinaya ödenen birim fiyatın 80 TL/ton olması ve 2 fazlı pirinaya ödenen birim fiyatın ise 25 ve 35 TL/ton olması durumu için değerlendirilmiştir. Ayrıca, 2 fazlı pirina bedeli olarak 50 TL/ton ödenmesi durumunda, işletmelerin gelir kaybı değişikliği analiz edilmiştir.

Alternatiflerin karşılaştırılması, NBD üstünden yapılmıştır. NBD, işletmenin 10 yıllık süreçte elde edeceği gelirlerin, önceden saptanmış bir iskonto değerine bağlı olarak bugüne indirgenmiş değerlerin toplamı ve yatırım için gerekli bedelin (yatırım ve işletme giderleri) belirlenmiş iskonto değeri üzerinden bugünkü değeri toplamı arasındaki farktır. Çıkan değerın eksi (-) olması, işletmenin kârının varsayılan iskonto oranından düşük olması (işletmenin zarar etmesi), artı olması ise (+) işletmenin kazanç sağlaması anlamına gelmektedir. NBD hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$NBD = -Y_0 + \sum_{n=1}^n \frac{NF_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Burada;

Y<sub>0</sub>: İlk yatırım maliyeti

NF: Net Fayda

i: iskonto oranı (iskonto oranı %5 alınmıştır).

n: süre, yıl (10 yıl alınmıştır).

Net Fayda, genel olarak işletme gelirlerinde ve giderlerindeki fark olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, 3 fazdan 2 faza geçiş için Net Fayda, 3 fazdan 2 faza geçişte oluşan işletme gelirlerindeki değişimle 3 fazdan 2 faza geçiş sonucunda oluşan işletme maliyetlerindeki değişim neticesinde elde edilen yıllık net gelir farkı olarak ifade edilebilir. Örneğin, dönüşebilir özellikte bir dekantöre sahip tesisin 2 fazlı üretime geçmesi durumu için Net Faydayı yazarsak; (i) 2 fazlı üretime dönüşüm durumunda su kullanımı azalacağı için su giderlerinde azalma olacaktır (değeri pozitif), (ii) oluşan yıkama ve seperatör atıksularının kanalizasyona deşarjı için atıksu bertaraf bedeli ödenecektir (değeri negatif), (iii) pirina gelirindeki artış ya da azalma (2 fazlı üretimde daha fazla pirina oluşacaktır, ancak 2 fazlı pirinanın satış fiyatı 3 fazlı pirinadan düşüktür. Pirinanın birim fiyatına göre, pirina gelirindeki değişim pozitif veya negatif olabilir). Bu durumda, Net Fayda;

NF: (+) Su giderinde azalma + (-) Atıksu bertaraf gideri + (±) pirina gelirindeki değişim olacaktır.



## 2.2. Üç fazlı üretimden iki fazlı üretime geçiş

Mevcut durumda 3 fazlı olarak çalışan zeytinyağı işletmelerinin, 2 fazlı üretime dönüşmesi için, tesiste bazı düzenlemeler yapması gerekmekte ve yeni yatırım ihtiyacı olabilmektedir. Yatırım ihtiyacı arasında (i) kullanılan dekantör tipine bağlı olarak dekantörün dönüştürülme maliyeti ve/veya yeni dekantör yatırımı, (ii) tesis içinde pirinanın taşınması için helezon tadilatı veya pirina pompası yatırımı, (iii) pirina depolama havuzu ya da silosu imalat yatırımıdır. Türkiye’deki zeytinyağı işletmelerinde kullanılan dekantörler, 2 fazlı üretime dönüşüm uygunluğuna göre “dönüşebilir (üretim veriminde değişiklik olmadan)”, “kısmen dönüşebilir (dönüştüğünde üretim kapasitesinde düşme gözlenebilir)” ve “dönüşemez (dekantörün yenilenmesi gerekir)” olarak 3 gruba ayrılmıştır [23]. Oluşturulan gruplar özelinde, 2 fazlı üretime dönüşüm maliyeti ile gerekli ekipman revizyonu ve/veya yeni ekipman ihtiyacı belirlenmiş ve 3 farklı büyüklükteki zeytinyağı işletmesi için yatırım maliyeti tahmin edilmiştir (Tablo 1). Dönüşebilir özellikteki dekantörler için dönüşüm maliyetleri, dekantör firmalarından ve dönüşüm gerçekleştiren işletmelerden temin edilmiştir. Dönüşemez özellikteki dekantöre sahip işletmeler için ise yeni dekantör bedeli olarak dekantör firmalarından temin edilen, dekantör fiyatlarının ortalaması dikkate alınarak öngörülmüştür [24]. Zeytinyağı işletmelerinin, 2 fazlı üretime dönüşmesi alternatifinin, tesislere olan maliyetini etkileyen bir diğer parametre, pirina geliridir. 2 fazlı üretimde oluşan pirina, 3 fazlı pirinaya kıyasla daha nemlidir. Bununla birlikte 2 fazlı pirina bedeli, pirinanın nem oranına ve taşınan mesafeye göre farklılık gösterdiği için pirina tesisleri tarafından pirinaya ödenen bu bedel, daha düşük olmaktadır. Bu nedenle, pirina gelirinin değişiminin değerlendirilebilmesi amacıyla farklı pirina bedelleri için gelir kaybı hesaplanmıştır. Bunun için, pirina bedeli, saha çalışmaları ve veri toplama çalışmaları sırasında zeytinyağı işletmeleri ve pirina tesislerinden temin edilen bilgiler doğrultusunda belirlenmiş, hesaplarda 3 fazlı pirina için pirina satış bedeli 80 TL/ton, 2 fazlı pirina için ise 25-35 TL/ton olarak alınmıştır. Ayrıca, 2 fazlı pirina satış fiyatının 50 TL/ton olması durumu için de maliyet analizi yapılmış, sonuçlar dönüşümün tesislere olan maliyeti açısından karşılaştırılmıştır.

Tablo 1. Üretim kapasitelerine göre zeytinyağı tesislerinin dönüşüm maliyetleri (TL).

	1.000 ton/sezon	2.000 ton/sezon	4.000 ton/sezon
<b>Dönüşebilir özellikte dekantöre sahip tesisler</b>			
Dekantörün dönüşüm bedeli	10.000	10.000	15.000
Helezon tadilatı ve pompa temin bedeli	30.000	30.000	30.000
Pirina depolama tankı bedeli	20.000	40.000	80.000
Toplam dönüşüm maliyeti	60.000	80.000	125.000
<b>Kısmen Dönüşebilir özellikte dekantöre sahip tesisler</b>			
Dekantörün dönüşüm bedeli	40.000	40.000	60.000
Helezon tadilatı ve pompa temin bedeli	30.000	30.000	30.000
Pirina depolama tankı bedeli	20.000	40.000	80.000
Toplam dönüşüm maliyeti	90.000	110.000	170.000
<b>Dönüşemez özellikte dekantöre sahip tesisler</b>			
Yeni dekantör yatırım bedeli	130.000	200.000	280.000
Helezon tadilatı ve pompa temin bedeli	30.000	30.000	30.000
Pirina depolama tankı bedeli	20.000	40.000	80.000
Toplam dönüşüm maliyeti	180.000	270.000	390.000

## 2.3. Yerinde arıtma

Yerinde arıtma alternatifinde, her bir zeytinyağı işleme tesisinin karasuyu arıtabilecek nitelikte arıtma tesisi kurması ve tesis bünyesinde arıtma yapması ön görülmüştür.

Mevcut durumda, literatürde karasuyun arıtımı ile ilgili sürdürülebilir ve ekonomik bir teknoloji belirtilmemiş olsa da, son yıllarda membran proseslerinin kullanımına yönelik çalışmalar dikkate alınmış [28-30] ve membranla entegre bir sistemin kurulacağı öngörülmüştür. Arıtmanın, ön arıtma (fiziksel ve kimyasal), membran filtrasyonu (ultrafiltrasyon) ve biyolojik arıtma proseslerinden oluşacağı öngörülmüş, proseste oluşacak membran konsantresinin ise lagünde buharlaştırılması planlanmıştır. Arıtma sisteminin yatırım maliyeti, literatürde yer alan birim maliyetler dikkate alınarak tahmin edilmiş, ayrıca lagün maliyeti de hesaba eklenmiştir. Lagün dibinde oluşacak çamurun, mevcut uygulamaya benzer şekilde pirina ile birlikte değerlendirileceği kabul edilmiş, çamur için herhangi bir ilave bertaraf maliyeti öngörülmemiştir. Buna göre; maliyet analizlerinde kullanılan, tesisin yatırım ve işletme maliyetleri, literatürdeki çalışmalar doğrultusunda [31-32] farklı kapasiteler için derlenerek Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Kapasitelerine göre zeytinyağı tesislerinin yerinde arıtma maliyetleri.

Ortalama işlenen zeytin miktarı (ton/sezon)	1.000	2.000	4.000
Atıksu miktarı (m <sup>3</sup> )	1.200	2.400	4.800
Atıksu arıtma tesisi inşası (TL)	175.000	350.000	700.000
Membran konsantresi için buharlaştırma lagün inşası (TL)	25.000	50.000	100.000
Toplam yatırım maliyeti (TL)	200.000	400.000	800.000
İşletme maliyeti (yıllık TL)*	30.000	60.000	120.000

\*25 TL/m<sup>3</sup> karasu olarak kabul edilmiştir.

#### 2.4. Merkezi arıtma

Merkezi arıtma alternatifinde, zeytinyağı işletmelerinde oluşan karasuyun, merkezi bir arıtma tesisine taşınarak arıtılacağı varsayılmıştır. Bunun için, 50 km çaplı servis alanı içinde (en uzak tesis 25 km mesafede) bir arıtma tesisi kurulacağı kabul edilmiştir. Arıtma tesisinin sezon süresince hizmet vereceği varsayılarak kapasite tahmini yapılmıştır. Karasuyun arıtımı için kurulmuş bir merkezi arıtma tesisi örneğinin olmaması sebebiyle, yerinde arıtma alternatifi ile aynı arıtma prosesinin kullanılacağı varsayılmıştır (fiziksel arıtma, kimyasal arıtma, biyolojik arıtma ve ultrafiltrasyon prosesi). Yatırım ve işletme maliyetleri, kapasite büyümesine bağlı olarak yerinde arıtma birim maliyetleri azaltılarak (yaklaşık %40 oranında) alınmıştır. Karasu nakliye bedelleri, seçilen 50 km çaplı servis alanı içinde vidanjör ile taşıma yapılacağı kabulüne göre, sefer sayısı ve birim yakıt maliyetleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Merkezi arıtma tesisinin, özel işletmeler tarafından kurulacağı, işletme ve nakliye maliyetleri dikkate alınarak, arıtma bedelinin zeytinyağı işletmelerine yansıtılacağı kabul edilmiştir. Merkezi arıtma tesisi maliyetleri Tablo 3’te sunulmuştur. Buna göre, merkezi arıtma tesisinde bir metreküp karasuyun arıtılmasının bedelinin nakliye dahil ortalama olarak yaklaşık 36,6 TL olacağı öngörülmektedir. Merkezi arıtma tesisin %20 karla çalışması durumunda, ise zeytinyağı üreticilerinden ortalama olarak 1 metreküp karasu için nakliyesi ile birlikte yaklaşık 44 TL tahsil edileceği öngörülmektedir.

Tablo 3. Merkezi arıtma tesisi maliyetleri.

Kabuller	
Kapasite (m <sup>3</sup> /sezon)	100.000
Günlük atıksu kapasitesi (m <sup>3</sup> /gün)	700
Arıtma yatırım bedeli (TL)	10.000.000
Arıtma işletme bedeli (TL/sezon)	1.000.000
Atıksu nakliyesi için vidanjör adedi*	15
Personel gideri (vidanjör şoförü maliyeti) (TL/sezon)	225.000
Vidanjör amortisman bedeli (TL/sezon)**	562.500

<b>Kabuller</b>	
Toplam günlük transfer mesafesi, km/gün**	2.500
Kilometrede yakıt bedeli (TL/km)	2
Toplam yakıt maliyeti (TL/sezon)****	750.000
Diğer vidanjör giderleri (bakım ve sigorta) (TL/sezon)	200.000
Toplam atıksu nakliye gideri (TL/sezon)	1.737.500
Aritma tesisi amortisman ve işletme bedeli (TL/yıl)*****	2.000.000
Toplam işletme maliyeti (TL/sezon)	3.737.500
Atıksu arıtma maliyeti (TL/m <sup>3</sup> )	36,6
Metreküp atıksu arıtma fiyatı (%20 kar) (TL/m <sup>3</sup> )	44

\* Her biri 15 m<sup>3</sup> kapasiteli

\*\* Vidanjörün ekonomik ömrü 8 yıl ve fiyatı 300.000 TL olarak alınmıştır.

\*\*\* 50 sefer yaptığı ve gidiş dönüş 50 kilometre olduğu kabul edilmiştir

\*\*\*\* Sezonunda 150 gün çalışıldığı kabul edilmiştir

\*\*\*\*\* Amortisman bedeli hesabında ekonomik ömür 10 yıl varsayılmış ve yıllık 1 milyon TL alınmıştır.

### 2.5. Buharlaştırma lagünü

Buharlaştırma lagünü yapılması alternatifinde, tesislerde oluşacak karasuyun depolanarak buharlaşmaya bırakılacağı, sızdırmaz özellikte ve derinliği 1,5 metre olan lagünler inşa edileceği kabul edilmiş, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan Genelge 10 kriterlerine göre hesap yapılmıştır [26]. Atıksuyun yağ içeriğine bağlı olarak, buharlaşmanın yeterli oranda gerçekleşip gerçekleşmeyeceği, tesis tarafından kontrol edilmeli ve bölgesel olarak ayrıca değerlendirilmelidir. Maliyet hesaplanırken, zeytinyağı tesislerinin kendi bünyelerinde yeterli araziye sahip oldukları varsayılmış ve hesaba arazi bedeli dâhil edilmemiştir. Buna göre, farklı kapasitedeki işletmeler için lagün inşa maliyetleri Tablo 4'te verilmiştir. Lagünlerin yıllık işletme gideri hesabında, lagünlerin inşa bedelinin %2'si oranında bir bakım maliyeti olacağı ön görülmüştür.

Tablo 4. Sezondaki üretim kapasitelerine göre zeytinyağı tesislerinin lagün inşa maliyetleri.

<b>Ortalama zeytin işleme miktarı (ton/sezon)</b>	<b>1.000</b>	<b>2.000</b>	<b>4.000</b>
Atıksu miktarı (m <sup>3</sup> )	1.200	2.400	4.800
Lagünün toplam yüzey alanı (m <sup>2</sup> )	800	1.500	3.200
Lagün inşa maliyeti (TL)	60.000	100.000	180.000

### 3. Bulgular

Türkiye'de 3 fazlı üretim yapan işletmelerdeki dekantörlerin %98'i, 2 fazlı üretime dönüşüm için uygundur (toplam dekantörlerin %78'i dönüşebilir, %20'si kısmen dönüşebilir), yalnızca %2'si dönüşüme uygun değildir ve yeni yatırım gerektirmektedir [23]. Zeytinyağı üreticilerinin 2 fazlı üretime dönüşüm için yatırım maliyetleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Buna göre, dönüşebilir tesislerin 2 fazlı üretime geçmek için dekantör başına 10.000-15.000 TL, kısmen dönüşebilir özellikte dekantöre sahip tesislerin dekantör başına 40.000-60.000 TL, dönüşemez özellikte dekantöre sahip ve yeni dekantör yatırımı yapması gereken tesislerin ise kapasitesine göre 130.000-280.000 TL civarında yatırım yapması gerektiği ön görülmektedir. Zeytinyağı işletmelerinin üretim proseslerini 2 fazlı üretime dönüştürmeleri durumunda, ortaya çıkabilecek diğer bir ihtiyaç, prininin depolanmasıdır. Pirininin depolanması için, tabanı sızdırmaz özellikte havuzlar ya da silolar kullanılabilir. Bununla birlikte, pirininin iletilmesi için

pompa ve taşıma helezonu tadilatı ve/veya yatırımı da gerekmektedir. Buna göre, ortalama 2.000 ton/sezon kapasiteli ve dönüştürülebilir özellikte dekantöre sahip bir zeytinyağı işletmesinin, toplam dönüşüm maliyetinin ortalama olarak 80.000 TL civarında olacağı tahmin edilmektedir. Tablo 1’de yer alan dönüşüm maliyetleri dikkate alındığında, Türkiye’deki 3 fazlı zeytinyağı işletmelerinin tamamının 2 fazlı üretime dönüşmesi durumunda, toplam yatırım maliyetinin ortalama 72.339.000 TL seviyelerinde olacağı, bu maliyetin 16.739.000 TL’sinin dekantör dönüşümü için, 3.380.000 TL’sinin yeni dekantör yatırımı için, 22.380.000 TL’sinin ise pirina transferi için helezon ve pompa tadilatı için, 29.840.000 TL’sinin ise pirina depolama (silo, havuz vb.) için kullanılacağı tahmin edilmektedir. Görüldüğü gibi pirina depolama maliyeti önemli yatırım kalemleri arasındadır. Mevcut durumda, 2 fazlı çalışan tesislerin büyük çoğunluğu, mevcut karasu havuzlarını, pirina depolamak için kullanmaktadır ve Türkiye’deki 3 fazlı zeytinyağı tesislerinin %89’u karasu havuzuna sahiptir [23]. Zeytinyağı tesislerinin 2 fazlı üretime dönüşümü sonrası, mevcut karasu havuzlarının pirina depolaması amacıyla kullanılması durumunda, tüm Türkiye geneli için toplam dönüşüm maliyeti yaklaşık 47.000.000-50.000.000 TL mertebesine düşecektir. Türkiye’deki zeytinyağı tesislerinin 2 fazlı üretime dönüşmesi durumunda, dönüşümün 3 farklı üretim kapasitesine sahip zeytinyağı tesislerine olan maliyetleri, gelir ve giderleri, Tablo 5’te sunulmuştur. Tablo 5 incelendiğinde, pirina gelirinin, zeytinyağı işletmeleri için önemli bir gelir kalemi olduğu görülmektedir. Proses değişikliğine bağlı olarak, pirina gelirindeki değişim, yani 3 fazlı pirina geliri (birim fiyatı 80 TL/ton) ile 2 fazlı (birim fiyatı 25-35 TL/ton) arasındaki fark “gelir kaybı” olarak sonuçlara yansımaktadır. Su gideri ise, suyun birim fiyatının yüksek olduğu illerde, önemli sayılabilecek maliyet kalemleri arasında olabilir ve 2 fazlı üretim açısından gider azalması olarak sonuçlara etki edebilir. Bu çalışmada, alternatif bertaraf yöntemleri için fayda ve maliyetler, Tablo 6’da, alternatiflerin zeytinyağı işletmelerine olan yatırım ve 10 yıllık işletme maliyetleri toplamının net bugünkü değerleri (NBD) ise Şekil 2’de verilmiştir. Her bir alternatif için, NBD değerleri, maliyet kalemlerindeki değişiklikler belirlenerek, varsa eğer gelirler (örn. su bedelinden tasarruf, pirina gelirindeki artış vb.) ve giderler (örn. ilk yatırım maliyeti, işletme maliyeti, işletmenin su ve atıksu için ödediği bedeller pirina gelirindeki azalma, vb.) dikkate alınarak hesaplanmıştır. Buna göre, örneğin 1.000 ton kapasiteli bir zeytinyağı üretim tesisinin, 3 fazlı üretimden, 2 fazlı üretime dönüşmesi durumunda, yıllık olarak su giderlerinde 6.300 TL azalma olması beklenmektedir. Bununla birlikte, atıksu bertarafı için her yıl 540 TL harcanması ve pirina satışından 9.300 TL gelir kaybı (2 fazlı pirina fiyatı 35 TL/ton olduğunda) olması beklenmektedir. Bunun sonucunda, söz konusu tesiste yıllık olarak 3.540 TL’lik bir zarar olabilmektedir. Bir başka ifadeyle, 2 fazlı pirinanın 35 TL/ton bedelle satılması durumunda, 3 fazlı olarak üretim yapan 1.000 ton kapasiteli bir tesisin 3 fazlı üretimden elde edeceği 40.800 TL pirina geliri, 2 fazlı üretime geçildiğinde 31.500 TL’ye düşmektedir. Aradaki 9.300 TL’lik fark, pirina gelirinde azalma olarak yer almaktadır (Tablo ).

2 fazlı pirina bedelinin 25 TL/ton olması durumunda, sezonda 4.000 ton işleyen ve dönüştürülebilir özellikte olan bir zeytinyağı üretim tesisinin 2 fazlı üretime dönüşmesiyle NBD değeri, yaklaşık -506.370 TL olmakta; yerinde arıtma yapıldığında bu değer -1.799.709 TL; merkezi arıtma yapıldığında ise bu değer -1.628.977 TL olmaktadır. Buna göre, 2 fazlı pirinanın fiyatı, 50 TL/ton olduğunda, tesis kapasitelerine bakılmaksızın en uygun seçeneğin 2 fazlı üretime dönüşüm olacağı görülmektedir. Sezonda 4.000 ton işleyen ve dönüştürülebilir özellikteki tesisin 2 fazlı üretime dönüşmesi durumunda, NBD değeri yaklaşık -188.586 TL iken, yerinde arıtma yapıldığında NBD

değeri üzerinden kayıp -1.799.706 TL olmaktadır. Elde edilen sonuçlardan, 2 fazlı üretime geçişte en belirleyici unsurun zeytinyağı işletmelerinin gelirleri arasında önemli yere sahip olan pirina bedeli olduğu görülmektedir. 2 fazlı pirina için ton başına birim fiyatın 25 TL veya 35 TL olması ve işletme bünyesinde yeterli alanın bulunduğu arazi bedelinin ödenmediği durumda, istenen kriterlere getirilmiş lagünlerde buharlaştırma yapmak ekonomik olarak anlamlı görünmektedir (Şekil 2). Ancak çoğu işletmede, yeterli alanın bulunmadığı bilinmektedir. İşletmenin bünyesinde yeterli büyüklükte kullanılmayan arazinin bulunmadığı ve/veya arazi bedelinin söz konusu olması durumunda, bu seçenek ekonomik olarak uygun olmamaktadır. Diğer taraftan, yerinde ve merkezi arıtma alternatifleri, en yüksek maliyetli seçenekler olarak ortaya çıkmaktadır.

Tablo 5. İki 2 fazlı üretime dönüşümün zeytinyağı tesislerine olan maliyeti.

Zeytin işleme kapasitesi	1.000 ton/sezon		2.000 ton/sezon		4.000 ton/sezon	
	2 faz	3 faz	2 faz	3 faz	2 faz	3 faz
Üretilen zeytinyağı miktarı (ton)	237.1	236.8	474.2	473.6	948.4	947.2
Hak yağ miktarı (tesise kalan yağ) (ton)	23.71	23.68	47.42	47.36	94.84	94.72
Zeytinyağı geliri (TL)*	237.100	236.800	474.200	47.600	948.400	947.200
Oluşan pirina miktarı (ton)	900	510	1.800	1.020	3.600	2.040
<b>Pirina geliri **</b>						
2 fazlı pirina fiyatı 25 TL/ton ise	22.500	40.800	45.000	81.600	90.000	163.200
2 fazlı pirina fiyatı 35 TL/ton ise	31.500	40.800	63.000	81.600	126.000	163.200

Tablo 5. (Devamı).

2 fazlı pirina fiyatı 50 TL/ton ise	45.000	40.800	90.000	81.600	180.000	163.200
<b>Toplam pirina ve yağ geliri***</b>	<b>268.600</b>	<b>277.600</b>	<b>537.200</b>	<b>555.200</b>	<b>1.074.400</b>	<b>1.110.400</b>
Üretimde kullanılan su miktarı (m <sup>3</sup> )	310	940	620	1.880	1.240	3.760
Oluşan atıksu miktarı (m <sup>3</sup> )	180	1.200	360	2.400	720	4.800
Su gideri (TL)****	3.100	9.400	6.200	18.800	12.400	37.600
Atıksu gideri (TL)*****	540	-	1.080	-	2.160	-

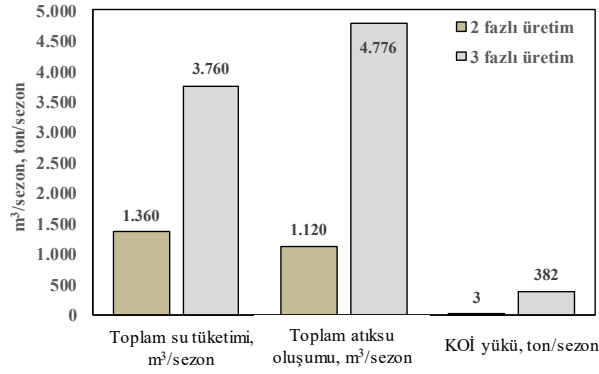
\* 1 litre yağ fiyatı 10 TL

\*\*3 fazlı pirina birim fiyatı sabit ve 80 TL/ton olarak alınmıştır

\*\*\*2 fazlı pirinanın tonu 35 TL, 3 fazlının 80 TL olduğu durumda

\*\*\*\* Su fiyatı, 10 TL/ m<sup>3</sup>

İşletmenin finansal analizinde, çevresel göstergeler arasında yer alan, su kullanımının ve atıksu oluşumunun azalması, su maliyeti ve atıksu uzaklaştırma bedelindeki değişim açısından finansal analize yansıtılmıştır. Çevresel kazanımların, örneğin su kaynaklarının korunması ve çevre kirlenmesinin önlenmesine olan etki ve sağlanacak çevresel faydanın maliyet karşılığı, finansal analiz hesabına dâhil edilememiştir. Çevresel göstergeler açısından karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, sezonda 4.000 ton zeytin işleyen bir tesisin 2 fazlı ve 3 fazlı üretim yapması durumunda, işletmenin su kullanımı, oluşacak atıksu miktarı ve atıksuyun KOİ yükü tahmin edilmiştir (Şekil 1). Şekil 1 incelendiğinde, 2 fazlı üretimin çevresel faydasının, gerek su tüketimi ve oluşacak atıksu miktarı, gerekse de atıksuyun kirlilik yükü açısından, 3 fazlı üretime kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle oluşacak atıksuyun KOİ yükü açısından, aradaki fark (2 fazlı üretim lehine yaklaşık 125 kat) büyüktür.



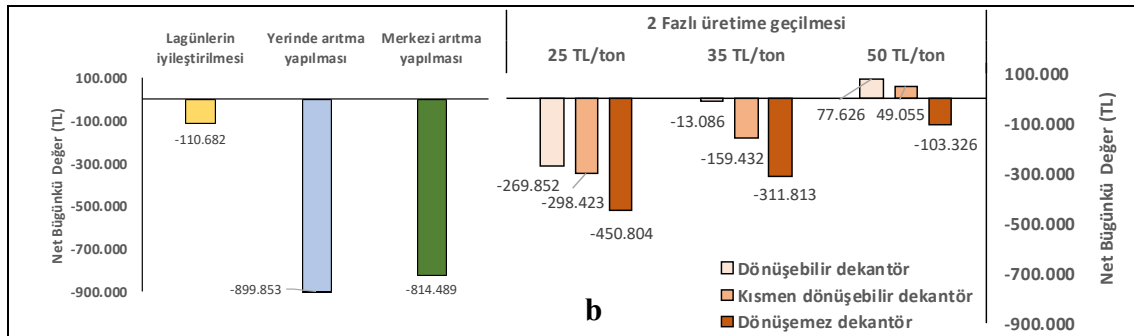
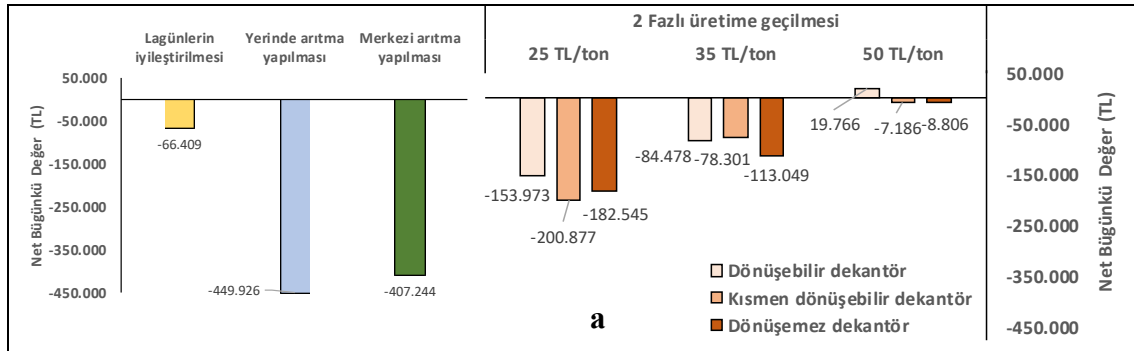
Şekil 1. Sezonda 4.000 ton zeytin işleyen bir tesisin, 2 fazlı ve 3 fazlı üretim yapması durumunda su tüketimi, atıksu oluşumu ve KOİ yükü (Hocaoglu vd. [24]'ten uyarlanmıştır).

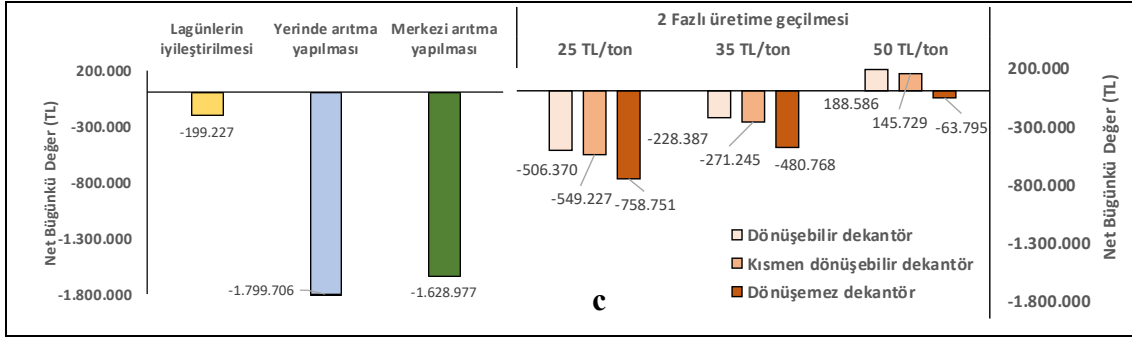
Merkezi arıtma seçeneğinde, atıksuyun tesise taşınması önemli gider kalemleri arasındadır. Merkezi arıtma tesisi, civarındaki zeytinyağı üretim tesislerine en fazla 25 km uzaklıkta olacak şekilde ön görülmüş olsa da, su miktarının ve ihtiyaç duyulan vidanjör sayısının fazla olması, atıksuyun tesise taşınma maliyetlerini arttırmaktadır. Atıksu nakliye maliyetlerini ortadan kaldırmak üzere, zeytinyağı tesislerinin ihtisas OSB içinde toplanması düşünülebilir. Amortisman ve kanalizasyona deşarj bedelleri dâhil birim atıksu arıtma bedelinin (6 TL altına düşmesi durumunda, merkezi arıtma seçeneği, 2 fazlı üretime dönüşüme kıyasla daha ekonomik olabilmektedir (ihtisas OSB'ye taşınmanın bedeli göz ardı edilmiştir). Atıksu deşarj bedelinin 3 TL civarında olduğu göz önüne alındığında, amortisman dahil birim atıksu arıtma bedelin 3 TL altında olması gerektiği görülmektedir. Membran sistemleri ile entegre arıtma teknolojisi ile deşarj standartlarına ulaşabilmenin mümkün olabileceği, değerlendirildiğinde, amortisman dahil birim atıksu arıtma bedelin 3 TL altında olması, günümüz koşullarında gerçekçi görünmemektedir. Bu doğrultuda, OSB'ye taşınma bedeli göz ardı edildiği durumda dahi, merkezi arıtma seçeneğinin zeytinyağı işletmelerine olan maliyeti, 2 fazlı üretime dönüşüme kıyasla yüksektir.

Tablo 6. Farklı alternatiflerin fayda ve maliyetleri.

	1000 ton/sezon	2000 ton/sezon	4000 ton/sezon
<b>Lagünlerin iyileştirilmesi</b>			
Lagün inşa maliyeti, TL	-60.000	-100.000	-180.000
Yıllık bakım maliyeti, TL	-1.200	-2.000	-3.600
<b>Yerinde arıtma yapılması</b>			
Yerinde atıksu arıtma tesisi inşa maliyeti, TL	-175.000	-350.000	-700.000
Lagün inşa maliyeti, TL	-25.000	-50.000	-100.000
Yıllık arıtma tesisi işletme ve bakım maliyeti, TL	-30.000	-60.000	-120.000
Kanalizasyona deşarj (atıksu bertaraf) gideri, TL	-3600	-7.200	-14.400
<b>Merkezi arıtma yapılması</b>			
Yıllık merkezi arıtmaya ödenen bedel, TL	-52.740	-105.480	-210.960
<b>2 Fazlı üretime geçilmesi</b>			
<b>Dönüşebilir dekantöre sahip tesisler için</b>			
Dönüşüm maliyeti, TL (-)	-60.000	-80.000	-125.000
Yıllık su giderinde azalma, TL (+)	6.300	12.600	25.200
Yıllık kanalizasyona deşarj bedeli, TL (-)	-540	-1.080	-2.160
Yıllık pirina gelirinde azalma, TL (-)			
25 TL/ton pirina	-18.300	-36.600	-73.200

	1000 ton/sezon	2000 ton/sezon	4000 ton/sezon
35 TL/ton pirina	-9.300	-18.600	-37.200
50 TL/ton pirina	4.200	8.400	16.800
<b><i>Kısmen dönüştürülebilir dekantöre sahip tesisler için</i></b>			
Dönüşüm maliyeti, TL (-)	-90.000	-110.000	-170.000
Yıllık su giderinde azalma, TL (+)	6.300	12.600	25.200
Yıllık kanalizasyona deşarj bedeli, TL (-)	-540	-1.080	-2.160
Yıllık pirina gelirinde azalma, TL (-)			
25 TL/ton pirina	-18.300	-36.600	-73.200
35 TL/ton pirina	-9.300	-18.600	-37.200
50 TL/ton pirina	4.200	8.400	16.800
<b><i>Dönüşürülemez özellikte dekantöre sahip tesisler için</i></b>			
Dönüşüm maliyeti, TL (-)	-180.000	-270.000	-390.000
Yıllık su giderinde azalma, TL (+)	6.300	12.600	25.200
Yıllık kanalizasyona deşarj bedeli, TL (-)	-540	-1.080	-2.160
Yıllık pirina gelirinde azalma, TL (-)			
25 TL/ton pirina	-18.300	-36.600	-73.200
35 TL/ton pirina	-4.800	-18.600	-19.200
50 TL/ton pirina	4.200	8.400	16.800





Şekil 2. Farklı alternatiflerin Net Bugünkü Değerleri a) 1000 ton/sezon kapasiteli tesisi b) 2000 ton/sezon kapasiteli tesisi c) 4000 ton/sezon kapasiteli tesisi.

#### 4. Sonuçlar

Mevcut çalışmada, zeytinyağı üretim tesislerinde oluşan karasuyun bertaraf alternatiflerinin maliyetleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, 1.000, 2.000 ve 4.000 ton/sezon zeytin işleme kapasitesine sahip zeytinyağı üretim tesisleri ele alınmıştır. Alternatiflerin, zeytinyağı işletmelerine olan toplam maliyetleri (ilk yatırım ve 10 yıllık işletme maliyetleri toplamı) arasında önemli farklar bulunmuştur. Buna göre, zeytinyağı işletmeleri açısından, en ekonomik çözüm, 3 fazlı üretimden 2 fazlı üretime geçiş ve işletme bünyesinde yeterli arazinin bulunduğu ve arazi bedeli ödenmediği durumda, lagünün istenen kriterlere göre iyileştirilmesi olmuştur. Ancak arazi bedelinin söz konusu olduğu durumda, 2 fazlı üretime geçiş en ekonomik çözüm olarak görülmektedir.

3 fazlı zeytinyağı işletmelerinin, 2 fazlı üretime dönüşmesinde, işletme maliyetlerini etkileyen en önemli parametrenin, pirina bedeli olduğu belirlenmiştir. 3 fazlı pirinaya ödenen bedel 80 TL/ton iken, 2 fazlı pirinaya ödenen bedelin 25 TL-35 TL/ton seviyelerinden, 50 TL/ton seviyesine yükselmesi durumunda, dönüşümün işletmelere olan maliyetinin ortadan kalkacağı belirlenmiştir. Bu açıdan, pirina üstünden verilecek destek ve teşvikler, sektörün 2 fazlı üretime geçişinin artmasına katkı sağlayabilir.

Türkiye'deki tüm 3 fazlı zeytinyağı işletmelerinin, 2 fazlı üretime dönüşmesi durumunda, toplam yatırım maliyetinin mevcut lagünlerin kullanım kullanılmamasına bağlı olarak, 47-73 milyon TL arasında olacağı tahmin edilmektedir.

Yerinde arıtma ve merkezi arıtma seçenekleri ise, zeytinyağı işletmeleri açısından maliyetin en yüksek olduğu alternatifler olarak bulunmuştur. 25 km bir yarıçap içinde kurulacak merkezi arıtma alternatifinin, yatırım ve işletme maliyeti, yerinde arıtmaya göre düşük olmakla birlikte atıksuyun tesise taşınması en önemli gider olarak ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda, zeytinyağı üretim tesislerinin ihtisas OSB içine taşınması ve atıksu transfer bedelinin ortadan kaldırılması durumu değerlendirilebilir. Bu durumda, OSB'ye taşınma maliyetleri göz ardı edildiğinde, amortisman dahil birim işletme maliyetinin 3 TL/m<sup>3</sup> civarında olduğu bir arıtma teknolojisiyle deşarj standartlarına sağlanabilirse, merkezi arıtma seçeneği 2 fazlı üretime dönüşüm maliyeti seviyesine gelmekte ve ekonomik olarak anlamlı olmaktadır. Ancak, mevcut arıtma teknolojileri ve uygulanabilecek membranla entegre arıtma sistemi özellikleri dikkate alındığında, birim işletme maliyetlerinin söz konusu seviyenin üstünde olacağı ve bu seçeneğin mevcut koşullarda gerçekçi olmadığı söylenebilir.



## Teşekkür

Bu makale, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından desteklenmiş olan “Zeytin Sektörü Atıklarının Yönetimi (ZEYTİNAY)” projesi kapsamında oluşturulmuştur (TÜBİTAK MAM, 2015). Proje sürecinde emeği geçen başta, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Çevre ve Şehircilik İl Müdürlükleri olmak üzere, Tarım ve Orman Bakanlığı, Zeytincilik Araştırma Enstitüsü (İzmir), Ulusal Zeytin ve Zeytinyağı Konseyi’ne teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] Tunç, M. S., Ünlü, A., Zeytinyağı üretim atıksularının özellikleri, çevresel etkileri ve arıtım teknolojileri, **Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 4, 2, 44-74, (2015).
- [2] Di Mauro, M. D., Giardina, R. C., Fava, G., Mirabella, E.F., Acquaviva, R., Renis, M., D’antona, N., Polyphenolic profile and antioxidant activity of olive mill wastewater from two sicilian olive cultivars: Cerasuola and nocellara etnea, **European Food Research and Technology**, 1-9, (2017).
- [3] Azbar, N., Bayram, A., Filibeli, A., Muezzinoglu, A., Sengul, F., Ozer, A. A review of waste management options in olive oil production, **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 34, 3, 209-247, (2004).
- [4] Oktav, E., Özer, A., Zeytinyağı endüstrisi atıksularının fiziksel ön arıtımı, İnşaat mühendisleri odası, **Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi**, Antalya, (2005).
- [5] Paraskeva, P., Diamadopoulos, E., Technologies for olive mill wastewater (OMW) treatment: A review, **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 81, 1475-1485, (2006).
- [6] Yalılı Kılıç, M., Kestioğlu, K., Kaya, G. Zeytin karasuyunun fiziko-kimyasal arıtılabilirliği. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 13, 3, 271-276, (2009).
- [7] Gursoy-Haksevenler, B. H., Arslan-Alaton, İ., Evidence of inert fractions in olive mill wastewater by size and structural fractionation before and after thermal acid cracking treatment, **Separation and Purification Technology**, 154, 176-185, (2015).
- [8] Garcia-Ibanez, P., Cabanillas, A., Sanchez, J. M. Gasification of leached orujillo (olive oil waste) in a pilot plant circulating fluidised bed reactor. **Preliminary results. Biomass Bioenergy**, 27, 183–194, (2004).
- [9] Rozzi, A., ve Malpei, F., Treatment and disposal of olive mill effluents, **International Biodeterioration & Biodegradation**, 38, 3, 135-144, (1996).
- [10] Papaioannou, D. A., method of processing waste gases from the drying of olive presscake. **Biological Wastes**, 24, 2, 137-145, (1988).
- [11] Rovatti, M., Bisi, M. ve Ferraiolo, G., High added value products from difficult wastes, **Resources, Conservation and Recycling**, 7, 4, 271–283, (1992).
- [12] Şevik, F., Tosun, İ., Ekinci, K., Composting of olive processing wastes and tomato stalks together with sewage sludge or dairy manure, **International Journal of Environmental Science and Technology**, 13, 5, 1207-1218, (2016).

- [13] Filya, İ., Hanoğlu, H., Canbolat, Ö., Sucu, E., Kurutulmuş pirinanın yem değeri ve kuzu besisinde kullanıma olanakları üzerinde araştırmalar, **Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi**, 20, 1, 13-23. (2006).
- [14] Roig, A., Cayuela, M. L., Sanchez-Monedero, M. A., An overview on olive mill wastes and their valorisation methods, **Waste Management**, 26, 9, 960-969, (2006).
- [15] Cayuela, M. L., Sanchez-Monedero, M. A., Roig, A., Two-phase olive mill waste composting: Enhancement of the composting rate and compost quality by grape stalks addition, **Biodegradation**, 21, 3, 465-473, (2010).
- [16] Boğa, M., Zeytinyağı yan ürünlerinin ruminant beslemede kullanım olanakları. **Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 2, 3, 154-59, (2014).
- [17] Karaca, C., Bozoğlu, B., Polat, O., Hatay ili pirina atık miktarının ve enerji potansiyelinin haritalanması, **Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi**, 29, 2, 55-60, (2015).
- [18] Keleş, G., Zeytin posasının ruminantlar için besin ve besleme değeri. **Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 3, 10, 780-789, (2015).
- [19] Rincon, B., Rodriguez-Gutierrez, G., Bujalance, L., Fernandez-Bolanos, J., Borja, R., Influence of a steam-explosion pre-treatment on the methane yield and kinetics of anaerobic digestion of two-phase olive mil solid waste or alperujo, **Process Safety and Environmental Protection**, 102, 361-369, (2016).
- [20] Baysan, U., Koç, M., Kaymak-Ertekin, F., 2-fazlı zeytin pirinasının değerlendirilmesinde kurutmanın önemi, **Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 5, 2, 103-112, (2017).
- [21] Öcal, A., Zeytinyağı atıksuyu ve pirinanın bitki yetiştirilmesinde kullanım olanaklarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2005).
- [22] Görel, Ö., Doymaz, İ., Akgün, N. A., Zeytinyağı fabrikası atıklarının enerji amaçlı kullanım, **Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu**, İzmir, (2003).
- [23] Hocaoğlu S. M., Baştürk I., Haksevenler B. H., Aydöner, C., Türkiye'deki zeytinyağı işletmelerinin üretim prosesleri ve kapasite kullanımları açısından değerlendirilmesi, **Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 5, 7, 724-731. (2017).
- [24] Hocaoglu, S. M., Haksevenler, B. H., Basturk, I., Talazan, P., Aydoner, C., Assessment of technology modification for olive oil sector through mass balance: A case study for Turkey, **Journal of Cleaner Production**, 188, 786-795. 2018.
- [25] Yıldırım, R., Tunalioglu, R., Aydın'da karasu sorunu ve zeytinyağı işletmelerinin çözüme yönelik tercihlerinin incelenmesi, **Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi**, 13, 2, 39-48. (2016).
- [26] ÇŞB, Zeytinyağı tesislerinde oluşan atıksuların yönetiminde uyulması gereken teknik hususlar konulu 2015/10 sayılı Genelge, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2015).
- [27] TÜBİTAK MAM, Zeytin Sektörü Atıklarının Yönetimi, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, Kocaeli, (2015).
- [28] Yalılı Kılıç, M., Kaya, G., Kestioğlu, K., Kimyasal, biyolojik ve ileri arıtma yöntemleri ile zeytin karasuyunun arıtımına yönelik bir envanter çalışması. **Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 14, 2, 183-198, (2009).

- [29] Stoller, M., Azizovab, G., Mammadovac , A., Vilardia , G., Di Palmaa , L., Chianese, A., Treatment of olive oil processing wastewater by ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis and biofiltration. **Chemical Engineering Transactions**, 47, 409-414, (2016).
- [30] Salimi Khaligh, S., Yagci, N., Balcik, C., Ozbey, B., Keskinler, B., Olmez-Hanci, T., Dizge, N., Orhon, D., Sozen, S., Particle size distribution analysis of chemically enhanced two-phase membrane filtration for olive mill effluents, **Journal of Chem Technol Biotechnol**, 92, 4, 749–756, (2016).
- [31] Şengül, F., Özer, A., Çatalkaya, E.B., Oktav, E., Evcil, H., Çolak, O., Sağır, Y., Zeytinyağı üretim atıksularının özellikleri, çevresel etkileri ve arıtım: EBSO proje kapsamındaki zeytinyağı işletmeleri için durum tespiti, Karasu karakterizasyonu, karasu arıtılabilirlik çalışmaları ve sonuç raporu, İzmir, (2003).
- [32] Gursoy-Haksevenler, Arslan-Alaton, İ., Treatment of olive mill wastewater by chemical processes: Effect of acid cracking pretreatment. **Water Science Technology**, 69, 7, 1453-1461, 2014.

# Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda yüksek halka katkılı Standart Model Higgs sektörü

Yaşar HİÇYILMAZ\*

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, Çağış kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 12.04.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 07.08.2019

## Özet

*Bu çalışmada, Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda (BHÇ) Standart Model'in Higgs sektörü yüksek halka mertebelerinde incelenmiştir. Literatürde dört halka mertebesine kadar hesaplanmış olan Higgs'in efektif potansiyelinden türetilen Higgs'in öz bağlaşım sabitleri kullanılarak BHÇ'deki Higgs süreçlerine ait tesir kesitleri hesaplanmıştır. Bu sayede Standart Model öngörüsü çerçevesindeki Higgs sektörü, yüksek halka mertebelerinde düzeltilmiş haliyle çarpıştırıcılarda test edilebilecek ve çıkan sonuçlar elimizde bir altyapı olduğu için sağlıklı bir şekilde tartışılacaktır.*

**Anahtar kelimeler:** Standart model, Higgs sektörü, büyük hadron çarpıştırıcısı.

## Standard Model Higgs sector with high loop contributions at Large Hadron Collider

### Abstract

*In this study, we investigate the Standard Model Higgs sector at high loop levels at Large Hadron Collider (LHC). To analyze Higgs process without background pollution, cross sections that belong to the Higgs process has been calculated by using self coupling constants of Higgs boson produced by effective potential of Higgs boson which is calculated up to four loop levels as known in literature. It is possible to observe this Higgs process at LHC collisions. Thus, Higgs sector bordered by the predictions of the SM can be tested at colliders with corrected form on high loop levels and the results can be discussed properly since we have groundwork.*

**Keywords:** Standard model, Higgs sector, large hadron collider.

\* Yaşar HİÇYILMAZ, yasarhicilyilmaz@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-3222-7942>

## 1. Giriş

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda Higgs bozonunun keşfiyle başlayan süreç sonucunda yüksek enerji fiziği açısından oldukça heyecan verici ve bir o kadar da ilginç bir durum ile karşı karşıyayız. Bir yandan, keşfedilen skaler bozon Standart Model (SM) öngörülleri ile tutarlı görünüyor iken, diğer yandan ise karanlık madde, karanlık enerji ve daha birçok fiziksel olgunun doğası ve kökenleri üzerine Standart Model'in ötesinde yeni fizik senaryolarına olan ihtiyacımız halen yerinde durmaktadır. Öte yandan SM'in kurgusu içerisinde kütle çekimini barındırmadığı sürece efektif bir teoriden öteye gidemediği de bir gerçektir.

Son yıllara kadar elimizde çok zengin teorik modellerin mevcudiyeti ve tahminleri ile birlikte deneysel verilerin eksikliği göze çarpıyordu. Özellikle Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (BHÇ) ölçümleri ile deneysel verilerin ortaya çıkması sayesinde en popüler yeni fizik senaryoları olarak değerlendirilebilecek modeller olan süpersimetrik modellerin Higgs sektörüne dönük detaylı öngörüllerinin deneysel ölçümlerle yüzleşme sürecinde ölüm kalım savaşı vermeleri kaçınılmazdır. Bu savaş hem özeldir süpersimetri hemde iki Higgs dublet modeli (THDM) gibi genelde farklı Higgs mekanizmaları barındıran tüm yeni fizik adayları için geçerlidir. Deneysel olarak gözlemlenmiş olan skaler bozon Standart Model Higgs bozonunun tüm özellikleri ile uyumlu görünmektedir ve SM'nin öngördüğü kütle aralığında gözlemlenmiş olarak değerlendirilebilir. Özetle, deneysel sonuçlar Standart Model'i tamamlamış gibi görünmekte ama henüz bizlere beklediğimiz yeni fizik senaryolarına dönük ne süpersimetri ne de başka bir SM ötesi bir senaryo hakkında ipucu vermemektedir.

Elbette bu durum deneysel verilerin zenginleşmesi ve hassasiyetlerinin artması sonucunda değişebilir. Bu sebeplerden dolayı, artık Standart Model Higgs'i olarak tanımlanan parçacığın özelliklerinin araştırılması, Standart Model'deki elektrozayıf simetri kırınımının tam olarak anlaşılması ya da SM ötesi yeni teoriler kurma açısından da büyük öneme sahiptir.

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda (BHÇ) Higgs bozonuna dönük ölçülmesi gereken en önemli özelliklerinden birisi kendisi ile bağlaşımıdır. Özellikle Higgs'in kendisi ile üçlü bağlaşımı Higgs potansiyelinin tam olarak anlaşılması için hayati öneme sahiptir. Çarpıştırıcı süreci bağlamında baktığımızda üçlü Higgs özbağlaşımını ölçebileceğimiz süreçlerin adı çift Higgs üretimidir [1-6]. Diğer yandan Higgs'in diğer bir özbağlaşımı olan dörtlü Higgs bağlaşımı, dahil olduğu üçlü Higgs üretim süreçlerinin şu an ki ya da gelecek çarpıştırıcılardaki deneylerde gözlemlenmesinin zorluğu bakımından düşük kesinlikle bile ölçülmesi maalesef çok zordur [7]. Bu çalışmada üzerinde duracağımız süreçler daha yakın bir zamanda sonuç alınabilecek olan çift Higgs üretimi süreçleridir.

Standart Model Higgs sektörünü temel seviyede ele almak oldukça basittir. Bilindiği gibi en basit bozunum diyagramı olan ağaç mertebesinde hesaplanan Higgs bozonu bağlaşım sabitlerinde bile daha üst mertebeye halkalar göz önüne alındığında, teoriden gelen bir belirsizlik vardır. Bu yüzden Higgs potansiyeline eklenecek her bir halka katkısı teoriden gelecek belirsizliği azaltacağından dolayı önemlidir ve göz önüne alınmalıdır. Teorik olarak SM'de ağaç mertebesinde ve halka mertebelerinde Higgs'in efektif potansiyeli farklı olduğundan, kendisi ile bağlaşım sabitleri de farklı olacaktır. Bu farkın bilinmesi ve Higgs'in kendisi ile bağlaşım sabitlerinin daha net ortaya

çıkarılması ile deneylerde bulunacak olası sonuçların Standart Model'i mi doğruladığı yoksa Standart Model ötesi yeni fiziğe mi kapı açtığının anlaşılacaktır.

Bu nedenlerden dolayı, SM Higgs sektöründeki teorik belirsizliğin azaltılması ve BHÇ'de test edilmesi bu çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde genel olarak Standart Model'in Higgs Mekanizması'nın yapısına değinilecek ve kullandığımız halka düzeltmeleri verilecektir. Üçüncü kısımda BHÇ'de Higgs çifti üretim süreçlerinden bahsedilecektir. Dördüncü kısımda halka katkılı Higgs özbağlaşımlarından ve izlediğimiz yöntem bahsedilecektir. Son bölümde ise yapılan analizler ve alınan sonuçlar grafikler ve tablolar halinde gösterilecek ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

## 2. Standart Model Higgs sektörü ve halka katkıları

Elektrozayıf teori fermiyon-fermiyon ve fermiyon-ayar bozonu arasındaki etkileşimleri doğru bir şekilde tahmin etmesine karşın, kütleli oldukları deneylerce kanıtlanan fermiyonlar, W ve Z bozonlarının nasıl kütle kazandıklarına dair herhangi bir açıklama getirememektedir. Böyle kütle terimlerinin Lagrangiana elle eklenmesi hem lokal ayar değişmezliğini bir müdahale ile kırar hem de fiziksel açıklamadan yoksundur. Brout–Englert–Higgs mekanizması [8-11] bu problemi, Elektrozayıf SU(2)xU(1) simetrisinin kendiliğinden kırılmasını sağlayacak

$$V(\phi) = \mu^2(\phi^\dagger\phi) + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2 \quad (1)$$

potansiyelini Standart Model Lagrangian'ına ekleyerek çözmektedir. Burada  $\phi$ , Higgs alanı olarak adlandırılan bir çiftli kompleks skaler alandır. Öte yandan ekstra skaler alan için eklenen toplam Lagrangian terimi

$$L_{skaler} = (D^\mu\phi)^\dagger(D_\mu\phi) - V(\phi) \quad (2)$$

şeklindedir.

$\mu^2 < 0$  durumu için, (2)'deki Lagrangian  $\phi$  alanı için simetrik kalmasına rağmen, bu Lagrangian'ın gerektirdiği vakum, küçük pertürbasyonlar için simetrik değildir. Dolayısıyla simetri kendiliğinden kırılmıştır ve bu duruma “Kendiliğinden Simetri Kırılması” denir. Ayrıca teoriye kütleli olan yeni bir skaler bir parçacık eklenmiştir. Burada olan şey tam olarak global ayar simetrisinin kırılması sonucu ortaya çıkan Goldstone bozonunun kendiliğinden kırılan lokal ayar simetrisi ile bir vektör bozon tarafından yutulması bu bozona yeni bir serbestlik derecesi başka bir deyişle kütle kazandırmasıdır. Kısacası Elektrozayıf simetrisinin kendiliğinden kırılması sonucu W ve Z bozonları kütle kazanır. Öte yandan elektromanyetik simetri kırılmadan kaldığından dolayı foton kütleli kalmıştır.

Kütle kazanan ayar bozonlarının kütleleri

$$m_{W^+} = m_{W^-} = \frac{1}{2}vg \quad (3)$$

$$m_Z = \frac{1}{2}v\sqrt{(g^2 + g'^2)}$$

şeklindedir. Burada  $v$ , vakum beklenen değerini  $g$  ve  $g'$  ise elektromanyetik ve zayıf etkileşimin ayar kuplajını ifade eder. Fermiyonlar ise Higgs alanı ile etkileşimi sonucu kütle kazanırlar. Yukawa etkileşimleri adı verilen bu etkileşimler için Lagrangian terimi

$$L_{Yukawa} = -y_{ij}[\bar{\psi}_i^L \phi \psi_j^R + \bar{\psi}_i^R \phi \psi_j^L] \quad (4)$$

Vakum etrafında açılmış Higgs potansiyelinin en basit hali

$$V(h) = \frac{1}{2}(\partial_\mu h)^2 - (\lambda v^2)h^2 - \lambda v h^3 - \frac{1}{4}\lambda h^4 \quad (5)$$

Şeklinde olup bu potansiyel “Ağaç seviyesinde Higgs potansiyeli” olarak adlandırılır. Burada  $h$ , vakum etrafında salınım yapan Higgs alanını temsil eder. Higgs bozonunun kendisi ile etkileşiminden elde edilecek kütle terimi ise (5) eşitliğinden elde edilir.

$$m_h = \sqrt{2\lambda v^2} \quad (6)$$

Yukarıda bahsedilen model elektrozayıf simetriyi kırmak için çok sezgisel bir yol olmasına karşın yumuşak bir simetri kırılması için tek yol değildir. Daha önce anlatılanlardan da anlaşılacağı gibi simetrinin kendiliğinden kırılmasına yol açan, Lagrangiana yeni bir skaler alan (Higgs alanı) ve bu alana ait içerisinde kompleks bir kütle terimi ( $\mu^2 < 0$ ) bulunan, (1) eşitliğinde gösterilen bir  $V(\phi)$  potansiyeli eklemektir. Öte yandan Coleman ve Weinberg böyle kompleks bir kütle teriminin yokluğunda bile efektif ağaç seviyesi potansiyeline halka etkileşimlerinden gelen kuantum düzeltmelerinden dolayı simetrinin kendiliğinden kırılabileceğini göstermişlerdir [12].

Coleman ve Weinberg (CW)'in analizi giren ve çıkan parçacığın sadece teorideki skaler  $\phi$  olduğu tüm diyagramların bulunduğu efektif bir potansiyel hesaplamayı içermektedir. Başka bir deyişle ağaç seviyesi üzerinde ki kuantum etkilerinin de potansiyele dahil edilmesidir. CW'nin orijinal çalışmasında bir halka düzeyinde efektif potansiyelin analizi yapılmıştır. Bu analize göre 1-halka mertebesinde efektif potansiyelin tamamı

$$V = \frac{\lambda}{4!}\phi^4 + \frac{\lambda^2\phi^4}{256\pi^2} \left( \ln \frac{\phi^2}{M} - \frac{25}{6} \right) \quad (7)$$

şeklindedir.

Higgs'in halka katkılarından gelen düzeltmeler eklenmiş efektif potansiyel yardımıyla Standart Model Higgs sektöründeki teorik belirsizlik azaltılmış olur. Literatürde iki halka katkısına kadar hesaplanmış efektif Higgs potansiyeli [13,14] bulunmaktadır. Bu

çalışmada kullanılan üç ve dört halka mertebesinde Higgs'in efektif potansiyeli [15,16] makalesinde hesaplanmıştır. Buna göre Standart Model Elektrozayıf sektörü için ağaç düzeyinde Higgs potansiyeli ve birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü halka seviyelerinde top kuark için bu potansiyelle gelecek olan düzeltmeler sırasıyla

$$V^{(1)} = -N_c T^2 [\overline{\ln}(T) - 3/2] \tag{8}$$

$$V^{(2)} = g_3^2 N_c C_F T^2 [6\overline{\ln}^2(T) - 16\overline{\ln}(T) + 18] + y_t^2 N_c T^2 \left[ -\frac{3}{2}\overline{\ln}^2(T) + 8\overline{\ln}(T) - \frac{23}{2} - \frac{\pi^2}{6} \right] \tag{9}$$

$$V^{(3)} = g_3^4 N_c C_F T^2 \{ C_G \left[ -\frac{22}{3}\overline{\ln}^3(T) + \frac{185}{3}\overline{\ln}^2(T) + (24\zeta(3) - \frac{1111}{6})\overline{\ln}(T) + \frac{2609}{12} + \frac{44}{45}\pi^4 - \frac{232}{3}\zeta(3) + \frac{16}{3}\ln^2(2)[\pi^2 - \ln^2(2)] - 128\text{Li}_4(1/2) \right] + C_F \left[ -24\overline{\ln}^3(T) + 63\overline{\ln}^2(T) - (48\zeta(3) + \frac{121}{2})\overline{\ln}(T) + \frac{85}{12} - \frac{88}{45}\pi^4 + 192\zeta(3) - \frac{32}{3}\ln^2(2)[\pi^2 - \ln^2(2)] + 256\text{Li}_4(1/2) \right] + T_F \left[ 48\overline{\ln}(T) - \frac{232}{3} + 96\zeta(3) \right] + T_F N_q \left[ \frac{8}{3}\overline{\ln}^3(T) - \frac{52}{3}\overline{\ln}^2(T) + \frac{142}{3}\overline{\ln}(T) - \frac{161}{3} - \frac{64}{3}\zeta(3) \right] \} + g_3^2 y_t^2 N_c C_F T^2 \{ 15\overline{\ln}^3(T) - 90\overline{\ln}^2(T) + [407/2 + 3\pi^2 + 60\zeta(3)]\overline{\ln}(T) - 54\zeta(3) - \frac{2393}{12} - \frac{29}{6}\pi^2 + \frac{31}{15}\pi^4 + \frac{32}{3}\ln^2(2)[\pi^2 - \ln^2(2)] - 256\text{Li}_4(1/2) \} + y_t^4 N_c T^2 \{ -\frac{9}{4}\overline{\ln}^3(T) + \frac{57}{4}\overline{\ln}^2(T) + \left[ -\frac{3}{4}\pi^2 - \frac{121}{4} - 12\zeta(3) \right]\overline{\ln}(T) + \frac{529}{24} + \frac{23}{12}\pi^2 - \frac{22}{45}\pi^4 + \frac{93}{2}\zeta(3) - \frac{8}{3}\ln^2(2)[\pi^2 - \ln^2(2)] + 64\text{Li}_4(1/2) \} + y_t^4 N_c^2 T^2 \{ \frac{7}{2}\overline{\ln}^3(T) + \frac{17}{4}\overline{\ln}^2(T) + \left[ -\frac{659}{8} - \frac{5}{6}\pi^2 \right]\overline{\ln}(T) + \frac{4903}{48} + \frac{3}{4}\pi^2 - 64\zeta(3) \} \tag{10}$$



$$\begin{aligned}
 V^{(4)} = & g_3^6 T^2 \left\{ \frac{13820381}{270} + \frac{1747112}{45} \zeta(3) + \frac{1984}{9} \zeta(5) \right. \\
 & - \frac{40288}{9} \zeta^2(3) - \frac{298894}{1215} \pi^4 - \frac{1780}{243} \pi^6 + \frac{5888}{135} \ln^5(2) \\
 & - \frac{5888}{88} \pi^2 \ln^3(2) - \frac{36064}{405} \pi^4 \ln(2) + \frac{78464}{81} \ln^2(2) [\ln^2(2) - \pi^2] \\
 & + \frac{627712}{27} \text{Li}_4(1/2) - \frac{47104}{9} \text{Li}_5(1/2) + \overline{\ln}(T) \left( \frac{27680}{3} \zeta(3) \right. \\
 & - \frac{63200}{9} \zeta(5) - \frac{1547146}{27} - \frac{208}{9} \pi^4 + \frac{640}{3} \ln^2(2) [\ln^2(2) - \pi^2] \\
 & - 5120 \text{Li}_4(1/2) + (30584 - 2400 \zeta(3)) \overline{\ln}^2(T) \\
 & \left. - 9144 \overline{\ln}^3(T) + 1380 \overline{\ln}^4(T) \right\} \tag{11}
 \end{aligned}$$

şeklindedir. Burada  $C_G$  SU(3) ayar grubunun Casimir invariantı,  $C_F, T_F$  ve  $N_C$  ise sırası ile Casimir invariant, temel gösterimin boyutu ve teorideki kuarkların sayısıdır. T, üst kuark kütle karesini ifade eder. Diğer yandan,  $\zeta(x)$  ve  $\text{Li}_4(x), \text{Li}_5(x)$  sırasıyla Riemann zeta fonksiyonu ve Logaritmik integral serisi olup,

$$\overline{\ln}(X) \equiv \ln(X/Q^2) \tag{12}$$

şeklindedir.

Kuantum halka düzeltmelerine bakıldığında, içerisinde logaritmik ifadelerin bulunduğu görülür. Logaritmik ifadelerin açılması ile dört halka seviyesinde Higgs efektif potansiyelinin yapısı Higgs alanı, h'nin kuvvetleri cinsinden

$$\begin{aligned}
 V_{eff}(h) = & V^0 + A^0 + (V_h^0 + A_h)h + (V_{h^2}^0 + A_{h^2})h^2 \\
 & + (V_{h^3}^0 + A_{h^3})h^3 + (V_{h^4}^0 + A_{h^4})h^4 + A_{h^5}h^5 + A_{h^6}h^6 + O[h^7] \tag{13}
 \end{aligned}$$

şeklindedir.

Burada  $V_i^0$  terimleri efektif potansiyele ağaç mertebesinde gelen terimleri,  $A_j$  ise logaritmik terimleri seri olarak açılmış halka etkilerinden gelen terimleri ifade eder ( $i = h, h^2, h^3, h^4$  ve  $j = h, h^2, h^3, h^4, h^5, h^6$ ). Dolayısıyla (5) eşitliğinde ağaç seviyesinde Higgs bozonunun kendisi ile sadece üçlü ve dördü bağlaşımı bulunurken, halka seviyelerinde logaritmik terimlerin açılması ile daha çok Higgs'in kendisi ile bağlaştığı beşli ve altılı Higgs özbağlaşımının bulunduğu durumlar mümkün olabilir.

### 3. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'nda Higgs çifti üretimi

2012 yılının Temmuz ayında Büyük hadron çarpıştırıcısında yapılan iki farklı deneyden ATLAS ve CMS'in araştırma grupları 125 GeV civarında bozonik bir parçacık gözlemlendiğini açıklamışlardır[17,18]. Devamında yapılan deneylerde bu bozonik parçacığın Standart Model'de tahmin edilen Higgs bozonunun özelliklerine uyduğu görülmüştür [19].

Bundan sonraki süreçte ise Higgs bozonunun yaptığı bağlaşımların ölçülmesi Standard Model Higgs sektörünün test edilmesi açısından oldukça büyük önem arz etmektedir [20-27].

Özellikle Higgs özbağlaşımlarının deneylerce elde edilmesi sonucu Higgs potansiyelinin ve dolayısıyla Elektrozayıf Simetri Kırınımı'nın anlaşılması ve olası Yeni Fizik senaryoları hakkında bilgi edinilmesi için üzerinde durulması gereken bir konudur. Diğer taraftan Higgs bozonunun kendisi ile yaptığı üçlü bağlaşımın (ikili Higgs oluşumu) ölçülmesi şu an ki ve yeni teknoloji ile yapılabilecek çarpıştırıcılarla mümkün görünürken, maalesef dört Higgs bozonunun bağlaşması ile oluşan (üçlü Higgs oluşumu) süreçlerin ölçülmesi ancak çok daha ileriki çarpıştırıcılarda ele alınabilecektir [28].

Kütlesi 125 GeV civarında olan bir Higgs'in bozunma süreçlerine ait gerçekleşme oranları dikkate alındığında çift Higgs üretiminde iki Higgs'in bozunma kanalları ve olasılıkları ise Tablo 1'de gösterilmiştir[29].

Tablo 1. Çift Higgs bozunum kanalları ve dallanma oranları.

Bozunum Kanalı	Dallanma Oranı
$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	% 33
$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	% 25
$hh \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$	% 7.3
$hh \rightarrow ZZb\bar{b}$	% 3.1
$hh \rightarrow W^+W^-\tau^+\tau^-$	% 2.7
$hh \rightarrow ZZW^+W^-$	% 1.1
$hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$	% 0.27
$hh \rightarrow \gamma\gamma\gamma$	% 0.001

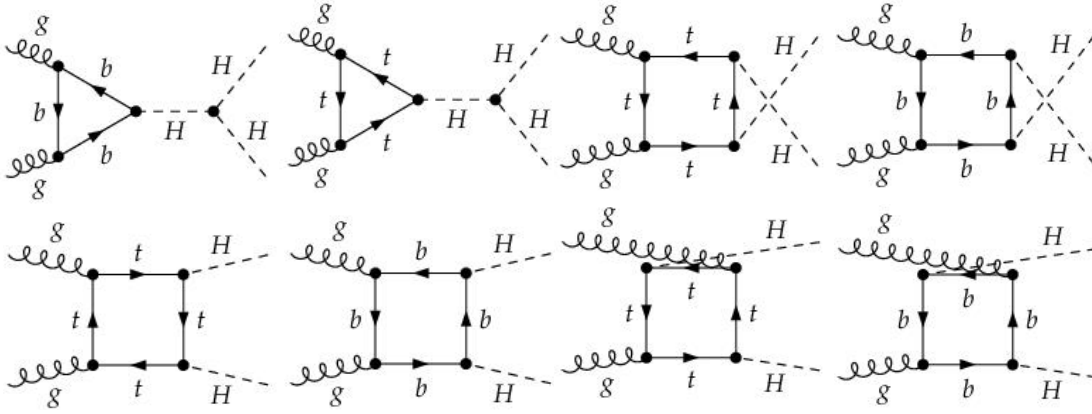
Tablo 1'de gösterilen bozunum kanalları arasında  $hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$  ve  $hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$  kanalları en olası bozunum gibi görünmesine karşın LHC analizlerinde çok fazla arka alana sahip olduğundan çözümlenmesi bakımından zor süreçlerdir. Diğer yandan her ne kadar dallanma oranı olarak düşük olan  $hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$  kanalı QCD ve QED tekli Higgs üretiminden gelen arka alanlara ( $Zh(\gamma\gamma)$  ve  $h(\gamma\gamma)b\bar{b}$ ) sahip olsa da hem yukarıda bahsettiğimiz diğer bozunum kanallarına nazaran arka alanın daha az oluşu hem de

hassasiyeti bakımından çift Higgs üretiminin analizi açısından tabloda görünen bozunum kanallarından en iyisidir [38,39].

Bu bölümün devamında Higgs'in üçlü özbağlaşımlarının bulunduğu ikili Higgs üretim süreçlerinin çarpıştırıcılardaki durumu ve ilgili Feynman diyagramları ele alınmıştır.

### 3.1 Gluon füzyonu sürecinde Higgs çifti üretimi

Bu süreç iki gluonun bir araya gelip, ağır kuark (genelde üst kuark) halkası yoluyla ortaya iki Higgs bozonu çıkarması olayıdır [30-33]. Ağaç seviyesinde oluşamayan ve Higgs çifti üretiminde en dominant süreçtir. Tesir kesitine en çok katkıyı veren üst ve alt kuarkların halka yapısında görüldüğü süreçler Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Gluon füzyonu sürecinde olası Higgs çifti oluşum kanallarının Feynman diyagramları

Şekil 1'de görüldüğü üzere gluon füzyonunda Higgs çifti oluşumu sadece halka düzeyinde ve iki farklı yapıda olur. Bunlardan biri iki gluonun üçgen şeklinde bir üst kuark halkası oluşturup üçgenin geriye kalan diğer köşesinden çıkan Higgs'in iki Higgs bozonuna bozunmasıdır ki, efektif özbağlaşımımızın katkı sunduğu süreç budur. Diğerisi ise iki gluonun kare şeklinde bir üst kuark halkası oluşturup karenin geriye kalan diğer iki köşesinden çıkan birer Higgs bozonunu meydana getirmesidir. Gluon füzyonundan Higgs çifti oluşumu için partonik tesir kesitinin analitik ifadesi

$$\hat{\sigma}(gg \rightarrow hh) \approx \int_{i_-}^{i_+} dt \frac{1}{2^2} \frac{1}{8^2} \frac{1}{2!} \frac{1}{16\pi\hat{s}^2} \frac{2\alpha_s^2}{(4\pi)^2} \left| \frac{\Gamma_{hh}^V}{\hat{s} - m_h^2} F_V + F_W \right|^2 \quad (14)$$

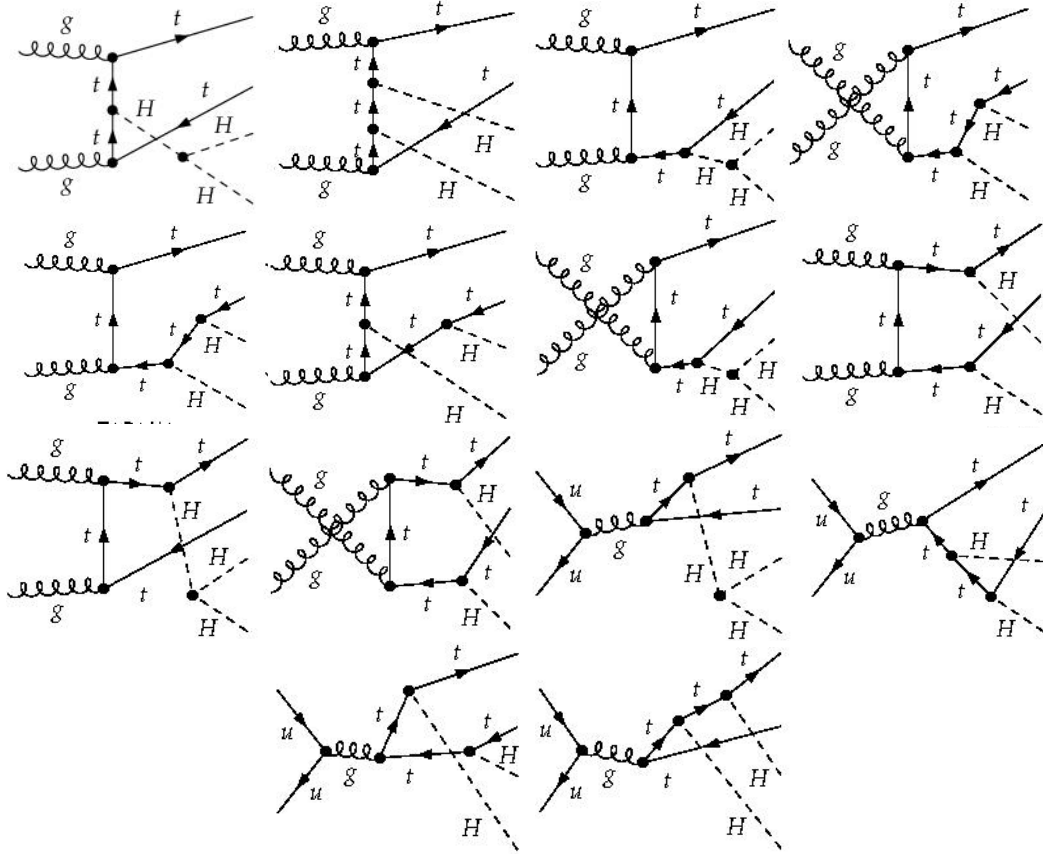
şeklinde dir[34]. Burada  $F_V$  ve  $F_W$  sırasıyla üçgen ve kare diyagramların halka fonksiyonları olup birbirleri ile zıt işaretlidir. Bu durumu Higgs'in gluonlarla bağlaşımını içeren efektif Lagrangian teriminden görebiliriz[35].

$$\begin{aligned} L_{eff} &= \frac{\alpha_s}{12\pi} (\log H) G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} \\ &= \frac{\alpha_s}{12\pi} \left( \frac{h}{v} - \frac{h^2}{2v^2} + \dots \right) G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} \end{aligned} \quad (15)$$

Aynı zamanda (14) eşitliğinde de görüldüğü gibi  $F$  teriminin önündeki katsayı Higgs'in üçlü bağlaşımı ile doğru orantılı olmasına karşın diyagramdaki sanal Higgs'in kütle karesi,  $s$ , ile ters orantılıdır [36]. Dolayısıyla tesir kesiti ifadesine göre kare diyagramın katkısı üçgen diyagrama göre oldukça büyüktür. Sonuç olarak toplam tesir kesiti kare diyagramın sonucuna yaklaşmaktadır.

### 3.2 $t\bar{t}H\bar{H}$ sürecinde Higgs çifti üretimi

Proton-proton çarpışması sonucu oluşan gluon ya da kuarkların biraraya gelmesi ile üst, anti üst kuark ve iki Higgs bozonu oluşması sürecidir. Tesir kesitine en çok katkıda bulunan süreçler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.  $t\bar{t}H\bar{H}$  sürecinde olası Higgs çifti oluşum kanallarının Feynman diyagramları

## 4. Yöntem

Bu çalışmada, halka katkılı Higgs potansiyelinden yararlanarak elde edeceğimiz Higgs'in üçlü ve dördü öz bağlaşımını bulmak için literatürde de daha önce kullanılmış olan efektif potansiyel metodu kullanılmıştır. Bu metodun bir halka mertebesinde uygulanması ile efektif potansiyelin Higgs alanı cinsinden seri açılmış halini (16) eşitliğinde görüldüğü gibi yazabiliriz[37].

$$V_{eff} = \frac{-\mu^2}{2}(v+h)^2 + \frac{1}{4}\lambda(v+h)^4 - \frac{N_c}{16\pi^2} \frac{y_t^4}{2}(v+h)^4 \left( \frac{h}{v} - \frac{h^2}{2v^2} + \frac{h^3}{3v^3} - \frac{h^4}{4v^4} + \frac{h^5}{5v^5} - \dots \right) \quad (16)$$

Bu efektif potansiyelden türetilen Higgs'in bir halka katkılı üçlü öz bağlaşımı ise

$$\Gamma_{hhh} = \frac{3m_h^2}{v} \left( 1 - \frac{N_c}{3\pi^2} \frac{m_t^4}{v^2 m_h^2} \right) \quad (17)$$

şeklinde dir.

Bu çalışmada kullanılan Higgs'in iki, üç ve dört halka katkılı üçlü öz bağlaşım ları (9), (10) ve (11) eşitliklerindeki efektif Higgs potansiyelinden yukarıda gösterilen yöntemle türetilmiştir. (18), (19) ve (20) eşitliklerinde de anlaşılacağı gibi her bir katkı kendisinden önce gelen halkaların katkılarını da içermektedir. Bu bağlaşım lar sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\Gamma_{hhh}^{(2)} = \frac{3m_h^2 e}{2m_W \sin(\theta_W)} \left( 1 - \frac{m_t^4 e^2}{4m_W^2 m_h^2 \pi^2 \sin^2(\theta_W)} + \frac{7m_t^6 e^4}{256m_W^4 m_h^2 \pi^4 \sin^4(\theta_W)} + \frac{m_t^4 e^2 g_3^2}{24m_W^2 m_h^2 \pi^4 \sin^2(\theta_W)} \right) \quad (18)$$

$$\Gamma_{hhh}^{(3)} = \frac{3m_h^2 e}{2m_W \sin(\theta_W)} \left( 1 - \frac{m_t^4 e^2}{4m_W^2 m_h^2 \pi^2 \sin^2(\theta_W)} + \frac{7m_t^6 e^4}{256m_W^4 m_h^2 \pi^4 \sin^4(\theta_W)} + \frac{m_t^4 e^2 g_3^2}{24m_W^2 m_h^2 \pi^4 \sin^2(\theta_W)} - \frac{3677m_t^8 e^6}{8192m_W^6 m_h^2 \pi^6 \sin^6(\theta_W)} + \frac{5m_t^6 e^4 g_3^2}{96m_W^4 m_h^2 \pi^6 \sin^4(\theta_W)} + \frac{53m_t^4 e^2 g_3^4}{768m_W^2 m_h^2 \pi^6 \sin^2(\theta_W)} \right) \quad (19)$$

$$\Gamma_{hhh}^{(4)} = \frac{3m_h^2 e}{2m_W \sin(\theta_W)} \left( 1 - \frac{m_t^4 e^2}{4m_W^2 m_h^2 \pi^2 \sin^2(\theta_W)} + \frac{7m_t^6 e^4}{256m_W^4 m_h^2 \pi^4 \sin^4(\theta_W)} + \frac{m_t^4 e^2 g_3^2}{24m_W^2 m_h^2 \pi^4 \sin^2(\theta_W)} - \frac{3677m_t^8 e^6}{8192m_W^6 m_h^2 \pi^6 \sin^6(\theta_W)} + \frac{5m_t^6 e^4 g_3^2}{96m_W^4 m_h^2 \pi^6 \sin^4(\theta_W)} + \frac{53m_t^4 e^2 g_3^4}{768m_W^2 m_h^2 \pi^6 \sin^2(\theta_W)} + \frac{1609m_t^4 e^2 g_3^6}{49152m_W^2 m_h^2 \pi^8 \sin^2(\theta_W)} \right) \quad (20)$$

Bu bağlaşım lar kullanılarak FeynArts paket programı [38] için yeni bir model dosyası oluşturulmuştur. Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (LHC, HL-LHC ve FCC) ve Uluslararası Doğrusal Çarpıştırıcı'daki (elektron-pozitron ve foton-foton çarpıştırıcıları) bu bağlaşım ları içeren Higgs üretim süreçlerinin bir önceki bölümde gösterilen Feynmann diyagramları FeynArts vasıtasıyla çizdirilmiş matris elemanlarının (genliklerinin) analitik hesaplanması FormCalc [39] programı kullanılarak, varsa halka integrallerinin

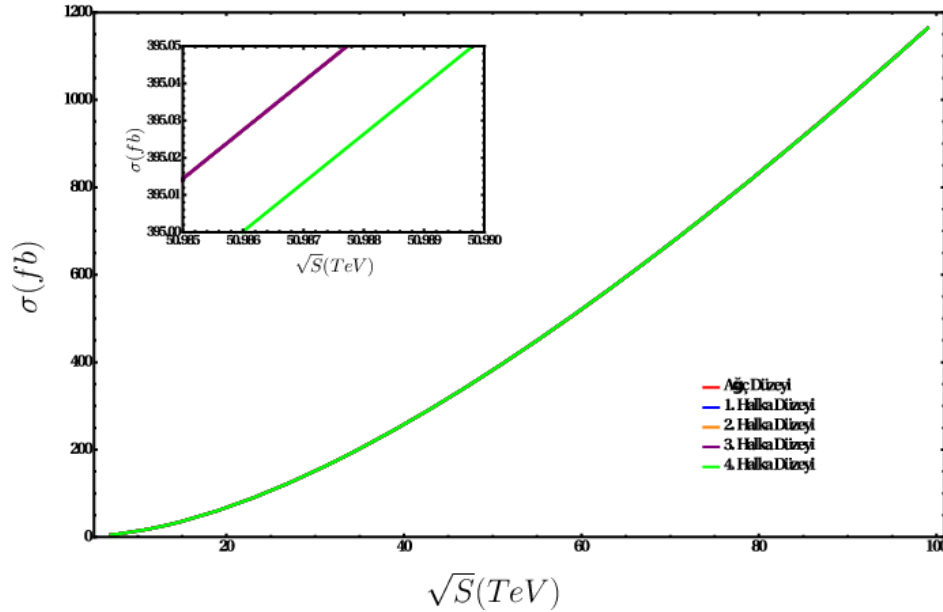
çözümü LoopTools [40] yardımı ile yapılmış ve ilgili süreç için tesir kesiti hesaplamamıza yarayan Fortran kodları elde edilmiştir.

## 5. Sonuçlar ve tartışma

Bu bölümde elde edilen sonuçlar grafikler ve tablolar yardımıyla gösterilmiştir. Her bir grafikte kırmızı renk ağaç seviyesindeki Higgs öz bağlaşımlarının bulunduğu süreçleri, mavi renk 1-halka seviyesinde düzeltilmiş Higgs öz bağlaşımlarının bulunduğu süreçleri, turuncu renk 2-halka seviyesinde düzeltilmiş Higgs öz bağlaşımlarının bulunduğu süreçleri, mor renk 3-halka seviyesinde düzeltilmiş Higgs öz bağlaşımlarının bulunduğu süreçleri ve yeşil renk 4-halka seviyesinde düzeltilmiş Higgs öz bağlaşımlarının bulunduğu süreçleri göstermektedir. Her alt bölümde grafiklerin ardından Büyük Hadron Çarpıştırıcısına ait çarpışma enerjilerine dönük tahminleri içeren tablolar verilmiştir.

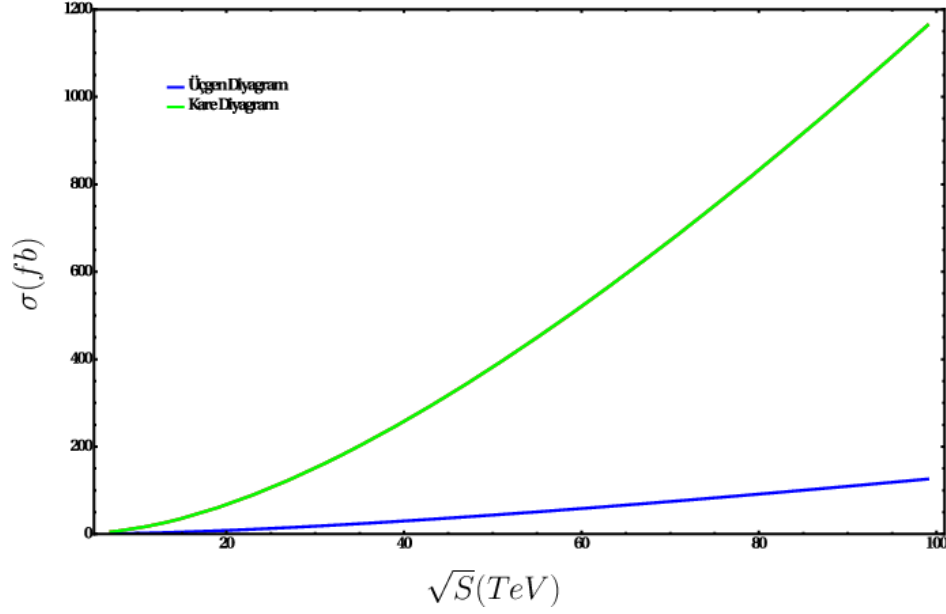
### 5.1 Gluon füzyonu sürecinde Higgs çifti üretimi

Bu süreç için Şekil 1’de gösterilen kanallar her bir halka katkısı için hesaplanmış ve bu süreç için toplam tesir kesiti bulunmuştur. Şekil 3’de kütle merkezi çarpışma enerjisine karşılık Higgs çifti oluşum tesir kesiti grafiği gösterilmiştir.



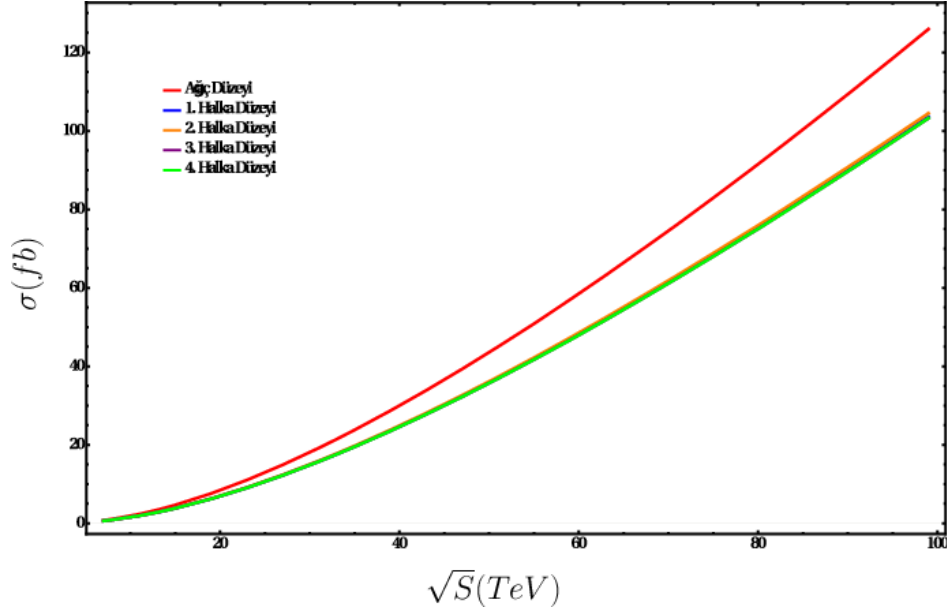
Şekil 3. Gluon füzyonu sürecinde çarpışma enerjisine karşılık Higgs çifti oluşum tesir kesiti grafiği.

Grafikte görüldüğü gibi bu süreçte Higgs’in özbağlaşımına gelen halka etkilerini ağaç seviyesinden ayırmak neredeyse imkansızdır. Bunun sebebi dördüncü bölümde anlatılan üçgen ve kare diyagramların katkı oranları arasındaki durumdur. Bu durum Şekil 4’te daha net gözlemlenebilir.

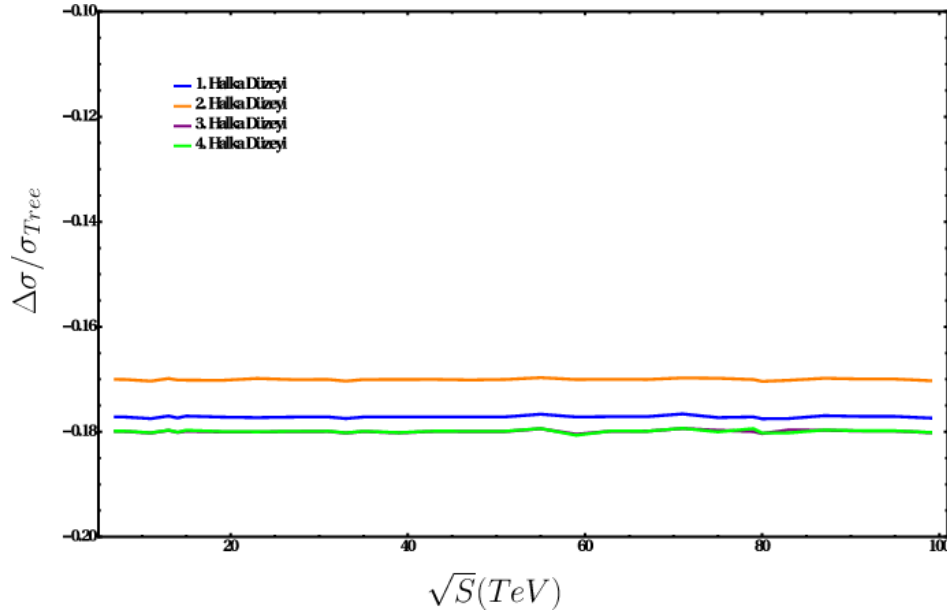


Şekil 4. Gluon füzyonu sürecinde üçgen, kare ve tüm diyagramlar için (ağaç seviyesinde üçlü Higgs bağlaşımı kullanılarak elde edilen) çarpışma enerjisine karşılık Higgs çifti oluşum tesir kesiti grafiği.

Öte yandan üçgen diyagram için tesir kesitinin Higgs'in efektif öz bağlaşımaları ile ilişkisi Şekil 5'te gösterilmiştir. Buna göre üçgen diyagramların tesir kesiti katkısı için bir, iki, üç ve dört halka katkılı Higgs'in efektif özbağlaşımaları arasında bir fark görünmemektedir. Fakat Şekil 6'ten görüleceği gibi Ağaç mertebesindeki üçlü Higgs bağlaşımı ile aralarında yüzde 18'e varan farklar mevcuttur. Bu farkın toplam tesir kesitinde anlaşılması daha önce anlatılan nedenden dolayı mümkün değildir. Dolayısıyla Higgs'in üçlü bağlaşımına gelen halka katkılarının anlaşılması açısından gluon füzyonu yararlı bir kanal değildir. Bunun iyi tarafı ise yüksek halka katkılarından bir belirsizliğin gelmeyecek oluşudur. Üçgen ve kare diyagramlarının halka fonksiyonlarının zıt işarete sahip olmasından dolayı ağır Standart ötesi ağır parçacıkların öz bağlaşımaya yapacağı negatif (pozitif) katkılar ile toplam tesir kesitinde pozitif (negatif) değişimler meydana getirme potansiyeline sahiptir. Bu yüzden yeni fizik teorileri için LHC'de bakılması gereken en önemli kanal olma özelliğini korumaktadır.



Şekil 5. Gluon füzyonu sürecinde üçgen diyagramlar için çarpışma enerjisine karşılık Higgs çifti oluşum tesir kesiti grafiği

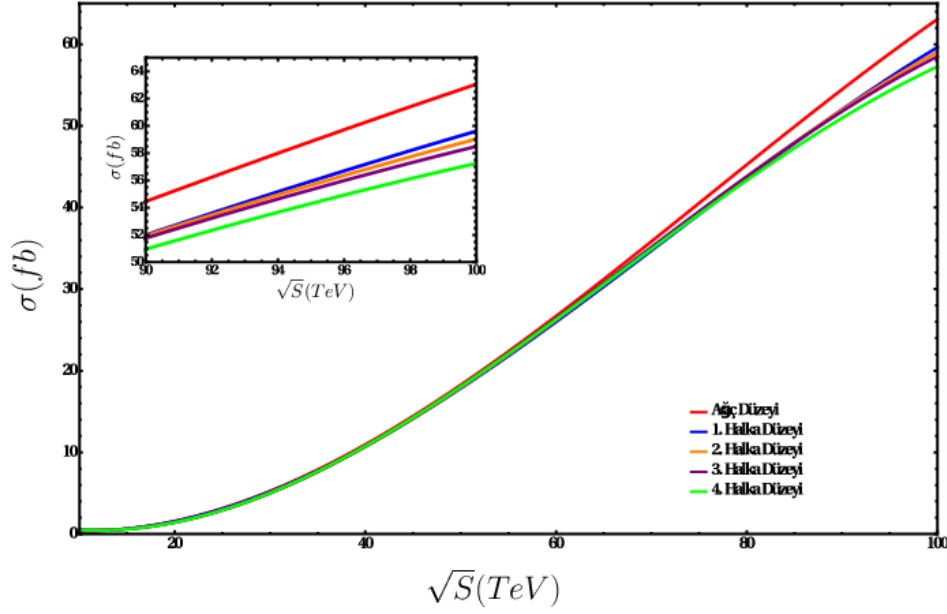


Şekil 6. Gluon füzyonu sürecinde üçgen diyagramlar için çarpışma enerjisine karşılık, her halka seviyesi için Higgs çifti oluşum tesir kesitinin ağaç seviyesi tesir kesitine oranı grafiği

### 5.2 $t\bar{t}HH$ sürecinde Higgs çifti üretimi

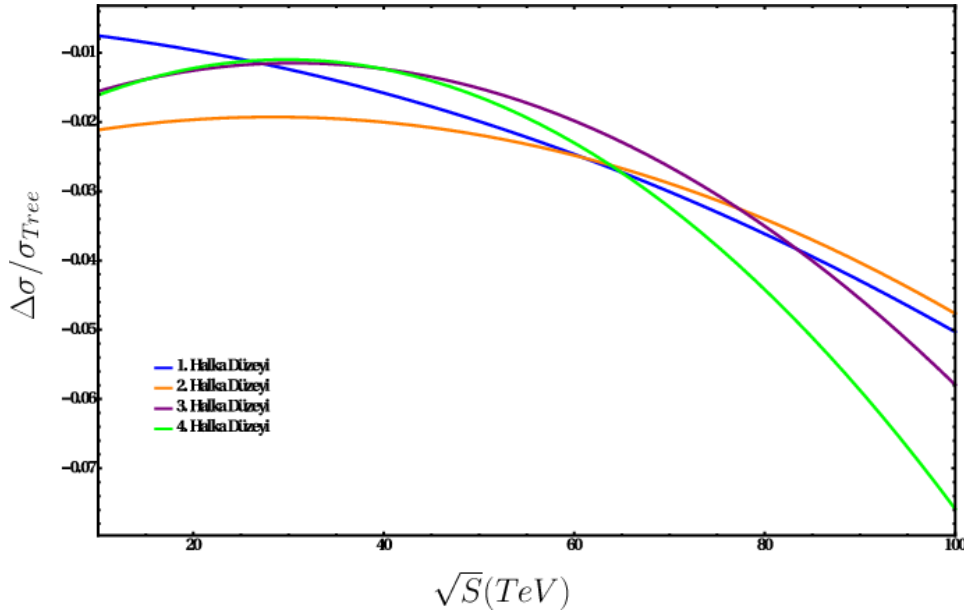
Bu süreç için en çok katkının geldiği Şekil 2’de gösterilen gluon ve yukarı kuarkın oluşturduğu kanallar her bir halka katkısı için hesaplanmış ve toplam tesir kesiti bulunmuştur. Şekil 7’de kütle merkezi çarpışma enerjisine karşılık Higgs çifti oluşum tesir kesiti grafiği gösterilmiştir.





Şekil 7. ttHH sürecinde çarpışma enerjisine karşılık Higgs çifti oluşum tesir kesiti grafiği

Şekil 7'den anlaşılacağı gibi bu süreçte halka etkilerinin ağaç seviyesinden en fazla ayrılan bölge çarpışma enerjisinin 100 TeV (FCC) olacağı bölgedir. Diğer taraftan Şekil 8'den bu süreç için ağaç ile halka seviyeleri arasındaki farkın en fazla yaklaşık yüzde 8 olacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca bu çarpışma enerjisinde dört halka katkılı süreç diğer halka katkılarından kabaca yüzde üç ayrılmaktadır.



Şekil 8. ttHH sürecinde çarpışma enerjisine karşılık her halka seviyesi için Higgs çifti oluşum tesir kesitinin ağaç seviyesi tesir kesitine oranı grafiği

Tablo 2'de Şekil 7'deki grafikte gösterilen tesir kesitleri Büyük Hadron Çarpıştırıcısı ve ileride geliştirilecek olan HL-LHC ve FCC çarpıştırıcılarındaki olası çarpışma enerjileri için ağaç seviyesi ve halka seviyeleri için gösterilmiştir. Tablo 3'de bu enerjilerde çift

Higgs bozunum kanalları için tesir kesitleri gösterilmiş olup, Tablo 4'te bu kanallar için bozunum sayıları gösterilmiştir.

Tablo 2. ttHH sürecinde LHC'deki çarpışma enerjileri için tesir kesitleri.

$\sqrt{s}$ (TeV)	$\sigma_{Tree}$ (fb)	$\sigma_{1-Loop}$ (fb)	$\sigma_{2-Loop}$ (fb)	$\sigma_{3-Loop}$ (fb)	$\sigma_{4-Loop}$ (fb)
<b>14</b>	0.528	0.544	0.511	0.542	0.513
<b>33</b>	6.769	<b>6.643</b>	6.518	<b>6.521</b>	6.554
<b>80</b>	45.235	<b>43.542</b>	43.761	<b>43.792</b>	43.314
<b>100</b>	63.054	<b>59.614</b>	59.033	<b>58.493</b>	57.244

Tablo 3. ttHH sürecinde LHC'deki enerjilere dönük çift Higgs bozunum kanalları tesir kesitleri.

<b>Bozunum Kanalı</b>	$\sqrt{s}$ (TeV)	$\sigma_{Tree} \cdot BR$	$\sigma_{1-Loop} \cdot BR$	$\sigma_{2-Loop} \cdot BR$	$\sigma_{3-Loop} \cdot BR$	$\sigma_{4-Loop} \cdot BR$
$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	14	<b>0.174</b>	0.179	<b>0.168</b>	0.168	<b>0.169</b>
	33	<b>2.233</b>	2.192	<b>2.151</b>	2.152	<b>2.163</b>
	80	<b>14.927</b>	14.368	<b>14.441</b>	14.451	<b>14.293</b>
	100	<b>20.80</b>	19.672	<b>19.481</b>	19.302	<b>18.890</b>
$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	14	<b>0.132</b>	0.126	<b>0.127</b>	0.127	<b>0.128</b>
	33	<b>1.692</b>	1.660	<b>1.629</b>	1.630	<b>1.638</b>
	80	<b>11.308</b>	10.885	<b>10.940</b>	10.948	<b>10.828</b>
	100	<b>15.763</b>	14.903	<b>14.758</b>	14.623	<b>14.311</b>
$hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$	14	<b>0.0014</b>	0.0014	<b>0.0013</b>	0.0014	<b>0.0013</b>
	33	<b>0.018</b>	0.017	<b>0.017</b>	0.017	<b>0.017</b>
	80	<b>0.122</b>	0.117	<b>0.118</b>	0.118	<b>0.117</b>
	100	<b>0.170</b>	0.161	<b>0.159</b>	0.157	<b>0.154</b>

Tablo 4. ttHH sürecinde LHC'deki enerjilere dönük çift Higgs bozunum sayıları.

Çarpıştırıcı	Bozunum Kanalı	Ağaç Düzeyi Bozunum Sayısı	4-Halka Düzeyi Bozunum Sayısı	% Fark
LHC 14 TeV 300 fb <sup>-1</sup>	$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	52	51	-1.9
	$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	40	39	-2.5
HL-LHC 14 TeV 3000 fb <sup>-1</sup>	$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	522	507	-2.8
	$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	396	384	-3.0
	$hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$	4	4	0
FCC 33 TeV 300 fb <sup>-1</sup>	$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	669	648	-3.1
	$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	507	489	-3.5
	$hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$	5	5	0
FCC 33 TeV 3000 fb <sup>-1</sup>	$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	6699	6489	-3.1
	$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	5076	4914	-3.1
	$hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$	54	51	-5.5
FCC 80 TeV 3000 fb <sup>-1</sup>	$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	44781	42879	-4.2
	$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	33924	32484	-4.2
	$hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$	366	351	-4.2
FCC 100 TeV 3000 fb <sup>-1</sup>	$hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	62400	56670	-9.1
	$hh \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$	47289	42933	-9.2
	$hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$	510	462	-9.4

Büyük Hadron Çarpıştırıcısı'ndaki en önemli kanal olan gluon füzyonunda halka etkilerinin gözlemlenmesi için uygun olmayan bir kanal olmasına rağmen, ekstra bir belirsizliğin gelmemesinden ötürü BHÇ'daki çarpışma enerjilerinde olası yeni fizik teorilerinin gözlemlenebileceği en önemli kanal olma özelliğini korumaktadır. FCC gibi daha çok yüksek çarpışma enerjilerinde önemli süreçlerden biri haline gelen ttHH kanalında ise bahsettiğimiz etkiler ancak 80-100 TeV aralığındaki çarpışma enerjilerinde gözlemlenebilir olmaktadır. Ağaç seviyesine göre bu çarpışma enerjilerinde yüzde 4 ile yüzde 9 arasında tesir kesiti farkı ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte 100 TeV çarpışma enerjisinde bir halka katkılı üçlü Higgs öz bağlaşımı içeren sürece göre **yüzde 3'lük** bir fark vardır. Sonuç olarak tesir kesitindeki belirsizlik yüksek halka mertebesinde biraz daha giderilmiştir.

Son olarak bu iki kanal dışında diğere önemli bir kanal vektör bozon füzyonudur ( $pp \rightarrow hhq\bar{q}$ ). Bu kanal şu anki BHC enerji seviyesi olan 14 TeV’de Higgs’in vektör bozonlar ile bağlaşımına ( $VVh$  ve  $VVhh$ ) oldukça duyarlıdır[41]. Diğere yandan Higgs’in üçlü bağlaşımına duyarlılığı bu enerji seviyesinde düşüktür. Dolayısıyla 14 TeV mertebesinde bu kanala ait halka katkılarının bu çalışmada gözlemlenen gluon füzyonu ve tHH kanallarından daha düşük olması beklenir. Öte yandan FCC enerji seviyesi olan 100 TeV’e yaklaştıkça vektör bozon füzyonu ile tHH kanalının tesir kesitleri büyüklük olarak birbirine yaklaşıır. Bundan dolayı çarpıştırıcı enerjisinin artmasıyla vektör bozon füzyonu kanalındaki halka katkılarının tHH kanalı ile aynı seviyede olması beklenir.

## Kaynaklar

- [1] Papaefstathiou, A., Yang, L. L. and Zurita, J., Higgs boson pair production at the LHC in the  $b\bar{b}W^+W^-$  channel, **Phys. Rev. D**, 87, 011301, (2013); Gupta, R. S., Rzehak, H. and Wells, J. D., How well do we need to measure the Higgs boson mass and self-coupling? , **Phys. Rev. D**, 88, 055024, (2013).
- [2] Baglio, J., Djouadi, A., Grober, R., Muhlleitner M. M., Quevillon J. and Spira M., “The measurement of the Higgs self-coupling at the LHC: theoretical status”, **JHEP**, 1304, 151, (2013).
- [3] Dicus, D.A., Kao, C . and Willenbrock, S. S. D., Higgs Boson Pair Production From Gluon Fusion, **Phys. Lett. B**, 203, 457, (1988).
- [4] Dawson, S., Dittmaier ,S. and Spira, M., Neutral Higgs boson pair production at hadron colliders: QCD corrections, **Phys. Rev. D**, 58, 115012 (1998); Djouadi, A., Kilian, W., Muhlleitner, M. and Zerwas, P. M., Production of neutral Higgs boson pairs at LHC, **Eur. Phys. J. C**, 10, 45, (1999).
- [5] Baur, U., Plehn, T. and Rainwater, D. L., Probing the Higgs selfcoupling at hadron colliders using rare decays, **Phys. Rev. D**, 69, 053004, (2004).
- [6] Fujii, K., Physics at the ILC with focus mostly on Higgs physics, **arXiv:1305.1692 [hep-ex]**, (2013).
- [7] Plehn, T. and Rauch, M., The quartic higgs coupling at hadron colliders, **Phys. Rev. D**, 72, 053008, (2005).
- [8] Weinberg, S., A Model of Leptons, **Phys. Rev. Lett.**, 19, 1264, (1967).
- [9] Salam, A., **Nobel Symposium No.8**, ed. N.Svartholm (Almqvis and Wiksell, **Stockholm**), (1969).
- [10] Glashow, S. L., Partial Symmetries of Weak Interactions, **Nucl. Phys.**, 22, 579, (1961).
- [11] Nambu, Y., Axial vector current conservation in weak interactions, **Phys. Rev. Lett.**, 4,380–382, (1960).
- [12] Coleman, S. and Weinberg, E., Radiative corrections as the origin of spontaneous symmetry breaking, **Phys.Rev.D**, vol.7,pp.1888–1910, (1973).
- [13] Ford, C., Jack, I., Jones, D. R. T., The Standard model effective potential at two loops, **Nucl.Phys. B**, 387, 373, (1992).
- [14] Ford, C., Jones, D. R. T. , The Effective potential and the differential equations method for Feynman integrals, **Phys. Lett. B**, 274, 409, (1992).
- [15] Martin, S. P., Three-loop Standard Model effective potential at leading order in strong and top Yukawa couplings, **Phys. Rev. D**, 89, 013003, (2014).
- [16] Martin, S. P. ,Four-loop Standard Model effective potential at leading order in QCD, **Phys. Rev. D**, 92, 5, 054029, (2015).

- [17] The ATLAS Collaboration, Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, **Phys. Lett. B**,716,1-29, (2012).
- [18] The CMS Collaboration, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, **Phys. Lett. B**, 716,30-61, (2012).
- [19] The ATLAS Collaboration, Measurements of Higgs boson production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC , **Phys. Lett. B**, 726, 88, (2013).
- [20] Giardino, P. P., Kannike, K., Raidal, M., Strumia, A., Reconstructing Higgs boson properties from the LHC and Tevatron data, **JHEP**, 1206, 117, (2012).
- [21] Azatov, A., Contino, R., Del, Re D., Galloway, J., Grassi, M., et al., Determining Higgs couplings with a model-independent analysis of  $h \rightarrow \gamma\gamma$ , **JHEP**, 1206,134, (2012).
- [22] Klute, M., Lafaye, R., Plehn, T., Rauch, M., Zerwas, D., Measuring Higgs Couplings from LHC Data, **Phys.Rev.Lett.**, 109,101801, (2012).
- [23] Carmi, D., Falkowski, A., Kuik, E., Volansky, T., Zupan, J., Higgs After the Discovery: A Status Report, **JHEP**, 1210,196, (2012).
- [24] Djouadi, A., Precision Higgs coupling measurements at the LHC through ratios of production cross sections, **The European Physical Journal C** , 73:2498, (2013).
- [25] Cacciapaglia G., Deandrea A., La Rochelle G. D., Flament J. B., Higgs couplings beyond the Standard Model, **JHEP** ,03,029, (2013).
- [26] Masso, E., Sanz, V., Limits on Anomalous Couplings of the Higgs to Electroweak Gauge Bosons from LEP and LHC, **Phys. Rev. D**, 87, 033001, (2013).
- [27] Belanger, G., Dumont, B., Ellwanger, U., Gunion, J., Kraml, S., Higgs Couplings at the End of 2012, **JHEP** ,02,053, (2013).
- [28] Dolan, M. J., Englert, C., Spannowsky, M., Higgs self-coupling measurements at the LHC, **JHEP**,1210,112, (2012).
- [29] Styles, N., Summary of Run 1 Searches and HL-LHC Prospects studies, **Higgs Pair Production at Colliders Workshop**, Mainz,(2015).
- [30] Eboli, O., Marques, G., Novaes, S. and Natale, A., Twin Higgs-boson production, **Phys. Lett. B**, 197, 269, (1987).
- [31] Glover, E. and Bij, J. vd. , Higgs boson pair production via gluon fusion, **Nucl. Phys. B**, 309, 282, (1988).
- [32] Dicus, D., Kao, C. and Willenbrock, S., Higgs Bboson pair production from gluon fusion, **Phys. Lett. B**, 203, 457, (1988).
- [33] Plehn, T., Spira, M. and Zerwas, P.M., Pair production of neutral Higgs particles in gluon-gluon collisions, **Nucl. Phys. B**, 479, 46, (1996).
- [34] Glover, E. W. N. and Bij, J. J. v.d., Higgs Pair Production via Gluon Fusion , **Nucl. Phys. B**, 309, 282, (1988).
- [35] Haba, N., Kaneta, K., Mimura, Y. and Tsendenbaljir, E., Higgs Pair Production at the LHC and ILC from general potential, **Phys. Rev. D**, 89, 015018 (2014).
- [36] Plehn, T., Spira, M. and Zerwas, P. M., Pair Production of Neutral Higgs Particles In Gluon-Gluon Collisions, **Nucl. Phys. B** , 479, 46 (1996).
- [37] Kanemura, S., Kiyoura ,S.,Okada ,Y., Senaha, E., and Yuan, C.-P.,New physics effect on the Higgs self-coupling, **Phys. Lett. B**, 558, 157-164,(2003); Kanemura, S., Okada, Y., Senaha, E., and Yuan, C.-P.,Higgs coupling constants as a probe of new physics, **Phys. Rev. D**, 70, 115002, (2004).

- [38] Hahn, T., Generating Feynman Diagrams and Amplitudes with FeynArts 3, **Comp. Phys. Commun.**, 140, 418, (2001).
- [39] Hahn, T., Excursions into FeynArts and FormCalc, **Nucl.Phys.Proc.Suppl.**, 160, 101-105, (2006).
- [40] Hahn, T., Automatic Loop Calculations with FeynArts, FormCalc, and LoopTools, **Nucl. Phys. Proc. Suppl.**, 89, 231, (2000).
- [41] Bishara F., Contino R. and Rojo J., Higgs pair production in vector-boson fusion at the LHC and beyond, **Eur. Phys. J.**, C77, 7, 481, (2017).

# Omega invariant of the line graphs of tricyclic graphs

Hacer ÖZDEN AYNA\*

Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Bursa.

Geliş Tarihi (Received Date): 06.08.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.09.2019

## Abstract

Graphs are probably one of the few fastest growing subjects due to their applications in many areas including Chemistry, Physics, Biology, Anthropology, Finance, Social Sciences, etc. One of the ways of classifying graphs is according to the number of faces. A graph having no cycle is called acyclic, and a graph having one, two, three, faces are respectively called unicyclic, bicyclic, tricyclic. Recently, a new graph invariant denoted by  $\Omega(D)$  for a realizable degree sequence  $D$  is defined.  $\Omega(D)$  gives a list of information on the realizability, number of faces, components, chords, multiple edges, loops, pendant edges, bridges, cyclicness, connectedness, etc. of the realizations of  $D$  and is shown to have several explicit applications in Graph Theory. Acyclic, unicyclic and bicyclic graphs have been studied already in relation with  $\Omega$  invariant. In this paper, we study tricyclic graphs by means of  $\Omega$  invariant.

**Keywords:** Omega invariant, degree sequence, tricyclic graph.

## Üç yüzlü grafların doğru graflarının omega invaryantı

## Özet

Kimya, Fizik, Biyoloji, Antropoloji, Finans, Sözel Bilimler vb alanlardaki uygulamaları nedeniyle graflar en hızlı gelişen alanlardan birisidir. Grafları sınıflandırma yollarından birisi grafların yüz sayılarıdır. Hiçbir yüzü olmayan grafa yüzü olmayan graf (acyclic), bir, iki, üç yüzü olan graflara sırasıyla bir yüzlü (unicyclic), iki yüzlü (bicyclic) ve üç yüzlü (tricyclic) graflar denir. Son zamanlarda çizilebilir bir derece dizisi için adına omega invaryantı denilen bir sayı tanımlanmıştır.  $\Omega(D)$ , çizilebilirlik, yüz sayısı, bileşen, giriş, katlı kenar, döngü, sallanan kenar, köprü sayıları, döngüsellik ve bağlantılılık gibi  $D$  nin çizimlerinin sahip olduğu çeşitli özelliklerle ilgili bilgi vermektedir ve graf teorisinin çeşitli uygulamalarında faydalıdır. Yüz bulundurmayan, bir

\* Hacer ÖZDEN AYNA, hozden@uludag.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-1556-3511>

ve iki yüze sahip graflar  $\Omega$  invariantı ile bağlantılı olarak çalışılmıştır. Bu çalışmada üç yüze sahip grafları  $\Omega$  invariantı yardımıyla inceleyeceğiz.

**Anahtar Kelimeler:** Omega invariant, derece dizisi, üç yüzlü graf.

## 1. Introduction

Let  $G = (V, E)$  be a graph having order  $n$  and size  $m$ . Let  $v \in V(G)$  be a vertex of  $G$ . The degree of  $v$  is denoted by  $d_v$ . A vertex of degree one will be called a pendant vertex and an edge having a pendant vertex will be called a pendant edge. The largest vertex degree in a graph is denoted by  $\Delta$ . If  $u$  and  $v$  are two adjacent vertices of  $G$ , then the edge  $e$  connecting these vertices will be denoted by  $e = uv$  and also the vertices  $u$  and  $v$  are called adjacent vertices.  $e$  will be said to be incident with the vertices  $u$  and  $v$ . A graph is said to be connected if there is a path between every pair of vertices and disconnected if not.

In many occasions, we shall classify our graphs under consideration according to whether they have at least one cycle or not. Those graphs having no cycle will be called acyclic. For example, all trees are acyclic. The remaining graphs are called cyclic graphs. A graph having one, two, three cycles is called unicyclic, bicyclic and tricyclic, respectively. The relation between omega invariant and acyclic graphs is studied in [5], between omega invariant and caterpillar trees is studied in [6]. In this work, we study the tricyclic graphs in a similar manner.

An edge connecting a vertex to itself is called a loop, and at least two edges connecting two vertices will be called multiple edges. When there are no loops nor multiple edges, the graph will be called simple.

A degree sequence written with multiplicities is given as  $D = \{d_1^{(a_1)}, d_2^{(a_2)}, d_3^{(a_3)}, \dots, \Delta^{(a_\Delta)}\}$

where  $a_i$ 's are positive integers. It is also possible to state a degree sequence as

$$D = \{1^{(a_1)}, 2^{(a_2)}, 3^{(a_3)}, \dots, \Delta^{(a_\Delta)}\}$$

where some of  $a_i$ 's could be zero.

Let  $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, \Delta\}$  be a set of non-decreasing non-negative integers. If the degree sequence of a graph  $G$  is equal to  $D$ , then  $D$  is said to be realizable and  $G$  is a realization of  $D$ .

For a realizable degree sequence, there is at least one graph with this degree sequence. Usually their number is quite big and there is no formula for it yet. The most well-known realizability test is known as Havel-Hakimi.



The degree sequence of some graphs are as follows:  $D(P_n) = \{1^{(2)}, 2^{(n-2)}\}$ ,  $D(C_n) = \{2^{(n)}\}$ ,  $D(S_n) = \{1^{(n-1)}, (n-1)^{(1)}\}$ ,  $D(K_n) = \{(n-1)^{(n)}\}$ ,  $D(K_{r,s}) = \{r^{(s)}, s^{(r)}\}$  and  $D(T_{r,s}) = \{1^{(1)}, 2^{(r+s-2)}, 3^{(1)}\}$ .

## 2. $\Omega$ invariant

In this section, for a realizable degree sequence  $D$  or for a given graph  $G$ , we recall the definition and some fundamental properties of the number  $\Omega(D)$  or  $\Omega(G)$ , respectively, which are defined and studied in [2]. The number  $a_1$  of pendant vertices of a tree  $T$  is given by

$$a_1 = 2 + a_3 + 2a_4 + 3a_5 + 4a_6 + \dots + (\Delta - 2)a_\Delta, \tag{1}$$

where  $a_i$  is the number of vertices of degree  $i$ . Note that Eqn. (1) can be restated as

$$a_3 + 2a_4 + 3a_5 + 4a_6 + \dots + (\Delta - 2)a_\Delta - a_1 = -2. \tag{2}$$

Generalizing this,  $\Omega(D)$  is defined in [2] as follows:

**Definition 1.** Let  $D = \{1^{(a_1)}, 2^{(a_2)}, 3^{(a_3)}, \dots, \Delta^{(a_\Delta)}\}$  be a set with a realization  $G$ . The  $\Omega(G)$  of the graph  $G$  is defined only in terms of the degree sequence as

$$\Omega(G) = a_3 + 2a_4 + 3a_5 + 4a_6 + \dots + (\Delta - 2)a_\Delta - a_1 = \sum_{i=1}^{\Delta} (i - 2)a_i.$$

$\Omega(G)$  of some graphs such as  $T, P_n, C_n, S_n, K_n, T_{r,s}, K_{r,s}$  where  $n = r + s$  which respectively denote a tree, path, cycle, star, complete, tadpole and complete bipartite graphs with  $n$  vertices are

$$\begin{aligned} \Omega(C_n) &= 0 \\ \Omega(P_n) &= -2 \\ \Omega(S_n) &= -2 \\ \Omega(T) &= -2 \\ \Omega(K_n) &= n(n - 3) \\ \Omega(K_{r,s}) &= 2[rs - (r + s)] \\ \Omega(T_{r,s}) &= 0. \end{aligned}$$

The most useful graph classes in the study of  $\Omega$  are the path, cycle and tree graphs. Note that the  $\Omega$  of a path, star or tree is equal to -2. This is true for all trees as stated in [2].

We now recall some basic properties of  $\Omega$ . In many cases, we study with disconnected graphs. The following useful result shows that  $\Omega$  of  $G$  is additive on the components of  $G$ :

**Theorem 1.** [2] Let  $G$  be a disconnected graph with components  $G_1, G_2, \dots, G_c$ . Then  $\Omega(G) = \sum_{i=1}^c \Omega(G_i)$ .

The following relation is useful in calculating  $\Omega(G)$ :

**Theorem 2.** [2] For a graph

$$G \quad \Omega(G) = 2(m - n).$$

That means, for any graph  $G$ ,  $\Omega(G)$  is even. Therefore if  $\Omega(D)$  is odd for a set  $D$  of non-negative integers, then  $D$  is not realizable, which can be taken as a new realizability test.

The number  $r$  of non-overlapping cycles in a given connected planar graph  $G$  is known as the cyclomatic number of  $G$ .  $r$  is stated in terms of  $\Omega(G)$ :

**Theorem 3.** [2] Let  $D = \{1^{(a_1)}, 2^{(a_2)}, 3^{(a_3)}, \dots, \Delta^{(a_\Delta)}\}$ . If  $D$  is realizable as a connected planar graph  $G$ , then the number  $r$  of faces is given by

$$r = \frac{\Omega(G)}{2} + 1.$$

This result is useful in many applications. The following is a direct generalization of Theorem 3 to disconnected graphs:

**Corollary 1.** [2] Let  $D = \{1^{(a_1)}, 2^{(a_2)}, 3^{(a_3)}, \dots, \Delta^{(a_\Delta)}\}$  be realizable as a graph  $G$  with  $c$  components.  $r$  of  $G$  is given by

$$r = \frac{\Omega(G)}{2} + c.$$

For the definitions of the fundamental notions in Graph Theory, see [1], [3], [4], [7], [8].

### 3. Line graphs

Let  $G$  be a simple undirected graph. A graph obtained by associating a new vertex onto each edge of  $G$  and connecting two such new vertices with an edge iff the corresponding edges of  $G$  have a vertex in common is called the line graph of  $G$  and denoted by  $L(G)$ .  $L(G)$  is one of the derived graphs with many useful properties. It is known that the order of the line graph is equal to the size of the graph, and the size of the line graph is given by the formula

$$m(L(G)) = \frac{1}{2} \sum_{u \in V(G)} d_u^2 - m(G).$$

In [19] this formula is restated as

$$m(L(G)) = \frac{1}{2} M_1(G) - m(G).$$

where  $M_1(G)$  denotes the first Zagreb index of  $G$ . It is clear that  $L(P_n) = P_{n-1}$ ,  $L(C_n) = C_n$  and  $L(S_n) = K_{n-1}$ .

The following result was obtained for characterization of connected unicyclic graphs:

**Lemma 1.** [5] Let  $G$  be a connected graph.  $G$  is unicyclic iff  $m(G) = n(G)$ .

That is, the necessary and sufficient condition for a connected graph to be unicyclic is that the order and size are equal. As  $n(L(G)) = m(G)$ , Lemma 1 immediately gives the following result which characterises all the graphs  $G$  such that the orders of  $G$  and  $L(G)$  are equal:

**Theorem 4.** [5] Let  $G$  be a connected graph.  $G$  is unicyclic iff  $n(L(G)) = n(G)$ .

By Theorem 4, the number of vertices are the same in  $G$  and  $L(G)$  whenever the graph  $G$  is unicyclic, and vice-versa. Of course, the line graph is rarely unicyclic. First we characterize all graphs having the property that  $n(L(G)) = n(G)$ . Actually even if the graph is unicyclic or acyclic, its line graph may have a large number of faces. The structure of the line graph of a tree is given as follows:

**Theorem 5.** [5] Let  $G$  be a connected simple acyclic graph with degree sequence  $D = \{1^{(a_1)}, 2^{(a_2)}, 3^{(a_3)}, \dots, \Delta^{(a_\Delta)}\}$ . Then its line graph  $L(G)$  consists of  $a_2$  times  $K_2$ 's,  $a_3$  times  $K_3$ 's, ...,  $a_\Delta$  times  $K_\Delta$ 's where  $K_r$  and  $K_s$  have a unique common vertex in  $L(G)$  for  $d_{v_i} = r$  and  $d_{v_j} = s$  iff  $v_i$  and  $v_j$  are adjacent in  $G$ .

In the following result, for a graph  $G$ , the necessary and sufficient condition for  $L(G)$  to have a pendant vertex was given:

**Theorem 6.** [5] Let  $G$  be any graph.  $G$  has a support vertex of degree 2 iff  $L(G)$  has a pendant vertex.

#### 4. Omega invariant of the line graphs of tricyclic graphs

In this section, we will determine all the integer values that can be attained by the omega of the line graphs of tricyclic graphs. In our results, we shall need two new notions:

**Definition 1.** Two graphs will be called adjacent if they have a common cutvertex. Two graphs will be called neighbor if they have an edge in common.

In Fig. 1,  $G$  and  $H$  are adjacent and  $H$  and  $I$  are neighbour.

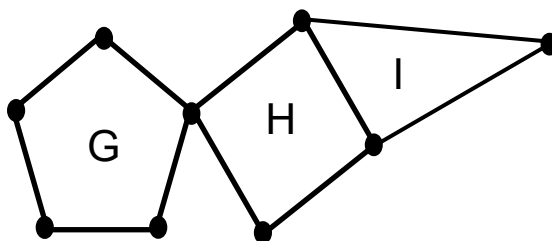


Figure 1. Adjacent and neighbor graphs.

Our aim is to find the lowest possible  $r$  (and  $\Omega$ ) for the line graph of a connected tricyclic graph.

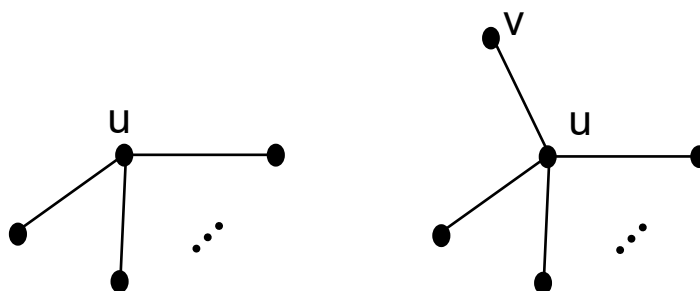


Figure 2. Adding a new pendant vertex  $v$  to  $G$ .

It is clear that pendant vertices do not change the number of faces of the graph  $G$ . Therefore  $\Omega$  does not change as well. But a pendant vertex  $v$  increases the degree of its support vertex  $u$  resulting in an increase on the number of faces of the line graph  $L(G)$ , see Fig. 2. If the degree of  $u$  in  $G$  is  $d_G u$ , after adding a new pendant edge  $uv$ , it will become  $d_G u + 1$  and the increase in the number of faces of  $L(G)$  will be

$$\begin{aligned} & T_{d_G u + 1 - 2} - (T_{d_G u - 2}) \\ &= T_{d_G u - 1} - T_{d_G u - 2} \\ &= \frac{(d_G u - 1)(d_G u)}{2} - \frac{(d_G u - 2)(d_G u - 1)}{2} \\ &= \frac{d_G u - 1}{2} (d_G u - (d_G u - 2)) \\ &= d_G u - 1. \end{aligned}$$

Therefore to find the connected tricyclic graph  $G$  with lowest possible number  $r(L(G))$  of faces and hence lowest  $\Omega(L(G))$ , we need to look for the connected tricyclic graphs without pendant edges.

Next, we consider possible connected tricyclic graph structures. As we can omit pendant edges, we need only to consider those graphs with  $\delta \geq 2$ . By Theorem 5, for each vertex  $v$  of degree  $d_v$  in  $G$ , we have a complete graph  $K_{d_G v}$  in  $L(G)$ . Because of this, the number of faces in a caterpillar tree was given in [6] by

$$r(L(G)) = \sum_{i=3}^{\Delta} a_i T_{i-2}.$$

We extend this result to tricyclic graphs as follows:

**Theorem 7.** Let  $G$  be a connected tricyclic graph. The number of faces of  $L(G)$  is given by

$$r(L(G)) = 3 + \sum_{i=3}^{\Delta} a_i T_{i-2}.$$

**Proof.** For a vertex  $v$  of degree 2 in  $G$  lying between two edges  $e_1$  and  $e_2$ , there is an edge ( $K_2$ ) between  $e_1$  and  $e_2$  in  $L(G)$ . For a vertex  $v$  of degree 3 in  $G$  lying between three edges  $e_1, e_2$  and  $e_3$ , there is a triangle ( $K_3$ ) around  $v$  in  $L(G)$ . For a vertex  $v$  of degree  $k \geq 4$  in  $G$  lying between  $k$  edges  $e_1, e_2, \dots, e_k$ , there is a complete graph ( $K_k$ ) around  $v$  in  $L(G)$ . As  $K_n$  has  $\frac{(n-1)(n-2)}{2}$  faces, the contribution of each vertex  $v$  of degree  $k \geq 2$  to the number of faces in  $L(G)$  is  $\frac{(k-1)(k-2)}{2}$ . Also as  $G$  is tricyclic and for each cycle  $C_n$ , there is another cycle  $C_n$  in  $L(G)$  with each vertex lying on an edge of  $G$ , we have three more faces each one is lying inside a cycle. So the result follows.

Next we shall find all the values of  $r(L(G))$  for all connected tricyclic graphs:

**Theorem 8.** Let  $G$  be a connected tricyclic graph.  $r(L(G))$  can take all integer values  $\geq 7$ . That is, the line graph of a connected tricyclic graph can have at least 7 faces.

**Proof.** First we prove that for a connected tricyclic graph  $G$ ,  $r(L(G)) \geq 7$ . Note that by Theorem 7,  $r(L(G)) = 3 + \sum_{i=3}^{\Delta} a_i T_{i-2}$ . Therefore for the minimum value of  $r(L(G))$ , we must find the minimum value of the sum

$$\sum_{i=3}^{\Delta} a_i T_{i-2} = a_3 + 3a_4 + 6a_5 + 10a_6 + 15a_7 + \dots + a_{\Delta} T_{\Delta-2}.$$

To achieve this, we consider all possible connected tricyclic graph structures without pendant edges. We obtain the lowest number of faces in  $L(G)$  which is 7 for the following graphs. Note that there are infinitely many other graphs with similar structures for which this minimum number is attained:

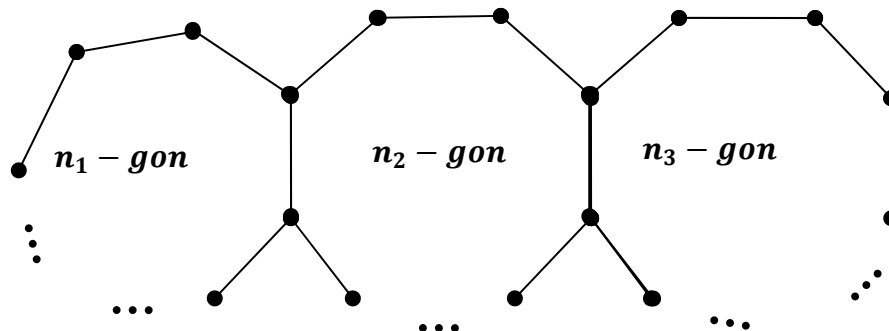


Figure 3. Connected tricyclic graphs with lowest number of faces in their line graphs.

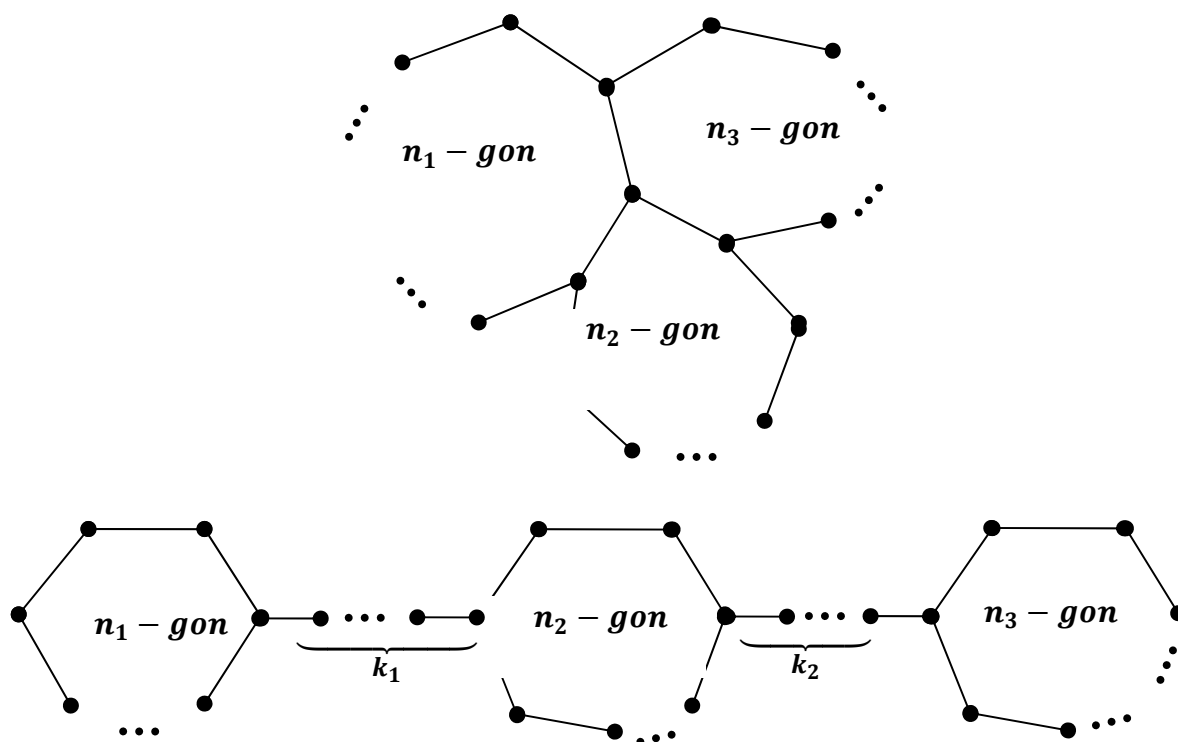


Figure 3. (continued).

To prove that  $r(L(G))$  can take all integer values  $\geq 7$ , we define an operation as in Fig. 4 where we add a new pendant vertex to  $G$ .

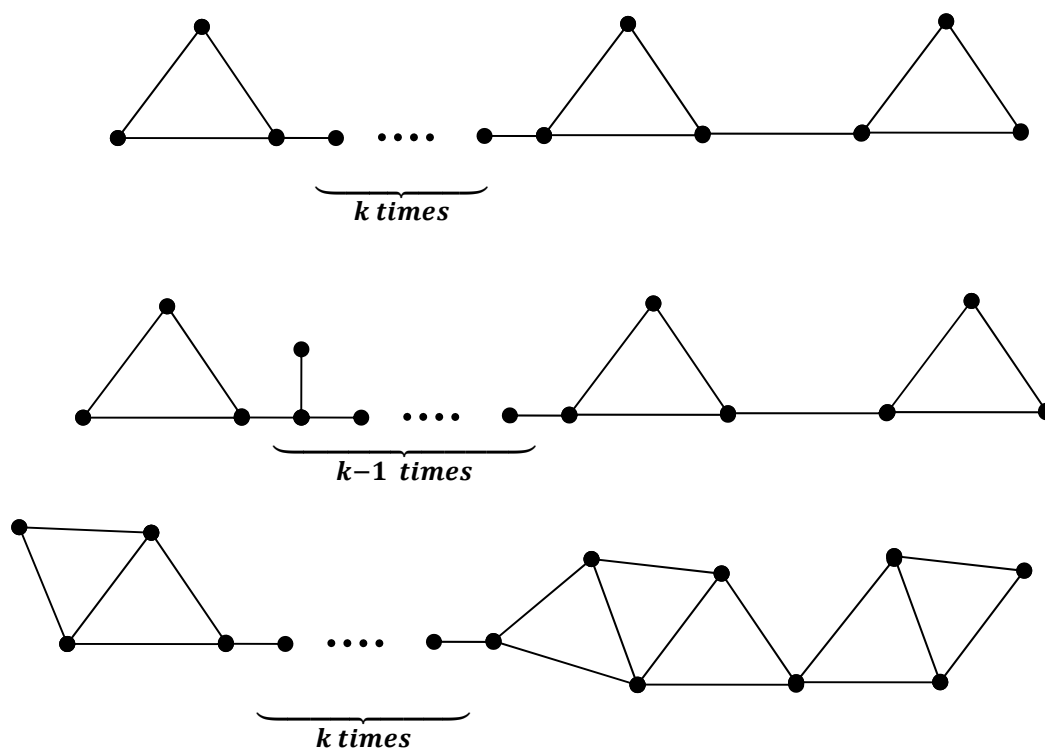


Figure 4. Effect of adding a new pendant vertex.

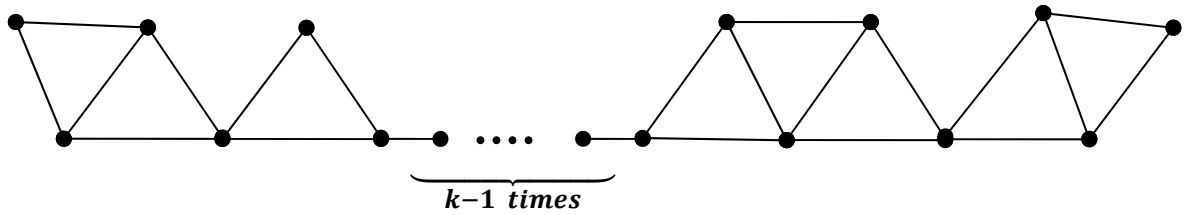


Figure 4. (continued).

This operation increases  $r(L(G))$  by 1 when the pendant vertex is added to be adjacent to a vertex of degree 2. Recall that if the added pendant vertex is adjacent to a vertex of degree  $k$ , then by the proof of Theorem 4, we know that  $r(L(G))$  increases by  $k-1$ . As this can be repeated many times by adding a new pendant vertex to another vertex of degree 2. The result then follows.

### References

- [1] Bondy, J.A. and Murty, U.S.R., **Graph Theory**, Springer NY, (2008).
- [2] Delen, S. and Cangul, I.N., A new graph invariant, **Turkish Journal of Analysis and Number Theory**, 6(1), 30-33, (2018).
- [3] Diestel, R., **Graph Theory**, Springer GTM, (2010).
- [4] Foulds, L.R., **Graph Theory Applications**, Springer Universitext, (1992).
- [5] Ozden Ayna, H., Ersoy Zihni, F., Erdogan, Ozen, F., Cangul, I. N., Srivastava, G. and Srivastava, H. M., Independence number of graphs and line graphs of trees by means of omega invariant, (preprint).
- [6] Ozden Ayna, H., Togan, M., Yurttas, A. and Cangul, I.N., Independence number of the line graphs caterpillar trees, (preprint).
- [7] Wallis, W.D., **A Beginner's Guide to Graph Theory**, Birkhauser, Boston, (2007).
- [8] West, W.D., **Introduction to Graph Theory**, Pearson, India, (2001).

# On the new travelling wave solution of a neural communication model

Gülnur YEL\*

Faculty of Educational Sciences, Final International University, Kyrenia Mersin 10, Turkey.

Geliş Tarihi (Received Date): 04.03.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 26.06.2019

## Abstract

The aim of this study is to present some new travelling wave solutions of conformable time-fractional Fitzhugh–Nagumo equation that model the transmission of nerve impulses. For this purpose, the improved Bernoulli sub-equation function method has been used. The obtained results are shown by way of the the 3D-2D graphs and contour surfaces for the suitable values.

**Keywords:** Time-Fractional Fitzhugh–Nagumo equation, conformable fractional derivative, travelling wave solutions.

## Bir sinirsel iletişim modelinin yeni salınımlı dalga çözümleri üzerinde

## Özet

Bu çalışmanın amacı, sinir uyarılarının iletişimini modelleyen uyumlu zaman-kesirli türevli Fitzhugh–Nagumo denkleminin bazı yeni salınımlı dalga çözümlerini sunmaktır. Bu amaçla, geliştirilmiş Bernoulli alt denklem fonksiyon metodu kullanılmıştır. Elde edilen çözümler uygun değerler için 2-3 boyutlu grafikler ve kontur yüzeyleri ile gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zaman-kesirli türevli Fitzhugh–Nagumo denklemi, uyumlu kesirli türev, salınımlı dalga çözümleri.

\* Gülnur YEL, gulnur.yel@final.edu.tr, <https://orcid.org/0000-00012-5134-4431>



## 1. Introduction

The reaction–diffusion equations have an important role to describe mathematical models. These equations are widely used in many branches such as ecology, spreading of biological populations, combustion theory, physiology, chemistry, geology, physics and engineering [1-6].

Neural communications have a significant role in mathematical biology. Understanding of electrical connections in neural networks several cognitive brain activities as memory, attention, sleep, and in various pathologies as Parkinson's disease, epilepsy, gives reliable information to make diagnosis and treatment in medicine and physiology. In recent years, a considerable amount of models have appeared to chaotic neurons systems. One of a good mathematical model is the Hodgkin-Huxley (HH) which describes the transmission of nerve impulses through an axon [7]. The FitzHugh–Nagumo (FHN) model which characterise neural network by nerve cells via electrical signalling is a simpler model of HH model [8,9]. This model has been studied extensively in mathematical biology and neurobiology [10-12]. In [13], a strongly connective model has been considered and its numerical simulations of neural networks with neurons have been shown. The dynamical behaviours of the FitzHugh–Nagumo model with fractional order have been addressed [14]. The author has concluded that the fractional order models can be used to control of abnormal stimulations. The approximate solutions of the fractional-order multiple chaotic FitzHugh–Nagumo neurons model under external electrical stimulation have been submitted by the multistep generalized differential transform method [15].

The space-fractional FitzHugh–Nagumo model in two-dimensional space has investigated the effect of implementation performance and scalability under such factors in [16]. Armanyos et. al. have discussed different order of fractional Fitzhugh-Nagumo and Izhikevich models and concluded that fractional orders enable broader scope understanding of the neuron behaviors [17]. To receive further studies on the fractional-order Fitzhugh-Nagumo model, it can be seen in [18-22].

Many scientists, especially in medicine, biology and engineering fields, have studied on mathematical models of real-life phenomena to present numerical simulation [23- 33]. However, analytical solutions are crucial to test accuracy of approximate solutions. Thus, so many analytical methods have been improved such as sine-Gordon expansion method [34, 35], the modified simple equation method [36], the extended sinh-Gordon equation expansion method [37-39] in recent years.

In the last century, fractional-order derivatives have been approved because of their advantages both closer to real-life circumstance and have higher precision by numbers of researchers [40-46]. Many novels on definitions and theories of fractional calculus have been submitted to the literature. As known Riemann Liouville and Caputo fractional derivatives have singularity resulting from the power kernel functions cause some computational difficulties. Whereas, Caputo and Fabrizio have submitted a new fractional operator without singular kernel [47]. Another non-singular derivative operator with the Mittag-Leffler kernel function is defined by Atangana and Baleanu [48]. The conformable fractional derivative operator which is compatible to many real-world problems and provides some properties of classical calculus such as derivative of

the quotient of two functions, the chain rule, the product of two functions has been submitted to the literature by Khalila et.al [49]. In this study, the new travelling waves will be analysed of the time-fractional Fitzhugh–Nagumo equation in conformable sense by the improved Bernoulli sub-equation function method (IBSEFM).

The rest of the paper is organized as follows; in the second section, the definition of conformable fractional derivative and some theorems corresponding to the definition are submitted. In the third section, analysis of the mentioned method with four steps are given. The application of the method to the time-fractional Fitzhugh–Nagumo equation in conformable sense and the figures of the valid solutions under the suitable values are presented in section 4. Some conclusions are given in the last section 5.

## 2. The facts of conformable derivative

**Definition:** Let  $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  be a function, the  $\gamma$ -order conformable derivative of  $f$  is defined as,

$$T_\gamma(f)(t) = \lim_{\nu \rightarrow 0} \frac{f(t + \nu t^{1-\gamma}) - f(t)}{\nu}$$

for all  $t > 0$ ,  $0 < \gamma < 1$  [49].

**Theorem:** Suppose that  $T_\gamma$  is fractional derivative operator with order  $\gamma$  and  $\gamma \in (0, 1]$ ,  $f, g$  be  $\gamma$ -differentiable at point  $t > 0$ . Then [49,50],

- i.  $T_\gamma(af + bg) = aT_\gamma(f) + bT_\gamma(g), \forall a, b \in \mathbb{R}$ .
- ii.  $T_\gamma(t^p) = pt^{p-\gamma}, \forall p \in \mathbb{R}$ .
- iii.  $T_\gamma(fg) = fT_\gamma(g) + gT_\gamma(f)$ .
- iv.  $T_\gamma\left(\frac{f}{g}\right) = \frac{gT_\gamma(f) - fT_\gamma(g)}{g^2}$ .
- v.  $T_\gamma(\lambda) = 0$ , for all constant functions  $f(t) = \lambda$ .
- vi. If  $f$  is differentiable then  $T_\gamma(f)(t) = t^{1-\gamma} \frac{df}{dt}(t)$ .

**Theorem:** Let  $f, g : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$  be differentiable functions, the following rule holds;  
 $T_\gamma(f \circ g)(t) = t^{1-\gamma} g'(t) f'(g(t))$ .

## 3. Analysis of the method

The improved Bernoulli sub-equation function method has the following four steps.

**Step 1.** Suppose the following partial differential equation;

$$G(D_t^\gamma u, u_x, u_t, u_{xt}, \dots) = 0, \tag{1}$$

and take the wave transformation;

$$u(x, t) = U(\zeta), \quad \zeta = \sigma x - \frac{\mu t^\gamma}{\gamma}, \tag{2}$$

where  $\sigma, \mu$  are constants and can be determined later. Substituting partial derivatives of Eq.(2) with respect to  $x$  and  $t$  into Eq.(1), we obtain the following nonlinear ordinary differential equation;

$$N(U, U', U'', U''', L) = 0. \tag{3}$$

**Step 2.** Assume that the following trial equation is solution of Eq.(3),

$$U(\zeta) = \frac{\sum_{i=0}^n a_i B^i(\zeta)}{\sum_{j=0}^m b_j B^j(\zeta)} = \frac{a_0 + a_1 B(\zeta) + a_2 B^2(\zeta) + L + a_n B^n(\zeta)}{b_0 + b_1 B(\zeta) + b_2 B^2(\zeta) + L + b_m B^m(\zeta)}. \tag{4}$$

Using the Bernoulli theory, we can write the general form of Bernoulli differential equation for  $B'$  as follows;

$$B' = wB + dB^M, \quad w \neq 0, \quad d \neq 0, \quad M \in \mathbb{I} - \{0, 1, 2\}, \tag{5}$$

where  $B = B(\zeta)$  is Bernoulli differential polynomial. Substituting above relations in Eq.(3), it yields us an equation of polynomial  $\varpi(B)$  of  $B$  as follows;

$$\varpi(B) = \rho_s B^s + L + \rho_1 B + \rho_0. \tag{6}$$

According to the homogenous balance principle, we can determine the relationship between  $n, m$  and  $M$ .

**Step 3.** The coefficients of  $\varpi(B)$  all be zero will yield us an algebraic system of equations;

$$\rho_i = 0, \quad i = 0, K, s. \tag{7}$$

The solution of this system will give the values of  $a_0, K, a_n$  and  $b_0, K, b_m$ .

**Step 4.** When we solve nonlinear Bernoulli differential equation Eq.(5), we obtain the following two situations according to  $w$  and  $d$ ;

$$B(\zeta) = \left[ \frac{-d}{w} + \frac{E}{e^{w(M-1)\zeta}} \right]^{\frac{1}{1-M}}, \quad w \neq d, \tag{8}$$

$$B(\zeta) = \left[ \frac{(E-1) + (E+1) \tanh(w(1-M)\zeta/2)}{1 - \tanh(w(1-M)\zeta/2)} \right]^{\frac{1}{1-M}}, \quad w = d, \quad E \in \mathbb{R}. \tag{9}$$

Using a complete discrimination system for polynomial of  $B(\zeta)$ , we obtain the analytical solutions to the Eq.(3) with the help of computational program. For a better explanation of the valid solutions in this way, the 2D-3D figures and contour surfaces can be plotted.

#### 4. Application

This section presents the application of mention method to the time-fractional Fitzhugh–Nagumo equation with conformable sense.

The nonlinear time-fractional partial differential equation is expressed as [51-53]

$$u_t^\gamma - u_{xx} - u(1-u)(u-\theta) = 0, \quad 0 < \gamma \leq 1, \quad 0 < \theta < 1, \tag{10}$$

where  $\gamma$  is order of conformable time-fractional derivative and  $\theta$  represents an arbitrary constant.

When  $\theta = -1$ , the Eq.(10) converts to the Newell–Whitehead equation.

Consider the fractional travelling wave transformation as

$$u(x,t) = U(\zeta), \quad \zeta = kx - \frac{ct^\gamma}{\gamma}, \tag{11}$$

where  $k, c$  are nonzero arbitrary constants. Putting Eq.(11) into Eq.(10), we obtain the following nonlinear ordinary differential equation,

$$-cU' - k^2U'' + \theta U - (1+\theta)U^2 + U^3 = 0. \tag{12}$$

According to homogeneous balance principle between  $U''$  and  $U^3$ , we get a relationship as

$$M + m = n + 1.$$

For the values  $M = 3, n = 3$  and  $m = 1$ , we obtain the following travelling wave solutions.

**Set 1:** For  $w \neq d$

$$a_0 = \theta b_0, a_1 = \frac{wa_3}{d}, a_2 = \frac{d\theta b_0}{w}, b_1 = \frac{wa_3}{d\theta}, k = \frac{\theta}{2\sqrt{2w}}, c = \frac{(-2+\theta)\theta}{4w}, \tag{13}$$

When the Eq.(8) and Eq.(4) are used for Eq.(13), we have

$$u_1(x,t) = \frac{Ew\theta}{-de^{\sqrt{2} \frac{x\theta}{t^\alpha(-2+\theta)\theta}} + Ew} \tag{14}$$

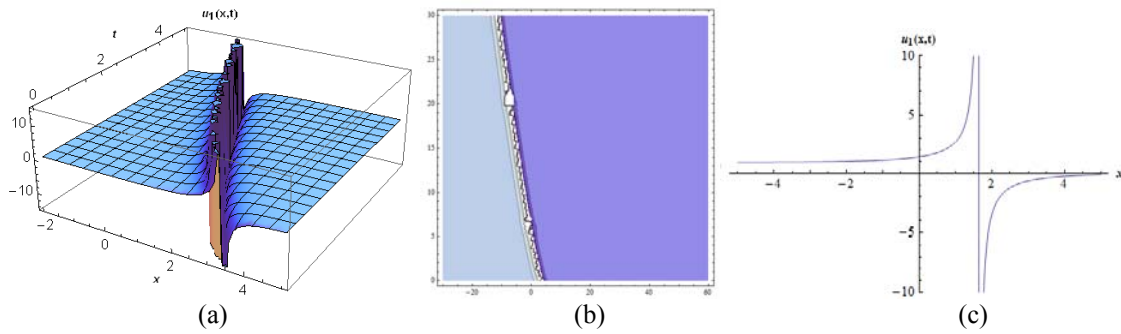


Figure 1. (a) and (b) are the 3D and contour surfaces of Eq.(14) with  $\gamma = 0.8$  respectively, and  $t = 2$  for the 2D graph (c).

**Set 2:** For  $w \neq d$

$$a_0 = \theta b_0, a_1 = \frac{w\theta a_3}{d(-1+\theta)}, a_2 = \frac{d(-1+\theta)b_0}{w}, b_1 = \frac{wa_3}{d(-1+\theta)}, k = \frac{-1+\theta}{2\sqrt{2}w}, c = \frac{-1+\theta^2}{4w}, \tag{15}$$

When the Eq.(8) and Eq.(4) are used for Eq.(15), we have

$$u_2(x,t) = \frac{d(-1+\theta)}{-d + e^{\frac{(-1+\theta)(-\sqrt{2}x\alpha + t^\alpha(1+\theta))}{2\alpha}} Ew} + \theta. \tag{16}$$

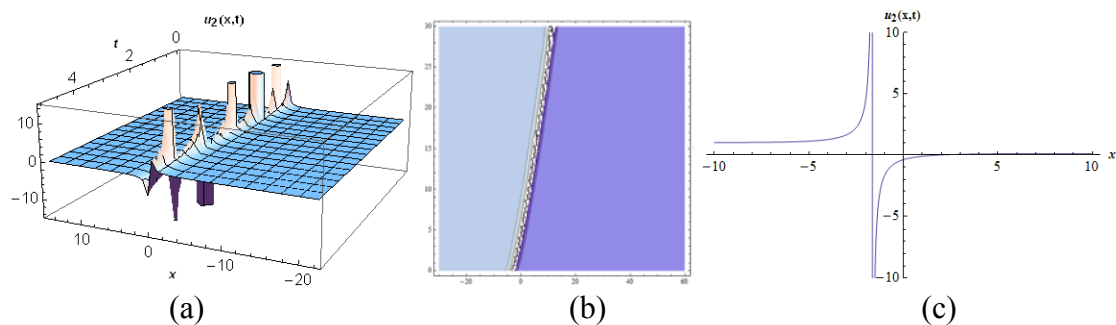


Figure 2. (a) and (b) are the 3D and contour surfaces of Eq.(16) with  $\gamma = 0.8$  respectively, and  $t = 2$  for the 2D graph (c).

**Set 3:** For  $w \neq d$

$$a_0 = \left(2 - \frac{\sqrt{2}c}{k}\right)b_0, a_1 = \left(2 - \frac{\sqrt{2}c}{k}\right)b_1, a_2 = -2\sqrt{2}dkb_0, a_3 = -2\sqrt{2}dkb_1, \theta = 2 - \frac{\sqrt{2}c}{k}, w = \frac{c - \sqrt{2}k}{2k^2}, \quad (17)$$

When the Eq.(8) and Eq.(4) are used for Eq.(17), we have

$$u_3(x, t) = \frac{E(\sqrt{2}c^2 - 4ck + 2\sqrt{2}k^2)}{\left(-ckE + k^2 \left(\sqrt{2}E + 2de \frac{(c - \sqrt{2}k)(kx - \frac{ct^\alpha}{\alpha})}{k^2}\right)\right)}. \quad (18)$$

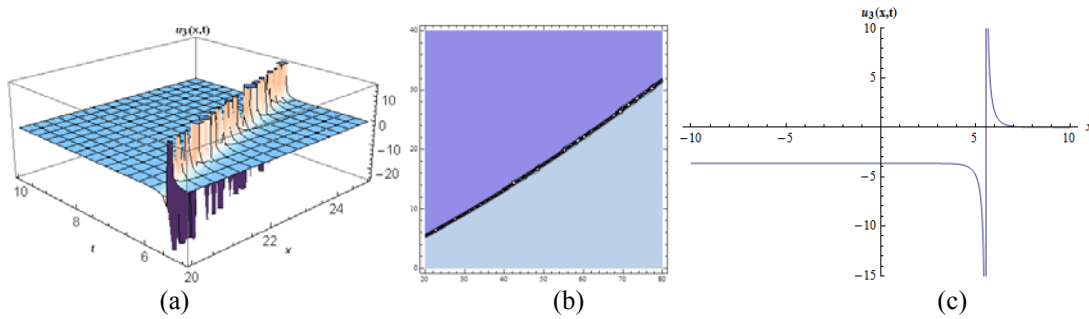


Figure 3. (a) and (b) are the 3D and contour surfaces of Eq.(18) with  $\gamma = 0.8$  respectively, and  $t = 1$  for the 2D graph (c).

**Set 4:** For  $w \neq d$

$$a_0 = 0, a_2 = 2\sqrt{2}dkb_0, a_1 = 0, a_3 = 2\sqrt{2}dkb_1, w = -\frac{1}{2\sqrt{2}k}, c = \frac{k(1 - 2\theta)}{\sqrt{2}}, \quad (19)$$

When the Eq.(8) and Eq.(4) are used for Eq.(19), we have

$$u_4(x, t) = \frac{2\sqrt{2}dk}{e^{\frac{x}{\sqrt{2}} + \frac{t^\alpha(-1+2\theta)}{2\alpha}} E + 2\sqrt{2}dk}. \quad (20)$$

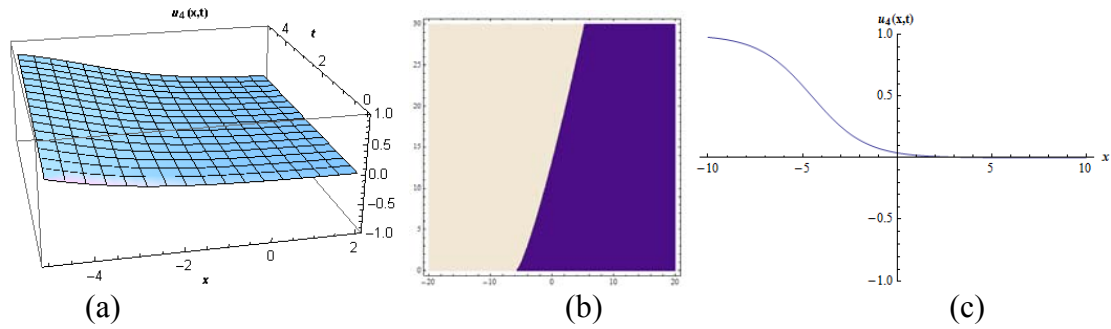


Figure 4. (a) and (b) are the 3D and contour surfaces of Eq.(20) with  $\gamma = 0.8$  respectively, and  $t = 2$  for the 2D graph (c).

**Set 5:** For  $w \neq d$

$$a_0 = 0, a_1 = 0, a_2 = -\frac{db_0}{w}, a_3 = -\frac{db_1}{w}, c = \frac{-1+2\theta}{4w}, k = \frac{1}{2\sqrt{2w}}, \quad (21)$$

When the Eq.(8) and Eq.(4) are used for Eq.(21), we have

$$u_5(x,t) = \frac{d}{d - e^{\frac{t^\alpha + \sqrt{2}x\alpha - 2t^\alpha\theta}{2\alpha}} Ew}. \quad (22)$$

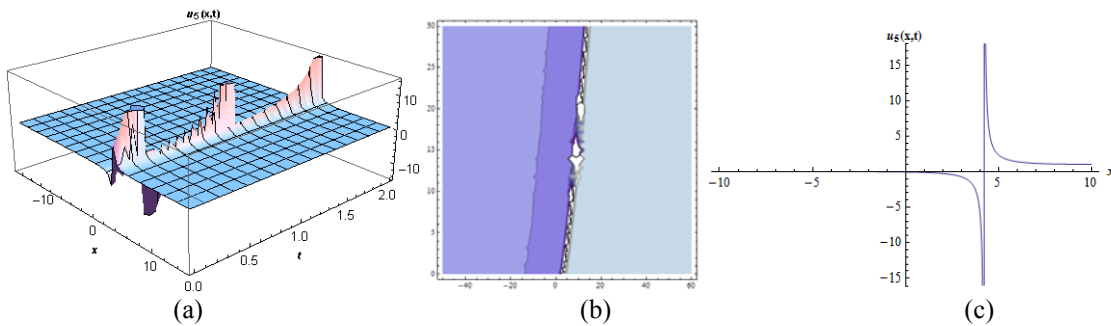


Figure 5. (a) and (b) are the 3D and contour surfaces of Eq.(22) with  $\gamma = 0.8$  respectively, and  $t = 2$  for the 2D graph (c).

**Set 6:** For  $w \neq d$

$$a_0 = \frac{4wcd b_0 + \sqrt{2}(1+8cw - \sqrt{1+4cw})db_0\sqrt{1+2cw + \sqrt{1+4cw}}}{8cdw}, \quad (23)$$

$$a_2 = \frac{\sqrt{2(1+2cw + \sqrt{1+4cw})}db_0}{w}, k = \frac{\sqrt{1+2cw + \sqrt{1+4cw}}}{2w}, \theta = \frac{a_0}{b_0}, a_3 = a_2 b_1, a_1 = \frac{a_0 b_1}{b_0},$$

When the Eq.(8) and Eq.(4) are used for Eq.(23), we have

$$u_6(x,t) = \frac{4cdwb_0h(x,t) - \sqrt{2} \left( e^{\frac{2ct^\alpha w}{\alpha}} Ew^2(1+8cw - \sqrt{1+4cw}) + d^2b_0e^{\Phi x}(-1 + \sqrt{1+4cw}) \right)}{8cdwb_0h(x,t)} \quad (24)$$

$$\frac{\sqrt{1+2cw + \sqrt{1+4cw}}}{8cdwb_0h(x,t)}$$

where  $\Phi = w\sqrt{\frac{1+2cw + \sqrt{1+4cw}}{w^2}}$ ,  $h(x,t) = de^{\Phi x} - e^{\frac{2ct^\alpha w}{\alpha}} Ew$ .

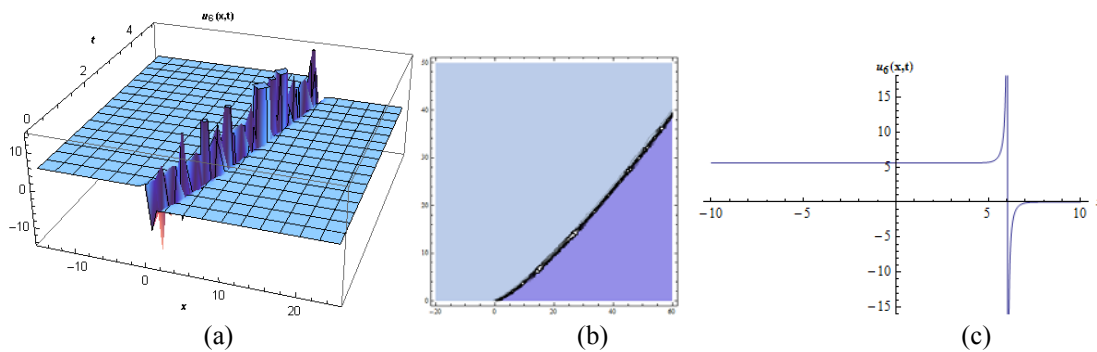


Figure 6. (a) and (b) are the 3D and contour surfaces of Eq.(24) with  $\gamma = 0.8$  respectively, and  $t = 2$  for the 2D graph (c).

### 5. Conclusions

In this study, we have presented some new travelling wave solutions of the conformable time-fractional Fitzhugh–Nagumo model via IBSEFM. Figure 1-6 shows surfaces of the exponential function solutions of fractional-order with  $\gamma = 0.8$ . The Fitzhugh Nagumo model describes travel waves that can be used for electrical signaling through the lengths of the nerve axons. The fractional cases are more useful than integer order in the diagnosis of psychological and physiological diseases that can be caused by instant electrical conduction between nerve cells. The fractional-order derivative may be using in brain wave oscillations to control their dynamics has been shown in many numerical simulations. Moreover, the conformable fractional derivative definition overcome the mentioned causes therefore the obtained exponential function solutions are more appropriate to test accuracy of numerical simulations. Assuming these facts, it is hoped that the above analytical wave solutions presented for the first time in the literature may be useful in areas such mathematical models such as clinical neurology, neuropsychology and so on.



## References

- [1] Keener, J. P. and Sneyd, J., **Mathematical Physiology**, Springer, New York, (1998).
- [2] Murray, J. D., **Mathematical Biology I and II**, Springer, New York, (2002).
- [3] Fisher, R. A., The wave of advantageous genes, **Annals of Eugenics**. 7, 355-369, (1937).
- [4] Zeldovich, Y. B. and Frank-Kamenetskii, D. A. Zhurnal Fis. Khimii, 12, 1938, 100; **Acts Physico-them. URSS**, 9, 341, (1938).
- [5] Wilhelmsson, H. and Lazzaro, E., Reaction–diffusion problems in the physics of hot plasmas, Bristol and Philadelphia, **Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing**, (2001).
- [6] Hundsdorfer, W. and Verwer, J. G., **Numerical solution of time dependent advection-diffusion-reaction equations**, Berlin: Springer, (2003).
- [7] Hodgkin, A. L. and Huxley, A. F., A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, **The Journal of Physiology**, 117, 500–544, (1952).
- [8] Fitzhugh, R., Impulse and physiological states in models of nerve membrane, **Biophysical Journal**, 1, 445–466, (1961).
- [9] Nagumo, J. S., Arimoto, S. and Yoshizawa, S., An active pulse transmission line simulating nerve axon, **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, 50, 2061–2070, (1962).
- [10] Jost, J., **Mathematical Methods in Biology and Neurobiology**, Springer, (2014).
- [11] Wang, J., Zhang, T. and Deng, B., Synchronization of FitzHugh Nagumo neurons in external electrical stimulation via nonlinear control, **Chaos, Solitons and Fractals**, 31, 30–38, (2007).
- [12] Murray, J. D., **Mathematical Biology: I. An Introduction, Interdisciplinary Applied Mathematics**, Springer, (2003).
- [13] Quininao, C. and Touboul, J. D., Clamping and Synchronization in the Strongly Coupled FitzHugh–Nagumo Model, submitted, (2018).
- [14] Tabi, C. B., Dynamical analysis of the FitzHugh–Nagumo oscillations through a modified Van der Pol equation with fractional-order derivative term, **International Journal of Non-Linear Mechanics** 105,173–178, (2018).
- [15] Momani, S., Freihat, A., and AL-Smadi, M., Analytical Study of Fractional-Order Multiple Chaotic FitzHugh-Nagumo Neurons Model Using Multistep Generalized Differential Transform Method, **Abstract and Applied Analysis**, Article ID 276279, 10p, (2014).
- [16] Markov, N., Ushenin, K., and Hendy A., Performance Evaluation of Space Fractional FitzHugh-Nagumo Model: an Implementation with PETSc Library, **CEUR Workshop Proceedings**, 1729, 12, (2016).
- [17] Armanyos, M. and Radwan, A. G., Fractional-Order Fitzhugh-Nagumo and Izhikevich Neuron Models, 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), (**IEEE 2016**), 1-5, Thailand, (2016) .
- [18] Sungu, I. C. and Demir, H., A new approach and solution technique to solve time fractional nonlinear reaction-diffusion equations, **Mathematical Problems in Engineering**, 2015, Article ID 457013, p.13, (2015).

- [19] Brandibur, O. and Kaslik, E., Stability of two-component incommensurate fractional-order systems and applications to the investigation of a FitzHugh-Nagumo neuronal model, **Mathematical Methods in the Applied Sciences**, 41(17), 7182-7194, (2018).
- [20] Ascione, G., and Pirozzi, E., On Fractional Stochastic Modeling of Neuronal Activity Including Memory Effects, **Computer Aided Systems Theory – EUROCAST 2017**, 3-11, Spain, (2018).
- [21] Khanday, F. A., Kant, N. A., Dar, R. M. and Zulkifli, T. Z. A., Low-Voltage Low-Power Integrable CMOS Circuit Implementation of Integer- and Fractional-Order FitzHugh-Nagumo Neuron Model, **IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems**, 99, 1-15, (2018).
- [22] Kumar, D., Singh, J. and Baleanu, D., A new numerical algorithm for fractional Fitzhugh–Nagumo equation arising in transmission of nerve impulses, **Nonlinear Dynamics**, 91, 307–317, (2018).
- [23] 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).
- [24] Gencoglu, M. T., Baskonus, H. M. and Bulut, H., Numerical simulations to the nonlinear model of interpersonal relationships with time fractional derivative, **AIP Conference Proceedings**, 020103 (1798), 1-9, (2017).
- [25] De Pillis, L. G., Gua, W. and Radunskaya, A. E., Mixed immunotherapy and chemotherapy of tumors: Modeling, applications and biological interpretations, **Journal of Theoretical Biology**, 238, 841–862, (2006).
- [26] Buzsaki, G. and Draguhn, A., Neuronal oscillations in cortical networks, **Science**, 304, 1926-1929, (2004).
- [27] Wang, X. J., Neurophysiological and computational principles of cortical rhythms in cognition, **Physiological reviews**, 90, 1195-1268, (2010).
- [28] Yokus, A., Comparison of Caputo and conformable derivatives for time-fractional Korteweg–de Vries equation via the finite difference method, **International Journal of Modern Physics B**, 32(29), 1850365, (2018).
- [29] Yokus, A., Numerical solution for space and time fractional order Burger type equation, **Alexandria Engineering Journal**, 57(3), 2085-2091, (2018).
- [30] Yokus, A. and Bulut, H., On the numerical investigations to the Cahn-Allen equation by using finite difference method, **An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications**, 9(1), 18, (2018).
- [31] Yokus, A., Baskonus, H. M., Sulaiman, T. A. and Bulut, H., Numerical simulation and solutions of the two-component second order KdV evolutionary system, **Numerical Methods for Partial Differential Equations**, 34(1), 211-227, (2018).
- [32] Yavuz, M. and Ozdemir, N., On the Solutions of Fractional Cauchy Problem Featuring Conformable Derivative, **ITM Web of Conferences**, 22, 01045, (2018).
- [33] Yokus, A. and Tuz, M., An application of a new version of (G'/G)-expansion method, **AIP Conference Proceedings**, 1798(1), 020165, (2017).
- [34] Yel, G., Baskonus, H. M. and Bulut, H., Novel Archetypes of New Coupled Konno-Oono Equation by Using sine-Gordon Expansion Method, **Optical and Quantum Electronics**, 49, 285, (2017).
- [35] Kumar, D., Hosseini, K. and Samadani, F., The sine-Gordon expansion method to look for the traveling wave solutions of the Tzitzéica type

- equations in nonlinear optics, **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, 149, 439-446, (2017).
- [36] Khan, K., Akbar, M. A., Exact solutions of the (2+1)-dimensional cubic Klein–Gordon equation and the (3+1)-dimensional Zakharov–Kuznetsov equation using the modified simple equation method, **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences**, 15(1), (2013).
- [37] Baskonus, H. M., Sulaiman, T. A. and Bulut, H., On the new wave behavior to the Klein–Gordon–Zakharov equations in plasma physics, **Indian Journal of Physics**, 1-7, (2018).
- [38] Sulaiman, T. A., Bulut, H., Yel, G. and Atas, S. S., Optical solitons to the fractional perturbed Radhakrishnan–Kundu–Lakshmanan model, **Optical and Quantum Electronics**, 50, 372, (2018).
- [39] Sulaiman, T. A., Yel, G. and Bulut, H., M-fractional solitons and periodic wave solutions to the Hirota Maccari system, **Modern Physics Letters B**, 33, No. 0, 1950052, (2019).
- [40] Baskonus, H. M., Yel, G. and Bulut, H., Novel wave surfaces to the fractional Zakharov-Kuznetsov-Benjamin-Bona-Mahony equation, **American Institute of Physics**, 1863(560084) (2017).
- [41] Kocak, Z. F. and Yel, G., Trigonometric Function Solutions of Fractional Drinfeld's Sokolov -Wilson System, **ITM Web of Conferences** 13, 01006, (2017).
- [42] Veerasha, P., Prakasha D. G. and Baskonus H. M., Novel simulations to the time-fractional Fisher's equation, **Mathematical Science**, 13, (2019).
- [43] Merdan, M., Solutions of time-fractional reaction–diffusion equation with modified Riemann–Liouville derivative, **International. Journal of. Physical. Sciences**. 7(15), 2317–2326 (2012).
- [44] Uçar, S., Uçar, E., Özdemir, N. and Hammouch, Z., Mathematical analysis and numerical simulation for a smoking model with Atangana–Baleanu derivative, **Chaos, Solitons& Fractals**, 118, 300-306, (2019).
- [45] Atangana, A. and Alkahtani, B., Analysis of the Keller–Segel model with a fractional derivative without singular kernel, **Entropy**, 17, 4439-4453, (2015).
- [46] 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**, 6, 75-83, (2016).
- [47] Caputo, M. and Fabrizio, M., A new definition of fractional derivative without singular kernel, **Progress in. Fractional Differentiation and Applications**, 1, 73-85, (2015).
- [48] Atangana, A. and Baleanu, D., New fractional derivatives with non-local and non-singular kernel theory and applications to heat transfer model, **Thermal Science**, 20, 763-769, (2016).
- [49] Khalila, R., Al Horania, M., Yousefa, A. and Sababheh, M., A new definition of fractional derivative, **Journal of Computational and Applied Mathematics**, 264, 65-70, (2014).
- [50] Atangana, A., Baleanu, D. and Alsaedi, A., New properties of conformable derivative, **Open Mathematics**, 13, 889–898, (2015).
- [51] Khan, N. A., Khan, N. U., Ara, A. and Jamil, M., Approximate analytical solutions of fractional reaction-diffusion equations, **Journal of King Saud University - Science**, 24, 111-118,(2012).

- [52] Rida, S. Z., El-Sayed, A. M. A. and Arafa, A. A. M., On the Solutions of Time-Fractional Reaction-Diffusion Equations, **Communication in Nonlinear Science & Numerical Simulation**, 15, 3847-3854, (2010) .
- [53] Pandir, Y. and Tandogan, Y. A., Exact solutions of the time-fractional Fitzhugh-Nagumo equation, **AIP Conference Proceedings** 1558, 1919, (2013).

# Balıkesir ilinde farklı iki GES tesisinin panel yerleşimi açısından verimliliklerinin karşılaştırılması

Fatih ATLİM<sup>1,\*</sup>, Bayram ESEN<sup>2</sup>, Metin DEMİRTAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TEDAŞ Uludağ Bölge Müdürlüğü, Bursa

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. Elektrik-Elektronik Müh. Böl., Çağış Kampüsü, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 05.12.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 25.04.2019

## Özet

Dünya genelinde nüfusa, teknolojiye ve tüketime bağlı olarak enerji talebi de her geçen gün artmaktadır. Artan bu enerji ihtiyacını karşılamak için mevcut kaynakların faydalı ve etkin bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Fosil kaynaklar sınırlı olduğu ve hızla tükendiği için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması da büyük önem kazanmaktadır. Bu yüzden ülkemizde de son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin geçmiş yıllara oranla arttığı görülmektedir. Bu çalışmada, Balıkesir İli Bandırma ilçesinde güneş panelleri farklı açılarla yerleştirilmiş olan iki adet GES (Albatur Enerji GES-Aydın Dülger GES) tesisine ait birer adet 40 kW'lık eviricinin günlük ve aylık olarak performansları karşılaştırılmıştır. Eğim açısından karşılaştırmanın doğru olması için İki GES tesisi birbirine çok yakın konumda seçilmiş olup hava şartlarının, sıcaklığın, güneş ışınımının, yükselti vb. gibi etmenlerden kaynaklanan farklılıkların olmamasına dikkat edilmiştir. Tesislerde kullanılan panel tipleri monokristal ve polikristal yapıdadır. Deneysel ve simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen bulgulara göre, panel eğim açılarının doğru seçilmesi durumunda yıllık enerji üretiminde büyük bir kazanç elde edilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Verimlilik, PV panel, güneş enerji sistemleri, monokristal, polikristal.

\*Fatih ATLİM, fatihatlim@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7680-2494>

Bayram ESEN, bayesen@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-6732-2619>

Metin DEMİRTAŞ, mdtas@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-2622-5286>

## Comparison of efficiency of different two solar energy systems in terms of panel settlement in Balıkesir

### Abstract

*Energy demand is increasing day by day due to population and consumption in the world. In order to meet this increasing energy need, the resources should be used useful and effectively. Since fossil sources are limited and rapidly exhausted, renewable energy is gaining importance. Therefore, in recent years, we see that electricity generation from renewable energy sources has increased compared to previous years. In this study, daily and monthly performances of one 40 kW inverters of two Photovoltaic (Albatur Energy-Aydın Dülger Energy) systems, which are located at different angles of solar panels in Bandırma District of Balıkesir province, are compared. The two Photovoltaic systems chosen for the comparison in terms of slope were chosen very close to each other lest not effecting the differences between two different solar panels due to factors such as weather conditions, temperature, solar radiation, elevation etc.. The panel types used in the systems is monocrystalline and polycrystalline. According to the results obtained from experimental and simulation studies, if the angles of the panel are selected correctly, a great gain is obtained in the annual energy production.*

**Keywords:** *Efficiency, PV Panel, solar energy system, monocrystalline, polycrystalline.*

### 1. Giriş

Güneş, Dünya gezegeni için tükenmez serbest enerjinin ana kaynağıdır. Hâlihazırda, ortaya çıkan güneş enerjisinden elektrik üretmek için yeni teknolojiler kullanılmaktadır. Güneş enerjisi ile ilgili yeni teknolojilerin gelişmesi, dünya çapında artan enerji talebini karşılamak için çevreye duyarlı olarak görülen çözüm önerilerinden biri olarak kabul edilmektedir. Güneş teknolojileri alanındaki hızlı büyümeler, düşük güneş pili verimliliği, düşük performans dengesi, ekonomik engeller (yatırım maliyeti ve finansman mekanizmalarının eksikliği) gibi çeşitli engellerle karşı karşıya kalmaktadır [1]. Son yıllarda güneş enerjisi, giderek yenilenebilir bir enerji kaynağı haline geldi ve yakın gelecekte yaygınlaşarak daha fazla kullanılması beklenilmektedir [2]. Türkiye’de güneşten elektrik üretim potansiyelinin yaklaşık olarak 500 bin MW olduğu tahmin edilmektedir. Güneş enerjisi mevcut diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında, ülkemizdeki en yüksek potansiyele sahip bir enerji kaynağı olduğu görülmektedir. Türkiye güneşten elektrik üretimi konusunda, kendine en yakın olan İspanya ve Fransa’dan daha fazla bir potansiyele sahiptir [3]. Fotovoltaik (PV) paneller, güneş ışığı şeklinde direkt ya da yaygın olarak gelen radyoaktif dalgaları elektriğe çeviren aygıtlardır. PV modülleri ile ilgili literatür taramasında, farklı ülke ve üniversitelerde birçok araştırmacının farklı yapıdaki PV modüllerin verimlilikleri ve maliyetleri konusunda ulusal ve uluslararası bazda çalışmalar yaptığı görülmektedir. Gün geçtikçe de yeni teknolojilere bağlı olarak farklı yapıda ve yüksek verimlilikte çalışan yeni modüller geliştirilmektedir.

Literatür taramasında öne çıkan çalışmalarda, Mirzaei ve Mohiabadi iki farklı ticari fotovoltaik modül olan monokristal ve polikristal panelleri üzerine, İran’ın yarı kurak bir

bölgesinde ve açık bir arazide yıl boyunca deneysel çalışmalar yapmıştır. Test edilen iki panel benzer eğim açısında ve aynı bağımsız çerçevelere yerleştirilmiştir. Her bir modülün güç çıkışı, enerji verimi, normalleştirilmiş güç çıkışı, verim ve performans oranı değerleri analiz edilmiş ve bölgenin iklim özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. Güneş radyasyonu seviyesinin oldukça yüksek olduğu orta doğu ülkelerinde daha önemli, düşük maliyetli ve çevre dostu teknolojilerin kullanıldığı koşullarda alternatif bir enerji kaynağı olduğunu göstermişlerdir [2]. Edalati ve arkadaşları, 11.04 kWp kapasitesine sahip şebekeye bağlı bir PV sisteminin tasarımı ve performansını araştırmıştır. Bu sistem, benzer karakteristik özelliklere sahip iki tip 5.52 kWp kapasiteli kristal PV teknolojilerinden oluşmaktadır. PV enerji santrali, her iki tip monokristal silikon ve polikristal PV modülleri için güneş ışınları ve ortam sıcaklıklarının aynı olduğu bir sanayi bölgesinde kurulmuştur. Elde edilen sonuçlarda, polikristal modüllerinin özellikle yüksek ortam ve modül sıcaklıklarında daha fazla elektrik ürettiğini tespit etmişlerdir. Yazarlar, Polikristal PV modüllerin normal olarak monokristal modüllerden daha ucuz olduğu için polikristal PV'yi kullanmayı tavsiye etmektedirler [4]. Bashir ve arkadaşları, Pakistan'ın Textila bölgesinde üç fotovoltaik modülün (monokristal, polikristal ve tek eklemlili amorf silikon) performans karşılaştırmasını ve değerlendirmesini yapmışlardır. Deneysel çalışmalar kış aylarında ve açık hava koşullarında gerçekleştirilmiş olup her modül için modül sıcaklık ve güneş ışınımının bu parametreler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yazarlar, monokristal ve polikristal modüller yüksek ışınım koşullarında daha iyi performans gösterirken, ışınımın azalması ile performanslarının ani olarak azaldığını gözlemlemişlerdir. Amorf PV modülünün daha iyi ışık emici özellikleri nedeniyle düşük ışınımda iyi performans gösterdiği ve böylece düşük ışınımda daha yüksek ortalama performansla sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada, modül verimliliği ve performans oranının, ışınım ve fotovoltaik modül arka yüzey sıcaklığının artmasıyla azalan bir eğilim gösterdiği tespit edilmiştir [5]. Taşçıoğlu ve arkadaşları, Bursa ilinde monokristal ve polikristal PV panellerinin farklı yükler altında iklimsel verilere dayalı düşük güçlerde elektrik üretimini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, monokristal güneş panelinin Bursa şartlarında polikristal panele göre daha verimli çalışabileceği belirlenmiştir [6]. Heba A. Mosalam bir araştırmasında, Ağustos ve Aralık aylarında iki ay boyunca, monokristal modül sıcaklığı ve ışın ışınlanması parametrelerinin modülün maksimum çıkış voltajı ve gücü üzerine olan etkilerini incelemiştir. Sistemin yapısı ve modül özellikleri kullanılarak benzetim(simülasyon) çalışmaları yapılmış, sonuçlar 4.5 kW kapasitesindeki gerçek sistem verileriyle karşılaştırılmıştır [7]. Afyon Kocatepe Üniversitesi Dazkırı Meslek Yüksekokulu öğrencilerine güneş panelleri hakkında pratik bilgi sağlamayı amaçlayan bir çalışmada, 20 Watt gücünde monokristal ve polikristal güneş panelleri kullanılmıştır. Çalışmanın amacı iki tip güneş panelinin aynı ortamda ürettiği enerji miktarlarını karşılaştırmak için gerilim ve akım sensörlerinin kullanılmasını ve üretilen enerji farklılıklarını göstermektir [8]. Yapılan bir tez çalışmasında, Tekirdağ ve Batı Marmara bölgesi için en verimli panel tipi belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar ve ölçümler sonucunda, Monokristal panelin Tekirdağ iklimi şartlarında ortalama verimi %15 olarak, Polikristal panelin verimi ise %14,9 olarak ölçülmüştür [9]. Mustafa Engin ve arkadaşları üç farklı fotovoltaik (monokristal, polikristal ve kadmiyum tellür) PV sisteminin performansını karşılaştırmış, ince film güneş panellerinin diğer panellere göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [10]. İbrahim Sefa ve arkadaşları mikro denetleyici tabanlı eğitim amaçlı güneş enerjisi kaynaklı yenilenebilir enerji eğitim seti tasarlamışlardır [11].

Literatürde güneş radyasyonunu modelleyen farklı yöntemler vardır. Zenit ( $\theta_z$ ), deklinasyon ( $\delta$ ), güneş azimut açısı ( $\theta_a$ ) ve Güneş doğuş ve batış saat açıları ( $\omega$ ) arasındaki ilişki denklem olarak aşağıda verilmiştir [12,13,14]. Deklinasyon açısının yaklaşık değeri Cooper denkleminde

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(360 \frac{(28+n)}{365}\right) \quad (1)$$

şeklinde yazılır. Zenit açısı ise

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Yükseklik açısı ise

$$h = 90 - \theta_z \quad (3)$$

eşitliğinden hesaplanır. Güneş azimut açısı ise

$$\cos\theta_a = \left( \frac{\cos\varphi \sin\delta - \sin\varphi \cos\delta \cos\omega}{\sin\theta_z} \right) \quad (4)$$

olarak yazılır. Güneş doğuş ve batış saat açıları birbiriyle zıttır ve

$$\omega = -\cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\varphi$  enlem açısını göstermektedir.

Eğik bir düzleme gelen güneş ışınlarının hesaplanmasında güneş ışınlarının geliş açısı ve eğik düzlem açılarından faydalanılır. Eğik düzlemin yatay düzlemle yaptığı açı eğim açısı olarak tanımlanırsa, geliş açısı ( $\cos\theta_g$ )

$$\cos\theta_g = \cos(\varphi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\varphi - \beta) \sin\delta \quad (6)$$

olarak yazılır. Burada  $\beta$  eğik düzlemin yatay düzlemle yapmış olduğu açıdır.

Yeryüzünde güneş paneline gelen güneş ışınımı direk, yayılı ve yansıyan ışınların toplamına eşittir. Toplam güneş ışınımı günlük olarak

$$Q_t = Q_d + Q_y + Q_{yan} \quad (7)$$

ifade edilebilir. Birgün boyunca eğik düzleme gelen toplam ışınımın ve yatay düzleme gelen ışınımın oranı  $R_d$  olarak tanımlanırsa,  $R_d$  ifadesi

$$R_d = \frac{Q_t}{Q_d} = \frac{\int_{H_1}^{H_2} \cos\theta_g dh}{\int_{-H}^H \cos\theta_z dh} \quad (8)$$



şeklinde yazılabilir. Bir gün boyunca eğik düzleme gelen toplam ışınlama ile yatay düzleme gelen ışınlama arasındaki oransal ilişki

$$R = R_d \frac{Q_d}{Q} + \frac{Q_y}{Q} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada  $\rho$  çevrenin yansımaya oranı,  $Q$  ise yatay düzleme gelen tüm güneş ışınlama miktarıdır. Bu denkleme göre ışınlama açıları 90 dereceye yaklaşması durumunda panel yüzeyindeki radyasyon oranının arttığı görülmektedir. Güneş panelindeki radyasyon ve güç üretimi arasındaki ilişki

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot T_c - T_r] \frac{G}{G_r} \quad (10)$$

olarak yazılabilir. Burada  $I_{ph}$  PV'nin ürettiği akımı (A),  $I_{sc}$  panelin kısa devre akımını (A),  $K_i$  kısa devre akımının sıcaklık katsayısını (A/C<sup>0</sup>),  $T_c$  PV'nin hücre sıcaklığını (C<sup>0</sup>),  $T_r$  referans sıcaklığını (C<sup>0</sup>),  $G$  güneş ışınlama miktarını (W/m<sup>2</sup>),  $G_r$  referans güneş ışınlama miktarını (1000 W/m<sup>2</sup>) göstermektedir. Bu denklemden panel üzerine gelen radyasyon miktarının eğim açısıyla değiştiği, bunun sonucu olarak da panelin güç üretiminin değiştiği görülmektedir.

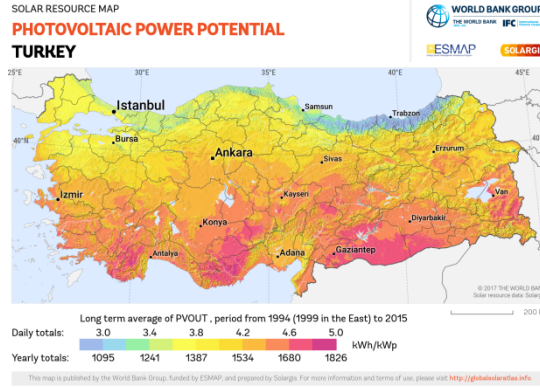
Literatür taramasına göre farklı ülke ve bölgelerde, farklı tip ve güçteki PV panellerin verimlilikleri üzerine ışınlama, gölgelenme, eğim, sabit, tek eksenli, çift eksenli vb. gibi farklı açılardan değerlendirmelerin yapıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Artan enerji ihtiyacı, fosil yakıtlarının çevreye verdiği zarar ve yakın gelecekte tükenecek olması güneş enerjisine olan ihtiyacı her geçen gün daha önemli bir hale getirmektedir. Deneysel çalışmaların fiziki ve maddi imkansızlıklardan dolayı genellikle küçük ölçeklerde yapıldığı görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada büyük ölçekli ve açıları farklı şekilde yerleştirilmiş ve aynı lokasyonda olan iki farklı GES tesisinin güç üretiminin gerçek ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Bundan sonraki bölümlerde, Balıkesir iline ait güneş enerji potansiyeli, panel eğim açıları'nın önemi, tesislerden alınan gerçek ve benzetim sonuçlarında elde edilen verilerin tablo ve grafik olarak sunumları, karşılaştırma ve sonuçları verilmiştir.

## 2. Güneş enerji potansiyeli bakımından Balıkesir ilinin ülkemizdeki yeri

Ülkemiz bilindiği üzere kuzey yarım kürede 36-42 enlemleri ve 26-45 doğu meridyenleri arasında bulunmaktadır. WEB sitesinden (<http://globalsolaratlas.info>) elde edilen bilgilere göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve ışınlama bakımından dünya geneline göre orta seviyede bir durumdadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere dünya geneli yıllık güneş enerji potansiyeli 730-2337 kWh/kWp bandı arasında değişirken, Türkiye ortalama olarak 1461-1753 kWh/kWp arasında kendine yer bulmaktadır.

Türkiye güneş haritasındaki ışınlama dağılımı Güney'den Kuzey'e doğru doğal olarak (enlem derecesine kıyasla) azalmakta, ışınlama şiddeti ise iklim ve yeryüzü şekline göre değişim göstermektedir. Güney Doğu Anadolu ülkemizin en çok güneş enerjisi alan

bölgesidir. Akdeniz Bölgesi bunu takip etmektedir. Karadeniz bölgesi ise hem rutubetli, hem de enlem değeri büyük olmasından dolayı en az ışınlam alan bölgedir. Atmosferdeki sis olayları ve su buharları ışınlamın azalmasına sebep olmaktadır. Güney Ege, Batı Karadeniz ve Orta Anadolu Bölgeleri orta derecede ışınlam alan bölgelerdir. Doğu Anadolu ve Doğu Akdeniz bölgeleri ise ışınlam değerleri yüksek olan bölgelerdir [9]. Balıkesir İli konumu itibariye 39 derece enleminde ve 27 derece boylamında (merkezi baz alınmıştır) olmak üzere, Şekil 1’ de görüldüğü gibi güneş enerji potansiyeli ve ışınlamı bakımından Türkiye geneline göre 1095-1826 kWh/kWp bandı arasında 1387-1534 kWh/kWp ile orta sıralarda yer almaktadır.



Şekil 1. Türkiye güneş enerji potansiyeli haritası [15].

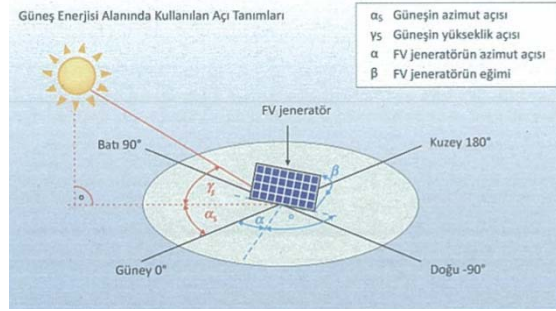
### 3. Panel eğim açısının PV performansına etkisi

Güneş pillerinde güneş enerjisinin taşıyıcı ve yayıcıları olan tanecikli fotonlar, fotovoltaik hücre üzerine düşünce elektrik enerjisine dönüştürürler. Güneş pilleri üzerine düşen güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken aygıtlardır. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek bulmuştur.

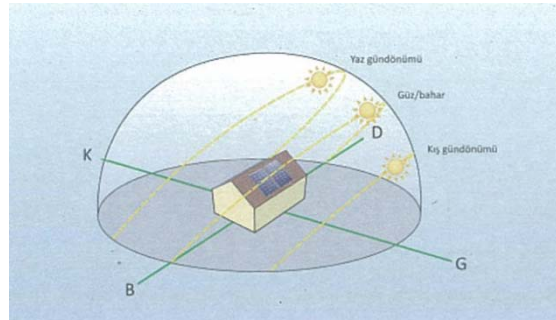
Silisyum, güneş pilinin de en yaygın hammaddesidir. Teknolojik olarak tek kristalli, çok kristalli ve amorf yapıları üretilen güneş pilleri ticari olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve verimleri sırasıyla; %15-17, %12-14, %5-8 olarak verilebilir [16].

PV panellerin performansını etkileyen birçok etmen bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; Konum, yönlendirme ve yüzey eğim açısı, gölgelenme, panel tipi, bakım ve temizlik, modüllerin arkasında oluşan sıcaklık olarak sayılabilir [17]. Bu çalışmada, yukarıda sayılan etmenler içerisinde etkin bir rolü olan, panellerin eğim açısının GES verimini nasıl etkilediği üzerinde durulmaktadır.

Güneşin konumu dünyanın her yerinde güneşin yüksekliği ve güneşin azimut açısı ile tanımlanır. Güneşten gelen ışınlam gücü güneşin yükseklik açısına bağlıdır. Bu açı yatay düzlem esas alınarak ölçülür. Güneşin hareketi nedeniyle yükseklik açısı hem gün içinde hem yıl içinde değişiklik göstermektedir [18]. Güneş teknolojilerinde kullanılan açı kavramları Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Güneş teknolojisinde kullanılan açı kavramları [15].



Şekil 3. Güneşin kuzey yarım kürede mevsime göre çizdiği yörüngeler [15].

Güneşin kuzey yarım kürede nasıl bir yörünge çizdiği Şekil 3'te gösterilmiştir. Güneş ışınımı PV modüle ne kadar dik bir açıyla gelirse sistem verimi buna bağlı olarak artar. Arazi uygulamalı Güneşi takip eden PV sistemlerde, panele gelen Güneş ışınımı sabit bir PV sisteme nazaran daha fazla sürede etki edeceğinden, PV veriminin daha yüksek olacağı söylenebilir. Arazi uygulamalı sabit bir PV sistemin optimum açısının belirlenmesinde ise yılın tüm mevsimleri göz önüne alınarak değerlendirilmektedir. Literatürde bu açının ülkemizde 30-35 derece arasında olduğu bilinmektedir. Çatı uygulamalı PV sistemlerde çatının eğimi panelin açısı olacağından optimum açıdan söz etmek sağlıklı olmayacaktır. PV sistemlerin performansı için panel eğim açısının ne derece önemli olduğu buradan da anlaşılmaktadır. Abdelkader ve arkadaşları monokristal ve polikristal PV modüllerin performans ve verimlilikleri arasındaki ilişkiyi deneysel olarak incelemişlerdir [19]. Rüstemli ve arkadaşları, güneş enerjisini aydınlatma ve ısıtmada kullanan, güneşi takip eden bir düzenek geliştirmişlerdir [20].

#### 4. Panel eğim açıları

Bu bölümde Balıkesir İli Bandırma ilçesinde bulunan farklı açılarla sabit olarak yerleştirilmiş farklı iki GES tesisinin verim açısından karşılaştırılması yapılmıştır. Albatır Enerji GES ve Aydın Dülger GES tesisleri ile ilgili bilgiler alt bölümlerde kısaca verilmiştir.

##### 4.1. Albatır enerji GES tesisi

Albatır Enerji GES, Balıkesir İli Bandırma ilçesi Kirazlı Mahallesiinde olup, 980 kW'e gücünde, panel eğim açısı 27 derece ve güneşe bakacak şekilde tasarlanmış, açık arazide kurulmuş bir GES tesisidir. Tesiste 20 adet 40 kW, 9 adet 20 kW'lık olmak üzere 29 adet evirici, 4116 adet 265 W'lık polikristal panel kullanılmış olup, sistemin

DC gücü 1.090.74 kWp'dir. Albatur Enerji GES Tesisine ait görüntü Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Albatur enerji GES tesisi.

#### 4.2. Aydın Dülger GES tesisi

Aydın Dülger GES, Balıkesir İli Bandırma ilçesi Doğruca Mahallesi'nde olup, 853 kWe gücünde panel eğim açısının 9 derece ve güneye bakacak şekilde tasarlanmış, çatıya yerleştirilmiş bir GES tesisidir. Tesiste 21 adet 40 kW, 1 adet 13 kW'lık olmak üzere 22 adet evirici, 3414 adet 285 W'lık monokristal panel kullanılmış olup, sistemin DC gücü 972.990 kWp'dir. Aydın Dülger GES tesisine ait görüntü Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Aydın Dülger GES tesisi.

Albatur Enerji GES ile Aydın Dülger GES tesisi arasındaki kuş uçuşu uzaklık yaklaşık 12 km'dir. İki tesisinde güçleri farklı olduğundan sağlıklı bir sonuca varmak için her iki tesisinden de 1 adet 40 kWe gücündeki eviriciler için karşılaştırma yapılmıştır. Üretim verileri 01.10.2017 ile 31.08.2018 tarihleri arasında aylık bazda REFUSol ([http://www.advanced-energy.com/images/REFUSol/ProductLine\\_TR.pdf](http://www.advanced-energy.com/images/REFUSol/ProductLine_TR.pdf)) evirici tarafından izlenilerek sisteme kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veriler performans karşılaştırması için kullanılmıştır. Albatur Enerji GES Tesisine 2017 yılının Eylül ayında yeni üretime başladığı için arıza ve testlerden dolayı bu aya ait verilerin sağlıklı olamayacağı düşünülerek dikkate alınmamıştır.

Her iki GES tesisine ait verilerin özelliklerini karşılaştırmak için parametre değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Tabloda panel açısı, panel yönü, gölgeleme, temizlenme ve konum gibi bilgiler verilmiştir.

Tablo 1. GES tesislerine ait veriler.

Tesisin Adı	Konum	Yıllık Güneş Işınımı (kWh/m <sup>2</sup> )	Panel Açısı (derece)	Panel Yönü	Gölgeleme	Panel Tipi	Panellerin Arka yüzeyinde havalanma	Bakım ve temizlik	Evirici Gücü	Panel Adeti ve (panel gücü)	Toplam panel gücü (kW)
ALBATUR ENERJİ GES	Enlem: 40 11' 44"	1563	27	Güney	Yok	Polikristal	Var	Var	40 kW	168 (265 kW)	44520
	Boylam: 28 07' 27"										
AYDIN DÜLGER GES	Enlem: 40 15' 55"	1560	9	Güney	Yok	Monokristal	Var	Var	40 kW	160 (285 kW)	45600
	Boylam: 28 00' 25"										

Albatur Enerji GES tesisindeki 40 kW’lık eviriciye her bir dizide 265 Wp’lik 21 adet panel olmak üzere 8 dizi bağlanmıştır. Bu durumda eviriciye ait olan DC giriş gücü 44.520 kWp’dir. Aydın Dülger GES tesisindeki 40 kW’lık eviriciye ise her bir dizide 285 Wp’lik 20 adet panel olmak üzere 8 dizi bağlanmıştır. Bu durumda eviriciye ait olan DC giriş gücü 45.600 kWp’dir. Aydın Dülger GES’e ait eviricinin DC giriş gücü Albatur Enerji GES’e ait eviricinin DC giriş gücünden 1.080 kWp daha fazladır. Albatur Enerji GES ve Aydın Dülger GES tesislerinin aylık enerji üretimini gösteren veriler Tablo 2’de verilmiştir. Ülkemiz kuzey yarım kürede yer aldığından en kısa gündüzün yaşandığı 2017 yılı 21 Aralık ayına ait günlük enerji üretim verileri Tablo 3 ve Şekil 6’da, en uzun gündüzün yaşandığı 2018 yılı 21 Haziran ayına ait üretim verileri ise Tablo 4 ve Şekil 7’de verilmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde, yıllık enerji üretiminin yaz aylarında yüksek olduğu, kış aylarında ise daha düşük olduğu görülmektedir. Aralık, Ocak ve Şubat aylarında gündüzün kısa olması nedeniyle bu aylardaki enerji üretiminin her iki tesis içinde yıllık ortalama üretime göre düşük olduğu, yaz ayları olan Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında ise enerji üretiminin her iki tesis içinde yüksek olduğu görülmektedir. Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında Aydın Dülger GES firmasının enerji üretiminin Albatur Enerji GES tesisine göre biraz daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 2. 40 kW’lık evirici için her iki tesise ait aylık üretim verileri.

	2017 EYLÜL	2017 EKİM	2017 KASIM	2017 ARALIK	2018 OCAK	2018 ŞUBAT
ALBATUR (kWh)	-	5.742,20	3.598,80	3.036,30	3.023,40	2.413,80
AYDIN DÜLGER (kWh)	-	4.563,50	2.737,20	2.208,60	2.293,40	2.157,60
	2018 MART	2018 NİSAN	2018 MAYIS	2018 HAZİRAN	2018 TEMMUZ	2018 AĞUSTOS
ALBATUR (kWh)	4.760,70	7.044,30	6.130,20	6.966,40	7.394,70	7.792,30
AYDIN DÜLGER (kWh)	4.387,30	6.831,70	6.436,50	7.267,70	7.440,20	7.056,60

Tablo 3 incelendiğinde, Aralık ayında Albatur Enerji tesislerinde üretilen enerjinin Aydın Dülger tesislerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

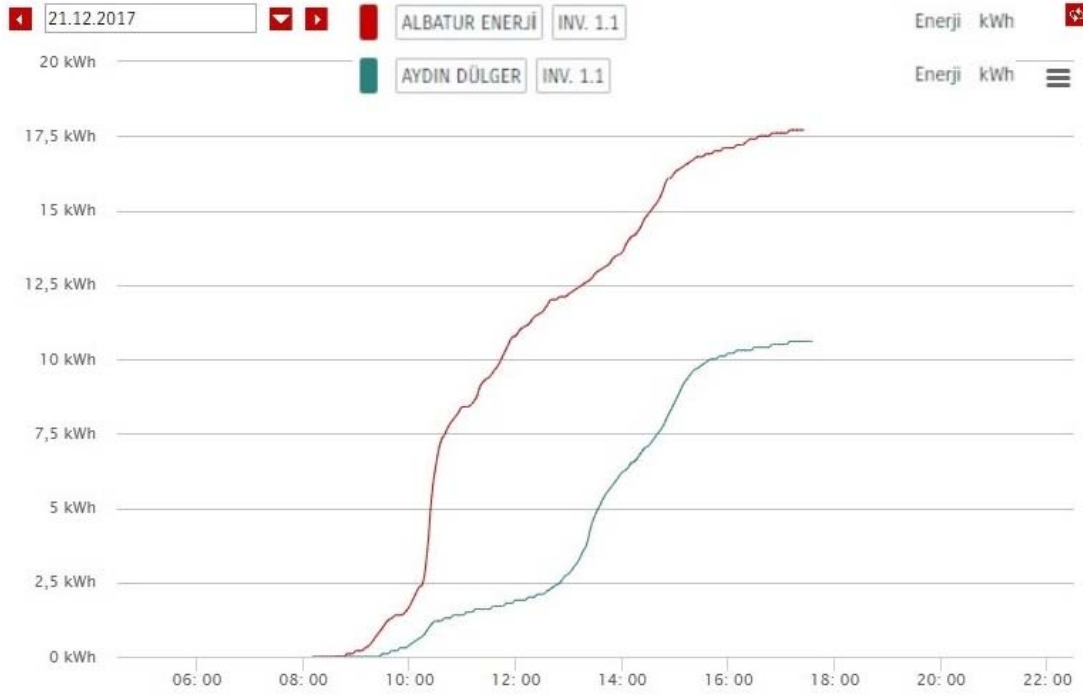
Tablo 3. 40 kW’lık evirici için her iki tesise ait aralık ayı üretim verileri.

2017 ARALIK		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ALBATUR ENERJİ GES (kWh)		63,8	81,5	74,6	33,8	93,6	152,4	171,8	195,1	97,9	31,3	187,6	128,8	180	122,5	178,8	
AYDIN DÜLGER GES (kWh)		57	58,8	68,2	16	62	122,5	124,8	129,1	82,1	35,3	119,4	100,3	117	96,7	120,2	
2017 ARALIK		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
ALBATUR ENERJİ GES (kWh)		152,6	21	35	20,1	24,9	17,7	8,6	15,9	172,3	191,3	190,2	165,7	119	56,3	19,9	32,3
AYDIN DÜLGER GES (kWh)		108,6	22,5	23,3	30,4	15,3	10,6	4,7	29,7	114,7	125,5	124,3	111,5	86,5	34,6	20,7	36,3

Tablo 4 incelendiğinde, Haziran ayında Aydın Dülger tesislerinde üretilen enerjinin Albatur Enerji tesislerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

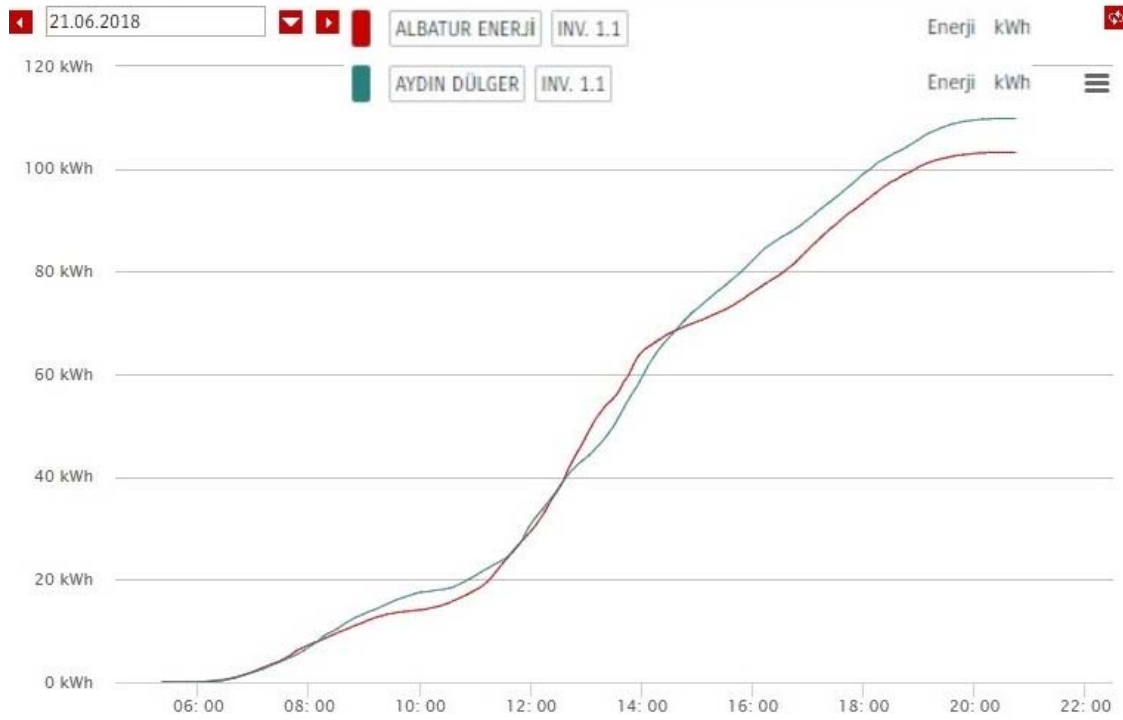
Tablo 4. 40 kW’lık evirici için her iki tesise ait haziran ayı üretim verileri.

2018 HAZİRAN		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ALBATUR ENERJİ GES (kWh)		278,4	267,1	296,6	268,5	208	262,8	255,6	255	266,8	269,7	282,1	297,9	287,2	272,2	234,1
AYDIN DÜLGER GES (kWh)		297,6	288,3	315,5	278,7	196,7	240,4	259	294,3	271,2	281,7	268,7	304,5	300,2	282,7	218,1
2018 HAZİRAN		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ALBATUR ENERJİ GES (kWh)		145	146,6	238,5	243,2	265,3	103,2	229,7	271,3	180,4	158,4	185,6	175	157,2	241	224
AYDIN DÜLGER GES (kWh)		197	138,9	254,2	277,3	266,8	109,8	223,1	270,2	220,4	241,3	177,3	183,9	168,2	226,3	215,4



Şekil 6. 40 kW'lık evirici için her iki tesise ait 21 Aralık günü üretim verileri.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, 21 Aralık günü alınan veriler karşılaştırıldığında, Albatür Enerji tesisinin enerji üretimi Aydın Dölger tesisine göre daha yüksektir. Aydın Dölger tesisi panellerin eğim açısının 9 derece olmasından dolayı enerji üretimine sabah daha geç başladığı görülmektedir.



Şekil 7. 40 kW'lık evirici için her iki tesise ait 21 Haziran günü üretim verileri.

Şekil 7 incelendiğinde, yaz aylarında iki tesisinde sabah erken saatlerde üretime başladığı ve gün boyunca farklılıkların kış aylarına göre daha az olduğu, Albatır GES'in öğleden sonra ürettiği enerjinin biraz daha düşük olduğu görülmektedir.

## 5. GES verilerinin değerlendirilmesi

Önceki bölümdeki tablo ve grafikler incelendiğinde, her iki tesisinde yaz aylarındaki enerji üretiminin kış aylarındakine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. İki tesiste konum olarak birbirine çok yakın olduğu için hava şartlarının aynı olmasından dolayı Haziran ve Aralık aylarındaki grafiklerde iki tesisinde enerji üretiminin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Örneğin Albatır Enerji GES bir önceki gün ürettiği enerjiden daha yüksek enerji üretmiş, Aydın Dülger GES' te aynı şekilde bir önceki gününe göre daha fazla enerji üretmiştir. Haziran ve Aralık aylarının farklı günlerindeki enerji üretimlerinin farklılık göstermesi bulutlanma olarak açıklanabilir. Örneğin 11-16 Aralık arasındaki üretim, 17-23 Aralık arasındaki üretimden yüksek çıkmaktadır.

27 derece eğimle güneye bakacak şekilde tesis edilmiş olan Albatır Enerji GES'e ait 40 kW'lık eviricinin yıllık enerji üretiminin aylık ortalaması yaklaşık 5263,92 kWh'tır. Aynı şekilde 9 derece eğimle güneye bakacak şekilde tesis edilmiş olan Aydın Dülger GES'e ait 40 kW'lık eviricinin yıllık enerji üretiminin aylık ortalaması yaklaşık 4852,75 kWh'tır. Bu durumda Albatır Enerji GES'e ait evirici diğerine göre aylık bazda yaklaşık 411,17 kWh'lık daha fazla enerji üretmiştir. Bu durumda yıllık ortalama olarak, 27 derece eğim açısıyla tesis edilmiş panellerin 9 derece eğim açısına göre tesis edilmiş panellerden daha yüksek bir verimle çalıştığı görülmektedir.

Ülkemiz kuzey yarım kürede yer aldığından güneş ışınlarının geliş açısı kış aylarına göre yaz aylarında daha dik olarak gelir. En uzun gündüz süresi 21 Haziranda olduğundan hem bu ay hem de bir önceki ve bir sonraki aylar baz alındığında Aydın Dülger GES tesisinin üretiminin Albatır Enerji GES'ten yüksek olduğu görülmektedir. Mayıs, Haziran ve Temmuz aylarında (bu aylar ülkemize güneş ışınlarının diğer aylara göre en dik açıyla geldiği aylar) Albatır Enerji GES'e ait eviricinin üretimi 20491,3 kWh olup, Aydın Dülger GES'e ait eviricinin üretimi ise 21144,4 kWh' tır. Bu aylarda 9 derecelik panel eğimi olan Aydın Dülger GES'in, 27 derece eğime sahip olan Albatır Enerji GES' ten daha verimli olduğu görülmektedir. Aynı karşılaştırmayı Kasım, Aralık ve Ocak ayları için (bu aylar ülkemize güneş ışınlarının diğer aylara göre en eğik açıyla geldiği aylar) yaptığımızda Albatır Enerji GES'e ait eviricinin üretimi 9658,5 kWh olup, Aydın Dülger GES'in üretimi ise 7239,2 kWh'dır. Bu aylarda Albatır Enerji GES, Aydın Dülger GES'e göre daha verimlidir.

## 6. Benzetim çalışmaları

Benzetim Çalışmaları PVSYST 6.7.6 programında her iki firma içinde yapılmıştır. Programın işleyişini göstermek için ön panel görüntüsü Şekil 10'da gösterilmiştir. Panel üzerinden firma adı, tesisin konumu, panel ve inverter tipinin seçimi, yön, eğim açısı, DC giriş gücü ve bağlantı şekli gibi veriler girilerek tesise ait AC çıkış gücü günlük aylık ve yıllık raporlar halinde alınabilmektedir. Güç olarak Watt, kWatt yada MWatt olarak da güce bağlı raporlar alınabilmektedir. Rapor sonuçları, isteğe bağlı tablo yada grafik şeklide program çıktısı olarak alınabilmektedir. Albatır Enerji GES ve Aydın



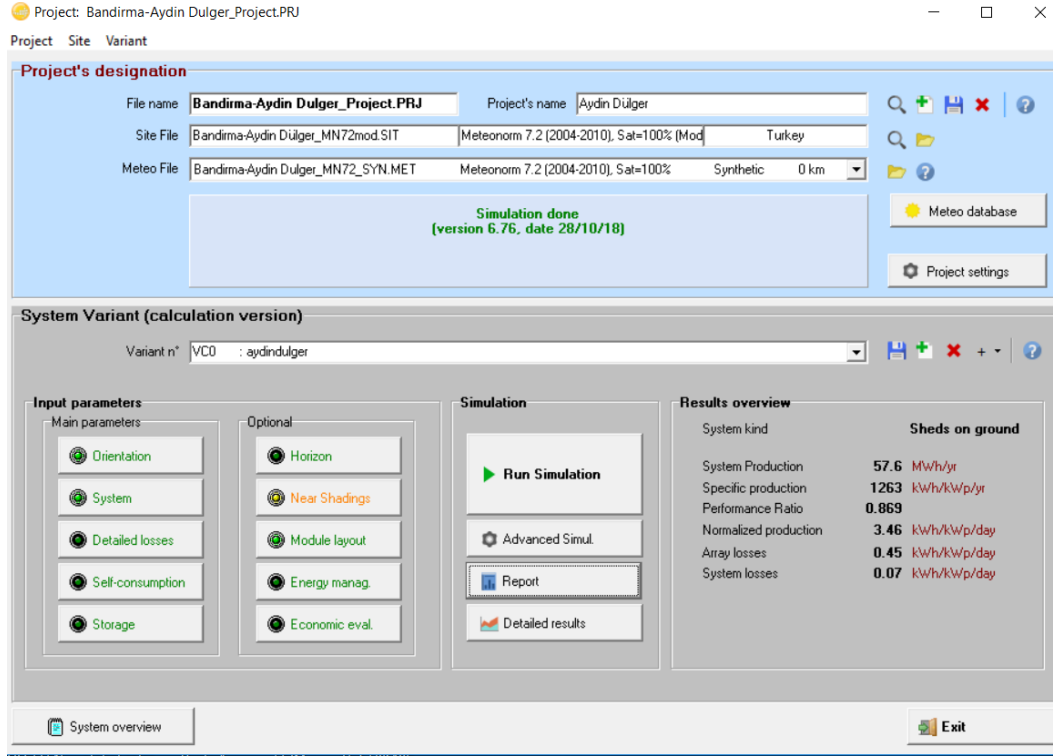
Dülger GES tesislerine ait eğim açıları ve güçleri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Simülasyon programında Alatur enerji GES için eğim açısı 27° ve kurulu güç 44.52 kW (265 Wx168 panel), Aydın Dülger GES için ise eğim açısı 9° ve kurulu güç ise 45.60 kW (285 Wx160 panel) olarak girilmiştir.

<b>Simulation variant : ALBATUR ENERJİ GES-1</b>			
Simulation date		18/11/18 09h03	
<b>Simulation parameters</b>			
System type		Sheds on ground	
Collector Plane Orientation	Tilt	27°	Azimuth 0°
Models used	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteororm
Horizon	Free Horizon		
Near Shadings	Detailed electrical calculation (acc. to module layout)		
User's needs :	Unlimited load (grid)		
<b>PV Array Characteristics</b>			
<b>PV module</b>	Si-poly	Model	<b>AXIpower AC-265P/156-60S</b>
Original PVsyst database	Manufacturer	Axitec USA	
Number of PV modules	In series	21 modules	In parallel 8 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	168	Unit Nom. Power 265 Wp
Array global power	Nominal (STC)	<b>44.5 kWp</b>	At operating cond. 39.8 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	578 V	I mpp 69 A
Total area	Module area	<b>273 m²</b>	Cell area 245 m²
<b>Inverter</b>			
Original PVsyst database	Model	<b>RefuSol 40K (840P)</b>	
Characteristics	Manufacturer	REFU Elektronik GmbH	
Inverter pack	Operating Voltage	250-900 V	Unit Nom. Power 40.0 kWac
	Nb. of inverters	1 units	Total Power 40 kWac
			Pnom ratio 1.11

Şekil 8. Alatur Enerji GES tesislerine ait eğim açısı, güç ve panel özellikleri.

<b>Simulation variant : aydindulger</b>			
Simulation date		28/10/18 16h47	
<b>Simulation parameters</b>			
System type		Sheds on ground	
Collector Plane Orientation	Tilt	9°	Azimuth 16°
Models used	Transposition	Perez	Diffuse Perez, Meteororm
Horizon	Free Horizon		
Near Shadings	Detailed electrical calculation (acc. to module layout)		
User's needs :	Unlimited load (grid)		
<b>PV Array Characteristics</b>			
<b>PV module</b>	Si-mono	Model	<b>Sunmodule SW 285 mono</b>
Original PVsyst database	Manufacturer	SolarWorld	
Number of PV modules	In series	20 modules	In parallel 8 strings
Total number of PV modules	Nb. modules	160	Unit Nom. Power 285 Wp
Array global power	Nominal (STC)	<b>45.6 kWp</b>	At operating cond. 40.7 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)	U mpp	555 V	I mpp 73 A
Total area	Module area	<b>268 m²</b>	
<b>Inverter</b>			
Original PVsyst database	Model	<b>RefuSol 40K (840P)</b>	
Characteristics	Manufacturer	REFU Elektronik GmbH	
Inverter pack	Operating Voltage	250-900 V	Unit Nom. Power 40.0 kWac
	Nb. of inverters	1 units	Total Power 40 kWac
			Pnom ratio 1.14

Şekil 9. Aydın Dülger GES tesislerine ait eğim açısı, güç ve panel özellikleri.



Şekil 10. PVSYST 6.7.6 programının ön panel görüntüsü.

Aydın Dülger ve Albatır Enerji GES tesislerine ait veriler benzetim programına girilerek elde edilen sonuçlar Tablo 5 ve Tablo 6'da sunulmuştur. Veriler, benzetim sonuçlarının sahadan alınan gerçek sonuçlarla karşılaştırma yapılabilmesi için Ocak ve Aralık ayları arasındaki süreler için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. Aydın Dülger tesisine ait benzetim sonuçları.

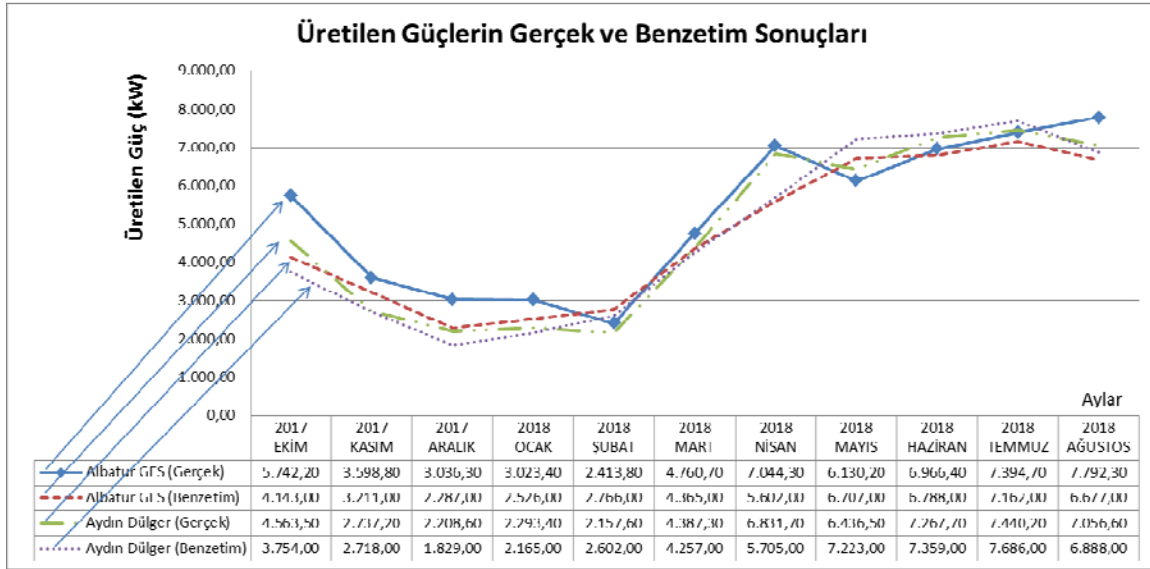
	GlobHor	DiffHor	T_Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	E_Grid	PR
	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	°C	kWh/m <sup>2</sup>	kWh/m <sup>2</sup>	MWh	MWh	
January	43.9	27.04	5.01	50.5	47.8	2.213	2.165	0.940
February	55.1	35.28	5.71	60.8	58.1	2.657	2.602	0.938
March	95.3	52.35	8.79	102.6	98.5	4.346	4.257	0.910
April	135.5	57.94	11.74	141.7	136.8	5.827	5.705	0.883
May	181.1	83.33	16.93	183.4	177.1	7.375	7.223	0.864
June	191.0	87.00	21.58	191.4	184.7	7.513	7.359	0.843
July	201.2	86.70	24.87	203.4	196.8	7.849	7.686	0.829
August	174.1	80.50	24.91	180.7	174.4	7.032	6.888	0.836
September	128.3	62.02	20.08	137.2	132.0	5.511	5.399	0.863
October	83.4	39.14	16.14	93.3	89.4	3.833	3.754	0.882
November	55.6	26.91	10.31	65.3	62.1	2.776	2.718	0.913
December	38.1	28.20	6.99	42.8	40.5	1.869	1.829	0.937
Year	1382.8	666.42	14.48	1453.1	1398.2	58.803	57.585	0.869

Tablo 5 incelendiğinde, kış aylarında üretilen gücün az olduğu, yaz aylarında güneşlenme sürelerinin uzun olması nedeniyle giderek arttığı, kışa döndüğünde tekrar azaldığı görülmektedir. Benzetim çalışmalarında sıcaklık, gölgelenme gibi dış etkenler dikkate alınmamıştır.

Tablo 6. Alatur Enerji GES tesisine ait benzetim sonuçları.

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	44.6	28.77	4.95	61.5	59.4	2.581	2.526	0.922
February	53.9	33.37	5.71	68.0	65.7	2.825	2.766	0.914
March	93.6	52.79	8.79	109.8	106.3	4.458	4.365	0.893
April	133.3	59.93	11.84	144.5	139.9	5.721	5.602	0.871
May	179.2	73.81	17.04	177.8	172.3	6.851	6.707	0.847
June	191.3	81.79	21.67	183.6	177.8	6.932	6.788	0.830
July	201.2	86.65	24.87	196.5	190.1	7.313	7.162	0.819
August	173.9	68.49	24.92	183.7	178.2	6.820	6.677	0.816
September	127.9	56.95	20.07	147.7	143.2	5.644	5.528	0.841
October	84.0	47.44	16.13	106.7	103.2	4.228	4.143	0.872
November	56.1	29.20	10.20	80.4	77.9	3.278	3.211	0.897
December	39.5	25.44	6.88	56.1	54.2	2.336	2.287	0.915
Year	1378.5	644.63	14.48	1516.3	1468.3	58.986	57.761	0.856

Tablo 6'ya bakıldığında, kış aylarında üretilen gücün az olduğu, yaz aylarında ise güneşlenme sürelerinin uzun olması nedeniyle üretilen gücün arttığı görülmektedir. GES sistemleri için de yapılan benzetim çalışmalarında sıcaklık, gölgelenme gibi dış etkenler dikkate alınmamıştır. Her iki tesise ait benzetim ve gerçek sonuçlar grafik olarak Şekil 11'de gösterilmiştir. Benzetim sonuçları ve gerçek sonuçlar karşılaştırıldığında üretim açısından panel eğiminin doğrudan sistemin verimliliğine etki ettiği görülmektedir.



Şekil 11. GES tesislerine ait benzetim ve gerçek sonuçlar.

Şekilde 11'de görüldüğü gibi, benzetim çalışmaları ve gerçek uygulama sonuçları arasında çevresel etkilerden dolayı farklılıklar oluşmaktadır. Rüzgar, sıcaklık, gölgelenme gibi faktörler benzetim çalışmalarında dikkate alınmadığı için gerçek uygulama sonuçlarıyla tam olarak örtüşmemektedir. Genel olarak üretilen güçler değerlendirildiğinde, benzetim ve uygulama sonuçlarının aynı dönemlerde artış ve azalma gösterdiği söylenebilir. Tesisler yeni olduğu için bazı dönemlerde gerçek

sonuçlar benzetim sonuçlardan fazla çıkmaktadır. Panel verimleri polikristal panel katalog verilerine göre 25 yılda %15, monokristal için ise %7 olarak doğrusal bir şekilde azalmaktadır.

Albatur Enerji GES ve Aydın Dülger GES Tesisleri için pvsyst 6.7.6 programına göre optimum eğim açısının 29 derece olduğu belirlenmiştir. Benzetim sonucuna göre Albatur enerji GES tesisi 27 derece panel eğim açısında yıllık 57761 kWh enerji üretirken aynı tesis 29 derece eğim açısında yıllık 57797 kWh enerji üretecektir. Bu da tesisin yıllık 36 kWh daha az enerji üretmesi anlamına gelmektedir. Yine de bu rakam ciddi bir fark oluşturmadığından tesisin optimal bir şekilde kurulduğu söylenebilir.

Aydın Dülger GES tesisi için yapılan çalışmanın benzetim sonuçları değerlendirildiğinde, panel eğim açısının 29, azimut açısının 16 derece olması durumunda yıllık 59987 kWh enerji üretilirken, panel eğiminin açısının aynı kalıp azimut açısının 0 olması durumunda 60253 kWh enerji üretecektir. Aynı tesis, 9 derece panel eğim açısında ve 16 derece azimut açısında yıllık 57585 kWh enerji üretmektedir. Buna göre tesisin konumu değişmeden (azimut açısı 16 derece olduğu durumda) optimum açıda tesis edilmiş olsaydı yıllık 2402 kWh (%4.17) daha fazla enerji üretilmiş olacaktı. Bu tesis hem optimum açıda hem de güney yönlü (azimut 0 derece) tesis edilmiş olsaydı yıllık 2668 kWh (%4,63) daha fazla enerji üretilmiş olacaktı. Söz konusu tesis çatı üzeri GES tesisi olduğundan hem panel eğim açısının optimum şekilde ayarlanamayacak oluşu hem de panel yönünün değiştirilemeyecek oluşundan dolayı optimal bir şekilde kurulduğundan bahsetmek mümkün olmayacaktır.

## 7. Sonuçlar ve tartışma

Fotovoltaik hücrelerin, farklı ışınım şiddetleri ve çalışma şartları altında ürettikleri güç değerleri sistem performansını belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Işınım miktarı, çalışma sıcaklığı, gölgelenme, eğim açısı, kirlilik ve iklimsel değişikliklere bağlı parametreler güneş panellerinin çıkış güçlerinin belirlenmesinde çok etkilidir. Bu çalışmada Balıkesir'in Bandırma ilçesinde kurulu bulunan iki adet GES tesisinin panel eğimi bakımından karşılaştırılması yapılmıştır. Tesisin birinde monokristal, diğerinde ise polikristal yapıda paneller bulunmaktadır. GES'lerin karşılaştırılmasındaki amaç, panel eğim açısının sistemin verimini nasıl etkilediğini incelemektir. 27 derece eğime sahip olan tesisin 9 derecelik eğime sahip tesise nazaran yıllık verimin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kısacası Güneş ışınları panel yüzeyine ne kadar dik bir açıyla gelirse PV modülün ürettiği güç o derece fazla olur. Bu nedenle panellerin buldukları konuma göre optimum eğimleri ve yönleri belirlenmelidir. Belirlenen bu değerlere göre panellerin yerleştirilmesi durumunda GES tesislerinden maksimum değerde verim elde edilebilmektedir. Benzetim sonuçlarına göre, incelenen GES'lerden maksimum verim alınabilmesi için eğim açılarının 29 derece olması gereklidir. Bu şekilde kurulan tesislerin amortisman süresi kısaltılarak ekonomik getirisi artırılabilir. Balıkesir ilindeki güneş ışınım miktarları dikkate alındığında, kullanılan panellerin güney yönünde 28 ile 30 derece arasında kurulmasının uygun olacağı söylenebilir.

## Teşekkür

Albatur Enerji GES, Aydın Dülger GES ve Sunvital Energy tesislerindeki yetkililere, sahadaki çalışmalarda elde edilen verilerin alınması ve değerlendirilmesinde, bu çalışmaya yaptıkları katkıdan dolayı teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] Kabir E., Kumar P., Kumar S., Adedeji, A. A. ve Kim K.H., Solar energy: Potential and future prospects, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82, 894-900, (2018).
- [2] Mirzaei M., Mohiabadi M. Z., A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions, **Energy for Sustainable Development**, 38, 93-101, (2017).
- [3] Güneş Enerji Santrali (GES) Geliştirme: Uşak Örneği, **Geomatik Dergisi**, 3(1);1-21, (2018).
- [4] Edalati S., Ameri M., Iranmanesh M., Comparative performance investigation of mono- and poly-crystalline silicon photovoltaic modules for use in grid-connected photovoltaic systems in dry climates, **Applied Energy**, 160, 255-265, (2015).
- [5] Anser Bashir M., Ali H. M., Khalil S., Ali M. ve Siddiqui A. M., Comparison of Performance Measurements of Photovoltaic Modules during Winter Months in Taxila, Pakistan, **International Journal of Photoenergy**, Article ID 898414, 8 pages, (2014).
- [6] Taşçıoğlu A., Taşkın O. ve Vardar A., A Power Case Study for Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in Bursa City, Turkey, **International Journal of Photoenergy**, Article ID 7324138, 7 pages, (2016).
- [7] Mosalam H. A., Experimental Investigation of Temperature Effect on PV Monocrystalline Module, **International Journal of Renewable Energy Research**, 8 (1), (2018).
- [8] Şihab R. Özcan K., Görgülü S., Karakan A., The comparison of energy production of monocrystalline and polycrystalline solar panel by using the wirelessly and measurement of energy, **IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering**, 12 (6) ,76-82, (2017).
- [9] Arslan İ., Tekirdağ Koşullarında Polikristal ve Monokristal Tip PV Güneş Panellerinin Verimlilik Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2018)
- [10] Başoğlu M. E., Kazdaloğlu A., Bilgin M. Z., Erfidan T., Çakır B., Farklı Güneş Paneli Teknolojilerinin Kocaeli ili için Performans Değerlendirmesi, Eleco 2014, Bursa, 96-100, (2014).
- [11] Sefa İ., Demirtaş M., Bayındır R., Güneş Enerjisi Eğitim Seti Tasarım ve Uygulaması, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 13(3), 327-336, (2007).
- [12] Taze G., Düz Güneş Kollektörü Verimini Etkileyen Bazı Parametrelerin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2010).
- [13] Obukhov S. G., Plotnikov I. A., Masolov V. G., Mathematical model of solar radiation based on climatological data from NASA SSE, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 363, (2018).

- [14] Er Z., Utilization of the collector two colored rainbow system in Istanbul, **Acta Physica Polonica A**, 300-302, 128 (2015).
- [15] <https://globalsolaratlas.info/downloads/turkey>
- [16] Küpeli A.  ., Güneş Pilleri ve Verimleri, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2005).
- [17] Turhan, S. ve  etiner,  ., Fotovoltaik Sistemlerde Performans Değerlendirmesi, 6. Ulusal  atı & Cephe Sempozyumu, Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, (2012).
- [18]  ataklı, M., Fotovoltaik Sistemler, German:  ataklı Enerji, 2.12-2.13, (2012).
- [19] Abdelkader M. R., Al-Salaymeh A., Al-Hamamre Z., Sharaf F., A comparative analysis of the performance of monocrystalline and multiycrystalline PV cells in semi arid climate conditions: the case of Jordan, **Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, 4(5), 543- 552, (2010).
- [20] Rustemli S., Dincadam F., Demirtas M., Performance Comparison of the Sun Tracking System and Fixed System in the Application of Heating and Lighting, **Arabian Journal for Science and Engineering**, 35(2), 171-183, (2010).

# Bazalt tozu katkılı harçların mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması

Veysel AKYÜNCÜ\*, Mehmet Timur CİHAN

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,  
Çorlu Kampüsü, Tekirdağ.

Geliş Tarihi (Received Date): 19.12.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 18.03.2019

## Özet

Bazalt beton üretiminde agrega olarak tercih edilen ancak üretimi esnasında yan ürün olarak yüksek miktarda atık bazalt tozu malzemesi ortaya çıkaran bir kayaktır. Bu atık malzemenin geri dönüşümüyle çevreye ve insan sağlığına verdiği zararın azaltulmasının yanında çimentoyla ikame edilmesi harç (beton) hammadde maliyetinde bir miktar düşme sağlayacaktır. Çalışma kapsamında kontrol serisi ve %5, %10, %15, %20 oranlarında bazalt tozu çimento ile ikame edilerek toplamda 5 seri harç numune üretilerek taze ve sertleşmiş harç deneyleri gerçekleştirildi. Taze harç deneyi olarak kıvam tayini, sertleşmiş harç deneyi olarak basınç, eğilme, yarmada çekme ve geçirimsizlik deneyi olarak basınç altında su işleme derinliği deneyleri yapıldı. %10 ikameli seride basınç dayanımında yaklaşık olarak %8 oranında artış elde edilirken, eğilme dayanımında ise %15 ikameli seride önemli bir artış elde edildi. %10 bazalt tozu ikame oranına sahip seride basınç altında su işleme derinliği düşüş göstererek olumlu bir katkı sağlamaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Atık bazalt tozu, harç, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, permeabilite.

## Investigation of the mechanical and permeability properties of mortars containing basalt powder

### Abstract

Basalt can be used as aggregate in concrete however, very fine waste basalt powder is released as by-product during aggregate production. The hazardous effect of this waste material on human health and environment can be diminished while using basalt

\* Veysel AKYÜNCÜ, vakyuncu@nku.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-3171-1553>

Mehmet Timur CİHAN, mehmetcihan@nku.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-5555-5589>

*powder as cement replacement material. In this study, reference and basalt powder added mortars were casted. Basalt powder was replaced at different percentages by weight of cement such as 5%, 10%, 15% and 20%. Workability (flow-table), compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength and permeability tests were performed at fresh and hardened state of mortars. In the 10% incremental series, an increase of approximately 8% was obtained in the compressive strengths and a significant increase in the flexural strength in the 15% substituted grades was obtained. A significant decrease was obtained at permeability of mortar with 10% basalt powder replacement as result of having denser structure at paste phase.*

**Keywords:** *Waste basalt powder, mortar, compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength, permeability.*

## 1. Giriş

Sürdürülebilir üretim günümüz koşullarında atık malzemelerin yeniden kullanımını zorunlu kılmaktadır. Oluşan atık ürünlerin bertarafı ekonomik açıdan üreticilerin sürdürülebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Atık maddelerin farklı endüstrilerde yeniden geri kazanımı (hammadde olarak kullanılması), atık maddelerin doğurduğu problemlerin önüne geçmekle beraber ekonomiye fayda sağlamaktadır.

Agrega ve su dünyada en çok tüketilen hammaddelerdir [1]. %58'lik oranla agreganın üretimi maden sektörü içinde en yüksek orana sahiptir. Çevre kirliliği bakımından yapı malzemelerinin üretimi birtakım olumsuz etkilere neden olmaktadır. Agregaların üretimi esnasında ortaya çıkan tozlar insan sağlığına ve çevreye önemli derecede zarar vermektedir. Bu nedenle agreganın üretimi sırasında çıkan tozların harçta kullanılması çevre kirliliğini azaltmasının yanında ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır.

Mermer ve granit endüstrisi tarafından üretim esnasında çevreye, toprağa ve su kirliliğine neden olan büyük oranda atık toz meydana gelmektedir ve oluşan tozun farklı endüstrilerde hammadde olarak kullanılması konusunda çeşitli ülkelerde araştırmalar yapılmaktadır [2]. Mermer ve granit tozlarının çimento yerine alternatif bir malzeme ve dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği konusunda araştırmalar bulunmaktadır [2].

Harç TS EN 13055 (2016) standardına [3] göre, çimentonun silisli bir kumla karıştırılması ve bu karışıma su ilavesiyle elde edilen bir bağlayıcı malzeme olarak tarif edilmektedir. Nitelikli bir harç beton içerisinde agreganın tanelerinin etrafını sarmalı, dayanım ve dayanıklılık özelliklerini servis ömrü boyunca yerine getirerek kendisinden beklenen performansı göstermelidir.

Beton; agreganın, çimento hamuru ve bu iki bileşenin ara yüzeyinden oluşan üç fazlı heterojen bir malzemedir. Agreganın çimento hamuru ara yüzeyi, betonda en zayıf halka olarak bilinmektedir ve bu bölge betonda çatlakların ilerlemesi açısından en uygun fazdır. Agreganın-çimento hamuru ara yüzeylerinde çatlakların oluşması, betonun elastik olmayan davranışında önemli rol oynamaktadır. Mikro çatlakların iri agreganın ve onu çevreleyen harçta başlaması ve çatlak ilerlemesinin ara yüzeyde gerçekleşmesi betonun bu fazının önemine işaret etmektedir. Bu nedenle harç özelliklerindeki iyileştirme betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine çok önemli bir katkı yapmaktadır [4, 5]. Betonun geçirimsizliği boşlukların boyutuna ve dağılımına bağlıdır. Boşlukların boyutu



ve dağılımı ise su/çimento oranı, çimento içeriği, çimento inceliği, çimento tipi, çimentoya ilave veya ikame olarak katılan mineraller, kimyasal katkıları, betonun yerleşmesi, ortam koşulları, kür koşulları gibi etkenlerden etkilenmektedir. Ayrıca hidratasyonun gelişimi ve çimentonun özellikleri de beton geçirimsizliğini etkileyen diğer etkenlerdir [6, 7, 8].

Agrega üretimi esnasında ortaya çıkan atık toz malzemelerin beton üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [9, 10]. Dobiszewska ve diğ. (2018) [9] bazalt tozu atıklarının beton üretiminde kullanılması üzerine yaptıkları çalışmalarında ince agreganın atık bazalt tozu ile yer değiştirmesi halinde basınç ve eğilme dayanımında belirli bir artış meydana geldiğini beton kalitesine olumsuz bir etki yapmadığını, atık bazalt tozunun ince malzeme olarak değerlendirilebileceğini belirlemişlerdir. Böylece bazalt tozu atıklarının beton üretiminde ince malzeme olarak kullanılmasının ekonomiye katkısının yanında çevreye verdiği zararın da engellenmesine neden olacağı belirtilmiştir.

Laibao ve diğ. (2013) [11] ise bazalt agregası üretiminde ortaya çıkan atık bazalt tozunun insan sağlığına ve çevreye verdiği zararı belirtmiş, bazalt tozunun yeni bir mineral katkı olarak kullanılabilirliği konusunu incelemişlerdir. Çalışmada öncelikle bazalt tozunun kimyasal bileşimi ve puzolanik aktivitesi tespit edilmiş olup, çimento pastası ve atık bazalt tozu ile üretilen numunelerin basınç dayanımı belirlendikten sonra atık bazalt tozlu harçlarda izotermal kalorimetrik ölçüm, x ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) testi ile hidratasyon süreci ve mikroyapısı incelenmiştir. Sonuç olarak bazalt tozunun belirgin bir puzolan faaliyet gösterdiği ve bir mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada Tekirdağ bölgesinde yer alan bazalt ocaklarından agrega üretim aşamasında ortaya çıkan atık bazalt tozunun çimento ile yer değiştirilmesi ile üretilmiş harç numunelerinin geçirimsizlik ve mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak incelendi. Elde edilen sonuçlar, bazalt tozunun harç üretiminde kullanım miktarının ve harç özelliklerinde oluşturacağı iyileştirme düzeyinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca harç fazının özelliklerinde gerçekleşecek iyileştirmelerin beton özelliklerine anlamlı etki yapacağı unutulmamalıdır.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Malzeme

Harç üretimi TSE EN 196-1'e [12] uygun CEM I 42.5 R çimento, CEN standard kum ve içilebilir su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Harç bileşim malzemelerine (çimento, bazalt tozu) ait özellikler Tablo 1'de görülmektedir. Harç üretiminde d<sub>50</sub> değeri 30 µ olan bazalt tozu, çimento ile ikameli olarak kullanılmıştır. CEN standard kuma ait agrega tane dağılımı Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 1. Çimento ve bazalt tozunun özellikleri.

Bileşim (%)	CEM I 42.5 R	Bazalt tozu	
CaO	62.85	12.38	
SiO <sub>2</sub>	19.52	44.25	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.36	11.56	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.38	10.63	
MgO	1.15	9.52	
SO <sub>3</sub>	3.36	0.45	
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.22/0.72	0.85/2.36	
Cl <sup>-</sup>	0.0415	0.215	
H <sub>2</sub> O	-	0.2	
Kızdırma kaybı	3.29	-	
Çözünmez kalıntı	0.24	-	
Fiziksel özellikler			
Özgül ağırlık	3.14	-	
Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3810	-	
İncelik (90 µ Elek üzerinde kalan %)	0.2	48.8	
Priz süresi (min)	Başlangıç	115	-
	Bitiş	189	-
Hacim genişmesi (mm)	1	-	
Mekanik özellikler			
Dayanım (MPa)	2 günlük	28,6	-
	7 günlük	41,3	-
	28 günlük	62,5	-

Tablo 2. CEN standard kuma ait agrega tane dağılımı.

Kare elek göz açıklığı (mm)	0.08	0.16	0.50	1.00	1.60	2.00
Elekten geçen kümülatif toplam (%)	99 ± 1	87 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	7 ± 5	0

Bazalt Tozunun Puzolanik Aktivitesi TS 25'e [13] göre belirlenmiş olup puzolanik aktivite deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. TS 25'e [13] göre deney uygulandığında kireç - tras karışımı ile hazırlanan deneme numunelerinin 7 günlük eğilmede çekme dayanımı en az 10 kgf/cm<sup>2</sup> ve 7 günlük basınç dayanımı en az 40 kgf/cm<sup>2</sup> olmalıdır. Puzolanların dayanım sonuçları TS 25'te belirtilen sınır değerlerin üzerindedir. Bazalt tozunun TS 25'e göre puzolanik aktiviteye sahip olduğu söylenebilir.

Tablo 3. Puzolanik aktivite deney sonuçları.

Puzolan	Mekanik Özellikler (kgf/cm <sup>2</sup> )	
	Eğilme Dayanımı	Basınç Dayanımı
Bazalt Tozu	20	55
TS 25 sınırı	≥10	≥40

## 2.2. Deneysel çalışma

Deneysel çalışma, numune üretimi, kürü, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır. Bir dizi deneme üretimi yapılarak s/ç oranı 0.6 olarak alınmıştır. Bazalt tozunun (çimento ile yer değiştirilmesi) harçların fiziksel (basınç altında su işleme derinliği) ve mekanik (basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada

çekme dayanımı) özelliklerine etkisinin belirlenmesi amacıyla 6 adet kontrol harç numunesi olmak üzere toplamda 18 (6+12) adet 100·100·100 mm küp numunesi, 18 (6+12) adet 40·40·160 prizma numunesi üretildi. Harç üretiminde %5, %10, %15 ve %20 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek bazalt tozu kullanıldı. Üretilen harç numunelerinin kodlanması ve karışım miktarları Tablo 4’de görülmektedir. Harç kıvamı TS EN 1015-3 (2000) “Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile)” [14] standardına göre belirlendi. Basınç ve eğilme deneyleri, TS EN 196-1, (2009) “Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini” [12] deney standardına göre yapıldı.

Tablo 4. Harç numunelerinin kodlanması ve 1 m<sup>3</sup> için gerekli karışım miktarları.

Numune kodu	Çimento	CEN standard kum	Su	Bazalt tozu	Bazalt tozu çimento yer değiştirme oranı
	kg	kg	kg	kg	çimentonun kütlece %
ÇBT%0	496.0	1488	297.6	0.0	0
ÇBT%5	471.2	1488	297.6	24.8	5
ÇBT%10	446.4	1488	297.6	49.6	10
ÇBT%15	421.6	1488	297.6	74.4	15
ÇBT%20	396.8	1488	297.6	99.2	20

Basınç altında su işleme derinliği tayini, TS EN 12390-8 (2010) [15] “Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini standardına uygun olarak gerçekleştirildi. Basınç altında su işleme derinliğinin tayini deney düzeneği Şekil 1, eğilme ve yarmada çekme deney düzeneği ise Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 1. Basınç altında su işleme derinliğinin tayini.



Şekil 2. Harç numunelerinde eğilme ve yarmada çekme deneyi.

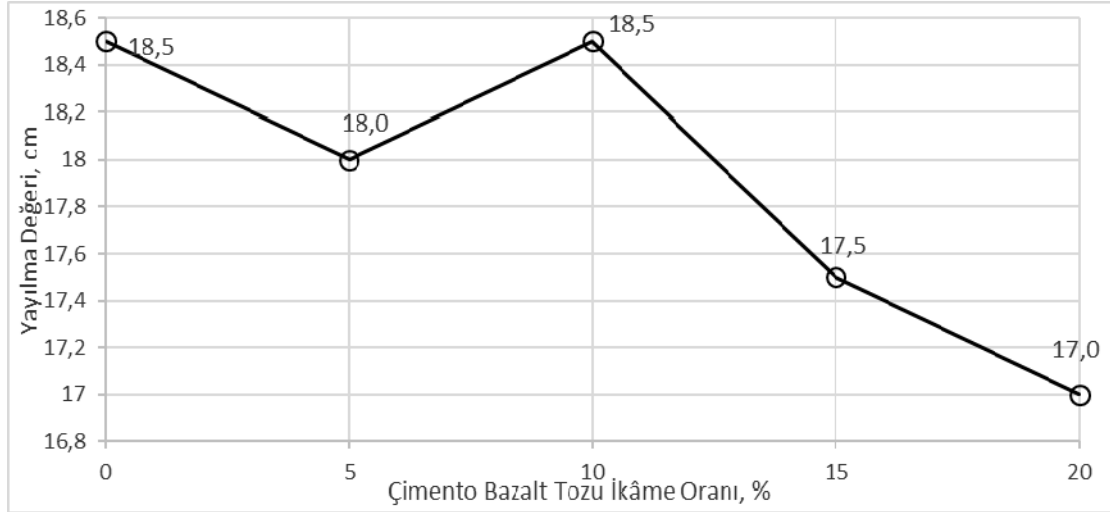
### 3. Sonuçlar ve tartışma

Harç numuneleri üzerinde yayılma tablası, 28. gün sonunda gerçekleştirilen basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve basınç altında su işleme derinliğinin tayini deney sonuçları Tablo 5’de görülmektedir.

Tablo 5. Harç numunelerine ait ölçüm sonuçları.

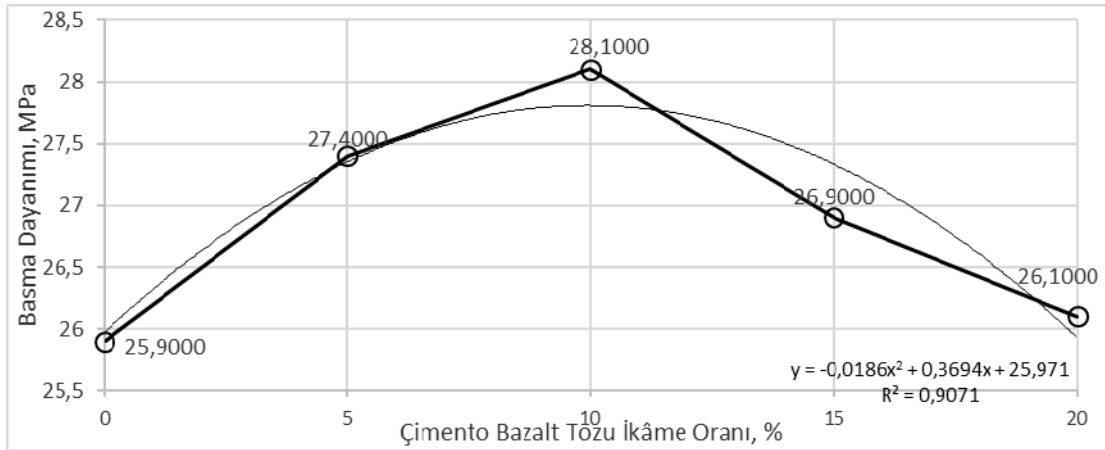
Numune kodu	Yayılma (cm)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Basınçlı Su İşleme Derinliği (mm)
ÇBT%0	18.5	25.9	6.1	4.4	23.9
ÇBT%5	18.0	27.4	6.4	4.4	24.0
ÇBT%10	18.5	28.1	6.9	4.5	24.3
ÇBT%15	17.5	26.9	7.1	4.4	25.2
ÇBT%20	17.0	26.1	7.0	4.3	24.1

Yayılma değerinin, çimento-bazalt tozu ikame oranına göre değişimi Şekil 3’de görülmektedir. Çimento- bazalt tozu ikame oranının % 0 olduğu durum ile %20 olduğu durum arasında 1.5 cm’lik bir yayılma farkı bulunmaktadır. Yayılma değerleri genel olarak azalma eğiliminde olup, bunun nedeni ise bazalt agregasının özgül ağırlığının çimentonun özgül ağırlığına göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bazalt tozu aynı ağırlığa sahip çimentoya göre daha fazla hacim kaplamaktadır.



Şekil 3. Çimento bazalt tozu ikâme oranına göre yayılma değerinin değişimi.

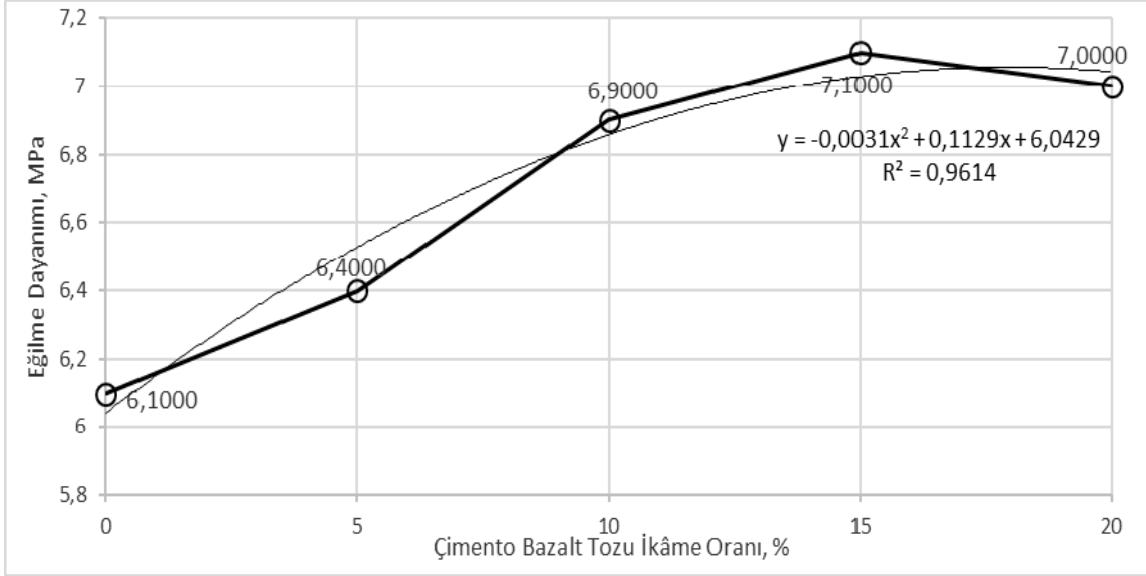
Basınç dayanımının, çimento-bazalt tozu ikame oranına göre değişimi Şekil 4’de görülmektedir. Basınç dayanımında, çimento bazalt tozu ikame oranının %0 olduğu durum ile %20 olduğu durum arasında 0.4 MPa’lık bir fark olduğu görülmektedir. % 0 ve %20 çimento bazalt tozu ikame oranları arasında basınç dayanımı grafiğinde, artışlar ve düşüşler görülmektedir. % 5’lik çimento-bazalt tozu ikame oranında 1.5 MPa’lık bir artış söz konusu iken, bu durum %10’luk ikame oranında 2.2 MPa’lık bir artış meydana getirmiştir. En yüksek basınç dayanımı, çimento bazalt tozu ikame oranının %10 olduğu durumda gözlenmektedir. Deney sonuçlarına göre, atık bazalt tozu ikameli harçların agrega-çimento hamuru ara yüzeyi boşluk yapısı üzerinde olumlu etki yaptığı ayrıca Duan ve arkadaşları[16] tarafından yapılan çalışmayla benzerlik gösterdiği söylenebilir. Mineral katkı kullanımıyla birlikte daha dolu ve yoğun bir yapı meydana gelmiş özellikle agrega-çimento hamuru ara yüzeyi güçlenmiştir.



Şekil 4. Çimento bazalt tozu ikâme oranına göre basınç dayanımının değişimi.

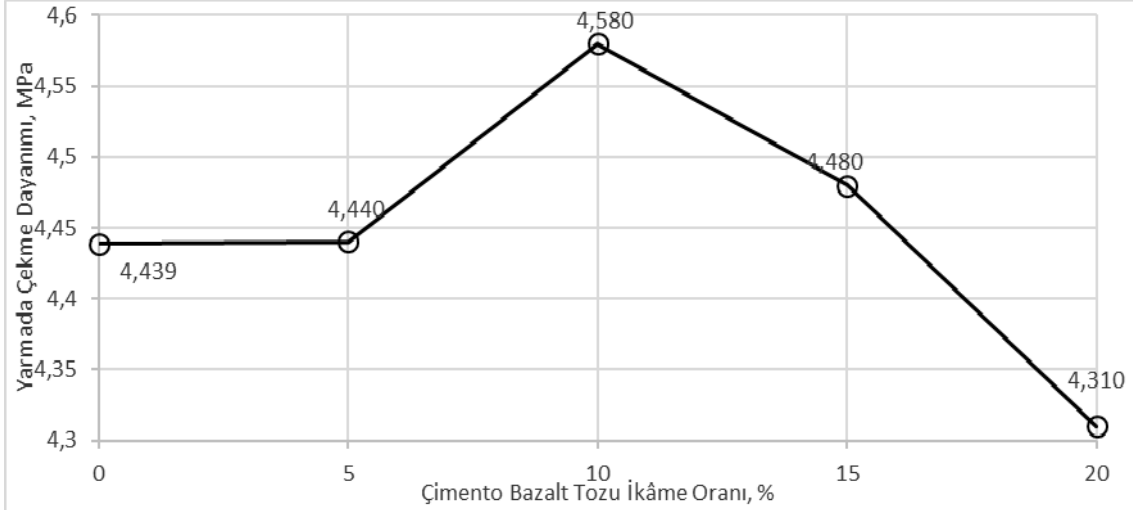
Eğilme dayanımının, çimento-bazalt tozu ikame oranına göre değişimi Şekil 5’te görülmektedir. Çimento bazalt tozu ikame oranındaki artış ile eğilme dayanımında yükselme görülmektedir. Çimento bazalt tozu ikame oranının %0 olduğu durum ile %15 olduğu durum arasında yaklaşık olarak 0.9 MPa dayanım farkı bulunmaktadır. Maksimum harç eğilme dayanımı, çimento bazalt tozu ikame oranının %15 olduğu durumda görülmektedir. Kullanılan mineral katkının incelik derecesine bağlı olarak

puzolanik reaksiyon hızında da artış meydana gelmektedir. Puzolanik aktiviteye bağlı olarak oluşan ürünler çimento hamurunun yoğunluğunu arttırarak çimento taneleri arasındaki boşluklarda da azalma sağlamıştır [17, 18].



Şekil 5. Çimento bazalt tozu ikame oranına göre eğilme dayanımının değişimi.

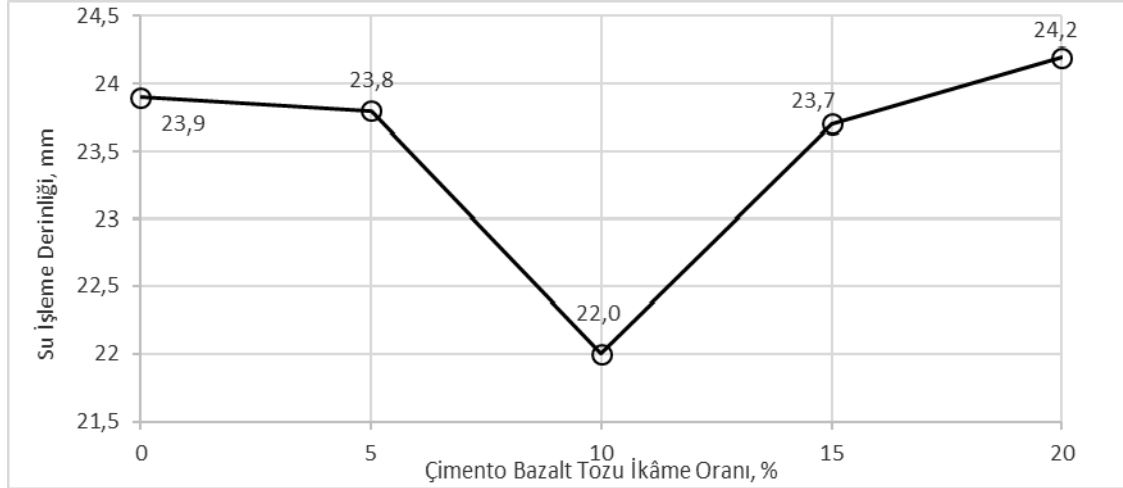
Yarmada çekme dayanımının, çimento-bazalt tozu ikame oranına göre değişimi Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Çimento bazalt tozu ikame oranına göre yarmada çekme dayanımının değişimi.

Yarmada çekme dayanımında, çimento bazalt tozunun %0 olduğu durum ile %20 olduğu durum arasında yaklaşık olarak 0.75 MPa'lık bir dayanım farkı olduğu görülmektedir. Yarmada çekme dayanımındaki değişkenlik, çimento bazalt tozu ikame oranındaki artışa bağlı olarak %10 seviyesinde 0.141 MPa'lık bir artış sağlamıştır. %10-%20 arasında yarmada çekme dayanımında düşüş meydana gelmiştir.

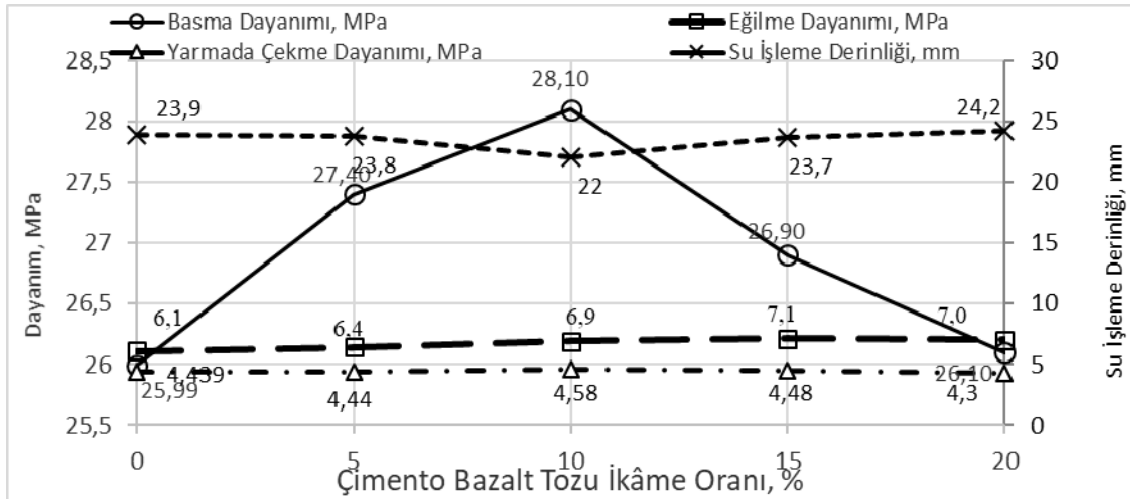
Basınç altında su işleme derinliğinin, çimento bazalt tozu ikame oranına göre değişimi Şekil 7'de görülmektedir



Şekil 7. Çimento bazalt tozu ikame oranına göre su işleme derinliğinin değişimi.

Basınç altında su işleme derinliğinde, çimento-bazalt tozu ikame oranının %0 ve %5 olduğu durumlar arasında belirgin bir fark göze çarpmamaktadır. %10 ikame oranında 1.9 mm'lik bir düşüş meydana gelmiştir. Çimento-bazalt tozu ikame oranının, %10'dan %15'e artırılmasıyla, grafikte ani bir yükselme gerçekleşmekte ve basınç altında su işleme derinliği kontrol serisine yakın bir değer almaktadır. %20 ikame oranında 24.2 mm olmak üzere en yüksek değere ulaşmaktadır. Çimento harcı boşluk yapısındaki kapiler boşluklarda mineral katkı kullanımı ile önemli derecede azalmalar ve jel boşluklarında ise artışlar müşahade edilmiştir [19, 20].

Basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımları ve su işleme derinliğinin çimento bazalt tozu ikame oranına göre değişimi Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Çimento bazalt tozu ikame oranına göre basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımı ve su işleme derinliğinin değişimi.

Şekil 8 incelendiğinde yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımlarının çimento bazalt tozu ikame oranına göre benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Basınçlı su işleme derinliğindeki değişim çok düşük (1.9 mm) olmaktadır. Basınç dayanımı %10 ikame değerinde yaklaşık % 7.5 oranında artış göstermiştir. Bu nedenle çimento ile

bazalt tozunun yer değiştirilerek üretilen numunelerde bazalt tozunun filler etkisi oluşturmadığı söylenebilir.

Deneysel sonuçlardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi aşağıda sıralanmıştır:

- Yapılan basınç deneyinde, kontrol numunesi ile çimento bazalt tozu ikame oranının %10 olduğu numuneler arasında 2.2 MPa'lık dayanım farkı olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı açısından çimento bazalt tozu ikame oranı %10 olarak harç numunelerinde kullanılması tercih edilebilir. Çimento bazalt tozu ikamesi ile basınç dayanımında meydana gelen yükselmenin nedeni mineral katkı içeren harçların içinde portland çimentosu ile yapılmış harçlara oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrat bileşikleri bulunmasıdır.
- Çimento bazalt tozu ikame oranındaki artış ile eğilme dayanımında yükselme görülmektedir. Eğilme dayanımı açısından çimento bazalt tozu ikame oranı %15 kullanılması tercih edilebilir. Ekonomik nedenlerle çimento bazalt tozu ikame oranı %15 yerine %20 miktarında da kullanılabilir.
- Yarmada çekme deneyi sonucunda, çimento bazalt tozu ikame oranının %10 olması durumunda yarmada çekme dayanımında %3'lük bir artış görülmektedir. Fakat %20 oranında %3 kadar bir azalma olduğu görülmektedir; dolayısıyla yarmada çekme dayanımı açısından %5 ve %15 arasında bazalt tozunun mineral katkı olarak kullanılması bir değişikliğe neden olmamaktadır.
- Su işleme derinliğinde, çimento-bazalt tozu ikame oranının %0 ve %5 olduğu durumlar arasında belirgin bir fark göze çarpmamaktadır. %10 ikame oranında 1.9 mm'lik bir azalma ile 22 mm olmak üzere en düşük değer ölçülmüştür. Çimento-bazalt tozu ikame oranının, %10'dan %20'e artırılmasıyla, grafikte bir yükselme gerçekleşmekte ve 24.2 mm olmak üzere en yüksek değere ulaşmaktadır. Geçirimsizlik açısından çimento bazalt tozu ikame oranının %10 olarak kullanılması tercih edilmelidir. Geçirimsizliğin azalmasının nedeni bazalt tozunun mineral katkı olması yanında ince bir dolgu maddesi olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca puzolanik etki sonucu serbest kireci bağlayarak çimento hamuru boşluk yapısında oluşan değişimler nedeniyle geçirimsizlik azalmaktadır.
- Puzolanlardaki CaO/SiO<sub>2</sub> oranı arttıkça C-S-H azalmaktadır. CaO/SiO<sub>2</sub> oran kontrol numunelerde 3.22 iken bazalt tozu ikamelilerde 0.28 mertebesinde. Bu nedenle bazalt tozu ikameli karışımlarda C-S-H oranı yüksek olduğundan atık bazalt tozu mekanik özelliklere olumlu katkı sağlamaktadır.
- Bazalt tozunun çimento ile %10 yer değiştirilerek kullanılması harç numunelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmektedir. Fakat harç numunelerinin dayanıklılık özellikleri üzerindeki etki düzeyinin de belirlenerek ortaya konması gerekmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Öztürk, Ö., Çelikkol M. ve Erkan M., Türkiye Agrega Sektör Raporu, Agrega Üreticileri Birliği, İstanbul, (2007).



- [2] Bacarji, E., Toledo Filho, R. D., Koenders, E.A.B., Figueiredo, E.P. and Lopes, J.L.M.P., Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers, **Construction and Building Materials**, 45, 1-10, (2013).
- [3] TS EN 13055, Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbet kullanım için, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2016).
- [4] Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın S., Beton, DEÜ Mühendislik Yayınları, (2012).
- [5] Neville A.M. and Brooks J.J., Concrete Technology, Pearson, Prentice Hall, 257-262, (2001).
- [6] Neville, A. M., Properties of Concrete, Longman, 433-434, (1995).
- [7] Mehta, P.K., Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes, **7th Int. Cong. on the Chemistry of Cement**, Paris, 3 (7), 1-5, (1980).
- [8] Ertün, T., Türker, P. ve Başkoca, A., Farklı çimento tipleriyle hazırlanan yüksek performanslı harçların geçirimsizliği, **6. Ulusal Beton Kongresi**, 361-369, (2005).
- [9] Dobiszewska, M., Schindler, A.K., Pichór, W., Mechanical properties and interfacial transition zone microstructure of concrete with waste basalt powder addition, **Construction and Building Materials**, 177, 222-229, (2018).
- [10] Saraya, M.E.I., Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study, **Construction and Building Materials**, 72, 104-112, (2014).
- [11] Laibao, L., Yunsheng, Z., Wenhua, Z., Zhiyong, L. and Lihua, Z., Investigating the influence of basalt as mineral admixture on hydration and microstructure formation mechanism of cement, **Construction and Building Materials**, 48, 434-440, (2013).
- [12] TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2009).
- [13] TS 25, Doğal puzolan (tras) - Çimento ve betonda kullanılan - Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2008).
- [14] TS EN 1015-3, Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayıma tablası ile), **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2000).
- [15] TS EN 12390-8, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, (2010).
- [16] Duan, P., Shui, Z., Chen, W., and Shen, C., Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete, **Construction and Building Materials**, 44, 1-6, (2013).
- [17] Mindess, S., Young, J.F., and Darwin, D., Concrete, second ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ., (2003).
- [18] Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T., Modeling of concrete performance: hydration, microstructure formation and mass transport, Taylor & Francis Group, London, (1999).
- [19] Jiang, G., Rong, Z., and Sun, W., Effects of metakaolin on mechanical properties, pore structure and hydration heat of mortars at 0.17 w/b ratio, **Construction and Building Materials**, 93, 564-572, (2015).
- [20] Kuzielová, E., Žemlička, M., Bartoničková, E., ve Palou, M.T., The correlation between porosity and mechanical properties of multicomponent systems consisting of Portland cement–slag–silica fume–metakaolin, **Construction and Building Materials**, 135, 306-314, (2017).

# Determination of insecticide imidacloprid residues in Tokat city water by using enzyme-linked immunosorbant assay (ELISA)

Meryem Şenay ŞENGÜL DEMİRRAK\*

Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Arts & Sciences,  
Department of Molecular Biology and Genetics, Tasliciftlik Campus, Tokat, Turkey

Geliş Tarihi (Received Date): 15.02.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.05.2019

## Abstract

*Imidacloprid is a common neonicotinoid insecticide applied in agricultural fields worldwide. Imidacloprid residues can be detected in water resources as it can accumulate in the surface and ground water after insecticide applications through many years. Because of this, a fast and efficient method, enzyme-linked immunosorbant assay (ELISA), is used to determine the imidacloprid levels in water sample collected from Tokat city water system and compared with a commercially available bottled water sample. Imidacloprid residue was not detected in bottled water sample. However, imidacloprid residues were detected in Tokat city water close to the maximum residue limit of imidacloprid. The results indicate that the Tokat city water system could be at the risk of imidacloprid contamination. This study also shows that ELISA technique can be effectively used for imidacloprid determination since it is fast and reliable and well correlated with other time consuming and cost-effective analytical methods.*

**Keywords:** Imidacloprid, ELISA, water, pesticide residue.

## Tokat ili su örneklerinde insektisit imidacloprid kalıntılarının enzim-bağımlı immunosorbent analizi (ELISA) ile belirlenmesi

## Özet

*İmidacloprid, dünya çapında tarım alanlarında uygulanan yaygın bir neonicotinoid insektisittir. Uzun yıllar boyunca insektisit uygulamaları, yüzey ve yeraltı sularında imidacloprid kalıntılarının birikebileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, hızlı ve etkili bir yöntem olan ELISA tekniği kullanarak Tokat ili su şebekesinden alınan örnekte*

\* Meryem Şenay ŞENGÜL DEMİRRAK, senay.sengul@gop.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-4879-1908>

*imidacloprid seviyesine bakılmış ve ticari olarak satılan şişe suyu ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Şişelenmiş su örneğinde imidacloprid kalıntısı saptanmamıştır. Fakat Tokat ili şebeke suyunda maksimum kalıntı limit alt sınır miktarı kadar imidacloprid tespit edilmiştir. Bu sonuç, Tokat ili suyunun imidacloprid ile kontamine riskini göstermektedir. Ayrıca bu çalışma, ELİSA tekniğinin hızlı, güvenilir ve diğer pahalı ve uzun analiz süresi gerektiren analitik metodlarla korelasyon göstermesi bakımından etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.*

**Anahtar kelimeler:** İmidakloprid, ELİSA, su, pestisit kalıntısı.

## 1. Introduction

Pesticides are heterogenous chemicals that are used to increase crop productivity and fight with insect-borne diseases. An insecticide is a pesticide that targets insects to control their destruction. Imidacloprid, 1-(6-chloro-3-pyridylmethyl)-2-nitroimidazolidine, is a new class of neonicotinoid insecticide [1-3]. It has been effectively used to cope with hemipteran (sucking) insects in agriculture worldwide due to its low toxicity in mammals and high effectiveness against insects [4-7]. It can be used directly on seeds and plants or can be applied to soil. Despite its benefits, it is a cause of environmental risk to other organisms and human being [8-11].

Several methods have been developed for the analysis of various insecticides. Detection of imidacloprid by analytical methods include gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), high-performance liquid chromatography (HPLC) and liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (LC MS/MS) [12-17]. These methods are very sensitive but require complex sample extraction procedure, large scale expensive instruments and trained personelle. Alternatively, enzyme-linked immunosorbent assays (ELISAs) have been widely used for the determination of imidacloprid residues in various samples [18-29]. ELISA is a faster, more sensitive, more effective, and high-throughput method which requires low budget to run various samples at the same time.

Pesticide consumption is gradually increasing worldwide, including Turkey, to increase agricultural production. To overcome problems associated with its misuse, application regulations were made by Government agencies and European Union Commission and maximum residue limits (MRLs) have been established for many consumable products [30-31]. For drinking water, the MRL has been determined as 0.1 µg/l for individual pesticides [32-33]. Despite these regulations, imidacloprid residue contaminations have been detected in soil and in water sources after many years of application [34]. In California (USA), it has been reported that 19 % of the water samples from three different agricultural fields has been found to be contaminated with imidacloprid, exceeding the limit of 1.05 µg/l [35]. A few study in Turkey have also indicated that the surface and groundwater were contaminated with pesticides in regions related with agricultural activities [36-38].

In this study, imidacloprid contamination was investigated in drinking water sample collected in the city of Tokat by ELISA technique. A bottled water sample is used as a control since we assume that the bottled water should be tested for many chemicals and pesticides. Tokat province is one of the largest agricultural areas located in Middle

Black Sea region and is a major contributor to the national agricultural food stock [39]. Despite the fact that 37% of the landscape in Tokat is occupied with agriculture, there is no evaluation of imidacloprid insecticide residues in agricultural samples and water resources in this region. This work provides the first preliminary study that determines imidacloprid residues in the Tokat city water sample. ELISA method can be effectively used in measurement of imidacloprid residues in water samples and a variety of agricultural products for proper assessment of human exposure to pesticides.

## **2. Material and methods**

### **2.1. Reagent, materials and samples**

The analytical grade imidacloprid was purchased from Sigma-Aldrich (Germany). The stock standard solution (50 ppm) was prepared by dissolving imidacloprid in methanol (Merck, Germany). Seven different standard levels (6, 4, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 ppb) were prepared by serial dilutions of the stock solution and stored at 4 °C until use.

The EnviroLogix QuantiPlate Kit for Imidacloprid (Model EP-006, Portland, ME), with an assay range from 0.2 to 6 parts per billion (ppb) was used for ELISA. Absorbances were measured at 450 nm with a microplate reader (Multiskan GO, Thermo Scientific).

The water samples tested in this study is a tap water collected in Tasliciftlik Campus which is about 10 km apart from Tokat city center. This region is mainly surrounded by agricultural fields. A bottled drinking water is also used as a control for comparison.

### **2.2. ELISA analysis**

The ELISA kit consists of 12 strips of 8 anti-imidacloprid coated antibody wells each and three calibrators (0.2, 1, and 6 ppb). Briefly, 100 µl of negative control, each calibrator, serial dilutions of the standards, and water samples were added to individual wells on the microtiter plate in duplicate. 100 µl of imidacloprid-enzyme conjugate was added immediately to each well and mixed gently. The plate was covered with parafilm to prevent evaporation and placed on an orbital shaker at 200 rpm for 1 hr at room temperature. After incubation, the contents of the wells were discarded and the wells were washed four times with cold water and tapped dry. 100 µl substrate was added to each well, mixed gently and covered with parafilm and shaken at 200 rpm on the orbital shaker. After 30 min of incubation, 100 µl stop solution was added to each well and yellow color development was checked. Quantitation of the assay was based on the optical density reading on each well at 450 nm.

Measured absorbances were normalized using the formula  $B/B_0$ , where  $B_0$  is the absorbance measured at zero concentration of imidacloprid and  $B$  refers to the absorbance of the standard (or calibrator) point [32]. A  $B_0$  of 1.0 (or %  $B_0$  of 100%) indicates the maximum amount of imidacloprid enzyme-conjugate bound to the antibody in the absence of imidacloprid (such as negative control). The data were fitted with the four-parameter logistic equation using SigmaPlot Version 14.0 (Systat Software, San Jose, CA, USA).

**3. Results and discussion**

The competitive ELISA assay results were determined as absorbance measurements that are inversely proportional to the imidacloprid determination. Figure 1 shows the competitive standard curves as a plot of % B<sub>0</sub> values versus concentration of imidacloprid with self-made standard solutions (0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 6 ppb) and the kit-provided calibrators (0.2, 1, and 6 ppb).

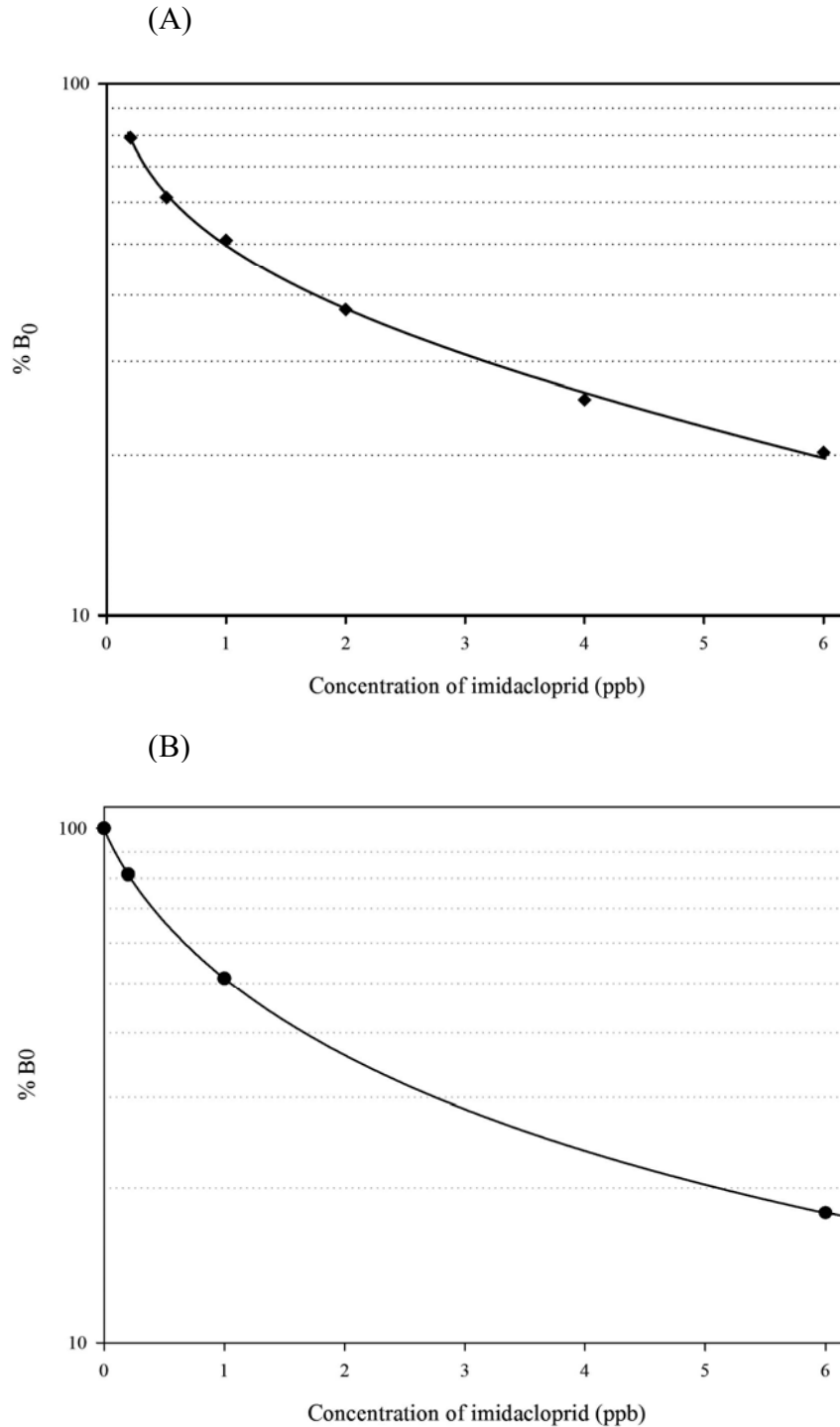


Figure 1. ELISA calibration curve for imidacloprid produced with self-made standard solutions (A) and kit-provided calibrators (B). Data are means of two replicates.

The linearity of each curve was determined by the slope calculated as -0.21 and -0.89 for self-made standard solutions and the kit-provided calibrators, respectively. The sensitivity of the ELISA test was determined by the IC<sub>50</sub> value (50 % inhibition of control), which is interpreted as the smaller the IC<sub>50</sub> value, the higher the sensitivity of the ELISA for imidacloprid detection. Accordingly, the IC<sub>50</sub> values were 1.04 ppb and 0.11 ppb for the calibrators and standards, respectively. The sensitivity of the ELISA assay in this study agreed with previously reported work that had IC<sub>50</sub> values in this range [24]. The limit of detection (LOD) of the kit was 0.07 ppb and the experimental LOD was calculated as 0.09 ppb which also indicates higher sensitivity of the assay. The coefficient of variation (CV) for absorbances for the standards, calibrators and the samples were as predicted (lower than 15 %). These results indicate that the ELISA method is sensitive for imidacloprid detection in water samples used in this study. While the bottled drinking water had no detectable imidacloprid residue, drinking water collected from Tokat province had imidacloprid residue level at the acceptable lower limit of MRL accepted by the European Union Commission.

#### 4. Conclusion

A rapid and sensitive ELISA method was conducted to determine imidacloprid residue level in city water and bottles water samples. Due to the large scale usage of imidacloprid in agricultural fields and lack of studies on imidacloprid contamination in water resources in Tokat province, it is important to assess a preliminary work to determine imidacloprid contamination in Tokat. According to our results, although the imidacloprid residue level does not exceed the MRL accepted in Europe, it is highly possible that it can be gradually increased in the long term if the usage of insecticide is not controlled in the future. This work clearly indicates that there could be a potential risk of imidacloprid contamination in Tokat. As an alternative to analytical methods, ELISA provides a simple and cost-effective screening method to efficiently quantify imidacloprid residues in various samples including water samples, agricultural products and food consumables. In the future work, agricultural products will be checked for imidacloprid contamination to understand the risk of insecticide contamination in the same location.

#### References

- [1] Kagabu, S., New insecticide imidacloprid, **Chemical Biology**, 31, 521-523, (1993).
- [2] Kagabu, S. and Medej, S., Stability comparison of imidacloprid and related compounds under simulated sunlight, hydrolysis conditions, and to oxygen, **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, 59, 980-985, (1995).
- [3] Kagabu, S. and Matsuno, H., Chloronicotinyl insecticides. 8. Crystal and molecular structures of imidacloprid and analogous compounds, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 45, 1, 276-281, (1997).
- [4] Bai, D., Lummis, S. C. R., Leicht, W., Breer, H. and Sattelle, D. B., Actions of imidacloprid and a related nitromethylene on cholinergic receptors of an identified insect motor neurone, **Pesticide Science**, 33, 197-204, (1991)

- [5] Mullins, J. W., Imidacloprid. A new nitroguanidine insecticide, **ACS Symposium Series American Chemical Society**, No. 524, 183-198, (1993).
- [6] Zwart, R., Oortgiesen, M. and Vijverberg, H. P. M., Nitromethylene heterocycles: selective agonists of nicotinic receptors in locust neurons compared to mouse N1E-115 and BC3H1 cells, **Pesticide Biochemistry and Physiology**, 48, 202-213, (1994).
- [7] Buckingham, S. D., Lapiéd, B., Le Corronc, H., Grolleau, F. and Sattelle, D. B., Imidacloprid actions on insect neuronal acetylcholine receptors, **Journal of Experimental Biology**, 200, 2685-2692, (1997).
- [8] Liou, H.H., Tsai, M.C., Chen, C.J., Jeng, J.S., Chang, S.C., Chen, S.Y. and Chen, R.C., Environmental Risk Factors and Parkinson's Disease: a Case-Control Study in Taiwan, **Neurology**, 48, 1583-1588, (1997).
- [9] Gong, R.Z., Chen, R. and Chen, L.Y., Evaluation on toxicity and safety of imidacloprid to environmental organisms, **Pesticide Science and Administration**, 20, 12-16, (1999).
- [10] Garry, V.F., Harkins, M.E., Erickson, L.L., Long-Simpson, L.K., Holland, S.E. and Burroughs, B.L., Birth Defects, Season of Conception, and Sex of Children Born to Pesticide Applicators Living in the Red River Valley of Minnesota, USA, **Environmental Health Perspectives**, 110, 441-449, (2002).
- [11] Richter, E.D. and Chlamtac, N., Ames, Pesticides, and Cancer Revisited. **International Journal of Occupational and Environmental Health**, 8, 63-72, (2002).
- [12] Placke, F. J. and Weber, E., Method of determining imidacloprid residues in plant materials. **Pflanzenschutz- Nachrichten**, 46, 109, (1993).
- [13] Naval 'on, A., Gonz'alez-Casado, A., El-Khattabi, R., Vilchez, J.L. and Fern'andez-Alba, A.R., Determination of imidacloprid in vegetable samples by gas chromatography-mass spectrometry, **Analyst**, 122, 579-581, (1997).
- [14] Baskaran, S., Kookana, R.S. and Naidu, R., Determination of the insecticide imidacloprid in water and soil using high-performance liquid chromatography, **Journal of Chromatography A**, 787, 271-275, (1997).
- [15] MacDonald, L. M. and Meyer, T. R., Determination of imidacloprid and triadimefon in white pine by gas chromatography/mass spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 46, 3133-3138, (1998).
- [16] Bonmatin, J.M., Moineau, I., Charvet, R., Fleche, C., Colin, M.E. and Bengsch, E.R., A LC/APCI-MS/MS method for analysis of imidacloprid in soils, in plants, and in pollens, **Analytical Chemistry**, 75, 2027-2033, (2003).
- [17] Schöning, R and Schmuck, R., Analytical determination of imidacloprid and relevant metabolite residues by LC MS/MS, **Bulletin of Insectology**, 56, 1, 41-50, (2003).
- [18] Li, K. and Li, Q.X., Development of an enzyme-linked immunosorbent assay for the insecticide imidacloprid, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 48, 3378-3382, (2000).
- [19] Lee, J.K., Ahn, K.C., Park, O.S., Kang, S.Y. and Hammock, B.D., Development of an ELISA for the detection of the residues of the insecticide imidacloprid in agricultural and environmental samples, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 49, 2159-2167, (2001).
- [20] Zhu, G.N., Gui, W.J., Zheng, Z.T., Cheng, J.L. and Gang, W.U., Synthesis and identification of artificial antigen for imidacloprid, **Agricultural Sciences in China**, 5, 307-312, (2006).

- [21] Wanatabe, S., Ito, S., Kamata, Y., Omoda, N., Yamazaki, T., Munakata, H., Kaneko, T. and Yuasa, Y., Development of competitive enzyme-linked immunosorbent assays (ELISAs) based on monoclonal antibodies for chloronicotinoid insecticides imidacloprid and acetamiprid, **Analytica Chimica Acta**, 427, 211-219, (2001).
- [22] Watanabe, E., Eun, H., Baba, K., Arao, T., Ishii, Y., Endo, S. and Ueji, M., Rapid and simple screening analysis for residual imidacloprid in agricultural products with commercially available ELISA, **Analytica Chimica Acta**, 521, 45-51, (2004).
- [23] Watanabe, E., Eun, H., Baba, K., Arao, T., Ishii, Y., Endo, S. and Ueji, M., Evaluation and validation of a commercially available enzyme-linked immunosorbent assay for the neonicotinoid insecticide imidacloprid in agricultural samples, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 52, 2756-2762, (2004).
- [24] Watanabe, E., Baba, K., Eun, H. and Miyake, S., Application of a commercial immunoassay to the direct determination of insecticide imidacloprid in fruit juices, **Food Chemistry**, 102, 745-750, (2007).
- [25] Kim, H.J., Shelver, W.L. and Li, Q.X., Monoclonal antibody-based enzyme-linked immunosorbent assay for the insecticide imidacloprid, **Analytica Chimica Acta**, 509, 111-118, (2004).
- [26] Xu, T., Jacobsen, C.M., Cho, I.K., Hara, A.H. and Li, Q.X., Application of an enzyme-linked immunosorbent assay for the analysis of imidacloprid in Wiliwili tree, *Erythrina sandwicensis* O. Deg, for control of the wasp *Quadrastichus erythrinae*, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 54, 8444-8449, (2006).
- [27] Xu, T., Wei, K.Y., Wang, J., Ma, H.X., Li, J., Xu, Y.J. and Li, Q.X., Quantitative analysis of the neonicotinoid insecticides imidacloprid and thiamethoxam in fruit juices by enzyme-linked immunosorbent assays, **Journal of AOAC International**, 93, 12-18, (2010).
- [28] Ma, H.X., Xu, Y.J., Li, Q.X., Xu, T., Wang, X.T. and Li, J., Application of enzyme-linked immunosorbent assay for quantification of the insecticides imidacloprid and thiamethoxam in honey samples, **Food Additives & Contaminants: Part A**, 26, 713-718, (2009).
- [29] Peng, F.Y., Jiang, H.R., Chen, Y.X., Chen, S.Z., Lin, Z.H., Liao, P, He, M., Shi, H.C. and Cai, Q., An enzyme-linked immunosorbent assay for detection of imidacloprid, **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, 38, 1737-1741, (2010).
- [30] European Commission, Commission implementing regulation (EU) No. 485/2013, Off. J. Eur. Union, 25 May 2013.
- [31] European Commission, Commission implementing regulation (EU) No. 491/2014, Off. J. Eur. Union, 16 May 2014.
- [32] Gabaldón, J.A., Maquieira, A. and Puchades, R., Current Trends in Immunoassay-Based Kits for Pesticide Analysis, **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 39, 6, 519-538, (1999).
- [33] Posthuma-Doodeman, C.J.A.M., Environmental risk limits for imidacloprid, National Institute for Public Health and the Environment, RIVM Letter report 601716018/2008, Bilthoven, the Netherlands, (2008).
- [34] Goulson, D., An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides, **Journal of Applied Ecology**, 50, 977-987, (2013).



- [35] Starner, K. and Goh, K. S., Detections of the neonicotinoid insecticide imidacloprid in surface waters of three agricultural regions of California, USA, 2010–2011, **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, 88, 3, 316-321, (2012).
- [36] Ekmekci, M., Pesticide and nutrient contamination in the Kestel polje-Kirkgoz karst springs, Southern Turkey, **Environmental Geology**, 49, 19-29, (2005).
- [37] Tuncel, S.G., Oztas, N.B. and Erduran, M.S., Air and groundwater pollution in an agricultural region of the Turkish Mediterranean Coast, **Journal of the Air & Waste Management Association**, 58, 1240-1249, (2008).
- [38] Kıvrak, S. and Gokturk, T., Pesticide analysis and method validation with GC/MSD instrument in environmental water samples, **Nevsehir Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 6, 407-414, (2017).
- [39] Orta Karadeniz Kalkına Ajansı, Tokat ili Tarım ve kırsal kalkınma eylem planı (2018-2023).  
<https://tokat.tarimorman.gov.tr/Belgeler/TOKAT%20%C4%B0L%C4%B0%20TARIM%20VE%20KIRSAL%20KALKINMA%20EYLEM%20PLANI%2018-2023.pdf>, (15.02.2019).

Masere sarımsak (*Allium sativum* Limne) ve Tunceli sarımsağı (*Allium tuncelianum* Kollman) yağlarının yoğun stoklanmış gökkuşağı alabalıklarının (*Oncorhynchus mykiss* W.) bazı kan parametrelerine ve NBT (Nitroblue Tetrazolium) seviyelerine etkileri

Başar ALTINTERİM<sup>1,\*</sup>, Önder AKSU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Malatya Turgut Özal Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Battalgazi Yerleşkesi, Malatya.

<sup>2</sup>Munzur Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi, Aktuluk Yerleşkesi, Tunceli.

Geliş Tarihi (Received Date): 01.03.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 26.08.2019

## Özet

Bu çalışmada, % 2 oranında masere sarımsak (*Allium sativum* L.) ve Tunceli sarımsağı (*Allium tuncelianum* Koll.) yağları, ortalama ağırlıkları:  $39.0 \pm 1.64$  gr. olan gökkuşağı alabalıklarının yemlerine ilave edilmiştir. Çalışmanın sonunda, gökkuşağı alabalıklarının kan parametreleri ve NBT (Nitroblue Tetrazolium) seviyeleri tespit edilmiştir. Sarımsak uygulaması yapılan gruplarda, MCH, P-LCR, PCT, PLT ve MPV parametrelerinde kontrol ve stres gruplarına göre istatistiksel olarak farklılık bulunmuştur ( $P < 0.05$ ). WBC, LYM, MID, RBC, HGB, HCT, MCV, MCHC, RDW-SD, RDW-CV ve PDW, değerleri arasında bir farklılık görülmemiştir ( $P > 0.05$ ). Sarımsak uygulamaları sonucu NBT seviyeleri önemli derecede azalma göstermiştir ( $P < 0.05$ ). Bu durum sarımsağın hücrelerdeki oksidatif stresi azalttığını göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Alabalık, sarımsak yağı, Tunceli sarımsağı, NBT, kan parametreleri.

\* Başar ALTINTERİM, basaraltinterim@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4544-2163>  
Önder AKSU, onderaksu@munzur.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-3735-6732>

## Effects of oils of macerated garlic (*Allium sativum* Limne) and macerated Tunceli garlic (*Allium tuncelianum* Kollman) on some hematological parameters and NBT (NitroblueTetrazolium) levels of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* W.) at high stocking density

### Abstract

*In this study, 2% of macerated garlic (Allium sativum L.) and Tunceli garlic (Allium tuncelianum Kollman) oils were added to the feeds of rainbow trout with an average weight of  $39.0 \pm 1.64$  g. At the end of the study, blood parameters and NBT (Nitroblue Tetrazolium) levels of rainbow trout were determined. A statistically significant increase in the MCH, P-LCR, PCT, PLT and MPV parameters was observed in the groups with garlic application compared to the control and stress groups ( $P < 0.05$ ), although there was a numerical increase in all blood parameters. There was no statistical significant difference between WBC, LYM, MID, RBC, HGB, HCT, MCV, MCHC, RDW-SD, RDW-CV and PDW levels ( $P > 0.05$ ). NBT levels decreased significantly as a result of garlic applications ( $P < 0.05$ ). This shows that garlic reduces oxidative stress in cells.*

**Keywords:** Trout, garlic oil, Tunceli garlic, NBT, blood parameters.

### 1. Giriş

Sarımsak (*Allium sativum* L.), eski çağlardan günümüze hem yemeklere lezzet vermek, hem de hastalıklara ilaç olarak kullanılmış bir bitkidir. Sarımsak ve içerdiği maddeler, immün sistem fonksiyonlarını artırıcı, kansere karşı koruyucu [1], kardiyovasküler sistemi koruyucu [2], antimikrobiyal [3] ve antioksidan [4] özelliklere sahiptirler.

Bitkiler balıklar üzerinde farklı çalışmalarda dezenfektan veya terapötikler şeklinde çeşitli çalışmalarda kullanılmaktadır [5, 6, 7, 8, 9]. Bitkiler balıklara genellikle farklı yöntemler ile direk olarak verilir veya suyun özelliklerini değiştirerek balığa etki ettirmek üzere su ortamına bırakılır [10].

Yapılan bir çalışmada masere sarımsak yağının, su buharı distilasyonuna ve taze sarımsağa göre içerdiği maddeler açısından en zengin ürün olduğunu tespit etmiştir. Özellikle tiyosülfinatlar, vinilditiinler, sülfidler ve ajoene geçişleri en yüksek seviyede elde edilmiştir [11]. Özellikle allisin (dialiltiyosülfat) sarımsağın en dikkat çekici maddesidir. Allisin, antimikrobiyal özelliği, bağışıklık hücrelerinin fagositoz fonksiyonu kolaylaştırdığı ve bakterisit aktivitesini artırdığı, ek olarak, doğal öldürücü hücreleri uyardığı, lizozim ve antikor cevaplarını artırdığı bildirilmektedir [12, 13].

Ezilmemiş sarımsak taneleri nispeten kokusuzdur ve aynı zamanda S-allil-sisteinsülfoksit olarak da bilinen kükürt içeren bir amino asit türevi olan alliiini içerir. Alliin, sarımsak kesildiğinde veya ezildiğinde aktive olan enzim alliinaz enziminin yardımıyla allisin haline dönüştürülür. Alil-2-propeniyosülfinat olarak da bilinen

uçucu bir bileşik olan allisin, sarımsağa keskin kokusunu verir. Allisin, antibiyotik aktivitesi olan reaktif bir oksidandır. Aslında, allisin salgılayan doğranmış sarımsak, antibiyotiklerin keşfedilmesinden önce yaraları tedavi etmek için kullanılmaktaydı. Bununla birlikte, in vivo olarak, allisin biyolojik olarak temin edilemez ve sarımsak veya sarımsak preparasyonları yedikten sonra kanda hemen hemen tespit edilemez. Allisin yağda çözünür organosülfür bileşiklerine ayrışır [14].

Tunceli sarımsağı (*Allium tuncelianum* Kollman), doğal olarak yetişen tek diş sarımsak olarak da bilinen Tunceli-Ovacık yöresine ait bir sarımsak türüdür. Diğer sarımsak türlerine kıyasla daha az kokuya sahiptir. Sarımsak türlerinin hepsinin antioksidan kapasiteleri yüksektir. Özellikle ihtiva ettiği allisin antioksidan kapasitenin büyük bir bölümünü oluşturur [15].

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Deneyin hazırlanması

Çalışmada ortalama canlı ağırlığı  $39.0 \pm 1.64$  gr. olan gökkuşağı alabalıkları (n: 160) kullanılmış ve çalışma üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk stresi gruplarında; kontrol stres grubu: 50 balık, masere sarımsak yağı stres grubu: 50 balık, masere Tunceli sarımsağı yağı stres grubu: 50 balık ve normal kontrol grubunda: 10 balık, 200 litrelik tanklara yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan sarımsak ve Tunceli sarımsağı Elazığ da yöresel bir satıcıdan temin edilmiştir. Masere yağın elde edilmesi için sarımsaklar 15 gün boyunca ayçiçeği yağında (1/10 oranında) bekletilmiştir. Elde edilen masere yağlar alabalıklarının yemlerine % 2 oranında ilave edilmiştir. Tüm çalışma boyunca balıklar sabah ve akşam olmak üzere günde iki kere ticari bir alabalık yemi ile 42 gün boyunca beslenmiştir. Yemleme günlük olarak balıkların canlı ağırlıklarının ortalama % 2'si oranında uygulanmıştır.

### 2.1. Kan analizleri

Kan alma işlemi balıklardan besleme yapılmadan gerçekleştirilmiş ve balıklar kan alma işleminden önce anestezi madde ile (Benzocaine 30 mg/L) bayıltılmıştır. Denemeler etik kurallara uygun olarak gerçekleştirilmiştir (İnönü Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Deney Hayvanları Etik Kurulu, Protokol No: 2013/A-71). Bayıltılan balıkların kuyruk venalarından enjektörle kan örnekleri alınarak içerisinde EDTA bulunan tüplere aktarıldı. EDTA'lı kan örneklerinden tam kan sayımı ve NBT testi, aynı gün içerisinde yapıldı. WBC (Lökosit), LYM(Lenfosit), MID (Monosit), RBC (Eritrosit), HGB (Hemoglobin), HCT (Hematokrit), MCV (Ortalama Eritrosit Hacmi), MCH (Hücre hemoglobin ortalaması), MCHC (Ortalama Eritrosit Hacmi), RDW-SD (Kırmızı kan hücresi dağılım genişliği-standart sapma), RDW-CV (Kırmızı kan hücresi dağılım genişliği-varyasyon katsayısı), PLT (Trombosit), MPV (Ortalama trombosit hacmi), PDW (Trombosit dağılım genişliği), PCT (Tombosit yüzdesi), P-LCR (Trombosit-hücre genişliği oranı) parametrelerinin tespiti, PROCAN PE6800VET marka tam otomatik hematoloji analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

### 2.2. İstatistiksel analiz

Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) Version 24.0 programı kullanılmıştır. Elde edilen hematolojik verilerin değerlendirilmesi  $P < 0.05$  güven aralığında normal dağılım göstermeyen değerler için Kruskal wallis testi yapılmıştır. İkili gruplar arasında da mann whitney u testi uygulanmıştır.

### 3. Sonuçlar ve tartışma

MCH, PLT, MPV, PCT, P-LCR kan parametreleri ve NBT seviyelerinde istatistikî olarak anlamlı farklılık bulunmuştur ( $P<0.05$ ). WBC, LYM, MID, RBC, HGB, HCT, MCV, MCHC, RDW-SD, RDW-CV, PDW, değerleri arasındaki fark önemsiz bulunmuştur ( $P>0.05$ ). Yemlere ilave edilen sarımsak yağlarının kan ve NBT parametreleri üzerindeki etkileri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Deneme gruplarındaki balıkların kan ve NBT değerleri.

Kan parametreleri	Kontrol normal	Kontrol stres	Sarımsak stres	Tunceli sarımsağı stres
NBT	0.54±0.16 <sup>a</sup>	0.72±0.03 <sup>ab</sup>	0.24±0.04 <sup>b</sup>	0.22±0.01 <sup>b</sup>
MCH (pg)	23.76±6.24 <sup>a</sup>	39.85±8.27 <sup>b</sup>	44.77±2.21 <sup>b</sup>	47.50±0.90 <sup>b</sup>
PLT (10 <sup>3</sup> /μL)	1538.66±454.5	464.5±177.48	52.25±28.22	19±5.56
MPV (fL)	10.9±1.6 <sup>a</sup>	8±0.56 <sup>a</sup>	11.67±1.93 <sup>a</sup>	14.36±0.4 <sup>b</sup>
PCT (%)	1.62±0.28 <sup>a</sup>	0,74±0.6 <sup>b</sup>	0.02±0.05 <sup>c</sup>	0.02±0.01 <sup>c</sup>
P-LCR (%)	26.26±8.42 <sup>a</sup>	11.25±3.74 <sup>b</sup>	34.52±12.58 <sup>c</sup>	53.2±2.42 <sup>d</sup>
MCHC (g/dl)	31.03±17.07	44.45±1.48	46.72±1.59	43.73±2.34
WBC (10 <sup>3</sup> /μL)	41.73±10.75	39.45±7.42	41.68±13.64	51.2±7.53
LYM (%)	92.53±1.84	88.6±6.22	93.25±1.95	93.4±0.75
LYM# (10 <sup>3</sup> /μL)	38.66±10.34	34.7±4.10	38.85±12.71	47.86±7.41
GRAN (%)	2.66±0.98	5±3.67	2.3±0.69	2.16±0.37
GRAN#(10 <sup>3</sup> /μL)	1.06±0.4	2.1±1.83	0.9±0.4	0.9±1.1
MID#(10 <sup>3</sup> /μL)	2±0.45	2.65±1.48	1.92±0.85	2.23±0.11
MID (%)	4.8±0.9	6.4±2.54	4.45±1.27	4.43±0.47
RBC (10 <sup>6</sup> /μL)	2.89±0.42	1.73±0.54	1.74±0.66	2.04±0.5
HGB (g/dl)	6.96±2.41	7.15±3.6	7.9±3.24	9.73±2.51
HCT (%)	24.06±5.77	16.2±8.62	16.9±6.85	22.46±6.78
MCV (fL)	84.1±19.87	90.3±21.21	96.25±6.21	106.06±6.96
RDW-SD (fL)	65.66±10.92	50.2±7.91	61.35±7.58	60.1±5.69
RDW-CV (%)	17.33±7.07	11.75±0.77	13.57±2.01	11.76±1.85
PDW (%)	14.76±4.46	8.2±0.0	9.2±1.19	17.1±7.34

\*: Aynı satırdaki farklı harfler istatistikî bakımından önemlidir ( $P<0.05$ ). Ortalama+ standart sapma değerleri verilmiştir.

Masere sarımsak (Elazığ) ve Masere ovacık sarımsağı yağlarının uygulandığı balıkların trombosit seviyelerinin azalması, besi yağlarında bulunan bileşiklerin antikoagülan etkisiyle stres etkilerini azaltmada rol oynayabileceği hipotezini desteklemektedir [16, 17]. Özellikle bu etki Ovacık sarımsak yağında daha belirgin olarak ortaya çıkmıştır.

Taze sarımsağın % 1-2-3 oranlarında alabalık yemlerine ilave edilerek gerçekleştirilen bir denemede % 1'lik grubun MCH, RBC, HB, HCT değerleri istatistikî olarak önemli bulunmuştur. Bizim çalışmamızda da benzer şekilde MCH değeri istatistikî olarak önemli çıkmıştır. Ancak sarımsak yağları gruplarımızda ki balıklarda RBC, HB, HCT değerlerinin istatistikî olarak önemsiz olduğu belirlenmiştir [18]. Kan endeksleri (MCV, MCH ve MCHC), çoğu hayvanda anemi tanısı için özellikle önemlidir. Çalışmamızda, en yüksek MCH düzeyi Tunceli sarımsağında tespit edilmiştir. Ayrıca normal kontrol grubuna göre stres gruplarının MCH seviyelerinde belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, Shalby ve ark., 2006'da belirttiği gibi MCH'deki bu artış, sarımsak yağlarının eritropoezi uyardığını göstermektedir [19]. MCHC değerleri arasında önemli bir farka rastlanılmamış olmakla birlikte, stres arttıkça rakamsal olarak değerlerin yükseldiği belirlenmiştir. MCH ve MCHC değerlerinin anemi durumuna paralel olarak artış göstermesi beklenen bir sonuçtur.

Sarımsak ekstraktı kullanılan bir diğer çalışmada ise WBC değerleri arasındaki farklılığın, bu çalışmada olduğu gibi istatistikî açıdan önemsiz olduğu bildirilmiştir [20].

MCH, MCHC, PDW, PCT seviyelerindeki artış hematopoietik organları ve immün hücreleri uyardığını ortaya koymaktadır [21].

Hastalık etkeni (*Pseudomonas fluorescens*) uygulanan bir çalışmada tedavi amacıyla sarımsak uygulanan grupta hastalıkla baş edebilmek açısından NBT değerinin diğer gruplara göre anlamlı şekilde yükseldiği bildirilmiştir [22]. Benzer bir çalışmada *Aeromonas hydrophila* enfeksiyonuna karşı tedavi uygulamasında NBT seviyelerinde artış olduğu vurgulanmıştır [23].

Daha önce yapılmış bir diğer çalışmada ise yoğun sayıda depolanmış balıkların makrofaj ve nötrofillerinin aktivasyonunda artış olduğu beyan edilmiştir [24]. Artan makrofaj ve nötrofil aktivitesi NBT seviyesinde ki artışla paralellik göstermektedir.

Yüksek yoğunlukta stoklama çalışılan benzer çalışmalarda kontrol grubuna göre artan yoğunluk ile birlikte oksijen radikallerinin üretiminin benzer şekilde arttığı görülmüştür [25].

Özellikle monosit ve nötrofillerin immün yanıtında bir indikatörü olan fagositik aktivitenin tespitinde kullanılan, NBT aktivite testine göre, denememizde stres kontrol grubunun, normal kontrol grubuna göre arttığı görülmüştür. Ayrıca sarımsak stres gruplarında bu stresi baskılayıcı ve negatif feedback etkisi gösterdiği tespit edilmiştir. Strese bağlı olarak immün sistemde meydana gelen artış ile birlikte üretilebilecek serbest radikal miktarı vücuda zarar verebilme ihtimaline karşı sarımsak grupları özellikle Tunceli sarımsağının, dengeleyici olarak görev yaptığı görülmüştür.

Çalışmamızda kullandığımız sarımsak yağlarındaki antioksidan maddeler, gerek yoğunluktan dolayı azalan oksijen miktarından kaynaklanan stresi, gerekse de yem için

ortaya çıkan rekabet stresine bağlı olarak makrofajlar ve nötrofiller tarafından üretilen serbest radikallerin yüksek seviyelerini düşürerek normal seviyeye getirdiğini göstermiştir. Sarımsak yağ gruplarındaki NBT seviyelerindeki düşüş bunun göstergesidir. Ağbaş ve ark., 2013 çalışmalarında beyan ettikleri gibi Tunceli sarımsağının NBT değerlerindeki düşüşün normal sarımsağa göre daha düşük olması ise içerdiği antioksidan maddelerin normal sarımsağa göre daha yüksek miktarda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [26].

Sonuç olarak ülkemizde üretimi gerçekleştirilen ve maliyetli olmayan sarımsakların masere yağlarının, balık stresinin giderilmesinde ve profilaktif olarak kullanımı tavsiye edilmektedir.

## Kaynaklar

- [1] You, W.C., Blot, W.J., Chang, Y.S., Ershow, A., Yang, Z.T., An, Q., Henderson, B.E., Fraumeni, J.F. Jr, Wang, T.G., Allium vegetables and reduced risk of stoma chncancer, **Journal of the National Cancer Institute**, 81, 2, 162-4, (1989)
- [2] Amagase, H., Petesch, B.L., Matsuura, H., Kasuga, S., Itakura, Y., Intake of garlic and its components, **The Journal of Nutrition**, 131, 3, 955–962, (2001).
- [3] Erkan, N. and Bilen, G., Effect of essential oil streatment on the frozen storage stability of chub mackerel fillets, **Journal für Verbraucher schutz und Lebensmittelsicherheit**, 5: 101–110, (2010).
- [4] Imai, J., Ide, N., Nagae, S., Moriguchi, T., Matsuura, H., Itakura, Y., Antioxidant and radical scavenging effects of aged garlic extract and its constituents, **Planta Medica**, 60, 5, 417-20 (1994).
- [5] Chang, S.T., Chen, P.F. and Chang, S.C., Antibacteriel activity of leaf essantial oils and their consituents from *Cinnamon osmophloeum*, **Journal of Ethanopharmacology**, 77, 123-127 (2001).
- [6] Choriantopoulos, N.G., Giaouris, E.D., Skandamis, P.N., Haroutounian, S.A. and Nychas, G.J.E., Disinfectant test against monoculture and mixed-culture biofilms composed of technological, spoilage and pathogenic bacteria: Bactericidal effect of essential oil and hydrosol of *Satureja thymbra* and comparison with standard acidbase sanitizers, **Journal of Applied Microbiology**, 104, 1586–1596 (2008).
- [7] Gulec, A.K., Altinterim, B. and Aksu, O., Determination of lethal concentration (LC50) values of *Cinnamomum zeylanicum* hydrosol on carp fish, **Iranian Journal of Fisheries Sciences**, 12, 1, 34-44, (2013).
- [8] Altinterim, B., Kutluyer, F. and Aksu, O., Oksijen Radikal Absorbans Kapasitesi (ORAK) Seviyeleri Farklı Bitki Masere Yağlarının Yoğun Stoklanmış Gökkuşluğu Alabalıklarının (*Oncorhynchus mykiss*) Bazı Kan Parametrelerine Etkileri, **Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi**, 13, 1, 63-69, (2018a).
- [9] Altinterim, B., Öztürk, E., Kutluyer, F. and Aksu, O., Yeşil Çay Yağının Gökkuşluğu Alabalıklarının (*Oncorhynchus mykiss*) Yem Değerlendirme Oranına ve Hematolojik Parametrelerine Etkileri, **Atatürk Üniversitesi Veteriner Bilimleri Dergisi**, 13, 2, 159-164, (2018b).

- [10] Altınterim, B., Gulec, A.K. and Aksu O., Determination of Safety Dose of *Eucalyptus camaldulensis* Hydrosol on Mirror Carp (*Cyprinus carpio*), **Fresenius Environmental Bulletin**, 21, 5a, 1219-1222, (2012).
- [11] Brace, L.D., Cardiovascular Benefits of Garlic (*Allium sativum* L), **The Journal of Cardiovascular Nursing**, 16, 4, 33-49, (2002).
- [12] Lee, J.Y. and Gao, Y., Review of the application of garlic, *Alliums sativum*, in aquaculture, **Journal of the World Aquaculture Society**, 43, 4, 447–458, (2012).
- [13] Talpur, A.D. and Ikhwanuddin, M., Dietary effects of garlic (*Allium sativum*) on haemato-immunological parameters, survival, growth, and disease resistance against *Vibrio harveyi* infection in Asian seabass, *Latescal carifer* (Bloch), **Aquaculture**, 364–365: 6–12, (2012).
- [14] Freeman, F., and Kodera, Y., Garlic chemistry: stability of S-(2-Propenyl) 2-Propene-1-sulfinothiolate (Allicin) in blood, solvents and simulated physiological fluids, **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 43, 9, 2332–2338, (1995).
- [15] Yumrutaş, Ö., Demirörs, Saygıdeğer, S., Doğan, M. The in vitro antioxidant activity of *Allium tuncelianum*: An endemic. **Journal of Applied Biological Sciences**, 3, 3, 61-64, (2009).
- [16] Chan, K., Yin, M. and Chao, W., Effect of diallyl trisulfide-rich garlic oil on blood coagulation and plasma activity of anticoagulation factors in rats, **Food and Chemical Toxicology**, 45, 3, 502-507, 2007.
- [17] Ohaeri, O.C. and Adoga G.I. Anticoagulant Modulation of Blood Cells and Platelet Reactivity by Garlic Oil in Experimental Diabetes Mellitus, **Bioscience Reports**, 26, 1, DOI: 10.1007/s10540-006-9004-1, (2006).
- [18] Farahi, A., Kasiri, M., Sudagar, M., Iraei, M.S. and Shahkolaei M.D., Effect of garlic (*Allium sativum*) on growth factors, some hematological parameters and body compositions in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), **AAFL Bioflux**, 3, 4, 317-323, (2010).
- [19] Shalaby, A.M.I., Khattab, Y.A., Abdel Rahman, A.M., Effects of Garlic (*Allium sativum*) and chloramphenicol on growth performance, physiological parameters and survival of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), **The Journal of Venomous Animals and Toxins including Tropical Diseases**, 12, 2, 172-201, (2006).
- [20] Breyer, K.E., Getchell, R.G., Cornwell, E.R. and Wooster, G.A., Efficacy of an Extract from Garlic, *Allium sativum*, Against Infection with the Furunculosis Bacterium, *Aeromonas salmonicida*, in Rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss*. **Journal of The World Aquaculture Society**, 46, 3, 273-282, (2015).
- [21] Hamadouche, NA., Lazeb, H., Kaddouri, A., Guellil, H., Slimani, M. and Aoues A., Ameliorated effects of green tea extract on lead induced kidney toxicity in rats, **Algerian J Nat Prod**, 3, 130-137, (2016).
- [22] Diab, A.S., Aly, S.M., John, G., Abde-Hadi, Y. and Mohammed, M.F., Effect of garlic, black seed and Biogen as immunostimulants on the growth and survival of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (Teleostei: Cichlidae), and their response to artificial infection with *Pseudomonas fluorescens*, **African Journal of Aquatic Science**, 33, 1, 63–68, (2008).
- [23] Nya, E.J. and Austin, B. Use of garlic, *Allium sativum*, to control *Aeromonas hydrophila* infection in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), **Journal of Fish Diseases**, 32, 11, 963-70, (2009).



- [24] Siwicki, A.K. and Studnicka, M. The phagocyticability of neutrophils and serum lysozme activity in experimentally infected carp, *Cyprinus carpio* L., **Journal of Fish Biology**, 31, A, 57-60, (1987).
- [25] Ruane, N.M., Carball, E.C. and Komen, J., Increased stocking density influence the acute physiological stres response of common carp *Cyprinus carpio* (L.), **Aquaculture Research**, 33, 777-784, (2002).
- [26] Ağbaş, B., Karkuş, D., Adıgüzel, R., Keser, S. and Demir, E. Tunceli Sarımsağının (*Allium tuncelianum*) Toplam antioksidan Özelliklerinin ve Kuru Madde İçeriğinin Normal Sarımsak (*Allium sativum*) ile karşılaştırılması. **Munzur Üniversitesi, Bilim ve Gençlik Dergisi**, 1, 2, 50-62, (2013).

# Yay katsayısı sürekli değiştirilebilen seri elastik aktüatör tasarımı ve imalatı

Ömer PEKDUR<sup>1,\*</sup>, Davut AKDAŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Balikesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü,  
Çağış kampüsü, Balıkesir.

<sup>2</sup>Balikesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çağış  
kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 01.10.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 14.05.2019

## Özet

Hareketli robotlarda eklem tahriki için dişli kutusuna sahip elektrik motorları yaygın olarak kullanılmaktadır. Dişli kutusu çıkışında yüksek empedans görülmektedir. Robotlarda eklem hızlarına, hareket türüne ve dışarıdan gelecek darbelere karşı eklem empedansının sürekli olarak değiştirilmesi gereklidir. Bu soruna çözüm oluşturulması için dişli kutusunun çıkışına seri olarak yay ve benzeri elastik elemanlar kullanılmış ve bunların yay katsayıları değişik yöntemlerle değiştirilmeye çalışılmıştır. Kısıtlı hareket alanlarında başarı da elde edilmiştir. Bu çalışmada daha pratik mekanik uygulamaya ve daha geniş yay katsayısı aralığına sahip eleman geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla hava yayı geliştirilmiş ve bu elemanın değişik yük ve basınç aralıklarında karakteristiği çıkarılmıştır. İlk deneysel bulgularında, farklı basınçlar altında seri elastik elemanın deformasyon ve yük eğrileri elde edilmiş, bu elemanların geniş kuvvet aralıklarında etkin kullanılabileceğini görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Seri elastik aktüatör, hava yayı, eklem empedansı.

## Design and production of continuously variable series elastic actuator

### Abstract

Electric motors with gearboxes are widely used for joint drive in moving robots. High impedance is observed at the gearbox output. It is necessary to continuously change the joint impedance against the joint speeds, type of movement and the impacts from the

\* Ömer PEKDUR, opekdu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-1392-0044>  
Davut AKDAŞ, akdas@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-2492-5046>

*outside. In order to solve this problem, spring and similar elastic elements were used in series to the output of the gearbox and their spring coefficients were tried to be changed by different methods. Success was achieved in the limited range of motion. In this study, it is aimed to develop elements with more practical mechanical application and wider spring coefficient range. For this purpose, air spring has been developed and the characteristics of this element at different load and pressure ranges have been worked out. In the first experimental findings, the deformation and load curves of the series elastic elements under different pressures were obtained and it was seen that these elements could be used effectively in wide force ranges.*

**Keywords:** *Robotic foot design, robotic arm design, series elastic actuators, air spring.*

## 1. Giriş

Aktüatörlerin karakteristikleri hareket oluşturmada ve kontrolünde anahtar elemanlardır. Canlılardaki hareket kabiliyetleri ve hareket esnasındaki enerji depolama özellikleri, canlılardaki ile kıyaslanabilir özellikte aktüatör olmaması nedeniyle, günümüzde gerçekleştirilen makinalarca yakalanamamaktadır. Canlıların kaslarının mekanik yapısı ve nörolojik kontrol yöntemi, özellikle eklemlerin sürekli ve gerçek zamanlı empedanslarının değiştirilebilmesi açısından, günümüz robotlarının çok ötesindedir. Günümüzdeki robot yapılarında genellikle eklemlerin konum kontrolü yapılmaktadır. Robot kolu istenen konuma geldiğinde bu konumu, dışarıdan bozucu kuvvetler uygulansa bile korur (ideal olarak sonsuz empedans durumunda) [1]. Bu yüksek empedans, motor şaftına bağlı yüksek dişli oranına sahip dişli kutusunca sağlanmaktadır. Endüstriyel robotlar için bu istenen bir durumdur, fakat çevresi ile etkileşen robotlar için eklem empedanslarının değiştirilebilir olması istenir [2]. Birçok pratik uygulamada Seri Elastik Aktüatörlerin sabit yay katsayısı veya elastisite modülü olmaktadır. Bunun başlıca sebebi, aktüatör ve seri elastik elaman için kısıtlı mekanik montaj hacim ve bağlantı şekli kısıtlamalarıdır. Sabit yay katsayısı veya elastisite modülü sabit bir eklem empedansı ortaya çıkarır. Bilindiği gibi, mekanik empedans zaman bağımlı kuvvet ile zaman bağımlı konum arasındaki dinamik ilişkiyi ifade eder. Bu diferansiyel ilişki doğrusal ya da doğrusal olmayan türlerden olabilmektedir [3].

Seri Elastik Aktüatörlerin etkisini oluşturabilecek farklı mekanik yapıların pratikte uygulandığını görmekteyiz. Bu elemanların tüm türevleri karakteristik olarak kinetik enerjinin depolanması ve darbe emilmesi ortak özelliklerini taşımakla birlikte farklı fiziksel prensiplerle istenen eklem empedansı elde edilmektedir. Yazılımla aktif empedans kontrolü, ataletsel sistemler ve mekanik sistem içsel özellikli olarak elastik yapıları gruplandırabiliriz.

Aktif empedans kontrolü, seri elastik elamanın davranışını kontrol sistem yazılımı ile gerçekleştirmeye (taklit etmeye) çalışmaktır [4]. Bu tür yapılarda, sistemde kullanılan sensörlerin, aktüatörlerin ve kontrol donanımının hızının, sistemin etkileşimde bulunacağı ortamdaki hız gereksinimlerinden çok daha yüksek hızlarda tepkiler verebilmesi gereklidir. Fakat mekanik darbelerin bant genişliği neredeyse sonsuz olduğu için (iki çok sert cisimin çarpışması gibi), sistem hızı ne kadar yüksek olursa olsun, bu tür darbe (impulse) kuvvetleri sistemce emilememektedir. Ayrıca, aktif empedans sistemlerinde mekanik enerji depo edilmemekte dolayısıyla enerji verimliği oldukça düşüktür.

Ataletsel empedans kontrolünde yay ve sönümleyici olmaksızın sadece kütle kinetik enerjinin depolanmasında kullanılmaktadır. Burada cayro elemanı depoladığı dönü enerjisi ile robotları dengede tutmada veya Formula 1 gibi yarış otomobillerinin yönlendirilmesinde ve teknelerin dalgalı denizlerde sarsıntılarını azaltmada kullanılmaktadır [5 ve 6]. Bu tür mekanik yapılar oldukça ağır, büyük hacimlerde, özel imalat gerektiren yapılarda ve pahalı olmaktadır.

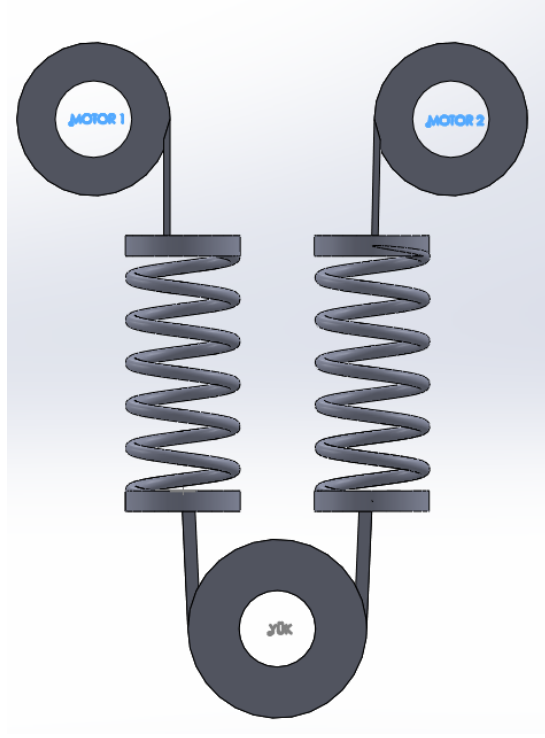
İçsel özellikli elastik yapılar aktüatörlerden sonra seri olarak bağlanmışlardır ve yükleri hareket ettirmede kullanılmaktadırlar. Elastik elemanlar mekanik özellikleri gereği tüm pratik bant genişliklerinde kuvvetlerle etkileşime girebilmekte ve bunlardan gelen enerjileri belirli oranlarda içlerinde depolayabilmektedirler [7]. Göreceli olarak küçük hacimlerde, ağırlıklarda ve düşük maliyetlerde olmaktadır. Bu tür sistemler yay katsayıları sabit ya da değişen türlerde olabilmektedirler. Uygulamanın özelliğine bağlı olarak bir yapı tercih edilmektedir. Bu çalışmada geliştirilmekte olan Seri Elastik Aktüatör nihai olarak yürüyen robotlarda kullanılması için araştırma yapıldığından dolayı sistem yay katsayısının robot uzvunun hareketine bağımlı olarak sürekli ve gerçek zamanlı olarak değiştirilmesi hedeflenmiştir. Canlılar yürüme hareketleri esnasında sürekli olarak kaslarının yay katsayılarını değiştirmektedirler [8]. Örneğin bir hayvanın ayağı yere bastığında yüksek, ayağı havada ileri doğru salınımında olduğu zaman ise düşük empedans değerlerine sahiptir.

Bu çalışmada canlılar örnek alınarak, aktüatöre seri bağlı elemanın yay katsayısını gerçek zamanlı değiştirmeye imkân sağlayacak seri elastik aktüatör tasarımı ve deneylerle temel karakteristiği çıkartılan aktüatör verileri sunulmuştur.

Bu makalede çalışmanın temelini oluşturan ve araştırmacılarca geliştirilen, temel testleri gerçekleştirilen yaylı bir seri elastik aktüatör sistemi ikinci bölümde tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, yay katsayısının sürekli değiştirilmesine imkân sağlayacak ve kendi sistemimizde kullanılan hava yayı karakteristiği özellikleri verilmiştir. Dördüncü ve beşinci bölümlerde iki farklı tasarım modeli ortaya konulmuştur. Son olarak bulgular ve sonuçlar sunulmuştur.

## 2. Seri elastik aktüatörler

Seri elastik aktüatörler içsel elastik yapıya sahip olduklarından, özellikle darbe şeklindeki yüklerin enerjilerinin emilmesinde diğer yapılara göre avantajlara sahiptir [9 - 23]. Elastik elemanlar, çıkışı yüksek empedansa sahip olan tahrik elemanlarına (yüksek dişli oranlı elektrik motorları) seri olarak bağlanmaktadır. Belirli empedans değerlerinin her zaman yakalanması için, elastik elemanlar her zaman ön yükleme altında olmak zorundadır. Bunun için aşağıda şekil 1 de gösterilen birbirleri ile zıt çalışan (antagonistik) yapı ve değişik türevleri kullanılmaktadır. Bu şekilde iki adet yay elemanın motor1 ve motor2 tarafından belirli oranlarda zıt veya birbirine göre aynı yönde ve farklı kuvvetlerde sürülmesi ile istenen çıkış empedansı sağlanmaktadır. Bu basit yapının dezavantajları eklem torkunun tek bir motorun azami torkundan daha fazla olamaması ve yayın uzama sınırlarında tork elde edilememesidir [24].



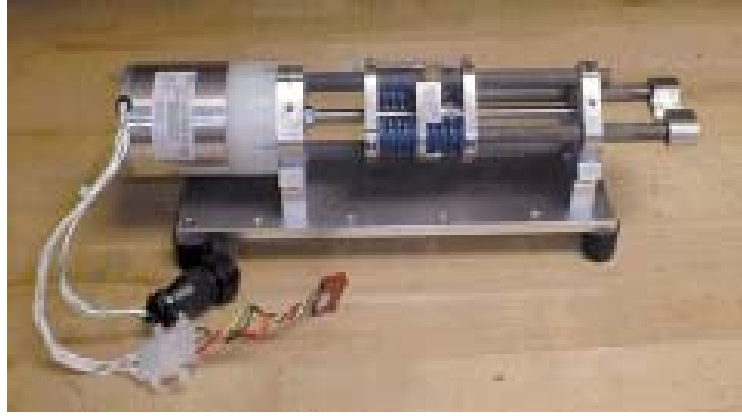
Şekil 1. SEA'nın şematik gösterimi.

Literatürde her bir yayın ayrı ayrı veya birlikte başka yay elemanlarına bağlanması ile motorların tork-yay elemanlarının hareket sınırları geliştirilmiştir [25]. Başka bir çalışmada ise Şekil 1'dekinden farklı olarak her bir motora sağlı-sollu iki adet yay elemanı bağlandığı ve bunun yay davranışını olumlu geliştirdiği sunulmuştur [26]. Fakat her bağlantı şeklinde sürülen eklem empedansı ve eklem konumu motorların birbiri ile senkronize çalışmasıyla gerçekleşmekte ve eklem konumu ve eklem empedansı aynı motor çifti ile sağlanmaktadır. Bazı çalışmalarda üçüncü bir motor kullanılarak eklem konumu ve eklem empedansı birbirinden bağımsız hale getirilmiştir [27 ve 28]. Bu çalışmalarda kısıtlı iyileştirmeler elde edilmesine rağmen yapıların büyüklüğü ve ilave motor gereksinimi mobil robot uygulamalarında uygulanmalarını güçleştirmektedir.

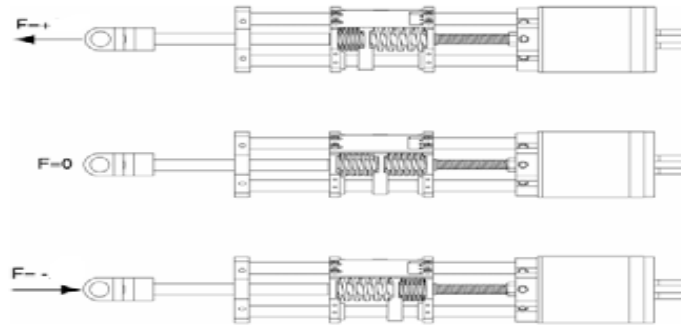
Bu makaleye konu olan çalışmalarımız, yukarıda bahsi geçen çalışmalar incelendikten sonra, ön sıkıştırılmalı yayların dişli kutusuna sahip bir motor tarafından sürülebilmesini incelemekle başlamıştır. Burada elde edilen tecrübeler ışığında üçüncü bölümde bahsedilen havalı elastik elamanın tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Aktüatörün çıktı kuvveti yayın sıkışmasına bağlıdır ve Hook Kanunu ( $F=k.x$ ) temeline dayanmaktadır. Yayın sıkıştırılması bir sensör yardımıyla hesaplanır. SEA'da kullanılan yayın sabiti bilindiği için yayın sıkışma miktarına göre çıktı kuvveti otomatik olarak hesaplanır. Bu hesaba göre motora sinyal gönderilerek kuvvetin kontrol edilmesi sağlanır. Şekil 2 seri yay elemanların kullanımı ile gerçekleştirilen aktüatörü göstermektedir. Şekil 3'te ise bu seri elastik aktüatörün çalışması esnasında kuvvet yönlerine bağlı olarak yay elemanlarının şekil değiştirmeleri gösterilmektedir. Bu çalışmada yaylar, uygulanan kuvvetle doğrusal olarak şekil değiştirmektedir. Yay katsayısı ve yaylara uygulanan ön gerilme, robot tarafından manipüle edilecek cisimler (eğer bu sistem robot kollarında kullanılırsa) sadece benzer boyutlarda ve ağırlıklarda

olduğu durumlarda verimli kullanım olacağı görülmüştür. Çünkü yayların ön gerilmelerinin değişimi el ile yapılmaktadır. Ayrıca bu tasarımda aktüatörün bağlı olacağı robot yapının konum ve empedansının birlikte değiştiği görülmüştür. Dışarıdan gelebilecek bozucu kuvvetler eklem konumunu değiştirmiştir. Sonuç olarak eklem konum ve eklem empedansı bu tasarımda birbirinden bağımsız olarak korunamamıştır. Ayrıca mekanik yapı sabit robot kolları için bir alternatif aktüatör yapısı oluştursa da, yürüyen robotlar için bu yapı oldukça büyük ve ağırdır. Özellikle mobil robotun tüm elektronik ve mekanik elemanları ve enerji depolama birimleri üzerinde taşıma olasılığı düşünüldüğünde, seri elemanın, hâlihazırda oldukça ağır olan motorlara çok fazla ilave ağırlık oluşturmaması gerekir. Bu çalışma sonucunda hava yayının daha iyi bir alternatif olacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 2. Araştırmalarımızın ilk aşamasında geliştirilen elektrikli seri elastik aktüatör.

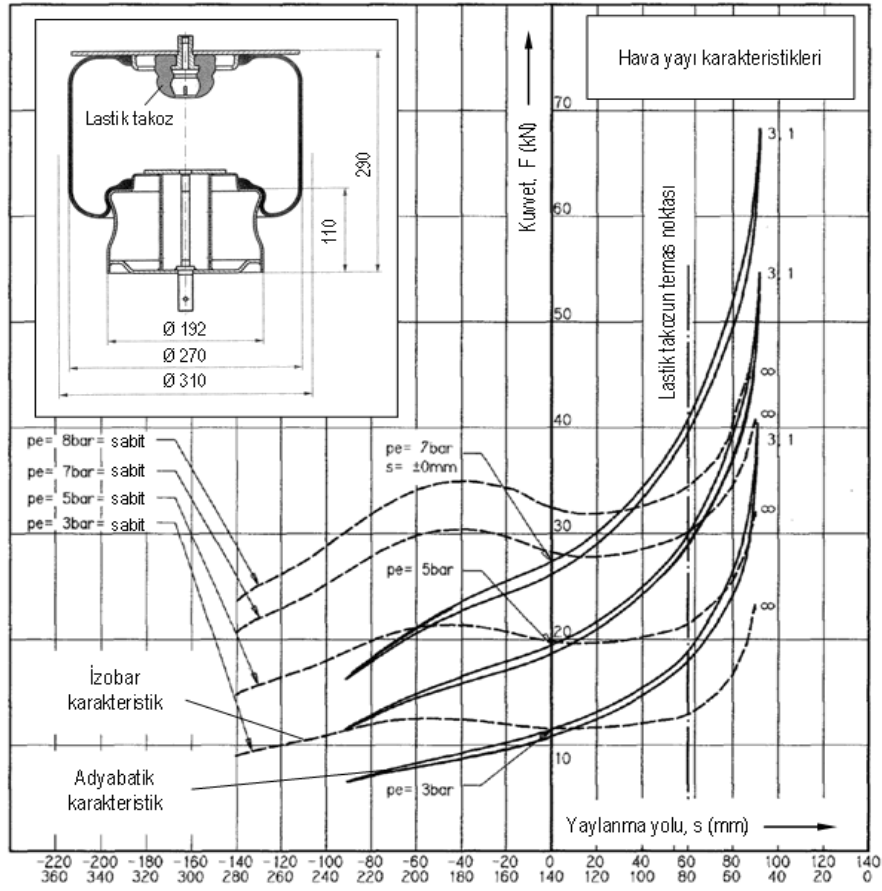


Şekil 3. Seri elastik aktüatörde oluşan kuvvetler ve yönleri.

### 3. Hava yayı

Hava yayları genellikle titreşimli yerlerde titreşim sönümleyici olarak kullanılırlar. En çok kullanıldığı yerler otomobil, kamyon, otobüs, tren gibi araçlar ile titreşimli çalışan makinelerdir. Hava yayları birçok biçimde imal edilmektedirler. Bağlandıkları yerlere, çalışma koşullarına ve maruz kaldıkları kuvvetlerin büyüklüklerine göre hava yaylarının şekil ve büyüklükleri değişmektedir. Hava yaylarının çalışma prensibi (içerisinde hava veya azot gazı bulunabilir.) kapalı hacimdeki gazların elastik davranışlarının yay olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Hava yayları progresif yay karakteristiğine sahiptirler. Hava yayının yay sabiti içindeki hava basıncının değişimine bağlı olarak değişmektedir.

Hava yayının bir diğer önemli yanı ise artan yük ile hava yayının artan iç basıncı neticesinde yay katsayısının artması ve azalan işletme basıncında ise uygun bir şekilde azalmasıdır. Örnek bir hava yayının yay karakteristiği Şekil 4'te görülmektedir [29 ve 30]. Bu şekilde hava yayının doğrusal olmayan karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Literatürde de bu tür kuvvet-konum ilişkisinin seri elastik aktüatörlerden istenen bir özellik olduğu belirtilmektedir. Özellikle zıplama hareketi yapan robotlar üzerine çalışma yapan araştırmacılar [31] bu karakteristiğin ani darbelerin emilmesi için gerekli olduğu sonucuna varmışlardır. Bizim nihai amacımız, seri elastik aktüatörü yürüyen robotlarda kullanılması için geliştirmektir. Yürüme esnasında zemin ile ayakaltı arasında ani kuvvet aktarımı olacağından aşağıda yer alan şekil 4'teki hava yayı karakteristiğinin amaca uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Hava yayı karakteristiği.

Literatürde hava yaylarının doğrudan robot eklemlerini sürdükları uygulamalarda vardır. Bu tür uygulamalarda havalı eleman doğrudan aktüatörün kendisi olmaktadır ve yapay kas olarak adlandırılmaktadır. En yaygın kullanılan tasarım McKibben yapay kasıdır [32]. Yapay kaslar kendi içyapılarında yüksek sürtünmeye sahiptir. Ayrıca çalışmaları esnasında histeresis ve ölü bölge konum ve empedans kontrolü yapılmasını oldukça güçleştirmektedir. Yapay kaslar parçalı (pleated) yapılarak bu olumsuzluklar azaltılmaya çalışılsa da önemli bir ilerleme kaydedilememiştir [33 ve 34]. Bu sebeplerden dolayı seri elastik aktüatörler pratik uygulamalarda yer almaktadır ve eklem empedans kontrolünde başarılı sonuçlar vermektedir [35].

#### 4. Deneysel hava yayı tasarımı

Hava yaylarının imalinde kullanılan lastiğin boyutları ve kuvvetlere karşı dayanım değeri o hava yayının kullanılacağı kuvvet aralığını belirlemektedir. Eğer robot düşük kuvvetlerin etkisi altında çalışacaksa bu robotta kullanılacak SEA'daki hava yayının boyutları ve dayanım değerleri de ona göre düşük olacaktır. Yüksek ise hava yayının değerleri de yüksek olacaktır. Balıkesir Üniversitesi'nde gerçekleştirilen insansı robot çalışmasında [36], robot eklemlerinin tork değerlerinin gerçekleştirilen hareket esnasında birbirlerinden farklı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca genel amaçlı tek bir yay tasarımının robotun tüm eklemleri ile boyutsal uyumu da genelde mümkün olmamaktadır.

Bu nedenle bu çalışmada iki farklı SEA tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Tasarlanan SEA'lardan biri düşük kuvvetler de çalışmakta diğeri ise daha büyük kuvvetlerde çalışabilmektedir. SEA'da kuvvet kontrolünün yapılabilmesi için yay sabitinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Hava yaylarının yay sabitinin iç basıncına göre değişmesinden dolayı öncelikle tasarımda kullanılacak yayların değişik iç basınçlardaki yay sabiti karakteristiği çıkarılmıştır.

##### 4.1. Birinci tasarım; düşük güçler için

Piyasada satılan hava yayları genelde çok yüksek yükler altında çalıştığı için bu çalışmada düşük yükler altında çalışabilecek hava yayı ihtiyacına yönelik olarak hava yayları imal edildi.

Piyasada sönümleyici olarak çalışan ve içi silikon dolu olan bir körük alınarak tasarımda kullanılacak hava yayına dönüştürülmüştür. Körüğün içindeki silikon boşaltılmış, normal yay alınmış ve alın kısmına iç basıncı dışarıdan değiştirebilmek için delik açılmıştır. Kullanılan körük Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Hava yayına dönüştürülen körük.

Hava yayına dönüştürülen körüğün öncelikle hazırlanan deney düzeneğinde değişik iç basınçlarda sahip olduğu yay sabiti çıkarılmıştır. Yay karakteristiğinin çıkarılması için kullanılan düzenek Şekil 6'da ve çalışma sonucu iç basınç kuvvet değerleri Tablo 1'de ve Şekil 7'de görülmektedir.

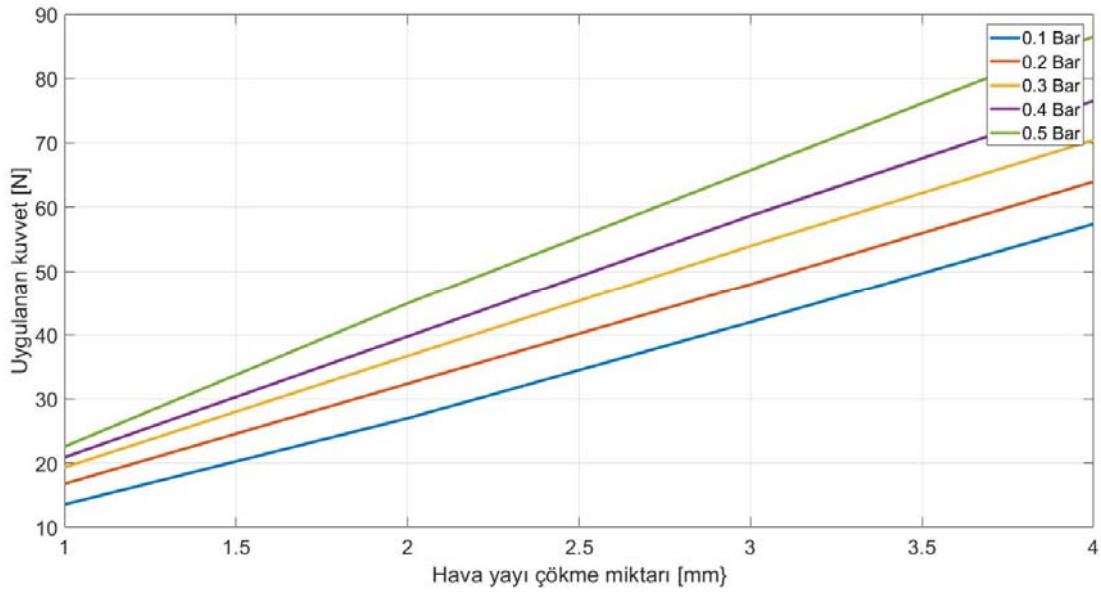




Şekil 6. Yay karakteristiği çıkarma düzeneği.

Tablo 1. İç basınç, kuvvet ve çökme değerleri.

Basınç (Bar)	Çökmeye Bağlı Ağırlık Miktarı (Kg)				Yay Katsayısı N/m
	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	
0,5	2,3	4,58	6,7	8,82	2923
0,4	2,13	4,05	5,98	7,8	3145
0,3	1,97	3,74	5,5	7,18	3407
0,2	1,71	3,3	4,89	6,52	3708
0,1	1,38	2,75	4,28	5,85	4264

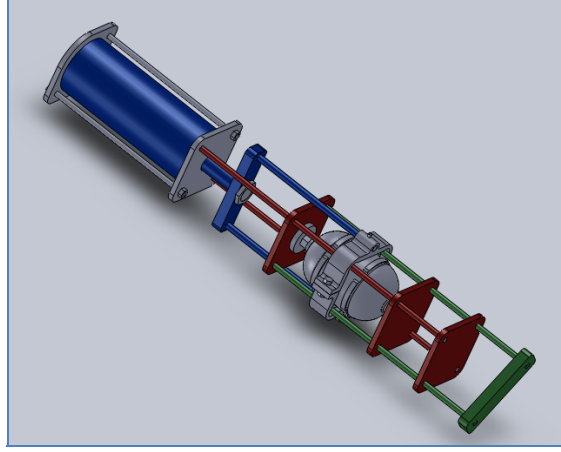


Şekil 7. İç basınç, kuvvet ve çökme değerleri.

Gerçekleştirilen deneylerde hava yayına 0.1 Bar'dan 0.5 Bar'a kadar basınçlı hava verilmiştir. Her farklı basınç değerinde 5mm, 10mm, 15mm ve 20mm çökme değeri için uygulanması gerekli kuvvet değeri ölçülmüştür. Tablo 1 ve Şekil 11 bu deneylerin bulgularıdır. Tablo 1 de hava yayının iç basıncının değişmesiyle birlikte yay katsayısı değerinin de değiştirilebildiği gösterilmiştir. Bu SEA eğer bir robotun parmaklarını

kontrol etmede kullanılacaksa, tutma kuvveti aktüatörün içsel karakteristiği olarak cisimleri yumuşak veya daha sert kavrama olanağı sağlayacaktır.

Hava yayının karakteristiği çıkarıldıktan sonra imal edilecek SEA'nın tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan SEA Şekil 8'de görülmektedir.

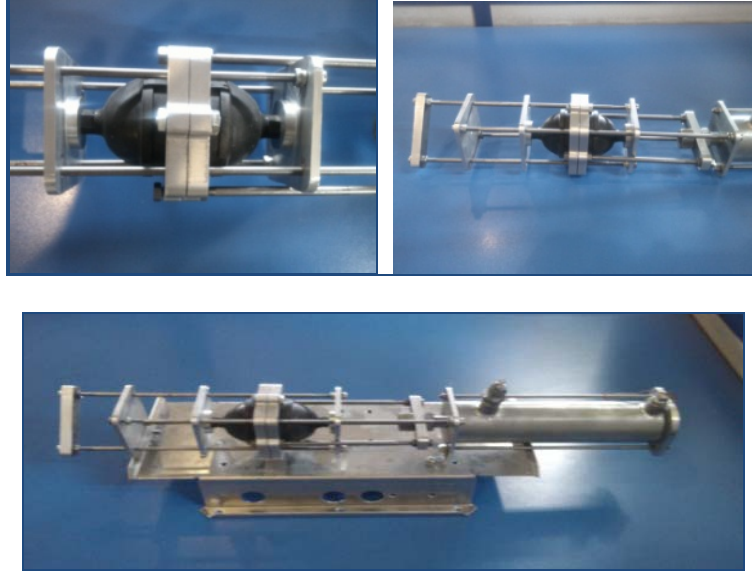


Şekil 8. Tasarımı yapılan SEA.

Tasarımda hareketi vermesi için hidrolik piston kullanılmıştır. Yay olarak sırt sırta monte edilmiş iki adet eşit hava yayı (şekil 5'deki) kullanılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen SEA'nın imalat parçaları tasarıma uygun olarak imal edilmiş ve daha sonra parçaların montajı yapılmıştır. İmalatı gerçekleştirilen SEA'nın parçaları Şekil 9'te ve montaj işlemi gerçekleştirilmiş SEA Şekil 10'da görülmektedir.



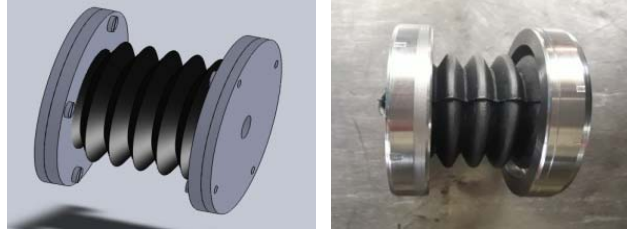
Şekil 9. İmal edilen parçalar.



Şekil 10. Montajı tamamlanan SEA.

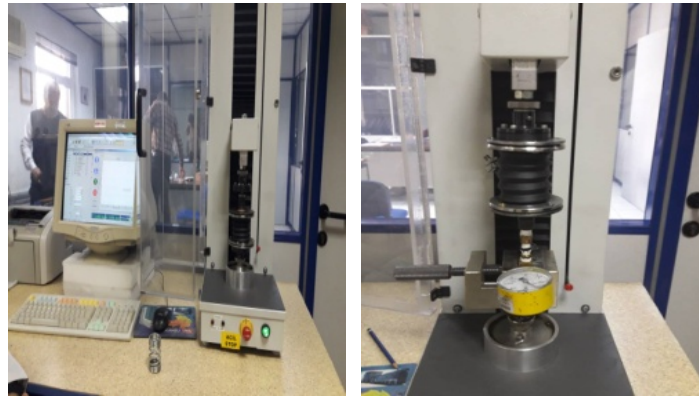
#### 4.2. İkinci tasarım; yüksek güçler için

Daha büyük yükler altında çalışabilecek ikinci SEA tasarımı içinde öncelikle hava yayı imalatı yapılmıştır. Hava yayı için piyasada satılan bir körük alınmış ve körük kesilerek lastiği imal edilecek hava yayında kullanılmıştır. Tasarlanan hava yayı Şekil-11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Tasarımı yapılan hava yayı.

Daha sonra yayın yay sabiti karakteristiğinin çıkarılması için deney düzeneği hazırlanmış ve yay ölçme tezgâhında deneyleri yapılarak değerler çıkarılmıştır. Şekil 12’da deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 12. Deney düzeneği.

Yapılan deneyler sonucu imal edilmiş olan hava yayının yay sabiti karakteristiği çıkarılmıştır ve Tablo'2 deki sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 2'deki değerler Tablo 1'deki değerlere benzer olarak, azalan basınç değerleriyle elastik elemanın yay katsayısının azaldığını (beklenildiği gibi) göstermiştir. Şekil 13 ve 14'de bu hava elemanın tasalanan montaj taslağı gösterilmiştir. Hava yaylarının içinden boru şeklinde mil geçmektedir. Sızdırmazlık o-ring ve keçelerle sağlanmaktadır. Hava yaylarının iç basınçları milin yayların içinde kalan kısımlarına açılan deliklerle değiştirilmektedir.

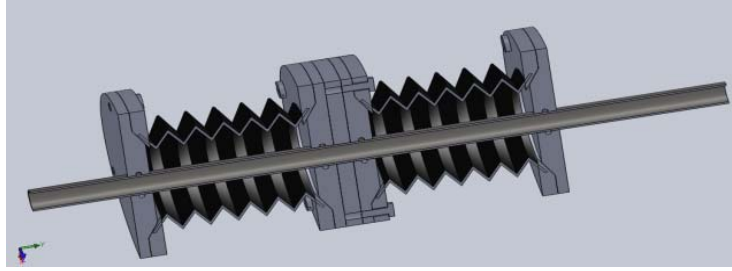
Tablo 2. İlk üç deney değerleri.

Test Numarası	Yay Katsayısı N/m	Başlangıç		Basılan Mesafe (mm)	Kuvvet (N)
		Yay Boyu (mm)	İç Basınç (mbar)		
1	5340	90	350	5	33,2
				10	57
				15	80,8
				20	113,3
				25	148
				30	171
				35	185
2	5060	87	300	5	29,4
				10	50
				15	74
				20	105
				25	130,6
				30	146
3	4204	85	250	5	22,3
				10	42,4
				15	65,1
				20	89,7
				25	108,6
				30	127,4
				35	164,5
				40	209

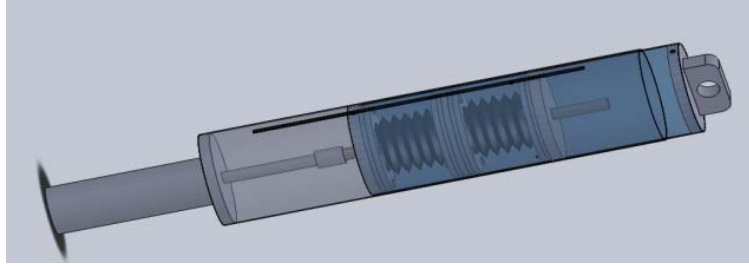
Test Numarası	Yay Katsayısı N/m	Başlangıç		Basılan Mesafe (mm)	Kuvvet (N)
		Yay Boyu (mm)	İç Basınç (mbar)		
4	4046	81	200	5	18,1
				10	36,1
				15	55,4
				20	75,8
				25	96
				30	114,9
				35	139,5
				40	169,6

Tablo 2. (Devamı).

5	3812	75	150	5	18,2
				10	35,7
				15	54,3
				20	72,3
				25	90,8
				30	113,5
				35	142,3
				40	185,9



Şekil 13. Monte edilmiş hava yayı.



Şekil 14. Yüksek güçlü seri elastik aktüatörün taslak tasarımıdır.

## 7. Sonuçlar ve öneriler

Çalışmamızın başlangıcında taranan literatür'den çıkartılan sonuç, gelişen robot teknolojisi ile insan makine etkileşiminin arttığı ve bunun sonucunda hem insan hem robot için güvenlik tedbirlerinin alınması gerektiğidir. Ayrıca ayaklı robotların da çok sayıda araştırmacı tarafından geliştirilmekte olması ve deneylerde değişik hızlarda yürüyen robot ayaklarının bilinmeyen zemin yüzeyleri ile darbeli etkileşimi SEA'ları gerekli kılmaktadır. Özellikle darbe (impulse) şeklinde gelen kuvvetlerin, aktüatör tarafından emilmesi ve enerji olarak depolanması robotun bilinmeyen yüzeylerle etkileşiminde eklem konum kararlılığını artırırken, SEA'da depolanan enerjinin geri kullanımı ile robotun hareket verimliliği de artırılmış olacaktır. Tüm canlılarda bu mekanizmalar vardır ve bu nedenle canlıların hareketleri her hareket koşulu altında en verimlidir.

Robot eklemlerinde farklı tork (kuvvet) gereksinimleri ortaya çıkmaktadır. Örneğin robot elleri ve ayakları için aynı aktüatörü kullanmak mümkün değildir (boyut ve kuvvet açısından). Ayrıca seri elastik aktüatörün robot eklemlerinde ortaya çıkaracağı empedans değerlerinin, canlılarda olduğu gibi, robot ekleminin hareketine bağımlı

olarak değiştirilmesi gerektiği literatürde sunulmuştur. Bu nedenle iki farklı kuvvet aralığı için tasarım yapılması öngörülmüştü. Seri elastik aktüatörlerin karakteristiğini belirleyecek olan hava yaylarını hazır bulmak mümkün olmamıştır. Deneysel amaçlarla geliştirilen hava yayları ya çok iyi üretim imkanları olan araştırma kurumlarında geliştirilmiş veya bu çalışmada olduğu gibi farklı amaçlarla kullanılan ürünleri hava yaylarına dönüştürme yoluna gidilmiştir. Gerçekleştirilen iki hava yayı için, sönümleyici olarak kullanılan iki farklı körük türü kullanılmıştır. Test düzenekleri ile hava yayı elamanlarının karakteristikleri çıkartılmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2 yaylar için elde edilen verileri içermektedir. İki tablo kıyaslandığında değişen iç basınçla birlikte, hava yayının yay sabitinin değiştirilebildiği görülmüştür. İkinci tasarım için tabloda 2’de sadece 0.35 Bar değerine kadar veriler sunulmuştur. 0.3 Bar yüksüz iç basınç değeri için ilk tasarım 3407 N/m, ikinci tasarım ise 5060 N/m yay katsayısına sahiptir. Hava yaylarının doğrusal olmayan karakteristiği nedeniyle, iki hava yayı arasındaki oran eşit değişmemektedir. İki hava yayı da artan basınç değerleriyle doğrusal olmayan bir şekilde artan yay katsayısı karakteristiği göstermektedir. Özellikle ikinci hava yayında aratan basınç neredeyse logaritmik konum-kuvvet değişimi göstermektedir. Üçüncü bölümde bahsedildiği gibi, doğrusal olmayan davranış canlıların kas sistemlerinde görülmektedir ve yürüyen robotlarda istenen bir durumdur. Bu sayede darbelerin aktüatörce emilmesi sağlanmaktadır.

Şekil 8 ve 14 de verilen seri elastik aktüatörler olası bir tasarımı göstermektedir. Bu tasarımlar oldukça uzundur. Ayak ve gövde eklemlerini doğrudan sürmek için uygundur fakat parmak ve benzeri küçük uzuvları bu aktüatörlerle doğrudan sürmek fiziki olarak mümkün değildir. Bu durum canlılar içinde benzerdir ve canlılardaki tendonların işlevini yerine getirecek kablo sistemleri aktüatöre bağlanarak fiziki olarak küçük uzuvların sürülmeleri ve eklem empedanslarının da ayarlanabilmesi mümkündür.

Çalışmamızda seri elastik aktüatörün istenildiği gibi yay katsayısı değişebilen ve iki farklı yük aralığındaki kuvvetlerde kullanılacak hava yayı karakteristiği çıkarılmıştır. Bu geliştirilen hava yaylarının kullanıldığı seri elastik aktüatörlerin ilk tasarımları ve imalatları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışmanın eklem empedansının istenildiği gibi ve gerçek zamanlı değişebilen robotlarda kullanılmasının mümkün olduğudur. Fakat robotlarda uygulamak için SEA’nın tasarımının çok daha fazla iyileştirilmesi gereklidir.

Bu çalışmada nihai amacımız, bu aktüatörün dinamik davranışını test etmek ve değişen eklem empedans değerleri ile kendisine gelen darbelerin enerji olarak hangi oranlarda depolandığını test etmektir. Bu sayede de robotun farklı eklem hareketleri için aktüatörün davranışını ortaya koymaktır.

## Kaynaklar

- [1] Salisbury, K., Eberman, B., Levin, M., Townsend, W., The design and control of an experimental whole-arm manipulator, **The Fifth International Symposium on Robotics Research**, MIT Press, 233–241, (1991).
- [2] Vanderborght, B., Albu-Schaeffer, A., Bicchi, A., Burdet, E., Caldwell, D., Carloni, R., Catalano, M., Ganesh, G., Garabini, M., Grioli, G., Haddadin, S., Jafari, A., Laffranchi, M., Lefeber, D., Petit, F., Stramigioli, S., Grebenstein, M., Tsagarakis, N., Van Damme, M., Van Ham, R., Visser, S., Wolf, S., Variable

- impedance actuators: moving the robots of tomorrow, **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2012**, (2012)
- [3] Van Ham, R., Thomas, S., Vanderborght, B., Hollander, K., Lefeber, D., Compliant actuator designs: review of actuators with passive adjustable compliance/controllable stiffness for robotic applications, **IEEE Robotics and Automation Magazine**, 16(3), 81–94, (2009).
- [4] Albu-Schaffer, A., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimbock, T., Hirzinger, G., The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments, **Industrial Robot: An International Journal**, 34(5), 376–385, (2007).
- [5] Xu, Y., Au, S., Stabilization and path following of a single wheel robot, **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 9(2), 407–419, (2004).
- [6] K. Pullen, C. Ellis, Kinetic energy storage for vehicles, **Hybrid Vehicle Conference, IET The Institution of Engineering and Technology**, 2006, IET, 91–108, (2006).
- [7] Petit, F., Albu-Schaffer, A., State feedback damping control for a multi DOF variable stiffness robot arms, **IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2011**, 5561–5567, (2011).
- [8] Albu-Schaeffer, A., Bicchi, A., Stramigioli, S., Burdet, E., Smagt, P., Parravicini, A., Lefeber, D., Tsagarakis, N., VIATORS-variable impedance actuation systems embodying advanced interaction behaviors, **European Future Technologies Conference, FET09**, (2009).
- [9] Arumugom, S., Muthuraman, S. ve Ponselvan, V., Modeling and application of series elastic actuators for force control multi legged robots, **Journal of Computing**, 1(1), 26-33, (2009).
- [10] Rouse, E.J., Mooney, L.M. ve Martinez-Villalpando, E.C., Clutchable series-elastic actuator: design of a robotic knee prosthesis for minimum energy, **13th International Conference on Rehabilitation Robotics, ICORR**, (2013).
- [11] Vanderborght, B., Verrelst, B., Ham, R.V., Damme, M.V., Lefeber, D., Duran, B.M.Y. ve Beyl, P., Exploiting natural dynamics to reduce energy consumption by controlling the compliance of soft actuators, **The International Journal of Robotics Research**, 25(4), 343-358, (2006).
- [12] Pratt, J.E., Exploiting inherent robustness and natural dynamics in the control of bipedal walking robots, **Doktora Tezi, MIT** (2000).
- [13] Kawamura, A. ve Zhu, C., The Development of biped robot MARI-3 for fast walking and running, **IEEE**, (2006).
- [14] Goris, K., **Autonomous Mobile Robot Mechanical Design**, (2005).
- [15] Yesilevskiy, Y. ve Remy, C.D., Series or parallel elasticity - Which is better?, **Dynamic Walking**, (2014).
- [16] Robinson, D.W., Pratt, J.E., Paluska, D.J. ve Pratt, G.A., Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot, **International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, Atlanta, (1999).
- [17] Junior, A.G.L., de Andrade, R.M. ve Filho, A.B., Linear serial elastic hydraulic actuator: digital prototyping and force control, **IFAC (International Federation of Automatic Control)**, (2015).
- [18] Pratt, J.E. ve Krupp, B.T., Series elastic actuators for legged robots, **Proc. SPIE 5422, Unmanned Ground Vehicle Technology VI**, (2004).
- [19] Pratt, J.E., Krupp, B.T. ve Morse, C.J., The RoboKnee: An exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking, **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, New Orleans, (2004).

- [20] Pratt, G.A., Low Impedance walking robots, **Integrative and Comparative Biology**, 42(1), 174-181, (2002).
- [21] Pratt, J., Krupp, B., Design of a bipedal walking robot, **Proc. SPIE 6962**, Unmanned Systems Technology X, Orlando, (2008).
- [22] Robinson, D.W., Design and Analysis of Series Elasticity in Closed-loop Actuator Force Control, Doktora Tezi, MIT, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts, (2000).
- [23] Pratt, J., Legged Robots at MIT: What's new since raibert, **IEEE Robotics & Automation Magazine**, 7(3), 15-19, (2000).
- [24] Verrelst, B., Van Ham, R., Vanderborght, B., Lefeber, D., Daerden, F., VanDamme, M., Second generation pleated pneumatic artificial muscle and its robotic applications, **Advanced Robotics**, 20(7), 783–805, (2006).
- [25] Tonietti, G., Schiavi, R., Bicchi, A., Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction, **IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2005**, 526–531, (2005).
- [26] Schiavi, R., Grioli, G., Sen, S., Bicchi, A., VSA-II: a novel prototype of variable stiffness actuator for safe and performing robots interacting with humans, **IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008**, 2171–2176, (2008).
- [27] Eiberger, O., Haddadin, S., Weis, M., Albu-Schäffer, A., Hirzinger, G., On joint design with intrinsic variable compliance: derivation of the DLR QA-joint, **IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2010**, 1687–1694, (2010).
- [28] Hurst, J.W., Rizzi, A.A., Series compliance for robot actuation: application on the electric cable differential leg, **IEEE Robotics & Automation Magazine** 15(3), (2008).
- [29] Topaç, M.M. ve Kurulay, N.S., Computer aided design of an anti-roll bar for a passenger bus, **Mühendis ve Makina**, 50, 594. (2009).
- [30] Buzluk, S., Mekanik sistemlerde titreşim kontrolü, **Yalıtım Kongresi**, Eskişehir, (2001).
- [31] Seyfarth, A., Geyer, H., Blickhan, R., Lipfert, S., Rummel, J., Minekawa, Y., Iida, F., Fast motions in biomechanics and robotics, Vol. 340, Springer, Berlin, Heidelberg, 383–401 (Chapter Running and walking with compliant legs), (2006).
- [32] Tondu, B., Lopez, P., Modeling and control of mckibben artificial muscle robot actuators, **IEEE Control Systems Magazine**, 20(2), 15–38, (2000).
- [33] Verrelst, B., Van Ham, R., Vanderborght, B., Lefeber, D., Daerden, F., Van Damme, M., Second generation pleated pneumatic artificial muscle and its robotic applications, **Advanced Robotics**, 20(7), 783–805, (2006).
- [34] Villegas, D.C., Van Damme, M., Vanderborght, B., Lefeber, D., Third generation pleated pneumatic artificial muscles for robotic applications: development and comparison with McKibben muscles, **Advanced Robotics**, 26 1205–1227, (2012).
- [35] De, A., Tasch, U., A two-DOF manipulator with adjustable compliance capabilities and comparison with the human finger, **Journal of Robotic System**, 13, 25–34, (1996).
- [36] Akdas, D., An effective mechanical design and realization of a humanoid robot BUrobot, **ACTA, Mechatronics**, 11(10), (2014).



# Su örneklerindeki Cu(II), Co(II), Fe(III) ve Ni(II) iyonlarının Schiff bazı komplekslerinin katı-faz ekstraksiyonu yönteminden sonra ICP-OES ile tayini

Mustafa Umut KONANÇ<sup>1,2\*</sup>, Mustafa Kemal GÜMÜŞ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin MYO, Kimyasal ve Kimyasal İşleme Teknolojisi Bölümü, Artvin.

<sup>2</sup>Artvin Çoruh Üniversitesi, Bilim-Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Artvin.

<sup>3</sup>Artvin Çoruh Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Artvin.

Geliş Tarihi (Received Date): 08.01.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 20.06.2019

## Özet

Bu çalışmada; saf su örneklerine ilave edilen belli derişimde Co(II), Cu(II), Fe(III) ve Ni(II) iyonlarının sulu ortamdan giderimi araştırılmıştır. İlk olarak 4-metoksisalisilaldehit ve 4-aminoantipirin bileşiklerinin tepkimesi sonucu 4-{2-hidroksi-4-metoksi-benziledenamino}-1,5-dimetil-2-fenil-1-H-pirazol-3(2H)-on (Schiff bazı) sentezlenmiştir. Sentezlenen Schiff bazı metal komplekslerine dönüştürülmüş ve UV-Gör bölgedeki absorsiyon artışları belirlenmiştir. Ardından komplekslerin sulu fazdan absorpladığı metal iyonu derişimini bulmak için katı faz ekstraksiyonu işlemi uygulanmış ve ekstraksiyon sonrası sulu fazda kalan metal iyonu derişimleri ICP-OES ile mg/L düzeyinde tayin edilmiştir. Bu sonuçlara göre; dört metal iyon için komplekse ait optimum şartlar; metal-ligant bağlanma oranı (Job's metodu): 1/2, reaksiyon süresi: 15 dakika, pH: 6.5, reaksiyon sıcaklığı: 25 °C olarak bulunmuştur. Ayrıca ekstraksiyon yöntemi için geri kazanım değerleri 0.25, 1.0 ve 10 mg/L konsantrasyonda Co(II), Cu(II), Fe(III) ve Ni(II) iyonları için ayrı ayrı uygulanmıştır. En iyi verim 0.25 mg/L konsantrasyondaki çözeltiler için en düşük %85.2 en yüksek %96.8 olarak bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Ağır metal, Schiff bazı, ICP-OES, UV-Görünür Spektrofotometre, Katı faz ekstraksiyonu, Aminoantipirin, Salisilaldehit.

\* Mustafa Umut KONANÇ, umutkonanc@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4141-3923>  
Mustafa Kemal GÜMÜŞ, mkgumus@artvin.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-6373-5221>

## Determination of Cu (II), Co (II), Fe (III) and Ni (II) ions by ICP-OES after solid-phase extraction of their Schiff complexes in water samples

### Abstract

*In this study, the removal of Co (II), Cu(II), Fe(III) and Ni(II) ions from the aqueous medium at a certain concentration added to the pure water samples was investigated. Firstly, 4-{2-hydroxy-4-methoxy-benzylidene-amino}-1,5-dimethyl-2-phenyl-1-H-pyrazole-3(2H)-one (Schiff base) was synthesized between 4-methoxysalicylaldehyde and 4-aminoantipyrine compounds. Synthesized Schiff base was transformed into metal complexes and the increase in absorptivity in the UV-vis region was determined. Then, solid phase extraction was performed to find the metal ion concentration that the complexes absorbed from the aqueous phase, and the metal ion concentrations remaining in the aqueous phase after the extraction were determined in mg/L level with ICP-OES. According to these results; optimum conditions for the complex for four metal ions; metal-ligand binding ratio (Job's method): 1/2, reaction time: 15 minutes, pH: 6.5, reaction temperature: 25 °C. In addition, the recovery method was applied separately for Co (II), Cu (II), Fe (III) and Ni (II) ions at a concentration of 0.25, 1.0 and 10 mg/L. The best yield was found to be 85.2% and 96.8% for solutions at 0.25 mg/L concentration.*

**Keywords:** Heavy metal, Schiff base, ICP-OES, UV-Visible Spectrophotometer, Solid phase extraction, Aminoantipyrine, Salicylaldehyde.

### 1. Giriş

Çevre kirliliğine neden olan kirleticilerden biri de ağır metallerdir. Ağır metaller; düşük konsantrasyonlarda yüksek toksik etki gösterebilen metal grubunun ortak adıdır. Bu grup içerisinde periyodik tabloda yer alan kurşun, kadmiyum, demir, kobalt, çinko, civa, arsenik gibi 60'tan fazla metal sayılabilmektedir. Bu elementler doğada elementel halde bulunmayıp; sülfürleri, karbonatları ve silikatları şeklinde bulunurlar. Sulara taşınan ağır metallerin çok düşük konsantrasyonlara kadar seyrelmesi ve kısmen karbonat, sülfür, sülfat gibi iyonlarla tekrar bileşik oluşturması sonucu su tabanında çökme ve zenginleşme işlemi gerçekleşmektedir. Sediment tabakasının adsorpsiyon kapasitesi sınırlı olduğundan suların ağır metal konsantrasyonu gittikçe artmaktadır [1]. Bu durum toprak kirliliğinde yüksek kirlenici potansiyeline sahip olan As, Cd, Cr, Hg, Cu ve Pb gibi metaller için de söylenebilir. Kirlenmiş sahalarda yer alan ağır metallerin bitki dokularında birikmesi sonucu gıda zincirinin son halkası olan canlı organizmalara kadar ulaşabilmesi bu yolla mümkün olmaktadır. Ancak bu durum ağır metallerin canlı organizmada toksik etki göstereceği anlamına gelmez. Bu sebeple ağır metalleri organizmada biyolojik proseslere katılma derecelerine göre; 1. tür ve 2. tür olarak iki sınıfa ayırabiliriz. 1. tür metaller: Besin yoluyla dışarıda alınan ve organizmanın yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmesi için yapısında belirli konsantrasyonlarda bulunması gereken metaller (Zn, Cu, Fe gibi). 2. tür metaller: Canlı organizmanın yaşamsal faaliyetleri için gereksinim duymadığı, çok düşük konsantrasyonlarda bile

ciddi sağlık problemlerine yol açabilen (As, Hg, Cd gibi) metal turleri olarak tanımlanabilmektedir. Ekosistem uzerinde yaşamsal faaliyetlerin etkin ve elverişli olarak sũrdũrũlebilirliđi açısından bu toksik grubun sınır değerlerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda hava, su ve toprak için limit değerler belirlenmiştir. Bu limit değerlerin belirlenmesine yœnelik olarak yapılan çalışmalarda Atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS), İndũktif eşleşmiş plazma optik emisyon spektroskopisi (ICP-OES), İndũktif eşleşmiş plazma kũtle spektroskopisi (ICP-MS) gibi spektroskopik yœntemler oldukça popũler olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda dũřuk konsantrasyonda yũksek toksik etki gœsteren kirleticilerin tespitine yœnelik olarak birçok œn zenginleştirme metodu geliştirilmiştir. Bu metot turlerinden biride metal iyonunun organik yapıda bir reaktif ile oluşturduğu kompleksleşme reaksiyonlarıdır. Oluşan bu kompleks ortamdaki matriksten rahatça izole edilebilecek ve zenginleştirilebilecektir. Bu amaçla kullanılan tũrevlendirme reaktifleri arasında ditiyonlar, ditiyokarbomatlar, hidrazonlar ve Schiff bazları (iminler) verilebilir.

Schiff bazları bir primer amin ile karbonil bileşiğinin karbonu arasında gerçekleşen kondenzasyon tepkimesi sonucu oluşmaktadır. Oluşan bu yeni bileşiğin en karakteristik œzelliđi yapısında bir karbon-azot çift bağlından oluşan imin grubu (-C=N-) bulundurmasıdır. İlk defa 1869 yılında ‘‘Hugo Schiff’’ tarafından sentezlenen bu yapısının koordinasyon bileşiklerinde etkin olarak kullanımı 1930’lu yıllarda Preiffer ve arkadaşlarının kullanımı ile başlamıştır [2]. Schiff bazlarının fiziksel, kimyasal ve spektroskopik œzellikleri incelendiğinde geçiş metalleri, lantanit ve radyoaktif elementlerle kararlı kompleks oluşturabilmekte œzelliklerinden dolayı koordinasyon kimyasında etkin olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu yapılar; iyon tũrũne bağlı olarak şelatlama ve gœrũnũr bœlgede renkli kompleksler verebilmesi gibi spesifik œzelliklerinden dolayı absorpsiyon, emisyon, kũtle ve spektrofotometrik yœntemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [3,4].

Chimpalee vd. yaptıkları çalışmada; Cu(II) iyonunun spektroskopik yœntemle belirlenmesine için, bis(asetilaseton)etilendiamin reaktifini kullanarak M-(H<sub>2</sub>AA)<sub>2</sub>en kompleksine dœnũřtũrmũř ve oluşturulan kompleksi sıvı faz ekstraksiyonla ayırarak spektrofotometrede 343, 370 ve 570 nm’de tayin etmişlerdir [5]. Dalman vd.; farmasotik ve biyolojik œrneklerde yer alan Cu (II) iyonunun spektroskopik yœntemle belirlenmesi için 3-{2-[2-(2-hidroksiimino-1-metil-propilidenamino)-etilamino]-etilimino}-bũtan-2-on oksim kullanılarak M-(H<sub>2</sub>mdo) kompleksine dœnũřtũrmũř ve oluşturulan kompleksi spektrofotometre ile 570 nm’de mg/L dũzeyinde tayin etmişlerdir [6]. Redd vd. yaptıkları çalışmada endũstriyel alaşımlarda bulunan Hg(II) iyonunun spektroskopik yœntemle belirlenmesi için diasetil monoksim izonikotinoilhidrazon (DMIH) kullanarak M-DMIH kompleksine dœnũřtũrmũř ve spektrofotometre kullanılarak 351 nm’de mg/L dũzeyinde tayin etmişlerdir [7]. Cesur [8]; su œrneklerinde Pb(II), Cd(II), Cu(II) ve Mn(II) iyonlarını alevli atomik absorpsiyon (FAAS) ile belirlenmesine yœnelik olarak fenilpiperazin ditiyokarbamat (KPPzDC) kullanarak M-KPPzDC kompleksine dœnũřtũrmũř ve katı faz ekstraksiyon ile elde edilen tũrevi FAAS ile mg/L dũzeyinde tayin etmiştir. Cheria vd. [9]; Th(IV) œzeltisinin ekstrakte edilmesi ve fotometrik yœntemle belirlenmesi için (E)-4-(2-hidroksifenil-imino)pentan-2-on (AcPh) kullanarak M-AcPh kompleksine dœnũřtũrmũř ve oluşturulan kompleksi spektrofotometre ile 540 nm’de mg/L dũzeyinde tayin etmişlerdir. Sun Rui vd. [10]; deniz suyu œrneklerinde bulunan Cd(II) iyonunun Atomik floresenans spektrometre ile belirlenmesine yœnelik olarak amonyum pirolidin ditiyokarbamat (APDC), sodyum

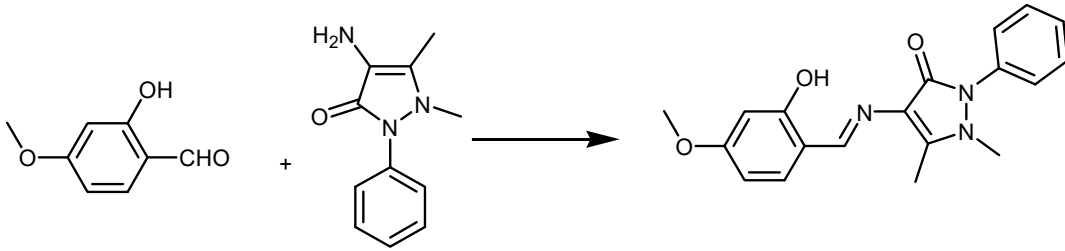
dimetil ditiyokarbamat (DMDTC), amonyum dibütül ditiyofosfat (DBDTP) ve sodyum dietil ditiyofosfat (DEDTP), sodyum dietil ditiyokarbamat (DDTC) reaktifleri kullanılarak komplekslerine dönüştürmüş ve elde edilen türevi AFS ile  $\mu\text{g/L}$  düzeyinde tayin etmişlerdir.

Bu çalışmada öncelikli olarak metal iyonlarına bağlanabilen bir Schiff bazı sentezlenmiştir. Schiff bazı; 4-aminoantipirin ile 4-metoksisalisilaldehit (2-hidroksi-4-metoksi-benzaldehit) arasında asit katalizörlüğünde gerçekleşen kondenzasyon tepkimesi sonucu 4-{2-hidroksi-4-metoksi-benziliden-amino}-1,5-dimetil-2-fenil-1-*H*-pirazol-3(2*H*)-on olarak elde edilmiş ve sulu ortamda farklı derişimde hazırlanan metal iyonları ile komplekslerine dönüştürülmüştür. Elde edilen komplekslerin kararlı yapılarını oluşturmak için pH etkisi, reaksiyon süresi, ekstraksiyon yöntemi, metal ligant bağlanma oranı (Job's metodu) gibi parametreler araştırılarak optimum şartlar belirlenmiştir. Optimum şartlara göre katı faz ekstraksiyon için  $\text{C}_{18}$  silika tabanlı (ODS) bir mikrokolon hazırlanmıştır. Mikrokolondan farklı derişimlerde metal iyon çözeltileri geçirilmiş ve kolonda absorplamadan kalan çözeltiler ICP-OES ile ölçülerek her bir iyonun absorbans verimi ve absorbans kapasitesi ayrı ayrı tespit edilmiştir.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1 Schiff bazının sentezlenmesi

0.152 g (1 mmol) 2-hidroksi-4-metoksibenzaldehit ve 0.203 g (1 mmol) 4-aminoantipirin tartılarak reaksiyon kabına konulmuştur. Bu karışımın üzerine 2 mL etanol, katalizör olarak 1 damla asetik asit ilave edilerek "Anton Paar Monowave 300 monomode" sentez reaktöründe  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  30 dakika mikrodalga ışınmasına maruz bırakılmıştır. Reaksiyonun takibi ince tabaka kromatografisi (TLC) yardımıyla yapılmıştır. Ürünün kristanlenmesi için buzdolabında bir gün bekletilmiştir. Elde edilen sarı renkli katı madde süzgeç kağıdından süzülerek ayrılmış ve soğuk etanolle (2 mL) yıkanmıştır. Schiff bazının sentez reaksiyonu Şekil 1. de gösterildiği gibidir.



Şekil 1. Schiff bazının elde edildiği sentez reaksiyonu.

Sentezlenen Schiff bazının yapı karakterizasyonu için NMR, FTIR ve Elementel analizleri yapılmıştır.  $^1\text{H}$  NMR analizi için Schiff bazından 10 mg tartılarak NMR tüpüne aktarılmış ve üzerine 1 mL kloroform-*d* eklenerek tamamen çözünmesi sağlanmıştır. Ardından "Nanalysis nmready 60 MHz Benchtop Spectrometer" NMR cihazına yerleştirilen numunenin proton  $^1\text{H}$  NMR spektrumu alınmıştır. FTIR analiz için Schiff bazından 20 mg tartılarak havada toz haline getirilmiş ve "Shimadzu IR Prestige-21" FTIR cihazı ve ATR ataçmanı kullanılarak  $4000\text{-}600\text{ cm}^{-1}$  arasında spektrum taraması yapılmıştır. Elementel analiz için Schiff bazından 20 mg tartılarak kalay kapsüle yerleştirilmiş ve preslenmiştir. Numune "Vario MACRO Cube:

Elemental Analyzer” cihazında oto örnekleyiciye yüklenerek 1100 C° yakılmış ve C, H ve N oranı yüzdesel olarak hesaplanmıştır.

### **2.2 Metal-Schiff bazı kompleksinin oluşturulması**

Metal-Schiff bazı kompleksinin oluşturulması için  $2 \times 10^{-4}$  M 100 mL (% 8’lik metanol-su karışımı) Schiff bazı ve  $2 \times 10^{-4}$  100 mL metal iyonu içeren sulu faz stok çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan her bir çözeltinin 550-300 nm arasında temel UV-Gör spektrum taraması yapılarak en yüksek absorbans şiddetlerini veren dalga boyu belirlenmiştir. Daha sonra hazırlanan her bir metal iyonu ve Schiff bazı çözeltisinden eşit hacimlerde alınarak bir behere aktarılmış ve 250 rpm’de 5 dakika karıştırılarak renkli metal-Schiff bazı kompleksi oluşturulmuştur. Oluşturulan komplekslerin 550-300 nm arasında spektrum taraması yapılarak dalga boyu ve absorbans şiddetlerindeki değişim belirlenmiştir. Ardından kompleks kararlılığını artırmak amacıyla optimizasyon işlemlerine geçilmiştir.

### **2.3 Optimizasyon çalışmaları**

Metal-ligant bağlanma oranı (Job’s Metodu), pH etkisi, sıcaklık etkisi, ekstraksiyon türü ve reaksiyon süresi temel parametreler olarak belirlenmiştir. Metal-ligant kompleksleri arasında sıralamada en yüksek absorbans şiddeti gösteren Cu(II) iyonu olmuştur. Bu iyon çözeltisi üzerinden optimizasyon deneyleri yapılarak diğer metal iyonlarına uygulanmıştır.

#### **2.3.1 Metal-Ligant bağlanma oranının tespiti**

Metal-Schiff bazı kompleksinin bağlanma oranının tespiti amacıyla Job’s metodu kullanılmıştır. Bu metoda göre; Schiff bazı ile metal iyonu derişiminin toplamı sabit kalmak koşulu ile çözeltilerin hacimleri değiştirilerek oluşturulan komplekslerin absorbans şiddetleri ölçülmüştür. Schiff bazının değişen hacimlerine karşı absorbans değerleri grafiğe geçirilerek yapıya ait en uygun bağlanma oranı tespit edilmiştir.

#### **2.3.2 pH etkisi**

Kompleks kararlılığı üzerine pH etkisini belirlemek için pH değerleri sırası ile 4, 5, 6 ve 6.5 olarak ayarlanmıştır. Bu pH değerinde hazırlanan her bir çözelti için, UV spektrofotometrede referans su’ya karşı 550-300 nm arasında spektrum taraması yapılmış ve maksimum absorbans şiddetini veren değer tespit edilmiştir.

#### **2.3.3 Reaksiyon süresi**

Metal-Schiff bazı kompleksinin kararlı bir yapıya dönüştüğü reaksiyon süresini belirlemek için, hazırlanan kompleks çözeltisinden 100 mL alınarak bir behere aktarılmış ve manyetik karıştırıcı ile 250 rpm’de karıştırılmaya başlanmıştır. Ardından çözeltiden 15 dakikalık periyotlarla bir saat boyunca örnekler alınmış ve spektrofotometre ile suya karşı 415 nm’de absorbans değeri ölçülmüştür.

#### **2.3.4 Ekstraksiyon yöntemi**

Oluşturulan metal-Schiff bazı kompleksinin inorganik safsızlıkların uzaklaştırılabilesi ve en iyi verimle absorpsiyon kapasitesinin belirlenmesi amacıyla katı ve sıvı ekstraksiyon işlemleri uygulanmıştır.

##### **2.3.4.1 Sıvı-Sıvı ekstraksiyon**

Metal-Schiff bazı kompleksinin ekstraksiyon öncesi absorbans şiddetlerinin belirlenmesinin ardından, sıvı ekstraksiyon için kloroform, diklorometan, *n*-hekzan,

dietil eter seçilmiştir. Belirlenen bu çözümler ile gerçekleştirilen kademeli sıvı-sıvı ekstraksiyon işlemi sonrası organik faza geçen ve su fazında kalan kompleksin absorpsiyon şiddetleri 550-300 nm arasında spektrofotometre ile ölçülerek absorpsiyon verimleri hesaplanmıştır.

#### 2.3.4.2 Katı-Sıvı ekstraksiyon

Katı-sıvı ekstraksiyon için silika tabanlı mini bir kolon hazırlanmıştır. Farklı miktarlarda silika (C<sub>18</sub>) tartılarak cam damlalıktan yapılmış olan bir cam kolon içerisine yerleştirilmiştir. Hazırlanmış olan kolon deiyonize su, etanol ve tekrar deiyonize su ile yıkanmıştır. Daha sonra her bir metal-Schiff bazı kompleksi uygun derişimlerde hazırlanarak silikakolondan geçirilmiştir. Ardından kolonda tutulan her metal-Schiff bazı bileşiği düşük hacimde metanol ile geri alınmıştır. Geri alınan çözeltinin 550-300 nm arasında spektrum taraması yapılarak ekstraksiyon verimi hesaplanmıştır. Çözeltinin geri alınmasında sırası ile metanol, etanol, kloroform, dietil eter ve *n*-hekzan kullanılmıştır.

#### 2.3.5 Absorpsiyon denemeleri

Absorpsiyon denemeleri için sentezlenen Schiff bazından sırası ile 5 mg, 10 mg, 20 mg ve 40 mg tartılmış ve 250 mg silika malzeme ile karıştırılarak katı faz ekstraksiyonda kullanılan mikro kolonlar hazırlanmıştır.

##### 2.3.5.1 Giderim verimi

Giderim veriminin hesaplanması için kontrol numunesi olarak Schiff bazı içermeyen silika mikro kolon ve farklı miktarlarda Schiff bazı içeren silika mikro kolonlar hazırlanmıştır. Sırası ile 5 mL su, metanol ve tekrar su geçirilerek kolonların şartlanması sağlanmıştır. Ardından başlangıç derişimi 0.25 M, 1.0 M ve 10 M olarak hazırlanan Co(II), Cu(II), Ni(II) ve Fe(III) karışımları mikrokolonlara belirli hacimlerde yüklenmiş ve kolonda tutunmadan kalan metal iyonları derişimleri ICP-OES ile ölçülerek belirlenmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre ekstraksiyon öncesi ve sonrası dataları aşağıdaki bağıntı kullanılarak yüzdesel olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Giderim Verimi (\%)} = (C_o - C_e) * 100 / C_o \quad (1)$$

C<sub>o</sub>: Başlangıç konsantrasyonu

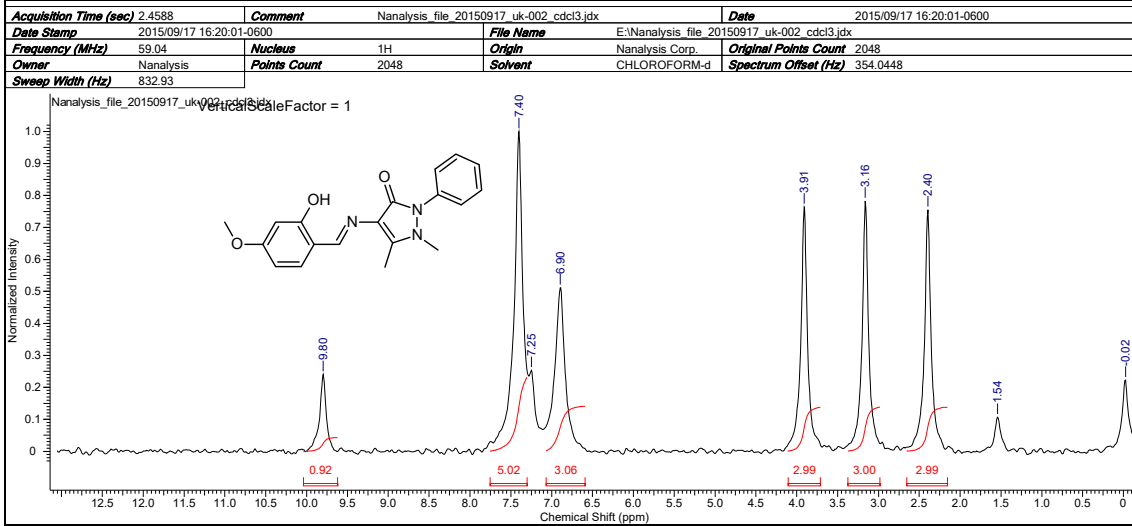
C<sub>e</sub>: Ekstraksiyon sonrası konsantrasyon

### 3. Sonuçlar ve tartışma

#### 3.1 Schiff bazı sentezinin kalitatif tayini

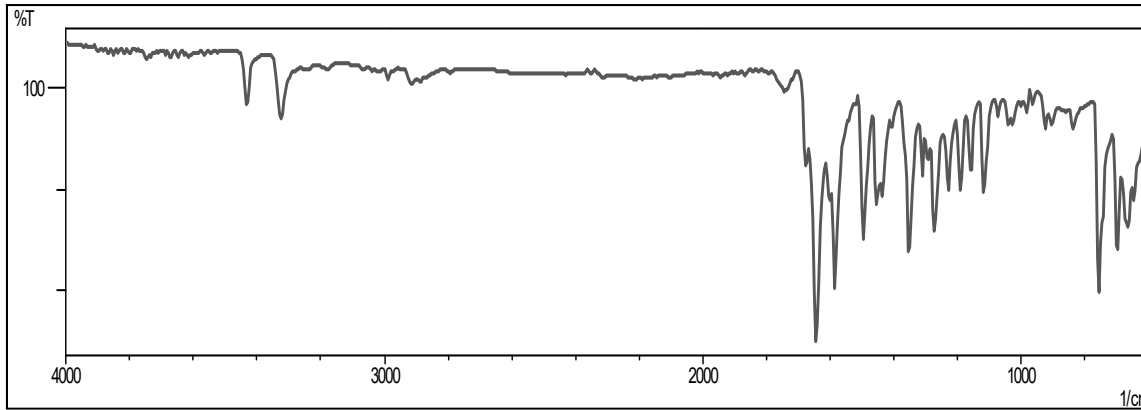
##### 3.1.1 Schiff bazının NMR spektrumu

Şekil 2'deki <sup>1</sup>H NMR spektrumunda; 2.40 ppm deki pik karbona bağlı metil grubu hidrojenlerini, 3.16 ppm deki pik azota bağlı metil grubu hidrojenlerini ve 3.91 ppm deki pik oksijene bağlı metil grubu hidrojenlerini göstermektedir. Ayrıca 7.40 ve 6.90 ppm deki aromatik halka hidrojenlerini ve 9.80 ppm deki pik hidroksil grubu protonunu göstermektedir. Bu spektruma göre Schiff bazının yapısı ile NMR spektrumunun verileri örtüşmektedir.

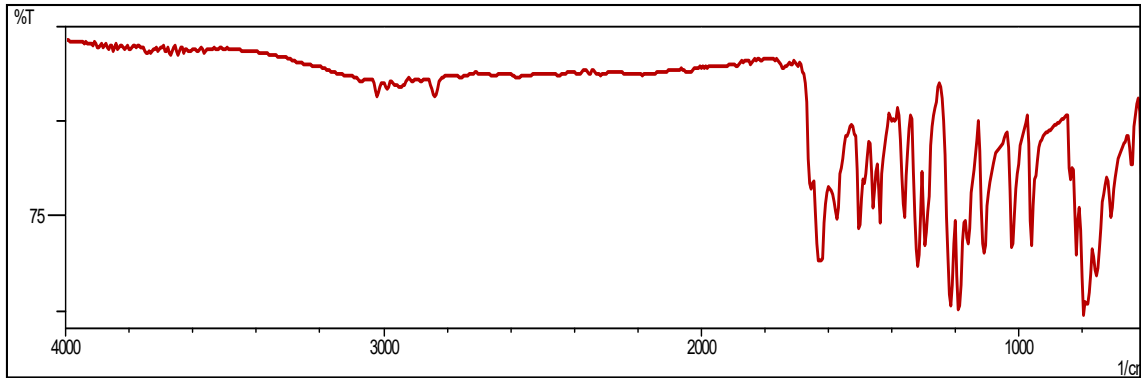
Şekil 2. Schiff bazının <sup>1</sup>H-NMR spektrumu.

### 3.1.2 Schiff bazının FTIR spektrumu

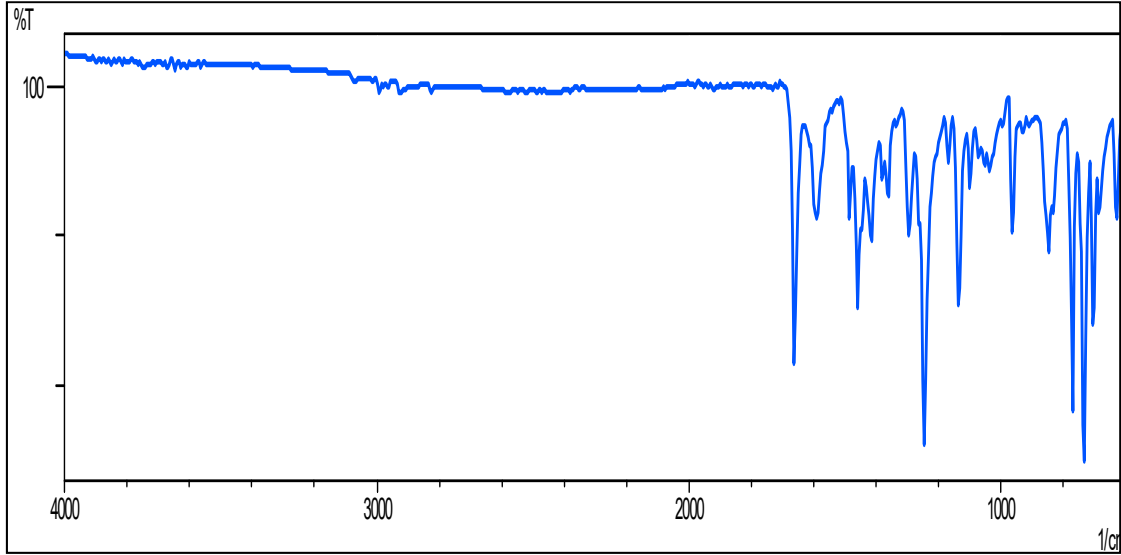
FTIR ölçümleri için yapılan çalışmada, sentez öncesi başlangıç maddeleri ve sentez sonrası ürüne ait IR spektrumu alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlara ait spektrumlar Şekil 3, 4, ve 5’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3. 4-Aminoantipirine ait IR spektrumu.



Şekil 4. 2-Hidroksi-4-metoksibenzaldehit’e ait IR spektrumu.



Şekil 5. Schiff bazına ait spektrumu IR.

Şekil 3’de 4-aminoantipirinin yapısında yer alan ve primer aminlerde 3300-3500 bandında gözlenen N-H gerilme bandı, aktif karbonil grubunun kondenzasyonu ile Schiff bazına dönüştüğü için Şekil 5’de çekilen IR spektrumunda gözlenmemektedir. Ayrıca Şekil 5’de 1600  $\text{cm}^{-1}$  civarında imin (C=N) bandı gözlenmektedir. Bu bilgiler ışığında, IR spektrumu ile elde edilen spektrumlara göre yapının sentezlendiği görülmektedir.

### 3.1.3 Schiff Bazının Elementel analizi

Sentezlenen Schiff bazının kantitatif tayini element analiz ile hesaplanan deneysel sonuçlar Chem draw programı kullanılarak hesaplanan teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.Sentezlenen Schiff bazının elementel analiz sonuçları.

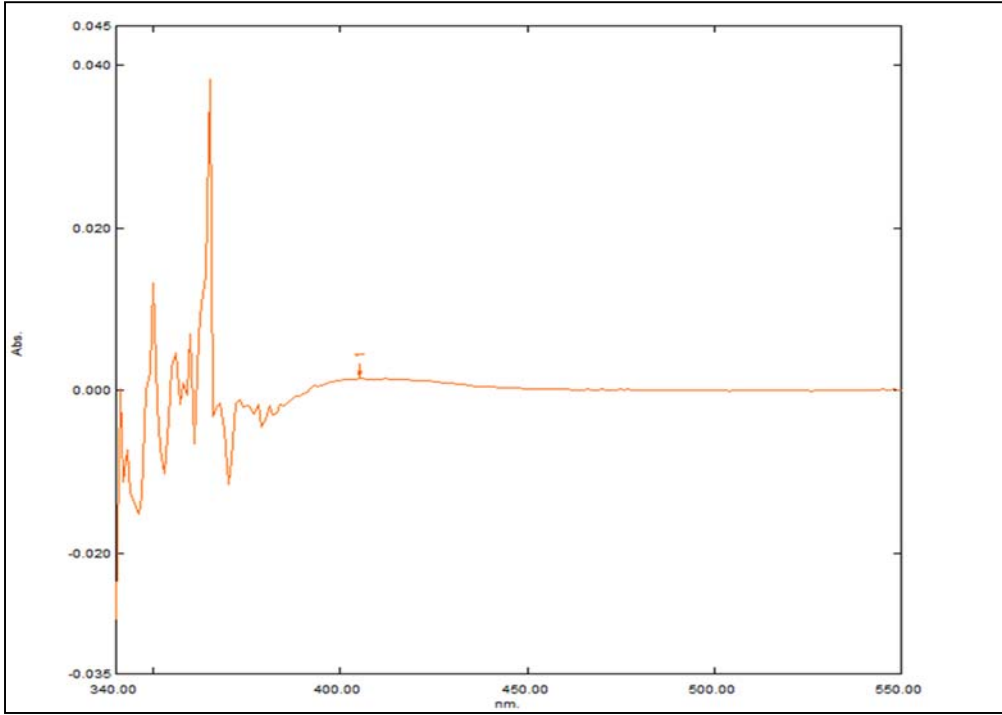
Sentezlenen Schiff Bazı ( $\text{C}_{19}\text{H}_{19}\text{N}_3\text{O}_3$ )	Teorik Sonuçlar	Deneysel Sonuçlar
	C(%): 67,74	C(%): 66,52
N(%): 12,46	N(%): 11,64	
H(%): 5,68	H(%): 6,15	

Elde edilen sonuçlara göre teorik hesaplamalar deneysel verilerle örtüşmektedir.

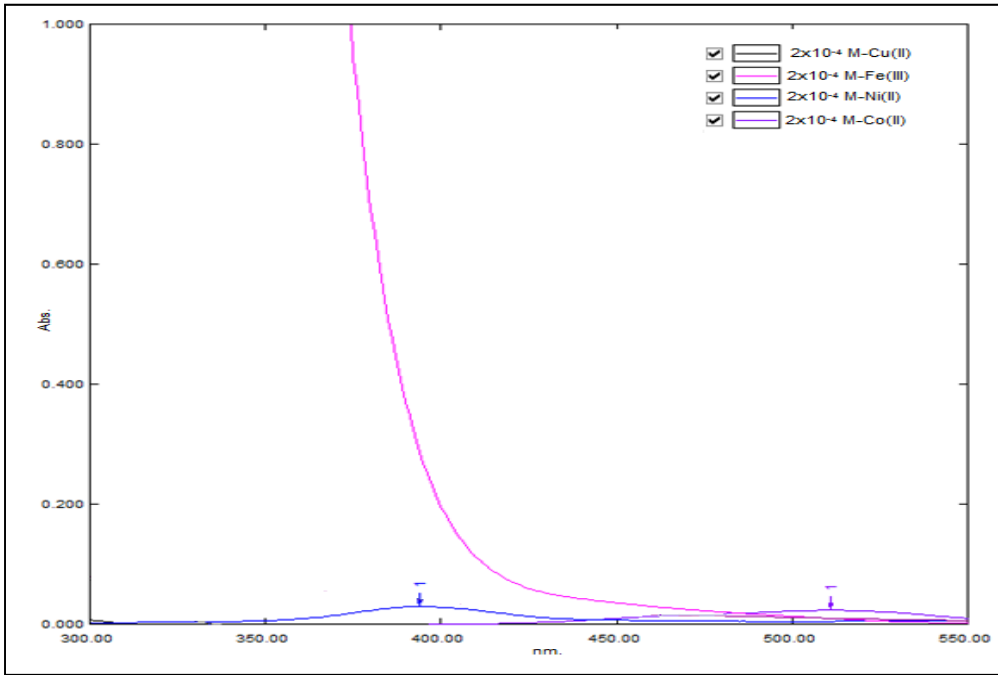
### 3.2 Schiff bazı ve sulu faz metal iyonlarının UV-Gör spektrum taramaları

Schiff bazı ve sulu faz metal iyonları için hazırlanan  $2 \times 10^{-4}$  M olan standart çözeltilerin kör çözeltiliye karşı (deiyonize su) UV-Gör spektrum taramaları yapılarak absorbans şiddetleri belirlenmiştir.





Şekil 6. Schiff bazının 550-330 nm arası spektrumu.

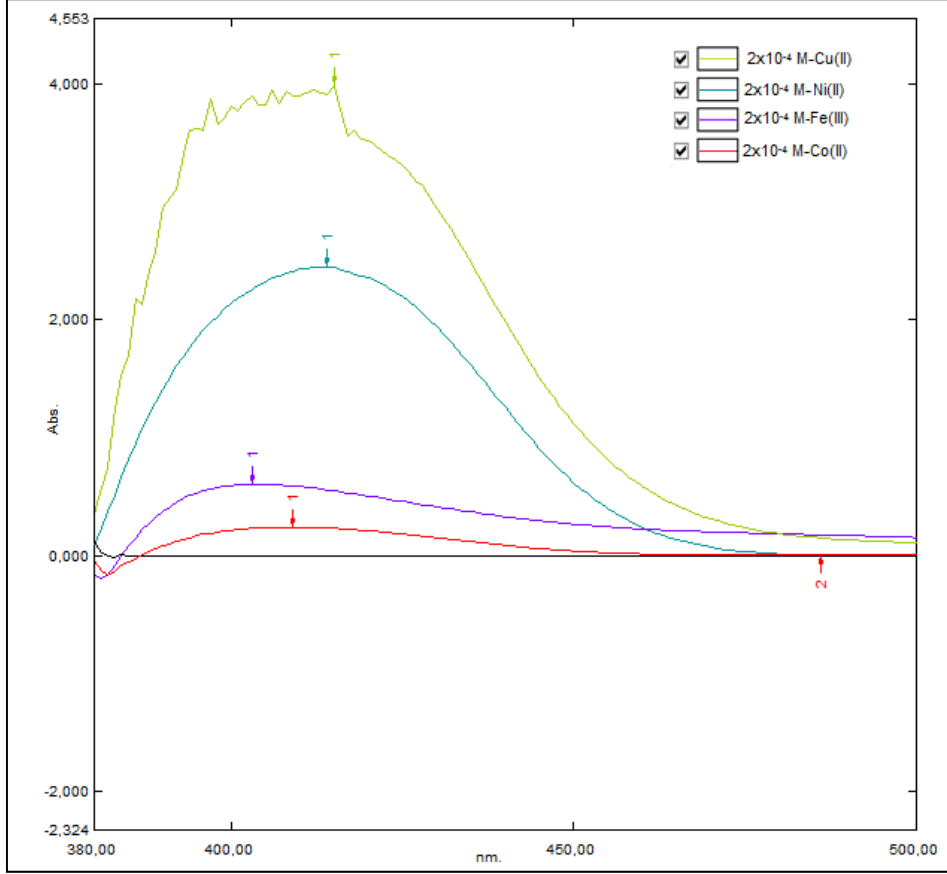


Şekil 7. Metal iyonlarının 550-330 nm arası spektrumu.

Şekil 6 Schiff bazı ve şekil 7 metal iyonlarının 550-300 nm arası spektrum grafiği incelendiğinde; görünür bölge absorban değerlerinin, Fe(III) iyonu hariç oldukça düşük olduğu görülmektedir.

### 3.3 Kompleksin absorbands şiddetine ekisi

Sulu faz metal çözeltilerinin görünür bölge absorbandslarını artırmak için Schiff bazı metal iyonu arasında gerçekleştirilen bağlanma sonucu 550-300 nm arasında değişen absorbands değerleri şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Metal-Schiff bazı kompleksinin 500-380 nm arası spektrumu.

Şekil 8’de metal-Schiff bazı kompleksinin görünür bölge absorbands şiddetlerinde değişim açıkça görülmektedir. Bu değişim grafiksel olarak incelendiğinde en yüksek absorbands şiddeti 414 nm olarak belirlenmiş olup sıralama Cu(II) > Ni(II) > Fe(III) > Co(II) şeklindedir.

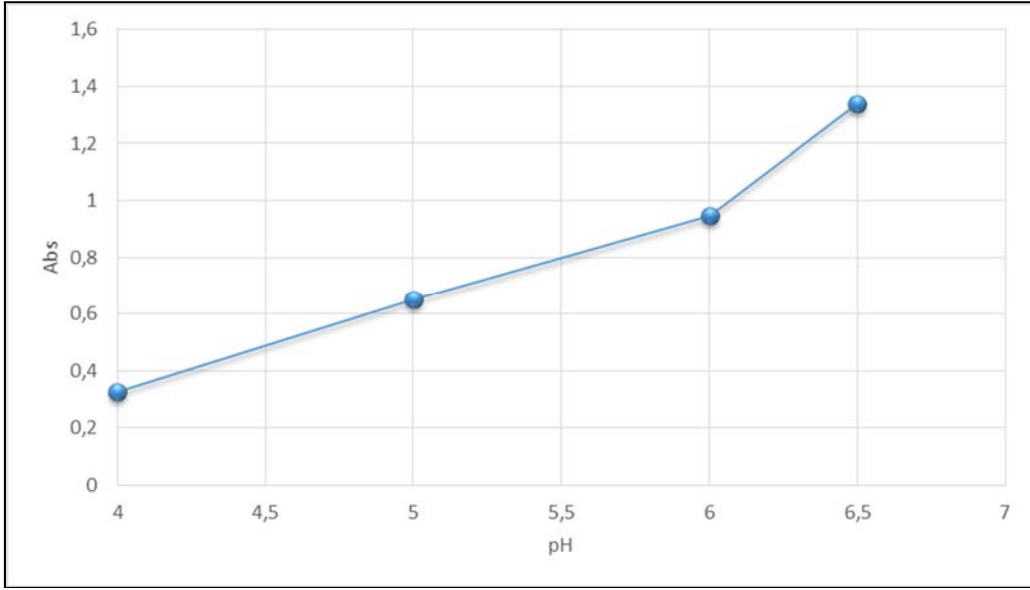
### 3.4 Optimizasyon çalışmaları

#### 3.4.1 Metal-Ligant bağlanma oranı

Metal-Schiff bazı komplekslerinin stokiometrik olarak birleşme oranını belirlemek için Job’s metodu kullanılmıştır. UV-Gör spektrofotometre ile 414 nm’de alınan spektrum sonuçlarına göre metal-ligant bağlanma oranı 1/1 olarak bulunmuştur.

#### 3.4.1 pH etkisi

Cu(II) iyonu ile Schiff bazı arasında oluşan kompleksleşme reaksiyonun için en yüksek absorbands şiddeti pH 6.5’de elde edilmiştir.

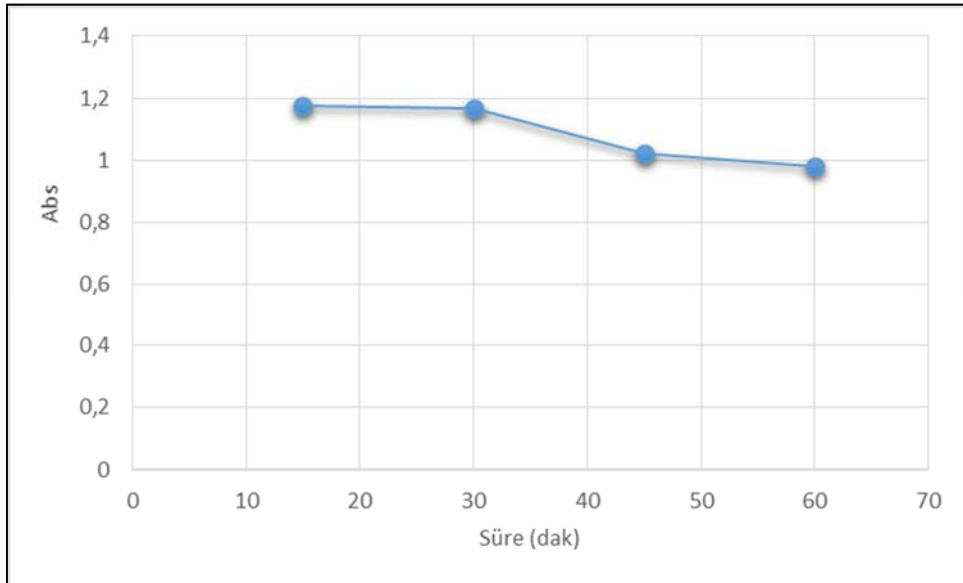


Şekil 9. Metal-Schiff bazı kompleksinin pH-Abs değişim grafiği.

Grafikten görüldüğü üzere ortam bazikliği arttıkça metal-Schiff bazı kompleksinin kararlılığı artmaktadır. Ancak bu durum metal iyonlarının bazik ortamda hidroksitleri şeklinde çökebilmesine yol açacağından maksimum pH değeri 6.5 ile sınırlı tutulmuştur.

### 3.4.2 Reaksiyon süresi

Reaksiyon süresinin tespiti için metal-Schiff bazı kompleksinin zamana bağlı olarak absorbans şiddetindeki değişimler incelenmiştir. Şekil 10'da metal ile Schiff bazı çözeltilisinin karıştırılması sonucu metal-Schiff bazı kompleksinin hemen oluştuğu ve 30 dakika boyunca kararlı bir yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Kompleks oluşumuna zamanın etkisi.

### 3.4.3 Ekstraksiyon yöntemi

#### 3.4.1 Sıvı-Sıvı ekstraksiyonu

Sıvı-sıvı ekstraksiyon yöntemi uygulamalarında metal-Schiff bazı kompleksinin organik çözücünün polaritesine göre farklı absorbans verimleri ile geri kazanım sağladığı görülmüştür. Çizelge 2’de görüldüğü üzere elde edilen kompleksin polar yapıda olan kloroform ve diklorometan fazına kolaylıkla geri alınabildiği buna karşın apolar yapıda olan *n*-hekzan ile düşük polar yapıdaki dietil eter fazına geri alınmadığı görülmektedir.

Çizelge 2.  $1 \times 10^{-4}$  M 1 mL standart metal çözeltileri kullanılarak oluşturulan kompleksin sıvı-sıvı ekstraksiyon verimleri.

Metal İyonu	Ekstraksiyon Verimleri (%)			
	Diklorometan	Kloroform	Dietil eter	<i>n</i> -Hekzan
Cu <sup>2+</sup>	43.7	43.2	0.7	0.1

\* n= 3 (ekstraksiyon tekrarı)

#### 3.4.2 Katı-Sıvı ekstraksiyon

Katı-sıvı ekstraksiyon uygulamalarında sentezlenen Schiff bazına nüfuz eden seçici metal iyonlarının kütle transferi ile aktarılması için hazırlanan mikrokolondan sırası ile 1'er mL deiyonize su, metalol ve tekrar deiyonize su geçirilerek kolon şartlandırılmıştır. Ardından oluşturulan sulu faz metal kompleksinden 1 mL alınarak kolona yüklenmiş ve basamaklı olarak sırası ile 1mL metanol, etanol, *n*-hekzan ve dietileterle geri alınmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda apolar yapıda olan *n*-hekzan ve düşük polariteye sahip dietil eterle geri kazanım yapılamadığından çalışmaya metanol ve etanol üzerinden devam edilmiştir.

Çizelge 3.  $1 \times 10^{-4}$  M 1 mL standart metal çözeltileri kullanılarak oluşturulan kompleksin katı-sıvı ekstraksiyon verimleri.

Metal İyonu	Ekstraksiyon Verimleri (%)	
	Etanol*	Metanol*
Cu <sup>2+</sup>	55.2	87.3

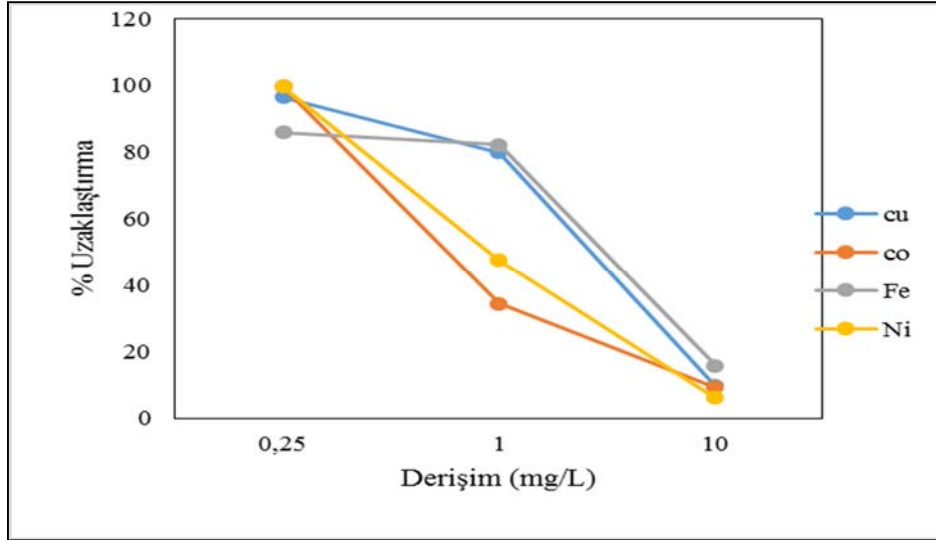
\* n= 3 (ekstraksiyon tekrarı)

Yapılan sıvı-sıvı ve katı-sıvı ekstraksiyon işlemleri sonucunda metanol ile yapılan basamaklı katı-sıvı ekstraksiyon işlemi en yüksek ekstraksiyon verimine sahiptir

### 3.5 Adsorpsiyon denemeleri

#### 3.5.1 Giderim verimi

Katı-sıvı ekstraksiyon için 0.25 M, 1.0 M ve 10 M olarak hazırlanan Co(II), Cu(II), Ni(II) ve Fe(III) karışımlarının mikro kolonda tutunma ve absorpsiyon kapasitelerinin belirlenmesi amacıyla ICP-OES ile ölçüm sonuçları şekil 11 ve çizelge 4’de görülmektedir.

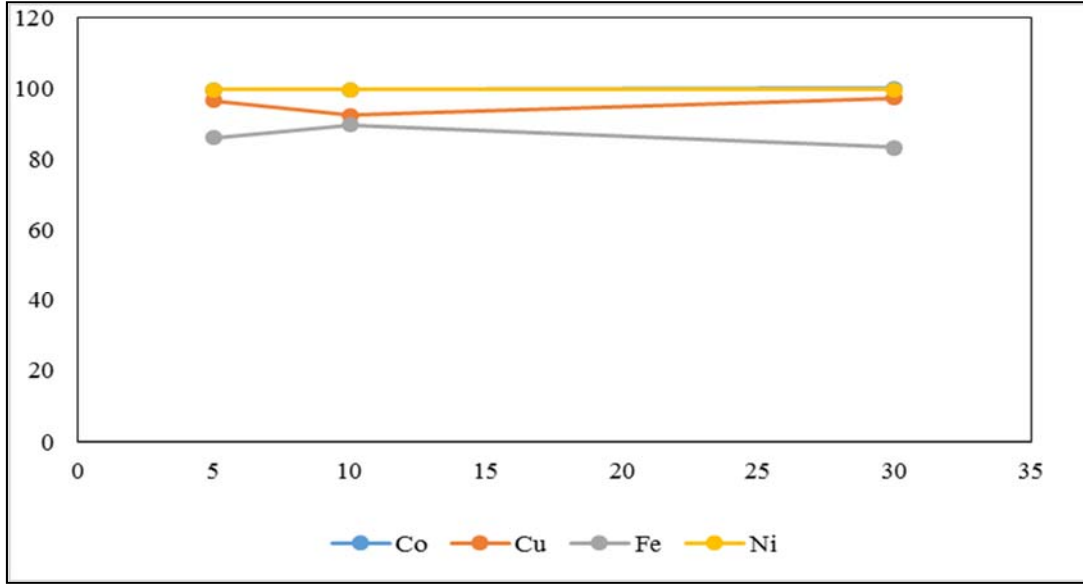


Şekil 11. Metal Konsantrasyonunun adsorbent verimine etkisi.

Çizelge 4. Farklı derişimelerde hazırlanan metal iyonlarının adsoprsiyon verimleri.

Elem ent adı	Absorbent konsantrasyonu (mg/L)	(a) CP-OES Ölçüm Sonuçları* (Analit)	(%) Uzaklaştırma	ICP-OES Ölçüm Sonuçları (Kontrol)
Co <sup>2+</sup>	0.25	0.001	99.6	0.247
Co <sup>2+</sup>	1	0.656	34.4	0.985
Co <sup>2+</sup>	10	9.267	9.3	9.828
Cu <sup>2+</sup>	0.25	0.052	96.5	0.263
Cu <sup>2+</sup>	1	0.052	80.0	1.053
Cu <sup>2+</sup>	10	9.517	4.8	10.726
Fe <sup>3+</sup>	0.25	0.215	86.0	0.260
Fe <sup>3+</sup>	1	0.177	82.3	1.046
Fe <sup>3+</sup>	10	8.422	15.8	10.302
Ni <sup>2+</sup>	0.25	24.90	99.6	0.251
Ni <sup>2+</sup>	1	0.524	47.6	1.002
Ni <sup>2+</sup>	10	9.406	5.9	9.992

\*n=3 (ICP-OES ile numune tekrarı)



Şekil 12. Adsorban miktarının adsorbans verimine etkisi.

Çizelge 5. Schiff bazının sabit derişimde (0.25 M) metal konsantrasyonuna etkisi.

Schiff Bazı miktarı (mg)	Element Adı			
	Co <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Ni <sup>2+</sup>
5	99.6	96.5	86.0	99.6
10	99.6	92.3	89.6	99.4
20	99.9	97.2	83.2	99.8

Şekil 11 ve çizelge 4’de görüldüğü üzere eşitlik (1) ile hesaplanan adsorbans verimleri ( $q_e$ ) metal konsantrasyonu artıkça azalma göstermektedir. Metal konsantrasyonu 0.25 mg/L olarak hazırlanarak uygulanan katı faz ekstraksiyon işlemi için verim % 90’nın üzerinde iken derişimin 10 mg/L kadar çıkarılması ile adsorbans verimi % 10’nun altına düşmektedir. Bu durum adsorbent ile metal iyonu arasındaki kondenzasyon reaksiyonun belirli yüzeylerde ve belli konsantrasyonlarda gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca şekil 12 ve çizelge 5’de görüldüğü gibi 0.25 mg/L derişime sahip metal iyonu çözeltileri için adsorbent miktarlarının 5 mg ile 20 mg arasında değiştirilmesi adsorpsiyon kapasitesinde anlamlı bir değişime neden olmamıştır. Bununla birlikte 1.0 M ve 10 M çözeltilerle tekrarlanan çalışmalarda şekli 11’deki sonuçlarla paralellik göstermektedir. Bu durum konsantrasyon artışına bağlı olarak metal iyonu derişimleri için belli bir doygunluk seviyesinin olduğunu göstermektedir.

### 3.5.2 Adsorpsiyon izotermi

Schiff bazı metal komplekslerinin katı faz ekstraksiyon kolonundaki adsorpsiyon kapasitesini belirlemek amacıyla kullanılan Langmuir ve Freundlich eşitlikleri için sabitler belirlenmiştir.

Langmuir izotermi için 0.25 mg/L derişiminde Co(II), Cu(II), Fe(III) ve Ni(II) için sırasıyla  $C_e/q_e$  oranının  $C_e$ ’ye karşı grafiğe geçirilmesi ile elde edilen grafiğin eğiminden  $q_{max}$  ve kesiminden  $K_L$  değeri hesaplanmıştır.

Freundlich izotermi için 0.25 mg/L derişiminde Co(II), Cu(II), Fe(III) ve Ni(II) için sırasıyla  $q_e = K_f \cdot C_e^n$  bağıntısının logaritmik olarak uygulanması sonucu,  $\log q_e$ 'nin  $\log C_e$ 'ye karşı grafiğe geçirilmesi ile elde edilen grafiğin eğiminden  $1/n$  değeri ve kesiminden  $\log K_f$  değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler çizelge 6'de gösterilmektedir.

Langmuir ve Freundlich izoterminden elde edilen sabitler ve adsorbans kapasitelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar çizelge 6'da görülmektedir.

Çizelge 6. Langmuir ve Freundlich izotermi için yapılan çalışmalar.

Yapılan çalışmalar	Tayin Edilen İyonlar	Langmuir İzoterm İzoterm sabitleri			Freundlich İzoterm sabitleri		
		$q_{max}$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R^2$	$K_f$	$1/n$	$R^2$
Ceglowski vd. [11]	$Cu^{2+}$	$81.72 \pm 0.37$	$0.068 \pm 0.010$	0.999	$7.79 \pm 2.98$	$0.40 \pm 0.09$	0.813
	$Cd^{2+}$	$157.25 \pm 1.41$	$0.031 \pm 0.010$	0.999	$13.01 \pm 4.37$	$0.37 \pm 0.06$	0.868
	$Cr^{3+}$	$29.97 \pm 2.95$	$0.010 \pm 0.004$	0.953	$2.05 \pm 0.26$	$0.39 \pm 0.03$	0.976
	$Ni^{2+}$	$67.45 \pm 2.55$	$0.013 \pm 0.004$	0.992	$3.71 \pm 1.03$	$0.43 \pm 0.06$	0.920
	$Co^{2+}$	$71.29 \pm 1.98$	$0.026 \pm 0.011$	0.996	$7.57 \pm 1.68$	$0.34 \pm 0.05$	0.913
Dursun ve Köysüren [12]	$Ni^{2+}$	0.548	-0.833	0.899	3.221	-1.111	0.897
	$Co^{2+}$	1.839	-0.437	0.702	10.86	-1.884	0.697
Hussein vd. [13]	$Co^{2+}$	70.47	0.20	-	-	-	-
	$Fe^{3+}$	63.49	0.26	-	-	-	-
Monier vd. [14]	$Cu^{2+}$	$124 \pm 1$	0.551	0.899	3.221	-1.111	0.897
	$Cd^{2+}$	$84 \pm 2$	-0.437	0.702	10.86	-1.884	0.697
Ji vd. [15]	$Cu^{2+}$	28.57	0.086	0.998	8.2	0.23	0.962
	$Ni^{2+}$	16.95	0.039	0.996	3.3	0.30	0.812
Yavuz vd. [16]	$Mn^{2+}$	0.446	0.067	-	-	-	-
	$Co^{2+}$	1.470	0.108	-	-	-	-
	$Ni^{2+}$	1.669	0.112	-	-	-	-
	$Cu^{2+}$	10.787	0.155	-	-	-	-
Yapılan Çalışma	$Co^{2+}$	0.084	1.44	0.827	1.049	0.894	0.9965
	$Cu^{2+}$	1.032	43.77	0.999	0.926	0.021	0.619
	$Fe^{2+}$	0.309	16.32	0.998	5.597	0.756	0.994
	$Ni^{2+}$	0.836	18.51	0.999	0.979	0.096	0.995

Denge adsorpsiyon izotermi için çözücüler ve adsorbans arasındaki davranışları açıklamada oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca bu izoterm modelleri adsorpsiyon bölgesinin tek basamakta olup olmadığı, homojen veya heterojen bir dağılım sahip olup olmadığı hakkında fikir vermektedir. Bu bilgiler ışığında yapılan çalışma sonucu çizelge 6'da elde edilen veriler regresyon değerlerin 1'e yakın olduğu Langmuir izoterm modeline daha uygun olduğunu göstermektedir. Bu izoterm modeli; yüzey düzleminde göç etmeyen adsorbans ile özdeş adsorpsiyon bölgelerine sahip eş enerjili yüzeylerin tek basamakta bir molekülü adsorpsiyonundan hareket ettiği varsayımına dayanmaktadır. Ayrıca tek tabaka adsorpsiyon için yüksek  $K_L$  değerleri yüksek afinite ile adsorpsiyonun gerçekleştiğini göstermektedir [17].

Sonuç olarak; 2-hidroksi-4-metoksibenzaldehit (4-metoksisalisilaldehit) ve 4-aminoantipirinin kondenzasyonu sonucu oluşan Schiff bazının, Co(II), Cu(II), Fe(III) ve Ni(II) iyonlarını sulu çözeltiden uzaklaştırılmada etkin bir adsorban olarak kullanılabileceği deneysel verilerle desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., Timur, S., Metallerin Çevresel Etkileri-I. **İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Dergisi**, 136, 47-53, (2003).
- [2] Patai, S., Chemistry of the Carbon-Nitrogen Double Bond. **Wiley**, 238-247, (1970).
- [3] Posokhov, Y., Kuş, M., Biner, H., Gümüş, M. K., Tuğcu, F. T., Aydemir, E., Kaban, S., İçli, S. Spectral properties and complex formation with Cu<sup>2+</sup> ions of 2-and 4-(N-arylimino)-quinolines. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 161(2-3), 247-254, (2004).
- [4] Avcibasi, N., Posokhov, Y., Ocaoglu, K., Varlikli, C., Kus, M., Türkmen, G., Gumus, M. K., Tugcu, F. T., Aydemir, E., Kaban, S. Spectrophotometric Determination of Cu<sup>2+</sup> with Quinolinyl Derivative in Organic and Aqueous Solutions. **Asian Journal of Chemistry**, 19(3), 1930, (2007).
- [5] Chimpale N., Chimpalee D., Keawpasert P., Burns D. T., Flow injection extraction spectrophotometric determination of nickel using bis (acetylacetone) ethylenedimine. **Analytica Chimica Acta**, 408, 123-127, (2000).
- [6] Dalman O., Tufekci M., Nohut, S., Guner S., Karabocek S., Spectrophotometric determination of copper in pharmaceutical and biological samples with 3-{2-[2-(2-hydroxyimino-1-methylpropylideneamino)-(ethylamino)]-ethyl-imino}-butan-2-one oxime), **Journal Of Pharmaceutical And Biomedical Analysis**, 27,183-189, (2002).
- [7] Reddy G. C., Devanna N., Chandrasekhar K. B., Derivative spectrophotometric determination of mercury (II) using diacetyl monoxime isonicotinoyl hydrazone (DMIH), **International Journal of Chemistry**, 3(2), 227-232, 2011.7
- [8] Cesur H., Determination of manganese, copper, cadmium and lead by FAAS after solid-phase extraction of their phenylpiperazine dithiocarbamate complexes on activated carbon, **Turkish Journal Of Chemistry**, 27,307-314, (2003).
- [9] Cheira, M. F., Orabi, A. S., Hassanin, M. A., Hassan, S. M., Solvent extraction of thorium (IV) from chloride solution using Schiff base and its application for spectrophotometric determination., **Chemical Data Collections**, 13, 84-103, (2018).
- [10] Sun, R., Ma, G., Duan, X., Sun, J., Determination of cadmium in seawater by chelate vapor generation atomic fluorescence spectrometry., **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, 141, 22-27, (2018).
- [11] Ceglowski, M., Schroeder, G., Preparation of porous resin with Schiff base chelating groups for removal of heavy metal ions from aqueous solutions., **Chemical Engineering Journal**, 263, 402-411, (2015).
- [12] Dursun, Ş., Köysüren H. N. U., Sudan kurşun ve nikel iyonlarının *Verbascum cheiranthifolium* L. materyali ile giderimi., **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 29, 3, 569-577, (2014).
- [13] Hussein, M. A., Marwani, H. M., Alamry, K. A., Asiri, A. M., El-Daly, S. A., Surface selectivity competition of newly synthesized polyarylidene (keto amine)



- polymers toward different metal ions, **Journal of Applied Polymer Science**, 131,19, (2014).
- [14] Monier, M., Ayad, D. M., Abdel-Latif, D. A. Adsorption of Cu (II), Cd (II) and Ni (II) ions by cross-linked magnetic chitosan-2-aminopyridine glyoxal Schiff's base, **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, 94, 250-258, (2012).
- [15] Ji, F., Li, C., Tang, B., Xu, J., Lu, G., Liu., P. Preparation of cellulose acetate/zeolite composite fiber and its adsorption behavior for heavy metal ions in aqueous solution, **Chemical Engineering Journal**, 209, 325-333, (2012).
- [16] Yavuz, Ö., Altunkaynak, Y., Güzel, F., Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite, **Water Research**, 37(4), 948-952. (2003).
- [17] Oo, C. W., Osman, H., Fatinathan, S., Zin, M. A. M. The Uptake of Copper (II) Ions by Chelating Schiff Base Derived from 4-Aminoantipyrine and 2-Methoxybenzaldehyde, **International Journal of Nonferrous Metallurgy**, 2(01), 1. (2013).

# Karasal algılayıcı ağlarda gözleme için enerji etkin TDMA erişim tekniği

**Muhammed Enes BAYRAKDAR\***

*Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,  
Merkez Kampüs, Düzce.*

*Geliş Tarihi (Received Date): 13.02.2019  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 26.06.2019*

## Özet

*Algılayıcı ağların uygulama alanlarından biri olan karasal algılayıcı ağlar, gözleme işlemleri için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kablosuz algılayıcı ağlar, belirli bir bölgenin sıcaklık, nem, basınç, hareket gibi karakteristiklerini incelemek amacıyla küçük bir gömülü cihaz üzerine yerleştirilmiş farklı algılayıcıların birleşimi olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürekli olarak belirli bir bölgeyi izlemek için kablosuz algılayıcı ağın bu bölgelerin kesişme noktalarında yer alması gerekmektedir. Bu makalede, kablosuz algılayıcı ağına dayalı bir gözleme sistemi oluşturulmuştur. Kırsal bölgelerdeki belirli bir arazinin ne tür meyve – sebze yetiştiriciliğine uygun olduğunu tespit etmek amacıyla sıcaklık, nem, basınç, vb. değerlerin sezilmesi düşünülmüştür. Gözleme için kullanılan algılayıcı düğümler benzetim ortamında geliştirilmiştir. Kablosuz algılayıcı ağ düğümlerinin yapısı, donanımı ve iş akışı tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin enerji verimli olarak çalışması ve paket çarpışmalarının yaşanmaması için ortam erişim tekniği olarak TDMA protokolü seçilmiştir. Benzetim sonuçları, algılayıcı ağın ortam bilgilerini hızlı bir şekilde toplama ve veriyi gerçek zamanlı olarak işleme merkezine aktarma yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, önerdiğimiz sistem karasal alandaki kablosuz algılayıcı ağların kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.*

**Anahtar kelimeler:** *Algılayıcı ağ, ortam erişim, karasal.*

\* Muhammed Enes BAYRAKDAR, muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-9446-0988>

# Energy efficient TDMA access technique for surveillance in terrestrial sensor networks

## Abstract

*The terrestrial sensor networks, which are one of the application areas of sensor networks, are now widely used for monitoring and security operations. The wireless sensor networks are a combination of different sensors placed on a small embedded device to examine characteristics of a given region such as temperature, humidity, pressure, movement. The wireless sensor network must be located at the intersection points of these zones to continuously monitor a specific area. In this article, a monitoring system based on the wireless sensor network is created. The sensor nodes used for monitoring were developed in a simulation environment. The structure, hardware and workflow of wireless sensor network nodes are designed. TDMA protocol has been chosen as the medium access technique in order to ensure that the designed system operates in an energy-efficient manner and that packet collisions are not experienced. The simulation results show that the sensor network has the ability to quickly collect media information and transmit data to the processing center in real time. In addition, the system we proposed suggests the usefulness of wireless sensor networks in the terrestrial area.*

**Keywords:** *Sensor network, medium access, terrestrial.*

## 1. Giriş

Kablosuz algılayıcı ağların benzersiz özellikleri, klasik kablosuz ağların tüm yönleriyle yeniden düşünülmesini gerektirmektedir [1,2]. Bunlar arasında, algılayıcı ağlarda temel ve hala keşfedilmemiş bir sorun olan ideal paket boyutunun belirlenmesi işlemi bulunmaktadır [3,4]. Özellikle, düşük güçlü iletişim kısıtlamaları ve düşük maliyetli algılayıcı düğümlerin tasarım özellikleri nedeniyle iletişimde çapraz katman etkilerinin de incelenmesini gerektirmektedir [5,6]. Algılayıcı ağların enerji verimli olarak çalışabilmesi için, ideal paket boyutunun ve ortam erişim tekniğinin doğru bir şekilde değerlendirmesi gerektirmektedir [7].

Geleneksel olarak paket büyüklüğü optimizasyonu, belirli bir verimlilik ölçütüne dayalı olarak paketin noktadan noktaya başarılı bir şekilde aktarılması gerektiği göz önüne alınarak gerçekleştirilir [8]. Bununla birlikte, geleneksel yaklaşımda kablosuz algılayıcı ağ iletişiminin çoklu atlama ve geniş yayın özelliklerinin etkisi de hesaba katılmaktadır [9,10]. Paket büyüklüğünün, iletişimin güvenilirliğini doğrudan etkilediği iyi bilinmektedir [11]. Bunun yanında, çoklu atlama algılayıcı ağlarda, iletişim bağlantılarının kalitesi ağda oluşturulan rotalara ve kullanılan ortam erişim tekniğine bağlıdır [12]. Ayrıca, paylaşılan kablosuz ortam için rekabet eden komşu düğümlerin varlığı, iletişim başarısını önemli ölçüde bozmakta ve iletişim performansını etkilemektedir [13]. Gerçekleştirilen iletişimin başarısı, hem kablosuz kanalın özelliklerine hem de kullanılan hata kontrol tekniğine bağlıdır [14]. İletişimin farklı katmanlarının bir araya gelmesinden kaynaklanan bu gibi faktörler göz önüne alındığında, algılayıcı ağlar için paket boyutu optimizasyonu, ortam erişim tekniği seçimi ve çapraz katman değerlendirmesi çok önemlidir [15].

Paket boyutu optimizasyonu ve ortam erişim tekniği seçimindeki zorluklardan birisi de algılayıcı ağların kendi doğal yapısından kaynaklanmaktadır [16]. Algılayıcı ağlar, son derece karmaşık kablosuz algılayıcı düğümlerin geliştirilmesinden bu yana geniş uygulama alanları bulmuştur [17]. Algılayıcı ağlar genel olarak ormanlar, fabrikalar, binalar, vb. karasal alanlarda yaygın olsa da farklı alanlarda da geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [4]. Son zamanlarda, algılayıcı ağ araştırması sualtı ve yeraltı ortamlara da yayılmıştır [9]. Sualtı kablosuz algılayıcı ağları, çok düşük bant genişliği ve yüksek hata oranı sualtı kanalları ile karakterize edilmektedir [12]. Benzer şekilde, son zamanlarda kablosuz yeraltı algılayıcı ağ uygulamaları ve gereksinimleri de araştırılmaktadır [3]. Bu ağlar, kanal özellikleri açısından ek zorlukları da beraberinde getirmektedir [6]. Sonuç olarak, bu ortamlar için de optimum paket boyutu ve ortam erişim tekniği isabetli olarak belirlenmelidir [15].

Duan ve arkadaşları, potansiyel bilgileri zamanında toplayabilen karasal boru koruma ekipmanlarını izlemek için bir sistem tasarlamışlardır [18]. Geliştirdikleri sistemde, katot korumasının koruma modunda talep üzerine ince ayar yapabilmektedirler. Sistemlerinde, potansiyel verileri toplamak ve uzak veri iletimini gerçekleştirmek için kablosuz algılayıcı ağları ve GPRS teknolojisini entegre etmişlerdir. Enerji tüketimini etkin bir şekilde düşürmek, donanım bileşenlerinin seçiminde güç tasarrufu sağlamak ve çarpışmayı önlemek için TDMA protokolünü kullanmışlardır. Veri iletimi ve düşük güç tasarrufu bakımından %96 civarı sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca, karasal boru hattının fiziksel hatalarını zamanında tespit etme ve talep üzerine kablosuz algılayıcı ağlarını kontrol etme gereksinimlerini karşılamışlardır [18].

Stuntebeck ve arkadaşları, kablosuz yeraltı algılayıcı ağ kavramı üzerine uygulamaları tartışmışlardır [19]. Yeraltı ortamında yaygın olarak bulunan karasal kablosuz algılayıcı ağ donanım çözümlerinin kullanımının alt yapısını incelemişlerdir. İki farklı yeraltı algılayıcı düğüm arasında ve bir yeraltı algılayıcı düğüm ile yer üstü algılayıcı düğüm arasında gerçekleşen iletişim için paket hata oranı ve alınan sinyallerin alınan sinyal gücü üzerine incelemeler yapmışlardır [19].

Alhashimi ve arkadaşları, bağımsız algılayıcı kaynak bilgisi gerektirmeyen mesafe algılayıcıları için yeni bir kalibrasyon prosedürü tanımlamışlardır [20]. Önerdikleri çalışmada, algılayıcıların doğrusal hareketi izlediklerini ve nesnelerin hareket etmediğini vurgulamışlardır. Prosedürlerini sadece genel bir mesafe algılayıcı parametrelerini tahmin etmek için değil, aynı zamanda robotik uygulamalarda en yaygın kullanılan algılayıcıları entegre etmek ve algılayıcıların içsel parametrelerini öğrenmek için tasarlamışlardır. Yaptıkları testlerin, doğrusal hareketler varsayımını ihlal etmeye karşı yüksek sağlamlık gösterdiğini vurgulamışlardır [20].

Tondwalkar ve arkadaşları, algılayıcı düğümlerin hareketli ve sabit olduğu algılayıcı ağlar aracılığıyla lokalizasyon hizmeti tasarlamayı amaçlamışlardır [21]. Kablosuz algılayıcı ağ uygulamalarının çoğunluğunun, algılayıcı düğümlerin esas fiziksel konumlarının güvenilir bilgisini gerektirdiğini vurgulamışlardır. Pozisyon hesaplaması için üçgenleme yöntemini kullanmışlardır. Güvenilir konum bilgisi elde etmek için, hesaplanan pozisyonun aksine gerçek pozisyonun kök minimum ortalama kare hata analizi yönteminden faydalanmışlardır [21].

Bu makalede, kablosuz algılayıcı ağına dayalı bir gözlemeleme sistemi oluşturulmuştur. Gözlemeleme için kullanılan algılayıcı düğümler benzetim ortamında geliştirilmiştir. Kablosuz algılayıcı ağ düğümlerinin yapısı, donanımı ve iş akışı tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin enerji verimli olarak çalışması ve paket çarpışmalarının yaşanmaması için ortam erişim tekniği olarak TDMA protokolü seçilmiştir. Tüm tasarım aşamaları Riverbed Modeler yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [22]. Algılayıcı düğümlerin çarpışmadan kaçınması ve enerji verimli olarak çalışması için TDMA ortam erişim tekniği kullanılarak modellenmişlerdir. Benzetim modeli sonuçları incelendiğinde, karasal algılayıcı ağın sezilen verileri çok düşük bir gecikme ile topladığı ve bu verileri hızlı bir şekilde çevrimiçi izleme merkezine gönderdiği görülmektedir. Ayrıca, önerilen araştırma alanındaki kablosuz algılayıcı ağların kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Önerdiğimiz sistem, kırsal alanlarda meyve, sebze yetiştiriciliğinde ortamın sıcaklık, nem gibi özelliklerinin denetimi ve izlemesi için kullanılabilirliği gibi belirli bir bölgenin farklı özelliklerinin kontrolü için de kullanılabilir olacaktır.

## **2. Teorik model ve benzetim modeli çalışmaları**

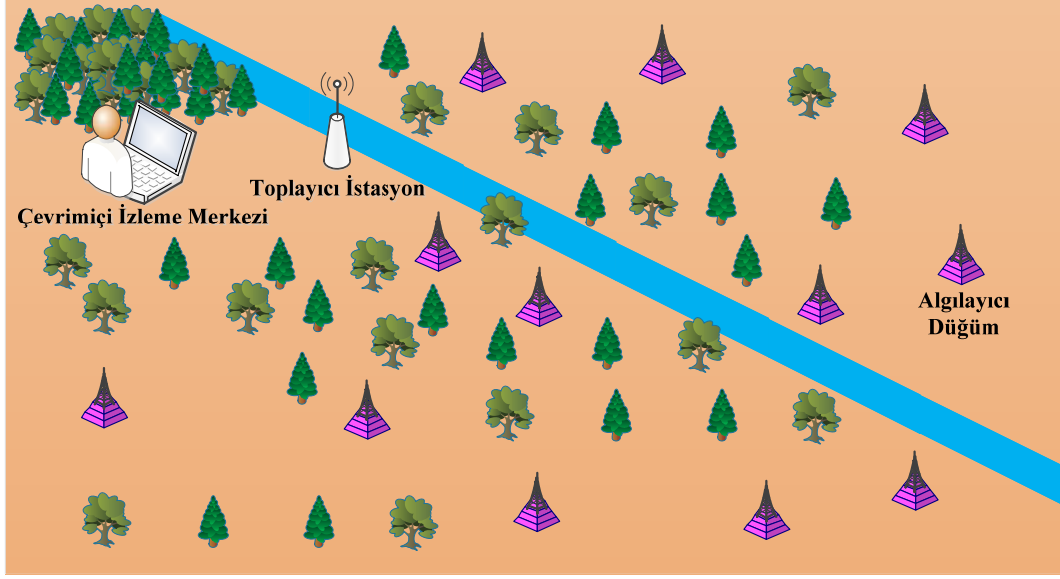
Çalışmamızda, karasal algılayıcı ağlarda gözlemeleme için enerji etkin erişim tekniğinin tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. Ağ yapımızın temeli ve tasarımı tamamlandıktan sonra, Riverbed Modeler yazılımı ile benzetimi yapılmıştır. Senaryo olarak, kırsal bölgelerde belirli bir arazinin ne tür meyve veya sebze yetiştiriciliğine uygunluğunu tespit etmek için sıcaklık, nem, basınç, vb. özelliklerinin algılayıcı düğümler yardımıyla uzun süreli gözlemlenmesi düşünülmüştür.

Riverbed Modeler, hem benzetim modellerini yapılandırmak hem de ağ senaryoları geliştirmek için grafiksel bir kullanıcı arabirimi sunmaktadır. Kablosuz ağın yapılandırması üç aşamada gerçekleştirilmektedir; ağ aşaması, düğüm aşaması ve işlem aşaması. Ağ aşamasında, ağın topolojisi oluşturulmaktadır. Düğüm aşaması, düğümün davranışını tanımlamaktadır ve düğümün farklı modülleri arasında akan verileri kontrol etmektedir. Süreç aşaması, durumlar ile kullanılan durum makineleri ve aralarındaki geçişler ile karakterize edilmektedir. Riverbed Modeler benzetim yazılımının kaynak kodu Proto C programlama dilinde yazılmaktadır.

### **2.1. Karasal algılayıcı ağ tasarım ve benzetimi**

Şekil 1'de görülmekte olan karasal algılayıcı ağ tasarımında, tarıma uygunluk tespitinin yapılması için kırsal bir bölgeye yerleştirilmiş çok sayıda algılayıcı bulunmaktadır. Algılayıcılar kendi aralarında tasarsız (ad-hoc) olarak haberleşmektedir.

Algılayıcı düğümler, gerektiği durumlarda da birbirleri üzerinden haberleşerek verilerini toplayıcı istasyona aktarmaktadırlar. Ortam erişim tekniği olarak çarpışma içermediğinden dolayı enerji etkin bir protokol olan TDMA tabanlı ortam erişim tekniği kullanılmaktadırlar. Karasal algılayıcı düğümlerden gelen verileri toplama görevini toplayıcı istasyon üstlenmektedir.



Şekil 1. Karasal algılayıcı ağ tasarımı.

Birbirleri üzerinden haberleşerek verilerini toplayıcı istasyona aktardıkları için merkezi bir koordinatöre düğüme ihtiyaç duymamaktadırlar. Toplayıcı istasyonun topladığı veriler, civarda bulunan herhangi bir çevrimiçi izleme merkezinden izlenmekte ve takip edilmektedir. Toplayıcı istasyon, çevredeki algılayıcı düğümlerden gelen sıcaklık, nem, basınç vb. verileri toplamaktadır.

Tablo 1. Karasal algılayıcı ağ benzetim parametreleri.

Parametre	Değer
Veri iletim hızı	250 Kbps
Paket boyutu	50 byte
Gecikme	5 us
Frekans	2,4 Ghz
Benzetim süresi	3600 sn
Gönderim gücü	50 mW
Alım gücü	42,5 mW
Algılayıcı düğüm sayısı	12

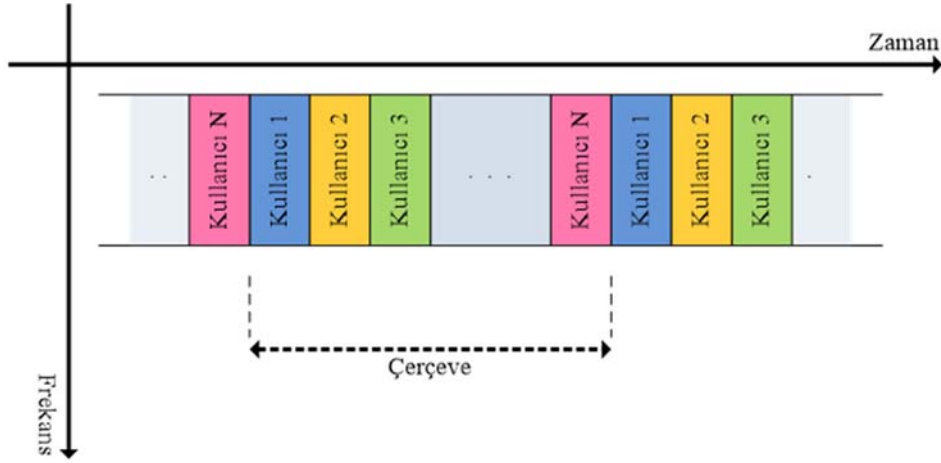
Tablo 1’de, karasal algılayıcı ağ benzetim parametreleri gösterilmektedir. Riverbed Modeler yazılımı üzerinde, her bir parametre ve aldığı değerler net bir şekilde ifade edilmiştir. Veri iletim hızı, algılanan verilerin düğümlerden toplayıcı istasyona aktarılma hızını ifade etmektedir ve karasal alanlar için 250 Kbps olmaktadır. Paket boyutu, algılanan verinin sayısal olarak büyüklüğünü temsil etmektedir ve sıcaklık, nem, basınç, vb. veriler için 50 byte yeterli olmaktadır. Gecikme, sezilen bir verinin algılayıcı düğümden toplayıcı istasyona gönderildiği süredir ve küçük çaplı karasal algılayıcı ağlar için 5 us olmaktadır. Frekans değeri olarak, kablosuz haberleşme için en çok kullanılan 2,4 Ghz seçilmiştir. Benzetim süresi, benzetim yazılımının bu ağ yapısını test ettiği süredir ve genel olarak doğru sonuç almak için 3600 sn yeterli olmaktadır. Gönderim gücü ve alım gücü, sezilen verinin gönderilmesi ve alınması için gereken güçtür ve karasal algılayıcı ağlardaki sıcaklık, nem, basınç, vb. veriler için sırasıyla 50

mW ve 42,5 mW yeterli olmaktadır. TDMA tekniği, 10 – 15 algılayıcı düğüme kadar iyi performans göstermektedir. Bu sebeple algılayıcı düğüm sayısı 12 olarak seçilmiştir.

## 2.2. TDMA ortam erişim tekniği

TDMA sistemler, radyo spektrumunu zaman dilimlerine bölmektedir ve her bir zaman diliminde sadece bir algılayıcı düğüm alma ya da gönderme işlemi yapabilmektedir. Bu sistem belirli bir zaman bölgesine genişletilirse, birbirinden bağımsız pek çok algılayıcı düğüm aynı ortam üzerinden ve farklı zaman dilimlerinde iletim işlemlerini gerçekleştirebilirler.

TDMA yapısında, veri hızı doğrudan doğruya iletim ortamının bant genişliğine bağlıdır. İletim ortamının bant genişliği çok fazla ise, çok yüksek veri hızlarına ulaşmak mümkündür. Bu durum, aynı iletim ortamından çok daha fazla algılayıcı düğümün iletim yapabilmesi anlamına gelmektedir. Bant genişliği düşük olan iletim ortamlarında ise daha düşük veri hızlarında iletim yapılabilmektedir.



Şekil 2. TDMA ortam erişim tekniği.

Şekil 2’de, her bir algılayıcı düğümün zaman çerçevesindeki bir kanalı kullandığı görülmektedir.  $\lambda$  üretilen ortalama paket sayısı ve N kullanıcı sayısı olmak üzere, başarımları G aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$G = \lambda * N \quad (1)$$

Başarımları, belirli bir zaman diliminde algılayıcı düğümlerin gönderdiği verilerin toplayıcı istasyon tarafından başarılı bir şekilde alınması olarak ifade edilmektedir. TDMA tekniği çekişme tabanlı bir ortam erişim protokolü olmadığı için, ağa gönderilen TDMA paketleri birbirleriyle çarpışmamaktadır. Bu sebeple, ortalama yük 1’den az olduğunda başarımları sunulan yüke eşit olmaktadır. Ortalama yükün 1 ve 1’den fazla olduğu durumda ise, başarımları 1’e eşit olarak kalmaktadır.

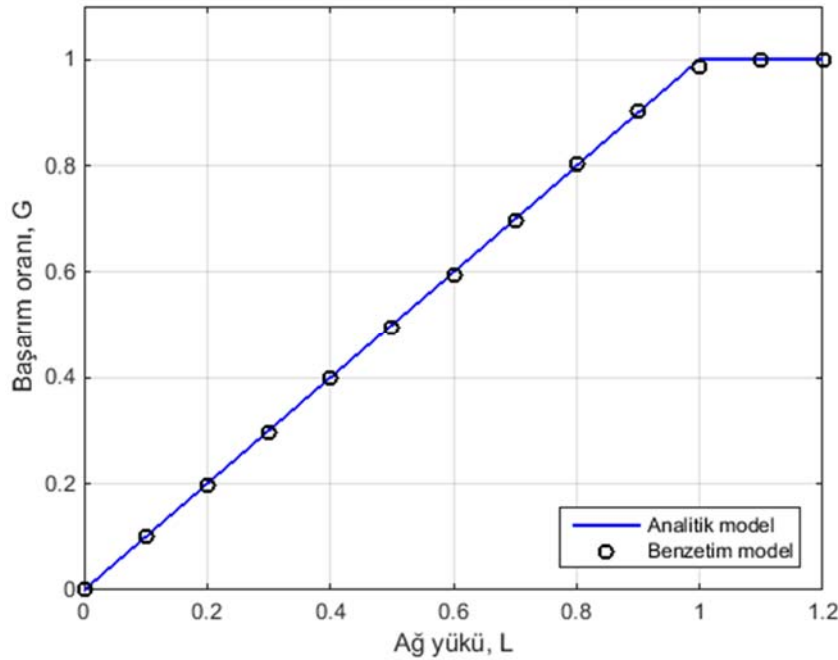
Karasal algılayıcı düğümler göz önüne alındığında, enerji tüketiminin yoğun olarak kablosuz haberleşme aşamasında meydana gelmektedir, bunun dışındaki enerji tüketimleri göz ardı edilebilecek seviyededir. S paket iletimi için geçen süre ve P paket iletim işlemi için harcanan güç olmak üzere, enerji tüketimi E aşağıdaki denklemde olduğu şekilde elde edilmektedir.

$$E = S * P \quad (2)$$

Sistemin enerji etkin bir şekilde çalışması için, paket iletiminde harcanan gücün ve sürenin az olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için, birbirleri üzerinden haberleştikleri göz önünde bulundurularak düğümlerin mümkün olduğunca birbirlerine yakın bir konumda yerleştirilmeleri önem arz etmektedir.

### 3. Grafikselle sonuçlar

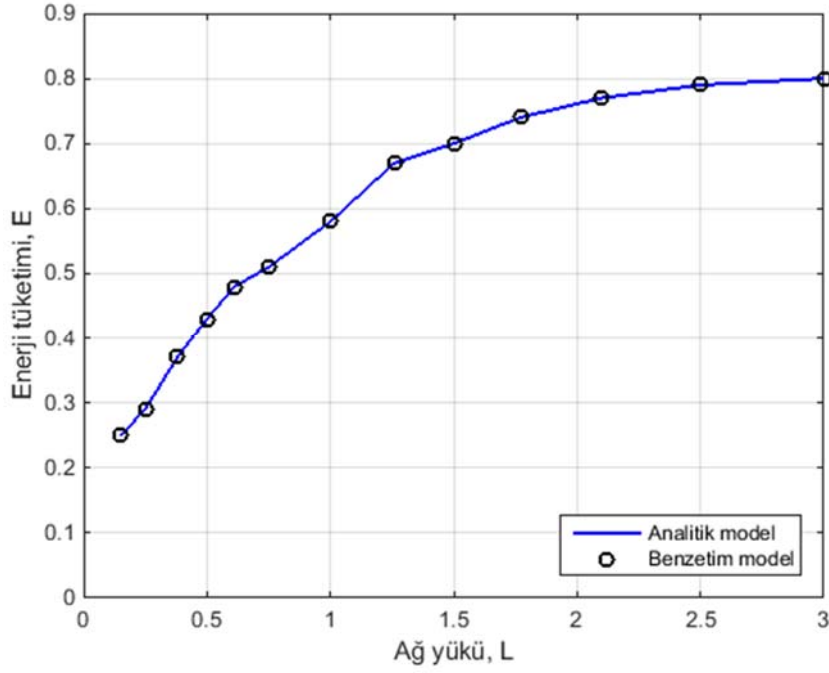
Algılayıcı ağ yükü 0'dan 1'e doğru artırıldığında, başarımları da yaklaşık olarak aynı oranda artmaktadır. Bunun sebebi, karasal algılayıcı ağların ve kablosuz haberleşme ortamlarının doğal yapısından kaynaklanan bozucu etkilerdir. Diğer taraftan, algılayıcı ağ yükü 1 ya da daha fazla olduğunda başarımları yaklaşık 1 seviyesinde kalmaktadır. Şekil 3'de, analitik sonuçların benzetim sonuçları ile birebir örtüştüğü net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3. TDMA başarımları.

Algılayıcı ağ yükü 0'dan 3'e doğru artırıldığında, enerji tüketimi de 0'dan 1'e doğru belirli bir oranda artmaktadır. Bunun sebebi, karasal algılayıcı düğümlerden toplanan verilerin artmasına bağlı olarak enerji tüketimi yapmalarıdır. Diğer taraftan, algılayıcı ağ yükü 2,5 veya daha fazla olduğunda enerji tüketimi yaklaşık 0,8 civarında kalmaktadır. Şekil 4'te, analitik sonuçların benzetim sonuçları ile birebir örtüştüğü net bir şekilde görülmektedir.





Şekil 4. TDMA enerji tüketimi.

Şekil 3 ve Şekil 4 dikkatli bir şekilde incelendiğinde, benzetim model ve analitik model sonuçlarının çok yakın olması, karasal algılayıcı ağ tabanlı enerji verimli ortam erişim tekniğinin geçerliliğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, benzetim modelini geliştirdiğimiz enerji etkin karasal algılayıcı ağ modelinin hedeflenen nitelikleri sağladığından dolayı gerçek hayattaki ortamlarda da kullanılabileceğini gözler önüne sermektedir.

#### 4. Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, kablosuz algılayıcı ağına dayalı bir gözlemeleme sistemi ele alınmıştır. Gözlemeleme için kullanılan algılayıcı düğümlerin tasarımı benzetim ortamında yapılmıştır. Kablosuz algılayıcı ağ düğümlerinin yapısı, donanımı ve iş akışı tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin enerji verimli olarak çalışması için ortam erişim tekniği olarak TDMA protokolü seçilmiştir. Benzetim modelinden elde edilen sonuçlara bakıldığında, önerilen kablosuz karasal algılayıcı ağdaki toplayıcı istasyonun ortamdaki sezilen verileri hızlı bir şekilde topladığı ve bu verileri gerçek zamanlı olarak izleme merkezine aktarabildiği görülmektedir. Ayrıca, önerilen araştırma alanındaki kablosuz algılayıcı ağların kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma temel alınarak, farklı enerji etkin ortam erişim teknikleri kullanılarak gözlemeleme uygulamaları gerçekleştirilebilir. Gelecekte bu tarz çalışmaların yapılması, algılayıcı ağ kullanımının iyi yönlerinin günlük hayatta kullanabileceğimiz yapıya kavuşmasını sağlayacaktır.

## Teşekkür

Değerli desteklerinden dolayı kıymetli eşim Sümeyye ve kızım Asel'e çok teşekkür ederim. Danışman olarak bana yaptığı katkılardan dolayı Doç. Dr. Ali Çalhan hocama çok teşekkür ederim.

## Kaynaklar

- [1] Ahmad, A., Javaid, N., Imran, M., Guizani, M. and Alhamed, A.A., An advanced energy consumption model for terrestrial wireless sensor networks, **International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)**, 790-793, Paphos, (2016).
- [2] Kato, A., Wakabayashi, H., Hayakawa, Y., Bradford, M., Watanabe, M. and Yamaguchi Y., Tropical forest disaster monitoring with multi-scale sensors from terrestrial laser, UAV, to satellite radar, **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, 2883-2886, Fort Worth, TX, (2017).
- [3] Descamps, P., Vindevoghel, J., Bouazza, F. and Sawsan, S., Microwave doppler sensors for terrestrial transportation applications, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 46, 1, 220-228, (1997).
- [4] Bachmann, R.J., Boria, F.J., Ifju, P.G., Quinn, R.D., Kline, J.E. and Vaidyanathan R., Utility of a sensor platform capable of aerial and terrestrial locomotion, **IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, 1581-1586, Monterey, CA, (2005).
- [5] Zhang, C., Terrestrial mobile networks for Air-to-ground communications of the general aviation, **International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)**, 1-5, Nanjing, (2011).
- [6] Babbitt, J., O'Dell, S. and Xu, Y., Optimizing terrestrial transport architecture in satellite telephony networks, **IEEE Wireless Communications and Networking Conference**, 164-168, New Orleans, LA, USA, (1999).
- [7] Dean, R.A., Satellite/terrestrial interoperation in personal communications networks, **Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Universal Personal Communications**, 450-454, San Diego, CA, USA, (1994).
- [8] Kapovits, A., Satellite communications integration with terrestrial networks, **China Communications**, 15, 8, 22-38, (2018).
- [9] Baras, J.S., Ball, M., Roussopoulos, N., Jang, K., Stathatos, K. and Valluri, J., Integrated management of large satellite-terrestrial networks, **Proceedings MILCOM**, 383-387, Monterey, CA, USA, (1997).
- [10] Chan, V.W.S., Some research directions for future integrated satellite and terrestrial networks, **MILCOM - IEEE Military Communications Conference**, 1-7, Orlando, FL, USA, (2007).
- [11] Hu, J. and Song, T., A vehicle-mounted communication system integrating satellite and terrestrial networks, **7th International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCCT)**, 767-771, Seoul, (2012).
- [12] Sheriff, R.E. and Gardiner, J.G., Integrating satellite and terrestrial communication networks, **IEE Colloquium on Mobile Communications**, 1-7, London, UK, (1992).
- [13] Moraitis, N. and Panagopoulos, A.D., On the interference analysis between terrestrial cellular and multiple airborne wireless networks, **Proceedings of the**

- 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)**, 1371-1375, Rome, (2011).
- [14] Boria, F.J., A sensor platform capable of aerial and terrestrial locomotion, **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, 3959-3964, Edmonton, Alta, (2005).
- [15] Vuran, M.C. and Akyildiz, I.F., Cross-layer packet size optimization for wireless terrestrial, underwater, and underground sensor networks, **IEEE INFOCOM - The 27th Conference on Computer Communications**, 226-230, Phoenix, AZ, (2008).
- [16] Sato, N., Oikawa, M., Suzuki, J., Ishikawa, T. and Murata, Y., Design and implementation of movie camera recording on worker's motion tracing system by terrestrial magnetism sensors, **13th International Conference on Network-Based Information Systems**, 451-456, Takayama, (2010).
- [17] Sato, N., Oikawa, M., Takayama, T. and Murata, Y., An angle measurement method by using terrestrial magnetism sensors on a ski jumper's motion monitoring system, **14th International Conference on Network-Based Information Systems**, 60-67, Tirana, (2011).
- [18] Duan, S., Yu, Y. and Wang, Q., Monitoring and control of terrestrial pipe cathode protection system based on wireless sensor network, **IET International Conference on Wireless Sensor Network (IET-WSN)**, 7-12, Beijing, (2010).
- [19] Stuntebeck, E.P., Pompili, D. and Melodia, T., Wireless underground sensor networks using commodity terrestrial motes, **2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks**, 112-114, Reston, VA, (2006).
- [20] Alhashimi, A., Varagnolo, D. and Gustafsson, T., Calibrating Distance Sensors for Terrestrial Applications Without Groundtruth Information, **IEEE Sensors Journal**, 17, 2, 3698-3709, (2017).
- [21] Tondwalkar, A.V. and Vinayakray-Jani, P., Terrestrial localization by using angle of arrival measurements in wireless sensor network, **International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)**, 188-191, Jabalpur, (2015).
- [22] <https://www.riverbed.com/gb/>, (06.02.2019).

# Amorf ve nano-boyutlu $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinin sentezi ve karakterizasyonu

Berna BÜLBÜL\*

Balıkesir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 10145, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 14.05.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 09.09.2019

## Özet

Bu çalışmada ilk defa amorf ve nano-yapılı  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  bileşiği, tamponlu-çöktürme yöntemiyle başarılı bir şekilde sentezlendi. Sentezlenen bileşiğin FTIR spektrumunda,  $1393 \text{ cm}^{-1}$  ( $[\text{BO}_3]$  asimetrik gerilme),  $935 \text{ cm}^{-1}$  ( $[\text{BO}_3]$  simetrik gerilme) ve  $681 \text{ cm}^{-1}$  ( $[\text{BO}_3]$  düzlem dışı bükülme) dalga sayılarında üç temel titreşim bandı gözlemlendi. Bu titreşim bantları,  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  bileşiğinin kimyasal yapısında, düzlem üçgen  $[\text{BO}_3]$  gruplarının bulunduğunu ortaya koydu. XRD analizi ile sentezlenen ürünün amorf özellikte olduğu belirlendi. ICP-MS kullanılarak bileşikteki Ho/B oranı 1.02 olarak hesaplandı. TG/DTG eğrisinde, 303K ve 523 K sıcaklık aralığındaki, yaklaşık % 17.5'lik ilk kütle kaybı, bileşiğin yapısında 2.8 mol kristal su bulunduğunu gösterdi. 523 K ve 693 K sıcaklık aralığındaki ikinci kütle kaybı ise,  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  nano-parçacıklarının yüzeyinde yaklaşık % 4 oranında PEG-2000 moleküllerinin tutunduğunu ortaya koydu. Nano-parçacıkların SEM ve TEM fotoğrafları ile ortalama parçacık boyutu ve standart sapmasının  $15 \pm 6 \text{ nm}$ ., şeklinin ise küresele benzer özellikte olduğu ispatlandı. Enerji bant aralığı 5.3 eV olarak hesaplandı. Sentezlenen  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  bileşiğinin ve polimerler ile hazırlanan nano-kompozitlerinin malzeme bilimi ve tıp alanlarındaki uygulamalarda kullanılması öngörülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Holmiyum borat, nano-yapı, amorf, tamponlu-çöktürme yöntemi.

## Synthesis and characterization of amorphous and nano-sized $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ compound

### Abstract

In this study, amorphous and nano-structured  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  compound was successfully synthesized for the first time by the buffered-precipitation method. Three

\* Berna BÜLBÜL, bernabulbul@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-0508-4878>

basic vibration bands were observed in the wave numbers of  $1393\text{ cm}^{-1}$  (asymmetric stretching  $[\text{BO}_3]$ ),  $935\text{ cm}^{-1}$  ( $[\text{BO}_3]$  symmetric stretching) and  $681\text{ cm}^{-1}$  ( $[\text{BO}_3]$  out-of-plane bending) in the FTIR spectrum of the synthesized compound. These vibration bands revealed that trigonal plane  $[\text{BO}_3]$  groups were present in the chemical structure of the  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  compound. It was determined that the synthesized product was amorphous by XRD analysis. The Ho/B ratio in the compound was calculated as 1.02 using by ICP/MS. The initial mass loss of about 17.5% in the temperature range of 303K and 523K showed 2.8 mol crystal water in the structure of the compound in the TG/DTG curve. The second mass loss in the 523 K and 693 K temperature range revealed that about 4% of the PEG-2000 molecules were retained on the surface of  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  nano-particles. The mean particle size of the nano-particles was 15 nm with 6nm standard deviation and the shape was similar to the sphere according to the SEM and TEM photographs. The Band-gap energy was calculated as 5.3 eV. It is envisaged that the synthesized  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  compound and the nano-composites prepared with the polymers will be used in the applications of material science and medicine.

**Keywords:** Holmium borate, nano-structure, amorphous, buffered-precipitation method.

## 1. Giriş

Lantanit borat bileşikleri, doğrusal olmayan optik (NLO) özelliğe, termal kararlılığa, yüksek optik zarar eşiğine, ultraviyole ışın geçirgenliğine ve güçlü ışıldaama şiddetine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle, vakum boşalım lambalarında ve plazma gösteri panellerinde yaygın bir şekilde kullanılırlar [1].

Lantanit boratlar ve hidratlı lantanit boratlar ( $\text{Ln}_x\text{B}_y\text{O}_z/\text{Ln}_x\text{B}_y\text{O}_z\text{H}_t$ ), düzlem üçgen  $[\text{BO}_3]$  veya düzgün dörtyüzlü  $[\text{BO}_4]$  gruplarından oluşabildikleri gibi bu grupların kompleks şekillerde bir araya gelmesiyle de oluşabilirler [2]. Kimyasal formüllerindeki Ln/B (Lantanit/Bor) mol oranına bağlı olarak farklı bileşimlere sahiptirler. Kapalı formüllerinde aynı Ln/B oranına sahip lantanit borat bileşiklerinin farklı kristal yapıları mevcuttur. Meyer' in terminolojisine göre bu kristal yapılar  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  gibi yunan harfleri ile isimlendirilir [3]. Lantanit boratlar, kristal yapılarında hidroksil ve/veya su molekülü içerip içermemelerine göre de ikiye ayrılırlar. Literatürde yüksek bor oranından başlayarak düşük bor oranına doğru var olan mikro yapı-susuz borat bileşikleri şunlardır;  $\alpha/\beta$   $\text{LnB}_5\text{O}_9$  [4-5],  $\text{Ln}_4\text{B}_{14}\text{O}_{27}$  [6],  $\alpha/\beta/\gamma/\delta$   $\text{LnB}_3\text{O}_6$  [7, 8, 9, 10],  $\text{Ln}_4\text{B}_{10}\text{O}_{21}$  [11],  $\alpha/\beta$   $\text{Ln}_2\text{B}_4\text{O}_9$  [12-13],  $\text{Ln}_3\text{B}_5\text{O}_{12}$  [14],  $\text{Ln}_4\text{B}_6\text{O}_{15}$  [15],  $\pi/\mu/\lambda/\beta/\nu/\chi$   $\text{LnBO}_3$  [16, 17, 18, 19, 20, 21], H- $\text{LnBO}_3$  [22],  $\text{Ln}_{8.66}\text{O}_8(\text{BO}_3)_2(\text{B}_2\text{O}_5)$  [23],  $\text{Ln}_{17.33}\text{O}_{16}(\text{BO}_3)_4(\text{B}_2\text{O}_5)_2$  [24],  $\text{Ln}_3\text{BO}_6$  [17],  $\text{Ln}_{26}\text{O}_{27}(\text{BO}_3)_8$  [25],  $\text{Ln}_{31}\text{O}_{27}(\text{BO}_3)_3(\text{BO}_4)_6$  [26]. Kristal yapılarında su içeren mikro yapı lantanit borat bileşikleri ise şunlardır;  $\text{LnB}_9\text{O}_{13}(\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{LnB}_8\text{O}_{11}(\text{OH})_5$ ,  $\text{LnB}_6\text{O}_9(\text{OH})_3$  [27-28],  $\text{LnB}_5\text{O}_8(\text{OH})_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  [29],  $\text{Ln}_2\text{B}_6\text{O}_{10}(\text{OH})_4$  [30] ve  $\text{Ln}_4\text{B}_6\text{O}_{14}(\text{OH})_{12}$  [31].

Nadir toprak boratların ışıldaama özellikleri, onu oluşturan parçacıkların boyutundan ve şeklinden güçlü bir şekilde etkilenir. Parçacık şekli açısından mükemmel yüzeye ve küresel şekle sahip olan parçacıklar düzgün ışık şiddeti dağılımına sahiptirler. Lantanit boratların mikro-boyutlu tek kristalleri optikte yaygın bir şekilde kullanılırken, yarı-kristal özelliğe sahip olanları da yapıcı girişim özellikleri nedeniyle artan bir ilgiye sahiptirler [32]. Yarı-kristal malzemelerin teknolojik uygulamalardaki sınırlamaları dar

bir dalga boyu bölgesinde ışınım yapma özellikleri yüzündendir. Bunun nedeni içerdikleri kristal yapı kusurları ve kristal alan simetrileridir [33]. Lantanit boratların parçacık büyüklüklerindeki azalış, düşük kristal özellik ve yüzey kusurları, bu malzemelerin ışıltama şiddetlerinde azalmaya neden olabilir. Lantanit boratların elde edildikleri sentez koşullarına bağlı olarak optimum ışıltama özelliklerini koruyabildikleri ideal parçacık büyüklükleri vardır [34].

Anorganik kimyacılar dünden bugüne genellikle kristal yapı malzemeleri sentezleme ve üretme çabasında oldular. Mikro-boyutlara sahip olanların sentezinde pek çok farklı sentez yöntemleri kullanıldı. Geleneksel katı-hal yöntemleri [16] ve yüksek sıcaklık/yüksek basınç [31] yöntemi bu metotlardan bazılarıdır. Nano-boyutlu ve kristal lantanit boratların sentezinde ise solvotermal/hidrotermal [35] yöntem en çok kullanılan metotlardan oldu. Literatürde lantanit borat bileşiklerinin mikro-boyutta sentezi ile ilgili çok fazla kaynak olmasına rağmen, nano-boyutlu sentezine ilişkin sınırlı sayıda kaynak vardır. Henkes ve ark. [34] tarafından yapılan çalışmada, polivinil pirolidon varlığında, uygun stokiometrik oranlarda hazırlanan lantanit nitrat/asetat ve  $\text{NaBH}_4$  çözeltileri birbirlerine eklendi. Reaksiyon sonucunda amorf özellikteki öncül maddenin çöktüğü, amorf ürünün  $700\text{ }^\circ\text{C}$ ' de 90 dk ile 120 dk arasında hava ortamında kül fırınında ısıtıldığında nano-boyutlu lantanit ortoboratların elde edildiği görüldü. Xu ve ark. [35] tarafından yapılan başka bir çalışmada, hazırlanan nadir toprak klorürler ile sodyum hidroksit çözeltileri ortam pH' ı 14 olduğunda birbirine eklendi. Çöken öncül madde  $180\text{ }^\circ\text{C}$  de 12 saat boyunca otoklavda ısıtıldığında, nano-tel yapısındaki  $\text{Ln}(\text{OH})_3$  bileşiklerinin oluştuğu, elde edilen bu bileşiklerin saf su ortamında, otoklav içinde,  $180\text{ }^\circ\text{C}$ ' de 12 saat boyunca borik asit ile muamele edildiğinde nano ve mikro-boyutta lantanit ortoboratların elde edildiği görüldü.

Amorf-nano malzemeler kristal yapı malzemelere göre çok daha kolay işlenebilme, film haline getirilebilme ve polimerler ile ideal kompozit oluşturabilme yeteneğine sahiptir. Özellikle paramanyetik ve optik özelliğe sahip, amorf, nano ve eş-boyutlu lantanit boratların sentezi; malzeme ve tıp alanındaki uygulamalar açısından oldukça önemlidir. Biyolojik görüntüleme ve etiketleme bu malzemelerin tıptaki uygulamalarından bazılarıdır [36]. Bununla birlikte bu bileşiklerin biyolojik sistemdeki rolleri ile ilgili literatürde hiçbir veri bulunmamaktadır. Parçacık boyutları  $100\text{ nm}$ ' nin altında olan, amorf, düzgün ve yuvarlak parçacık şekline sahip manyetik ve optik lantanit boratların sentezlenebilmesi, bu bileşiklerin biyolojik sistemdeki rollerinin bilinmesi açısından oldukça önemlidir.

Adını Stockholm'den alan holmiyum, lantanitler serisi elementleri arasında olağandışı manyetik, optik ve elektriksel özelliklere sahiptir. Elektropozitifliği oldukça yüksektir. Genellikle bileşiklerinde artı üç yükseltgenme basamağında bulunur. Yüksek manyetik özelliği sayesinde manyetik kutup bileşeni olarak yaygın kullanıma sahiptir. Çeşitli tıbbi uygulamalarda katı hal lazerleri olarak holmiyumdan yararlanır. Nötronları kuvvetli bir şekilde absorbe edebilir. Filyon ürünü olan nötronları emme kabiliyeti yüzünden nükleer reaktörlerde sıkça kullanılır [37].

Bu çalışmada, manyetik ve optik özelliğe sahip, amorf ve nano-yapılı  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  bileşiği ilk kez başarılı bir şekilde sentezlendi. Bileşiğin sentezlenmesinde ilk kez bizim tarafımızdan geliştirilen tamponlu-çöktürme yöntemi kullanıldı. Bu yöntemde, daha önceden bilinen ortak-çöktürme yönteminin bazı yönleri geliştirildi. Yüksek konsantrasyona (1 M) sahip borat tamponu kullanılarak reaksiyon ortamının pH' ı 9.2'

ye ayarlandı. Biyo-uyumlu bir yüzey aktif madde olan polietilen glikol 2000 (PEG-2000) reaksiyon ortamına ilave edildi. Böylelikle biyolojik sistemde kullanılabilme özelliğine sahip 100 nm altı, amorf, eş-boyutlu ve küresele benzer bir şekle sahip hidratlı holmiyum borat bileşiği elde edildi.

## 2. Materyal ve metot

### 2.1. Materyal

HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O bileşiğinin sentezi için analitik saflıkta Ho(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O (Sigma Aldrich % 99.9 saflıkta), NaOH (Merck % 97 saflıkta), H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (Merck % 99.9 saflıkta), Polietilen glikol 2000, (2000 g/mol) (Merck) kullanıldı.

### 2.2. Metot

20 mmol (40 g.) PEG 2000, 180 ml saf suda çözüldü. Ayrı bir beherde 10 mmol (4.4102 g.) Ho(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O, 20 ml su içinde çözüldü. İki çözelti birbiri ile yarım saat süre ile manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Başka bir beherde 45 mmol (1.800 g.) NaOH, 90 ml. saf suda çözüldü. Üzerine 90 mmol (5.5658 g.) H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> eklendi ve çözüldü. pH değeri 9.2 ve konsantrasyonu 1 M olan borat tamponu hazırlanmış oldu. PEG 2000-Ho(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O çözelti karışımı 500 ml.' lik bir balona aktarıldı. Mekanik karıştırıcı 2000 rpm dönme hızında dönerken çözeltinin üzerine yüksek derişime sahip borat tamponu hızlı bir şekilde ilave edildi. Oda sıcaklığında ve hava ortamında yarım saat boyunca 2000 rpm de karıştırma işlemi devam ettirildi. Sarımsı-beyaz renkli sütümsü karışım elde edildi. Elde edilen sütümsü karışım 7000 rpm de 10 dakika santrifüjlendi. Ortamdaki safsızlıklardan kurtulabilmek amacı ile bol saf su ile üç kez yıkandı. 70 °C' de 24 saat süre ile kurutuldu.

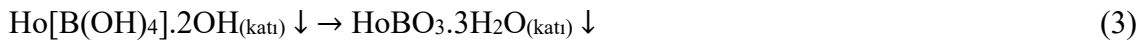
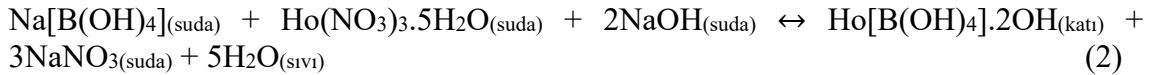
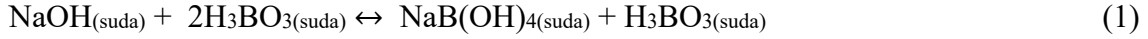
### 2.3. Karakterizasyon

Reaksiyon sonucu elde edilen ürünün kristal özelliğe sahip olup olmadığı, CuK $\alpha$ : 1.54059 Å, 40 mA, ve 45 kV radyasyonunda çalışan PANalytical Empyrean X-Işınları Toz Kırınım cihazı (XRD) kullanılarak incelendi. Kristal yapıda hangi borat gruplarının bulunduğunu belirlemek amacıyla 4000-600 cm<sup>-1</sup> dalga sayısı aralığında çalışan Perkin Elmer 65 model FTIR Spektrofotometre kullanıldı. Ürünün Termogravimetrik analizi, 40 ml/dk azot akış hızında, 25 °C-800° C sıcaklık aralığında, 10 °C/dk'lık ısıtma hızına sahip Mettler Toledo marka TGA/DTA cihazı kullanılarak yapıldı. Ürünün UV-Görünür Bölge analizi, T80 UV-Vis Spektrofotometre kullanılarak gerçekleştirildi. Reaksiyon sonucu elde edilen ürünün parçacık şekil ve boyut özellikleri, FEI Quanta 650 Field Emission model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Hitachi HT7700 Model Geçirmeli Elektron Mikroskobu (TEM) kullanılarak incelendi. Kimyasal formüldeki Ho/B oranını belirlemek amacıyla Thermo X series 2 model ICP-MS cihazı kullanıldı.

## 3. Sonuçlar ve tartışma

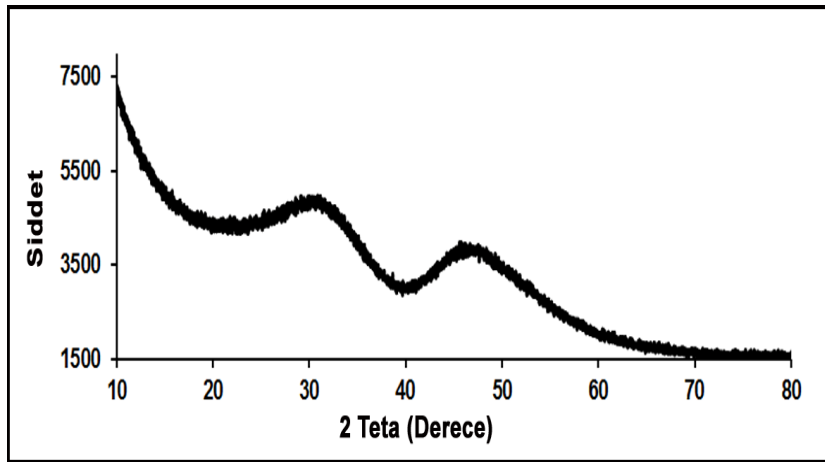
Değişen bor derişimine bağlı olarak, sulu çözeltilerde farklı bor içeren türler bulunabilir. Düşük bor derişimlerinde çözeltide ana olarak (0.2 M altında) tek çekirdekli B(OH)<sub>3</sub> ve B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> türleri bulunur. Daha yüksek bor derişimlerinde (0.025-0.6 M arasında) ve pH 6 ile 10 arasındayken suda çözünebilir B<sub>3</sub>O<sub>3</sub>(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>, B<sub>4</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> ve B<sub>5</sub>O<sub>6</sub>(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> gibi polimerik borat türleri oluşur. pH değeri 10' nun ve bor derişimi 0.6 M' in üzerine

çıkıtığında sulu çözeltide ana olarak bulunan borat türü tek çekirdekli  $B(OH)_4^-$  olur [38]. Bu çalışmada, bor derişimi 1M olan borat tamponu hazırlandı ve ortamın pH değeri 9.2 olarak ölçüldü. Hazırlanan tampon çözelti içerisindeki borat türünün  $B(OH)_4^-$  olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi tampon çözeltiler bir denge reaksiyonu sonucu oluşurlar. Bu durum, oluşan borat türünün dışında, başlangıç kimyasal maddelerinin de belirli bir oranda çözelti ortamında bulunduğunu gösterir. Reaksiyonda holmiyum iyonu ile bu borat türünün bir araya gelerek kompleks bir yapı oluşturduğu, oluşan bu kompleks yapının da, çözeltide içerisinde 2.8 mol su tutan lantanit borat bileşimine dönüştüğü düşünülmektedir. Çözeltinin reaksiyon sonucu pH'ı 8.85 olarak saptandı.



Elde edilen bileşimin kimyasal yapısındaki metal elementlerin birbirlerine olan oranını bulabilmek için ICP-MS yapıldı. Yapılan hesaplamalar sonucunda, kimyasal formüldeki Ho/B oranının 1.02 olduğu belirlendi.

Reaksiyon sonucu elde edilen ürünün XRD grafiği Şekil 1' de gösterildi. Bu grafik, elde edilen hidratlı holmiyum borat bileşiminin amorf özellikte olduğunu ve herhangi bir kristal yapısının bulunmadığını ortaya koydu.

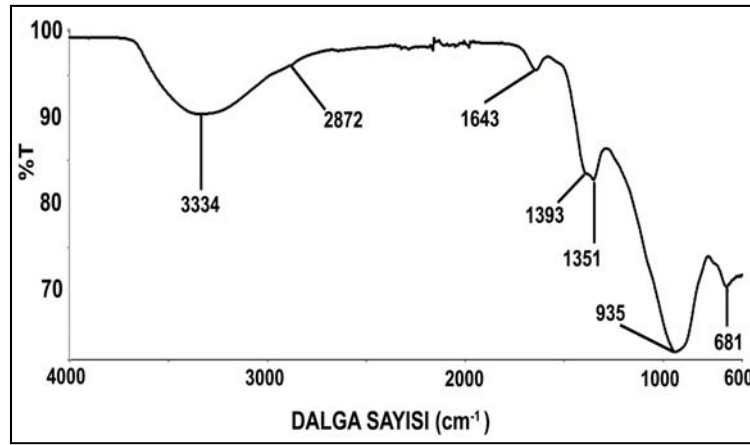


Şekil 1.  $HoBO_3 \cdot 2.8H_2O$  bileşimine ait XRD grafiği.

Daha öncede ifade edildiği gibi lantanit boratlar ve hidratlı lantanit boratlar ( $Ln_xB_yO_z/Ln_xB_yO_zH_t$ ), düzlem üçgen  $[BO_3]$  veya düzgün dörtyüzlü  $[BO_4]$  gruplarından oluşabildikleri gibi bu grupların kompleks şekillerde bir araya gelmesiyle de oluşabilirler [2]. Düzlem üçgen  $[BO_3]$  grupları, FTIR spektrumlarında  $1300-1500\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı bölgesinde güçlü asimetrik gerilme titreşimlerine sahipken,  $800-1000\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı bölgesinde, güçlü simetrik gerilme titreşimlerine sahiptir. Düzgün dörtyüzlü  $[BO_4]$  grupları ise  $900-1050\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı bölgesinde güçlü asimetrik gerilme titreşimlerine sahipken,  $700-850\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı bölgesinde güçlü simetrik gerilme titreşimine sahiptir [39]. Ürünümüze ait FTIR spektrumunda (Şekil 2)  $1393\text{ cm}^{-1}$  ve  $1351\text{ cm}^{-1}$  ( $[BO_3]$  asimetrik gerilme) ile  $935\text{ cm}^{-1}$  ( $[BO_3]$  simetrik gerilme) dalga sayısı

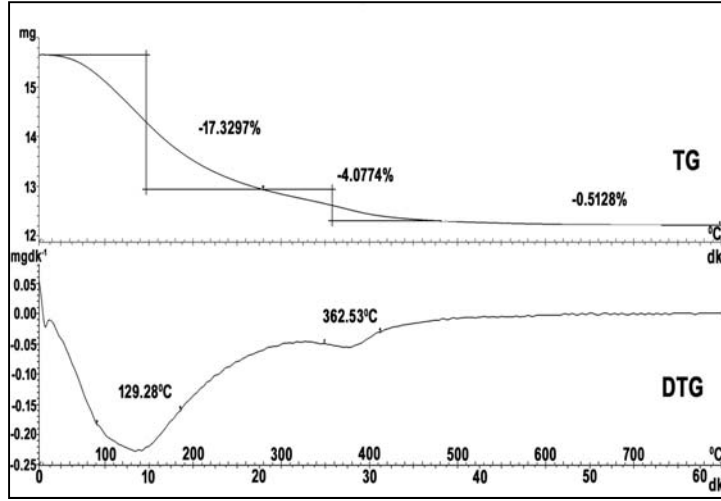


bölgesinde güçlü titreşim bantları bulunmaktadır. Bununla birlikte spektrum,  $681\text{ cm}^{-1}$  ( $[\text{BO}_3]$  düzlem dışı bağlanma) dalga sayısı bölgesinde zayıf bir titreşim bandı da içermektedir. Bu titreşim bantları, bizim yapımızdaki borat tipinin düzlem üçgen  $[\text{BO}_3]$  grubu olduğunu güçlü bir biçimde desteklemektedir. FTIR spektrumunda  $3334\text{ cm}^{-1}$  de görülen yayvan ve güçlü titreşim bandı,  $[\text{OH}]$  gruplarının simetrik gerilim titreşimlerine,  $1643\text{ cm}^{-1}$  de görülen zayıf titreşim bandı ise kristal su içerisinde bulunan  $[\text{HOH}]$  gruplarının düzlem içi bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir.  $2872\text{ cm}^{-1}$  dalga sayısı bölgesindeki zayıf ve yayvan titreşim bandı PEG-2000 bileşiğindeki  $[\text{HCH}]$  grubuna ait bükülme titreşimidir. Bu sonuç, eş-boyutlu parçacıklar elde edebilmek için ortama konan PEG-2000 moleküllerinin çok az da olsa hidratlı holmiyum borat nano-parçacıklarının yüzeyine tutunduğunu gösterir.



Şekil 2.  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  bileşiği için FTIR spektrumu grafiği.

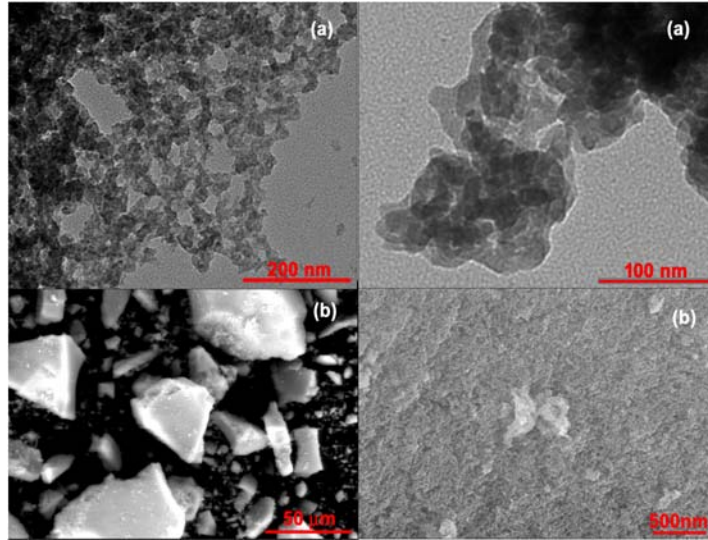
Amorf özellikteki hidratlı holmiyum borat bileşiğinin TG/DTG eğrisi Şekil 4' de verildi. TG/DTG eğrisinde kütle kaybının olduğu iki adet endotermik pik gözlemlendi. İlk % 17.3297' lik kütle kaybı, 303 K ile 523 K arasında meydana geldi. Yapılan hesaplamalar bu kütle kaybının, yapıdan uzaklaşan 2.8 mol su molekülüne karşılık geldiğini ortaya koydu. % 4.0774' lük ikinci kütle kaybı ise 523 K ile 693 K arasında meydana geldi. Bu sıcaklık aralığı, yüzey aktif madde olarak kullanılan PEG-2000 moleküllerinin bozunma sıcaklık aralığına karşılık gelmektedir. Sentez işlemi sırasında, sterik etki oluşturarak eş-boyutlu parçacıklar elde edebilmek amacıyla, reaksiyon ortamına PEG-2000 ilave edildi. Reaksiyon sonucunda, ortamdaki safsızlıkların giderilebilmesi için ürün bol saf su ile yıkandı. Bu sonuç, bol su ile yıkandığında, PEG-2000 moleküllerinin çok büyük bir kısmının ortamdaki safsızlıkların giderilebilmesi için ürün bol saf su ile yıkandı. Bu sonuç, bol su ile yıkandığında, PEG-2000 moleküllerinin çok büyük bir kısmının ortamdaki safsızlıkların giderilebilmesi için ürün bol saf su ile yıkandı. Bu sonuç, bol su ile yıkandığında, PEG-2000 moleküllerinin çok büyük bir kısmının ortamdaki safsızlıkların giderilebilmesi için ürün bol saf su ile yıkandı.



Şekil 3. HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O bileşiği için TG/DTG grafiği.

Elde edilen ürünün kimyasal formülü ICP-MS, TG/DTG ve FTIR analizi verilerinden yola çıkılarak HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O olarak belirlendi.

Hidratlı holmiyum borat bileşiğinin parçacık şekli ve boyutu SEM ve TEM fotoğraflarından (Şekil 4) yararlanılarak incelendiğinde, parçacık şeklinin kısmen küresel olduğu bulundu. SEM fotoğraflarında parçacıkların morfolojisi net olarak görüntülenemedi. Bunun nedeni ölçüm yapılan cihazın çözünürlüğün düşük olmasıydı. TEM fotoğraflarında ise Image J programı kullanılarak 281 adet parçacığın boyutu tek tek ölçülebildi. Ortalama parçacık boyutu ve standart sapması 15nm ± 6nm olarak hesaplandı.



Şekil 4.a) HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O bileşiğinin TEM fotoğrafları b) SEM fotoğrafları.

Şekil 5a), HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O bileşiği için optik yansıma grafiğini verir. Dağınık yansıma ölçümlerinden yararlanarak bileşiklerin enerji bant aralığını hesaplamak için birçok teknik geliştirildi. En temel yöntem, doğrusal dağınık yansıma artış başlangıcının enerji bant aralığı olarak düşünüldüğü yerde, dalga boyuna karşı yansıma grafiğini çizmektir [40]. Bununla birlikte, enerji bant aralığını kesin bir şekilde belirleyebilmek için geçiş

tipini tayin edebilmek önemlidir. Biz enerji bant aralığını hesaplamak ve geçiş tipini belirleyebilmek için Mc Lean analizini [41] kullandık

$$\alpha \cdot hv = k (hv - E_g)^{1/n} \quad (4)$$

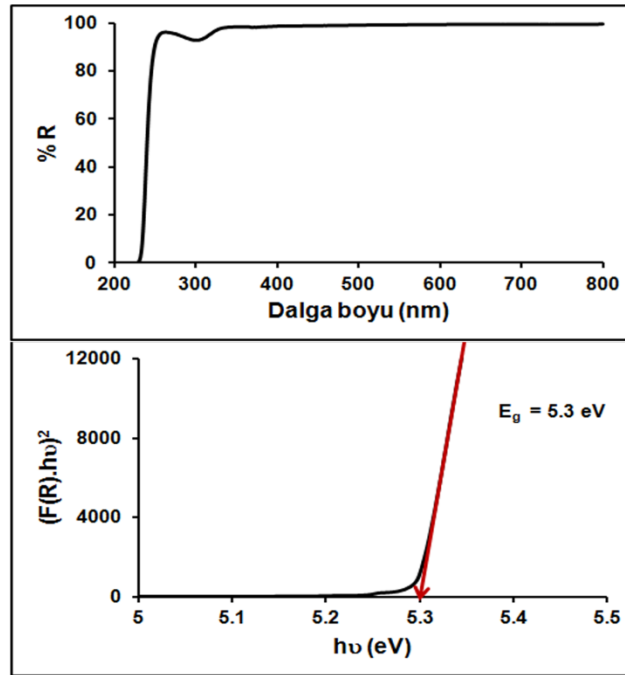
Bu denklemde  $k$  enerjiden bağımsız bir sabit,  $E_g$  enerji bant aralığı ve  $\alpha$  absorpsiyon katsayısıdır

$$F(R) = \frac{\alpha}{s} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (5)$$

Bu denklemde ise  $F(R)$  Kubelka–Munk fonksiyonu,  $R$  optik yansıma ve  $s$  saçılma faktörüdür.  $F(R)$ ,  $\alpha$  ile orantılı olduğundan (bkz. Denk.5)  $n$ ,  $hv'$  ye karşı  $(F(R) \cdot hv)^n$  çizilerek belirlenebilir. Direk izinli geçişler için  $n = 2$ , direk yasaklı geçişler için  $n = 2/3$ , dolaylı izinli geçişler için  $n = 1/2$ , dolaylı yasaklı geçişler için  $n = 1/3$ , geçiş tipini belirler. En iyi doğrusal uyum, bizim bileşliğimiz için  $n = 2$  (direk izinli geçiş) olarak belirlendi.  $n = 2$  ifadesi Denklem 4' de, yerine konulursa Denklem 6 'ya dönüşür

$$F(R) \cdot hv = k \cdot (hv - E_g)^{1/2} \quad (6)$$

Böylece, Denklem 6 kullanılarak hesaplanan enerji bant aralığı, hidratlı holmiyum borat bileşliği için 5.3 eV (Şekil 5b) olarak bulundu. Enerji bant aralığı 4 eV değerinin üzerinde olan malzemeler yalıtkan, 4 eV ve 1 eV değerinin arasında olanlar yarı iletken, 1 eV değerinin altında olanlar ise iletken olarak tanımlanır. Nano yapıli holmiyum borat bileşliği için hesaplanan 5.3 eV değeri bu maddenin yalıtkan özellikte olduğunu ortaya koymaktadır. Bu enerji bant aralığı değeri, literatürdeki diğer benzer yapıli lantanit boratlarla uyumludur.



Şekil 5.a) HoBO<sub>3</sub>.2.8H<sub>2</sub>O bileşliği için optik yansıma grafiği b) Enerji bant aralığı hesaplama grafiği.

Sonuç olarak, bu çalışmada amorf ve nano-boyutlu  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  bileşiği ilk kez başarılı bir şekilde yüksek basınç ve sıcaklığa ihtiyaç duymaksızın, fabrikasyona uygun bir metot olan tamponlu-çöktürme yöntemi kullanılarak oda koşullarında sentezlendi. ICP-MS, TG/DTG ve FTIR ölçümlerinden yararlanılarak bileşiğin kimyasal formülü  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  olarak belirlendi. Bundan sonraki çalışmalarda amorf, nano ve eş-boyutlu  $\text{HoBO}_3 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$  bileşiğinin ve nano-kompozitlerinin, malzeme bilimi ve tıp alanındaki uygulamalarının ayrıntılı bir şekilde incelenmesi hedeflenmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Boyer, D., Bertrand, G., Mahiou, R., A spectroscopic study of the vaterite form  $\text{YBO}_3:\text{Eu}^{+3}$  processed by sol-gel technique, **Journal of Luminescence**, 104, 229-237, (2003).
- [2] Chinn, S., Hong, H. Y. P., Fluorescence and lasing properties of  $\text{NdNa}_5(\text{WO}_4)_4$ ,  $\text{K}_3\text{Nd}(\text{PO}_4)_2$  and  $\text{Na}_3\text{Nd}(\text{PO}_4)_2$ , **Optics Communications**, 18, 87-88, (1976).
- [3] Meyer, J., Triklone Orthoborate der Seltenen Erden, **Naturwissenschaften**, 59, 215-215, (1972).
- [4] Li, L., Lu, P., Wang, Y., Jin, X., Li, G., Wang, Y., You, L., Lin, J., Synthesis of rare earth polyborates using molten boric acid as a flux, **Chemistry of Materials**, 14, 4963-4968, (2002).
- [5] Li, L., Jin, X., Li, G., Wang, Y., Liao, F., Yao, G., Lin, J., Novel Rare Earth Polyborates. Part 2. Syntheses and Structures, **Chemistry of Materials**, 15, 2253-2260, (2003).
- [6] Nikelski, T., Schäfer, M. C., Schleid, T.,  $\text{La}_4\text{B}_{14}\text{O}_{27}$ : Ein Lanthan-*ultra*-Oxoborat mit Raumnetzstruktur, **Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie**, 634, 49-55, (2008).
- [7] Goubin, F., Montardi, Y., Deniard, P., Rocquefelte, X., Brec, R., Jobic, S., Optical properties of  $\text{CeBO}_3$  and  $\text{CeB}_3\text{O}_6$  compounds: first-principles calculations and experimental results, **Journal of Solid State Chemistry**, 177, 89-100, (2004).
- [8] Emme, H., Heymann, G., Haberer, A., Huppertz, H., High-Pressure Syntheses, Crystal Structures, and Thermal Behaviour of  $\beta\text{-Re}(\text{BO}_2)_3$  (Re = Nd, Sm, Gd), **Zeitschrift für Naturforschung B**, 62, 765-770, (2007).
- [9] Emme, H., Despotopoulou, C., Huppertz, H., High-Pressure Synthesis, Crystal Structure of the Structurally New Orthorhombic Rare Earth Meta-Oxoborates  $\gamma\text{-Re}(\text{BO}_2)_3$  Re=La-Nd, **Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie**, 630, 2450-2457, (2004).
- [10] Heymann, G., Soltner, T., Huppertz, H.,  $\delta\text{-La}(\text{BO}_2)_3$  ( $\delta\text{-LaB}_3\text{O}_6$ ): A new high-pressure modification on lanthanum meta-oxoborate, **Solid State Sciences**, 8, 821-829, (2006).
- [11] Haberer, A., Heymann, G., Huppertz, H.,  $\text{Pr}_4\text{B}_{10}\text{O}_{11}$ : A new Composition of Rare Earth Borates by High-Pressure/High-Temperature Synthesis, **Journal of Solid State Chemistry**, 180, 1595-1600, (2007).
- [12] Emme, H., Huppertz, H.,  $\text{Gd}_2\text{B}_4\text{O}_9$ : Ein weiteres Oxoborat mit kantenverknüpften  $\text{BO}_4$ -Tetraedern, **Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie**, 628, 2165-2170, (2002).
- [13] Huppertz, H., Altmannshofer, S., Heymann, G., High-Pressure Preparation, Crystal Structure, and Properties of the New Oxoborate  $\beta\text{-Dy}_2\text{B}_4\text{O}_9$ , **Journal of Solid State Chemistry**, 170, 320-329, (2003).

- [14] Emme, H., Valldor, M., Pöttgen, R., Huppertz, H., (2005). Associating Borate and Silicate Chemistry by Extreme conditions High-Pressure Synthesis, Crystal Structure and Properties of the Novel Borates  $RE_3B_5O_{12}$ , **Chemistry of Materials**, 17, 2707-2715, (2005).
- [15] Huppertz, H., Eltz, B., Multianvil High-Pressure Synthesis of,  $Dy_4B_6O_{15}$ : The First Oxoborate with Edge Sharing  $BO_4$  Tetrahedra, **Journal of American Chemical Society**, 124, 9376-9377, (2002).
- [16] Hosokawa, S., Tanaka, Y., Iwamoto, S., Inoue, M., Morphology and structure of rare earth borate ( $REBO_3$ ) synthesized by glycothermal reaction, **Journal of Materials Science**, 43, 2276-2285, (2008).
- [17] Cohen-Adad, M. Th., Aloui-Lebbou, O., Goutaudier, C., Panczer, G., Dujardin, C., Pedrini, C., Florian, P., Massiot, D., Gerard, F., Kappenstein, Ch., Gadolinium and Yttrium Borates: Thermal Behavior and Structural Considerations, **Journal of Solid State Chemistry**, 154, 204-213, (2000).
- [18] Müller-Bunz, H., Nikelski, Schleid, Th., Single Crystals of the Neodymium(III) meta-Borate  $Nd(BO_2)_3$  and ortho-Borate  $NdBO_3$ , **Zeitschrift für Naturforschung B**, 58, 375-380, (2003).
- [19] Huppertz, H., Multianvil High-Pressure Synthesis and Crystal Structure of  $\beta$ - $YbBO_3$ , **Zeitschrift für Naturforschung B**, 56, 697-703, (2001).
- [20] Noirault, S., Joubert, O., Caldes, M. T., Piffard, Y., High-temperature form of neodymium orthoborate,  $NdBO_3$ , **Acta Crystallographica Section E**, 62, 228-230, (2006).
- [21] Huppertz, H., Eltz, B. Hoffmann, R. D., Piotrowski, H., Multianvil High-Pressure Syntheses of Crystal Structure of the New Rare Earth Oxoborates  $\chi$ - $DyBO_3$  and  $\chi$ - $ErBO_3$ , **Journal of Solid State Chemistry**, 166, 203-212, (2002).
- [22] Lemanceau, S., Bertrand-Chadeyron, G., Mahiou, R., El-Ghozzi, M., Cousseins, J. C., Conflant, P., Vannier, R. N., Synthesis and Characterization of H- $LnBO_3$  Orthoborates ( $Ln=La, Nd, Sm, \text{ and } Eu$ ), **Journal of Solid State Chemistry**, 148, 229-235, (1999).
- [23] Dzhurinskii, B. F., Ilyukhin, A. B., Rare-Earth and lead mixed anionic oxoborates, **Crystallography Reports**, 47, 397-403, (2002).
- [24] Lin, J. H., You, L. P., Lu, G. X., Yang, L. Q., Su, M. Z., Structural and luminescent properties of  $Eu^{3+}$  doped  $Gd_{17.33}(BO_3)_4(B_2O_5)_2O_{16}$ , **Journal of Materials Chemistry**, 8, 1051-1054, (1998).
- [25] Noirault, S., Celerier, S., Joubert, O., Caldes, M. T., Piffard, Y., Effects of Water Uptake on the Inherently Oxygen-Deficient Compounds  $Ln_{26}O_{27}(BO_3)_8$  ( $Ln = La, Nd$ ), **Inorganic Chemistry**, 46, 9961-9967, (2007).
- [26] Hering, A. S., Haberer, A., Kaindl, R., Huppertz, H., High-pressure synthesis and crystal structure of the new holmium oxoborate  $Ho_{31}O_{27}(BO_3)_3(BO_4)_6$ , **Solid State Sciences**, 12, 1993-2002, (2010).
- [27] Li, L. Y., Lu, P. C., Wang, Y. Y., Jin, X. L., Li, G. B., Wang, Y. X., You, L. P., Lin, J. H., Synthesis of Rare Earth Polyborates Using Molten Boric Acid as a Flux, **Chemistry of Materials**, 14, 4963-4968, (2002).
- [28] Li, L. Y., Jin, X. L., Li, G. B., Wang, Y. X., Liao, F. H., Yao, G. Q., Lin, J. H., Novel Rare Earth Polyborates. 2. Syntheses and Structures, **Chemistry of Materials**, 15, 2253-2260, (2003).
- [29] Ivanova, A. G., Belokoneva, E. L., Dimitrova, O. V., Mochenova, N. N., New borate  $LaB_5O_8(OH)_2 \cdot 1.5H_2O$  with a  $\{4[3T^+ \Delta]_{\infty\infty} + \Delta\}_{\infty\infty\infty}$  complex framework. Its place in the structural system based on symmetry and topology analysis in

- terms of the OD theory, **Russian Journal Inorganic Chemistry**, 51, 862–868, (2006).
- [30] Cong, R., Yang, T., Wang, Z., Sun, J., Liao, F., Wang, Y., Lin J., Syntheses, Structure, and Luminescent Properties of Novel Hydrated Rare Earth Borates  $\text{Ln}_2\text{B}_6\text{O}_{10}(\text{OH})_4\cdot\text{H}_2\text{O}$  (Ln = Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, and Y), **Inorganic Chemistry**, 50, 1767-1774, (2011).
- [31] Huppertz, H., Multianvil high-pressure/high-temperature preparation, crystal structure, and properties of the new oxoborates,  $\text{Dy}_4\text{B}_6\text{O}_{14}(\text{OH})_2$  and  $\text{Ho}_4\text{B}_6\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ , **Journal of Solid State Chemistry**, 177, 3700–3708, (2004).
- [32] Baudrier-Raybaut, M., Haidar, R., Kupecek, P., Lemasson, P., Rosencher, E., Random quasi-phase-matching in bulk polycrystalline isotropic nonlinear materials, **Nature**, 432, 374–376, (2004).
- [33] Jiang, X. C., Yan, C. H., Sun, L. D., Wei, Z. G., Liao, C. S., Hydrothermal homogeneous urea precipitation of hexagonal  $\text{YBO}_3:\text{Eu}^{3+}$  nanocrystals with improved luminescent properties, **Journal of Solid State Chemistry**, 175, 245–251, (2003).
- [34] Henkes, A. E., Schaak, R. E., Synthesis of nanocrystalline  $\text{REBO}_3$  (RE= Y, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho) and  $\text{YBO}_3:\text{Eu}$  using a borohydride-based solution precursor route, **Journal of Solid State Chemistry**, 181, 3264–3268, (2008).
- [35] Xu, Z., Li, C., Cheng, Z., Zhang, C., Li, G., Peng, C., Lin, J., Self-assembled 3D architectures of lanthanide orthoborate: hydrothermal synthesis and luminescence properties, **CrystEngComm**, 12, 549–557, (2010).
- [36] Li, Z., Zeng, J., Li, Y., Solvothermal Route to Synthesize Well-Dispersed  $\text{YBO}_3:\text{Eu}$  Nanocrystals, **Small**, 3, 438–443, (2007).
- [37] <https://www.makaleler.com/gelecegin-elementlerinden-holmiyum-nedir>
- [38] Schott, J., Kretschmar, J., Acker, M., Eidner, S, Kumke, M. U., Drobot, B., Barkleit, A., Taut, S., Brendler, V., Stumpf, T., Formation of a Eu(III) borate solid species from a weak Eu(III) borate complex in aqueous solution, **Dalton Transactions**, 43, 11516-11528, (2014).
- [39] Peak, D., Luther III, G. W., Sparks, D., ATR-FTIR spectroscopic studies of boric acid adsorption on hydrous ferric oxide, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 67, 2551-2560, (2003).
- [40] Lopez, R., Gomez R., Band-Gap energy estimation from diffuse reflectance measurements on sol-gel and commercial  $\text{TiO}_2$ : a comparative study, **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, 61, 1-7, (2012).
- [41] McLean, T., The absorption edge spectrum of semiconductors, **Progress in Semiconductors**, 5, 53-102, (1960).

# Comparative skeletal osteology of *Darevskia parvula* (Lantz & Cyren, 1913) and *Darevskia adjarica* (Darevsky & Eiselt, 1980) (Squamata: Lacertidae)

Elif YILDIRIM<sup>1,2</sup>, Oscar ARRIBAS<sup>3</sup>, Yusuf KUMLUTAŞ<sup>1,2</sup>,  
Çetin ILGAZ<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Biology, Faculty of Science, Dokuz Eylül University, Buca, İzmir, Turkey

<sup>2</sup>Fauna Flora Applied and Research Center

<sup>3</sup>Avda, Francisco Cambó 23, E-08003 Barcelona, Spain

Geliş Tarihi (Received Date): 14.02.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 21.06.2019

## Abstract

A detailed description of cranial and postcranial osteology of *Darevskia parvula* and *D. adjarica* is provided osteological data for further comparative studies of other lizards. The descriptions and comparisons are based on 12 specimens, of which 10 adult and 2 juveniles for each species. *Darevskia parvula* and *D. adjarica* are highly conservative species and they have similar osteological features. The differences in the current study are the number of teeth for the cranial skeleton and the number of vertebrae for the postcranial. *Darevskia parvula* has a lower number of teeth than *D. adjarica*.

**Keywords:** Lacertidae, *Darevskia parvula*, *Darevskia adjarica*, osteology, Turkey.

## *Darevskia parvula* (Lantz & Cyren, 1913) ve *Darevskia adjarica* (Darevsky & Eiselt, 1980)'nın karşılaştırmalı iskelet osteolojisi (Squamata: Lacertidae)

## Özet

*Darevskia parvula* ve *D. adjarica* türlerinin kranial ve postkranial osteolojilerinin

Elif YILDIRIM, elfoloji@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9614-5754>

Oscar ARRIBAS, oarribas@xtec.cat, <https://orcid.org/0000-0001-9575-3045>

Yusuf KUMLUTAŞ, yusuf.kumlutas@deu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1154-6757>

\* Çetin ILGAZ, cetinilgaz@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7862-9106>

detaylı tanımlaması diğer kertenkele türlerinin karşılaştırmalı çalışmaları için osteolojik veriler sağlamaktadır. Tanımlamalar ve karşılaştırmalar her bir tür için 10 erişkin ve 2 juvenil bireylerden oluşan 12 örneğe dayanmaktadır. *Darevskia parvula* ve *D. adjarica* oldukça korunmuş türleridir ve benzer osteolojik özelliklere sahiptirler. Bu çalışmadaki farklılıklar kranial iskelet için diş sayısı ve postkranial iskelet için de omur sayısıdır. *Darevskia parvula*'nın *D. adjarica*'dan daha az dişi vardır.

**Anahtar Kelimeler:** *Lacertidae*, *Darevskia parvula*, *Darevskia adjarica*, osteoloji, Türkiye.

## 1. Introduction

The Lacertidae is one of the most common lizard families in the world. So far, numerous studies investigated the phylogeny of the family Lacertidae using both morphological and molecular approaches. However, intra- and interspecific relationships within the genus *Darevskia* are still unclear. The lacertid genus *Darevskia* includes 32 species that exist in Armenia, Azerbaijan, Bulgaria, Georgia, Greece, Iran, Kosovo, Romania, Russia, Serbia, Turkey and Turkmenistan [1, 2]. The herpetofauna of Turkey includes 15 species of the genus *Darevskia* [6, 9]. Formerly, *Darevskia parvula* had two subspecies: *D. p. parvula* and *D. p. adjarica*. The distribution sites of these two taxa include Northeastern Turkey (Rize, Artvin, Ardahan and Bayburt provinces) and Georgia. *Darevskia adjarica* was originally described as a subspecies of *D. parvula* [16]. Based on its morphological, osteological and molecular data, it was elevated to the species level [7].

*Darevskia parvula* is a widely studied species [7, 15, 16, 21, 23]. It was formerly considered as a member of the *Lacerta saxicola* group [23]. Since then, the taxonomy of the species examined here has been revised so many times [7, 10, 12, 13, 15, 16, 21]. Furthermore, numerous molecular studies have been conducted for the species examined [18, 19, 26, 27]. Although there are many studies conducted on their taxonomy, genetics and morphology, detailed and comprehensive osteological studies of the lizard families including Lacertidae received relatively limited attention [5, 6, 22, 28]. In this study, we aim to provide detailed comparative osteological descriptions of *D. parvula* and *D. adjarica*, and to shed some more light on the osteology and phylogeny of these lacertids.

## 2. Materials and methods

In this study, we used ten adult (5 ♂♂ and 5 ♀♀) and two juvenile specimens of *D. adjarica* collected from 24 km W of Ortacalar, Artvin, northeastern Anatolia. We also used ten adult (5 ♂♂ and 5 ♀♀) and two juvenile specimens of *D. parvula* captured from 30 km SW of Yusufeli, Artvin, northeastern Anatolia. These specimens were museum materials deposited in Biology Department, Dokuz Eylül University. All specimens were cleared and double stained following the methodology described by [33]. We followed the osteological terminology described by [4, 11, 20, 31, 32]. All illustrations were taken using a Leica DFC295 camera. Illustrations were digitized and arranged in CORELDRAW (Ver. X4).



### 3. Results

#### 3.1. The skull roof of *Darevskia adjarica* and *D. parvula*

**Frontal.** The frontal is described as a paired median bone that articulates with the nasals anteriorly, the prefrontals anterolaterally, the postfrontals posterolaterally and the parietal posteriorly. The bone forms the roof of the anterior portion of the braincase and the dorsolateral edge of the orbit. The width of frontal is the largest where the bone contacts the parietal and the postfrontals. The bone carries two processes: the anterolateral process that extends the angle formed by the nasal, the prefrontal and the facial process of the maxilla and the posterolateral process that is slightly rounded in the two lacertids (Figure 1A and B). The length of the bone is longer than the parietal.

**Parietal.** The parietal is a single bone that forms the posterior roof of the skull (Figure 1A and B). The bone carries two processes: the anterolateral and the supratemporal processes. The anterolateral process of the parietal is shorter than the supratemporal process. The length of the bone is shorter than its width. The posterodorsal edge of the braincase is not covered by the parietal. The post-temporal fenestra is open in the two lacertids. The supratemporal process of the parietal is slender and contacts the supratemporal with its posterolateral margin. The bone articulates with the postfrontal laterally, the frontal anteriorly, the supraoccipital posteriorly. All specimens examined here have a parietal foramen in the dorsal view.

#### 3.2. Nasal region of *Darevskia adjarica* and *D. parvula*

**Premaxilla.** The premaxilla is an unpaired bone that is the anteriormost elements of the snout (Figure 1A and B). Bones have an alveolar and a nasal process. The premaxilla carries a slender nasal process and a broad alveolar process. The nasal process of the premaxilla extends between the nasals. This process reaches only one-fourth of the anterior part of the nasals. The alveolar process of the premaxilla is thinner and carries teeth along its ventral surface. These parts are similar in both lacertid species (*D. parvula* and *D. adjarica*). The premaxilla articulates with the maxilla posterolaterally, the vomer posteroventrally and the nasals posteriorly. The maxillary process of the premaxilla articulates with the premaxillary process of the maxilla. The premaxilla carries 7 premaxillary teeth in both *D. parvula* and *D. adjarica*.

**Maxilla.** The maxilla is a paired bone that forms the lateral side of the snout (Figure 1A and B). The bone reaches almost half of the skull. Each maxilla carries three processes: the premaxillary, the orbital, and the facial processes. The facial process of the maxilla extends to the nasal and its posterior end is concave in the two lacertids. In the anterior to posterior sequence, the bone articulates with the premaxilla, nasal, anterolateral process of the frontal and prefrontal. The orbital process forms the posterior part of the maxilla. Each maxilla articulates also with the platine medially, the lacrimal, jugal and ectopterygoid posteriorly. Ventrally, the alveolar portion of the maxilla carries an average of 17.1 maxillary teeth in *D. parvula* and an average of 15.8 maxillary teeth in *D. adjarica*.

**Nasal.** The nasal is a paired and thin bone that articulates with the premaxilla anteriorly, the frontal posteriorly, the maxillae anterolaterally and the prefrontals posterolaterally (Figure 1A and B). The one-fourth of the anterior part of the nasal is separated from other part of the nasal by the nasal process of the premaxilla. The

posterior end of the nasal overlaps the anterior part of the frontal. The lateral edges of the nasals connect with the facial processes of the maxillae. The anterior edge of the facial process of the maxilla and the anterior edge of the nasal forms the dorsal edge of the nares.

### 3.3. Orbital region of *Darevskia adjarica* and *D. parvula*

**Prefrontal.** The prefrontal is a paired bone and is approximately triangular in the two lacertids (Figure 1A and B). The bone forms the anterodorsal edge of the orbit. The prefrontal encloses the orbital cavity with the frontal, the postfrontal, the postorbital and the jugal. The posterodorsal process is slender and elongated and extends to the lateral margin of the frontal in the two species.

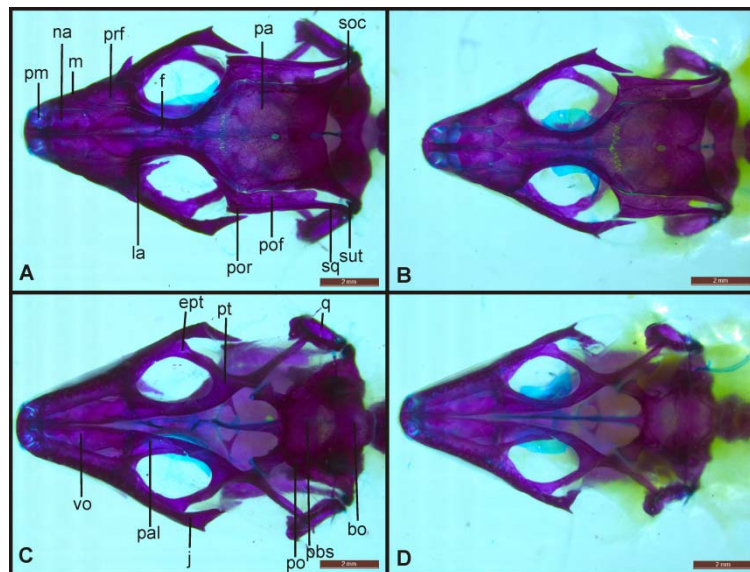


Figure 1. Skull of *D. adjarica* (A and C) and *D. parvula* (B and D). A. and B. Dorsal view, C. and D. Ventral view. bo, basioccipital; ept, ectopterygoid; f, frontal; j, jugal; l, lacrimal; m, maxilla; na, nasal; pfr, prefrontal; pa, parietal; pal, palatine; pbs, parabasisphenoid; pm, premaxilla; po, prootic; pof, postfrontal; por, postorbital; pt, pterygoid; q, quadrate; soc, supraoccipital; sq, squamosal; sut, supratemporal; vo, vomer (scale bar = 2 mm).

**Lacrimal.** The lacrimal is a large and triangular cranial element in each lacertids (Figure 1A and B). The bone forms the anterior orbit edge and is located between the prefrontal and jugal. In the dorsal view, the lacrimal articulates with the maxilla anterolaterally, the jugal posterolaterally and the prefrontal medially.

### 3.4. Temporal region of *Darevskia adjarica* and *D. parvula*

**Postfrontal.** The postfrontal is a paired bone that is approximately rectangular in the dorsal view (Figure 1A and B). The anterior part of the postfrontal forms the posteromedial portion of the orbit whereas the posterior part of the bone forms the anterior edge of the supratemporal fenestra. Unlike the parietal, the bone does not get longer posteriorly. The bone exists between the parietal and postorbital and articulates with the frontal, the parietal and the postorbital.

**Postorbital.** The postorbital is thin and its posterior edge, which meets with the squamosal, is sharp (Figure 1A and B). Anterolaterally, the bone extends up to the jugal but these two bones do not connect with each other. In both species, the postorbital connects with the postfrontal medially and with the anterior process of the squamosal posterolaterally. The postorbital is not fused with the postfrontal in the two

lacertids we examined.

**Squamosal.** The squamosal is a paired and thin bone that has a sharp anterior process and a curved posterior process (Figure 1A and B). The anterior process extends up to the postorbital, whereas the posterior process is lying through the quadrate ventrally and supratemporal laterally.

**Supratemporal.** The supratemporal is a small bone with a sharp anterior end (Figure 1A and B). The bone exists between the squamosal and supratemporal process of the parietal. The postfrontal is not connecting with the supratemporal. The anterior edge of the bone forms the posterior part of the supratemporal fenestra.

**Quadrate.** The quadrate is a paired bone that forms the posterolateral angle of the skull (Figure 1C and D). The bone is flattened and approximately in rectangular shape. The bone articulates with the lower jaw.

**Epipterygoid.** The epipterygoid is a long and rod-like element of the skull (Figure 1C and D). The bone extends anterior to the prootic.

**Jugal.** The jugals are approximately L-shaped bones in the lateral view (Figure 1C and D). However, there is a small protuberance at the level of the posterior process in the two lacertid taxa we examined here. The bone forms the posteroventral edge of the orbit. The bone has anterior and posterior processes. The anterior process articulates with the posterodorsal part of the maxilla anterolaterally and the lacrimal anteriorly. The posterior process that articulates with the anterolateral process of the ectopterygoid extends to the postorbital.

### **3.5. Palatal region of *Darevskia adjarica* and *D. parvula***

**Vomer.** The vomer is a paired and elongated bone that forms the anterior portion of the palate (Figure 1C and D). The anterior part and the end of the vomer are sharp but it is broadening posteriorly. In the ventral view, the vomer is surrounded by the premaxilla, the maxilla and the palatine. The anterior margin of the vomer meets the medial part of the premaxilla whereas, the posterior edge of the vomer articulates with the vomerine process of the palatine. The connection between the maxilla and the vomer is floppy. The anterior part is fused to each other, while the remaining part of the bone is separated medially.

**Palatine.** The palatine occupies the middle part of the skull floor (Figure 1C and D). The palatines do not contact one another in the midline because of the pyriform space. The posterior part of the bone is wider than its anterior part. The vomerine process of the palatine overlaps with the posterior edge of the vomer, whereas the pterygoid process of the palatine overlaps with the palatine process of the pterygoid.

**Pterygoid.** The pterygoid forms the posterior part of the palate and does not bear teeth (Figure 1C and D). The pterygoids are separated by the pyriform space. The Y-shaped bone carries the palatine, the transverse, and the quadrate processes. The posteromedial part of the orbital fenestra is formed by the palatine process that articulates with the pterygoid process of the palatine and transverse process. The transverse process connects to the medial process of the ectopterygoid. The quadrate process of the pterygoid is longer than other processes and meets the quadrate in the posterolateral part

of the skull.

Ectopterygoid. The ectopterygoid is a triradiate bone that forms the lateral margin of the orbital fenestra (Figure 1C and D). Anterolaterally, the ectopterygoid articulates with the orbital process of the maxilla. Posterolaterally, the bone connects the transverse process of the pterygoid. Each ectopterygoid carries anterolateral, posterolateral and medial processes, which articulate with the maxillae, jugals and pterygoids, respectively.

### **3.6. Oto-occipital region of *Darevskia adjarica* and *D. parvula***

Prootic. The prootic forms the anterolateral portion of the braincase (Figure 1C and D). The alar process of the bone articulates with the supraoccipital dorsally. The anteroventral process meets with the basioccipital ventrally. The prootic also contacts the parabasisphenoid anteroventrally and the otooccipital posteriorly.

Supraoccipital. The supraoccipital is an unpaired bone that creates the posterior roof of the braincase (Figure 1A and B). The bone exists posteriorly to the parietal and forms the dorsal edge of the foramen magnum. All of the specimens we examined have a posttemporal fenestra.

Basioccipital. The basioccipital is an unpaired bone that forms the posterior end of the braincase (Figure 1C and D). The bone articulates with the parabasisphenoid anteriorly and is lying anteriorly to the occipital condyle.

Parabasisphenoid. The parabasisphenoid is a single bone that is composed of the parasphenoid and the basisphenoid (Figure 1C and D). The bone presents anterior of the basioccipital and forms the anterior floor of the braincase. The basipterygoid process lies anterolaterally to medial and connects with the pterygoid. A long cultriform process is located at the anteromedial part of the parabasisphenoid.

### **3.7. Mandible of *Darevskia adjarica* and *D. parvula***

Dentary. The dentary is the largest mandibular bones and carries teeth on its dorsal surface (Figure 2A and B). The dentary creates the anterior half of mandible. The bone articulates with the angular ventromedially, the surangular ventrolaterally and the coronoid dorsally. The dentary carries an average of 19.5 dentary teeth in *D. parvula* and an average of 20.8 dentary teeth in *D. adjarica*.

Coronoid. The coronoid is a small V-shaped bone that exists in the middle of the mandible (Figure 2A and B). The bone occupies the space between the surangular and the dentary. The coronoid carries a large dorsal process and the height of the process has approximately the maximum height of the dentary. The labial process of the bone is approximately equal in width for both lacertid species and extends to the dentary. The anteromedial and posteromedial processes are present in the lingual view. The anteromedial process (or anterior lingual process) contacts several bones like the dentary anteriorly, splenial ventrally, surangular posterodorsally. The posteromedial process (or posterior lingual process) overlaps to the surangular and articular.

Angular. The angular locates the ventral surface of the mandible (Figure 2A). The bone forms approximately one-third the length of the mandible. The bone in the labial view is more likely apparent than the lingual view. The articular contacts the

surangular posterodorsally and posterior end of the dentary anterodorsally.

**Surangular.** The surangular is contact with the coronoid anteriorly, the articular posteriorly and the angular laterally (Figure 2A and B). The surangular forms the posterior half of the mandible. The length of the bone is approximately same length as the dentary.

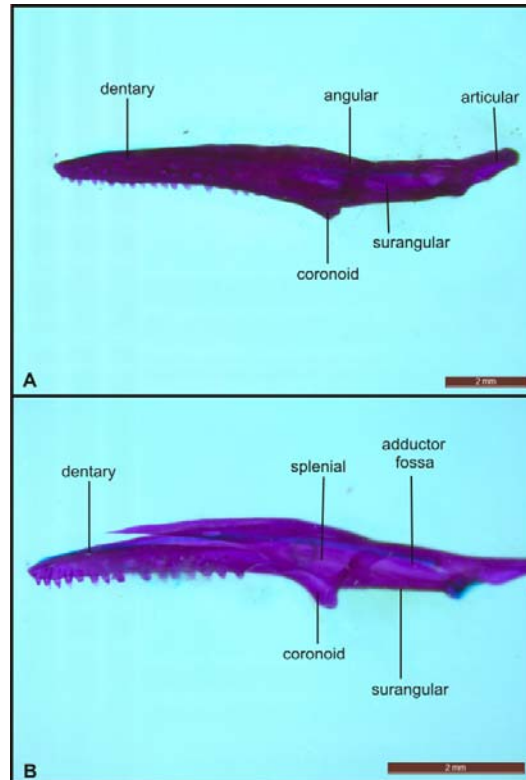


Figure 2. Mandible of *D. adjarica* and *D. parvula*. A. Labial view of *D. adjarica* and B. Lingual view of *D. parvula* (scale bar = 2 mm).

**Splenial.** The splenial is a long and thin bone that is seen in the anteromedial part of the mandible (Figure 2B). The bone meets the anterior lingual process of the coronoid posterodorsally and dentary anterodorsally.

### 3.8. Hyoid apparatus

The hyoid occupies beneath the lower jaw (Figure 3A). It consists of several elements. The basihyal is the central triradiate element and is calcified in all specimens (Figure 3C and D). The basihyal carries the glossohyal that is a long and thin medial process (Figure 3C and D). The hypohyal that is oriented anterolaterally and the ceratohyal that is oriented posterolaterally form the first visceral arch (Figure 3C and D). The hypohyal articulates with the basihyal anterolaterally (Figure 3C and D). The posterolaterally oriented first ceratobranchial and first epibranchial form the second visceral arch. The first ceratobranchial articulates with the basihyal posterolaterally. The second ceratobranchial and second epibranchial constitute the last visceral arch of the hyoid apparatus. In some younger specimens, the second ceratobranchial is cartilaginous.

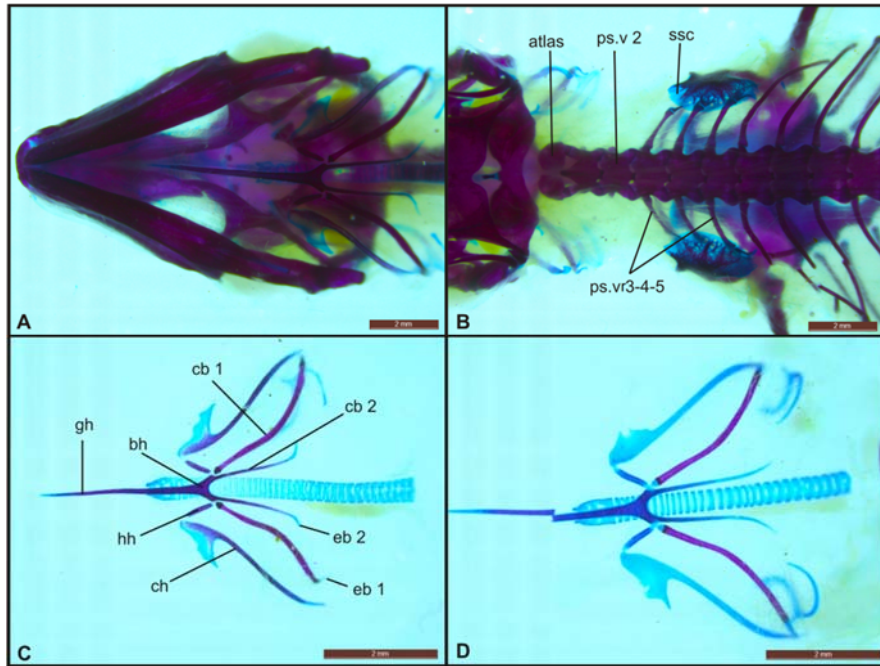


Figure 3. Hyoid apparatus and presacral vertebrae of *D. adjarica* and *D. parvula*. A. Ventral view of the adult of *D. parvula*, B. Dorsal view of the adult *D. adjarica*, C. Dorsal view of the juvenile of *D. parvula*, D. Dorsal view of the adult of *D. parvula*. bh, basihyal; cb 1-2, ceratobranchial 1-2; ch, ceratohyal; eb 1-2, epibranchial 1-2; gh, glossohyal; hh, hypohyal; ps.v, presacral vertebrae; ps.vr, presacral vertebral ribs; ssc, suprascapula cartilage (scale bar = 2 mm).

### 3.9. Vertebrae

The number of the vertebrae in *D. adjarica* is similar with those of *D. parvula*. Both *D. parvula* and *D. adjarica* have 27-28 presacral vertebrae. The morphology of the vertebrae is also similar with each other. The atlas is the first vertebra and is constituted by the intercentrum and the neural arches. Dorsally, the paired neural arches of the atlas do not contact with one another. The atlas lies through the axis that has wide neural arches in the dorsal view. The prezygophysis occupies the anterior edge of the vertebra, whereas the postzygophysis are present on the posterior edge of the vertebra. The axis has a transversal process without the ribs (Figure 3B). The following three and the last six vertebrae have short ribs in the examined species. In some specimens, the ribs on the last presacral vertebra are reduced. Interspecific variation is caused by the number of the remaining vertebrae, that have long ribs. There was a interspecific variation between male and female specimens with respect to the number of vertebrae. *Darevskia.parvula* and *D. adjarica* had 27-28 vertebrae for males and females, respectively.

### 3.10. Pectoral and pelvic girdles

The pectoral girdle consists of a single interclavicle, paired clavicles, scapulae, coracoids, epicoracoids and suprascapulae (Figure 4A and D). The clavicle and interclavicle are the only ossified elements in all specimens (Figure 4B and E). However, the epicoracoid, suprascapula, sternum, and xiphisternum are partly ossified or cartilaginous in some specimens we examined (Figure 4B and E). The morphology of the pectoral girdle in both species is similar with each other. The clavicle is closed and simple rounded shaped, whereas the interclavicle is cruciform in the species examined here (Figure 4A and D). The lengths of the anterior interclavicular process are shorter than the posterior interclavicular process in *D. parvula* and *D. adjarica* (Figure 4B and E). The sternal-xiphisternal costal formula is (3+2) that is three pairs

of ribs are attached directly to the sternum and two pairs of ribs are attached to the xiphisternum. A sternal fontanelle that is oval in shape is also present in the two lacertid species (Figure 4A and B).

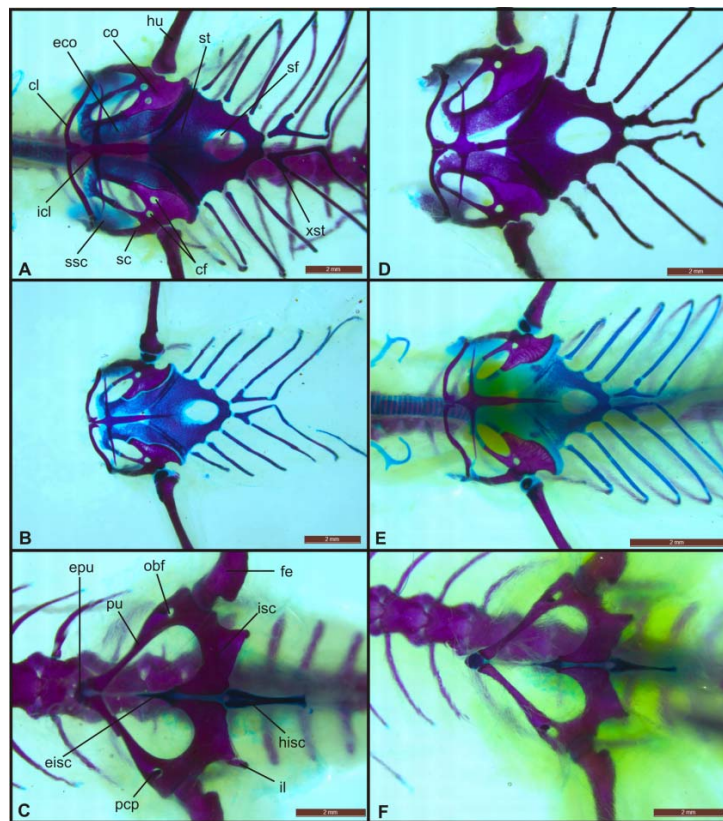


Figure 4. Pectoral and pelvic girdles of *D. adjarica* and *D. parvula*. A. adult of *D. adjarica*, B. juvenile of *D. adjarica*, C. adult of *D. adjarica*, D. adult of *D. parvula*, E. juvenile of *D. parvula* F. adult of *D. parvula*. cf, coracoid foramen; cl, clavicle; co, coracoid; eco, epicoracoid; eisc, epiischium; epu, epipubis; fe, femur; hisc, hipoischium; hu, humerus; icl, interclavicle; il, ilium; isc, ischium; obf, obturator foramen; pcp, pectinal process; pu, pubis; sc, scapula; sf, sternal fontanelle; ssc, suprascapula, st, sternum, xst, xiphisternum (scale bar = 2 mm).

The pelvic girdle is constituted by the epipubis, pubis, ilium, hypoischium, epiischium and ischium (Figure 4C and F). In the pubis of both species examined here, the pectinal process and obturator foramen are present. The ilium is rod-like in shape and meets the sacral vertebra. The epipubis presents in the anterior end of the pubis. The epiischium and hypoischium occupy anterior and posterior side of the ischium, respectively. The single and large ischio- pubic fenestra is surrounded by the pubis and ischium. The pelvic girdle is similar in the two lacertid species.

### 3.11. Forelimb and hindlimb

The forelimb is composed of the humerus, radius, ulna, metacarpals and digits (Figure 5A and C). The first segment of the forelimb is the humerus whereas the intermediate segments are the radius and ulna. The carpal, metacarpal and phalanges form the distal segment of the forelimb. The proximal end of the humerus articulates with the glenoid fossa whereas the distal ends articulate with the radius and ulna. The ulna is larger than the radius. The carpal region in the distal segment constitutes the proximal and distal row bones. The radiale, ulnare and centrale are in the proximal row whereas the distal carpals 1, 2, 3, 4 and 5 are in the distal row. The centrale is found between radiale and ulnare. A big pisiform occupies ventral to the ulna. The digits comprise of the long metacarpals and phalanges. The phalangeal formulae for the forelimbs is as follows; 2,

3, 4, 4, 3.

The hindlimb consists of the femur, tibia, fibula, metatarsals and digits (Figure 5B and D). The tarsus comprises the fibulare, tibiale and two distal tarsals. The first segment of the hindlimb is the femur and the intermediate segment is the fibula and tibia. The tarsal, metatarsal and phalanges form the distal segment of the hindlimb. The fibulare and ulnare are present at the distal ends of the tibia and fibula. The phalangeal formulae for the hindlimbs is as follows; 2, 4, 4, 3, 2.

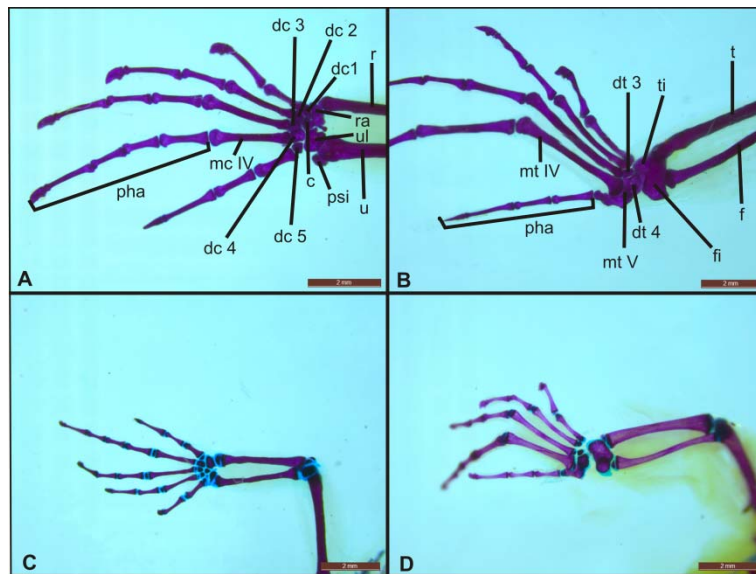


Figure 5. Fore- and Hind-limb of *D. adjarica* and *D. parvula*. A. Adult of *D. adjarica*, B. Adult of *D. parvula*, C. Juvenile of *D. adjarica* and D. Juvenile of *D. parvula*. c, centrale; dc 1-2-3-4-5, distal carpal 1-2-3-4-5; dt 3-4; distal tarsal 3-4; f, fibula; fi, fibulare; mc IV metacarpal IV; mt IV-V metatarsal IV-V; pha, phalange; psi, psiform; r, radius, ra, radiale; t, tibia; ti, tibiale; u, ulna; ul, ulnare (scale bar = 2 mm).

#### 4. Discussion

The skull is the most complicated skeletal element and provides important data for phylogenetic analysis. [14]. The phylogeny of reptiles has some contradiction. Osteological studies have paved the way for molecular works. The genus *Darevskia* [3] which have some taxonomic revisions, have been investigated in numerous studies. Most of the subspecies were evaluated to species rank because of the detailed morphological and molecular studies [3, 6, 15, 17, 26]. Although osteological data have an important role to address its taxonomic position and attain a better understanding of the evolution of lizards, the literature on skeletal osteology of lizard is quite limited. Among all lizard families, Gymnophthalmidae is one of the most commonly studied families [11, 20, 25, 29, 30].

There is an intraspecific variation in *D. parvula* and *D. adjarica*. Some authors found that there is variation during ontogeny of lizards [8]. There are some differences between juvenile and adult *Darevskia* species we examined here with regard to cranial bones (frontal, parietal). The closure of the frontoparietal suture does not occur and frontoparietal fenestra remains open in the juvenile specimens. This openness seems like a plus sign. This variation is important to elucidate individual characteristics of each specimen. The number of teeth also varies among specimens. In the pectoral



girdle of juvenile specimens, the suprascapula, epicoracoid and sternum are partly ossified or cartilage. Moreover, in the hyoid apparatus, the ceratohyal and second ceratobranchial are cartilaginous in most juvenile specimens, whereas they are ossified in all adult specimens examined.

The genus *Darevskia* is intricate because of the taxonomic position of specimens. In previous studies, all of the rock lizards were known as a single group, *Lacerta saxicola*. As studies on these species were started to be carried out, the taxonomic position of many species was changed or renamed to another species. Arribas et al. [7] studied *D. parvula* by using morphology, osteology and genetics approaches and suggested that two subspecies had to be evaluated as two distinct species (*D. parvula* and *D. adjarica*). They found that *D. parvula* and *D. adjarica* show similar osteological characters with each other. However, difference is caused by having an extra vertebra in both sexes of Ardahan specimens of *D. adjarica*. Specimens examined here also have the same number of presacral vertebrae. Both species have 27-28 vertebrae for males and females, respectively. This difference in the number of vertebrae is explained with the climatic conditions. According to Lourdais et al. [24] this condition affected the vertebral number which is related with the snout-vent length during embryogenesis. The number of teeth also differs from *D. parvula* and *D. adjarica*. The number of teeth in *D. adjarica* is more than *D. parvula* except for the premaxilla. The alveolar surface of *D. parvula* carries 7 teeth in the premaxilla, 15 to 16 teeth in the maxilla and 17 to 21 teeth in the dentary. In *D. adjarica* the number of teeth is as follows: 7 teeth in the premaxilla, 16 to 19 teeth in the maxilla and 18 to 23 teeth in the dentary.

*Darevskia* species analyzed also share some osteological characters. These characters have largely protected in the two species. They have similar osteological characters and these similarities are as follows: 1) The frontal bone separate from one another, 2) the pineal fontanelle present in the parietal, 3) The postorbital and postfrontal separate from each other, 4) The sternum has an oval-shaped fontanelle and the sternal formula is (3+2), 5) The clavicle is open in shape, 6) The interclavicle is cruciform and posterior process in two species is longer than anterior one, 7) the post-temporal fenestra is available, 8) supratemporal fenestra present, 9) the nasal and orbital openings are not equal in size, 10) the jugal is triradiate with a small posterior process, 11) the premaxilla-maxilla articulation is simple. Despite these similarities, the skeletal elements of species here show differences when they compared with other lacertids from the literature. Müller [28] investigated skull osteology of *Parvilacerta parva* and found a large braincase, a short parietal table, closed post-temporal openings and a large lacrimal. Similarly, species analyzed here have a parietal table and large lacrimal. However, the post-temporal opening is open in all examined species. Khosravani [22] worked on skull osteology of the two lacertids *Eremias persica* and *Mesalina watsonana*. In this study, the authors found that there are some differences between the two lacertid species. In *E. persica*, the nasals contact with each other whereas the bones do not contact in *M. watsonana*, Also, a big pyriform space in *M. watsonana* is larger than those of *E. persica*. But, these osteological differences are not present in our species examined here. Osteology of *Darevskia defilippi* was treated by Arribas [5] and some osteological characters are as follows: 7-8 teeth in premaxilla, 13-17 teeth in maxilla and 19-20 teeth in dentary; the postfrontal and postorbital bones separate from one another and are subequal; the maxillojugal suture is smooth; the squamosal overlap one third of the postorbital; the number of the presacral vertebra is

27 in males and 28-29 in females. Our species examined here share similar osteological characters with *D. defilippi* except from the number of the presacral vertebra and teeth.

The osteological morphology of *D. parvula* and *D. adjarica* is described carefully in the current study. Our work provides important and detailed data about the osteology of these lacertid species. But, we still need more information to better understand morphology of the skeleton of lacertid taxa and his variation among the groups of this conservative family. Despite the number of lizards and importance of such studies, these kind of osteological studies are scarce. Moreover, the cranial and postcranial skeleton provides useful data for lacertid phylogeny and for relationship among species.

## References

- [1] Ahmadzadeh, F., Flecks, M., Carretero, M. A., Mozaffari, O., Böhme, W., Harris, D. J., Freitas, S. and Rödder, D., Cryptic speciation patterns in Iranian Rock Lizards uncovered by integrative taxonomy, **Plos One**, 8, 1-17, (2013).
- [2] Arnold, E.N., Arribas, O.J. and Carranza, S., Systematics of the Palaearctic and Oriental lizard tribe lacertini (Squamata: Lacertidae: Lacertinae), with descriptions of eight new genera, **Zootaxa**, 1430, 1-86, (2007).
- [3] Arribas, O.J., Morfologia, filogenia y biogeografía de las lagartijas de alta montana de los Pirineos, Ph.D., Universidad autonoma de Barcelona, Barcelona, Spain, (1997).
- [4] Arribas, O.J., Osteology of the Pyrenean mountain lizards and comparison with other species of the collective genus *Archaeolacerta* Mertens, 1921 s. l. from Europe and Asia Minor, **Herpetozoa**, 11(1/2), 47-70, (1998).
- [5] Arribas, O.J., Osteology of *Darevskia defilippi* (Camerano, 1877) raises doubts: Is it really a close relative of *Darevskia raddei* (Boettger, 1892), **Herpetozoa**, 25, 21-24, (2012).
- [6] Arribas, O.J., Ilgaz, Ç., Kumlutaş, Y., Durmuş, S.H., Avcı, A. and Üzümlü, N., External morphology and osteology of *Darevskia rudis* (Bedriaga 1886), with a taxonomic revision of the Pontic and Small-Caucasus populations (Squamata: Lacertidae), **Zootaxa**, 3626, 401-428, (2013).
- [7] Arribas O.J., Ilgaz, Ç. and Kumlutaş, Y., Reevaluation of the intraspecific variability in *Darevskia parvula* (Lantz & Cyren, 1913): an integrated approach using morphology, osteology and genetics (Squamata: Lacertidae), **Zootaxa**, 4472(1), (2018).
- [8] Barahona, F. and Barbadillo, L.J., Inter- and intraspecific variation in the post-natal skull of some lacertid lizards, **Journal of Zoolology**, 245, 393-405, (1998).
- [9] Baran, İ., Ilgaz, Ç., Avcı, A., Kumlutaş, Y. ve Olgun, K., **Türkiye amfibi ve sürüngenleri**, 207, TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları, Ankara, Türkiye, (2013).
- [10] Başoğlu, M. ve Baran, İ., **Türkiye sürüngenleri, kısım I. kaplumbağalar ve kertenkeleler**, 272, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Kitaplar Serisi, İzmir, Türkiye, (1977).
- [11] Bell, C.J., Evans, S.E. and Maisano, J.A., The skull of the gymnophthalmid *Neusticurus ecleopus* (Reptilia: Squamata), **Zoological Journal of Linnean**

- Society**, 139, 382-304, (2003).
- [12] Bodenheimer, F.S., Introduction into knowledge of the amphibia and reptilia of Turkey, **Revue de la Faculte des Sciences de L'Universite d'Istanbul, Serie B, Sciences Naturelles**, 9, 1-78, (1944).
- [13] Clark, R.J. and Clark, E.D., Report on a collection of amphibians and reptiles from Turkey, **Occasional Papers of the California Academy of Sciences**, 104, 1-62, (1973).
- [14] Conrad, J.L., Phylogeny and systematics of Squamata (Reptilia) based on morphology, **Bulletin of the American Museum of Natural History**, 310, 1-182, (2008).
- [15] Darevsky, I.S., **Rock lizards of the Caucasus: Systematics, ecology and phylogenesis of the polymorphic group of the Caucasian rock lizards of the subgenus *Archaeolacerta***, 216, Nauka, Leningrad, Russia, (1967).
- [16] Darevsky, I.S. and Eiselt, J., Neue felseneidechsen (Reptilia: Lacertidae) aus dem Kaukasus und aus der Türkei, **Amphibia-Reptilia**, 1, 29-40, (1980).
- [17] Fu, J., Darevsky, I.S., MacCulloch, R.D., Kupriyanova, L.A., Roitberg, E.S., Sokolova, T.M. and Murphy, R.W., Genetic and morphological differentiation among Caucasian rock lizards of the *Lacerta caucasica* complex, **Russian Journal of Herpetology**, 2(1), 36-42, (1995).
- [18] Fu, J., Toward the phylogeny of the Family Lacertidae: Implications from mitochondrial DNA 12S and 16S gene sequences (Reptilia: Squamata), **Molecular Phylogenetics and Evolution**, 9, 1, 118-130, (1998).
- [19] Fu, J., Toward the phylogeny of the family Lacertidae – why 4708 base pairs of mtDNA sequences cannot draw the picture, **Biological Journal of Linnean Society**, 71, 203-217, (2000).
- [20] Guerra, C. and Montero, R. The skull of *Vanzosaura rubricauda* (Squamata: Gymnophthalmidae), **Acta Zoologica**, 90, 359-371, (2009).
- [21] Ilgaz, Ç., Comparative morphology of *Darevskia parvula* (Lantz-Cyren 1936) (Sauria: Lacertidae) subspecies in Northeastern Anatolia, Turkey, **North-West Journal of Zoology**, 5, 2, 263- 280, (2009).
- [22] Khosravani, A., Rastegar-Pouyani, N., and Oraie, H., Comparative skull osteology of the lacertids *Eremias persica* and *Mesalina watsonana* (Sauria: Lacertidae), **Iran Journal of Animal Biosystematics**, 7, 2, 99-117, (2011).
- [23] Lantz, L. A. and Cyrén, O., Eine neue varietät der felseneidechse *Lacerta saxicola Eversmann parvula* nov. var., **Bulletin of Museum Caucasus**, 7, 163-168, (1913).
- [24] Lourdais, O., Shine, R., Bonnet, X., Guillon, M. and Naulleau, G., Climate affects embryonic development in a viviparous snake, *Vipera aspis*. **Oikos**, 104, 551-560, (2004).
- [25] Montero, R., Moro, S.A. and Abdala, V., Cranial anatomy of *Euspondylus acutirostris* (Squamata: Gymnophthalmidae) and its placement in a modern phylogenetic hypothesis, **Russian Journal of Herpetology**, 9, 2, 215-228, (2002).
- [26] Murphy, R.W., Darevsky, I.S., MacCulloch, R.D, Fu, J. and Kupriyanova, L.A., Evolution of the bisexual species of Caucasian rock lizards: A phylogenetic evaluation of allozyme data, **Russian Journal of Herpetology**, 3, 1, 18-31, (1996).
- [27] Murphy, R.W., Fu, J., MacCulloch, R.D., Darevsky, I.S. and Kupriyanova, L.A., A fine line between sex and unisexuality: The phylogenetic constraints on parthenogenesis in Caucasian lacertid lizards, **Zoological Journal of**

- Linnean Society**, 130, 527-549, (2000).
- [28] Müller, J., Skull osteology of *Parvilacerta parva*, a small-sized lacertid lizard from Asia Minor, **Journal of Morphology**, 253, 43-50, (2002).
- [29] Roscito, J.G. and Rodrigues, M.T., Comparative cranial osteology of fossorial lizards from the tribe Gymnophthalmini (Squamata: Gymnophthalmidae), **Journal of Morphology**, 271, 1352- 1365, (2010).
- [30] Roscito, G.R. and Rodrigues, M.T., A comparative analysis of the postcranial skeleton of fossorial and nonfossorial gymnophthalmid lizards, **Journal of Morphology**, 274, 845-858, (2013).
- [31] Tarazona, O.A., Fabrezi, M. and Ramírez-Pinilla, M.P., Cranial morphology of *Bachia bicolor* (Squamata: Gymnophthalmidae) and its postnatal development, **Zoological Journal of Linnean Society**, 152, 775-792, (2008).
- [32] Torres-Carvajal, O., Cranial osteology of the Andean lizard *Stenocercus guentheri* (Squamata: Tropicuridae) and its postembryonic development, **Journal of Morphology**, 255, 94-113, (2003).
- [33] Wassersug, R., A procedure for differential staining of cartilage and bone in whole formalin fixed vertebrates, **Stain Technology**, 51, 131-134, (1976).

# Improving *in vitro* seed sprouting on legume of *Indigofera zollingeriana* stored seed

Siti MAESAROH<sup>1,\*</sup>, Çiğdem Alev ÖZEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Field Crops, Faculty of Agriculture, Ankara University, 06110, Diskapı, Ankara, Turkey

<sup>2</sup>Department of Biology Education, Faculty of Education, Gazi University, 06500, Teknikokullar, Ankara, Turkey

Geliş Tarihi (Received Date): 19.02.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 26.08.2019

## Abstract

Experimental evidence shows that notable Indonesian forage crop zollinger blue or *Indigofera zollingeriana* has high seed dormancy that hinders its reproduction on large scale. This study reports different pre-treatments to break seed dormancy and improve seed germination of *I. zollingeriana* seeds under *in vitro* conditions. Experimental evidence suggest that both mechanical and chemical scarification followed by treatment with constantly agitated liquid 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> has significant effects on seed germination of the plant. The germinated seeds were cultured on MS medium to aid seedling growth. The results showed improved germination and raising of the seedlings compared to the treatments; when the seedlings were germinated using sand paper or acid scarified seeds singly. However, acid scarification for longer time affect negatively on germination especially roots.

**Keywords:** Forage, gibberelic acid, legumes, mechanical scarification, chemical scarification.

Baklagil bitkisi *Indigofera zollingeriana*'nın depolanmış tohumların *in vitro* koşullarda çimlendirilmesi ve geliştirilmesi

## Özet

DeneySEL çalışmalar, Endonezya'da zollinger mavisi ya da *Indigofera zollingeriana* olarak bilinen yem bitkisinin üretimini büyük ölçüde engelleyen faktörün yüksek tohum dormansisi olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada farklı ön muameleler ile yüksek

\*Siti MAESAROH, maesaroh@ankara.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-1024-284X>

Çiğdem Alev ÖZEL, cigdemozel@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-2900-3507>

*tohum dormansisinin kırılması ve in vitro koşullar altında tohum çimlendirilmesinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan denemelerde hem mekanik hem de kimyasal muamelesinin birlikte uygulanması sonrası 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> uygulamasının tohum çimlenmesinde önemli etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Çimlenen tohumlar MS besin ortamına alınarak büyümeye bırakılmıştır. Bu şekilde çimlendirilen tohumlar sadece zımpara ya da asit muamelesi uygulaması ile çimlendirilen tohumlara göre daha iyi çimlenme göstermiştir. Bununla birlikte asit uygulama süresinin artması özellikle çimlenen tohumların köklerinde olumsuz etkiye sebep olmuştur.*

**Anahtar kelimeler:** Yem, gibberellik asit, baklagil, mekanik aşındırma, kimyasal aşındırma.

## 1. Introduction

*Indigofera* are leguminous plant with their tolerance to abiotic stresses like drought, light floods, acidic soils and salinity [1-2]. *Indigofera* species distribute thoroughly in tropical region especially South Asia and Indonesian island [3-4]. The utilization of *Indigofera* has been reported as sources of forage crop, natural dyes, cosmetics and pharmaceuticals.

*Indigofera zollingeriana* Miq. with its drought of tolerance, high herbage production and nutritional quality is one of important forage sources that grows in Indonesia [5-7]. Akbarillah et al. [8] reported *Indigofera*'s leave meal contain 27% crude protein, 19.94% crude fiber, 9.96% crude fat, 0.22% Ca, 0.18% P and 1700 kkal/Kg energy metabolism.

It is well known as one of cultivation problem that normal seed *I. zollingeriana* germinated at 4<sup>th</sup> days with germination below 35% after 2 months of storage periode [9]. Low seed germination of *I. zollingeriana* is partially related to thick skin coat and fungal invasions during storage that influence seed germination behavior of stored seeds [10-11]. Seed has important role to support breeding and quality forage production. However, high seed dormancy that increase with the passage of time in *I. zollingeriana* offer considerable challenge to expand its production.

This study aimed to offer practical solutions to solve seed dormancy under *in vitro* conditions.

## 2. Materials and methods

The seeds were collected from Prof. Dr. Luki Abdullah of the Department of Nutrition Science and Feed Technology, Bogor Agricultural University, Indonesia.

### 2.1 Tetrazolium test

Tetrazolium test was carried out following Pradhan and Badola [12] to evaluate seed viability of fresh, 9, 13, 15 and 17 months old seeds. Each sample contained 100 seeds.

### 2.2 Surface disinfection methods

Sixty (60) seeds each of *I. zollingeriana* were surface disinfected using 20, 40, 60, 80 and 100% concentration of commercial bleach (Domestos-Turkey, containing 5%

NaOCl) for 10 minutes. Subsequently, they were rinsed  $3 \times 5$  min with autoclaved distilled water to remove the traces of commercial bleach. The disinfected sterilized seeds were cultured on sterile MS medium [13], pH 5.6-5.8 to optimize the best disinfection conditions.

### **2.3 Seed dormancy break treatments**

The experiment determined effectiveness of mechanical (sand paper) and chemical (acid) scarification of the seeds singly or in combination. Thereafter, initially the 9 months old seedlings were treated/shaked with 0.0, 0.11, 0.16 and 0.21 mg/L GA<sub>3</sub> (Gibberellic acid) for 3 days to optimize best GA<sub>3</sub> concentration. Subsequently, the 13, 15 and 17 months old seedlings were treated with the optimized concentration of GA<sub>3</sub>. The control treatments contained the seeds that were not scarified and not treated with GA<sub>3</sub>. All seeds were cultured in growth chamber.

### **2.4 Statistical analysis**

Each experimental treatment used 60 seeds divided into equally distributed 4 replicates; each containing 15 seeds or explants. The control treatments contained the seeds or explants that were not scarified and not treated with GA<sub>3</sub>. The data was analyzed by comparing means using SPSS 24 program for Windows. The significant differences among the means were determined by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). The percentage data obtained from the experiments were subjected to arcsine transformation before statistical analysis [14].

## **3. Results**

### **3.1 Tetrazolium test**

Tetrazolium test showed 100%, 90%, 85% and 85% seed viability on seeds stored for 9 months, 13, 15 and 17 months respectively showing that the seeds loose viability progressively with the passage of time.

### **3.2 Seed sterilization of *I. zollingeriana* and germination**

No contamination was noted on any sterilization treatment after 3 weeks. Seed germination percentage ranged 5-18.33% (Fig. 1). It was noted that > 20% commercial bleach caused progressively increasing inhibition on germination of *I. zollingeriana* seeds. Seed germination decreased with each advancing concentration of commercial bleach. Moreover, these commercial bleach concentrations also had damaging effects on respective seed coat/testas that secreted increased blue or violet pigments in the culture medium. These pigments had stunting effects on growth of seedlings even after 10-12 days of culture post germination (Fig 2).

In the 2nd experiment, the sterilized seeds were sprouted using different concentrations of GA<sub>3</sub> in sterilized erlenmeyer fasks on horizontal shakers with aim to optimize the best effective GA<sub>3</sub> concentration. The GA<sub>3</sub> concentrations other than 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> were not as effective and had inclination towards gigantic growth and callusing on the germinating seedlings. A non significant increase (20%) in germination percentage was noted; with significant differences compared to the former experiment, showing radicular protrusions on the germinated seedlings using 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> (Fig. 3). No inhibition was noted on these seedlings with development of comparatively longer (~3.5 cm) shoots in 10-12 days'time. Therefore, this concentration of GA<sub>3</sub> was used in all

subsequent experiments. No release of pigmentation was noted on any shaken liquid GA<sub>3</sub> treated seeds on MS medium.

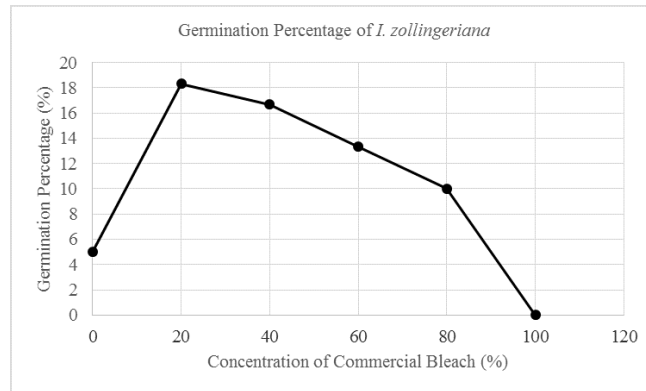


Fig. 1. Effect of variable concentration of commercial bleach on seed germination percentage of *I. zollingeriana*.

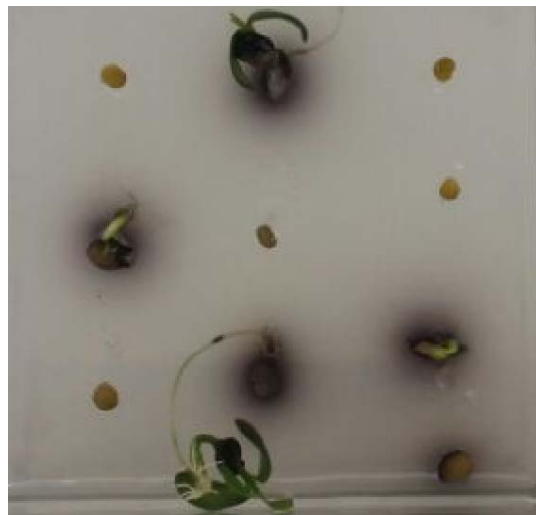


Fig. 2 Commercial bleach treated germinated seedlings with increased blue or violet pigments in the culture medium.

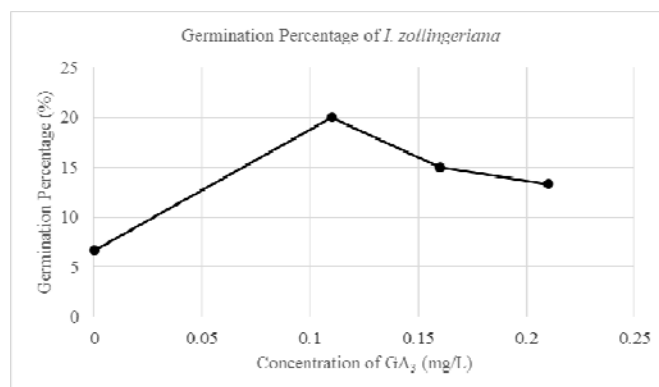


Fig. 3. Effects of variable concentration of gibberellic acid (GA<sub>3</sub>) on seed germination percentage of Zollinger's Indigo.



### 3.3 Scarification treatments of 9 months old seeds

#### 3.3.1. Sand paper scarification

Sand paper scarification on 9 months old seeds followed by treatment with liquid 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> was not as effective as acid scarification strategy to germinate the 9 months old seeds and the seed germination never surpassed 50%. Sand paper scarified seeds were prone to secrete pigmentations compared to acid scarified seeds, in to the culture medium and hindered growth and development of seedlings. The germinated seedlings were subcultured three times to avoid the problem. This might have inhibited growth and germination of seedlings.

#### 3.3.2 Sulphuric acid scarification

The seed germination percentage ranged 18.33-66.67% (Table 1) on sulphuric acid scarified seeds for 5 to 20 min followed by treatment with 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> for 3 days. Acid treated seeds had bleached seed coat and 2-3 cm long shoots with leaves in 10-12 days. Minimum and maximum seed sprouting was noted on 5 and 10 min sulphuric acid scarification of seeds in the same order.

Table 1. Influence of sandpaper and 98% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> treatment on 9 months old seed germination of *I. zollingeriana* under *in vitro*.

Scarification treatment		Sulfuric acid scarification treatment (min)	Percentage of germination (%) after 3 days treatment with 0.11 mg/L GA <sub>3</sub> by continuous shaking before culture on agar solidified MS medium
Sand paper scarification with 2-3 scratches			
-		5	18.33e
-		10	73.33c
-		20	66.67d
+		5	95.00b
+		10	100.00a
+		20	100.00a

Means not followed by the same letter within a column differ significantly at 0.05 level of significance using Duncan's multiple range test.

#### 3.4 Treating 9 months old sand paper + sulphuric acid scarified seeds after treatment with liquid GA<sub>3</sub> and culture on MS medium

It was noted that the seeds that were acid scarified for 5 to 20 min followed by treatment with 0.11% GA<sub>3</sub> induced 18.33-66.67% sprouting of the seedlings (Table 1). Contrarily, combined scarification (sand paper + 5 to 20 min acid scarification) followed by 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> imbibition with continuous shaking improved the seedling sprouting percentage in range of 95-100% (Table 1). Minimum seed germination (95%) was noted on 5 min and 100% seed germination was noted on combined 10-20 min acid scarified seeds followed by treatment with liquid 0.11 mg/L GA<sub>3</sub>. However, 10 min and 20 min scarified seeds showed burning of radicular tips on the germinated seeds. This showed that longer acid treatments are hazardous for seeds and should be avoided. Therefore, combined scarification and post treatment with GA<sub>3</sub> was preferred in all subsequent experiments to sprout seedlings. Combined sand paper and acid scarified seeds were the most effective and gave the highest seed germination and significant improvement in the germination percentage of the seeds.

### 3.5 Effect of different durations of storage on seed germination

The result showed 90, 85 and 85% seed germination on 13, 15 and 17 months old stored seeds in the same order at room temperature, using combined (sand paper and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) scarification for 5 min, followed by seedling sprouting in 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> treatment (Table 2).

Seed germination percentage of 5, 5 and 5% was noted on 13, 15 and 17 months stored non scarified seeds that were treated without 0.11 mg/L GA<sub>3</sub>. The seeds did not show any sprouts on agar solidified MS medium (control treatment 1). Whereas, germination percentage of 13, 15 and 17 months stored seeds was 88.33, 83.33 and 81.67% in the same order on combined scarified seeds shaken in sterile water (control treatment 2).

Table 2. Influence of sandpaper and 5 min 98% of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> scarification on germination percentage of *I. zollingeriana* stored seeds for 13, 15, 17 months.

Scarification treatment	Type of treatment	Percentage (%) of germination on storage		
		13 months	15 months	17 months
Sandpaper + 98% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> for 5 min	3 days treatment with 0.11 mg/L GA <sub>3</sub> by continuous shaking	90.00aA	85.00aB	85.00aB
No scarification (control treatment 1)	No treatment	5.00bA	5.00bA	5.00cA
Sandpaper + 98% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> for 5 min (control treatment 2)	3 days treatment with sterile water by continuous shaking	88.33aA	83.33aB	81.67bB

<sup>1</sup>Means not followed by same letter within a column differ significantly at 0.05 level of significance using LSD test.

<sup>1</sup>Means not followed by same letter within a row differ significantly at 0.05 level of significance using Duncan's multiple range test.

## 4. Discussion

### 4.1 Tetrazolium and dormancy

Tetrazolium (2, 3, 5 triphenyl tetrazolium chloride or bromide) test is the best indicator to evaluate seed viability potential that could germinate under field conditions. All living tissues respire and reduce colorless tetrazolium chloride into a non diffusible, red compound formazan by transfer of H ion transfer reactions, that transform living tissues red [12]. Tetrazolium test indicated 100% seed viability on 9 months stored seeds and variable reduction in seed viability thereafter on the seeds stored for 13, 15 and 17 months stored seeds. It is common belief and the previous studies by Abdullah [15], who suggest that storage of *I. zollingeriana* seeds under ex situ conditions for long term basis reduce seed germination. The results of this study confirmed that it is not seed viability but dormancy that affects seed germination of the stored seeds. The seeds stored longer than 9 months had reduced germination in agreement with Van Hezewijk et al. [16] and Müller et al. [17]. This reduction in germination could be due to different factors including seed moisture content, surrounding temperature, relative humidity and storage conditions that are natural during storage [12, 18-26]. Another reason of dormancy could be the development of combined embryo and seed coat dormancy [27].

It is assumed that the *I. zollingeriana* embryos used in this study were very weak or had developed enhanced level of ABA with the passage of time. Resultingly, these failed to press the seed coat to rupture it and break the related seed coat dormancy. Thus both of these dormancies coexisted and blocked seed germination in agreement with Baskin et al. [28], Baskin et al. [29] and Baskin and Baskin [30]. However, inhibition caused by seed coat was more prominent compared to the other embryo related dormancy/ies. As and when the seed coats were splitted due to combined scarification, GA<sub>3</sub> treatment reduced the ABA caused embryo growth blockage leading to the breaking of other types of seed dormancy [31-35].

The results further showed that the seeds did not lose seed integrity but germination capability is gradually lost in seeds stored for a longer time [36]. This also suggests that these seeds should be exposed to appropriate germination conditions like scarification, under warm moist conditions for termination of dormancy. Adkins et al. [37] suggests that addition of GA<sub>3</sub> in the seed germination environment improves germination and seed sprouting.

The validity of tetrazolium test that carried out to determine the percentage of viable seeds of seed lot is noted for all species in order to the method is described in the ISTA Rules [38]. The positive correlation between tetrazolium test and germination test are noted in many cases. The low seed germination [9] can be checked with tetrazolium test due to physical damage (broken seeds and heat damage) or physiological dormancy of mature seeds) [39].

#### **4.2 Seed sterilization of *I. zollingeriana* and germination**

Sodium hypochlorite is a fast, simple, economic and effective method of *in vitro* sterilization [40]. Although sodium hypochlorite is the most commonly of used, sterilizing agent, it could behave variably depending on the texture of seed coat among different species [41]. Sodium hypochlorite based sterilization was effective in this case as well. It was noted that increasing concentrations of bleach induced damage to the embryos of the seeds that reduced seed germination. However, the treatment was effective in partial germination of 18.33% with protrusion of radicles only. The cultured seeds secreted blue or violet colored anthocyanin pigments into the culture medium. This was controlled by 2-3 seed subcultures after every 3-4 days to avoid damage to the germinating seeds. Nwachukwu and Edeoga [42] established that several Indigofera species including *I. zollingeriana* contain starch grains, tannins and some crystal types besides number of pigments in all parts of the plants.

#### **4.3 GA<sub>3</sub> treatment**

GA<sub>3</sub> is known to have a significant role in seed germination and elongation. This has been conformed in other studies. Patel and Mankad [43] noted maximum seed germination percentage on *Tithonia rotundifolia* Blake using 500 mg/L (ppm) of GA<sub>3</sub>. This (0.11 mg/L GA<sub>3</sub>) treatment was effective to induce 20% germination with protrusions of both radicles and plumules. However, the seed coats were very hard and they did not allow more germination and improved elongation. Desai et al. [44] report that application of 150 mg/L of GA<sub>3</sub> on *Carica papaya* L. sprouts improved elongation of sprout shoots along with germination percentage.

#### 4.4 Germination of seeds after scarification (mechanical and acid) followed by germination with liquid GA<sub>3</sub> treatments

Tetrazolium test indicated seed viability of 100, 90, 85 and 85% for 9, 13, 15 and 17 months stored seeds respectively. The results showed that the seeds viability is lost gradually after a prolonged storage period. It is believed that ABA biosynthesis in the embryo and close by seed tissues continue maturation and storage proteins and lipids synthesis that suppress early embryo germination [45-46]. Generally, seed ABA level is low during early growth period that improves thereafter, and peaks around mid maturity period [27, 46-49]. Besides this other factors also aid increase or fall of ABA, that include sensitivity of ABA to seed development stage seed tissues and different thresholds to start and maintain seed development [46, 50-51]. Light, temperature and water availability can significantly affect level of ABA contents and sensitivity to seed maturity. Dormancy of *I. zollingeriana* might be caused by hard seed coat or wax layer beneath seed coat that can interfere water imbibition during germination. The results showed best results on 10 min acid scarified seeds treated with 0.11 mg/L GA<sub>3</sub>. Longer periods of scarification were hazardous even if the seeds were treated with GA<sub>3</sub>.

Sandpaper scarification is one of methods to soften seed coat and improve seed germination. Two three scratches of sand paper were considered as enough to crack seed coat/testa and avoid considerable damage to seed embryos making their seed coat more permeable to water with improved germination. Increased seed crushing or scratching can damage seed embryos fully or partially [52]. They reported that mature dodder seeds could be germinated by sand paper scarification. Hassen et al. [53] has reported sand paper scarification as an effective method to break seed dormancy and they improved seed germination from 41-73% compared to boiled water treatment in 6 accession of *Indigofera* (*I. cryptantha*, *I. brevicalyx*, *I. arrecta*, *I. spicata*, *I. trita* and *I. spicata*). In another study Hassen et al. [54] improved germination of *Ziziphus mucronata* (buffalo thorn) from 10.7% on non treated seeds to 65.4% after sand paper scarification, also report improvement of seed germination of forage legume from the control with 13.2% up to 85.3% and *Lessertia frutescens* 8% germination on control to 99.6% with mechanical scarification with sandpaper. Sandpaper can soften the hard seed coats of *I. zollingeriana*. It was similar to other small seed legumes species of *Indigofera* that successfully improved germination seed of in *I. cryptantha* and *I. spicata* by sandpaper scarification [53].

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> acts both as effective disinfectant and scarifying agent that helps to break seed coat and accelerate seed germination. Comparing the two types of scarification, sulphuric acid scarification was less effective compared to the combined scarification. in agreement with Hari et al. [55] and Balouchi and Sanavy [56]. Dilaver et al. [57], who confirmed increasing concentrations might have induced variable damage to the embryos of the *I. tinctoria* L., *Medicago polymorpha* L. and *Mycrotyloma daltoni* Webb. Verde, *Medicago rigudula* L. and *Astragalus* seeds in their studies. Ersin et al. [58] reported that highest germination rate in *Medicago polymorpha* L., *Trifolium lappaceum* L., *T. scabrum* L. and *T. strictum* L. was 47.5%, 90%, 12.5% and 10% using 95-97% concentrated of sulphuric acid for 5 min. The soaking of seeds in 98% concentrated of sulphuric acid for 15 min improved germination rate of *Trifolium resupinatum* L. up to 90.1%. Asl et al. [59] also confirm that acid scarification is effective to improve germination of species with hard seed coat.

The hard-seeded *I. zollingeriana* used in this study has weak embryos surrounded by a thick seed coat with strong micropylar openings that hinder entering of water into the seed structure, prevent sprouting and germination. This thickening of micropylar opening cell tissue structure propose that it offers strong resistance against water uptake and emergence of radicles [60-61]. To solve this problem seed coat hydrolysis is likely alternative to permit emergence of radicles and plumules [60] that is not possible in this case. This suggests need to give seed coat scarification treatments to overcome this issue in agreement with Bewley [48].

The results of this study shows that radicle emergence is likely dependent upon the weakening of the seed coat cell walls (by mechanical and acid scarification) and GA<sub>3</sub> have combined effect of weakening the seed coat and helping to increase seed germination. Medeiros Filho et al. [62] also affirmed above mentioned observations with seed coat cracks that allowed improved imbibition of water and seed germination.

The results of the study approve that combined pre scarification of seeds followed by treatment with 0.11 mg/L GA<sub>3</sub> were effective to enhance seed germination compared to control treatments (sterile water treated seeds). The results of this study show a significant improvement over the results of the previous studies of Abdullah [9, 16], who noted 28-35% germination of *I. zollingeriana* seeds stored for two months. Whereas, Abdullah [16] noted that storage period of more than 4 weeks decreased seed viability or increased seed dormancy resulting in decreasing germination percentage up to 24%.

## 5. Conclusion

The investigation demonstrate a comparison of mechanical and acid scarification used singly or both treatments combined + GA<sub>3</sub> treatment. Combination of all methodologies were more favorable to induce seed germination and solved the problem of unfavorable physiological impact of the seed embryos and hard seed coating with the highest seed germination rates.

## Acknowledgements

The authors are grateful to Prof. Luki Abdullah, Bogor Agricultural University, for help in give of seeds.

## References

- [1] Skerman, P.J., **Tropical forage legumes**, Food and Agricultural Organization, Rome, (1982).
- [2] Hassen, A., Rethman, N.F.G., Van Niekerk, W.A., and Tjelele, T.J., Influence of season/year and species on chemical composition and *in vitro* digestibility of five Indigofera accessions, **Animal Feed Science Technology**, 136, 312-322, (2007).
- [3] Bakasso, S.A., Lamien-Meda, C.E., Lamien, M., Kiendrebeogo, J., Millogo, A.G., and Ouedraogo Nacoulma, O.G., Polyphenol contents and antioxidant

- activities of five *Indigofera* species (*Fabaceae*) from Burkina Faso, **Pakistan Journal of Biological Sciences**, 11, 1429-1435, (2008).
- [4] Wiriadinata, H., **Indigofera L. (Papilionaceae) di Indonesia** In Ginting, S.P., Prawiradipura, B.R., and Purwantari, N.D., *Indigofera sebagai Pakan Ternak*, IAARD Press, 9-24, Jakarta, (2012). [in Indonesian Language]
- [5] Abdullah, L., and Suharlina, Herbage yield and quality of two vegetative parts of indigofera at different times of first regrowth defoliation, **Media Peternakan**, 33, 1, 44-49, (2010).
- [6] Herdiawan, I., and Sutedi, E., Produktivitas tanaman pakan *Indigofera* sp. pada tingkat cekaman kekeringan dan interval pemangkasan berbeda, **Indonesian Journal of Animal and Veterinary Science**, 17, 2, 161-167, (2012).
- [7] Herdiawan, I., Abdullah, L., Sopandie, D., Karti, P.D.M.H., and Hidayati, N., Respon fisiologis tanaman pakan *Indigofera zollingeriana* pada berbagai tingkat cekaman kekeringan dan interval pemangkasan, **Indonesian Journal of Animal and Veterinary Science**, 18, 1, 54-62, (2013).
- [8] Akbarillah, T., Kususiayah., Kaharuddin, D., and Hidayat, Tepung daun *Indigofera* sebagai suplemantasi pakan terhadap produksi dan warna yolk puyuh (*Coturnix coturnix japonica*), **Jurnal Sain Peternakan Indonesia**, 3, 1, 20-23, (2008).
- [9] Abdullah, L., **Prospektif agronomi dan ekofisiologi Indigofera sebagai tanaman pakan berkualitas tinggi** In Ginting, S.P., Prawiradipura, B.R., and Purwantari, N.D., *Indigofera sebagai Pakan Ternak*, IAARD Press, 47-58., Jakarta, (2012). [in Indonesian Language]
- [10] Girsang, R.C., Viability of *Indigofera (Indigofera zollingeriana)* seed after carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) injection and storing, (2017). <http://repository.ipb.ac.id/jspui/bitstream/123456789/54853/8/D12rcg.pdf>, (26.06.2018).
- [11] Abdullah, L., Girsang, R.C., Putra, N.P., Wiryawan, K.G., and Permana, I.G., **Viabilitas, intensitas kontaminasi jamur, dan tinggi hipokotil sebagai respon terhadap modifikasi atmosfer dengan injeksi CO<sub>2</sub> selama penyimpanan benih Indigofera zollingeriana** In Abdullah, L., Astuti, D.A., and Suharlina, *Bunga Rampai Hasil Riset dan Pengembangan Indigofera zollingeriana*, IPB Press, 6-13, Bogor, (2016) [in Indonesian language]
- [12] Pradhan, B.K., and Badola, H.K., Seed germination response of populations of *Swertia chirayita* following periodical storage, **Seed Technology**, 30, 1, 63-69, (2008).
- [13] Murashige, T., and Skoog, F., A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures, **Physiologia Plantarum**, 15, 3, 473-497, (1962).
- [14] Snedecor, G.W., and Cochran, W.G., **Statistical methods**. 6<sup>th</sup> ed. Oxford and IBH Publishing, New Delhi, (1976).
- [15] Abdullah, L., Prospektif agronomi dan ekofisiologi *Indigofera zollingeriana* sebagai tanaman penghasil hijauan pakan berkualitas tinggi, **Pastura**, 3, 2, 79-83, (2014).
- [16] Van Hezewijk, M.J., Van Beem, A.P., Verkleij, J.A.C., and Pieterse, A.H., Germination of *Orobanche crenata* seeds, as influenced by conditioning temperature and period. **Canadian Journal of Botany**, 71, 6, 786-792, (1993).
- [17] Müller, E., Cooper, E.J., and Alsos, I.G., Germinability of arctic plants is high in perceived optimal conditions but low in the field, **Botany**, 89, 5, 337-348, (2011).

- [18] Roberts, E.H., Predicting the storage life of seeds, **Seed Science and Technology**, 1, 499-514, (1973).
- [19] Vertucci, C.W., and Roos, E.E., Theoretical basis of protocols for seed storage. **Plant Physiology**, 9, 3, 1019-1023, (1990).
- [20] Vertucci, C.W., and Roos, E.E., Seed moisture content, storage, viability and vigour. **Seed Science Research**, 1, 277-279, (1991).
- [21] Ellis, R.H., Hong, T.D., and Roberts, E.H., Seed moisture content, storage, viability and vigour, **Seed Science Research**, 1, 275-277, (1991).
- [22] Ellis, R.H., Hong, T.D., and Roberts, E.H., The low-moisture-content limit to the negative logarithmic relation between seed longevity and moisture content in three subspecies of rice, **Annals of Botany**, 69, 1, 53-58, (1992).
- [23] Butola, J.S., and Badola, H.K., Effect of pre-sowing treatment on seed germination and seedling vigour in *Angelica glauca*, a threatened medicinal herb, **Current Science**, 87, 6, 796-799, (2004a).
- [24] Butola, J.S., and Badola, H.K., Seed germination improvement using chemicals in *Heracleum candicans* wall, a threatened medicinal herb of Himalaya, **Indian Forester**, 130, 5, 565-572, (2004b).
- [25] Yang, Q.H., Ye, W.H., Deng, X., Cao, H.L., Zhang, Y., Xu, K.Y., Seed germination eco-physiology of *Mikania micrantha* H.B.K, **Botanical Bulletin. Of Academia Sinica**, 46, 4, 293-299, (2005).
- [26] Onyekwelu, J.C., and Fayose, O.J., Effect of storage methods on the germination and proximate composition of *Treulia africana* seeds [Internet]. Tropentag: University of Kassel-Witzenhausen and University of Göttingen. 2007-[cited 2017 Dec 11].
- [27] Bewley, J.D., and Black, M., **Seeds physiology of development and germination**, 2nd ed, Plenum Publishing Corporation, Boston, (1994).
- [28] Baskin, J.M., Nan, X., and Baskin, C.C., A comparative study of seed dormancy and germination in an annual and a perennial species of Senna (Fabaceae), **Seed Science Research**, 8, 501-512, (1998).
- [29] Baskin, J.M., Baskin, C.C., and Li, X., Taxonomy, ecology, and evolution of physical dormancy in seeds, **Plant Species Biology**, 15, 139-152, (2000).
- [30] Baskin, J.M., and Baskin, C.C., **Classification, biogeography, and phylogenetic relationships of seed dormancy** In Pritchard, H., *Seed Conservation: Turning Science into Practice*, The Royal Botanic Gardens Press, Kew, (2004).
- [31] Ren, C., and Kermode, A.R., Analyses to determine the role of the megagametophyte and other seed tissues in dormancy maintenance of yellow cedar (*Chamaecyparis nootkatensis*) seeds: morphological, cellular and physiological changes following moist chilling and during germination, **Journal of Experimental Botany**, 50, 1403-1419, (1999).
- [32] Ren, C., and Kermode, A.R., An increase in pectin methyl esterase activity accompanies dormancy breakage and germination of yellow cedar seeds, **Plant Physiology**, 124, 231-242, (2000).
- [33] Schmitz, N., Abrams, S.R., and Kermode, A.R., Changes in abscisic acid content and embryo sensitivity to (+)-abscisic acid during dormancy termination of yellow-cedar seeds, **Journal of Experimental Botany**, 51, 1159-1162, (2000).
- [34] Schmitz, N., Abrams, S.R., Kermode, A.R., Changes in ABA turnover and sensitivity that accompany dormancy termination of yellow-cedar

- (*Chamaecyparis nootkatensis*) seeds, **Journal of Experimental Botany**, 53, 89-101, (2002).
- [35] Terskikh, V.V., Feurtado, J.A., Ren, C., Abrams, S.R., Kermode, A.R., Water uptake and oil distribution during imbibition of seeds of Western white pine (*Pinus monticola* Dougl. Ex D. Don) monitored *in vivo* using magnetic resonance imaging, **Planta**, 221, 17-27, (2005).
- [36] Roberts, E.H., **Seed ageing-the genome and its expression** In Nooden, D., and Leopold, A.C., *Senescence and Ageing in Plants*, Academic Press, 465-598, New York, (1988).
- [37] Adkins, S.W., Loewen, M., Symons, S.J., Variation within pure lines of wild oats (*Avena fatua*) in relation to degree of primary dormancy, **Weed Sciences**, 34, 6, 859-864, (1986).
- [38] FAO, **Seed toolkit: Seed quality assurance**, 111, The Food and Agriculture Organization of the United Nations and AfrikaSeeds, Rome, (2018).
- [39] Stefanie Kramer, Relationship between tetrazolium and germination test, (2010). [https://www.seedtest.org/upload/cms/user/Relationshipbetweentetrazoliumandgerminationtests\\_StefanieKramer.pdf](https://www.seedtest.org/upload/cms/user/Relationshipbetweentetrazoliumandgerminationtests_StefanieKramer.pdf), (12.01.2019).
- [40] Coimbra, M.C., Castro, A.H.F., Different methods for surface sterilization of *Pyrostegia venusta* (Ker Gawl.) Miers (Bignoniaceae) leaf explants, **Plant Cell Culture and Micropropagation**, 12, 2, 34-38, (2016).
- [41] Khawar, K.M., and Ozcan, S., High frequency shoot regeneration from cotyledonary node explants of different lentil (*Lens culinaris* Medik) genotypes and *in vitro* micrografting, **Biotechnology and Biotechnological Equipment**, 16, 1, 12-17, (2002).
- [42] Nwachukwu, C.U., and Edeoga, H.O., Tannins, starch grains and crystals in some species of *Indigofera* (Leguminosae-Papilionoideae), **International Journal of Botany**, 2, 159-162, (2006).
- [43] Patel, R.G., and Mankad, A.U., Effect of gibberellins on seed germination of *Tithonia rotundifolia* Blake, **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 3, 3, 10680-10684, (2014).
- [44] Desai, A., Panchal, B., Trivedi, A., and Prajapati, D., Studies on seed germination and seedling growth of papaya (*Carica papaya* L.) CV. madhubindu as influenced by media, GA<sub>3</sub> and cow urine under net house condition, **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, 6, 4, 1448-1451, (2017).
- [45] Kermode, A.R., Regulatory mechanisms involved in the transition from seed development to germination, **Critical Reviews in Plant Sciences**, 9, 155-195, (1990).
- [46] Kermode, A.R., **Regulatory mechanisms in the transition from seed development to germination: interactions between the embryo and the seed environment** In Kigel, J., and Galili, G., *Seed development and germination*, Marcel Dekker Inc, 273-332, New York, (1995).
- [47] Meinke, D.W., Molecular genetics of plant embryogenesis, **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, 46, 369-394, (1995).
- [48] Bewley, J.D., Seed germination and dormancy, **Plant Cell**, 9, 1055-1066, (1997).
- [49] Taylor, I.B., Sonneveld, T., Bugg, T.D.H., and Thompson, A.J., Regulation and manipulation of the biosynthesis of abscisic acid, including the supply of xanthophyll precursors, **Journal of Plant Growth Regulation**, 24, 253-273, (2005).



- [50] Xu, N., and Bewley, J.D., Sensitivity to abscisic acid and osmoticum changes during embryogenesis of alfalfa (*Medicago sativa*), **Journal of Experimental Botany**, 42, 821-826, (1991).
- [51] Jiang, L., Abrams, S., Kermode, A.R., Vicilin and napin storageprotein gene promoters are responsive to abscisic acid in developing transgenic tobacco seed but lose sensitivity following premature desiccation, **Plant Physiology**, 110, 1135-1144, (1996).
- [52] Hutchison, J.M., and Ashton, F.M., Effect of desiccation and scarification on the permeability and structure of the seed coat of *Cuscuta campestris*, **American Journal of Botany**, 66, 40-46, (1979).
- [53] Hassen, A., Pieterse, P.A., Rethman, N.F.G., Effect of pre-planting seed treatment on dormancy breaking and germination of *Indigofera* accessions, **Tropical Grasslands**, 38, 154-157, (2004).
- [54] Hassen, A., Rethman, N.F.G., Van Niekerk, W.A., Effect of different seed treatment options on dormancy breaking germination and emergence of *Ziziphus mucronata* (Buffalo thorn) seed, **Tropical Grassland**, 39, 124-128, (2005).
- [55] Hari, N., Warriar, K.C.S., and Gopalakrishnan, P.K., Pre-sowing treatments to promote seed germination in *Indigofera tinctoria* Linn, (2002). [https://www.researchgate.net/publication/281405050\\_Pre-sowing\\_Treatments\\_to\\_Promote\\_Seed\\_Germination\\_in\\_Indigofera\\_tinctoria\\_Linn](https://www.researchgate.net/publication/281405050_Pre-sowing_Treatments_to_Promote_Seed_Germination_in_Indigofera_tinctoria_Linn), (27.06.2018).
- [56] Balouchi, H.R., and Sanavy, S.A.M.M., Effect of gibberellic acid, pre-chilling, sulfuric acid and potassium nitrate on seed germination and dormancy of annual medics, **Pakistan Journal of Biological Sciences**, 9, 2875-2880, (2006).
- [57] Dilaver, Z., Mirzapour, M., and Kendir, H., Breaking seed dormancy and micropropagation of perennial Vulneraria Milkvetch (*Astragalus zulnerariae* Dc.). **ACTA Scientiarum Polonorum Horticulture**, 16, 4, 79-88, (2017).
- [58] Ersin, C., Nafiz, C., Rustu, H., and Suleyman, A., Breaking seed dormancy of some annual Medicago and Trifolium species by different treatments, **Turkish Journal of Field Crops**, 14, 2, 72-78, (2009).
- [59] Asl, M.B., Sharivivash, R., and Rahbari, A., Effect of different treatments on seed germination of Honey Locust (*Gleditschia triacanthos*), **Modern Applied Science**, 5, 1, 200-204, (2011).
- [60] Williams, H.A., Bewley, J.D., Greenwood, J.S., Bourgault, R., and Mo, B., The cell walls of the endosperm of *Asparagus officinalis* seeds during development and following germination, **Seed Science Research**, 11, 305-315, (2001).
- [61] Silva, E.A.A., Toorop, P.E., Van Aelst, A.C., and Hilhorst, H.W.M., Abscisic acid controls embryo growth potential and endosperm cap weakening during coffee (*Coffea arabica* cv. Rubi) seed germination, **Planta**, 220, 251-261, (2005).
- [62] Medeiros Filho, S., Franca, E.A., and Innecco, R., Germinacao de sementes de *Operculina macrocarpa* (L.) Farwel de *Operculina alata* (Ham) Urban, **Revista Brasileira Sementes**, 24, 2, 102-107, (2002).

# Dolu rezervuar durumdaki barajların sismik davranış tahminlerine seçilen nümerik model tipinin etkisi

Alper ALDEMİR\*

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş Tarihi (Received Date): 27.03.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.05.2019

## Özet

Barajlar, yılın kurak dönemlerinde toplumların su ihtiyacını karşılamada önemli bir rol oynamakta ve aynı zamanda teknolojik gelişmelerle günümüzde oldukça artan enerji ihtiyacını gidermeye de katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle artan nüfus ve teknoloji seviyesiyle, yeni barajların inşası da devam etmektedir. Tasarım aşamasında barajların etkileşimde bulunduğu zemin ve rezervuarın etkileri de dikkate alınmaktadır. Bu etkiler nümerik modellere yansıtılırken literatürde farklı teknikler (Westergaard ek kütlesi, Euler akışkan elemanları ve Lagrange akışkan elemanları, vb.) mevcut bulunmaktadır. Bu yaklaşımların barajların sismik tasarımlarına etkileri detaylı bir şekilde incelenmelidir. Bu nedenle, bu çalışmada, barajların tasarımı aşamasında sıklıkla kullanılan farklı modelleme metodlarının barajların modal özelliklerine nasıl etki ettiği irdelenmiştir. Bu amaçla, aynı kesit alanına sahip, farklı kesit geometrilibarajların rezervuarla etkileşimi Euler akışkan elemanı, Lagrange akışkan elemanı ve Westergaard ek kütle yaklaşımları kullanılarak dikkate alınmıştır. Elde edilen baraj modellerinin sismik davranışları elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Böylece tasarım aşamasında kullanılan rezervuar baraj gövdesini dikkate almak için kullanılan modelleme metodlarının sismik özellikleri ne ölçüde tahmin edebildikleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerden elde edilen bulgular sonucunda, Lagrange akışkan elemanı ve Westergaard ek kütle yaklaşımları Euler akışkan elemanlı modellere göre %20'yi bulan hata paylarıyla modal özellikleri tahmin edebildiği tespit edilmiştir. Bu hata oranları, yüksek mod etkilerinde oldukça büyük bir artış göstererek ilk mod için gözlemlenen değer yaklaşık 3 katına çıkmaktadır. Analizlerde kullanılan altı farklı kesit geometrisi sonuçlarına istinaden kesit tipinin sonuçlarda büyük bir farklılık yaratmadığı anlaşılmaktadır. Fakat baraj yüksekliğiyle (ya da artan yüksek mod etkisiyle) doğru orantılı bir şekilde hata paylarında bir miktar artış gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Ağırılık barajlar, sismik özellikler, rezervuar, modelleme tekniği.

\* Alper ALDEMİR, alperaldemir@hacettepe.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-2425-9685>

## Effect of the selected numerical model on the prediction of seismic behaviour of dams with full reservoir conditions

### Abstract

*The dams play an important role in meeting the water needs of societies during the dry periods of the year and at the same time they contribute to supply energy to meet the increasing energy demands due to the advancements in technology. Therefore, the construction of new dams still continues due to the increasing population and the level of technology. In the design phase of gravity dams, the interaction of the dam with the reservoir and the foundation rock should be taken into account. Different techniques (Westergaard's additional mass, Euler fluid elements and Lagrange fluid elements, etc.) are available in the literature to consider these effects in numerical models. However, the effects of these approaches on the seismic behaviour of dams should be examined in detail. Therefore, in this study, the effect of different reservoir modeling techniques on the seismic properties of concrete gravity dams was investigated. For this purpose, different concrete gravity dam sections were modeled by utilizing different reservoir modeling techniques. Seismic properties of the obtained dam models were determined and compared with each other. As a result, it was determined that different reservoir models predict modal characteristics with error rates of up to 20% compared to Euler fluid element models. These error rates increase nearly three times in high mode effects. In addition, it was observed that the error rates were not dependent on the selected section type. Finally, it has been observed that the predicted accuracy of higher modes is decreasing with the increasing dam height.*

**Keywords:** Gravity dams, seismic properties, reservoir, modeling technique.

### 1. Giriş

Günümüzde artan su (içme suyu veya sulama) ve enerji taleplerini karşılayabilmek için kaynakların daha verimli ve çok yönlü kullanılması ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyaç son yıllarda teknolojik gelişmelerde gözlemlenen ivme artışıyla doğru orantılı olarak enerji santrallerindeki artışı da beraberinde getirmektedir. İnsanoğlunun, zorunluğu ihtiyacı olarak sadece gıda malzemeleri bulunurken, 21. yüzyılla; enerji ihtiyacı, karşılanması gereken en önemli sorunlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu soruna teknolojik gelişmelerle artan ortalama yaşam süresi de eklenince, gıda sorununa da çözüm bulunması gerekmektedir. Bu iki ihtiyacın gerekli duyduğu hammadde olan su ise hidroelektrik santraller vasıtasıyla insanoğlunun hizmetine sunulabilmektedir. Bu bağlamda son yıllarda elektrik üretimi de yapabilecek niteliğe sahip hidroelektrik santrallerin inşaları oldukça artmıştır.

Türkiye’de su yapılarının devlet eliyle inşa edilme zorunluğunun 2005 yılında ortadan kalkarak özel sektöre açılması ile bu sistemlerin yapım ve işletmesine yoğun bir ilgi oluşmuştur. Bu bağlamda yatırım önceliklerinin değiştiği ve tasarım ve inşa sürelerinin asgariye indirildiği göze çarpmaktadır. Bilindiği üzere Türkiye’nin hemen hemen her bölgesinde sismik tehlike mevcuttur. Ayrıca, Carter [1] tarafından belirtildiği üzere barajların su toplaması için gerek duydukları vadiler genellikle sismik fayların yakınlarında oluşmaktadır. Bu gözlem, Jackson [2] tarafından Çin’de inşa edilen

barajların konumları üzerine yapılan araştırmada da doğrulanmıştır. Jackson [2] Çin’de inşa edilen barajların %98,6’sının orta ve yüksek sismik tehlikeye sahip alanlarda inşa edildiğini belirtmiştir. Tasarımları aşamasında deprem yüklerinin etkisinin önemli olduğu barajların, özel sektör yatırımlarıyla hızlı bir şekilde inşa edilme isteği, tasarım mühendisleri tarafından bazı basitleştirilmiş metotların kullanılmasına da yol açmaktadır. Bu kullanılan metotların daha karmaşık modelleme teknikleriyle doğrulanmaksızın kullanılması hidroelektrik santrallerin deprem sonrası hasarlara ve belki de afet seviyesinde yıkımlara yol açabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle gelişmiş ülkelerde barajların deprem etkileri altındaki davranışları 1950’li yıllarda incelenmeye başlanmıştır. Bu çalışmaların sonucunda, Amerika’da Federal Enerji Düzenleme Komisyonu (FERC) ve Amerika Birleşik Devletleri Ordusu İstikam Birliği (USACE) önderliğinde 1990’ların sonu itibarı ile depreme dayanıklı baraj gövde tasarımı için dokümanlar, metotlar ve yazılımlar geliştirilmiştir [3-5]. Ayrıca, sanılanın aksine bu devasa yapılar yer ivmesinin büyüklüğüne bağlı olarak hasar almaktadır [6]. Nuss vd. [6] dünya çapında inceledikleri barajların deprem sonrası durumlarından yola çıkarak oluşturdukları hasar tablosunda, 0,3g’den büyük azami yer ivmesine (PGA) sahip depremler tarafından sarsılan baraj gövdelerinin, hasar aldığını not etmişlerdir (Tablo 1). Bu sebeple hasarlı durumda, ciddi sorunlara ve hatta felaketlere yol açabilecek derecede mühim bu yapıların tasarımları esnasında azami özen gösterilmelidir.

Tablo 1. Tespit edilen beton barajların hasarları [6].

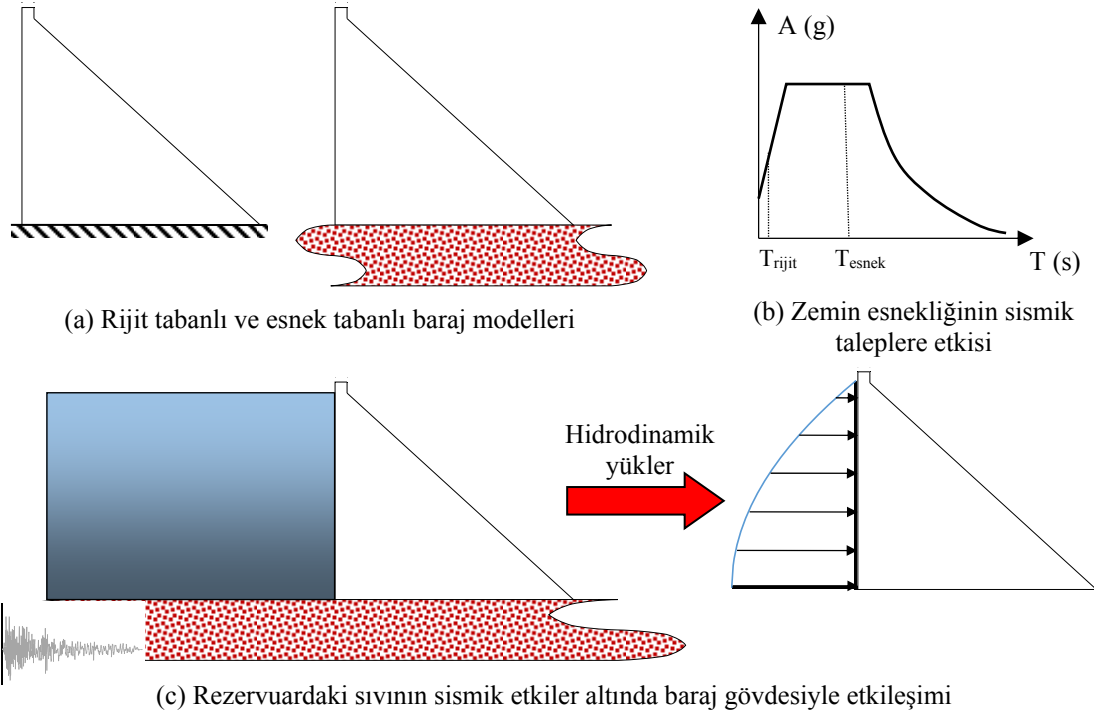
Baraj Adı	Yükseklik (m)	M <sub>w</sub>	PGA (g)	Hasar Durumu
Koyna	103	6,5	0,63	Barajın gövdesinin memba ve mansap yüzünde çatlaklar gözlemlenmiştir.
Shih Kang	21,4	7,6	0,51	Baraj gövdesinde düşey yönde yaklaşık 9m deplasman gözlemlenmiştir. Ayrıca gövde betonunda ezilme tespit edilmiştir.
Kasho	46,4	7,3	0,54	Baraj Kretindeki binada çatlaklar gözlemlenmiştir.
Uh	14	7,3	1,16	Gövdedeki Dolusavak tabanında çatlaklar tespit edilmiştir.
Takou	77	9	0,38	Baraj Kretinde bulunan odada çatlaklar gözlemlenmiştir.
Rapel	111	7,8	0,31	Gövdedeki Dolusavak ve su alma yapısında hasar gözlemlenmiştir.
Techi	185	7,6	0,5	Baraj Kret kurbunda lokalize olmuş çatlaklar gözlemlenmiştir.
Hsinfengkiang	105	6,1	0,54	Baraj Gövdesinin üst kısımlarında yatay çatlaklar gözlemlenmiştir.
Sefid Rud	106	7,7	0,71	Barajın Gövdesinin üst kısımlarında yatay çatlaklar ve bloklar arası hafif oynamalar tespit edilmiştir.

Barajların sismik davranışlarının tahmin edilmesi aşamasında baraj gövdesinin rezervuardaki sıvı ve zemindeki kayayla olan etkileşiminin dikkate alınması zorunluluğu bulunmaktadır [7]. Bunun temel sebebi, zeminin rijit olmadığının dikkate alınmasıyla baraj gövdesinin periyodunda bir uzama gözlemlenmektedir. Bu gözlem oldukça rijit bir yapıya sahip barajlarda diğer yapıların aksine, sismik taleplerin olumsuz yönde değişim göstermesine neden olmaktadır (Şekil 1.a-b). Ayrıca, rezervuarda bulunan sıvının da hidrodinamik etkiler altında sahip olduğu eylemsizlik

kuvvetinin, baraj gövdesinden farklı olmasından ötürü, rezervuardaki sıvı baraj gövdesine ek talepler getirmektedir (Şekil 1.c). Barajın rezervuar ve zeminle etkileşiminden kaynaklı baraj gövdesinde oluşacak ekstra taleplerin dikkate alınması büyük öneme sahiptir [7]. Ayrıca, son yıllarda yürütülen çalışmalarda baraj tasarımında iki boyutlu ve üç boyutlu modellerin arasında oluşan talep farklılıkları da incelenmektedir. Bu konuyla ilgili yürütülen çalışmalar, dar vadili barajlarda üç boyutlu modellerin kullanılmasının elzem olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [8, 9]. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar, barajın çevresindeki rezervuar ve zeminle etkileşiminden kaynaklı sismik özelliklerinin de etkilendiğini ortaya koymaktadır [7]. Bu etkileşimin dikkate alınabilmesi için baraj gövdesinin hâkim periyodunun öncelikle belirlenmesi gerekmektedir [10]. Sismik özelliklerin tahmininde kullanılan modal analiz sonuçlarının irdelendiği diğer çalışmalar da bu etkileşimin oldukça büyük oranlara sahip olduğunu işaret etmektedir [11, 12].

Rezervuardaki sıvının numerik modellere yansıtılabilmesi için literatürde farklı metotlar kullanılmaktadır [13, 14]. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan metotlar karmaşık olandan basite doğru sıralanırsa Euler akışkan elemanları [15], Lagrange akışkan elemanları [16] ve Westergaard [17] ek kütesidir. Bu numerik modelleme tekniklerinin her birinin kendi varsayımları ve basitleştirmeleri bulunmaktadır. Örneğin, Euler akışkan elemanları, sahip olduğu düğüm noktalarındaki basınç serbestlik derecesini elde edebilmek için Navier – Stokes denklemini çözmektedir [18]. Böylece akışkanın kendi ağırlığından ve/veya çevresel ivmelerden oluşan basınç değişimleri (hidrodinamik veya hidrostatik) direk olarak elde edilebilmektedir. Bu yaklaşım gerçeğe en yakın yaklaşım olarak görülmektedir. Lagrange akışkan elemanları ise yapısal elemanlardan türetilmiştir [18]. Bu akışkan elemanların, yapısal elemanlardan tek farkı, kesme rijitliğine sahip olmamalarıdır. Bunun dışında tüm özellikleri yapısal elemanlarla aynıdır. Bu sebeple Lagrange akışkan elemanları sahip olduğu düğüm noktalarındaki deplasman serbestlik derecesine sahiptirler. Westergaard [17] ek kütesi ise hidrodinamik etkilerden oluşacak hidrodinamik etkileri ve hakim periyot değişimini baraj gövdesine eklediği ek kütlelerle yansıtmaktadır. Bu metotta rezervuarın sonsuz uzunluğa sahip olduğu, rezervuardaki suyun sıkıştırılmaz olduğu ve memba yüzünün dik olduğu varsayılmaktadır [17].

Bu çalışmada, tasarım aşamasında mühendisler tarafından sıklıkla kullanılan ve tasarım şartnamelerinde kullanılmalarına izin verilen modelleme tekniklerinin baraj gövdelerinin sismik özelliklerini tahmin etme kabiliyetleri irdelenmektedir. Bu amaçla, Euler akışkan elemanlarına sahip modeller gerçeğe en yakın sonuçları ürettiği varsayımı yapılmıştır. Diğer iki modelleme tekniğinin Euler akışkan elemanları kullanılarak elde edilen sonuçlara ne kadar yakınsadığı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında tasarım aşamasında kullanılan altı farklı geometrik şekle sahip kesit kullanılmıştır. Bu kesitlerin ortak özelliği eşit alana sahip olmalarıdır. Böylece, kesitlerin sismik özelliklere etkisi de irdelenmiş olacaktır. Ayrıca, baraj yüksekliğinin sonuçlara etkisinin araştırılması açısından analizler farklı yüksekliklere sahip modeller için tekrarlanmıştır. Bu amaçla üç farklı yükseklik sınıfı (kısa, orta ve yüksek) kullanılmıştır. Bu üç sınıfı temsil etmesi açısından modellerde 50 m , 100 m ve 150 m yükseklik kullanılmıştır. Çalışmada her bir kesit üç farklı modelleme tekniğiyle tekrar modellenmiştir. Modellerden elde edilen ilk üç hâkim modun periyotlarıdır. Böylece çalışma kapsamında elde edilen veri tabanı  $3 \times 54 = 112$  adet veri içermektedir. Bu çalışmada kullanılan numerik modellerde zemin – baraj etkileşimi de dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında tüm analizler iki boyutlu modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. (a-b) Baraj gövdesinin zemin kayası ve (c) rezervuardaki sıvıyla dinamik etkileşiminin sonuçları.

## 2. Rezervuar modelleme teknikleri

Literatürde baraj-zemin-rezervuar modellerinin oluşturulurken kullanılan belli başlı metotlar en basitleştirilmişten en karmaşığa doğru, Westergaard ek kütlesi [17], Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar [16] ve Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar [15] olarak sıralanabilir. Bu modelleme yöntemlerinin teorilerinden biraz bahsetmek gerekirse;

Westergaard [17] bir çalışmada hidrodinamik etkileri baraj gövdesine tanımlanacak ek kütleler halinde modellenebileceğini öne sürmüştür. Bu maksatla, hazırladığı formülasyonu geliştirirken üç adet varsayımda bulunmuştur. Bunlar,

- Baraj rezervuarının sonsuza aynı geometriyi koruyarak uzadığı,
- Baraj rezervuarındaki suyun sıkıştırılmaz olduğu,
- Baraj memba yüzeyinin dik olduğu,
- Yüzey dalgaları ihmal edildiğidir.

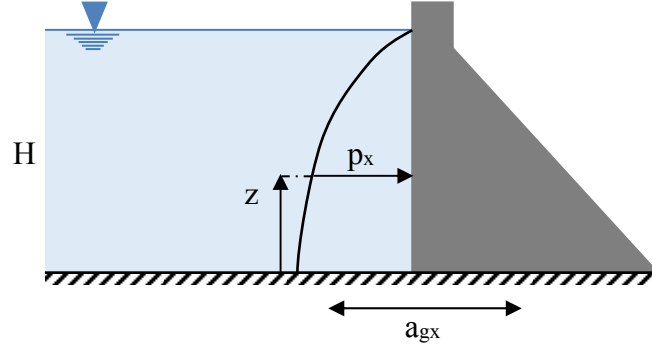
Bu varsayımlar ışığı altında barajın maruz kalacağı hidrodinamik etkileri Denk. 1'le ifade etmiştir.

$$p_x = \frac{7}{8} a_x w \sqrt{H(H-z)} = a_x m_{add} \quad (1)$$

Denk. 1'de  $p_x$  hidrodinamik basıncı,  $w$  sıvının öz ağırlığını,  $H$  rezervuardaki suyun yüksekliğini,  $a_x$  yatay ivmeyi ve  $z$  düşey koordinatı belirtmektedir (Şekil 2). Böylece  $m_{add}$  olarak barajın memba yüzeyinde tanımlanan ek kütleler sadece hareket

denkleminin sadece kütle matrisine ( $\mathbf{m}$ ) ek olarak işlenmekte baraj-zemin-rezervuar sisteminin sönümlenme ( $\mathbf{c}$ ) ve rijitlik matrislerine ( $\mathbf{k}$ ) bir etkisi olmamaktadır (Denk. 2). Bu nedenle, baraj-zemin-rezervuar sisteminin modal analizinde de sadece kütle matrisindeki ( $\mathbf{m}$ ) artış kaynaklı periyot artışına sebep olmaktadır (Denk. 14).

$$\mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}_s \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_s \mathbf{u} = -\mathbf{1} \mathbf{m}_s \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (2)$$



Şekil 2. Westergaard Ek kütlesi.

Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar rezervuardaki sıvının modellenmesi için kullanılan ikinci metot olarak gösterilmektedir. Bu akışkan elemanlar yapısal elemanlarla benzer bir şekilde düğüm noktalarında bağımsız değişken olarak düğüm noktasının yer değiştirmesini ( $u$ ,  $v$  ve  $w$  deplasmanları) kullanmaktadır. Bu akışkan elemanların formülasyonunda maddenin basınç altındaki şekil değiştirmeye gösterdiği dirençten yola çıkılmaktadır [16].

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

$$\sigma_m = K \varepsilon_v \quad (4)$$

Sıvının toplam strain enerjisi

$$\pi_e = \frac{1}{2} \int \varepsilon_v K \varepsilon_v dV \quad (5)$$

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan diskretizasyon kullanıldığında toplam strain enerji

$$\pi_e = \frac{1}{2} \mathbf{U}^T \mathbf{K}_f \mathbf{U} \quad (6)$$

Denk. 6'da  $\mathbf{U}$  deplasman vektörünü ( $u$  ve  $v$ ) ve  $\mathbf{K}_f$  rezervuardaki sıvının rijitlik matrisini temsil etmektedir (Denk. 7).

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{4}(u_1(1-s)(1-t) + u_2(1+s)(1-t) + u_3(1+s)(1+t) + u_4(1-s)(1+t)) \\ v &= \frac{1}{4}(v_1(1-s)(1-t) + v_2(1+s)(1-t) + v_3(1+s)(1+t) + v_4(1-s)(1+t)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$K_f = \int \left( \begin{bmatrix} x_{,s} & y_{,s} \\ x_{,t} & y_{,t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{1,s} & N_{2,s} & N_{3,s} & N_{4,s} \\ N_{1,t} & N_{2,t} & N_{3,t} & N_{4,t} \end{bmatrix} \right) K \left( \begin{bmatrix} x_{,s} & y_{,s} \\ x_{,t} & y_{,t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_{1,s} & N_{2,s} & N_{3,s} & N_{4,s} \\ N_{1,t} & N_{2,t} & N_{3,t} & N_{4,t} \end{bmatrix} \right) dV$$

$$= \int B^T K B dA$$

Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar için hareket denklemi

$$\mathbf{m}_f \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_f \mathbf{u} = \mathbf{R} \quad (8)$$

Yapı için hareket denklemi (Denk. 2) ve rezervuardaki sıvı için hareket denklemi (Denk. 8) memba yüzeyindeki etkileşim dikkate alınarak birleştirildiğinde

$$\mathbf{m}_c \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}_c \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}_c \mathbf{u} = -\mathbf{1} \mathbf{m}_c \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (9)$$

Denk. 9'da memba yüzeyindeki yapıya ait ve rezervuardaki sıvıya ait deplasmanların birbirine bağımlı olduğu durum (constraint) göz önüne alınmaktadır. Denk. 9 incelendiğinde sistemin simetrik olduğu ve deplasman dışında başka bir bağımsız değişkenin bulunmadığı görülmektedir.

Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar rezervuardaki sıvının modellenmesi için kullanılan üçüncü metot olarak gösterilmektedir. Bu akışkan elemanlar oluşturulurken aşağıdaki varsayımlar kullanılmaktadır.

- Değişen basınç değerleriyle özkütlenin değişebilmektedir (sıkışabilir sıvı).
- Sıvıda viskoz sönümlenme yoktur.
- Sıvının özkütlesinin tüm sıvı geometrisinde aynıdır.

Sıvının hareket denklemi hesaplanırken Navier-Stokes teoremi kullanılmaktadır. Eğer viskozite ihmal edilirse Navier – Stokes teoremi Denk. 10'daki hali almaktadır.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (10)$$

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho_o}}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \tilde{i} + \frac{\partial}{\partial y} \tilde{j} + \frac{\partial}{\partial z} \tilde{k}$$

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan diskretizasyon kullanıldığında

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = N^T \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Yapı için hareket denklemi (Denk. 2) ve rezervuardaki sıvı için hareket denklemi (Denk. 10) memba yüzeyindeki etkileşim dikkate alınarak birleştirildiğinde [19, 20]

$$\begin{aligned} m_s \{\ddot{\mathbf{u}}\} + c_s \{\dot{\mathbf{u}}\} + k_s \{\mathbf{u}\} &= F_s + [R] \{p\} \\ m_f \{\ddot{\mathbf{p}}\} + c_f \{\dot{\mathbf{p}}\} + k_f \{p\} &= F_f - \rho_w [R]^T \{\ddot{\mathbf{u}}\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ \rho_w [R]^T & m_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -R \\ 0 & k_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u} \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix}$$



### 3. Numerik model detayları

Bu çalışma kapsamındaki analizler, ANSYS [19] programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kesit geometrisinin sonuçlara etkisinin irdelenmesi açısından, altı farklı geometriye sahip kesit kullanılmıştır. Bu kesitler elde edilirken sabit bir alan değeri seçilmiş ve tüm kesitlerin alanları eşit olacak şekilde (en fazla %1 hata oranı olacak şekilde) memba ( $m_u$ ) ve mansap eğimleri ( $m_d$ ) belirlenmiştir. Böylece kullanılan her kesitte eşit miktarda malzeme kullanılmıştır. Tüm kesitlerde kret genişliği ( $t$ ) sabit tutulmuştur. Sonuçlara kesitin yüksekliğinin etkisini inceleyebilmek için baraj yüksekliği ( $H$ ) 50 m, 100 m ve 150 m olarak alınmıştır. Son olarak elde edilen memba ve mansap eğimleri ve seçilen baraj yüksekliği kullanılarak kesitin genişliği ( $B$ ) hesaplanmıştır. Tüm kesitlerin, geometrileri Tablo 2’de özetlenmektedir.

Tablo 2’de detayları verilen kesitler üç farklı rezervuar modelleme yöntemi kullanılarak numerik olarak modellenmiştir. Numerik modeller, zemin-rezervuar-baraj gövdesi etkileşimini dikkate almaktadır. Bu nedenle zemin kayası ve baraj kabuk elemanları marifetiyle (ANSYS’teki PLANE42 elemanı kullanılmıştır), farklı modellerde rezervuar sıvısı ise Lagrange formülasyonuna sahip elemanlar (ANSYS’teki FLUID79 elemanı kullanılmıştır) veya Euler formülasyonuna sahip elemanlar (ANSYS’teki FLUID29 elemanı kullanılmıştır) vasıtasıyla modellenmiştir [18]. Westergaard [17] ek kütlesi ise modellerde baraj gövdesinin memba yüzeyindeki düğüm noktalarına tanımlanan ek kütleler (ANSYS’teki MASS21 elemanı kullanılmıştır) marifetiyle dikkate alınmıştır. Numerik modellerde baraj gövdesinin çevresinin tamamını modellemek mümkün olmadığı için, zemin-rezervuar-baraj modeli oluşturulurken Sevim vd. [21]’in çalışmalarında tavsiye ettiği üzere, zemin baraj gövdesinin üç katı kadar genişlik ve yüksekliğe ve rezervuar da baraj gövdesinin üç katı kadar yüksekliğe sahip olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 3). Rezervuardaki sıvının Euler akışkan elemanlarıyla temsil edildiği numerik modellerde yapısal elemanlarla akışkan elemanların komşu düğüm noktalarında bir uyumsuzluk oluşmaktadır. Bunun temel sebebi Euler akışkan elemanların basınç serbestlik derecesine sahipken yapısal elemanların deplasman serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bu sorunu çözmek için çevresinde yapısal eleman bulunan Euler akışkan elemanlarda hem basınç hem de deplasman serbestlik dereceleri aktive edilirken diğer akışkan elemanlarda sadece basınç serbestlik derecesi aktive edilmiştir. Bu nedenle Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanların kullanıldığı modellerde simetrik olmayan rijitlik matrisine neden olmaktadır (Denk. 13). Bu nedenle Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar içeren numerik modellerin çözümünde simetrik olmayan matris çözümleri için kullanılan çözüm yöntemi aktive edilmiştir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan kesitler.

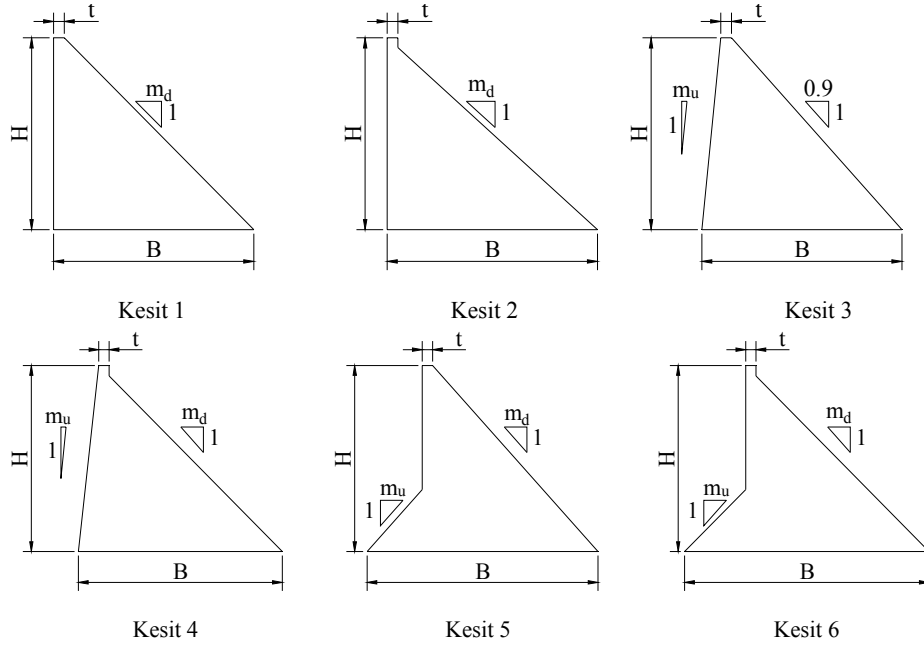
Baraj Kesiti	H (m)	B (m)	$m_u$	$m_d$	Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )
K1	50	31.75	0.000	0.475	<b>993.75</b>
K2	50	38.00	0.000	0.760	992.11
K3	50	31.75	0.048	0.428	993.75
K4	50	38.00	0.076	0.684	996.78
K5	50	36.53	0.428	0.428	994.44
K6	50	45.33	0.680	0.680	991.50

Tablo 2. (Devam).

K7	100	79.00	0.000	0.710	<b>4275.00</b>
K8	100	85.20	0.000	0.852	4284.79
K9	100	79.00	0.071	0.639	4275.00
K10	100	85.00	0.150	0.700	4280.18
K11	100	93.83	0.655	0.655	4288.89
K12	100	102.13	0.766	0.766	4283.13
K13	150	158.00	0.000	1.000	<b>12450.00</b>
K14	150	166.50	0.000	1.110	12516.33
K15	150	158.00	0.100	0.900	12450.00
K16	150	165.60	0.111	0.993	12452.23
K17	150	188.00	0.900	0.900	12450.00
K18	150	198.80	0.994	0.994	12457.19

$$\begin{aligned}
[M_s]\{\ddot{u}\} + [C_s]\{\dot{u}\} + [K_s]\{u\} &= \{F_s\} + [R]\{p\} \\
[M_f]\{\ddot{p}\} + [C_f]\{\dot{p}\} + [K_f]\{p\} &= \{F_f\} - \rho_w[R]^T\{\ddot{u}\} \\
\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho_w[R]^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & C_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -R \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{13}$$

Euler formülasyonuna sahip akışkan elemanlar kullanılan modellerde rezervuarın sınır durumu olarak rezervuarın uzunluğunun gerçek uzunluğundan daha az alınmasından kaynaklı sorunlar yaşanacaktır. Bir başka deyişle rezervuarın olduğundan kısa olarak modellenmesi rezervuar sonunda dalgaların sonsuza yayılması yerine baraj gövdesine yansımalarından kaynaklı ekstra talepler getirecektir. Bunun engellenmesi için rezervuarın bitiminde sınır koşullarını doğru yansıtmak ve dalga yansımalarını engellemek için dalga hızının emilmesi maksatlı iç sürtünme değeri maksimum değer alınarak dalga emici bir mesnet yaratılmıştır. Lagrange formülasyonuna sahip akışkan eleman kullanılan modellerde ise akışkan elemanların yapısal elemanlara penetre etmesi engellenmelidir. Ayrıca, akışkan elemanların yapısal elemanların yüzeyinde göreceli hareket yapmasına izin verilmelidir. Bu maksatla yapısal elemanların memba yüzeyindeki normal birim vektörü yönünde eşit, fakat tanjant birim vektörü yönünde ise bağımsız hareket etmelerine olanak sağlayan deplasman serbestlik derecesi kısıtlamaları (displacement constraint) tanımlanmıştır (Şekil 4). Westergaard [17] ek kütlesi içeren numerik modellerde ise, baraj gövdesinin memba yüzündeki düğüm noktalarına birer adet ek kütle tanımlanmıştır. Seçilen baraj kesitlerinde memba yüzünde eğim olanlar için Kuo [22] tarafından önerildiği gibi her bir düğüm noktasında iki farklı yön için ayrı ek kütle tanımlanmıştır.



\* H = 50, 100 ve 150m olarak alınmıştır.

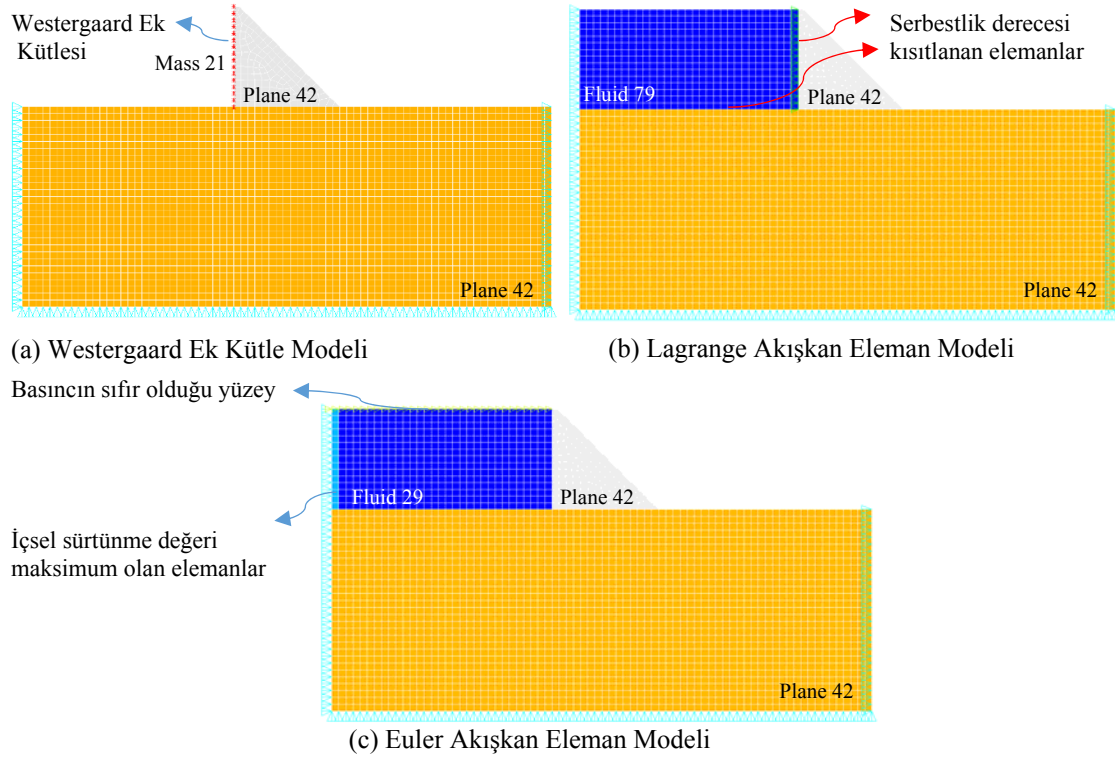
\*\* t = 8m

Şekil 3. Çalışmada kullanılan kesitlerin geometrileri.

Modellerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 3’de özetlenmektedir.

Tablo 3. Numerik modellerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

	Beton		Rezervuar Sıvısı		Zemin Kayası			
	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )	Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )	Sonic Dalga hızı (m/s)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Özkütle (kg/m <sup>3</sup> )
	23.750,0	0,2	2.400,0	1.000,0	1.460,0	10.800,0	0,2	10,0



Şekil 4. Çalışmada kullanılan farklı rezervuar modelleme yöntemleri.

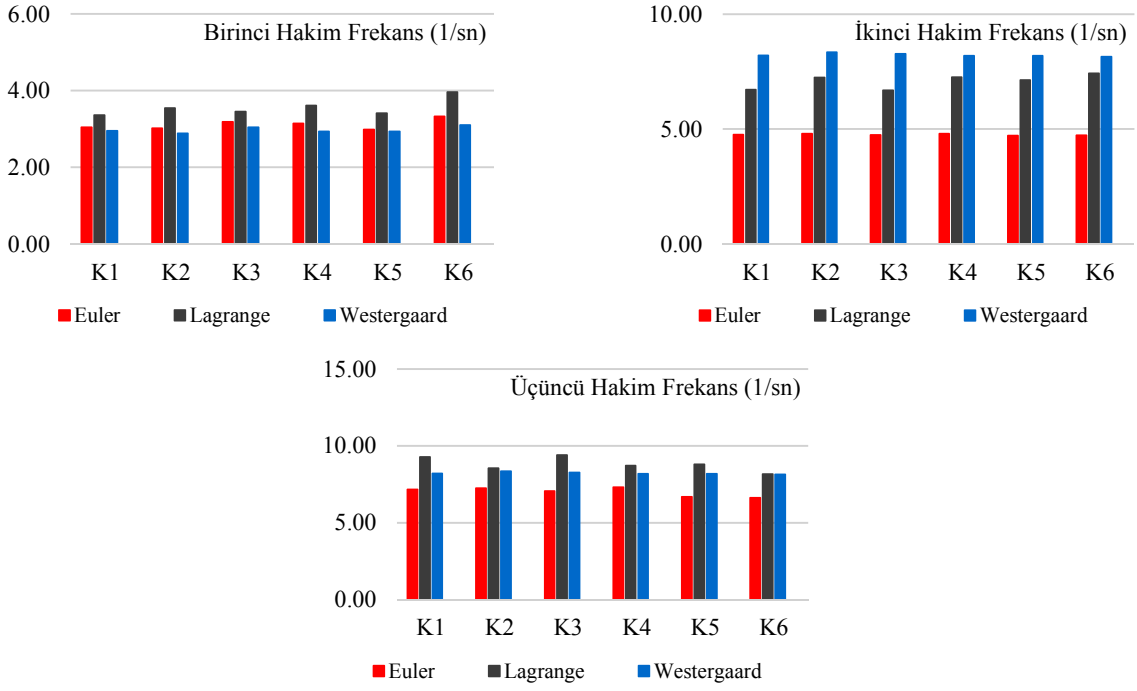
#### 4. Analiz sonuçları

Oluşturulan numerik modeller modal analize tabi tutulmuştur. İncelenen modellerin ilk üç moduna ait periyot değerleri öncelikle aynı baraj yüksekliğine sahip modeller için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma esnasında sıkışabilir sıvı etkilerini ve rezervuara yansıyan dalgaların engellendiği Euler formülasyona sahip modeller gerçeğe en yakın simülasyonlar olduğu için frekansların Euler akışkan elemanlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Baraj yüksekliği 50 m, 100 m ve 150 m olan durumlar için elde edilen sonuçlar Tablo 4-Tablo 6’te verilmektedir. Ayrıca analizlerden elde edilen frekanslara rezervuar modelleme tekniğinin etkisini daha iyi kavrayabilmek için analiz sonuçları Şekil 5-Şekil 7’de gösterilmektedir.

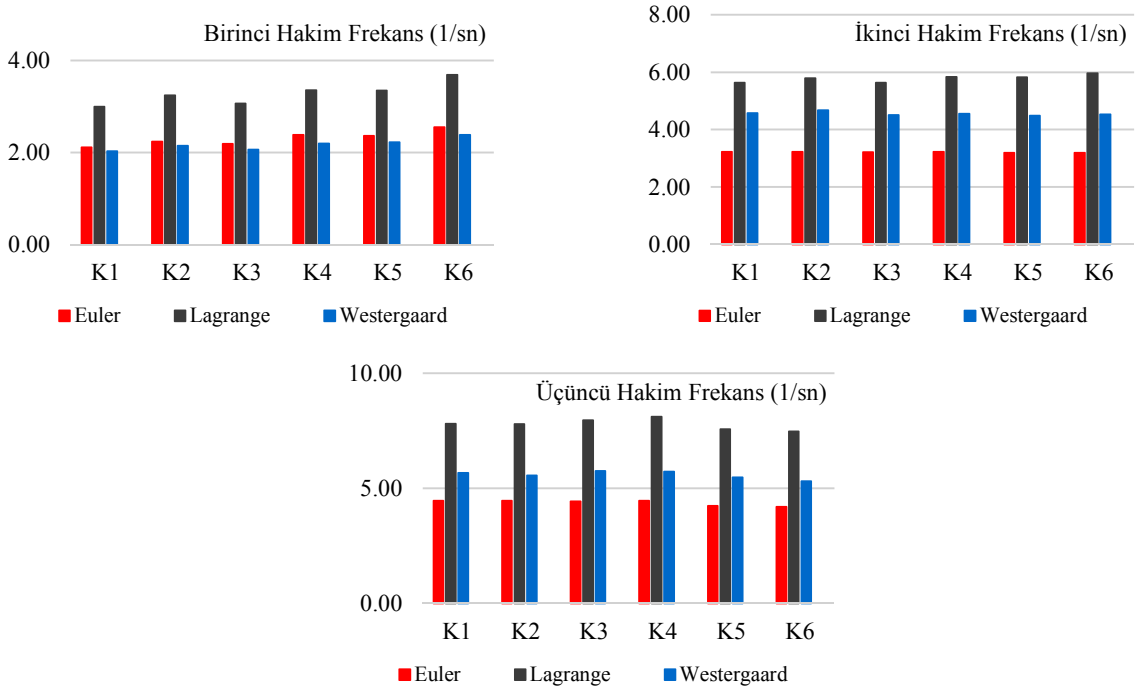
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler sonucunda, Westergaard ek kütleli numerik modellerden ve Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlı modellerden elde edilen birinci hâkim moda ait periyotlar, Euler akışkan elemanlı modellerden elde edilen sonuçlara kıyasla sırasıyla ortalama %4,5 ve %24,8’lik bir fark bulundurmaktadır. Ayrıca, ikinci hakim mod periyot tahminleri için belirtilen hata oranları ise sırasıyla ortalama %53,2 ve %59,8 olarak bulunmaktadır. Üçüncü hakim mod periyot tahminleri için ortalama hata oranları ise sırasıyla ortalama %29,6 ve %57,6 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 4. H=50m için frekans değerleri ve tespit edilen hata oranları.

Birinci Hakim Frekans (1/sn)				Birinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K1	3.05	3.36	2.95	-	-10.22	3.24
K2	3.02	3.55	2.89	-	-17.36	4.41
K3	3.18	3.45	3.04	-	-8.34	4.40
K4	3.14	3.61	2.94	-	-14.86	6.42
K5	2.98	3.41	2.94	-	-14.37	1.50
K6	3.32	3.96	3.10	-	-19.16	6.75
				Ortalama	-14.05	4.45
İkinci Hakim Frekans (1/sn)				İkinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K7	4.75	6.72	8.20	-41.33	-72.40	-41.33
K8	4.80	7.24	8.35	-50.92	-74.03	-50.92
K9	4.75	6.68	8.27	-40.84	-74.37	-40.84
K10	4.80	7.25	8.19	-51.13	-70.62	-51.13
K11	4.72	7.13	8.19	-51.14	-73.58	-51.14
K12	4.74	7.42	8.15	-56.76	-72.08	-56.76
				Ortalama	-48.69	-72.85
Üçüncü Hakim Frekans (1/sn)				Üçüncü Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K13	7.15	9.26	8.20	-	-29.50	-14.61
K14	7.24	8.54	8.35	-	-17.93	-15.34
K15	7.06	9.38	8.27	-	-32.82	-17.13
K16	7.30	8.71	8.19	-	-19.32	-12.11
K17	6.68	8.80	8.19	-	-31.70	-22.58
K18	6.62	8.17	8.15	-	-23.26	-22.99
				Ortalama	-25.76	-17.46



Şekil 5. H=50m için frekans değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6. H=100m için frekans değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 5. H=100m için frekans değerleri ve tespit edilen hata oranları.

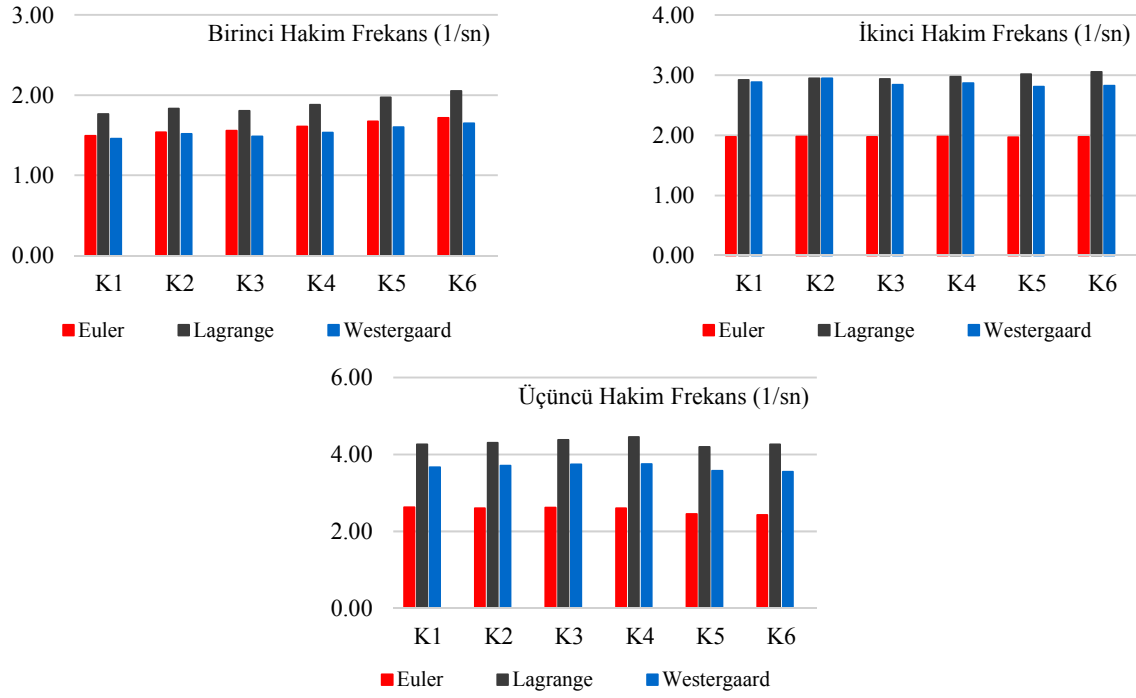
Birinci Hakim Frekans (1/sn)				Birinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K1	2.11	2.99	2.03	-	-41.64	4.06
K2	2.24	3.24	2.14	-	-44.89	4.20
K3	2.19	3.06	2.06	-	-39.93	5.73
K4	2.38	3.36	2.19	-	-41.13	7.83
K5	2.36	3.35	2.22	-	-41.56	6.03
K6	2.55	3.69	2.38	-	-44.79	6.38
				Ortalama	-42.33	5.70
İkinci Hakim Frekans (1/sn)				İkinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K7	3.22	5.63	4.57	-	-74.80	-41.94
K8	3.23	5.78	4.68	-	-79.12	-44.86
K9	3.22	5.63	4.50	-	-75.04	-39.95
K10	3.22	5.83	4.55	-	-80.75	-41.15
K11	3.19	5.82	4.48	-	-82.08	-40.29
K12	3.20	5.96	4.52	-	-86.31	-41.39
				Ortalama	-79.68	-41.60
Üçüncü Hakim Frekans (1/sn)				Üçüncü Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard
K13	4.45	7.81	5.67	-	-75.52	-27.30
K14	4.45	7.79	5.55	-	-74.80	-24.62
K15	4.43	7.96	5.75	-	-79.71	-29.74
K16	4.46	8.11	5.73	-	-81.84	-28.41
K17	4.23	7.57	5.47	-	-78.78	-29.13
K18	4.20	7.47	5.31	-	-78.00	-26.42
				Ortalama	-78.11	-27.60

Son olarak belirtilen hata oranlarının kesit tiplerine olan bağımlılığı tespit edilememiştir. Bir başka deyişle analiz sonuçlarının seçilen kesit tipine olan korelasyonu göz ardı edilecek kadar azdır.

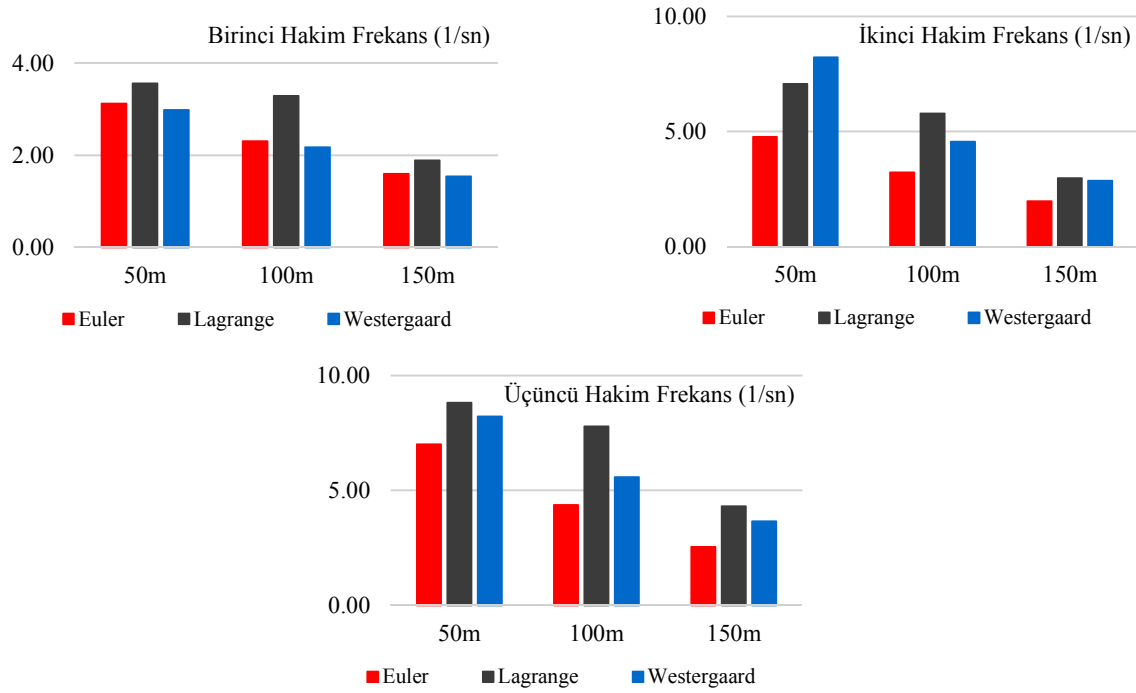
Tablo 6. H=150m için frekans değerleri ve tespit edilen hata oranları.

Birinci Hakim Frekans (1/sn)				Birinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K1	1.49	1.76	1.46	-	-18.06	2.37
K2	1.53	1.83	1.51	-	-19.46	1.32
K3	1.56	1.80	1.48	-	-15.89	4.71
K4	1.61	1.88	1.53	-	-16.90	4.81
K5	1.67	1.97	1.60	-	-17.88	4.28
K6	1.72	2.05	1.65	-	-19.44	3.97
				Ortalama	-17.94	3.58
İkinci Hakim Frekans (1/sn)				İkinci Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K7	1.97	2.92	2.88	-	-48.16	-46.15
K8	1.98	2.95	2.95	-	-49.26	-49.15
K9	1.97	2.93	2.84	-	-48.87	-44.06
K10	1.98	2.97	2.87	-	-50.49	-45.16
K11	1.96	3.01	2.81	-	-53.42	-42.98
K12	1.97	3.05	2.82	-	-54.93	-43.32
				Ortalama	-50.85	-45.14
Üçüncü Hakim Frekans (1/sn)				Üçüncü Hakim Frekans Hata Oranları (%)		
Baraj Kesiti	Euler	Lagrange	Westergaard	Euler	Lagrange	Westergaard
K13	2.62	4.26	3.66	-	-62.31	-39.67
K14	2.60	4.30	3.71	-	-65.46	-42.53
K15	2.61	4.38	3.74	-	-67.57	-43.15
K16	2.59	4.45	3.75	-	-71.63	-44.53
K17	2.45	4.19	3.57	-	-71.09	-45.82
K18	2.42	4.26	3.55	-	-75.85	-46.70
				Ortalama	-68.99	-43.73





Şekil 7. H=150m için frekans değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 8. Frekans değerlerine baraj yüksekliğinin etkisi.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında beton barajlar için pratikte sıklıkla kullanılan numerik modellerin sismik özellikleri yansıtmadaki performansları detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Çalışma kapsamında kesit tipinin etkisi, baraj yüksekliğinin etkisi ve modelleme tekniğinin etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Analiz sonuçlarının sonucunda, Westergaard [17] ek kütlelerinin kullanıldığı modellerde ilk hâkim mod periyodunun oldukça başarılı bir şekilde tahmin edildiği gözlemlenmiştir. Fakat, yüksek mod etkilerinin Westergaard [17] ek kütleleriyle tahmininde oldukça büyük hata oranlarının tespit edildiği belirtilmiştir. Yüksek mod etkilerinin oldukça önem arz ettiği barajlarda bu Westergaard [17] ek kütlelerinin kullanılmasının taleplerinin tahmininde oldukça büyük hata oranlarını yanında getireceği belirtilmiştir. Ayrıca, rezervuarın Lagrange formülasyonuna sahip akışkan elemanlar vasıtasıyla temsil edildiği durumlarda ise hiçbir mod etkisi için kabul edilebilir hata oranlarına ulaşamamaktadır. Özetle, tasarım mühendisleri yüksek mod etkilerinin oldukça önem arz ettiği beton ağırlık barajların tasarımında daha basit modeller kullanarak, hızlı çözümler elde etme eğiliminden vazgeçmelidirler. Bu çalışmada gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, basit numerik modellerin yüksek mod etkilerini yansıtmada çok büyük eksiklikleri bulunmaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Carter, B., Structures and land forms: Faults, <http://itc.gsw.edu/faculty/bcarter/geomorph/struct/fault1.htm>, (06 October 2017).
- [2] Jackson, J., Earthquake hazards and large dams in western China, **Probe International Report**, (2012).
- [3] Zangar, C.N., Hydrodynamic pressures on dams due to horizontal earthquake effects, **US Bureau of Reclamation**, Engineering Monograph, No:11, (1952).
- [4] Raphael, J.N., Design of dams for earthquake resistance, **Proceedings of First World Conference on Earthquake Engineering**, Berkeley, California (1956).
- [5] Chopra, A.K., Earthquake effects on dams, **Ph.D. Thesis**, University of California, Berkeley, USA, (1966).
- [6] Nuss, L.K., Matsumoto, N. and Hansen, K.D., Shaken but not stirred – Earthquake performance of concrete dams, **Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management**, 32nd Annual USSD Conference New Orleans, Louisiana, pp. 1511-1530, (2012).
- [7] Fenves, G. and Chopra, A.K., Simplified earthquake analysis of concrete dams, **Journal of Structural Engineering**, 113, 8, 1688-1708, (1987).
- [8] Arici, Y., Binici, B. and Aldemir, A., Comparisons of expected damage patterns from two and three dimensional nonlinear dynamic analyses of an RCC dam, **Structure and Infrastructure Engineering**, 10, 3, 305-315, (2014).
- [9] Bybordiani, M. and Arici, Y., The use of 3D modeling for the prediction of the seismic demands on the gravity dams, **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 46, 1769-1789, (2017).
- [10] Aldemir, A., Prediction equations for the fundamental period and mode shape of roller compacted concrete gravity dams considering three dimensional geometry effects, **Journal of Earthquake Engineering**, (2018).
- [11] Fenves, G. and Chopra, A.K., Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams: Separate hydrodynamic and foundation interaction effects, **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, 111, 6, 715-735, (1985).

- [12] Fenves, G. and Chopra, A.K., Simplified earthquake analysis of concrete gravity dams: Combined hydrodynamic and foundation interaction effects, **Journal of Engineering Mechanics (ASCE)**, 111, 6, 736-756, (1985).
- [13] Fenves, G. and Chopra, A.K., EAGD-84: A computer program for earthquake response analysis of concrete gravity dams, Report No: UCB/EERC-734, **Earthquake Engineering Research Center**, University of California, Berkeley, California, USA, (1984).
- [14] Wang, J. and Chopra, A.K., EACD-3D: A computer program for three dimensional earthquake analysis of concrete dams considering spatially - varying ground motion, Report No: UCB/EERC-2008/04, **Earthquake Engineering Research Center**, University of California, Berkeley, California, USA, (2008).
- [15] Dungan, R., An efficient method of fluid-structure coupling in the dynamic analysis of structures, **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 13, 1, 93-107, (1978).
- [16] Calayir, Y., Dumanoglu, A.A. and Bayraktar, A., Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches, **Computers and Structures**, 59, 5, 877-890, (1996).
- [17] Westergaard, H.M., Water pressures on dams during earthquakes, **Transactions of ASCE**, 98, 418–434, (1933).
- [18] ANSYS Theory Manual, Theory reference for the mechanical APDL and mechanical applications, SAS IP Inc., (2016).
- [19] ANSYS Inc., Basic Analysis Guide for ANSYS, SAS IP Inc, (2016).
- [20] Aldemir, A., Prediction equations for the fundamental period and mode shape of roller compacted concrete gravity dams considering three dimensional geometry effects, **Journal of Earthquake Engineering**, 2018.
- [21] Sevim, B., Altunisik, A.C., Bayraktar, A., Akköse, M., and Calayir, Y., Water length and height effects on the earthquake behavior of arch dam-reservoir-foundation systems, **KSCE Journal of Civil Engineering**, 15, 2, 295-303, 2011.
- [22] Kuo, J.S.H., Fluid – structure interactions: Added mass computations for incompressible fluid, Report No: UCB/EERC-82/09, **Earthquake Engineering Research Center**, University of California, Berkeley, California, (1982).

# Danışmanlı ve yarı danışmanlı öğrenme kullanarak doküman vektörleri tabanlı tweetlerin duygu analizi

Metin BİLGİN<sup>1,\*</sup>, İzzet Fatih ŞENTÜRK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi Müh. Fak. Bilgisayar Müh. Böl., Görükle kampüsü, Bursa.

<sup>2</sup>Bursa Teknik Üniversitesi Müh. ve Doğa Bil.Fak. Bilgisayar Müh. Böl., Mimar Sinan Kampüsü, Bursa.

Geliş Tarihi (Received Date): 06.03.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 10.07.2019

## Özet

İnternetin günlük hayatımızdaki artan kullanımı ile beraber sosyal medya organlarının gelişimi de paralellik göstermektedir. Mikroblog adı verilen facebook ve twitter benzeri uygulamaları ile anlık duyguları ve düşünceleri ifade etmek son derece yaygın bir hale gelmiştir. Mikroblog sitelerinin en yaygın kullanıma sahip olanlarından birisi de Twitter uygulamasıdır. Twitter üzerinden paylaşılan mesajlar bir ürün ya da hizmet hakkında olabileceği gibi bir kişiyle ilgili bir yorumda olabilmektedir. Yapılan yorumun belirtmek istediği anlamı ve duyguyu belirleyebilmek son dönemdeki gözde konulardan biridir. Bir ürün ya da hizmet hakkında yapılan binlerce yorumun tek tek okunup anlamlandırılması ve yorumlayanların fikirlerinin sınıflandırılması geleneksel yöntemlerde oldukça zaman ve emek alan bir alandır. Gerek makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarındaki gelişmeler gerekse de bunları işleyip yorumlayacak bilgisayar sistemlerinin gelişimine paralel olarak milyonlarca veri üzerinde duygu sınıflandırılması mümkün hale gelmiştir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada Türkçe ve İngilizce tivitler üzerinde duygusal sınıflandırma çalışması gerçekleştirilmiştir. Doküman vektörleri (Doc2Vec) kullanılarak yapılan çalışmada hem DBoW ve DM gibi iki farklı doküman vektörü yönteminin çalışması hemde Yarı Danışmanlı ve Danışmanlı öğrenmenin etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonuçları doğruluk, kesinlik, anma, özgünlük ve F-ölçütü metrikleri ile raporlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda Yarı Danışmanlı öğrenme yöntemi hem Türkçe hemde İngilizce veri kümesinde Danışmanlı öğrenmeye göre daha başarılı sonuçlar elde etmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yarı danışmanlı öğrenme, danışmanlı öğrenme, Doc2Vec, duygu analizi, makine öğrenmesi, doğal dil işleme, derin öğrenme.

\* Metin BİLGİN, metinbilgin@uludag.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4216-0542>

İzzet Fatih ŞENTÜRK, izzet.senturk@btu.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-1550-563X>

## Sentiment analysis of tweets based on document vectors using supervised learning and semi-supervised learning

### Abstract

*The increasing presence of the Internet in the daily life leads to proliferation of social media. Microblogging applications such as Facebook and Twitter let their users to express their feelings and emotions in a short form of digital content including text, picture, and video. Twitter is one of the most popular microblogging applications. Tweets posted on twitter may contain positive or negative comments on a product, service or an individual. The analysis of the sentiments behind the tweets has been a popular research topic recently. Considering the time required to read and analyze a vast amount of tweets regarding a given product or service, manual classification of tweets is a complex and time consuming process. Recent machine learning and deep learning algorithms and the developments in the computer systems enable classification of the huge amount of data according to their sentiments in parallel. In this study, we have carried out sentiment analysis on tweets with both Turkish and English content. We have employed Document Vectors (Doc2Vec) along with DBoW and DM and analyzed the performance of semi-supervised and supervised learning methods. We have reported the performance in terms of accuracy, precision, recall, specificity and F-score metrics. We have concluded that semi-supervised learning outperforms supervised learning for both Turkish and English datasets.*

**Keywords:** *Semi-supervised learning, supervised learning, Doc2Vec, sentiment analysis, machine learning, natural language processing, deep learning.*

### 1. Giriş

Son yıllarda internete erişim imkanlarının artışı ile internet hayatın vazgeçilmez bir nesnesi haline gelmiştir. Özellikle mobil tabanlı sosyal medya uygulamalarının cep telefonlarına girmesiyle hayatımızın her anı sanal ortama taşınmaktadır. İnsanların herhangi bir ürün ya da hizmet ile ilgili görüşlerini hızlı ve kolay bir şekilde paylaşmalarına imkan sağlayan sosyal platform (Facebook, Twitter vb.) siteleri günümüzde çok revaçtadır. İnternetin kullanımının yaygınlaşmasıyla beraber sosyal platformalarda (Twitter, Facebook vb.) paylaşılan içeriklerin artışı paralellik göstermektedir [1]. Sosyal platformlar üzerinden yazılan metinler psikoloji, veri madenciliği gibi araştırma alanları için büyük bir veri toplama alanı oluşmasını sağlamıştır [2,3]. İnternet kullanımının artışı ile birlikte artan kullanıcı yorumlarının olumlu ya da olumsuz gibi sınıflandırılması büyük bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Büyük miktarda verinin ön işlemlerden geçirilip, işlenmesi ve doğru sınıflandırılması büyük önem arz etmektedir. Sosyal paylaşım siteleri üzerinden elde edilen veriler üzerinde çeşitli makine öğrenmesi algoritmaları çalıştırılarak sınıflandırmayı gerçekleştirmek mümkündür. Makine Öğrenmesi algoritmalarının yüksek doğrulukla sınıflandırma yapabilmesi için ön işlem aşamasının doğru bir şekilde organize edilmesi gerekmektedir. Sosyal ağlardan elde edilen veriler ise yanlış yazılmış kelimeleri, kısaltmalar ve günlük konuşma diliyle yazılmış kelimeleri ve cümleleri barındırdığından

üzerinde duygu analizi yapmak oldukça zordur. Bu zorlukları aşabilmek için doğal dil işlemenin metodlarından faydalanmak kaçınılmaz bir durum oluşturmaktadır [4].

Bu kısımda önceki çalışmalar hakkında bilgiler verilecektir. Makalenin bu bölümü şu şekilde organize edilmiştir; duygu analizi üzerine yapılmış çalışmalar, Twitter verileri üzerindeki çalışmalar, Danışmanlı Öğrenme kullanan çalışmalar, Yarı Danışmanlı Öğrenme kullanan çalışmalar ve Türkçe Twitter verileri üzerine yapılmış çalışmaları açıklamak şeklindedir.

Günümüzce Twitter verileri üzerinde doğal dil işleme ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak: Szomsor ve diğ. [5], belirli bir tarih aralığında paylaşılan tivit metinlerinden salgın hastalıkları tahmin etmeye çalışan bir sistem geliştirmişlerdir. Bian ve diğ. [6] yaptıkları çalışma ise belirli bir tarih aralığında yazılmış tivit metinleri üzerinden kullanılan ilaçların ve yan etkilerinin analiz edilmesi üzerinedir. Nguyen ve diğ. [7], insan algısında sosyal medyanın etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Claster ve diğ. [8] çalışmalarında turistlerin bir belge hakkındaki yazmış oldukları tivit metinleri üzerinden algı analizi gerçekleştirmişlerdir. Liu ve diğ. [9] yaptıkları çalışmada, bir şirket hakkında bloglarda yazılmış metinler üzerinden şirketin satış grafiğini çıkarmaya çalışmışlardır Asur ve Huberman [10] çalışmalarında üç milyon tivit üzerinde, Joshi ve diğ. [11] ise film eleştirilerini kullanarak vizyondaki filmler hakkında tahminler çıkarmaya çalışmışlardır. Bollen ve diğ. [12] çalışmalarında Twitter verilerini kullanarak borsa hareketlerini tahmin etmeye çalışmışlardır.

Danışmanlı öğrenme kullanılarak gerçekleştirilmiş duygu analizi çalışmaları; Movie Review veri kümesi kullanılarak yapılan çalışmalar; Pang ve diğ. [13] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, film yorumlarını sınıflandırmak için 3 farklı makine öğrenmesi algoritması kullanılmışlar ve en yüksek doğruluk değerine %82.9 ile destek vektör makineleri ulaşmıştır. Pang ve Lee [14] gerçekleştirdikleri çalışmada bir metin içerisindeki ifadelerin nesnel veya öznel şeklinde sınıflandırılması üzerinedir ve çalışma öznel tümcelerinin daha ayırt edici olduğu yargısına varmışlardır. Whitelaw ve diğ. [15] çalışmalarında metinler arasındaki anlamsal ilişkilerin belirlenmesi ve destek vektör makineleri algoritmasıyla %90.2'lik doğru sınıflandırma başarısına ulaşmışlardır. Yessenalina ve diğ. [16] görüş çıkarımı için belge düzeyinde çok katmanlı bir mimari önermişler ve makine öğrenmesi algoritmaları ile bu görüşleri sınıflandırmaya çalışmışlardır. Matsumoto ve diğ. [17], yapılan değerlendirme belge düzeyinde cümlelerin sınıflandırması üzerine bir yöntem önerisinde bulunmuşlar ve çalışma sonucunda %93.7'lik doğru sınıflandırma doğru sınıflandırma başarısına ulaşmışlardır. Tan ve Zhang [18], görüş madenciliği üzerine yaptıkları çalışmada, Çince metinler üzerinde çalışmışlar ve makine öğrenmesi algoritmaları ile sonuçları sınıflandırmışlardır. Qui ve diğ. [19], görüş sınıflandırmayı reklam sektörü için uygulamışlardır. Bai [20], iki aşamalı bir yöntem önerisi ile kullanıcı yorumlarını makine öğrenmesi algoritmaları ile sınıflandırmışlardır. Chen ve Tseng [21], iki farklı veri kümesi üzerinde yorumları niteliklerine göre sınıflandırmaya çalışmışlardır. Xia ve diğ. [22], kolektif sınıflandırıcı tabanlı bir yorum sınıflandırıcı çalışması gerçekleştirmişlerdir. Kang ve diğ. [23] bir yemek firması için yapılan kullanıcı yorumlarını değerlendirmek için Naïve Bayes yöntemi üzerinde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Li ve Li [24], sosyal medya siteleri üzerinde yazılan metinlerin özetini sunan bir yapı geliştirmişlerdir. Moraes ve diğ. [25], makine öğrenmesi algoritmalarını kullanarak döküman seviyesinde sınıflandırma yapmışlardır. Wang ve diğ. [26], on veri kümesi üzerinde farklı sınıflandırıcılar kullanarak fikir madenciliği üzerine bir deneysel çalışma

gerçekleştirmişlerdir. Chalothom ve Ellman [27], tivit metinleri üzerinde makine öğrenmesi algoritmaları ile tekil ve topluluk sınıfları için kullanarak sınıflandırma çalışması yapmışlardır. Zheng ve diğ. [28], öznitelik seçmenin önemini ve sınıflandırıcıların performansına etkisini fikir madenciliği konusunda araştırmışlardır.

Yarı Danışmanlı öğrenme kullanılarak gerçekleştirilmiş duygu analizi çalışmaları; Aue ve Gamon [29], etiketli verinin az olduğu durumlarda eğitim için farklı yöntemler önererek, bu yöntemlerin başarıları araştırılmıştır. Tan ve diğ. [30], sıklıkla karşılaşılan bir problem türü olan alan-transfer (domain-transfer)'in çözümü için yeni yöntem önermişler ve bu yöntemin başarımını ölçmüşlerdir. Blitzer ve diğ. [31], alan-transfer probleminin çözümünde yapısal yazışma öğrenme (structural correspondence learning) tabanlı bir yöntem önermişler ve başarımını test etmişlerdir. Mihalcea ve diğ. [32], İngilizce için geliştirilmiş görüş sözlüğünün farklı diller üzerindeki performansını ölçümlemişlerdir. Li and Zong [33], çok-alanlı duygu sınıflandırma (multi-domain sentiment classification) için yeni iki farklı metod denemişlerdir. Banea ve diğ. [34], makine çevirisi (machine translation) tabanlı önerdikleri yeni yöntem ile İngilizce için kullanılan sözlüklerin Romanca ve İspanyolca üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Dasgupta ve Ng [35], yarı-danışmanlı bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem aktif öğrenme (active learning), transdüktif öğrenme (transductive learning) ve spektral kümeleme (spectral clustering) metodları temellidir. Wan ve diğ. [36], eş-eğitim (co-training) temelli Çince yorumların duygusal sınıflandırmasını yapmak için İngilizce kaynaklardan yararlanan bir sistem geliştirmişlerdir. He ve Zhou [37], sözlük tabanlı etiketleminin maliyetlerini düşürecek kendi kendine eğitim (self-training) metodolojine dayanan yeni bir yöntem önermişlerdir. Hernandez ve diğ. [38], duygusal sınıflandırma da kullanılmak üzere birbiriyle ilişkili üç hedef değişkenini (öznellik, görüş kutbu ve etkileme durumu) saptayabilmek için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Hajmohammadi [39], aktif öğrenmeyi (active learning) yarı danışmanlı olarak kullanarak duygu sınıflandırmak için kullanmışlardır. Hajmohammadi [40], duygu madenciliği için, Hajmohammadi [39]'da sunulan yöntemleri farklı dillerde uygulamışlar ve yarı-danışmanlı eğitimle birleştirerek yeni bir model önerisinde bulunmuşlardır. Hajmohammadi ve diğ. [41], yarı-danışmanlı öğrenme ile kendi kendine eğitim metodlarını birleştirerek İngilizce için oluşturulan derlemelerin diğer diller içinde kullanılmasına imkan sağlamaya çalışmışlardır.

Twitter üzerindeki Türkçe tivitler için yapılan duygu analizi çok fazla değildir. Eroğul [42], bir haber tivitini üzerindeki duyguyu olumlu ve olumsuz olarak sınıflandırma üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Vural [43], sözlük temelli bir yaklaşım ile film kritiklerini iki sınıflı (olumlu, olumsuz) şeklinde sınıflandırmıştır. Meral ve Diri [44], Twitter üzerinden toplanan metinler üzerinde, metin temsil yöntemi olarak n-gramları kullanarak üç sınıflı (olumlu-olumsuz-nötr) bir sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Şimşek ve Özdemir [45], atılan tivitler ile hisse senetlerinin değişimlerini arasındaki ilişkiyi modelleyecek bir sistem üzerine çalışmışlardır. Türkmenoğlu ve Tantuğ [46], film kritikleri ve tivitler üzerinden sözlük tabanlı ve makine öğrenmesi algoritmalarını kullanarak duygu çıkarımı yapmışlardır.

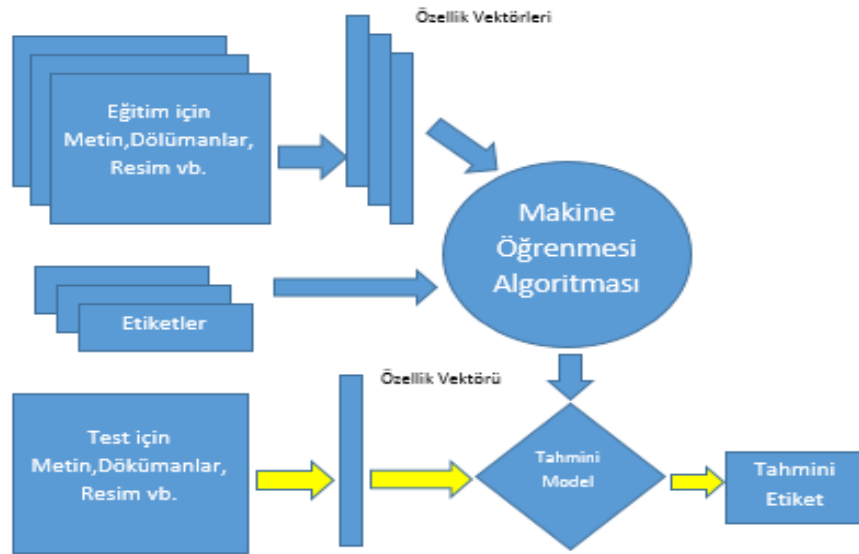
## 2. Deneysel metod

Makine Öğrenmesinde kullanılan öğrenme yöntemlerinden Danışmanlı Öğrenme-Yarı Danışmanlı Öğrenme yöntemleri, döküman sınıflandırma için kullanılan Doc2Vec yöntemi ve kullanılan veri kümesi ile ilgili bilgiler verilecektir.

### 2.1. Danışmanlı öğrenme

Bu tip öğrenmede öğrenen sistemin olayı öğrenmesine bir danışman yardımcı olur. Danışman sistemin öğrenmesi istenen konuyla ilgili örnekleri Girdi / Çıktı olarak verir. Danışmanlı öğrenme, girişlerle çıkışların eşleştiği örneklerden bir fonksiyonun öğrenilmesi ya da hipotezin bulunmasıdır [47]. Bu tip öğrenmede mutlaka bir danışmana ihtiyaç vardır. Danışmanlı öğrenme ait gösterim Şekil 1’de verilmiştir.

Danışmanlı öğrenme modelinde sınıflandırma işlemi gerçekleştirilir ve eğitim aşamasında oluşturulan model ile test aşamasında sistemin sınıflandırma yapması beklenir [48]. Yaygın olarak kullanılan algoritmalar, Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine), Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network), Naive Bayes, k-En Yakın Komşu (k-Nearest Neighbour) ve Karar Ağaçları (Decision Trees) ‘dır [49]. Sınıflandırma işlemi sonucunda tek etiketli (single-label) veya çok etiketli (multi-label) sınıflandırma gerçekleştirilebilir [50].

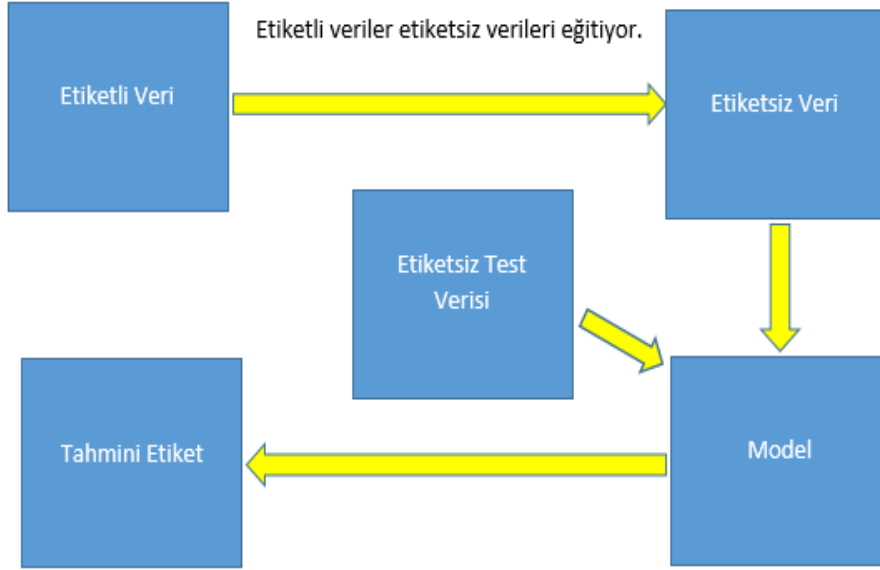


Şekil 1. Danışmanlı Öğrenme (Supervised Learning) [51].

### 2.2. Yarı danışmanlı öğrenme

Makine öğrenmesinde kullanılan öğrenme yöntemlerinden biridir. Giriş olarak verilen veri de çok miktarda etiketlenmemiş veri ve az miktarda etiketlenmiş veri sunulmaktadır [52]. Bu metod genellikle etiketlenmiş verinin az olduğu, etiketlenmemiş verinin kolaylıkla elde edilebildiği durumlarda kullanışlı olmaktadır. Yarı danışmanlı öğrenme ait gösterim Şekil 2’de verilmektedir [51].



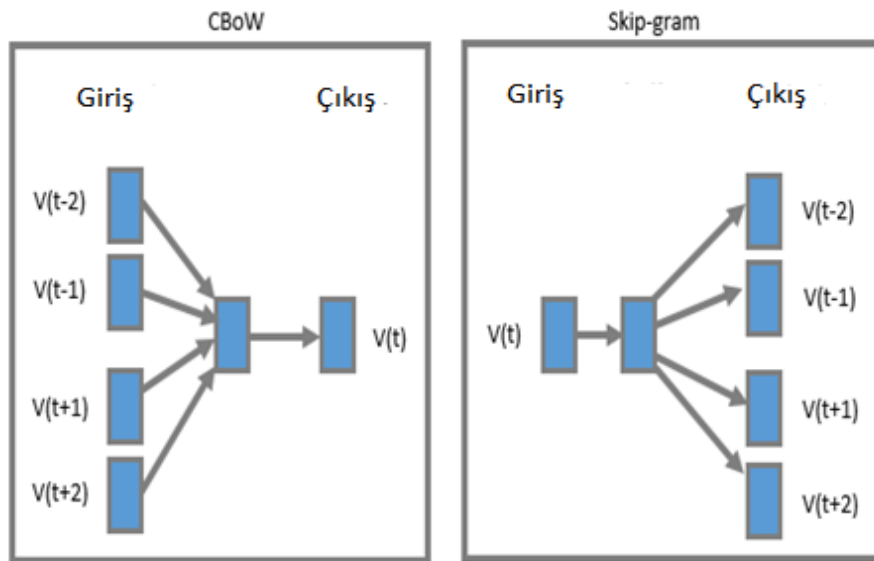


Şekil 2. Yarı Danışmanlı Öğrenme (Semi-Supervised Learning).

### 2.3. Doc2Vec

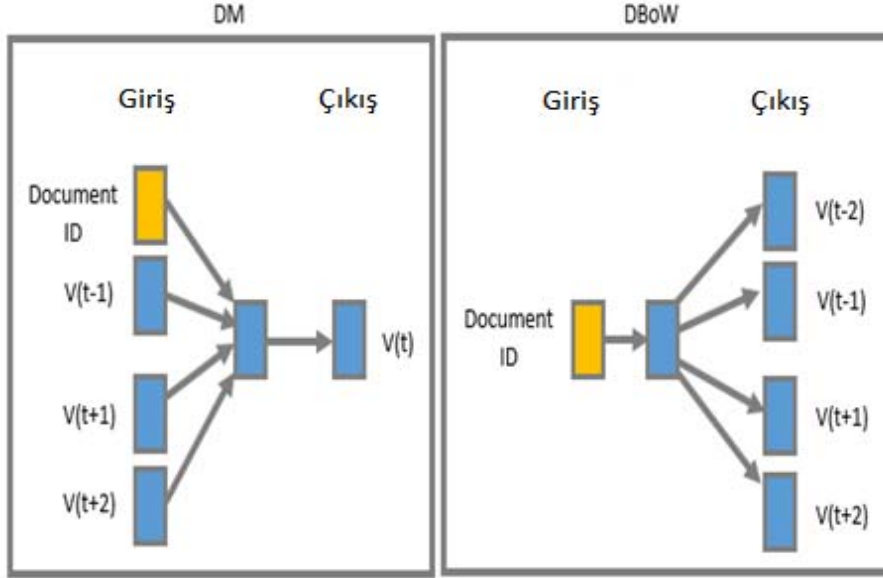
Doc2Vec yönteminin temeli Word2Vec yöntemine dayanmaktadır. Word2Vec algoritması, kelimeleri uzaysal bir düzleme taşıyarak bir vektör oluşturma yöntemidir. Doc2Vec ise cümleler ya da paragraflar için benzer işlemleri gerçekleştirmektedir. Doc2Vec yöntemi bazı kaynaklarda Paragraph2Vec ismiyle de anılmaktadır. Word2Vec algoritmasının dokümanlar için özelleştirilmiş halidir [1,4,5]. Word2Vec algoritmasına göre yapılan değişiklik Şekil 3 ve Şekil 4'ten de görüleceği üzere doküman numarası (document ID) eklenmesidir. Word2Vec'de amaç eğitim sürecinde ortalama olasılığı maksimize etmektir. Eş.1'de Doc2Vec yöntemine ait eşitlik görülmektedir. Eş. 1'de  $w_1, w_2, \dots, w_T$  eğitim kelimelerinin dizilimini vermektedir.

$$\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T -\log p(w_t | w_{t-k}, \dots, w_{t+k}) \quad (1)$$



Şekil 3. Word2Vec - CBoW ve Skip-gram (Word2Vec-CBOW and Skip-gram) [51].

Word2Vec algoritmasında Continuous bag of words (CBoW) ve Skip-Gram (SG) şeklinde iki farklı yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler Doc2Vec için yapılandırılarak Distributed Memory (DM) ve Distributed bag of words (DBoW) adında iki yönteme dönüştürülmüştür.



Şekil 4. Doc2Vec-DM ve DBoW (Doc2Vec- DM and DBoW) [51].

#### 2.4. Veri kümeleri (Data sets)

Yapılan çalışmada Türkçe ve İngilizce için iki farklı veri kümesi kullanılmıştır. Türkçe için yapılan çalışmada içerisinde 2906 tivit içeren duygu analizi için hazırlanmış bir veri kümesi kullanılmıştır [53]. Veri kümesi oluşturulurken Twitter üzerinden özel bir telekom şirketine ait gönderiler seçilmiştir. Veri kümesine ait bilgiler Tablo 1’de görülmektedir. Etiketsiz eğitim kümesi ise Twitter üzerinden yazdığımız api yardımıyla elde edilen tivitlerin düzenlenmesiyle oluşturulmuştur ve 2281 cümlelik bir veri kümesidir.

Tablo 1. Türkçe veri kümesi.

Sınıf	Cümle Sayısı
Etiketli	
Pozitif	724
Negatif	1270
Nötr	912
Toplam	2906
Etiketsiz	
2281 Cümle	

İngilizce için yapılan çalışmada içerisinde 1774 adet etiketsiz ve 58817 adet etiketli veri içeren veri kümesi kullanılmıştır [54]. Amerikadaki 6 büyük havayolu şirketinin (American, Delta, Southwest Airlines, United, US Airways, ve Virgin America) müşterilerinin 1 hafta içinde Twitter’da paylaştıkları tivitler toplanarak veri kümesi oluşturulmuştur. Veri kümesine ait bilgiler Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. İngilizce veri kümesi.

Sınıf	Cümle Sayısı
Etiketli	
Pozitif	301
Negatif	1091
Nötr	382
Toplam	1774
Etiketsiz	
58817 Cümle	

Veri kümeleri üzerinde Doc2Vec algoritmalarının çalıştırılmasından önce veri üzerinde bazı ön işlemler gerçekleştirilmiştir. Ön işlem safhasında duygu analizi için bir önemi olmayan veriler silinmiştir. Böylelikle hem sistemin başarı oranı artırılmış hem de gereksiz bilgiler ile uğraşılması önlenmiş ve böylelikle sistemin hesaplama maliyeti düşürülmüş olmaktadır. Tablo 3'te temizlenen verilere örnekler verilmiştir.

Tablo 3. Ön işlem safhasında silinen veriler.

Silinen Karakterler
Html Etiketleri
Twitter Kullanıcı Adları
Twitter Hashtagleri
Telefon numarası vb.
Posta kodları
Düzenli ifadeler

Twitter üzerinden elde edilen tivitler Json formatındadır. Türkçe için özel karakterler olan “ç”,“ş” vb. için dönüşümler yapılması sınıflandırmanın doğruluğunu artırmak için çok önemlidir. Alınan ham veriler üzerinde dönüşüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma da DM algoritması için kullanılan parametre değerleri Tablo 4'te görülmektedir. DBoW algoritması için dm\_concat parametresi yoktur ve dm parametresi 0 (sıfır) değerini almaktadır.

Tablo 4. DM'nin kullandığı parametreler (Parameters used for DM).

Parametre	Değeri
Size	400
Window	8
Min count	1
Sample	1e-4
negative	5
workers	4
dm	1
dm_concat	1

### 3. Bulgular ve tartışmalar

Gerçekleştirilen çalışmada iki farklı veri kümesi için iki farklı Doc2Vec algoritması çalıştırılmıştır. Çalışma sonuçlarının değerlendirilmesinde doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), duyarlılık (recall) ve F-ölçüsü metrikleri kullanılmıştır.

Doğruluk metriği, sınıflandırma başarısının tespit edilmesinde kullanılan en önemli metriklerdendir. Doğru sınıflandırılmış örnek sayısının (True Positive + True Negative), toplam örnek sayısına (TP + TN + False Pozitive + False Negative ) oranıdır [55]. Doğruluk metriğine ait denklem Eş. 2'de görülmektedir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{(TP)+(TN)}{TP+FP+FN+TN} \quad (2)$$

Kesinlik metriği, sınıfı doğru olarak belirlenmiş örneklerin TP (True Positive), sınıfı doğru olarak belirlenmiş tüm örneklere oranıdır. Kesinlik metriğine ait denklem Eş. 3'te görülmektedir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{(TP)}{TP+FP} \quad (3)$$

Duyarlılık metriği, doğru sınıflandırılmış pozitif örneklerin TP sayısının, toplam pozitif örneklere oranıdır. Duyarlılık metriğine ait denklem Eş. 4'te görülmektedir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{(TP)}{TP+FN} \quad (4)$$

F-ölçütü ise Kesinlik ve Duyarlılık metriğinin harmonik ortalamasıdır. F-ölçütüne ait denklem Eş. 5'te görülmektedir.

$$F - \text{ölçütü} = \frac{2 * \text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (5)$$

Yarı danışmanlı öğrenmenin uygulanabilmesi için Python programlama dilinde Gensim kütüphanesi kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirdiğimiz yazılım yarı danışmanlı olarak sistemi eğitebilecek şekilde tasarlanmıştır. Etiketli veriler ile etiketsiz veriler sisteme beraber verilmektedir. Oluşturulan yazılım etiketli ve etiketsiz verileri kullanarak bir model oluşturmaktadır. Ardından oluşturulan bu model yardımıyla test verilerinin etiketlenmesi sağlanmaktadır. Yazılım Doc2Vec yönteminin iki ayrı metodu olan DBow ve DM için kodlanmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen yazılım yardımıyla doğruluk (accuracy) değerleri hesaplanmış ve karışım (confusion) matrisleri oluşturulmuştur. Danışmanlı öğrenme için ise Weka yazılımı kullanılmıştır. Makine öğrenmesi algoritması olarak da Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines) kullanılmıştır. Tablo 1'de verilen Türkçe veri kümesi için yapılan çalışmaya ait sonuçlar Tablo 5'te görülmektedir.

Tablo 5. Türkçe veri kümesi için sonuçlar.

Yöntem	Cümle Sayıları						
Yarı Danışmanlı	250	500	750	1000	1500	2000	2500
DM	0.416	0.448	0.4413	0.443	0.4306	0.4315	0.4328
DBoW	<b>0.44</b>	<b>0.452</b>	<b>0.4506</b>	<b>0.46</b>	<b>0.448</b>	<b>0.4405</b>	<b>0.4488</b>
Danışmanlı							
DM	0.368	0.364	0.3706	0.396	0.3746	0.358	0.3512
DBoW	<b>0.432</b>	<b>0.4528</b>	<b>0.4502</b>	<b>0.441</b>	<b>0.4393</b>	<b>0.432</b>	<b>0.4252</b>

Tablo 6. Türkçe veri kümesi için karışım matrisleri (Cümle Sayısı=2500).

Yarı Danışmanlı Öğrenme	DM	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>1037</b>	35	16
	Nötr	728	<b>18</b>	35
	Pozitif	577	24	<b>25</b>
	DBoW	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>1058</b>	20	10
	Nötr	723	<b>30</b>	28
	Pozitif	575	22	<b>34</b>
Danışmanlı Öğrenme	DM	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>437</b>	333	263
	Nötr	314	<b>226</b>	284
	Pozitif	242	186	<b>215</b>
	DBoW	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>738</b>	252	43
	Nötr	520	<b>247</b>	57
	Pozitif	385	180	<b>78</b>

Tablo 2’de verilen İngilizce veri kümesi için yapılan çalışmaya ait sonuçlar Tablo 7’te görülmektedir.

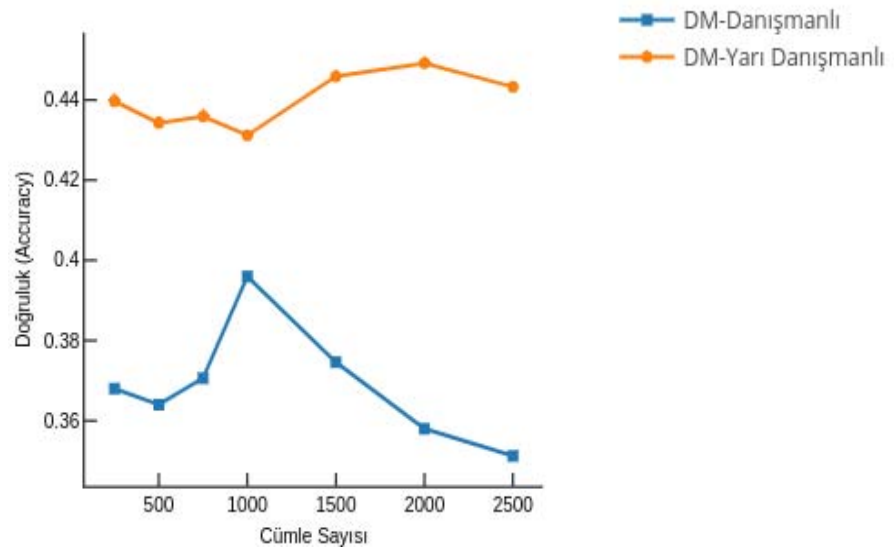
Tablo 7. İngilizce için sonuçlar (Results for English).

Yöntem	Cümle Sayıları					
Yarı Danışmanlı	250	500	750	1000	1250	1500
DM	0.604	0.626	0.620	0.601	0.6128	0.6066
DBoW	<b>0.608</b>	<b>0.632</b>	<b>0.635</b>	<b>0.610</b>	<b>0.6216</b>	<b>0.6206</b>
Danışmanlı						
DM	0.58	0.6006	0.5733	0.552	0.5376	0.518
DBoW	<b>0.5902</b>	<b>0.612</b>	<b>0.6013</b>	<b>0.602</b>	<b>0.6056</b>	<b>0.606</b>

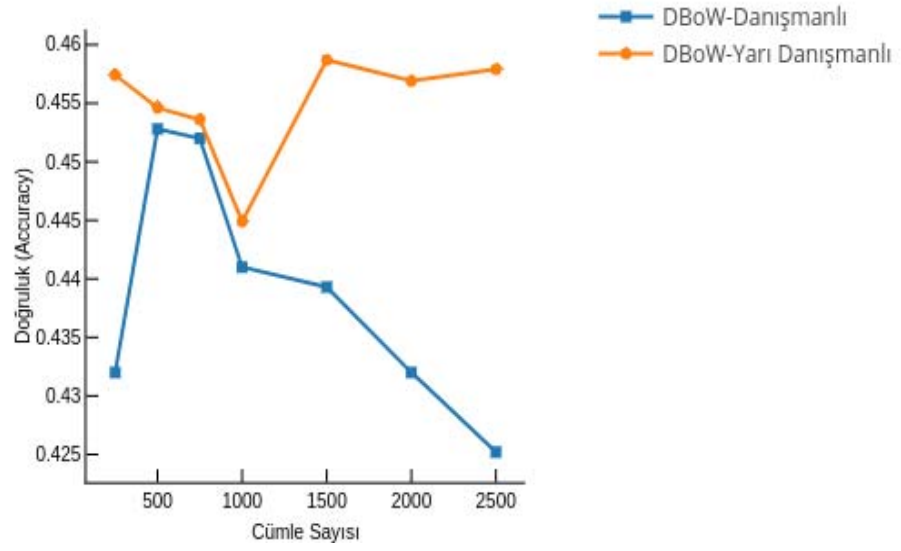
Tablo 8. İngilizce Veri Kümesi için Karışım Matrisleri (Cümle sayısı=1500).

Yarı Danışmanlı Öğrenme	DM	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>861</b>	50	10
	Nötr	270	<b>43</b>	7
	Pozitif	229	25	<b>5</b>
	DBoW	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>873</b>	43	5
	Nötr	265	<b>49</b>	6
	Pozitif	225	25	<b>8</b>
Danışmanlı Öğrenme	DM	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>710</b>	108	91
	Nötr	253	<b>44</b>	40
	Pozitif	188	43	<b>23</b>
	DBoW	Negatif	Nötr	Pozitif
	Negatif	<b>801</b>	52	56
	Nötr	265	<b>69</b>	33
	Pozitif	175	39	<b>40</b>

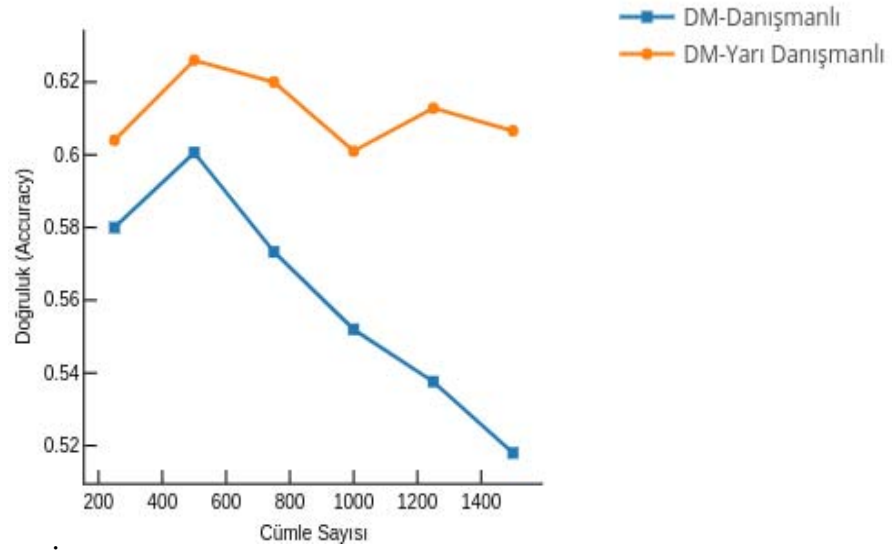
Türkçe ve İngilizce veri kümeleri yarı danışmanlı öğrenme ve danışmanlı öğrenme uygulanarak çalıştırılmıştır. Elde edilen doğruluk metrigine ait grafikler Şekil 5-8'de görülmektedir.



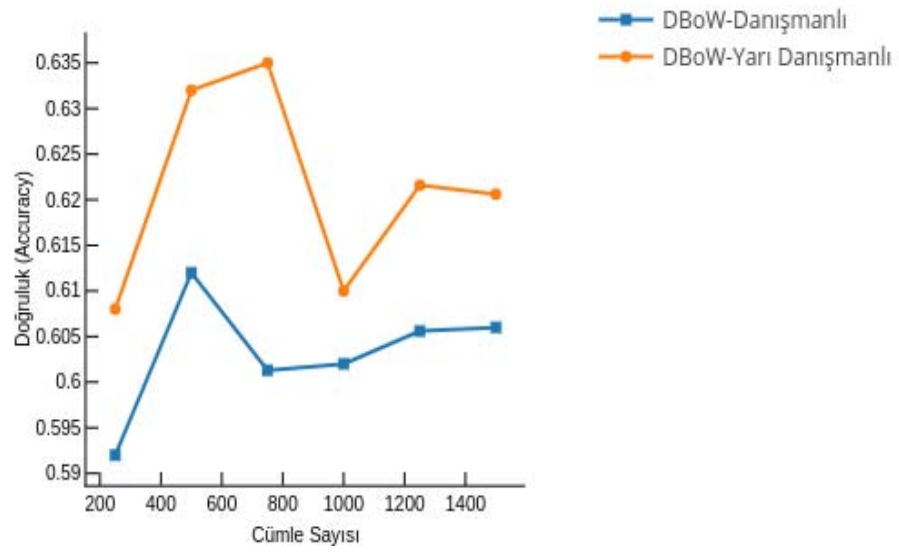
Şekil 5. Türkçe veri kümesine için DM yönteminin sonuçları.



Şekil 6. Türkçe veri kümesine için DBoW yönteminin sonuçları.



Şekil 7. İngilizce veri kümesine için DM yönteminin sonuçları.



Şekil 8. İngilizce veri kümesine için DBoW yönteminin sonuçları.

Şekil 5-8'te görüldüğü üzere her iki dil içinde Yarı Danışmanlı öğrenme daha yüksek doğruluk değerine ulaşmıştır. DBoW yöntemi de DM'ye göre daha yüksek doğruluk değerine ulaşmıştır.

Doğruluk metriği dışındaki kesinlik, duyarlılık (recall) ve F-ölçüsü metriklerine ait sonuçlar Tablo 9'da görülmektedir.

Tablo 9. Diğer metriklerin sonuçları.

Veri Kümesi	Yöntem	Öğrenme Türü	Kesinlik	Duyarlılık	F-Ölçütü
Türkçe	DM	Yarı Danışmanlı	0,348	0,432	0,3855
	DBoW		<b>0,4447</b>	<b>0,4488</b>	<b>0,4467</b>
	DM	Danışmanlı	0,3586	0,3512	0,3548
	DBoW		<b>0,4182</b>	<b>0,4252</b>	<b>0,4216</b>
İngilizce	DM	Yarı Danışmanlı	0,5062	0,6067	0,5519
	DBoW		<b>0,5556</b>	<b>0,6206</b>	<b>0,5863</b>
	DM	Danışmanlı	0,4497	0,518	0,481
	DBoW		<b>0,5502</b>	<b>0,6066</b>	<b>0,577</b>

XX

Hem Türkçe, hemde İngilizce veri kümesi için kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü değerleri en yüksek değerlerine yarı danışmanlı öğrenme ve DBoW yöntemiyle ulaşmıştır.



#### **4.Sonuçlar**

Bu çalışmanın ilk amacı Yarı Danışmanlı ve Danışmanlı eğitimin elimizdeki veri kümelerinin doğru sınıflandırılması üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. İkinci amacımız ise döküman vektörü olarak isimlendirilen Doc2Vec algoritmasının iki farklı metodu olan DBoW ve DM yöntemlerinin aynı şartlar altındaki performanslarının araştırılmasıdır.

Hem Türkçe hemde İngilizce dilleri için hem etiketli hemde etiketsiz veri kümelerinin oluşturulması ile işe başlanmıştır. Elde edilen veri kümeleri üzerinde çeşitli ön işlemler gerçekleştirildikten sonra veriler eğitim için hazır hale getirilmiştir. Eğitim aşamasında elimizdeki veriler yarı danışmanlı ve danışmanlı öğrenme kullanılarak Doc2Vec algoritmasının iki farklı yöntemi DBoW ve DM üzerinde çalıştırılarak bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller kullanılarak test aşamasına geçilmiştir. Çalışma sonuçları 4 farklı metrik (doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F-ölçütü) cinsinden verilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarından ilki yarı danışmanlı eğitimin danışmanlı eğitime kıyasla daha yüksek doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve f-ölçütü değerlerine ulaşmasıdır. Dolayısıyla makine öğrenmesi yöntemleri ile bir eğitim gerçekleştirirken etiketli veriyle beraber etiketsiz verilerinde kullanılmasının oluşturulan modelin doğruluğunu artırdığı söylenebilir.

Çalışma sonunda elde ettiğimiz ikinci yararlı sonuç ise Doc2Vec algoritmasının iki farklı yöntemi arasındaki sınıflandırma başarılarının farklılığıdır. Ölçülen 4 farklı metrik değeri için hem yarı danışmanlı hemde danışmanlı öğrenme yöntemi kullanıldığında DBoW yöntemi DM yöntemine göre daha yüksek başarı elde etmiştir. DM, DBoW yöntemine göre daha fazla veriye ihtiyaç duyması ve elimizdeki veri kümelerindeki örnek sayısının az olması DM yönteminin DBoW yönteminden geri kalmasının nedenlerinden birisi olabilir.

Gerçekleştirilen çalışma Doc2Vec yönteminin Türkçe için duygu analizi için gerçekleştirilmiş ilk çalışmalarından olması sebebiyle önemlidir. Türkçe için alınan sonuçların İngilizce'den daha düşük olmasının nedeni Türkçe için kullanılan veri kümesinin daha küçük olması gösterilebilir.

Bundan sonraki çalışmalarımızda Türkçe etiketli veri kümesinin büyütülmesi ve veri kümesindeki etiketli veri sayısının sistemin başarısı üzerindeki etkilerinin araştırılması öncelikli hedefimizdir. Böylece DM ve DBoW yöntemleri arasındaki veri miktarı arasındaki ilişkinin de ölçülmesi planlanmaktadır. Ayrıca danışmansız öğrenmenin elimizdeki veriler için elde edeceği sonuçlarda geleceğe dair yapılması planlanan görevlerden biridir. Bir başka gelecek planımız ise DBoW ve DM'nin hibrit bir yaklaşım şeklinde duygu analizinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve sonuçlarının elde edilmesi üzerinedir.

## Kaynaklar

- [1] Go, A., Huang, L., and Bhayani, R., Twitter sentiment analysis, **Entropy**, 17, (2009).
- [2] Liu, B. and Lei, Z., Mining Text Data: A survey of opinion mining and sentiment analysis, Mining Text Data, Springer, USA, pp. 415-463. ISBN: 978-1-4614-3223-4. Prabowo, R. and Thelwall, M., "Sentiment analysis: A combined approach", **Journal of Informetrics**, 3(2), 143-157, (2009).
- [3] Akgül, E.S., Ertano, C. ve Diri, B., Twitter verileri ile duygu analizi, **Pamukkale University Journal of Engineering Sciences**, 22(2), 106-110, (2016).
- [4] Szomszor, M.N., Kostkova, P. and Quincey, E.D., # Swineflu: Twitter predicts swine flu outbreak in 2009, **3rd International ICST Conference on Electronic Healthcare for the 21st Century**. 2012.
- [5] Bian J, Topaloglu, U, Yu, F., Towards large-scale Twitter mining for drug-related adverse events, **International Workshop on Smart Health and Wellbeing (SHB'12)**, Maui, Hawaii, USA, 29 October-2 November 2012.
- [6] Nguyen, L.E., Wu, P., Chan, W., Peng, W., Zhang, Y., Predicting collective sentiment dynamics from time-series social media, **Workshop on Issues of Sentiment Discovery and Opinion Mining (WISDOM '12)**, Beijing, China, 12 August 2012.
- [7] Claster, W.B., Dinh, H., Cooper, M., Naive bayes and unsupervised artificial neural nets for Cancun tourism social media data analysis, **2nd World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC)**. Kitakyushu, Fukuoka, Japan, 15-17 December 2010.
- [8] Liu, Y., Huang, X., An, A., Yu, X., ARSA: A sentiment aware model for predicting sales performance using blogs, **30th ACM SIGIR International Conference on Research and Development in Information Retrieval**, Amsterdam, the Netherlands, 23-27 July 2007.
- [9] Asur, S., Huberman, B.A., Predicting the Future with Social Media, **IEEE/WIC/ACM international conference on web intelligence and intelligent agent technology (WI-IAT)**, Toronto, ON, Canada, 31 August-3 September 2010.
- [10] Joshi, M., Das, D., Gimpel, K., Smith, N.A., Movie reviews and revenues: an experiment in text regression, **Human Language Technologies: The 11th Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics (NAACL-HLT)**, Los Angeles, CA, USA, 1-6 June 2010.
- [11] Bollen, J., Mao, H., Zeng, X., Twitter mood predicts the stock market, **Journal of Computational Science**, 2(1), 1-8, (2011).
- [12] Pang, B., Lee, L. and Vaithyanathan S., Thumbs up?: sentiment classification using machine learning techniques, Proceedings of the ACL-02 conference on Empirical methods in natural language processing-Volume 10. **Association for Computational Linguistics**, 2002.
- [13] Pang, B., and Lillian, L., A sentimental education: Sentiment analysis using subjectivity summarization based on minimum cuts, Proceedings of the 42nd annual meeting on Association for Computational Linguistics. **Association for Computational Linguistics**, 2004.
- [14] Whitelaw, C., Garg, N., Argamon, S., Using appraisal groups for sentiment analysis, **14th ACM International Conference on Information and**

- Knowledge Management (CIKM)**, Bremen, Germany, 31 October-5 November 2005.
- [15] Yassenalina, A., Yue, Y., Cardie, C., Multi-Level structured models for document-level sentiment classification, **Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)**, Boston, MA, USA, 9-11 October 2010.
- [16] Matsumoto, S., Takamura, H., Okumura, M., Sentiment classification using word sub-sequences and dependency sub-trees, **9th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD)**, Hanoi, Vietnam, 18-20 May 2005.
- [17] Tan, S., Zhang, J., An empirical study of sentiment analysis for Chinese document, **Expert Systems with Applications**, 34(4), 2622-2629, (2008).
- [18] Qui, G., He, X., Zhang, F., Shi, Y., Bu, J., Chen, C., DASA: dissatisfaction-oriented advertising based on sentiment analysis, **Expert Systems with Application**, 37(9), 6182-6191, (2010).
- [19] Bai, X., Predicting consumer sentiments from online text, **Decision Support Systems**, 50(4), 732-742, (2011).
- [20] Chen, C.C., Tseng, Y.D., Quality evaluation of product reviews using an information quality framework, **Decision Support Systems**, 50(4), 755-768, (2011).
- [21] Xia, R., Zong, C., Li, S., Ensemble of feature sets and classification algorithms, **Information Sciences**, 181(6), 1138-1152, (2011).
- [22] Kang, H., Yoo, S.J., Han, M., Senti-Lexicon and improved Naïve Bayes algorithms for sentiment analysis of restaurant reviews, **Expert Systems with Applications**, 39(5), 6000-6010, (2012).
- [23] Li, Y.M., Li, T.Y., Deriving Market intelligence from microblogs, **Decision Support Systems**, 55(1), 206-217, (2013).
- [24] Moraes, R., Valiati, J.F., Neto WPG, Document-Level sentiment classification: an empirical comparison between SVM and ANN, **Expert Systems with Applications**, 40(2), 621-633, (2013).
- [25] Wang, G., Sun, J., Ma, J., Xu, K., Gu, J., Sentiment classification: the contribution of ensemble learning, **Decision Support Systems**, 57, 77-93, (2014).
- [26] Chalothom, T., Ellman, J., Simple Approaches of Sentiment Analysis via Ensemble Learning, Editor: Kim KJ. **Information Science and Applications**, 631-639, Berlin, Germany, Springer, 2015.
- [27] Zheng, L., Wang, H., Gao, S., Sentimental feature selection for sentiment analysis of Chinese online reviews, **International Journal of Machine Learning and Cybernetics**, 1-10, (2015).
- [28] Aue, A., Gamon, M., Customizing sentiment classifiers to new domains: a case study, **International Conference on Recent Advances in Natural Language Processing (RANLP)**, Borovets, Bulgaria, 21-23 September 2005.
- [29] Tan, S., Wu, G., Tang, H., Cheng, X., A novel scheme for domain-transfer problem in the context of sentiment analysis, **Conference on Information and Knowledge Management (CIKM)**, Lisbon, Portugal, 6-10 November 2007.
- [30] Blitzer, J., Dredze, M., Pereira, F., Biographies, bollywood, boom-boxes and blenders: Domain adaptation for sentiment classification, **45th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)**, Prague, Czech Republic, 25-27 June 2007.

- [31] Mihalcea, R., Banae, C., Wiebe, J., Learning multilingual subjective language via cross-lingual projections, **45th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)**, Prague, Czech Republic, 25-27 June 2007.
- [32] Li, S., Zong, C., Multi-Domain sentiment classification, **46th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)**, Columbus, OH, USA, 19-20 June 2008.
- [33] Banae, C., Mihalcea, R., Wiebe, J., Multilingual subjectivity analysis using machine translation, **Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)**, Honolulu, HI, USA, 25-27 October 2008.
- [34] Dasgupta, S., Ng, V., Mine the easy, classify the hard: a semi-supervised approach to automatic sentiment classification, **47th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)**, Suntec, Singapore, 2-7 August 2009.
- [35] Wan, X., Co-training for cross-lingual sentiment classification, **47th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)**, Suntec, Singapore, 2-7 August 2009.
- [36] He, Y., Zhou, D., Self-Training from labelled features for sentiment analysis, **Information Processing and Management**, 47(4), 606-616, (2011).
- [37] Hernandez, O.J., Rodriguez, J.D., Alzate, L., Lucania, M., Inza, I., Lozano, J.A., Approaching sentiment analysis by using semi-supervised learning of multi-dimensional classifiers, **Neurocomputing**, 92, 98-115, (2012).
- [38] Hajmohammadi, M.S., Ibrahim, R., Selamat, A., Bi-View semi-supervised active learning for cross-lingual sentiment classification, **Information Processing and Management**, 50(5), 718-732, (2014).
- [39] Hajmohammadi, M.S., Ibrahim, R., Selamat, A., Cross-Lingual sentiment classification using multiple source languages in multi-view semi-supervised learning, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 36, 195-203, (2014).
- [40] Hajmohammadi, M.S., Ibrahim, R., Selamat, A., Fujita, H., Combination of active learning and self-training for cross-lingual sentiment classification with density analysis of unlabelled samples, **Information Sciences**, 317, 67-77, (2015).
- [41] Eroğul, U., Sentiment Analysis in Turkish. **MSc Thesis, Middle East Technical University**, Ankara, Turkey, 2009.
- [42] Vural, A.G., Cambazoğlu BB, Şenkul P, Tokgöz ZO., A frame work for sentiment analysis in Turkish: Application to polarity detection of movie reviews in Turkish, **27th International Symposium on Computer and Information Sciences**, Paris, France, 3-4 October 2012.
- [43] Meral, M., Diri, B., Twitter üzerinde duygu analizi, **IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı**, Trabzon, Türkiye, 23-25 Nisan 2014.
- [44] Şimşek, M., Özdemir, S., Analysis of the relation between Turkish twitter messages and stock market index, **6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)**, Tbilisi, Georgia, 17- 19 October 2012.
- [45] Türkmenoğlu, C., Tantuğ, A.C., Sentiment analysis in Turkish media, **Workshop on Issues of Sentiment Discovery and Opinion Mining (WISDOM '14)**, Beijing, China, 21-26 June 2014.
- [46] Nilsson, N.J., Introduction to machine learning: An early draft of a proposed textbook, (1996).
- [47] Chao, W-L., Machine Learning Tutorial, **Disp. Ee. Ntu. Edu. Tw**, (2011).

- [48] Caruana, R., and Niculescu-Mizil, A., An empirical comparison of supervised learning algorithms, **Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning**. ACM, 2006.
- [49] Sebastiani, F., Machine learning in automated text categorization, **ACM computing surveys (CSUR)**, 34.1, 2002.
- [50] Bilgin, M., Makine Öğrenmesi., **Papatya Yayıncılık**, Istanbul, (2018).
- [51] Witten, I.H., et al., Data Mining: Practical machine learning tools and techniques, **Morgan Kaufmann**, 2016.
- [52] Çetin, M., and Amasyalı, M.F., Supervised and Traditional Term Weighting Methods for Sentiment Analysis., **Sinyal İşleme Kurultayı**, (2013)
- [53] Airline Twitter Sentiment, <https://www.crowdfunder.com/data-for-everyone/>, Online: April 2017.
- [54] Kesim, M., Real time measurement of micro changes in dynamic images, **Msc. Thesis, Karadeniz Technical University**, Trabzon, Turkey, (2015).

# Taç eterlerin metal iyonları ile kompleksleşmesinin kondüktometriye Job's Plot yönteminin uygulanması ile belirlenmesi

Ümit ÇALIŞIR<sup>1</sup>, Baki ÇİÇEK<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Çağış Kampüsü, Balıkesir.

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, Çağış Kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 02.09.2019

Kabul Tarihi (Accepted Date): 18.09.2019

## Özet

Bu çalışma kapsamında benzo-tiyo ve benzo-okso taç eterler ile metal iyonları arasındaki iyon-dipol etkileşimleri Job's Plot yönteminin kondüktometriye uyarlanmasıyla belirlendi (Çözücü sistemi: %50 Asetonitril/su). Daha önce verilen mikrodalga sentez yöntemi kullanılarak yeniden sentezlenen **U1** (bis(1,2-dibenzo) oktatiyo tetrakarbonil-29-crown-6), **U2** (bis(1,2-dibenzo) tetratiyo tetrakarbonil-29-crown-6) taç eterlerinin NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>, AgNO<sub>3</sub>, CoCl<sub>2</sub> metal tuzlarıyla kompleksleşmeleri incelendi. Taç eter-katyon kompleksinin kompleksleşme oranı, kompleksleşme sabiti (**K<sub>e</sub>**) ve Serbest Gibbs Enerjisi (**ΔG<sup>0</sup>**) hesaplandı. Kondüktometri ile gerçekleştirilen çalışmalara göre **U1** bileşiği için kompleksleşme sabiti Na<sup>+</sup> > Zn<sup>2+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Ag<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > Co<sup>2+</sup> > Fe<sup>2+</sup> yönünde azalırken, **U2** bileşiği için Zn<sup>2+</sup> > Fe<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Co<sup>2+</sup> > Ag<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> yönünde değiştiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre taç eterler metal sensörü, biyoorganizmalardaki enzimler için inhibitör veya aktivatör ve sanayi-çevre uygulamalarında metal iyonlarının giderimi için kullanılabilirler.

**Anahtar kelimeler:** Kondüktometri, kompleks oluşum sabiti, kompleksleşme sabiti, Job's Plot yöntemi.

Ümit ÇALIŞIR, umitalisir@siirt.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-7699-2008>.

\* Baki ÇİÇEK, bcicek@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-1257-1188>.

## Determination of crown ether complexation with metal ions by application Job's Plot method to conductometry

### Abstract

*In this study, ion-dipole interactions between benzo-thio and benzo-oxo crown ethers and metal ions were determined by adaptation of Job's Plot method to conductivity (Solvent system: 50% Acetonitrile / water). The complexation properties of the crown ethers previously synthesized using microwave synthesis method (U1 (bis (1,2-dibenzo) octathio tetracarbonyl-29-crown-6), U2 (bis (1,2-dibenzo) tetrathio tetracarbonyl-29-crown-6)) and salts (NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>, AgNO<sub>3</sub>, CoCl<sub>2</sub>) were investigated. The complexation rate, complexation constant (Ke) and Free Gibbs Enthalpy ( $\Delta G^\theta$ ) of the crown ether-cation complex were calculated. According to the studies carried out by conductometry, the complexation constant for the compound U1 decreased in the direction  $Na^+ > Zn^{2+} > Ca^{2+} > Ag^+ > K^+ > Mg^{2+} > Co^{2+} > Fe^{2+}$ , while for the U2 compound  $Zn^{2+} > Fe^{2+} > Na^+ > K^+ > Co^{2+} > Ag^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$  were observed. According to the results of this study, selected crown ethers can be used for metal sensor, inhibitor or activator for enzymes in bioorganisms and metal trap in industrial-environmental applications.*

**Keywords:** Conductometry, complex formation constant, complexation constant, Job's Plot method.

### 1. Giriş

Makro halkalı bileşiklerin bir üyesi olarak taç eterler 1960'lı yıllardan beri bilinmektedir [1–4]. İçermiş oldukları hidrojen ve karbon atomlarından oluşan bir hidrofobik dış kavite ile apolar karakter gösterirken, oksijen, kükürt, azot gibi elementlerin birini ya da birkaçını içermesi durumlarından kaynaklı hidrofilik polar bir iç kaviteye sahiptir [5]. Bu polar iç kavitesi sayesinde kationlarla kararlı kompleksler oluşturmaktadır. İçermiş olduğu oksijen, azot ve kükürt atomları halkaya farklı kationları bağlama özelliği sunmaktadır [6,7]. Örneğin oksijen içeren analogları daha çok sert metallerin kationlarını bağlarken, kükürt ve azot bu ilgiyi yumuşak olarak nitelendirilen kationlara yönlendirmektedir. Aynı zamanda taç eterler bu iç kavite sayesinde çoklu kation içeren ortamlardan bazı metallerle seçimli olarak kompleks yapabilmektedir [8–12]. Bu seçimli kompleksleşme metal afinitesi olarak tanımlanmakla birlikte halka üzerindeki S, O ve N atomlarının kombinasyonu ile yumuşak/sert kationlarını aynı anda seçimli bağlayan sistemler tasarlanabilmektedir [13–17]. Taç eterlerin metallerle olan kararlı kompleksleri taç eterleri metal uzaklaştırma ajanı olarak kullanılabilmesi taç eterlere ayrı bir boyut kazandırmıştır [18]. Kondüktometri çok düşük derişimlerde çalışma, hızlı yanıt süresi, pratik olması gibi imkânlar sunarken potansiyometrik çalışmalara göre çoklu element sistemlerinde kompleksleşme seçiciliğinin belirlenmesine olanak sağlamamaktadır [19,20]. Ortamdaki toplam iletkenlik üzerinden değerlendirmeler yapmaya imkân sağlamaktadır. İkili sulu-çözücülü sistemler kimya sektöründe oldukça fazla kullanım alanlarına sahiptir [10,21]. Bu sistemlerin biyokimyadan biyofizik anabilim dallarına birçok kullanımı mevcuttur. Bu amaçla birçok su ile karışabilen çözücü (asetonitril, dioksan, etanol, metanol, DMSO vb.) kullanılabilir [22,23]. Sürekli değışimler yöntemi 1928 yılında Job tarafından sunulduğundan Job's Plot yöntemi adıyla da

bilinmektedir [24]. M ve L gibi iki türün bulunduğu çözeltilerde, M türü B ile bağlanabilir. Bazı durumlarda, birden fazla M tek bir L'ye bağlanır. L'ye bağlanma miktarını (bağlanma stokiyometrisi) belirlemenin yöntemlerinden birisi Job's Plot grafiği kullanmaktır. Günümüzde analitik kimya ve biyokimyada sık sık kullanılmaktadır [25–27]. Job's Plot yöntemi genellikle Kompleksleşmeyi yapan bileşiklerden birinin mol kesrine karşılık UV absorbansının grafik edilmesiyle belirlenmektedir [27]. Bu çalışmada grubumuzca daha önceki çalışmamızda sentezlenen bileşikler [16] kullanılarak kondüktometri yönteminin Job's Plot üzerine uygulanmasıyla kompleksleşme oranı ve sabitlerinin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Yaklaşık aynı halka boyutuna sahip taç eterlerin farklı heteroatom kombinasyonları seçilerek farklı yarıçapa ve sertliklere sahip katyonları bağlamak hedeflenmiştir.

## 2. Deneysel çalışmalar

### 2.1. Kullanılan cihazlar ve kimyasal malzemeler

Bu çalışmada kullanılan tuzlar ticari olarak (Sigma Aldrich, Carlo Erba, Merck, Roth) yüksek saflıklarda ( $\geq$  % 98.5) temin edilmiştir. Sulu çözeltiler hazırlanırken Human Corporation marka New Human Power I S-UV model ultra saf su cihazından üretilen 18.3 M $\Omega$ /cm dirençte ultra saf su kullanılmıştır. Çözücü sistemi (%50 Asetonitril/su) hazırlanırken HPLC saflıkta (Sigma Aldrich, gradient grade  $\geq$ % 99.9) Asetonitril kullanılmıştır. Deneylerde hassas terazi (KERN ABJ (d=0.1 mg)), otomatik pipet (ErgOne ve Brand), dispanser (Brand marka 0,5-5 mL ve 1-10 mL), ultrasonik banyo (Bandolin), manyetik karıştırıcı (IKA C-MAG HS-7), pH metre (Hanna HI 2211, probu HI1131), kondüktometre (Mettler Toledo SevenCompact Conductivity S230 ve Mettler Toledo InLab 741 ISM elektrot) kullanılmıştır.

### 2.2. Benzo-tiyo ve benzo-okso taç eterlerin sentezi

Çalışma kapsamında kullanılan taç eterler mikrodalga sentez yöntemiyle daha önceki çalışmalarımızda verilen prosedürlere göre sentezlenmiştir. Sentezlenen U1 (bis(1,2-dibenzo) oktatiyo tetrakarbonil-29-crown-6) benzo-tiyo taç eteri ve U2 (bis(1,2-dibenzo) tetratiyo tetrakarbonil-29-crown-6) benzo-okso taç eteri çalışmada kullanılmıştır [16].

### 2.3. Kondüktometrik yöntem

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneyler 25°C'deki sıcaklık hücrelerinde gerçekleştirilmiştir. Kompleksleşmesi belirlenecek çözelti karışımı 10 mL balon jodede hazırlanarak iletkenlik hücrelerine alınmıştır. İçerisine homojen dağılımın gerçekleşebilmesi amacıyla manyetik balık ilave edilerek çözeltinin sabit sıcaklığa ulaşması amacıyla 3 dakika sabit hızda karıştırılmıştır. İçerisine elektrot daldırılarak yine sıcaklığın dengeye ulaşması için 2 dakika beklenilmiştir. Beşinci dakikanın sonunda art arda 10 ölçüm alınmıştır. Çalışma tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçların ortalaması hesaplamalarda kullanılmıştır [17,19–21,28].

## 3. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışma kapsamında benzo-tiyo ve benzo-okso taç eterler ile metal iyonları arasındaki iyon-dipol etkileşmeleri Job's Plot yönteminin kondüktometriye uyarlanmasıyla belirlendi (Çözücü sistemi: %50 Asetonitril/su). Kompleksleşme oranı, Kompleksleşme sabiti, serbest Gibbs enerjisi gibi iletkenlik parametreleri hesaplandı. Önceden klasik ve



mikrodalga sentez yöntemleriyle sentezlenen, sıvı-sıvı iyon çiftleri metal ekstraksiyonu ile metal seçicilikleri belirlenen bileşiklerin, U1 (bis(1,2-dibenzo) oktatiyo tetrakarbonil-29-crown-6), U2 (bis(1,2-dibenzo) tetratiyo tetrakarbonil-29-crown-6), NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O, ZnCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, AgNO<sub>3</sub>, CoCl<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O metal tuzlarıyla kondüktometrik yöntemle kompleksleşmeleri incelenmiştir (Şekil 1) [16].

Kondüktometrik olarak gerçekleştirilen çalışmada elde edilen veriler kullanılarak Tablo 1’de verilen kompleksleşme oranı, kompleksleşme sabiti ve serbest Gibbs enerjisi 1-3 denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır [19]. Buna göre kompleksleşme denklemi (1) şu şekildedir;



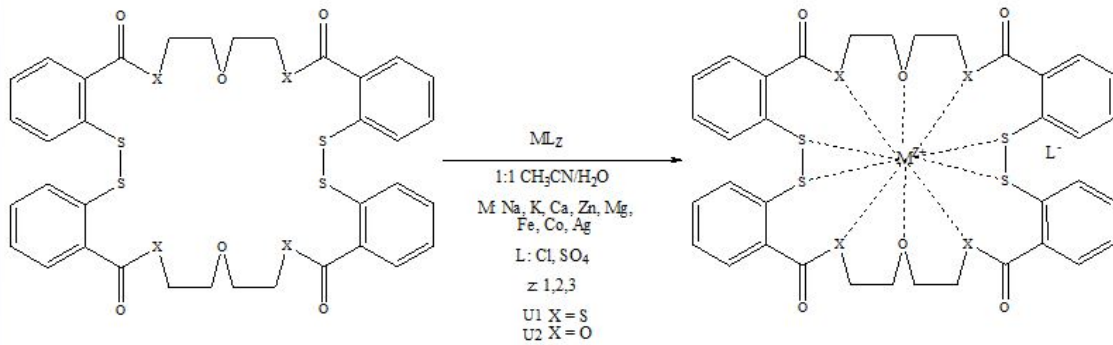
Bu denkleme göre M<sup>m+</sup>, L sırasıyla kation, ligandı simgeler. Bunun sonucu olarak farklı oranlarda kompleks oluşumu için K<sub>e</sub> denge sabiti (2) ile yazılabilir.

$$K_e = \frac{M_aL_b^{m+}}{[M^{m+}]^a[L]^b} \quad (2)$$

Ayrıca kompleksleşme oranı ise denge anındaki tuzun miktarının ligandın miktarına oranı hesaplanarak elde edilir (3) [24]. Burada n<sub>M</sub> tuzun mol sayısı ve n<sub>L</sub> ise ligandın mol sayısıdır.

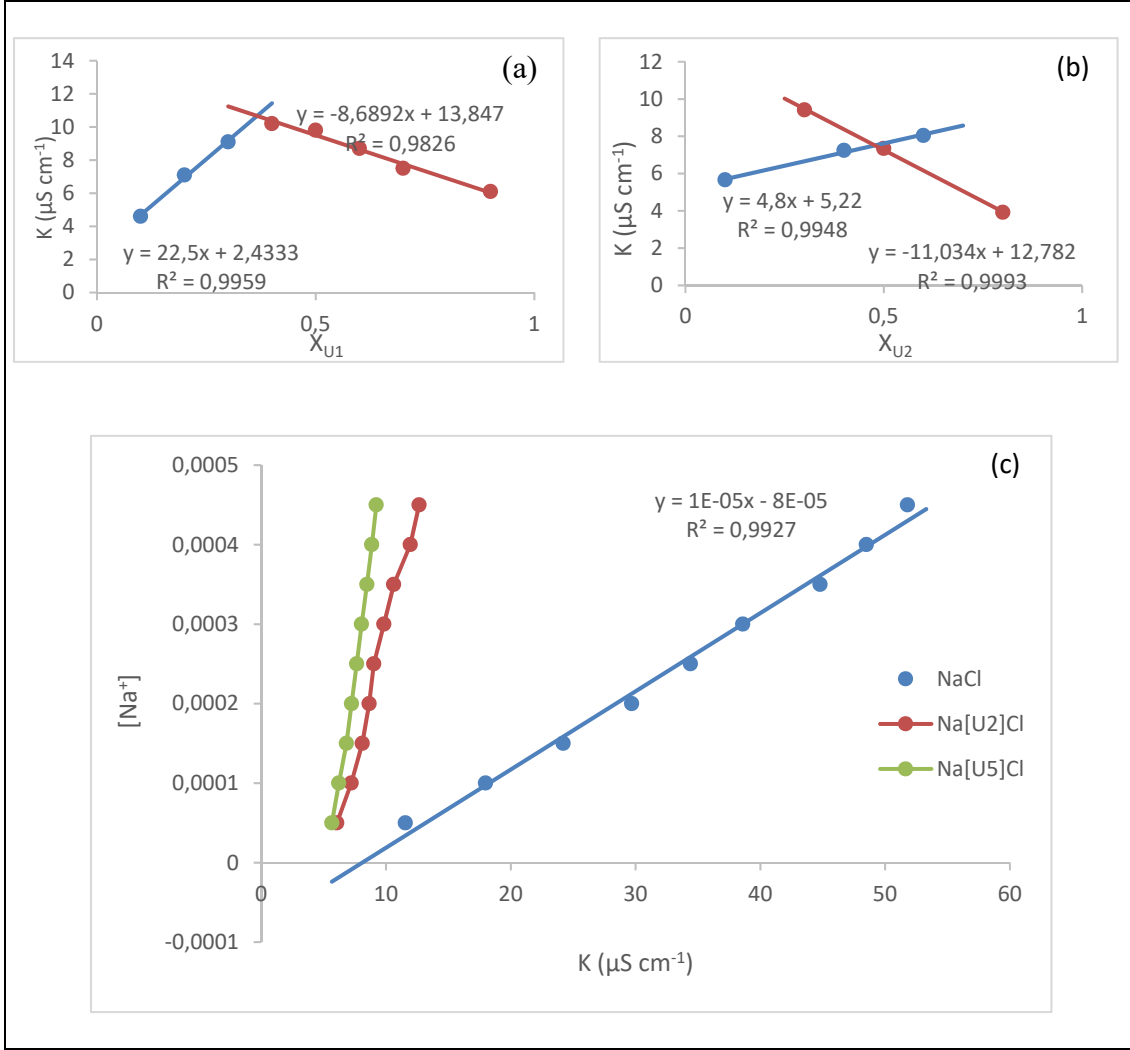
$$\text{Kompleksleşme Oranı} = \frac{n_M}{n_L} \quad (3)$$

(1) nolu denklem U1 ve U2 taç eterlerine uygulandığında, ayrıntılı kompleksleşme mekanizması şu şekilde çizilebilir (Şekil 1).



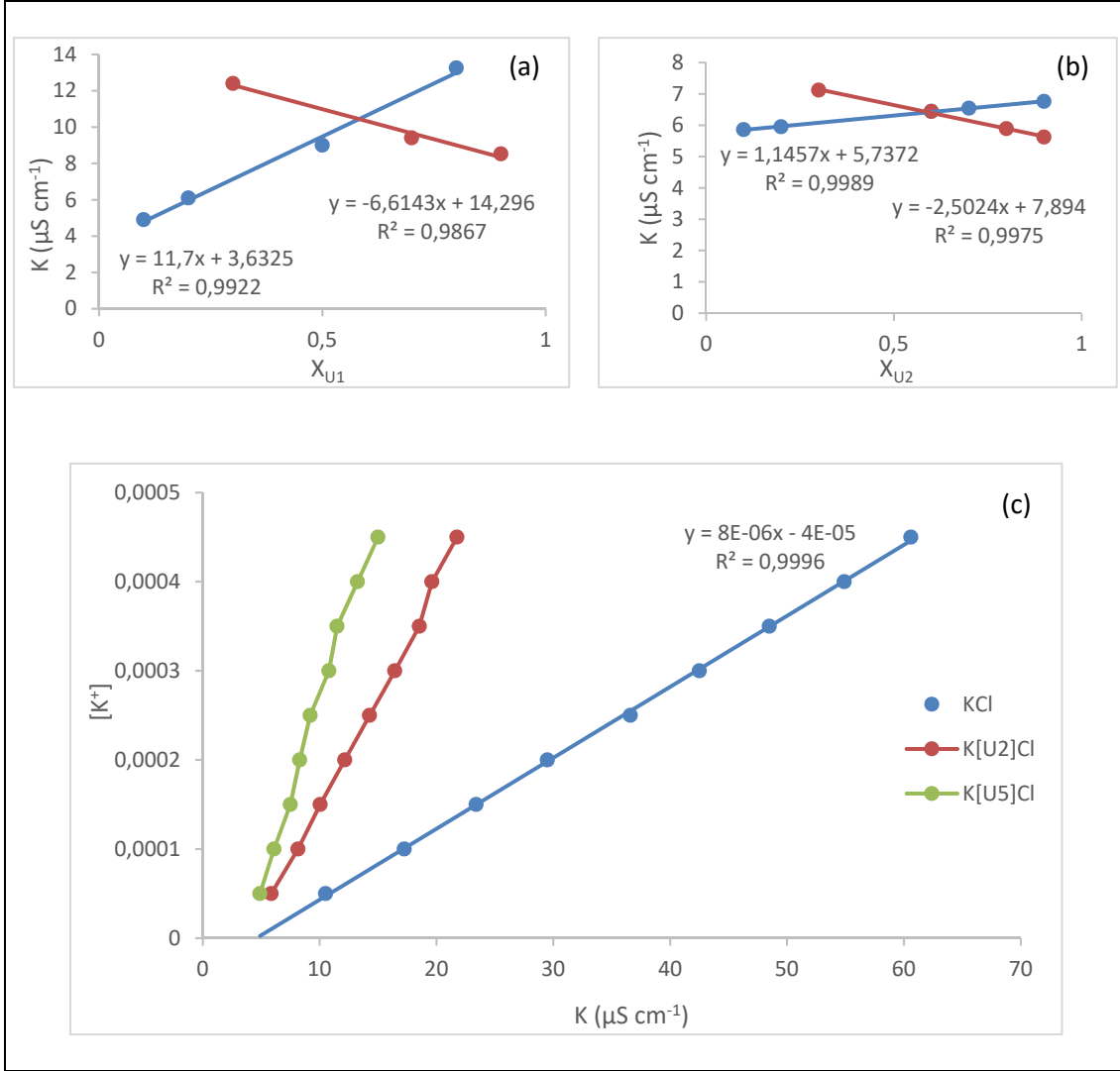
Şekil 1. U1 ve U2 benzo tiyo ve benzo okso taç eterleri ile metal tuzlarının % 50 asetonitril/saf su içerisinde kompleksleşmeleri

U1 ve U2 taç eterleri ile NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O, ZnCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, AgNO<sub>3</sub>, CoCl<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O metal tuzlarının iletkenlik verileri kullanılarak kompleksleşme oranı ve kompleksleşme grafikleri (Şekil 2-9 a-b-c) elde edilmiştir.



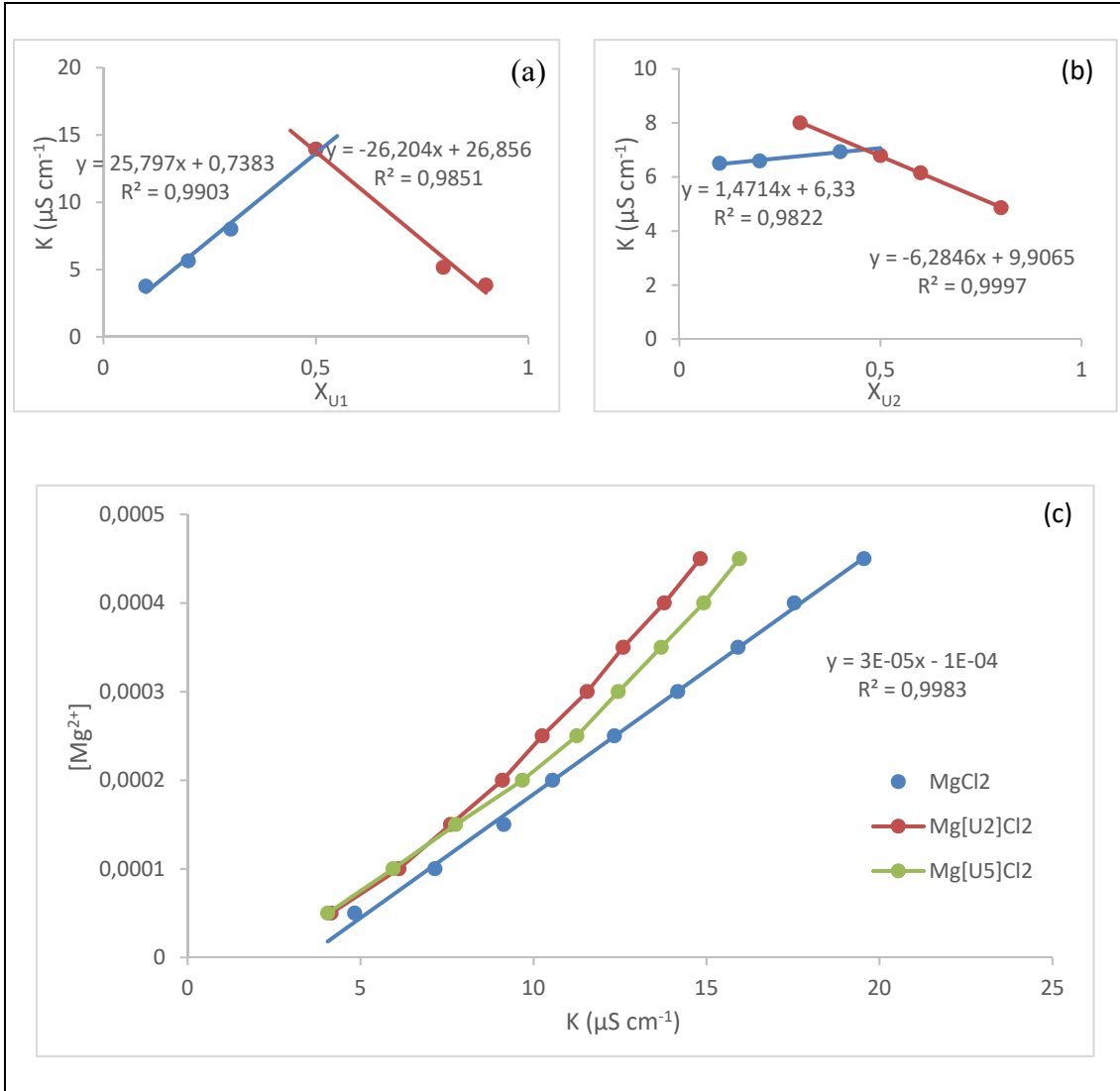
Şekil 2. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a) U1 ligantının, (b) U2 taç eterinin sodyum iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c) NaCl ile U1 ve U2 kompleksleri için gözlenen iletkenlik ( $K$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )) karşı  $[\text{Na}^+]$  ( $\text{mol L}^{-1}$ ) iyonu değişimi grafikleri

Şekil 2 incelendiğinde sodyum klorür tuzu ile U1 ve U2 taç eterlerinin kompleksleşme oranları (tuz/ligand) sırasıyla 3/2 ve 1/1 olarak tespit edilmiştir (Tablo 1). Bu durum U1 tiyo taç eterinin diğer okso taç etere göre daha çok kükürt atomu içermesinden kaynaklanmaktadır. Kükürt atomları taç eter içerisinde hacimli olmaları sebebiyle halka dışına doğru yönelmiştir. Oldukça küçük bir iyon çapına sahip olan sodyum iyonu okso taç eterin iç halka kavitesine tam 1/1 yerleşirken, U2 taç eteri sandviç kompleks yapmaktadır. Nispeten küçük iyon çapı, küçük iyon yükü sodyum ile kompleksleşmeyi artırmıştır. Her iki taç eter de neredeyse en çok kompleksleşmeyi sodyum iyonu ile yapmıştır. Son olarak şekil 2c incelendiğinde artan konsantrasyonla doğru orantılı olarak kompleksleşmenin arttığı gözlenmiştir.



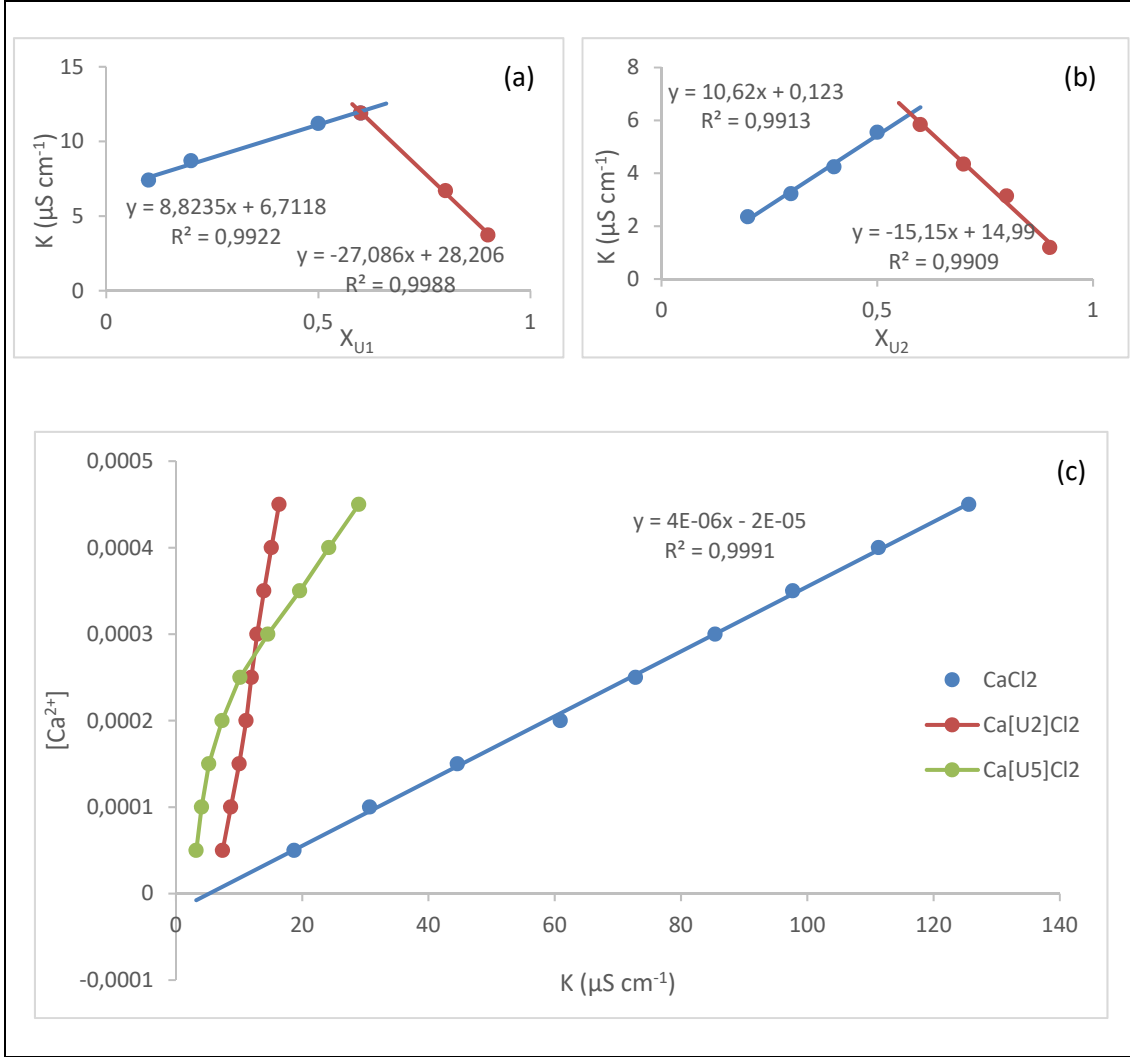
Şekil 3. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a) U1 ligantının, (b) U2 taç eterinin potasyum iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c) KCl ile U1 ve U2 kompleksleri için gözlenen iletkenlik (K (μS cm<sup>-1</sup>)) karşı [K<sup>+</sup>] (mol L<sup>-1</sup>) iyonu değişimi grafikleri

Potasyum klorür tuzunun U1 ve U2 taç eterleriyle yapmış oldukları kompleksler incelendiğinde oluşan komplekslerin kompleksleşme oranlarının aynı oldu görülmektedir (2/3). Elde edilen kompleksleşme oranlarının kompleksleşme sabiti Ke'nin hesabında kullanılmasıyla oldukça yüksek kompleksleşmenin olduğu tespit edilmiştir (logKe, U1:14; U2:19). Ayrıca şekil 3c'de verilen kompleksleşme grafiği iki taç eter arasındaki kompleksleşmeyi karşılaştırmamıza olanak sağlamaktadır. Buna göre kükürt oranı az olan ve okso taç eter özelliği taşıyan U2 taç eteri diğer tiyo taç eterden daha yüksek kompleksleşmeye sahiptir.



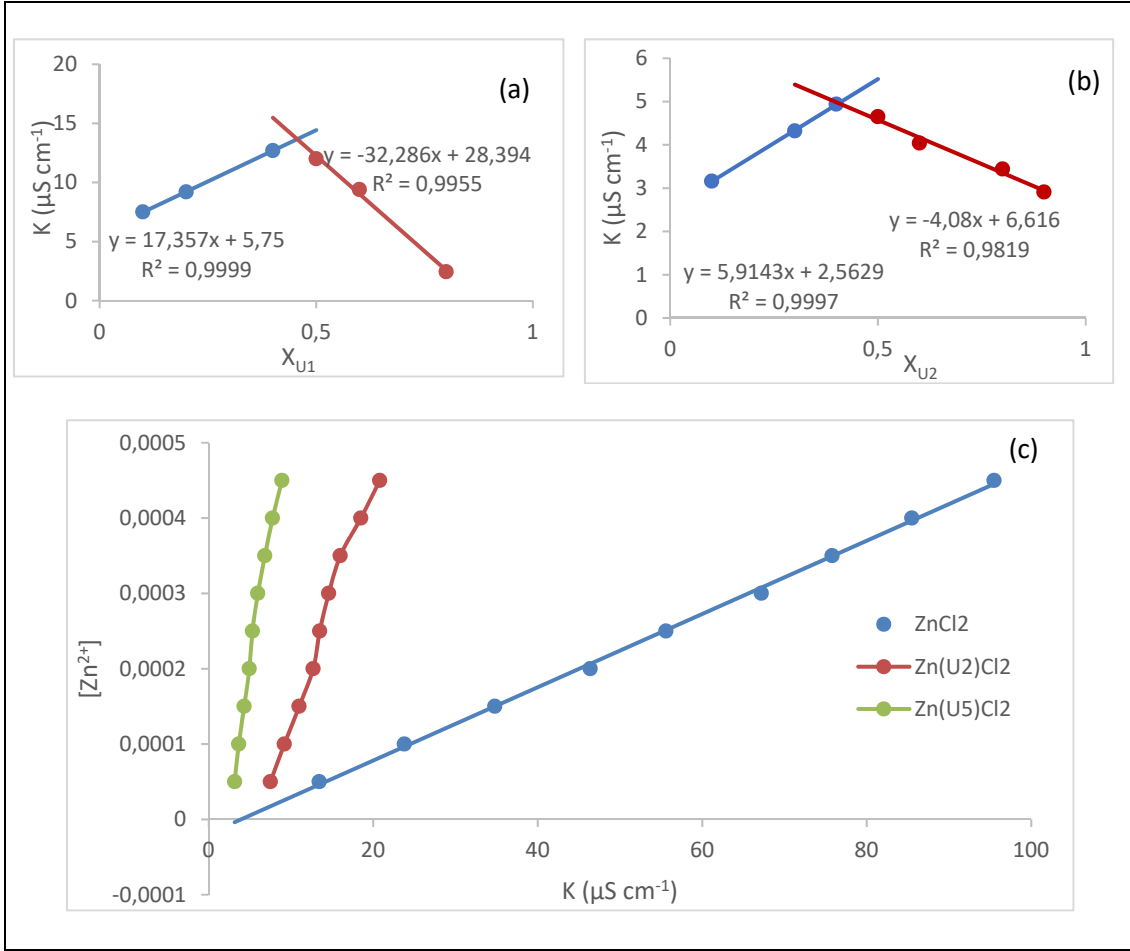
Şekil 4. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a) U1 ligantının, (b) U2 taç eterinin magnezyum iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c)  $\text{MgCl}_2$  ile U1 ve U2 kompleksleri için gözlenen iletkenlik ( $K$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )) karşı  $[\text{Mg}^{2+}]$  ( $\text{mol L}^{-1}$ ) iyonu değişimi grafikleri

Artan ligant konsantrasyonuna karşılık azalan tuz konsantrasyonunun kompleksleşmelerinin incelenmesiyle elde edilen kompleksleşme oranlarına göre (Şekil 4 a-b) tuz/ligand kompleksleşme oranları hem U1 hem de U2 taç eterleri için 1/1 olarak belirlenmiştir. Tablo 1 incelendiğinde  $\text{Mg}^{2+}$  iyonu ile hem U1 hem de U2 taç eterlerinin diğer iyonlara kıyasla daha az kompleksleşme gösterdiği görülmektedir ( $\log K_e$  değerleri; U1: 6.36; U2: 4.94). Ancak daha ayrıntılı kompleksleşmelerine bakıldığında (Şekil 4c) yüksek konsantrasyonlarda kompleksleşmenin arttığı ve tiyo taç eter olan U1 taç eterinin U2 taç eterine göre daha yüksek kompleksleşmeye sahip olduğu gözlenmektedir.



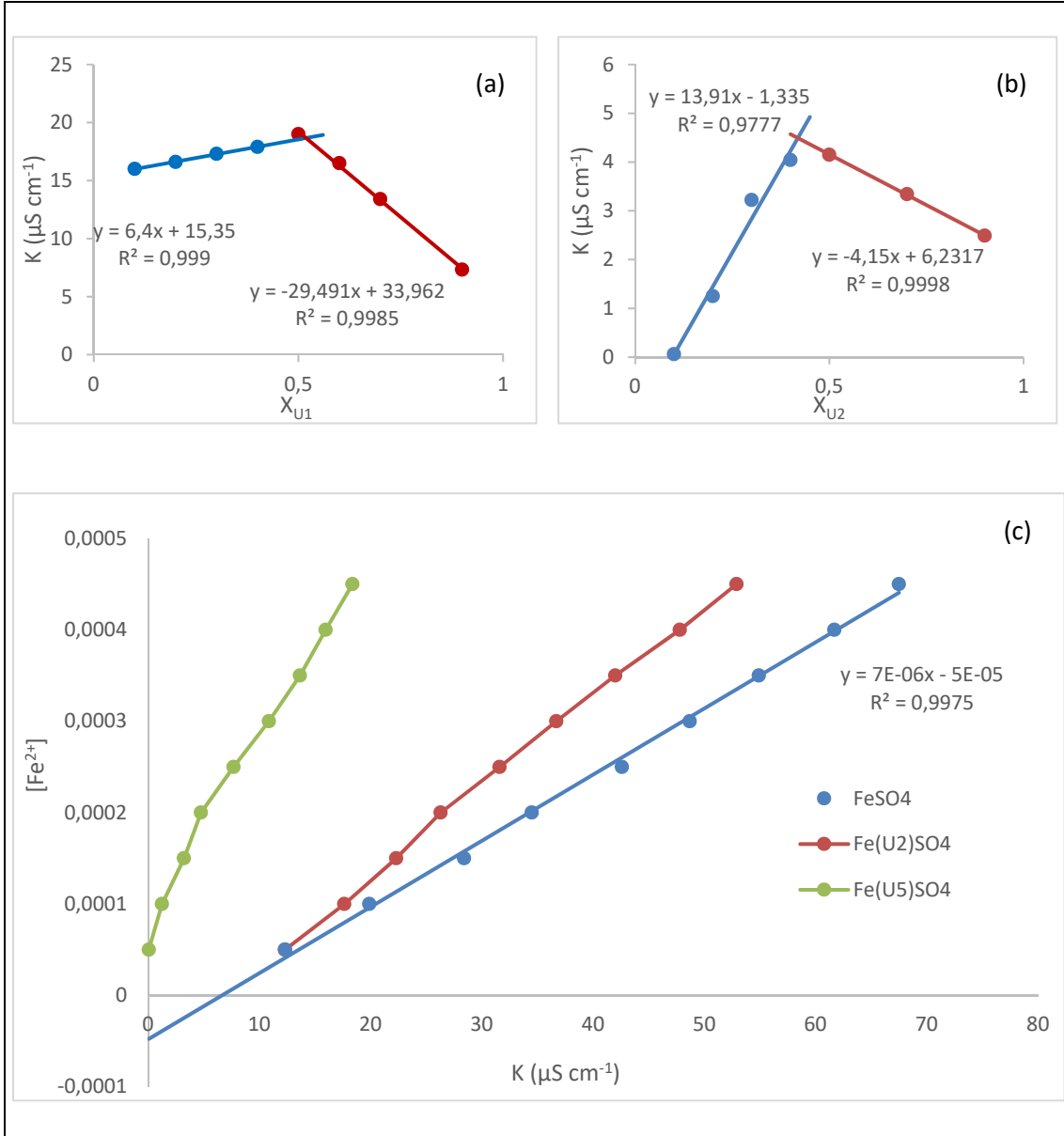
Şekil 5. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a) U1 ligantının, (b) U2 taç eterinin kalsiyum iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c) CaCl<sub>2</sub> ile U1 ve U2 kompleksleri için gözlenen iletkenlik ( $K$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )) karşı  $[\text{Ca}^{2+}]$  ( $\text{mol L}^{-1}$ ) iyonu değişimi grafikleri

$\text{Ca}^{2+}$  iyonu ile yapılan kondüktometrik kompleksleşme çalışmasında kompleksleşme oranı hem U1 hem de U2 ligantları için 2/3 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5 a-b). Kompleksleşme sabitleri incelendiğinde U1 taç eteri için  $\log K_e = 17,79$  ve U2 taç eteri için  $\log K_e = 12,18$  olarak tespit edilmiştir (Tablo 1). Hem U1 hem de U2 taç eterleri oldukça yüksek kompleksleşme göstermişlerdir (Şekil 5 c).



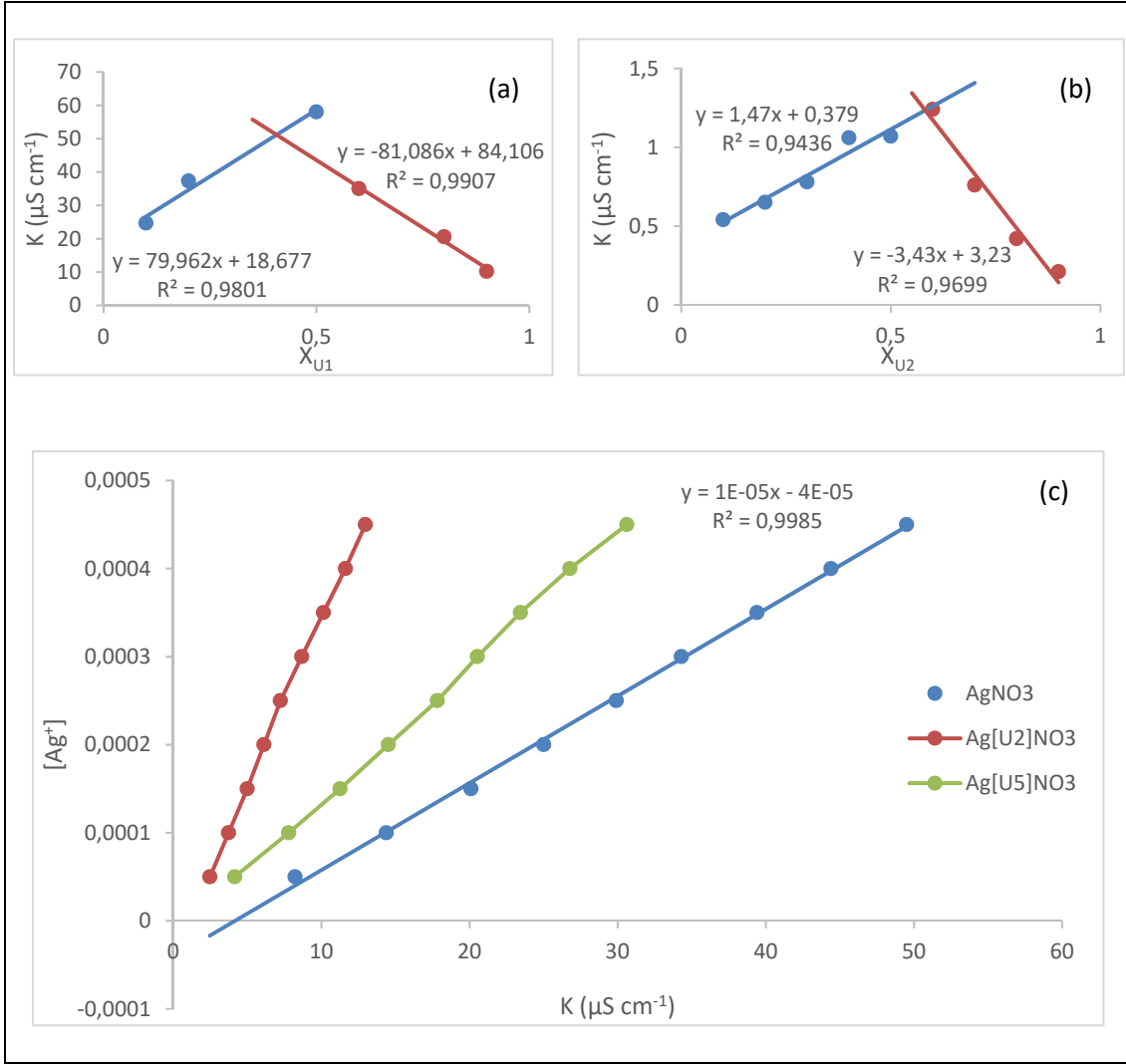
Şekil 6. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a) U1 ligantının, (b) U2 taç eterinin çinko iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c)  $\text{ZnCl}_2$  ile U1 ve U2 kompleksleri için gözlenen iletkenlik ( $K$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )) karşı  $[\text{Zn}^{2+}]$  (mol  $\text{L}^{-1}$ ) iyonu değişimi grafikleri

Çinko iyonu tiyo taç eter (U1) ve okso taç eter (U2) bileşikleri ile Şekil 6 a-b'de tespit edildiği gibi 3/2 oranında kompleksleşme yapmıştır. Her iki bileşik de yüksek kompleksleşme göstermiştir. Ancak iki ligand kıyaslandığında okso taç eter olan U2 taç eterinin daha yüksek kompleksleşme sabitine sahip olduğu gözlenmektedir ( $\log K_e: 18.71 < 20.34$ ).



Şekil 7. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a) U1 ligantının, (b) U2taç eterinin demir iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c) FeSO<sub>4</sub> ile U1 ve U2 kompleksleri için gözlenen iletkenlik ( $K$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )) karşı  $[\text{Fe}^{2+}]$  (mol  $\text{L}^{-1}$ ) iyonu değişimi grafikleri

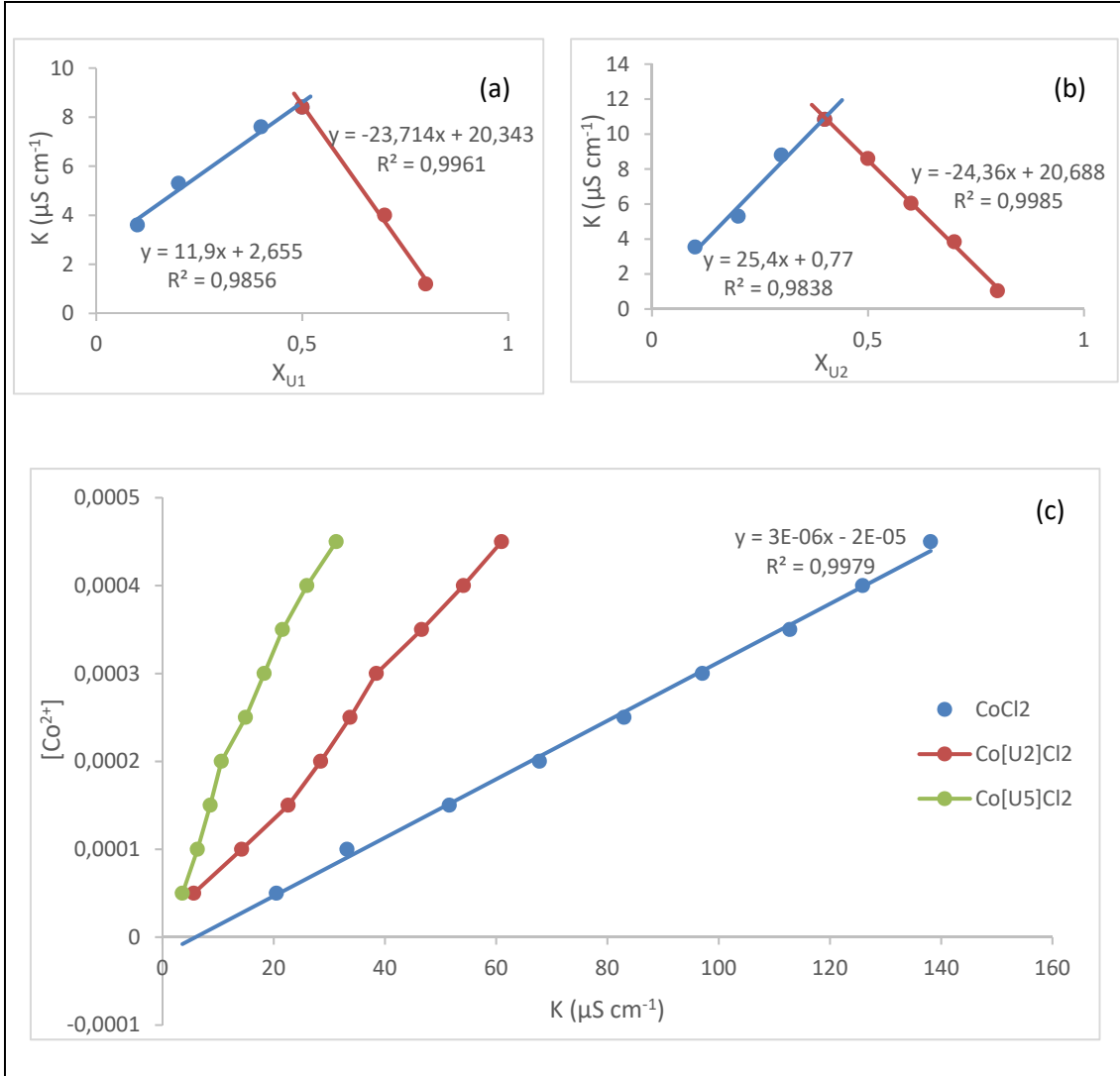
Şekil 7 ve Tablo 1 incelendiğinde  $\text{Fe}^{2+}$  seçici olarak okso taç eter (U2) ile yüksek kompleksleşme gösterirken, tiyo taç eter (U1) ile oldukça düşük kompleksleşme göstermiştir. Kompleksleşme oranları ise sırasıyla 1/1 ve 3/2'dir. Kompleksleşme oranının artması kompleksleşmeyi de artırmaktadır. Okso taç eterin boşluk çapının demir (II) iyonu ile uyumlu olması kompleksleşmenin artmasını sağlamıştır.



Şekil 8. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a)  $U_1$  liganının, (b)  $U_2$  taç eterinin gümüş iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c)  $AgNO_3$  ile  $U_1$  ve  $U_2$  kompleksleri için gözlenen iletkenlik ( $K$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )) karşı  $[Ag^+]$  ( $\text{mol L}^{-1}$ ) iyonu değişimi grafikleri

Gümüş iyonları hem tiyo hem de okso taç eterlerle benzer kompleksleşme göstermiştir ( $\log K_e \approx 14$ ). Ancak kompleksleşme oranları birbirinden farklıdır (sırasıyla  $U_1$  ve  $U_2$  için  $3/2$  ve  $2/3$ , Tablo 1 ve Şekil 8 a-b). Bu durum bahsedildiği üzere tiyo taç eterde yer alan kükürt atomlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Şekil 8 c'de artan gümüş konsantrasyonuna karşılık gözlenen iletkenlik değerleri grafik edilmiş ve tiyo taç eter olan  $U_1$ 'nin okso taç eter türevi olan  $U_2$ 'den daha çok kompleksleşme yaptığı gözlenmiştir.





Şekil 9. 25 °C da % 50 asetonitril/su içerisinde (a) U1 ligantının, (b) U2 taç eterinin kobalt iyonu ile kompleksleşme oranının tespit edilmesi, (c)  $\text{CoCl}_2$  ile U1 ve U2 kompleksleri için gözlenen iletkenlik ( $K$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )) karşı  $[\text{Co}^{2+}]$  ( $\text{mol L}^{-1}$ ) iyonu değişimi grafikleri

Şekil 9’da verilen grafikler incelendiğinde kobalt iyonu ile U1’nin 1/1 oranında kompleksleştiği U2’in ise 3/2 oranında kompleksleştiği gözlemlenmiştir. Bu kompleksleşme stokiyometrik katsayıları kullanılarak kompleksleşme sabitleri hesaplanmıştır. Kompleksleşme sabitleri kıyaslandığında U1’nin daha az kompleksleşme yaptığı ( $\log K_e=6.01$ ) gözlemlenirken, U2’in kobalt iyonu ile kompleksleşmesinin oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir ( $\log K_e=19.03$ ). Bu durumu Şekil 9c desteklemektedir.

Bu çalışma kapsamında daha önceki çalışmamızda [9] sentezlediğimiz bileşikler (U1 ve U2) için kompleksleşme sabitlerinin kondüktometri yöntemiyle belirlenmesi yapılmıştır. Bu amaçla ilk olarak Job’s Plot yönteminin kondüktometriye uyarlanmasıyla kompleksleşme oranları tespit edilmiştir (Şekil 2-9 a-b). Daha önceki birçok metal/ligand kompleksleşme çalışmasında stokiyometrik katsayılar 1/1 oranında kabul edilmiş ve bir metalin bir ligand tarafından bağlandığı düşünülmüştür. Ancak bu çalışma kapsamında 1:1 (1/1) komplekslerin yanında sandviç komplekslerin (2/1, 1/2, 2/3, 3/2) oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu kompleksleşme oranlarının kullanılmasıyla kompleksleşme sabitleri  $K_e$ ,

Log  $K_e$  ve  $-\Delta G^\theta$  hesaplanmıştır (Tablo 1). Elde edilen sonuçlara göre seçilen U1 ve U2 bileşiklerinin NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O, ZnCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, AgNO<sub>3</sub>, CoCl<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O metal tuzlarıyla kompleks oluşturdıkları gözlenmiştir.

Tablo 1. U1 ve U2 taç eteri ile bazı katyonların kompleksleşme oranları, kompleksleşme sabitleri ve serbest Gibbs enerjileri

Taç Eter	Katyon	Kompleksleşme Oranı ( $n_{\text{tuz}}/n_{\text{ligand}}$ )	$K_e$	Log $K_e$	$-\Delta G^\theta$
U1	Na <sup>+</sup>	3/2	$1.43 \times 10^{19}$	19.16	26117.79
	K <sup>+</sup>	2/3	$7.41 \times 10^{13}$	13.87	18910.93
	Mg <sup>2+</sup>	1/1	$2.29 \times 10^{+6}$	6.36	8672.45
	Ca <sup>2+</sup>	2/3	$6.17 \times 10^{+17}$	17.79	24256.17
	Zn <sup>2+</sup>	3/2	$5.18 \times 10^{+18}$	18.71	25515.60
	Fe <sup>2+</sup>	1/1	$5.23 \times 10^{+4}$	4.71	6432.919
	Ag <sup>+</sup>	3/2	$2.57 \times 10^{+14}$	14.41	19647.40
	Co <sup>2+</sup>	1/1	$1.03 \times 10^{+6}$	6.01	8198.47
U2	Na <sup>+</sup>	1/1	$1.83 \times 10^{+19}$	19.26	26265.58
	K <sup>+</sup>	2/3	$1.36 \times 10^{+19}$	19.13	26087.36
	Mg <sup>2+</sup>	1/1	$8.88 \times 10^{+4}$	4.94	6746.77
	Ca <sup>2+</sup>	2/3	$1.52 \times 10^{+12}$	12.18	16609.19
	Zn <sup>2+</sup>	3/2	$2.19 \times 10^{+20}$	20.34	27733.63
	Fe <sup>2+</sup>	3/2	$2.17 \times 10^{+19}$	19.33	26366.39
	Ag <sup>+</sup>	2/3	$2.05 \times 10^{+14}$	14.31	19512.58
	Co <sup>2+</sup>	3/2	$1.07 \times 10^{+19}$	19.03	25946.86

Elde edilen kompleksleşme verileri değerlendirildiğinde U1 ile en yüksek kompleksleşme Na<sup>+</sup> iyonu ile gerçekleşmiştir (log  $K_e=19.16$ ). U1 taç eteri en düşük kompleksleşme ise Fe<sup>2+</sup> iyonu ile olduğu gözlenmiştir (log  $K_e=4.71$ ). En yüksek kompleksleşmeden en düşük kompleksleşmeye doğru sıraladığımızda Na<sup>+</sup> > Zn<sup>2+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Ag<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > Co<sup>2+</sup> > Fe<sup>2+</sup> şeklindedir (sırasıyla log  $K_e = 19.16 > 18.71 > 17.79 > 14.41 > 13.87 > 6.36 > 6.01 > 4.71$ ). U2 taç eteri için Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Zn<sup>2+</sup> ve Co<sup>2+</sup> iyonları en yüksek kompleksleşmeye sahiptir. En az kompleksleşme yapan iyon Mg<sup>2+</sup> iyonudur. En yüksek kompleksleşmeden en düşük kompleksleşmeye doğru sıraladığımızda Zn<sup>2+</sup> > Fe<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Co<sup>2+</sup> > Ag<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> şeklindedir (sırasıyla log  $K_e = 20.34 > 19.33 > 19.26 > 19.13 > 19.03 > 14.31 > 12.18 > 4.94$ ).

Bu çalışmadan elde edilen veriler daha önceki çalışmamızda sıvı-sıvı iyon çiftleri metal ekstraksiyonu ile elde edilen veriler ile çoğunlukla benzerdir. Job's Plot yöntemiyle kompleksleşme stokiyometrilere tespit edilmesi, gerçek kompleksleşme sabitlerinin hesaplanmasına olanak sağlamıştır. Benzo tiyo taç eter (U1) bileşiminde hacimli kükürt atomlarının sayısının fazla olması ve konformasyonu sebebiyle geçiş metallerine olan ilgisi benzo-okso taç eter (U2) bileşiminden daha düşüktür.

## Kaynaklar

- [1] Zhou, Q.Z., He, C.L., Gu, H.N., Miao, Q.M., Zhai, C.X., Convenient synthesis of aryl-incorporated ditosylates and their application in preparation of crown ethers with higher yield, **Chinese Chemical Letters**, 19, 911–914, (2008).
- [2] Pedersen, C.J., Cyclic Polyethers and Their Complexes with Metal Salts, **Journal of the American Chemical Society**, 89, 10, 2495-2496, (1967).
- [3] Pedersen, C.J., Macrocyclic Polyethers: Dibenzo-18-Crown-6 Polyether and Dicyclohexyl-18-Crown-6 Polyether, **Organic Syntheses**, 52, 66, (1972).
- [4] Pedersen, I.S., Prize, N., Crown, C.E., **Chapter 2 Crown Ethers**, 10, 34–54, (1987).
- [5] Parker, D., **Macrocyclic Compounds-Synthesis**, II. Series, Oxford University Press, New York, 1996.
- [6] Water, L.G.A.V., Driessen, W.L., Glenney, M.W., Reedijk, J., Schröder, M., Selective and reversible extraction of heavy metal-ions by mixed-donor crown ether-modified oxirane and thirane resins, **Reactive and Functional Polymers**, 51, 33–47, (2002).
- [7] Yordanov, A.T., Roundhill, D.M., Solution extraction of transition and post-transition heavy and precious metals by chelate and macrocyclic ligands, **Coordination Chemistry Reviews**, 170, 93–124, (1998).
- [8] Lu, T., Wang, X., Tan, M., Liu, Y., Inoue, Y., Hakushi, T., Studies on rare-earth complexes with crown ethers. Part XXV. Synthesis, characterization, and structure of the complexes of lanthanite nitrates with 13-crown-4, **Helvetica Chimica Acta**, 76, 241–247, (1993).
- [9] Bruening, R.L., Tarbet, B.J., Krakowiak, K.E., Bruening, M.L., Izatt, R.M., Bradshaw, J.S., Quantitation of cation binding by silica gel bound thiamacrocycles and the design of highly selective concentration and purification columns for palladium(II), gold(III), silver(I), and mercury(II), **Analytical Chemistry**, 63, 1014–1017, (1991).
- [10] Çiçek, B., Çakir, Ü., Azizoglu, A., The associations of macrocyclic ethers with cations in 1,4-dioxane/ water mixtures; Potentiometric Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> binding measurements and computational study, **Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry**, 72,121–125, (2012).
- [11] Çakir, Ü., Çiçek, B., Yildiz, 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).
- [12] Çiçek, B., Onbaşıoğlu, Z., Synthesis and characterization of 1,3,4-thiadiazole-2,5-dithio crown ethers, **Heterocyclic Communication**, 22, 329–332, (2016).
- [13] Çakir, Ü., Çiçek, B., Extraction-ability and -selectivity of tetra-aza-crown ethers for transition metal cations, **Transition Metal Chemistry**, 29, 263–268, (2004).
- [14] Çiçek, B., Çalışır, Ü., The investigation of complexation properties and hard-soft acid-base relationship between thiacycrocrown ethers and metal ions, **Letters in Organic Chemistry**, 13, 572–577, (2016).
- [15] Çalışır, Ü., Benzo-tiyo crown eterlerin sentezi ve ekstraktif özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2014.
- [16] 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).
- [17] Çiçek, B., Yıldız, A., Synthesis, Metal ion complexation and computational studies

- of thio oxocrown ethers, **Molecules**, 16, 8670–8683, (2011).
- [18] Litvinova, V.V., Anisimov, A.V., Thiocrown compounds: synthesis and properties, **Chemistry of Heterocyclic Compounds**, 35, 12–22, (1999).
- [19] Çiçek, B., Çalışır, Ü., Bazı karbazol schiff bazlarının katyon bağlama özelliklerinin kondüktometrik incelenmesi, **Balikesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Dergisi**, 19, 246–256 (2017).
- [20] Çiçek, B., Synthesis of tetra-aza coronands and determination of complexity capabilities by potentiometric, conductometric and liquid-liquid extraction methods, PhD Thesis, Balikesir University, Institute of Science and Technology, Balikesir, 2002.
- [21] 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).
- [22] Erk, Ç., Cakir, 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).
- [23] Çakir, Ü., Çiçek, B., Erk, Ç., The association constants of macrocyclic ether-cation interactions in dioxane / water mixtures, part II, **Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry**, 275–278, (1998).
- [24] Job, P., Formation and stability of inorganic complexes in solution., **Annali di Chimica**, 9, 113–203, (1928).
- [25] Yang, L., Zhu, W., Fang, M., Zhang, Q., Li, C., A new carbazole-based Schiff-base as fluorescent chemosensor for selective detection of  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Cu}^+$ , **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 109, 186–92, (2013).
- [26] Nabeshima, T., Tsukada, N., Nishijima, K., Ohshiro, H., Yano, Y., Remarkably selective  $\text{Ag}^+$  extraction and transport by thiolariet ethers., **The Journal of Organic Chemistry**, 61, 4342–4350, (1996).
- [27] Huang, C.Y., Determination of binding stoichiometry by the continuous variation method: The Job Plot, **Methods in Enzymology**, 87, 509–525, (1982).
- [28] Ijeri, V.S., Srivastava, A.K., Complexation of macrocyclic compounds with mono-, di- and tri-valent transition and heavy metal ions in 90% (v/v) DMSO + water medium, **Polyhedron**, 22, 569–574, (2003).

# Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerinin bileşikleri için kütle soğurma katsayıları, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarının deneysel incelenmesi

**Burcu AKÇA\***

*Ardahan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yenisey Kampüsü, Ardahan*

*Geliş Tarihi (Received Date): 04.03.2019*

*Kabul Tarihi (Accepted Date): 26.08.2019*

## Özet

*Bu çalışmada, canlıların yaşamında kilit rol oynayan Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerinin bileşiklerinin ( $MnF_3$ ,  $MnBr_2$ ,  $CoCl_2$ ,  $CoF_2$ ,  $Co(NO_3)_2$ ,  $NiF_2$ ,  $NiSO_4$ ,  $CuSO_4$ ,  $CuF_2$ ,  $CuI$ ,  $ZnC_4H_6O_4$  ve  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) kütle soğurma katsayıları Enerji Ayrımlı X-ışını Floresans Spektrometresi (EDXRFS), yüksek çözünürlüklü bir Si(Li) detektör ve 59,54 keV enerjiye sahip bir Am-241 nokta kaynak kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen kütle soğurma katsayıları kullanılarak atomik, moleküler, elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunlukları belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar WinXCom ve FFAST programlarının teorik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçları, her iki teorik program sonuçlarıyla uyum gösterse de, karışım kuralı mantığına dayanmayan FFAST programının daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** *Esansiyel-eser elementler, EDXRFS, WinXCom, FFAST.*

Experimental investigation of the mass attenuation coefficients, atomic, molecular and electronic cross-sections, effective atomic numbers, and electron densities for compounds of Mn, Co, Ni, Cu and Zn essential-trace elements

\* Burcu AKÇA, burcuakca@ardahan.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-2399-5971>

## Abstract

*In this study, the mass attenuation coefficients of compounds ( $MnF_3$ ,  $MnBr_2$ ,  $CoCl_2$ ,  $CoF_2$ ,  $Co(NO_3)_2$ ,  $NiF_2$ ,  $NiSO_4$ ,  $CuSO_4$ ,  $CuF_2$ ,  $CuI$ ,  $ZnC_4H_6O_4$  and  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) of Mn, Co, Ni, Cu and, Zn essential-trace elements which play a key role in the life of living organism have been measured by using Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer (EDXRFS), a high-resolution Si(Li) detector and, an Am-241 point source with 59.54 keV energy. The atomic, molecular and electronic cross-sections, effective atomic numbers, and electron densities have been determined by using the measured mass attenuation coefficients. Obtained experimental results have been compared with theoretical values of WinXCom and FFAST programs. Although the results of the experiment were in agreement with the results of both theoretical programs, it was observed that gave better results of the FFAST program which was not based on the mixture rule logic.*

**Keywords:** *Essential-trace elements, EDXRFS, WinXCom, FFAST.*

## 1. Giriş

Kütle soğurma katsayısı, maddenin yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon ile etkileşimini; fotoelektrik soğurma, Compton saçılması, Rayleigh saçılması ve çift oluşumu vasıtasıyla açıklayan çok önemli bir parametredir. Bu etkileşimler için 1 MeV enerjinin altındaki enerjilerde, baskın olan ana etkileşim süreçleri inkoherent (Compton), coherent (Rayleigh) ve fotoelektrik soğurmadır [1]. Özellikle biyolojik materyallerin, X-ışını ve  $\gamma$ -fotonlarının kütle soğurma katsayıları bilgisi endüstriyel, biyolojik, tarım ve dozimetri, radyografi ve bilgisayarlı tomografi gibi alanlar için önemli sonuçlar içermektedir [2,3]. Ayrıca kütle soğurma katsayısı, madde hakkında atomik ve moleküler seviyede geniş bir bilgi üretir. Maddede, alan birimi ve kütle başına etkileşen fotonun etkileşim olasılığını ölçer [3]. Kütle soğurma katsayısı ve etkin atom numarası kompozit veya bileşik malzemeler için iki temel parametredir. Etkin atom numarası temelde doz değerlendirmesi, koruma etkinliği ve biriktirme faktörlerinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli parametredir [4]. Etkin atom numarası ve yoğunluk, malzemelerin ve bunların türevlerinin teknolojik ve işlevsel özelliklerini karakterize eden parametreler arasındadır. Temassız ölçümler, yüksek verimlilik, uygunluk ve ihtiyaç duyulan basit enstrümantasyon gibi özel nitelikler, malzemelerin radyoaktif kontrolüne ve foton radyasyon aktarımına dayanan yöntemlerin kullanımını genişletmiştir [5].

Kimyasal içeriğe bağlı olan kütle soğurma katsayısının, deneysel olarak tayin edilmesi çok önemlidir. Maddenin atomik ve moleküler seviyedeki bilgisini veren bu önemli parametre yardımıyla, diğer önemli parametreler olan atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunlukları da belirlenerek madde hakkında daha ayrıntılı bilgiler elde edilmektedir. Bundan başka bir ortamda ya da sistemde belirli sabitlerin bilinmesiyle enerji soğurulma değerleri ortalama olarak hesaplanabilmektedir. Bu hesap için gerekli en temel fiziksel parametreler etkin atom numarası ve etkin elektron yoğunluğudur. Etkin atom numarası, özellikle düşük ve orta atom numaralı materyaller için çok kullanışlı bir parametredir. Bu parametreye biyolojik ve medikal uygulamalarda sıkça rastlanmaktadır. Etkin atom numarasının içeriği X- ve  $\gamma$ -ışınlarının madde ile etkileşmesi temeline dayanmaktadır [6]. Biyolojik materyaller, plastik, toprak ve alaşımlar gibi kompozit malzemeler foton etkileşmesinin olduğu tüm enerji bölgesinde tek bir sayıyla temsil edilemezler ve kısmi süreçlerin her biri için bu

sayı farklı ağırlıklıdır [7]. Bu sayı kompozit materyaller için etkin atom numarası olarak adlandırılmaktadır ve bu parametre enerjiye bağlı değişim göstermektedir [8].

Kütle soğurma katsayısını elde etmek için deneysel teknikler temel olarak iletilen ışının soğurulma ölçüsünü ve numunenin yoğunluğunu kullanır. Bu metod transmisyon metodu olarak adlandırılır ve Beer-Lambert yasasının doğrudan kullanımındır. Literatür incelendiğinde, kütle soğurma katsayısı ve soğurma üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar, inşaat malzemeleri, gaz karışımları, kompozit malzemeler, biyolojik malzemeler ve daha birçok farklı malzeme için yapılmıştır. Literatürde bahsi geçen bu çalışmalardan bazıları şunlardır; Kerur ve ark. [9], <sup>57</sup>Co ve <sup>65</sup>Zn radyoaktif kaynaklarını kullanarak, düşük enerjili X-ışını bölgesi için kütle soğurma katsayılarının doğru bir şekilde belirlenmesini sağlamak amacıyla bir metod geliştirmişlerdir. Gopinathan Nair ve ark. [10], birkaç amino asit için 661,6; 1173 ve 1332,5 keV enerjilerde dar-şua geometrisi oluşturarak ve yüksek saflıkta Germanyum detektör kullanarak toplam soğurma tesir kesitlerini ölçmüşlerdir. Bhandal ve Singh [11], toplam ve kısmi kütle soğurma katsayılarını ve etkin atom numaralarını 1 keV-10<sup>5</sup> MeV enerji bölgesinde, katihal nükleer iz dedektörleri (SSNTD: Solid State Nuclear Track Detectors) için hesaplamışlardır. Shivaramu ve Ramprasath [12], etkin atom numaraları ve kütle soğurma katsayılarını, 26,3; 33,2; 59,54 ve 661,6 keV enerjilerde bazı termoluminesans dozimetrik bileşikler için deneysel olarak elde etmişlerdir. Erzeneoğlu ve ark. [13], farklı konsantrasyonlarda holmiyum katkılanmış InSe yarıiletkeninin kütle soğurma katsayılarını, 15,746–40,930 keV enerji bölgesinde Si(Li) detektör kullanarak ölçmüşlerdir. İçelli ve ark. [14], TSW (Trommel Sieve Waste) ve bor bileşiklerinin kütle soğurma katsayılarını 15,74–40,93 keV enerji bölgesinde ölçerek, moleküler, atomik, elektronik tesir kesitlerini ve etkin atom numaralarını belirlemişlerdir. Raje ve Chaudhari [15], Hindistan'ın Maharashtra eyaletindeki farklı bölgelerden alınan toprak numuneleri için 0,662 keV enerjide kütle soğurma katsayıları ölçmüşlerdir. Gounhalli ve ark. [16], birkaç narkotik ilacın kütle soğurma katsayılarını, etkin atom numaralarını ve elektron yoğunluklarını, 1 keV-100 GeV enerji aralığında WinXCom kullanarak belirlemişlerdir. Akça ve Erzeneoğlu [17], bazı biyomedikal önemli elementlerin bileşiklerinin kütle soğurma katsayıları, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarını 59,54 keV enerjide deneysel olarak belirlemişlerdir. Böke [18], insan kortikal kemik dokusunun foton etkileşim tesir kesitlerini belirlemiştir.

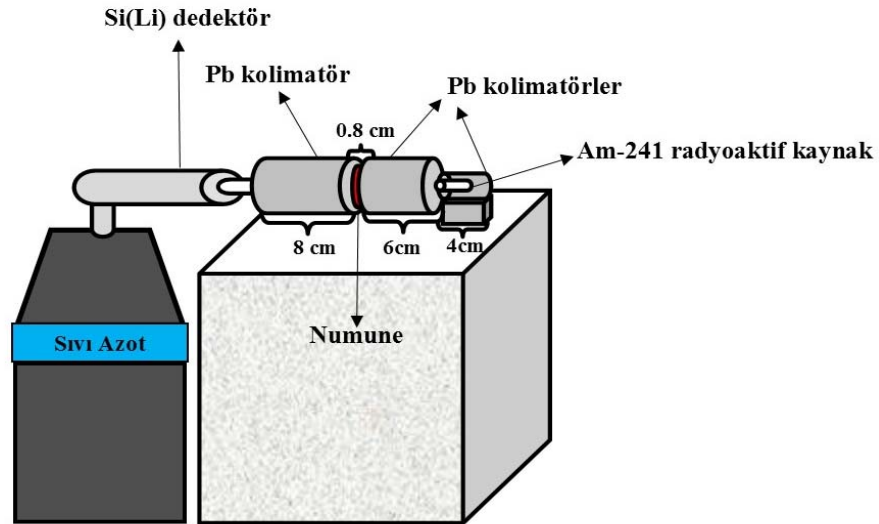
Çalışılan parametre kadar malzemede bir o kadar önemlidir. NCCLS'ye (National Commitee for Clinical Laboratory Standards) göre bazı elementler farklı ve önemli özelliklere sahiptir. NCCLS dikkate alınarak periyodik tablodaki elementler farklı renklerde gösterilmiştir. NCCLS'ye göre elementler vücutta, dokularda bulunma konsantrasyonları ve canlıların organizmasında kullanım amacına göre esansiyel-majör, esansiyel-eser, esansiyel-olmayan toksik ve tedavi amaçlı kullanılan elementler olarak dört grupta incelenmektedir [19]. Esansiyel-eser elementler vücut sıvılarında 10-10<sup>4</sup> µg/L iken, dokularda 0.01-100 µg/g konsantrasyon aralığındadır [20]. Esansiyel elementler; organizmanın normal fizyolojik fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için gereklidirler. Esansiyel elementler olmadan organizma yaşam döngüsünü tamamlayamaz veya normal gelişimini gerçekleştiremez [21]. Esansiyel elementler metalloenzimlerin yapısında kilit rol oynarlar. Ayrıca oksijen taşınması, hormonal aktivitelerin düzenlenmesi, serbest radikallerin etkisiz hale getirilmesi gibi birçok önemli biyolojik fonksiyonun yerine getirilmesinde yine bu elementler karşımıza çıkmaktadır [19].

Literatüre bakıldığında bu atomik parametrelerle ilgili çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Fakat bu enerjide ve bu malzemeler için herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma ilk deneysel verileri oluşturması bakımından önemlidir. Bu çalışmanın amacı, atomik ve moleküler seviyede bilgi veren bu önemli atomik parametrelerin tayininin, canlılar için oldukça önemli olan esansiyel elementler ve bileşikleri için yapılmasıyla, bunları kullanan özellikle tıp, dozimetri, radyografi vb. gibi bilim dallarına katkı sağlamak ve temel oluşturmaktır. Madde ve foton etkileşiminin sonucunda meydana gelen soğurulma olayının açıklanmasında bu önemli parametreler kullanılmaktadır. Kütle soğurma katsayısı direkt olarak soğurucu materyalin tabiatını yansıttığı için ayrı bir öneme sahiptir. Bu sebeple canlı vücudunda bulunan bu esansiyel elementlerin kütle soğurma katsayılarının, atomik, moleküler, elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarının belirlenmesiyle radyasyonla etkileşim tabiatları hakkında bilgi sahibi olunacaktır.

## 2. Materyal ve metot

### 2.1. Deney düzeneği

Çalışmada, ilk önce dar-şua geometrisi olarak adlandırılan deney düzeneği kurulmuştur. Bu düzeneğin amacı transmisyon deneylerinde, detektöre paralel ve az kayıplı ışın göndermektir. Deney geometrisi ya da dar-şua geometrisi kurşun kolimatörler kullanarak ve spektrumun en iyi şekilde görüldüğü mesafeler ayarlanarak oluşturulmuştur. Havadan gelen saçılma etkilerinin ortadan kaldırılması için, aynı deneysel şartlar altında numunesiz ölçümler alınarak, numuneli ölçümlerden çıkarılmıştır. Deney düzeneği Şekil 1’de gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen örnek bir soğurma spektrumu da Şekil 2’de verilmiştir.

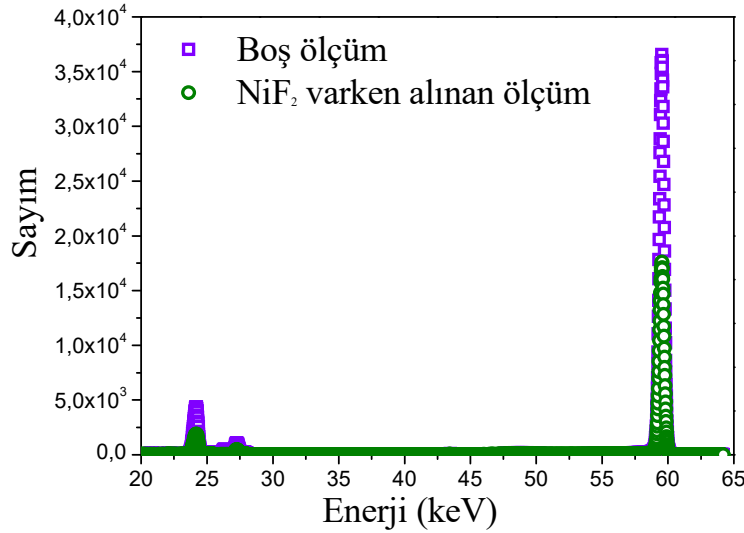


Şekil 1. Dar-şua geometrisi.

Deneyde, şiddeti 100 mCi olan Am-241 radyoaktif kaynağının 59,54 keV enerjili fotonları ve sayma sistemi olarak ise EDXRFs (enerji ayrımlı X-ışını floresans spektrometresi) kullanılmıştır. Analizör 4096 kanalda ve sayma süreleri 1800 s olarak



belirlenmiştir. Deneyde aktif çapı 3,91 mm, aktif alanı 12 mm<sup>2</sup> ve 5,9 keV’de yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) 160 eV olan yüksek çözünürlüklü bir Si(Li) detektör kullanılmıştır. Deney süresince sayaç kristali ve FET (field effect transistor, alan etkili transistör) 30 litrelik bir sıvı azot kabına bağlı, sıvı azot sıcaklığında (-196 °C) tutulmuştur.



Şekil 2. NiF<sub>2</sub> için örnek bir soğurma spektrumu.

Spektrumlar “Genie 2000” programı kullanılarak alınmıştır. Alınan spektrumlar Matlab programı kullanılarak özel bir yazılımla sayısal veriye dönüştürülmüş ve Origin Pro 8 programına aktarılarak spektrum alanları belirlenmiştir.

Çalışmada, deneysel hataların azaltılabilmesi için çevresel şartların aynı kalmasına, deney geometrisinin en iyi soğurmayı verecek şekilde oluşturulmasına, deneyin en az üç kez tekrarlanmasına ve numunelerin düzgün pelletlenmesine özen gösterilmiştir. İdeal bir transmisyon deneyinde bütün fotonlar paralel bir şua gibi soğurucu materyale gönderilmelidir. Fakat deneysel çalışmalarda her durumda sistematik, operasyonel vb. hatalar vardır. Bu hatalar; sayma istatistiği, soğurucunun bütünselliğinin olmaması, numunelerin kirlilik içermesi ve saçılan fotonların detektöre ulaşmamasından kaynaklanmaktadır. Deneydeki hatalar için ortalama değerden sapmalar yüzde olarak  $I_0$  ve  $I$  (<% 2), numune kalınlığı (<% 1,5), numunenin kütlesi (<% 1), sistematik (<% 0,9), olarak tespit edilmiştir. Kütle soğurma katsayılarındaki maksimum hatalar gelen  $I_0$  ve  $I$  geçen foton şiddetleri ile numune kalınlığı ( $t$ ) kullanılarak aşağıdaki formülden hesaplanmıştır;

$$\Delta\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{1}{t} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_0}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\ln \frac{I_0}{I}\right)^2 \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2} \quad (1)$$

eşitlikte  $\Delta I_0$ ,  $\Delta I$  ve  $\Delta t$  sırasıyla  $I_0$ ,  $I$  ışın şiddetleri ile  $t$  numune kalınlığının hatalarını temsil etmektedir. Deneysel hatalar (1) eşitliği yardımıyla hesaplandıktan sonra  $\pm$  olarak Tablo 1’ de verilmiştir.

## 2.2. Numunelerin hazırlanması

Çalışmada, yüksek saflıkta Merck ve Sigma Aldrich marka element ve bileşikler kullanılmıştır. Bu bileşikler Ardahan Üniversitesi merkezi araştırma laboratuvarından ve

Atatürk Üniversitesi fizik bölümünden temin edilmiştir. Esansiyel-eser elementler olarak adlandırılan, bu elementler (Mn, Co, Ni, Cu ve Zn), NCCLS'ye (National Committee for Clinical Laboratory Standards) göre belirlenmiştir [19]. Deneydeki element ve bileşiklerin deney düzeneğine uygun olması için die-set kullanılarak ve 10 ton sabit basınç altında Beckman marka pres ile preslenerek 13 mm çapında 15 adet pellet hazırlanmıştır. Numunelerin kütleleri on binde bir hassasiyetli teraziyle tartılmıştır. Numunelerin kütlesi, yaklaşık 0,700 – 0,800 gr olacak şekilde hazırlanmışlardır.

### 3. Teorik temel

Teorik kütle soğurma katsayılarını hesaplamak için elementler ve kimyasal bileşikler için karışım kuralını temel alan WinXCom programı kullanılmıştır [22- 24]. Karışım kuralına göre kütle soğurma katsayısı,

$$(\mu/\rho) = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (cm^2/g) \quad (2)$$

olmaktadır ve buradaki  $w_i$ ,  $(\mu/\rho)_i$  sırasıyla i. elementin ağırlık kesri ve kütle soğurma katsayısıdır. Bir kimyasal bileşiğin ağırlık kesri;

$$W_i = \frac{n_i A_i}{\sum_i n_i A_i} \quad (3)$$

olarak yazılabilir. Buradaki  $n_i$  ve  $A_i$  sırasıyla i. elementin atom sayısı ve atom ağırlığıdır. Teorik ve deneysel kütle soğurma katsayılarının değerleri;

$$\sigma_{t,m} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \frac{M}{N_A} \quad (barn/atom) \quad (4)$$

eşitliğinde kullanılarak toplam moleküler tesir kesiti (barn/atom) teorik ve deneysel olarak elde edilmektedir. Eşitlikteki  $M$  moleküler ağırlık,  $N_A$  ise Avogadro sayısıdır. Teorik ve deneysel toplam atomik tesir kesiti;

$$\sigma_{t,a} = \frac{1}{N_A} \sum_i f_i A_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i = \frac{\sigma_{t,m}}{\sum_i n_i} \quad (barn/atom) \quad (5)$$

eşitliğinden hesaplanmaktadır. Eşitlikteki  $f_i$  i. elementin bolluk kesri ya da bir elementin atom sayısının bileşikteki toplam atom sayısına oranıdır. Teorik toplam elektronik tesir kesiti (barn/atom);

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum_i \frac{f_i A_i}{Z_i} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (barn/atom) \quad (6)$$

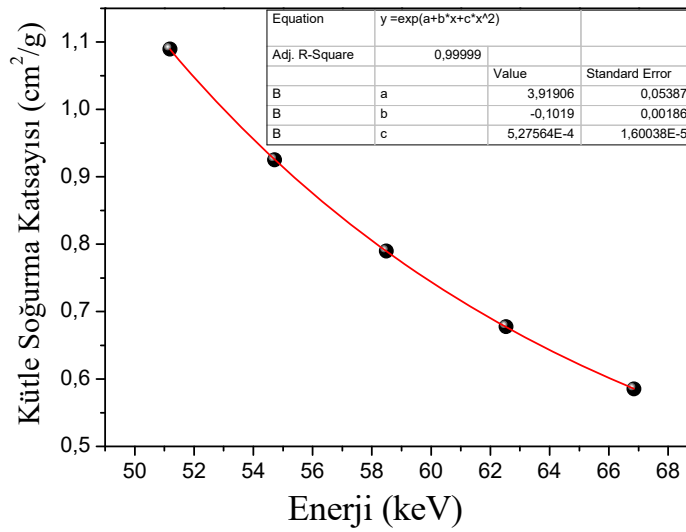
eşitliğinden hesaplanmaktadır. Teorik ve deneysel toplam atomik, toplam moleküler tesir kesitleri oranlanarak etkin atom numarası elde edilir;

$$Z_{et} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (7)$$

Teorik ve deneysel etkin elektron sayısı ya da elektron yoğunluğu (electron/g) [25],

$$N_e = \frac{N_A}{M} Z_{et} \sum_i n_i \text{ (electron/g)} \quad (8)$$

WinXCom programı teorik hesaplamalarda karışım kuralını kullanır, FFAST programı [26] ise veri setindeki değerleri WinXCom' dan farklı metotlarla hesaplar ve farklı sonuçlar üretebilir. WinXCom programı radyolojik fizik ve dozimetri için geliştirilmiştir, FFAST programı ise X-ışını kırınımı, interferometri ve kristalografi gibi alanlar için geliştirilmiştir. FFAST teorik programında 59,54 keV enerji için kütle soğurma katsayılarına karşılık gelen değerler bulunmadığı için yakın enerji değerleri dikkate alınarak Origin Pro 8 kullanılarak grafik çizilmiş ve interpolasyon yapılarak arada olan 59,54 keV enerji değeri için kütle soğurma katsayılarının doğru değerleri belirlenmiştir. Bu işlem için çizilmiş örnek bir grafik Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3.  $ZnC_4H_6O_4$  için FFAST kütle soğurma katsayısı değeri interpolasyon grafiği.

#### 4. Sonuçlar ve tartışma

Bu çalışmada özellikle NCCLS'ye göre gruplandırılmış periyodik tablo dikkate alınarak yeşil renkle gösterilen ve esansiyel-eser elementler olarak adlandırılan Mn, Co, Ni, Cu ve Zn elementlerinin bazı bileşikleri dikkate alınarak, önemli fiziksel parametrelerin deneysel tayini yapılmıştır ve çok kullanışlı olduğu bilinen iki teorik program (WinXCom ve FFAST) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmamızda dikkate alınan elementler yaşam için gereklidir ve yokluğunda ya ölüm ya da organizmanın birçok fonksiyonunun işlevselliğinde zararlarla karşılaşılır. Bu elementler, çeşitli hastalıkların tanı ve tedavisinde de önemli rol oynamaktadır. Mesela, sağlıklı ve tümörlü dokularda eser element konsantrasyonunun veya miktarının bilinmesi kanserin neden olduğuna cevap oluşturabilmektedir. Bu bakımdan çalışmamızın amacı, eser elementlerin bileşiklerinin foton etkileşmesinin, nasıl bir tabiata sahip olduğunu görmek ve canlılar için etkilerinin neler olabileceğini tahmin etmektir.

Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerinin bileşikleri için kütle soğurma katsayıları, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve

elektron yoğunluklarının deneysel değerleri Tablo 1’de, WinXCom programı teorik değerleri Tablo 2’de ve FFAST programı teorik değerleri ise Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 1. Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerinin bileşikleri için kütle soğurma katsayıları, atomik, moleküler tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarının deneysel değerleri.

Numuneler	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	$\sigma_{t,m}$ (barn/atom)	$\sigma_{t,a}$ (barn/atom)	$Z_{et}$	$N_e \times 10^{23}$ (electron/g)
Mn	1,071±0,077	97,707±7,024	97,707±7,024	24,792±1,782	2,718±0,195
MnF <sub>3</sub>	0,650±0,056	120,776±10,409	30,194±2,602	20,229±1,743	4,353±0,375
MnBr <sub>2</sub>	2,142±0,048	763,682±17,117	254,561±5,706	31,877±0,714	2,682±0,060
CoCl <sub>2</sub>	0,926±0,039	199,602±8,409	66,534±2,803	25,120±1,058	3,495±0,147
CoF <sub>2</sub>	0,931±0,044	102,012±4,823	34,004±1,608	16,427±0,777	4,496±0,213
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,568±0,005	172,476±1,519	19,164±0,169	17,436±0,154	5,166±0,045
NiF <sub>2</sub>	1,025±0,051	164,575±8,188	54,858±2,729	24,514±1,220	4,580±0,228
NiSO <sub>4</sub>	0,785±0,018	201,669±4,625	33,612±0,771	21,735±0,498	5,075±0,116
CuSO <sub>4</sub>	0,815±0,028	216,134±7,421	36,022±1,237	21,944±0,753	4,968±0,171
CuF <sub>2</sub>	1,322±0,060	222,899±10,117	74,300±3,372	30,601±1,389	5,445±0,247
CuI	5,676±0,062	1795,009±19,607	897,505±9,804	48,956±0,535	3,096±0,034
Zn	1,878±0,026	203,964±2,824	203,964±2,824	31,298±0,433	2,882±0,040
ZnC <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	0,908±0,023	276,569±7,008	18,438±0,467	18,838±0,477	9,275±0,235
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,771±0,010	367,947±4,775	13,628±0,177	16,326±0,212	9,232±0,120
I (İyot)	7,513±0,051	1583,321±10,747	1583,321±10,747	51,516±0,350	2,445±0,017

Tablo 2. Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerinin bileşikleri için kütle soğurma katsayıları, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarının WinXCom programı teorik değerleri.

Numuneler	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	$\sigma_{t,m}$ (barn/atom)	$\sigma_{t,a}$ (barn/atom)	$\sigma_{t,el}$ (barn/atom)	$Z_{et}$	$N_e \times 10^{23}$ (electron/g)
Mn	1,08	98,525	98,525	3,941	25,000	2,740
MnF <sub>3</sub>	0,629	116,917	29,229	1,493	19,582	4,214
MnBr <sub>2</sub>	2,240	798,771	266,257	7,986	33,341	2,805
CoCl <sub>2</sub>	0,852	183,693	61,231	2,649	23,118	3,217
CoF <sub>2</sub>	0,891	97,664	32,555	2,070	15,727	4,304
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,560	170,119	18,902	1,099	17,198	5,095
NiF <sub>2</sub>	1,010	162,163	54,054	2,238	24,155	4,513
NiSO <sub>4</sub>	0,749	192,469	32,078	1,546	20,743	4,843
CuSO <sub>4</sub>	0,807	213,885	35,647	1,642	21,716	4,916
CuF <sub>2</sub>	1,090	183,792	61,264	2,428	25,232	4,489
CuI	5,700	1802,623	901,311	18,333	49,164	3,109
Zn	1,800	195,506	195,506	6,517	30,000	2,762
ZnC <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	0,764	232,772	15,518	0,979	15,855	7,806
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,588	280,763	10,399	0,835	12,458	7,044
I (İyot)	7,730	1628,945	1628,945	30,735	53,000	2,515

Tablo 3. Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerinin bileşikleri için kütle soğurma katsayıları, atomik, moleküler ve elektronik tesir kesitleri, etkin atom numaraları ve elektron yoğunluklarının FFAST programı teorik değerleri.

Numuneler	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	$\sigma_{t,m}$ (barn/atom)	$\sigma_{t,a}$ (barn/atom)	$\sigma_{t,e}$ (barn/atom)	$Z_{et}$	$N_e \times 10^{23}$ (electron/g)
Mn	1,060	96,700	96,700	3,868	25,000	2,740
MnF <sub>3</sub>	0,619	115,058	28,765	1,489	19,323	4,158
MnBr <sub>2</sub>	2,220	791,639	263,880	7,908	33,367	2,807
CoCl <sub>2</sub>	0,839	180,891	60,297	2,610	23,100	3,214
CoF <sub>2</sub>	0,877	96,130	32,043	2,051	15,622	4,276
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,555	168,600	18,733	1,101	17,014	5,041
NiF <sub>2</sub>	0,998	160,237	53,412	2,223	24,031	4,490
NiSO <sub>4</sub>	0,741	190,414	31,736	1,541	20,593	4,808
CuSO <sub>4</sub>	0,798	211,499	35,250	1,633	21,592	4,888
CuF <sub>2</sub>	1,080	182,105	60,702	2,405	25,235	4,490
CuI	5,620	1777,323	888,661	18,081	49,148	3,108
Zn	1,770	192,247	192,247	6,408	30,000	2,762
ZnC <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	0,757	230,639	15,376	0,984	15,624	7,692
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,585	279,330	10,346	0,846	12,234	6,918
I (İyot)	7,630	1607,872	1607,872	30,337	53,000	2,515

Kütle soğurma katsayılarının deneysel ve teorik değerleri arasındaki rölatif fark (*RF*), Tablo 1’de yer alan  $\pm\sigma$  standart sapmaları da dikkate alınarak;

$$\text{Rölatif Fark (RF)} = \frac{(\mu/\rho_{\text{Teorik Değer}} - \mu/\rho_{\text{Deneysel Değer}})}{\pm\sigma} \quad (9)$$

formülüyle hesaplanarak Tablo 4’de verilmiştir. Bundan başka, kütle soğurma katsayılarının teorik ve deneysel değerler arasındaki oranı da (*T/D*) Tablo 4’de verilmiştir.

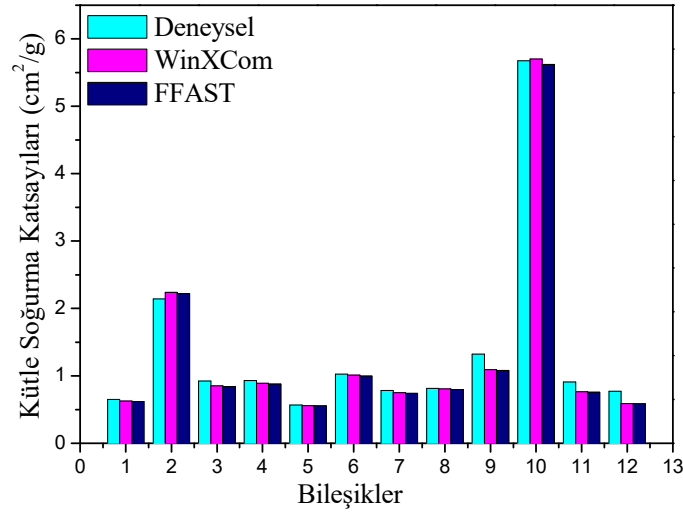
Tablo 1, 2 ve 3 incelendiğinde, Mn bileşiklerinde F elementinin bileşikte yer alması fotonun atomla etkileşme ihtimalini azaltırken, ağır bir element olan Br’ nin yer alması etkileşme ihtimalini artırmıştır. Yine Cu bileşiklerinde, CuF<sub>2</sub> ve CuI incelendiğinde, daha hafif ya da atom numarası düşük olan Florun (F), bileşiğin fotonla etkileşme ihtimalini azalttığı, atom numarası büyük olan İyotun (I) ise, etkileşme ihtimalini artırdığı görülmektedir. Bu ağır veya atom numarası büyük elementler için fotoelektrik etkinin baskın olması ve atomik tesir kesitlerinin de kütle soğurma katsayısıyla orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda, ağır metallerin canlılar üzerine kendi etkileri dışında, radyasyon etkileşme ihtimalini artırması bakımından da sorun yaratacağı görülmektedir. Bileşikler grup olarak dikkate alındıklarında, Mn bileşikleri hariç, atom sayısı arttıkça, kütle numarasının azaldığı yani foton etkileşiminin daha az olduğu görülmektedir. Tıbbi görüntüleme ve radyasyon tedavisinde kullanılan etkin atom numarasının deneysel olarak belirlenmesi çok önemlidir. Tablolardaki etkin atom numaraları incelendiğinde  $Z_{et} > 10$  olduğu görülmektedir.  $Z_{et} \leq 10$  organik maddelerin göstergesi iken, büyük bir  $Z_{et}$  genel olarak inorganik bileşikler ve metallerin göstergesidir [27]. Bu durum dikkate alınır, çalışmamızdaki bileşikler inorganik ve metaldir. Mn ve Zn element ve bileşiklerinin kütle numarası değerleri dikkate alındığına, element halindeken daha büyük kütle soğurma katsayısına sahip oldukları, bileşik halinde ise

hafif veya atom numarası ( $Z$ ),  $30 \geq Z$  elementleri içeren bileşiklerinin kütle soğurma katsayılarının daha küçük olduğu görülmektedir. Bu durum bize, bu bileşikler için element halinde foton etkileşim ihtimalinin arttığını düşündürmektedir.

Tablo 4. Mn, Co, Ni, Cu ve Zn esansiyel-eser elementlerin bileşiklerinin kütle soğurma katsayıları için rölatif farklar ( $RF$ ) ve teorik, deneysel sonuçların oranı ( $T/D$ ).

Numuneler	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )			
	$RF_{\text{WinXCom}}$	$RF_{\text{FFAST}}$	$T/D_{\text{WinXCom}}$	$T/D_{\text{FFAST}}$
Mn	0,116	-0,143	1,008	0,990
MnF <sub>3</sub>	-0,371	-0,549	0,968	0,953
MnBr <sub>2</sub>	2,050	1,633	1,046	1,037
CoCl <sub>2</sub>	-1,892	-2,225	0,920	0,906
CoF <sub>2</sub>	-0,901	-1,220	0,957	0,942
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-1,552	-2,552	0,986	0,978
NiF <sub>2</sub>	-0,295	-0,530	0,985	0,974
NiSO <sub>4</sub>	-1,989	-2,433	0,954	0,944
CuSO <sub>4</sub>	-0,303	-0,625	0,990	0,979
CuF <sub>2</sub>	-3,865	-4,032	0,825	0,817
CuI	0,388	-0,902	1,004	0,990
Zn	-2,995	-4,149	0,959	0,943
ZnC <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	-6,250	-6,554	0,842	0,834
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	-18,259	-18,559	0,763	0,759
I (İyot)	4,245	2,284	1,029	1,016

MnF<sub>3</sub>, MnBr<sub>2</sub>, CoCl<sub>2</sub>, CoF<sub>2</sub>, Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, NiF<sub>2</sub>, NiSO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub>, CuF<sub>2</sub>, CuI, ZnC<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub> ve ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O bileşikleri için kütle soğurma katsayılarının ( $\mu/\rho$ ), deneysel ve teorik değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4’de yapılmıştır. Bileşikler MnF<sub>3</sub> (1), MnBr<sub>2</sub> (2), CoCl<sub>2</sub> (3), CoF<sub>2</sub> (4), Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (5), NiF<sub>2</sub> (6), NiSO<sub>4</sub> (7), CuSO<sub>4</sub> (8), CuF<sub>2</sub> (9), CuI (10), ZnC<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>4</sub> (11) ve ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (12) şeklinde numaralandırılmıştır.



Şekil 4. Bileşiklerin deneysel ve teorik kütle soğurma katsayılarının karşılaştırılması.

Tablolar ve Şekil 4 incelendiğinde, deneysel değerler ve teorik değerler arasında çok iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Tablo 4'deki *RF* değerleri dikkate alınarak değerlendirme yapılırsa, genellikle FFAST teorik değerlerinin deneysel değerlere daha yakın olduğu görülmektedir. Bunun sebebi karışım kuralına dayanan WinXCom programının, kimyasal çevre ve moleküler bağların etkisini ihmal etmesidir. Tablolardaki tüm bileşiklerin atom sayıları göz önüne alındığında fiziksel parametrelerin değişiminde herhangi bir etkiye sahip olmadığı ve belirgin bir fark yaratmadığı görülmektedir. Bu bakımdan, karışım kuralının geçerliliği bir bileşikteki atom sayısına bağlı olarak açıklanamamaktadır. Herhangi bir bileşik için moleküler bağlar, kimyasal çevre gibi etkiler önemlidir, fakat bu etkiler karışım kuralı tarafından ihmal edilmektedir. Bileşikler bağlarla bir arada bulunan yapılar olmalarına rağmen karışım kuralı bağların etkisini ve kimyasal çevre etkisini dikkate almadan bir hesaplama sunmaktadır. Ayrıca kimyasal çevrenin, kütle soğurma katsayısı üzerine de etkisi olduğu kimyasal, moleküler ve termal ortamlardan etkilendiğine de inanılmaktadır. Yalıtılmış atom için teorik değer hesaplanmasında tesir kesiti hesabı dikkate alındığından dolayı deneysel kütle soğurma katsayısı değerinin sapmasına yol açmaktadır. Bu sapma karışım kuralının geçersizliği ya da kuralda aksaklık, bozulma olarak adlandırılır. Karışım kuralının geçersiz olması ve etkileri İçelli ve ark. [28, 29] tarafından yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir. Hafif elementlerden oluşmuş bileşik içerisindeki ağır elementlerin varlığı da deneysel ve teorik kütle soğurma katsayıları arasında farklara sebep olmaktadır. Bunun sebebi kütle soğurma katsayısının yüksek olduğu 0,01 MeV-0,5 MeV enerji aralığında fotoelektrik olayın baskın olmasındandır.

Sonuç olarak, çalışmamızdaki esansiyel-eser elementler için tayin edilen atomik parametrelerin kullandığımız dar-şua geometrisiyle deneysel olarak hassas bir şekilde ölçüldüğünü, karşılaştırılan teorik programlarla gayet iyi uyumlu sonuçlar alındığını, fakat FFAST program değerlerinin uygunluk açısından WinXCom program değerlerinden daha iyi olduğunu, farklı önemli elementler, bileşikler, enerjiler ve yöntemlerle yeni deneysel çalışmalar yapılabileceğini, bu elementler ve bileşiklerin deneysel ve teorik değerlerinin özellikle tıpta kullanım yönünün farklı araştırma gruplarıyla da yapılan ortak çalışmalarla daha da geliştirilmesi gerektiğini söyleyebiliriz.

**Kaynaklar**

- [1] Preira M.O., Carvalho Conti C., Anjos M. J., Lopes R.T., Correction of radiation absorption on biological samples using Rayleigh to Compton scattering ratio, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, 280, 39–44, (2012).
- [2] Jackson D.F., Hawkes D.J., X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures, **Physics Reports**, 70(3), 169-233, (1981).
- [3] Manohara S.R., Hanagodimath S.M., Studies on effective atomic numbers and electron densities of essential amino acids in the energy range 1 keV–100 GeV, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, 258(2), 321-328,(2007).
- [4] Vishwanath P. S., Badiger N. M., Effective atomic numbers of dosimetric interest organic compounds, **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, 54, 333-338, (2016).
- [5] Athanassiadis K.N., Determination of the Effective Atomic Numbers of Light Composite Materials, I2MTC 2009 - **International Instrumentation and Measurement Technology Conference**, Singapore, 5-7 May (2009).
- [6] Manohara, S. R., Hanagodimath, S. M, Thing, K. S., Gerward, L., The effective atomic number revisited in the light of modern photon-interaction cross-section databases, **Applied Radiation and Isotopes**, 68(4-5), 784-787, (2010).
- [7] Kumar, T., K., Venkataratnam, S., Reddy, K., V., Effective atomic number studies in clay minerals for total photon interaction in the energy region 10 keV-10 MeV. **Radiation Physics and Chemistry**, 48(6), 707-710, (1996).
- [8] Parasad, S., G., Parthasaradhi, K., Bloomer, W., D., Effective atomic numbers for photoabsorption in alloys in the energy region of absorption edges. **Radiation Physics and Chemistry**, 53(5), 449-453, (1998).
- [9] Kerur B. R., Thontadarya S. R., Hanumaiah B., Measurement of X-ray mass attenuation coefficients using mixed radiation emitters, **Indian Journal of Physics**, 67A (2), 163-167, (1993).
- [10] Gopinathan Nair K. P., Umesh T. K., Gowda R., Total Attenuation Cross Sections Of Several Amino Acids At 661.6, 1173 And 1332.5 keV, **Radiation Physics and Chemistry**, 45(2), 231-233, (1995).
- [11] Bhandal G. S., Singh K., Total And Partial Mass Attenuation Coefficients And Effective Atomic Number Studies In Different Solid State Nuclear Track Detectors, **Radiation Physics and Chemistry**, Vol., 47(1), 109-116, (1996).
- [12] Shivaramu R.A., Ramprasath V., Effective Atomic Numbers and Mass Attenuation Coefficients of Some Thermoluminescent Dosimetric Compounds for Total Photon Interaction, **Nuclear Science And Engineering**, 132, 148–153, (1999).
- [13] Erzenoğlu S., İçelli O., Gürbulak B., Ateş A., Measurement of mass attenuation coefficients for holmium doped and undoped layered semiconductors InSe at different energies and the validity of mixture rule for crystals around the absorption edge, **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, Volume 102(3), 343-347, (2006).
- [14] İçelli O., Erzenoğlu S., Boncukçuoğlu R., Determination of molecular, atomic, electronic cross-sections and effective atomic number of some boron compounds and TSW, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interaction with Materials and Atoms**, 266(14), 3226-3230, (2008).



- [15] Rajee D .V., Chaudhari L. M., Mass Attenuation Coefficients of Soil Samples in Maharashtra State (India) by Using Gamma Energy at 0.662 MeV, **Bulgarian Journal of Physics**, 37, 158–164, (2010).
- [16] Gounhalli S.G., Shantappa A., Hanagodimath S. M., Studies on Mass Attenuation Coefficient, Effective Atomic Numbers and Electron Densities of Some Narcotic Drugs in the Energy Range 1KeV -100GeV, **Journal of Applied Physics**, 2( 4), 40-48, (2012).
- [17] Akça B., Erzeneoğlu S., The Mass Attenuation Coefficients, Electronic, Atomic, and Molecular Cross Sections, Effective Atomic Numbers, and Electron Densities for Compounds of Some Biomedically Important Elements at 59.5 keV, **Science and Technology of Nuclear Installations**, 2014, 1-8, (2014).
- [18] Böke A., The photon interaction cross sections of human cortical bone tissue, **Chinese Journal of Physics**, 55( 6), 2165-2172, (2017).
- [19] Parsons P. J., Barbosa F. J., Atomic spectrometry and trends in clinical laboratory medicine, **Spectrochimica Acta**, 62(9), 992–1003, (2007).
- [20] Gillian, L., Jack, D., F., Benjamin, G., David, E., N., Patrick, J., P., John, S., NCCLS, Control of pre-analytical variation in trace element determinations; approved guideline. 19087 USA, (1997).
- [21] Zheng Y, Li X K, Wang Y, Cai L., The role of zinc, copper and iron in the pathogenesis of diabetes and diabetic complications: Therapeutic effects by chelators, **Hemoglobin**, 32(1-2), 135–145, (2008).
- [22] Jackson D.F., Hawkes D.J., X-ray attenuation coefficients of elements and mixtures. **Physics Reports**, 70, 169–233, (1981).
- [23] Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Levring, WinXCom-a program for calculating X-ray attenuation coefficients, **Radiation Physics and Chemistry**, 71, 653-654, (2004).
- [24] Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K. B., Levring, H., X-ray absorption in matter. Reengineering XCOM. **Radiation Physics and Chemistry**, 60(1-2), 23-24, (2001).
- [25] Gowda, S., Krishnaveni, S., Gowda, R., Studies on effective atomic numbers and electron densities in amino acids and sugars in the energy range 30-1333 keV, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, 239(4), 361-369, (2005).
- [26] Chantler, C. T., Olsen, K., Dragoset, R. A., Chang, J., Kishore, A. R., Kotochigova, S. A., Zucker, D. S., X-ray form factor, attenuation and scattering tables (Version 2.1). “<http://physics.nist.gov/ffast>”, National Institute of Standards and Technology (NIST) (2005).
- [27] Baltaş, H., Çevik, U., Determination of the effective atomic numbers and electron densities for YBaCuO superconductor in the range 59.5–136 keV, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, 266(7), 1127-1131, (2008).
- [28] İçelli, O., Erzeneoğlu, S., Boncukçuoğlu, R., Measurement of mass attenuation coefficients of some boron compounds and the trommel sieve waste in the energy range 15.746- 40.930 keV, **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, 78, 203-210, (2003).
- [29] İçelli, O., Erzeneoğlu, S., The mass attenuation coefficients in some vanadium and nickel compounds, **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radioactive Transfer**, 88, 519–524, (2004).

# Farklı yanlılık düzeltme yöntemlerinin istatistiksel ölçüğe indirgenmiş yağış projeksiyonlarına uygulanması

Umut KIRDEMİR\*, Umut OKKAN

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 31.10.2019  
Kabul Tarihi (Accepted Date): 27.11.2019

## Özet

İstatistiksel ölçek indirgeme modelleri kaba çözünürlüklü iklim modellerinin yerel ölçüğe indirgenmesinde oldukça etkili araçlar olup, iklim değişikliği çalışmalarında sıklıkla yararlanılmaktadır. Çeşitli hidro-meteorolojik değişkenlerin projeksiyonlarında kullanılan farklı iklim modelleri kendi bünyesinde barındırdıkları yanlılık sebebiyle ölçek indirgeme modellerinin performanslarını etkilemekte ve tahminlere ait hassasiyeti azaltabilmektedir. Bu nedenle, ölçek indirgeme modellerinin yanında yanlılık düzeltme işlemlerine de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'ne (IPCC) ait 5. Değerlendirme Raporu'na göre farklı emisyon senaryoları çerçevesinde hazırlanmış iklim modelleri ve farklı yanlılık düzeltme yöntemleri ile Gediz Havzası'na ait yağış projeksiyonları elde edilmiş ve bunu takiben farklı yanlılık düzeltme yöntemlerinin yağış tahminlerine olan etkileri araştırılmıştır. Bunun için öncelikle, Gediz Havzası yağışlarını temsil eden tahminleyici seçimi yapılmış, daha sonra ilgili yağış tahminleyicileri ile kaba çözünürlüklü iklim modelleri istasyon ölçüğüne indirgenmiştir. Çalışmada 2015-2050 gelecek dönemine ait kaba çıktıları bulunan 12 adet farklı küresel iklim modelinden faydalanılmış ve bu iklim modellerinden türetilen projeksiyonlar birleştirilerek daha kuvvetli tahminler elde edilmesi amaçlanmıştır. Çoklu iklim modellerinin birleşiminden sonra tahminlerde var olan yanlılıklar Kantil Haritalama (QM), Eş Oran Kantil Haritalama (ERQM), Trendsizleştirilmiş Kantil Haritalama (DQM) ve Kantil Delta Haritalama (QDM) yöntemleri ile ayrı ayrı düzeltilmiştir. Tüm performans indislerini kapsayan bulgulara göre, QM yönteminin en büyük hata değerlerini veren yaklaşım olduğu görülmüştür. Diğer yandan, QDM yönteminin ise rölatif değişimleri diğer yöntemlere göre daha iyi yansıtabildiği sonucuna varılmıştır. Ekstrem süreçleri temsil eden performans indisleri incelendiğinde de, QDM'nin ortalama tabanlı yağış projeksiyonlarının değerlendirilmesinde daha üstün olduğu gözlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yanlılık düzeltme, ölçek indirgeme, iklim modelleri, Gediz Havzası.

\*Umut KIRDEMİR, umut.kirdemir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5336-4842>  
Umut OKKAN, umutokkan@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-1284-3825>

## Implementation of different bias correction methods to statistically downscaled precipitation projections

### Abstract

*Statistical downscaling models are very effective tools for downscaling coarse-resolution climate models to local scale and are widely used in climate change studies. The different climate models used in the projections of various hydro-meteorological variables affect the performance of the downscaling models due to their inherent bias and can reduce the precision of predictions. Due to this reason, bias correction methods are needed in addition to the downscaling models. In the study prepared, the precipitation projections were obtained by the climate models derived within the framework of different emission scenarios in terms of the 5th Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the effects of different bias correction methods on precipitation estimations were investigated as well. For this purpose, firstly, the predictor selection which represents the precipitation of Gediz Basin was carried out and then the coarse-resolution climate models were downscaled to station scale by means of the related precipitation predictors. In the study, 12 different global climate models having raw outputs of 2015-2050 future period were utilized and it was aimed to obtain stronger predictions by combining the projections which were derived by these climate models. Subsequent to combination of multi-model projections, the bias existing in predictions were corrected by Quantile Mapping (QM), Equiratio Quantile Mapping (ERQM), Detrended Quantile Mapping (DQM) and Quantile Delta Mapping (QDM), respectively. According to the obtained results including all performance measures, it has been deduced that QM offers the largest error values. On the other side, it has been concluded that QDM method can better reflect relative changes compared to other methods. When performance indices pointing out extreme processes were also investigated, it was observed that QDM was superior in the evaluation of mean-based precipitation projections.*

**Keywords:** Bias correction, downscaling, climate models, Gediz Basin.

### 1. Giriş

Küresel ısınmayla birlikte meydana gelen ani iklimsel değişimler ülkemizde ve dünyada hidrolojik açıdan birtakım değişimler meydana getirmekte ve bu durum yüzey sularının kontrolü ve su kaynaklarının yönetimi konusunda geleceğe yönelik araştırmalar yapma ihtiyacı doğurmaktadır. Dünya genelinde istatistiksel açıdan anlamlı seviyede artan sıcaklıklar dünya üzerinde evapotranspirasyon miktarının artışına, bu da içme, kullanma veya tarımsal sulama için kullanılan yüzey sularının atmosferik zorlamalar sebebiyle azalmasına sebep olmaktadır [1]. Bu hususta, küresel dolaşım modelleri (GCM) adı verilen araçlar dünya iklimini matematiksel olarak modellemek için kullanılmakta ve iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisini araştırmak için de faydalanılmaktadır [2,3,4]. Mekânsal olarak farklı çözünürlüklerde hazırlanan bu modeller geçmiş ve gelecek döneme ait atmosferik ve oşinografik iklimsel tahminler barındırmaktadır. Kaba çözünürlükte hazırlanan bu modeller her ne kadar farklı iklimsel değişkenleri modelleyebilme becerisi gösterse de kendi içlerinde bir miktar yanlılıklar barındırmaktadır. Bu yanlılıklar genel olarak iklim modellerinin antropojenik

zorlamaları, hava olaylarındaki içsel değişkenliği ve bu değişkenliğe sebep olan bazı pozitif ve negatif geri beslemeleri veya incelenen bölgenin topografik yapısının etkilerini tam olarak modelleyememesinden kaynaklanabilmektedir. İklim değişikliği çalışmalarında kullanılan GCM'lerin mekânsal çözünürlükleri yansıtma yetersiz oluşu ve bazı atmosferik süreçleri modellemede sınırlı yeteneklere sahip olması sebebiyle, bu modellerin bir miktar yanlışlık barındırdıkları bilinmektedir [1, 5]. Bu sebeplerden dolayı, daha güvenilir tahminler elde edebilmek adına bahsi geçen sistematik hatalar 'yanlılık düzeltme' yöntemleri ile azaltılabilmektedir. Yanlılık düzeltme yöntemlerinin sistematik hataları düzeltmede kullanışlı bir araç oluşu bu yöntemlerin iklim değişikliği çalışmalarının vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir. Bu yöntemler incelenen değişkene ait verilerin çeşitli dağılım momentlerine uygulanmakla birlikte [6-9], değişkenin uyum gösterdiği dağılım yapısı da esas alınarak yapılmaktadır [10, 11]. Literatürde, bu yöntemleri kıyaslayan bazı çalışmalar yer almakta ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara göre dağılım tabanlı yanlılık düzeltme yöntemlerinin diğer yöntemlere göre daha uygun sonuçlar türettiği sonucuna varılmaktadır [12, 13]. Örneğin, Chen vd. [14] tarafından yapılan çalışmada, gözlenmiş ve GCM verilerinin ortalamalarını ve dağılımlarını esas alan 6 adet yanlılık düzeltme yönteminin hidrolojik model performansına olan etkileri araştırılmıştır. Söz konusu çalışmadaki bulgulara göre, dağılım tabanlı metotların yağış simülasyonlarını hidrolojik model performansını arttıracak şekilde düzelttiği sonucuna varmışlardır. Fangvd.[15] tarafından yapılan çalışmada ise yağış, sıcaklık ve akım simülasyonlarına ait yanlışlıklar farklı düzeltme yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmalarında farklı performans indisleri dikkate alınarak simülasyonların değişkenlik ölçütlerini ve dağılımlarını hesaba katan yöntemlerin yağış ve akım yanlışlıklarını daha iyi düzelttikleri sonucuna varmışlar, sıcaklık değişkeni için ise çalışmada kullanılan tüm yöntemlerin uygun ve benzer performans sergilediğini tespit etmişlerdir.

Dağılım tabanlı yanlılık düzeltme yöntemleri literatürde olasılık haritalama [17], kantil haritalama [18], histogram eşitleme [19], dağılım haritalama [12] gibi isimlerle bahsedilmiş (bu çalışmada kantil haritalama olarak isimlendirilecektir) ve bu yöntemler genel olarak GCM dağılımlarının gözlenmiş dağılımların üzerine haritalanması esasına dayanmaktadır. Hempel vd.[16] tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre, iklimsel hassasiyetin modellerde yansıtılması için GCM projeksiyonlarındaki rölatif değişimlerin yanlışlıkları düzeltilmiş projeksiyonlardaki rölatif değişimlerle uyum içinde olması gerektiği savunulmaktadır. Bununla birlikte kantil haritalama işlemi ile düzeltilmiş tahminler kimi zaman simülasyon değerlerini gereğinden fazla olarak tahminleyebildiği yani bahsi geçen rölatif trendleri koruyamadığı bulgularına da rastlanmıştır [20]. Yukarıda belirtilen bilgiler ışığında hazırlanan bu çalışmada, kantil haritalama esasına dayalı farklı yanlılık düzeltme yöntemlerinin performansları araştırılmıştır. Çalışma, Gediz Havzası yağışları üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada öncelikle 12 adet GCM, iki adet istatistiksel ölçek indirgeme metodu ile istasyon ölçeğine indirgenmiş daha sonra çoklu model sonuçları Bayesçi yaklaşımla birleştirilerek tekil model sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen tahminlerdeki sistematik hatalar 4 adet farklı yanlılık düzeltme yöntemi ile düzeltilmiş ve 9 adet farklı performans indisi ile incelenerek yanlılık düzeltme yöntemlerinin performansları belirlenmiştir.

Çalışmada bahsi geçen çalışma alanı ve kullanılan veriler Bölüm 2'de, kullanılan yöntemler Bölüm 3'te, elde edilen bulgular Bölüm 4'te ve bulgulara ait sonuçlar Bölüm 5'te detaylı olarak verilmiştir.

## 2. Çalışma alanı ve kullanılan veriler

Bu çalışmada, kullanılan yanlılık düzeltme yöntemleri Ege Bölgesi'nde bulunan ve yaklaşık 17.125 km<sup>2</sup>drenaj alanına sahip Gediz Havzası'nın aylık toplam yağışlarına uygulanmıştır. Akdeniz ikliminin hüküm sürdüğü Gediz Havzası'nda su kaynaklarının büyük bir bölümü sulama için kullanılmakta ve havzada yaklaşık olarak 110000 ha'lık tarımsal sulama alanı bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan ve havzada gözlenen yağış verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğü ve Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü tarafından işletilen 39 adet meteoroloji istasyonundan elde edilmiştir. İlgili yağış istasyonlarının 20 tanesi ayrıca sıcaklık gözlemi de yapmaktadır. İklim modellerinde ortak referans geçmiş senaryo dönemi olan Ocak 1980-Aralık 2005 dönemini temsil eden verilere göre, havzada yıllık toplam yağış yaklaşık olarak 550 mm ve yıllık ortalama sıcaklık yaklaşık olarak 15°C civarındadır.

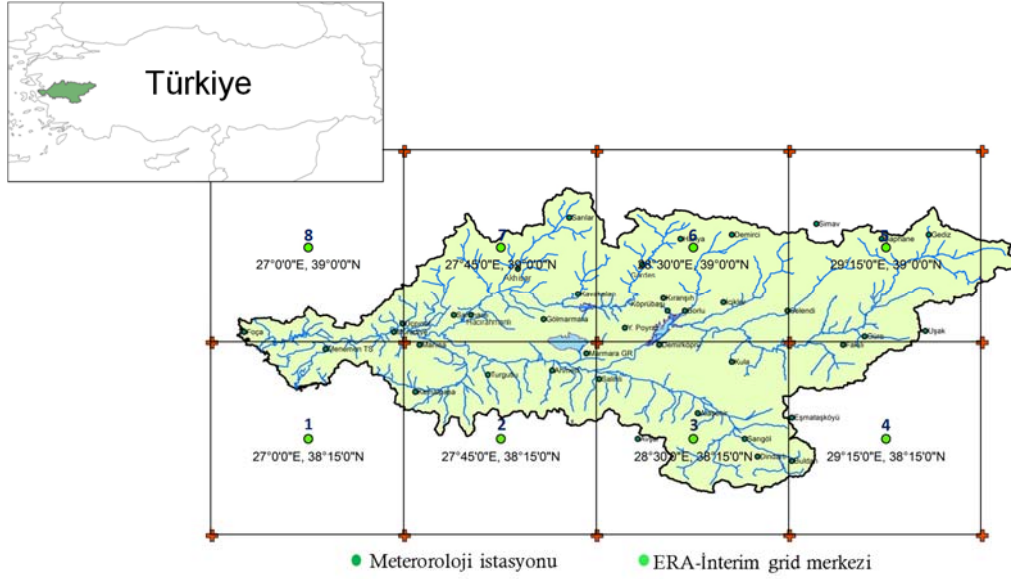
İstatistiksel ölçek indirgeme çalışmalarında yararlanılmak üzere Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) tarafından servis edilen 0,75°x0,75° alan çözünürlüğüne sahip ERA-İnterim reanaliz veri setleri kullanılmıştır. Farklı atmosferik seviyelerdeki (200 hPa, 500 hPa, 850 hPa) geopotansiyel yükseklik, sıcaklık, rölatif nem ve deniz seviyesindeki basınç, yüzeydeki sıcaklık, basınç ve yağış gibi 12 adet değişkene ait verileri barındıran reanaliz verilerinin temsil ettiği periyot kullanılan meteoroloji istasyonları ile paralellik göstermektedir. Tahminleyici seçiminde kullanılan süreç için Okkan ve Kirdemir [3] çalışması incelenebilir. Ayrıca çalışmada IPCC'nin 5. Değerlendirme Raporu'nda değinilen iklim senaryolarından faydalanılmıştır. Sera gazı emisyonlarının zamana göre değişimini dikkate alınarak türetilen temsili konsantrasyon rotaları (RCP) senaryolarından RCP8.5 senaryosu çalışma kapsamında kullanılmıştır. RCP8.5 senaryosuna göre 2100 yılında atmosferdeki CO<sub>2</sub> derişiminin yaklaşık olarak 1370 ppm'den fazla olması ve radyatif zorlamanın yaklaşık 8.5 W/m<sup>2</sup> civarından olması beklenmektedir. Ayrıca RCP8.5 senaryosu diğer RCP senaryoları arasında kötümser senaryo olarak da anılmaktadır. Çalışmada kaba çözünürlüklü referans dönem (REF) ve gelecek dönem RCP8.5 iklim senaryosu sonuçlarına sahip 12 adet GCM'den faydalanılmıştır. Nispeten daha iyimser senaryolar olan RCP4.5 ve RCP2.6 ise yöntemsel karışıklık yaratmamak adına çalışma kapsamına alınmamıştır. Kullanılan GCM'lerin barındırdıkları iklimsel değişkenler reanaliz veri setinde kullanılan değişkenler ile uyum göstermektedir. Kullanılan GCM'lerde REF'e ait tahminler meteoroloji ve reanaliz veri setindeki zaman periyodu ile aynı dönemi temsil etmekte, RCP8.5 senaryosuna ait veriler ise Ocak 2015-Aralık 2050 dönemine aittir. Şekil 1'de çalışmada kullanılan meteoroloji istasyonlarının havza üzerindeki konumları ve havzayı kapsayan ERA-İnterim ızgaraları verilmiştir. Havzada bulunan meteoroloji istasyonların konum bilgileri, hangi kurum tarafından işletildiği ve çalışmada kullanılan GCM'lere ait detaylı bilgiler Okkan ve Kirdemir [3] çalışmasında detaylı olarak verilmiştir.

## 3. Yöntem

### 3.1. Ölçek indirgeme ve çoklu model birleştirme stratejisi

Çözünürlük bakımından nispeten kaba olan genel dolaşım modelleri (GCM'ler) iklim değişikliğinin yerel ölçekteki hidro-meteorolojik etkilerini değerlendirmede yeterli değildir. Bu nedenle, istasyon ölçeğinde kaba çözünürlüklü atmosferik modellerin etkisini yorumlamak için yüksek çözünürlüklü sonuçlara ihtiyaç duyulmaktadır [21, 22, 23]. Bu ihtiyaçtan dolayı kaba çözünürlüklü GCM verilerinin ölçek indirgeme yöntemi

kullanılarak yerel ölçeğe indirgenmesiyle çalışma alanının iklimsel özelliklerini daha güvenilir bir şekilde temsil eden veri setine ulaşmak mümkündür.



Şekil 1. Gediz Havzası'nda bulunan meteoroloji istasyonları ve havzayı kapsayan ERA-Interim ızgaraları [3, 4].

Ölçek indirgeme modelleri genel olarak istatistiksel ve dinamik olarak iki gruba ayrılmaktadır. Dinamik ölçek indirgeme bölgesel iklim modellerine ait çalışmaları içermekte ve yüksek çözünürlükte bilgi barındırmaktadır. Ancak bu modeller çok fazla girdi istemekte, fazla parametre içermekte ve başlangıç-sınır koşulları olarak GCM'lerin kaba çıktılarını kullanmaktadırlar. GCM'lerden gelen belirsizlikler bu modellerde yanlılık miktarını arttırmakta bununla beraber uygulama aşamasında işlem yükü de oldukça fazladır. Bu nedenle, kaba ölçekli tahminleyiciler ile yerel ölçekli gözlenmiş değişkenler arasında istatistiksel ilişkilerin kurulmasına dayanan istatistiksel ölçek indirgeme modelleri daha pratik yöntemler olarak anılmaktadır [3, 21-23]. Bu çalışmaya altlık teşkil eden Okkan ve Kirdemir[3] çalışmasında, makine öğrenmesi teorisine dayanan yapay sinir ağları (YSA) ve en küçük kareler destek vektör makinesi (EKDVM) yöntemleri 39 adet istasyonun yağış ölçek indirgenmesinde kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada, öncelikle tüm olası regresyonlar (APREG) yöntemi ile Gediz Havzası yağışlarını temsil eden tahminleyici değişkenler tespit edilmiştir. APREG yönteminde oluşturulan lineer regresyon modellerinde girdi olarak ERA-Interim veri setleri kullanılmış ve ilgili istasyon yağışları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu uygulamada işlem yükünü azaltan ve aynı zamanda en uygun tahmini veren tek değişkenli bir model dikkate alınmış ve bu modelde ERA-Interim analiz veri setine ait yağış ( $pr$ ) değişkeni en uygun tahminleyici olarak seçilmiştir. Böylece, her bir istasyon için, istatistiksel ölçek indirgeme modellerinde kullanılmak üzere modele girdi olarak sunulacak değişken seçilmiş ve yerel ölçekteki yağışlar arasında ilişki kuracak model parametreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır [3]. İstatistiksel ölçek indirgeme uygulamalarında YSA ve EKDVM modellerinin performanslarını değerlendirmede kullanılan indisler Moriasi vd.[24] çalışmasında detaylı bir şekilde verilmiştir.

Literatürde tekil iklim modellerinin yarattığı belirsizliklerden, ayrıca çoklu iklim modellerinin uygulamalarında hangi modelin bir diğerine göre üstün olduğunun

belirsizliği vurgulanmıştır [4, 21]. Bu bağlamda Knutti vd. [25] tarafından hazırlanan çalışmada, IPCC'in 4. Değerlendirme Raporu sonrası çoklu iklim projeksiyonlarının birleştirilmesi hakkında tavsiyelerde bulunulmuştur. Hazırlanan raporda çalışmacılar model sonuçlarının ağırlıklı ortalamalarının kullanımını tavsiye etmişler, bu nedenle çalışmada Bayes Model Ortalaması (BMA) yöntemi kullanılarak 12 modele ait indirgenmiş sonuçların ağırlıklı ortalaması alınmıştır. Böylece REF ve RCP8.5 senaryosu kapsamında her bir istasyon için indirgenmiş ve akabinde ağırlıklandırılmış yağış tahminleri elde edilmiştir. BMA yönteminin detaylı anlatımı Okkan ve Kirdemir[4] çalışmasında verilmiştir.

### 3.2. Çalışmada kullanılan yanlılık düzeltme yöntemleri

#### 3.2.1. Kantil haritalama

Kantil haritalama (QM) yanlılık düzeltme yöntemi GCM'lere ait dağılımların gözlenmiş verilere ait dağılımların üzerine haritalanması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde, verilerin uyum gösterdiği teorik dağılımlar dikkate alınarak REF dağılımları altında her aya ait geçmiş ve gelecek dönem eklenik olasılık değerleri ve bu değerlere karşılık gelen kantil değerleri gözlenmiş dağılımlar altında elde edilerek düzeltilmiş yağış projeksiyonları elde edilir. QM ile elde edilen düzeltilmiş yağış değeri aşağıdaki formül ile elde edilebilir [3, 13].

$$y_{cor}(t) = F^{-1}\left(F\left(y_{mod}(t), \theta_{REF}\right), \theta_{obs}\right) \quad (1)$$

Burada,  $y_{cor}(t)$  t zamanındaki düzeltilmiş yağış değerini,  $y_{mod}(t)$  t ayındaki birleştirilen iklim modelinden elde edilen REF veya RCP8.5 senaryosuna ait yağış değerini,  $\theta_{REF}$  ve  $\theta_{obs}$  sırasıyla benzeştirilen REF ve gözlenmiş verilerden elde edilmiş dağılım parametrelerini,  $F(.)$  ve  $F^{-1}(.)$  ise sırasıyla REF dağılımına ait eklenik olasılık fonksiyonunu (CDF) ve gözlenmiş verilere ait ters kümülatif olasılık fonksiyonunu temsil etmektedirler.

#### 3.2.2. Eş oran kantil haritalama

Wang vd.[26] tarafınca yürütülen çalışmada, eş uzaklık kantil haritalama yönteminin [27] oran ölçme düzeyindeki değişkenlerin yanlılıklarını düzeltmede yetersiz kalmasından dolayı eş oran kantil haritalama (ERQM) yöntemi geliştirilmiştir ve bu yöntemde standart QM yöntemine ek olarak gelecek döneme ait dağılım yapısı da dikkate alınmıştır. Bu yöntem ile düzeltilmiş yağış değeri aşağıda verilen Denklem 2 aracılığıyla elde edilebilir.

$$y_{cor}(t) = y_{mod}(t) \frac{F^{-1}\left(F\left(y_{mod}(t), \theta_{mod}\right), \theta_{obs}\right)}{F^{-1}\left(F\left(y_{mod}(t), \theta_{mod}\right), \theta_{REF}\right)} \quad (2)$$

Burada,  $\theta_{mod}$  modellenmiş geçmiş veya gelecek döneme ait verinin dağılım parametrelerini temsil etmektedir.

#### 3.2.3. Trendsizleştirilmiş kantil haritalama

Cannon vd. [13] tarafından yapılan çalışma, QM veya ERQM uygulamalarında geçmiş verilerin dağılım yapısı esas alınarak değerlendirilen tahminlerin tanımlı aralıklarının aşması durumunda ekstrapolasyon önermemektedir. Bunun yerine, REF dağılımı

içerisindeki eğilim yapısı elimine edildikten sonra, tekrar ilgili rölatif eğilim miktarını düzeltilmiş değere etki ettirme ilgili çalışmada daha tutarlı görülmüştür. DQM olarak kısaltılan yöntemdeki süreç aşağıdaki gibi işletilmektedir.

$$y_{cor}(t) = F^{-1} \left( F \left( \frac{\bar{y}_{REF}(t) y_{mod}(t)}{\bar{y}_{mod}(t)}, \theta_{REF} \right), \theta_{obs} \right) \frac{\bar{y}_{mod}(t)}{\bar{y}_{REF}(t)} \quad (3)$$

Burada,  $\bar{y}_{REF}$  ve  $\bar{y}_{mod}$  sırasıyla  $t$  ayındaki uzun dönem REF ve modellenmiş verilerin ortalamasını ifade etmektedir.

### 3.2.4. Kantil delta haritalama

Kantil Delta Haritalama (QDM) metodu Cannon vd.[13] tarafından önerilmiş ve doğrudan rölatif değişimler dikkate alınarak modellenmiş verilerdeki yanlılıkları düzeltilme yoluna gidilmiştir. Bu yöntem DQM ile benzerlikler gösterse de, aralarındaki en büyük fark DQM'de sadece ortalamalar arasındaki rölatif değişimleri dikkate alınırken, QDM'de bu durum tüm yüzdeler için uygulanmaktadır. QDM ile düzeltilmiş yağış değerleri Denklem 4'te verildiği şekilde hesaplanabilmektedir.

$$y_{cor}(t) = F^{-1} \left( F(y_{mod}(t), \theta_{mod}), \theta_{obs} \right) \left( \frac{y_{mod}(t)}{F^{-1} \left( F(y_{mod}(t), \theta_{mod}), \theta_{REF} \right)} \right) \quad (4)$$

Çalışmada, kullanılan yanlılık düzeltme yöntemlerinin performanslarını değerlendirmek üzere 9 farklı indisten faydalanılmıştır. Bu indisler uzun dönem yağış verilerine uygulanmış aritmetik ortalama (AO), sulak periyot ortalaması (SPO), kurak periyot ortalaması (KPO), kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar mevsimlerine ait yağış ortalamaları (sırasıyla KO, İO, YO, SO), ekstrem yağışları temsil eden 95. yüzdeler değerlerini aşan yağışların toplamı (Y95) ve 99. yüzdeler değerlerini aşan yağışların toplamı (Y99) şeklindedir. Rölatif değişim kavramı RCP8.5 senaryo yağışlarına ait indis değerlerinin REF yağışlarına ait indis değerlerine oranı ile elde edilmektedir. Yukarıda belirtilen tüm bu indisler düzeltilmemiş ve düzeltilmiş yağışlara ayrı ayrı uygulanmış ve daha iyi performans gösteren yöntemin düzeltilmemiş yağışlardaki rölatif değişimleri daha iyi temsil edebildiği düşünülmüştür [4, 28]

## 4. Bulgular

Çalışmada, yanlılık düzeltme yöntemlerinin kullanılmasından önce, kaba çözünürlüklü GCM simülasyonları YSA ve EKDVM yöntemlerine dayanan istatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri ile istasyon ölçeğine indirgenmiştir. Reanaliz veri setinde bulunan yağış tahminleyicisi ölçek indirgeme yöntemlerine girdi olarak sunulmuş ve 39 adet meteoroloji istasyonu için kaba çözünürlüklü GCM simülasyonları istasyon ölçeğine indirgenmiştir. YSA ve EKDVM ile elde edilmiş her bir istasyona ait ölçek indirgeme sonuçları Okkan ve Kirdemir [3] çalışmasında verilmiştir. Söz konusu performanslara göre kullanılan her iki yöntem ile istasyonların yaklaşık %90'ında 'çok iyi' ve 'iyi' performanslar sağlanmıştır. İlgili meteoroloji istasyonunda hangi modele ait sonuçların kullanıldığı bilgisi söz konusu kaynakta mevcuttur. Aynı çalışmada, her bir istasyon için hangi ölçek indirgeme modeline ait sonuçların kullanılacağına karar verildikten sonra, BMA yöntemi ile tahminler ağırlıklandırılmış ve belirsizliği azaltılmış projeksiyonların



elde edildiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada, Okkan ve Kirdemir [3] tarafından daha önceden elde edilen senaryo bazlı projeksiyonlar yanlışlık düzeltme işlemlerine maruz bırakılmıştır.

Tablo 1. Manisa istasyonu için gözlenmiş (A), REF (B) ve RCP8.5 (C) senaryo yağışlarına ait PPCC testi sonuçları.

Aylar	Teorik Dağılımlar											
	Normal			LN2		Gumbel			Gamma-2			
	$\mu$	$\sigma$	$r(x_m, x_m')$	$\mu$	$\sigma$	$r(x_m, x_m')$	$\alpha$	$\beta$	$r(x_m, x_m')$	$\alpha$	$\beta$	$r(x_m, x_m')$
Ocak	113.208	86.435	0.970	4.500	0.678	0.953	0.014	73.785	0.979	65.993	1.715	0.975
Şubat	94.477	72.252	0.941	4.318	0.679	0.994	0.017	61.523	0.988	55.255	1.710	0.994
Mart	80.542	44.917	0.977	4.253	0.520	0.953	0.027	60.056	0.968	25.049	3.215	0.969
Nisan	58.392	30.812	0.987	3.944	0.496	0.965	0.040	44.339	0.978	16.259	3.591	0.980
Mayıs	34.254	30.743	0.929	3.238	0.769	0.985	0.040	20.232	0.978	27.592	1.241	0.987
Haziran	9.785	15.871	0.782	1.636	1.136	0.962	0.078	2.546	0.882	25.743	0.380	0.965
Temmuz	5.935	11.393	0.763	1.009	1.243	0.980	0.108	0.739	0.874	21.870	0.271	0.984
Ağustos	4.577	10.166	0.710	0.631	1.334	0.984	0.121	-0.059	0.833	22.578	0.203	0.979
Eylül	11.173	21.213	0.759	1.650	1.236	0.982	0.058	1.498	0.871	40.273	0.277	0.983
Ekim	31.489	30.786	0.933	3.114	0.819	0.980	0.040	17.447	0.981	30.098	1.046	0.992
Kasım	101.223	57.320	0.966	4.478	0.527	0.965	0.021	75.079	0.974	32.459	3.118	0.971
Aralık	142.546	87.883	0.926	4.799	0.568	0.985	0.014	102.463	0.976	54.182	2.631	0.978
Yıllık	687.601	151.626	0.979	6.509	0.218	0.992	0.008	618.445	0.992	33.436	20.565	0.990

B. Aylar	Teorik Dağılımlar											
	Normal			LN2		Gumbel			Gamma-2			
	$\mu$	$\sigma$	$r(x_m, x_m')$	$\mu$	$\sigma$	$r(x_m, x_m')$	$\alpha$	$\beta$	$r(x_m, x_m')$	$\alpha$	$\beta$	$r(x_m, x_m')$
Ocak	107.912	20.004	0.974	4.664	0.184	0.987	0.061	98.788	0.991	3.708	29.100	0.984
Şubat	80.278	15.420	0.995	4.367	0.190	0.985	0.080	73.245	0.967	2.962	27.103	0.990
Mart	70.425	16.881	0.958	4.227	0.236	0.971	0.073	62.726	0.967	4.046	17.405	0.970
Nisan	48.065	9.981	0.984	3.851	0.205	0.967	0.123	43.513	0.942	2.073	23.189	0.974
Mayıs	44.930	9.541	0.987	3.783	0.210	0.980	0.129	40.579	0.963	2.026	22.177	0.984
Haziran	35.490	10.685	0.978	3.526	0.295	0.978	0.115	30.616	0.971	3.217	11.031	0.982
Temmuz	14.951	5.612	0.990	2.639	0.363	0.961	0.219	12.391	0.961	2.106	7.099	0.975
Ağustos	7.852	5.594	0.900	1.856	0.641	0.983	0.220	5.301	0.963	3.986	1.970	0.974
Eylül	18.587	6.781	0.973	2.860	0.353	0.993	0.181	15.495	0.993	2.474	7.514	0.991
Ekim	61.227	20.485	0.978	4.062	0.326	0.994	0.060	51.884	0.993	6.854	8.933	0.992
Kasım	97.752	19.368	0.993	4.563	0.196	0.993	0.064	88.918	0.985	3.837	25.474	0.994
Aralık	119.230	19.329	0.990	4.768	0.161	0.994	0.064	110.414	0.986	3.134	38.048	0.994
Yıllık	706.700	53.564	0.982	6.558	0.076	0.981	0.023	682.269	0.958	4.060	174.069	0.981

C. Aylar	Teorik Dağılımlar											
	Normal			LN2		Gumbel			Gamma-2			
	$\mu$	$\sigma$	$r(x_m, x_m')$	$\mu$	$\sigma$	$r(x_m, x_m')$	$\alpha$	$\beta$	$r(x_m, x_m')$	$\alpha$	$\beta$	$r(x_m, x_m')$
Ocak	109.019	16.803	0.989	4.680	0.153	0.991	0.074	101.366	0.984	2.590	42.096	0.991
Şubat	69.274	17.496	0.973	4.207	0.249	0.978	0.071	61.306	0.976	4.419	15.677	0.979
Mart	65.157	14.373	0.967	4.153	0.218	0.975	0.086	58.611	0.974	3.170	20.552	0.974
Nisan	49.108	9.967	0.987	3.874	0.201	0.992	0.124	44.568	0.988	2.023	24.275	0.992
Mayıs	43.517	9.447	0.962	3.750	0.215	0.967	0.131	39.215	0.965	2.051	21.219	0.967
Haziran	33.671	9.184	0.951	3.481	0.268	0.971	0.135	29.489	0.969	2.505	13.443	0.969
Temmuz	14.557	5.956	0.987	2.601	0.393	0.978	0.208	11.844	0.980	2.437	5.974	0.987
Ağustos	7.905	5.321	0.978	1.881	0.611	0.978	0.233	5.482	0.993	3.582	2.207	0.992
Eylül	15.301	6.838	0.964	2.637	0.427	0.991	0.181	12.187	0.991	3.056	5.007	0.988
Ekim	48.571	11.210	0.997	3.857	0.228	0.987	0.111	43.466	0.973	2.587	18.775	0.992
Kasım	88.584	16.580	0.987	4.467	0.186	0.989	0.075	81.033	0.982	3.103	28.545	0.989
Aralık	116.839	19.628	0.990	4.747	0.167	0.988	0.063	107.900	0.974	3.297	35.434	0.990
Yıllık	661.503	53.707	0.993	6.491	0.081	0.991	0.023	637.043	0.965	4.360	151.705	0.992

Çalışmada kullanılan yöntemler dağılım tabanlı stratejiler esas alınarak uygulandığından, düzeltilmemiş REF ve RCP8.5 senaryolarına ait projeksiyonlara ve gözlenmiş verilere ait dağılım uygunluk testleri uygulanmıştır. Bu hususta Normal, 2 parametrelili Lognormal, Gumbel ve 2 parametrelili Gamma dağılımları için olasılık çizgisi korelasyon katsayısı (PPCC) yöntemi uygulanmış, her bir istasyon için yapılan

uyum testlerine göre tüm istasyonlarda verilerin 2 parametrelili Gamma dağılımına daha yüksek korelasyon değerleri ile uyduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple yanlışlık düzeltme yöntemlerinde 2 parametrelili Gamma dağılımına ait CDF ve ters CDF'ler kullanılmıştır. Tablo 1'de Manisa istasyonuna ait PPCC testi sonuçları örnek olarak verilmiştir (Burada kırmızı ile gölgelendirilmiş hücreler ilgili dağılıma ait kritik korelasyon katsayısı değerini aşan değerleri temsil etmektedir.  $r(X_m, X_m')$  gerçek verilerle teorik dağılım altında elde edilen kantil değerleri arasındaki korelasyon katsayısını temsil etmektedir).

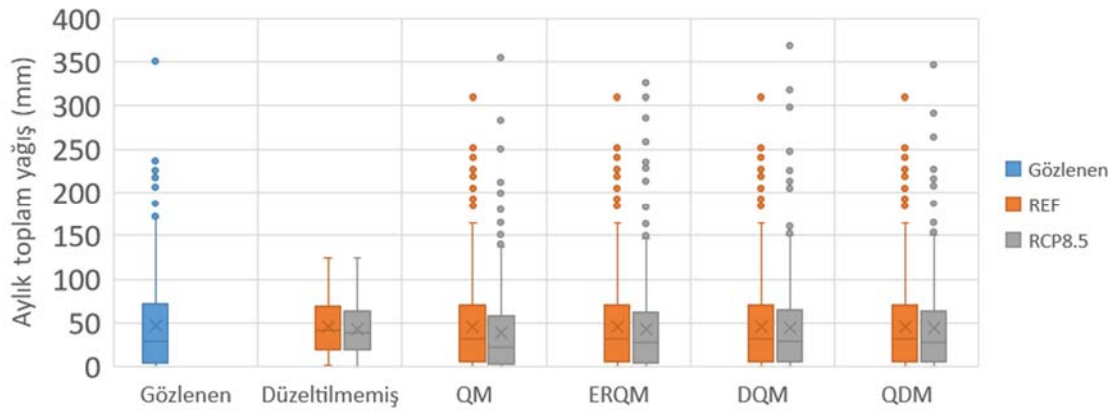
Uyum testlerinin ardından, çalışmada kullanılan yanlışlık düzeltme yöntemlerinde kullanılacak dağılım parametreleri momentler yöntemiyle tahmin edilmiş ve daha sonra REF ve RCP8.5 senaryosuna ait yağış projeksiyonları düzeltilmiştir. Denklem 1-4'ten de anlaşılacağı üzere tüm yöntemlerde REF'e ait yağış düzeltmelerinde aynı değerler elde edilmektedir. Metotlar arasındaki fark gelecek dönem yağışlarını düzeltirken ortaya çıkmakta bu da aynı zamanda düzeltilmemiş projeksiyonlara ait rölatif değişimleri yansıtmada konusunda çeşitli farklılıklara sebep olmaktadır. Gözlenen yağışlarla birlikte elde edilen düzeltilmemiş ve ilgili yöntemlerle düzeltilmiş projeksiyonlar incelendiğinde düzeltilmemiş yağış projeksiyonlarının gözlenmiş yağış değerlerine ait değişkenliği düşük tahmin ettiği gözlenmektedir. Bununla birlikte, düzeltilmemiş projeksiyonlar değişkenliklerde olduğu gibi çarpıklık değerlerini de düşük tahmin ettiği göze çarpmaktadır. Yanlışlık düzeltme işlemleri ile REF'e ait dağılım momentleri gözlenmiş değerlere oldukça yakınsamakta ve fiziksel olarak mantıklı sonuçlar türetildiği sonucuna varılmaktadır (Şekil 2). Çalışmada kullanılan yöntemler gelecek döneme ait düzeltme işlemlerini farklı stratejilere göre yapmakta ve bu sebepten farklı yağış projeksiyonları oluşmaktadır. Tablo 2'de Akhisar istasyonu için RCP8.5 senaryosuna ait düzeltilmemiş ve ilgili yanlışlık düzeltme yöntemleri ile elde edilmiş gelecek dönem yağışlarına ait bazı temel istatistikler verilmiştir. Tablo 2'den de görüldüğü üzere tüm yöntemler gelecek dönemde istatistiksel olarak farklı bir yapıya sahip olmakta aynı zamanda gelecekte ortalama yağışlarda birbirinden farklı azalmalar öngörmektedir.

Tablo 2. Akhisar istasyonu için düzeltilmemiş ve farklı yöntemlerle elde edilmiş gelecek dönem yağış projeksiyonlarına ait temel istatistikler

Yöntem	Temel İstatistikler							
	Min (mm)	Max (mm)	Ortalama (mm)	Medyan (mm)	Standart Sapma (mm)	Çarpıklık	Değişkenlik katsayısı	Değişim (%)
Düzeltilmemiş	0.39	124.10	43.11	39.12	28.18	0.51	0.65	-6.04
QM	0.00	355.71	38.72	21.81	47.53	2.32	1.23	-16.25
ERQM	0.00	326.36	42.57	27.72	49.98	2.17	1.17	-7.93
DQM	0.00	369.47	43.80	28.89	50.89	2.23	1.16	-5.28
QDM	0.00	346.30	43.62	28.28	50.53	2.11	1.16	-5.66

Özellikle düzeltilmemiş, ERQM, DQM ve QDM metotları ile düzeltilmiş aylık yağışlarda yaklaşık olarak %5.3-%8 arasında bir azalma öngörülürken, QM metodu kullanılarak elde edilen bu tahmin yaklaşık %16.3 civarındadır. Bu durumda Akhisar istasyonu için QM ile yapılan tahminler diğer yöntemler ile elde edilen tahminlere göre anlamlı bir farklılık yarattığı sonucuna varılabilir. Çalışmada kullanılan yanlışlık düzeltme yöntemlerinin performansları daha önce belirtilen 9 farklı indis ile kıyaslanmıştır. Bu hususta düzeltilmiş ve düzeltilmemiş projeksiyonlardaki rölatif değişimlere ait mutlak hatalar incelenmiştir. Yapılan kıyaslamalarda QDM yönteminin AO indisine göre istasyonların anlamlı bir çoğunluğunda (yaklaşık %82'sinde) diğer yöntemlere göre daha az hata ile rölatif değişimleri modellediği gözlenmiştir. QDM'in

yanı sıra DQM yöntemi AO indisine göre Gördes, Köprübaşı, Demirköprü, Hanya, Sarılar ve Üçpınar, ERQM ise sadece Muradiye istasyonunda rölatif değişimleri diğer yöntemlere göre daha iyi yansıtabilmişlerdir. QM yöntemi ise AO indisine göre göreceli olarak daha yüksek hatalara sahip sonuçlar türettiği görülmektedir. AO indisindeki sonuçlara bakılacak olursa, QM'in tahmin ettiği aylık ortalama yağış değişimlerinde mutlak değerce yüksek tahmin etme olasılığı söz konusudur. Benzer durum, KPO, KO, İO, YO ve SO indislerinde de mevcuttur. QDM yanlışlık düzeltme yöntemi bahsi geçen indislerde 39 adet meteoroloji istasyonunun birçoğunda düzeltilmemiş projeksiyonlardaki rölatif değişimleri diğer yöntemlere göre daha iyi yansıtıldığı gözlenmiştir. Bu indisler için yapılan hesaplamalarda yine AO'da olduğu DQM ve ERQM yöntemleri istasyonların bir kısmında daha küçük mutlak hata değerleri türettiği gözlenmiştir.

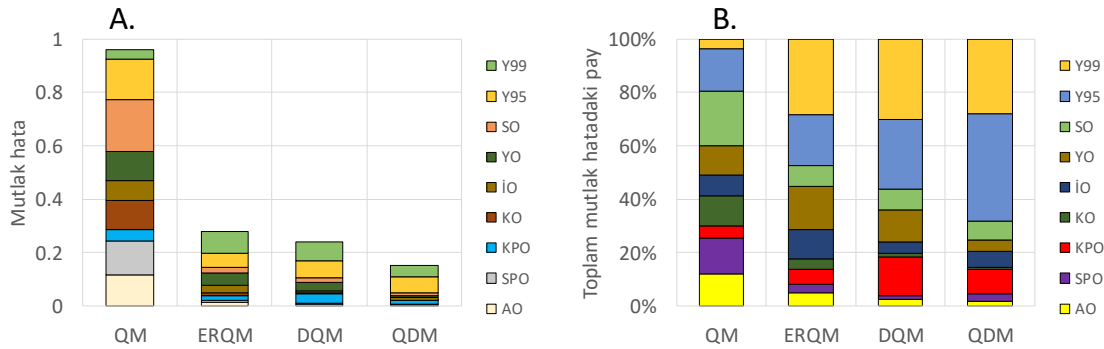


Şekil 2. Akhisar istasyonuna ait gözlenen aylık toplam yağışları, düzeltilmemiş ve her bir yanlışlık düzeltme yöntemi ile elde edilmiş REF ve RCP8.5 senaryosuna ait aylık toplam yağışları temsil eden kutu diyagramları

Bu indisler için yapılan hesaplamalarda yine AO'da olduğu DQM ve ERQM yöntemleri istasyonların bir kısmında daha küçük mutlak hata değerleri türettiği gözlenmiştir. KPO indisinde ise yanlışlık düzeltme yöntemlerinin performansları istasyonlara göre farklılık göstermektedir. Bu indise göre rölatif değişimlerin ERQM metodu ile 39 adet istasyonun 20'sinde diğer yöntemlere göre daha iyi modellenebildiği tespit edilmiştir. Yine bu istasyonların 15'inde QDM metodu KPO indisine ait rölatif değişimleri daha iyi yansıttığı görülmüştür. Ortalamaları esas alan indislerde rölatif değişimlerde genel olarak büyük hatalar türeten QM yöntemi, KPO indisine göre Gölarmara, Avşar ve Üçpınar istasyonlarında daha küçük hata değerleri ile projeksiyonlar türetebilmiştir. DQM yöntemi ile ilgili indise göre sadece Muradiye istasyonunda en iyi sonuçlar elde edilebilmiştir. Aylık ekstrem yağışları temsil eden Y95 ve Y99 indislerinde ise ortalamaları esas alan indislere göre daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. Y95 indisi ile elde edilen rölatif değişimler ve bunlara karşılık gelen hata değerlerine göre, ERQM diğer yöntemlere göre performans açısından daha iyi sonuçlar türetebilmiştir. Bu indise göre QM ve DQM istasyonların 6'sında, QDM ise istasyonların 7'sinde rölatif değişimleri daha iyi yansıtarak yağışları modelleyebilmişlerdir. Y99 indisinde ise QM 39 istasyonun 21'inde QDM ise 11'inde daha iyi sonuçlar üretebilmişlerdir.

Söz konusu indisler için yapılan hesaplamalarda yine AO'da olduğu DQM ve ERQM yöntemleri istasyonların bir kısmında daha küçük mutlak hata değerleri türettiği

gözlenmiştir. KPO indisinde ise yanlışlık düzeltme yöntemlerinin performansları istasyonlara göre farklılık göstermektedir. Bu indise göre rölatif değişimlerin ERQM metodu ile 39 adet istasyonun 20'sinde diğer yöntemlere göre daha iyi modellenebildiği gözlenmiştir. Yine bu istasyonların 15'inde QDM metodu KPO indisine ait rölatif değişimleri daha iyi yansıttığı gözlenmiştir. Ortalamaları esas alan indislerde rölatif değişimlerde genel olarak büyük hatalar türeten QM yöntemi, KPO indisine göre Gölarmara, Avşar ve Üçpınar istasyonlarında daha küçük hata değerleri ile projeksiyonlar türetebilmiştir. DQM yöntemi ile ilgili indise göre sadece Muradiye istasyonunda en iyi sonuçlar elde edilebilmiştir. Aylık ekstrem yağışları temsil eden Y95 ve Y99 indislerinde ise ortalamaları esas alan indislere göre daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. Y95 indisi ile elde edilen rölatif değişimler ve bunlara karşılık gelen hata değerlerine göre, ERQM diğer yöntemlere göre performans açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu indise göre QM ve DQM istasyonların 6'sında, QDM ise istasyonların 7'sinde rölatif değişimleri daha iyi yansıtarak yağışları modelleyebilmişlerdir. Y99 indisinde ise QM 39 istasyonun 21'inde QDM ise 11'inde daha iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır.



Şekil 3. Foça meteoroloji istasyonu için performans indislerine göre eklenik hataları ve bu hataların indislere göre paylarını gösteren eklenik çubuk diyagramı

Çalışmada kullanılan indislerdeki hataların toplamaları kıyaslandığında tüm istasyonlarda, QM yönteminden elde edilmiş yağış projeksiyonlarındaki rölatif değişimlere ait hataların diğer yöntemlere göre daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Kullanılan indislerce elde edilen toplam hatalarda en küçük değerler QDM yanlışlık düzeltme yöntemi ile elde edilmiştir. Hatalardaki paylar göz önüne alındığında ERQM, DQM ve QDM yöntemlerinde en büyük hatalar ekstrem süreçleri temsil eden Y95 ve Y99 indislerinde gözlenmektedir. İlgili yöntemler toplam hatanın yaklaşık %30'unu Y99 indisinde üretmektedir. QM yöntemi için ise Y99 indisine göre elde edilen hatalar QM yönteminin ürettiği toplam hatalar içerisinde en küçük paya sahiptir (~%3). Genel olarak diğer yöntemlere göre daha iyi performans gösteren QDM yöntemi ise toplam hataların yaklaşık %40'ını Y95 indisinde türetmiştir. QM metodu AO, SPO ve SO başta olmak üzere genel olarak ortalama değerlerine bağlı indislerde daha yüksek hata değeri türettiği gözlenmiş, bu üç indise göre ölçülen hatalar toplam hataların yaklaşık %45'ini temsil etmektedir. Tüm indislerde ortaya çıkan hatalar ve bu hataların toplam hatalardaki payını gösteren eklenik sütun grafikleri Foça meteoroloji istasyonu için örnek olarak Şekil 3'te verilmiştir.

## 5. Sonuçlar

Yanlılık düzeltme yöntemleri kaba çözünürlük GCM'lerden gelen yanlılıkları düzeltmekte etkili bir araç olup iklim değişikliği çalışmalarının vazgeçilmez bir bileşeni haline gelmiştir. Literatürde farklı stratejileri esas alan yöntemler mevcut olup bu yöntemleri ile farklı projeksiyonlar elde edilebilmektedir. Yanlılık düzeltme yöntemleri gelecek dönem projeksiyonlarında düzeltilmemiş GCM'lerdeki rölatif değişimleri iyi yansıtabilmeli ve bu hususta performansları değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada dağılım tabanlı 4 adet yanlılık düzeltme yönteminin performansı sınanmış ve tanımlanan farklı performans indislerine göre ilgili yöntemler birbirleri ile kıyaslanmıştır. Çalışma Gediz Havzası yağışları için uygulanmış ve IPCC'nin son değerlendirme raporunda belirtilen RCP senaryolarını esas alan 12 adet iklim modeli ile Gediz Havzası yağışları modellenmiştir. ANN ve LSSVM tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme modelleri ile kaba çözünürlüklü GCM'ler referans ve RCP8.5 senaryolarına göre istasyon ölçeğine indirgenmiş daha sonra BMA yöntemi ile çoklu modeller ağırlıklandırılarak istatistiksel olarak belirsizliği azaltılmış projeksiyonlar türetilmiştir. PPCC testi ile 2 parametrelili Gamma dağılıma uyduğu tespit edilen gözlenen, REF ve RCP8.5 senaryolarına ait Gediz Havzası yağışları, QM, ERQM, DQM ve QDM yöntemleri ile ayrı ayrı yanlılıkları düzeltilmiş ve uzun dönem ortalamaları ve ekstrem süreçleri değerlendiren 9 adet performans indisi ile sınanmıştır. Yapılan değerlendirmelere göre QDM yöntemi ortalama bazlı indislerin çoğunda rölatif değişimleri diğer yöntemlere göre daha küçük hatalarla simüle edebilmiştir. Bunların arasında kurak dönem ortalamalarını temsil eden KPO indisine göre ERQM yöntemi daha uygun sonuçlar vermiştir. Ekstrem süreçleri temsil eden 95. ve 99. yüzdilik değerlerinin toplamını temsil eden Y95 ve Y99 indislerine göre ortalamalara göre daha farklı sonuçlar elde edilmiştir. Y99 indisine göre QM diğer yöntemlere nazaran daha iyi performans göstermiştir. Y95 indisine göre ise ERQM yöntemi diğer yöntemlere göre rölatif değişimleri daha iyi yansıtmıştır. İndislerce elde edilen hataların toplamı göz önüne alındığında en küçük toplam hatalar QDM metodu, en büyük hatalar ise QM metodu ile elde edilmiştir. İlgili toplam hatalardaki indislerin payları incelendiğinde, diğer yöntemlere göre daha iyi performans gösteren QDM metodu hataların anlamlı bir bölümünü Y95 ve Y99 indislerinde üretmiştir (yaklaşık %70). Bu durumda Gediz Havzası aylık toplam yağışları için QDM yöntemi ortalamalara ait değişimleri ekstrem süreçlere ait değişimlere göre daha iyi modelleyebildiği söylenebilir. Yöntemlerin farklı havzalara ve değişkenlere uygulanması ile alakalı çalışmalar tarafımızca sürdürülmektedir. Örnek olarak ele alınan Gediz Havzasının su kaynakları yönetimi için çoklu kriterli karar verme süreci modellemesi Yılmaz ve Harmancıoğlu [29, 30] tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda daha önce ele alınmıştır. Gerek Okkan ve Kirdemir[3, 4] tarafından yürütülen çalışmalar, gerekse bu çalışma ile elde edilen yansız yağış projeksiyonları kullanılarak havzadaki akışların ve çok kriterli karar verme sürecinin ne ölçüde etkileneceği gelecek çalışmalarımızda ayrıca sorgulanacaktır.

## Teşekkür

Bu çalışma, ikinci yazar tarafından yürütülen, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)-Çevre, Atmosfer, Yer ve Deniz Bilimleri Araştırma Destek Grubu (ÇAYDAG) tarafından desteklenen 114Y716 numaralı tamamlanmış proje içeriğinden hazırlanmıştır. Yazarlar çalışmayı özenle değerlendiren iki hakeme ayrıca müteşekkirdir.

## Kaynaklar

- [1] IPCC, Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535, (2013).
- [2] Ghosh, S. ve Mujumdar, P.P., Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow using relevance vector machine, **Advances in Water Resources**, **31**, 1, 132–146, (2008).
- [3] Okkan, U. ve Kirdemir, U., Downscaling of monthly precipitation using CMIP5 climate models operated under RCPs, **Meteorological Applications**, **23**, 3, (2016).
- [4] Okkan, U. ve Kirdemir, U., Investigation of the Behavior of an Agricultural-Operated Dam Reservoir Under RCP Scenarios of AR5-IPCC, **Water Resources Management**, **32**, 8, 2847-2866, (2018).
- [5] Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen J. E., ve Engen-Skaugen, T., Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations-a comparison of methods, **Hydrology and Earth System Sciences**, **16**, 9, 3383–3390, (2012).
- [6] Lenderink, G., Buishand, A. ve Van Deursen, W., Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach, **Hydrology and Earth System Sciences**, **11**, 3, 1145–1159, (2007).
- [7] Leander, R. ve Buishand, T.A., Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows, **Journal of Hydrology**, **332**, 3–4, 487–496, (2007).
- [8] Leander, R., Buishand, T.A., van den Hurk, B.J.J.M. ve de Wit, M.J.M, Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output, **Journal of Hydrology**, **351**, 3–4, 331–343, (2008).
- [9] Schmidli, J., Frei, C., ve Vidale, P.L., Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods, **International Journal of Climatology**, **26**, 5, 679–689, (2006).
- [10] Ines, A.V.M. ve Hansen, J.W., Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies, **Agricultural and Forest Meteorology**, **138**, 1–4, 44–53, (2006).
- [11] Jakob Themeßl, M., Gobiet, A. ve Leuprecht, A., Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models, **International Journal of Climatology**, **31**, 10, 1530–1544, (2011).
- [12] Teutschbein, C. ve Seibert, J., Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods, **Journal of Hydrology**, **456–457**, 12–29, (2012).
- [13] Cannon, A.J., Sobie, S.R. ve Murdock, T.Q., Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?, **Journal of Climate**, **28**, 17, 6938–6959, (2015).
- [14] Chen, J., Brissette, F.P., Chaumont, D. ve Braun, M., Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America, **Water Resources Research**, **49**, 7, 4187–4205, (2013).
- [15] Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N. ve Zammit, C., Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China, **Hydrology and Earth System Sciences**, **19**, 6, 2547–

- 2559, (2015).
- [16] Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. ve Piontek, F., A trend-preserving bias correction &ndash; The ISI-MIP approach, **Earth System Dynamics**, **4**, 2, 219–236, (2013).
- [17] Block, P.J., Souza Filho, F.A., Sun, L. ve Kwon, H.H., A streamflow forecasting framework using multiple climate and hydrological models, **Journal of the American Water Resources Association**, **45**, 4, 828–843, (2009).
- [18] Boe, J., Terray, L., Habets, F. ve Martin, E., Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies, **International Journal of Climatology**, **27**, 1643–1655, (2007).
- [19] Sennikovs, J. ve Bethers, U., Statistical downscaling method of regional climate model results for hydrological modelling, **18th World IMACS/MODSIM Congress**, 3962–3968, Cairns, Australia, (2009).
- [20] Maraun, D., Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue, **Journal of Climate**, **26**, 2137–2143, (2013).
- [21] Okkan, U. ve Inan, G., Statistical downscaling of monthly reservoir inflows for Kemer watershed in Turkey: Use of machine learning methods, multiple GCMs and emission scenarios, **International Journal of Climatology**, **35**, 11, 3274–3295, (2015).
- [22] Okkan, U. ve Inan, G., Bayesian Learning and Relevance Vector Machines Approach for Downscaling of Monthly Precipitation, **Journal of Hydrologic Engineering**, **20**, 4, (2015).
- [23] Kirdemir, U., İklim değişikliğinin baraj havzası hidrolojisi üzerindeki olası etkilerinin modellenmesi: AR5-RCP senaryoları ve Demirköprü Barajı örneği, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, (2017).
- [24] Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Binger, R.L., Harmel, R.D. ve Veith, T.L., Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, **Transactions of the ASABE**, **50**, 3, 885–900, (2007).
- [25] Knutti, R. et al., Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections, IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections, (2010).
- [26] Wang, L. and Chen W., Equiratio cumulative distribution function matching as an improvement to the equidistant approach in bias correction of precipitation, **Atmospheric Science Letters**, **15**, 1–6, (2014).
- [27] Li, H., Sheffield J. ve Wood, E.F., Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching, **Journal of Geophysical Research**, **115**, (2010).
- [28] Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M. ve Viklander, M., Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden, **Atmospheric Research**, **92**, 3, 364–375, (2009).
- [29] Yilmaz, B., ve Harmancioglu, N., Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey, **Water SA**, **36**, 5, 563-576, (2010).
- [30] Yilmaz, B., ve Harmancioglu, N., An indicator based assessment for water resources management in Gediz River Basin, Turkey, **Water Resources Management**, **24**, 15, 4359–4379, (2010).

# Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri (FV-DÜB): güç kalitesine etkileri, uluslararası güç kalitesi standartları ve FV-DÜB barındıran dağıtım sistemleri için güç kalitesi iyileştirme yöntemleri

Alp KARADENİZ<sup>1,2\*</sup>, Murat Erhan BALCI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Çağış kampüsü, Balıkesir

<sup>2</sup>Balıkesir Üniversitesi Yenilenebilir Enerji Arş. Uyg. Merkezi, Çağış kampüsü, Balıkesir

Geliş Tarihi (Received Date): 22.10.2018

Kabul Tarihi (Accepted Date): 20.06.2019

## Özet

Günümüz güç sistemlerinde gerilim profilinin iyileştirilmesi, sistem güvenilirliğinin artırılması, hat kayıplarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması amaçlarıyla dağıtık üretim birimlerinin kullanımı yaygın hale gelmiştir. Bu dağıtık üretim birimlerinden, rüzgar türbinleri ve fotovoltaik birimler, elektrik üretiminde doğal gaz, kömür ve petrol gibi geleneksel enerji kaynaklarının kullanımını sınırlandırmaları, böylece sera gazı artışı ve küresel ısınma gibi çevresel sorunların önlenmesi için önemli birer seçenek haline gelmişlerdir. Ancak, bu dağıtık üretim birimleri, güç elektroniği devreleri üzerinden şebekeye bağlanmaları ve enerji kaynaklarının emre amade olmaması gibi sebeplerden dolayı; güç sistemlerinde çeşitli güç kalitesi problemlerine yol açmaktadır. Bu çalışmada, öncelikle fotovoltaik dağıtık üretim birimlerinde (FV-DÜB) teknolojik anlamda geline en son durum sunulmuş, daha sonra bu birimlerin güç sistemlerinde meydana getirdikleri güç kalitesi problemleri ile FV-DÜB'leri barındıran sistemler için hazırlanmış uluslararası güç kalitesi standartları irdelenmiştir. Son olarak, FV-DÜB barındıran sistemler için güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesinde uygulanan yöntemler tanıtılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Fotovoltaik enerji, dağıtık üretim, güç kalitesi.

\*Alp KARADENİZ, akaradeniz@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-0899-6581>  
Murat Erhan BALCI, mbalci@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0001-8418-8917>



## Photovoltaic distributed generation units (PV-DGU): impacts on power quality, international power quality standards and power quality improvement methods for the systems with PV-DGU

### Abstract

*In today's power systems, the use of distributed generation units has become widespread in order to improve the voltage profile, increase system reliability, reduce line losses and increase energy efficiency. Among these distributed generation units, wind turbines and photovoltaic units have limited the use of traditional energy sources such as natural gas, coal and oil in electricity generation, thus they became important options for the prevention of environmental problems such as greenhouse gas emissions and global warming. However, these distributed generation units are connected to the grid via power electronics circuits and their energy sources are non-dispatchable. Thus, they lead to various power quality problems in the power systems. In this study, firstly, the latest technological case of the photovoltaic distributed generation units (PV-DGUs) is presented. Secondly, the power quality problems caused by PV-DGUs in the power systems and the international power quality standards related with the systems containing PV-DGUs are investigated. Finally, the power quality mitigation methods have been detailed for the systems with PV-DGUs.*

**Keywords:** *Photovoltaic energy, distributed generation, power quality.*

### 1. Giriş

Fotovoltaik (FV) hücreler, rüzgar türbinleri, biyokütle, küçük hidro ve yakıt hücreleri temelli elektrik üreten dağıtık üretim birimleri (DÜB), gerilim profilinin iyileştirilmesi, sistem güvenilirliğinin artırılması, hat kayıplarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması bakımından avantajlar sağladığından, günümüz dağıtım sistemlerinde yaygın şekilde yer almaktadır [1, 2]. Ayrıca, bu yenilenebilir enerji temelli DÜB'lerin güç sistemlerinde yaygınlaşması, doğal gaz ve petrol gibi geleneksel enerji kaynaklarının kullanımına bağlı küresel ısınma ve iklim değişikliği sorunlarını engellemek bakımından önemlidir. Yenilenebilir enerji temelli DÜB'lere dayalı elektrik üretimi, geleneksel fosil enerji kaynaklarının yetersizliğinden dolayı meydana gelebilecek enerji krizlerini önlemek için de bir tedbirdir. Bu teknik avantajların yanı sıra, yenilenebilir enerji teknolojisi, fosil yakıt temelli teknolojilere kıyasla daha fazla gelişime açık olduğu için yenilenebilir enerji endüstrisi, yeni istihdam alanları oluşturma bakımından avantajlıdır [3].

FV elektrik üretim birimleri günümüz dağıtım şebekelerinde en hızlı şekilde yaygınlaşan yenilenebilir enerji temelli DÜB'lerden birisidir [4]. 2012-2017 yılları arası Dünya çapında yaklaşık olarak 300 GW güç kapasitesinde FV-DÜB kurulmuştur. Böylece 2017 yılında Dünya çapında kurulu FV-DÜB'lerin güç kapasitesi 400 GW'a çıkmıştır. FV-DÜB'lerin kapasitesinde son yıllarda meydana gelen bu artışın sebepleri, FV hücrelerin fiyatlarındaki düşüş, büyük güç seviyeleri için FV sistem elemanlarının imalatındaki teknolojik gelişmeler, hükümet teşvikleri ve ilgili bağlantı yönetmelikleri/standartlarının olgunlaşması gibi çeşitli faktörlerdir [5-7].

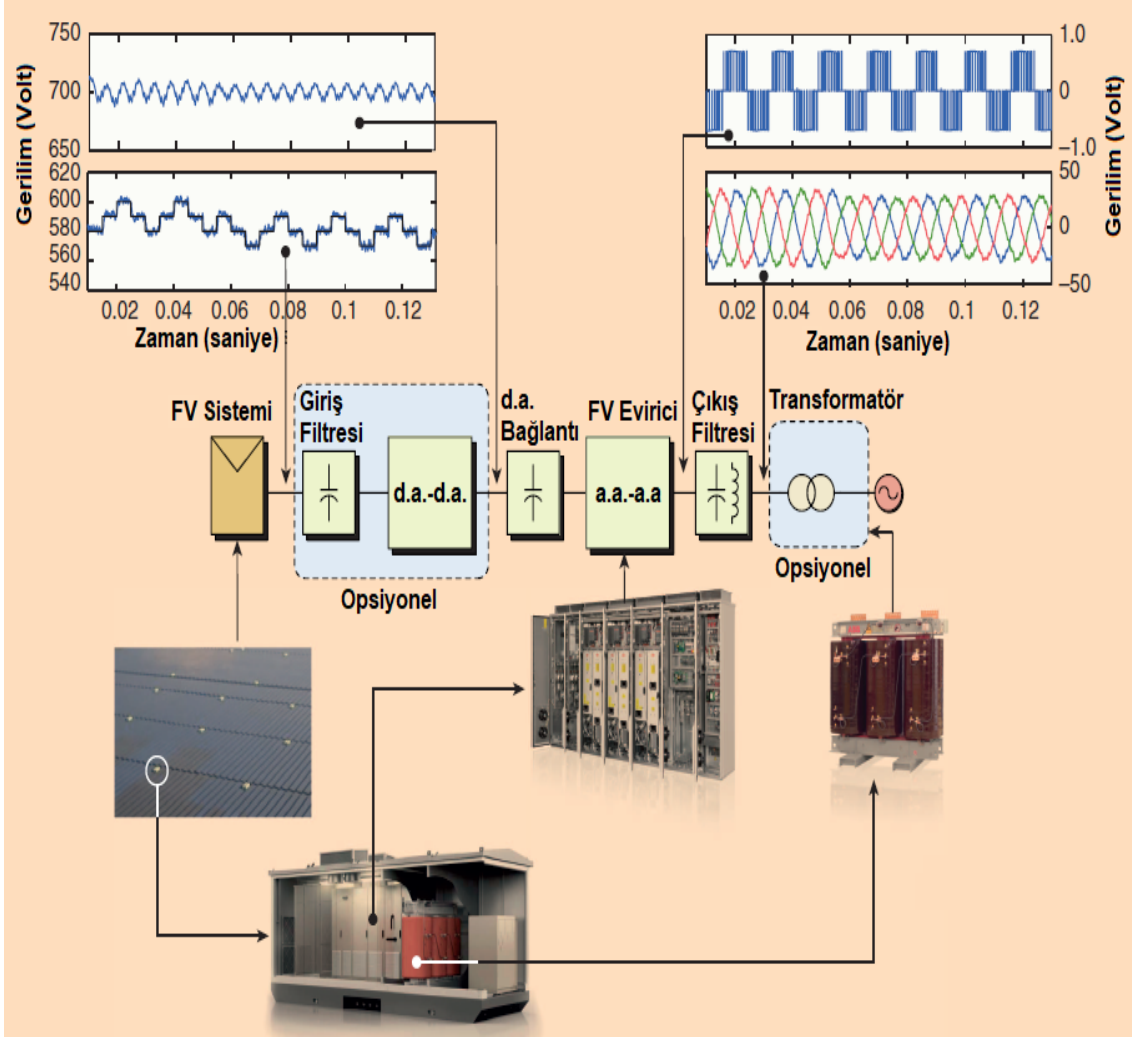
FV-DÜB'lerin buraya kadar kısaca özetlenen avantajlarına rağmen, boyutlandırılmaları ve şebekeye yerleştirilmeleri doğru yapılmadığı takdirde; elektrik güç sistemlerinde gerilim dalgalanmaları, harmonik bozulma, dengesizlik ve ters güç akışına bağlı hat kayıplarındaki artışlar ile güç sistemlerinde koruma problemleri gibi çeşitli olumsuz etkileri meydana gelir. FV-DÜB'lerin şebekeye düşük güçlerde ve az sayıda nüfuz ettiği geçmiş yıllarda, bu olumsuz etkiler ihmal edilebilir seviyelerdeydi. Ancak, günümüzde bu durum değişmiş; dolayısıyla bahsedilen olumsuz etkilerin önlenmesi için birçok uluslararası standart tarafından FV-DÜB'lerin uyması gerekli olan şebekeye bağlantı kriterleri tanımlanmıştır [7, 8].

Bu çalışmada, öncelikle FV-DÜB'ler için günümüzde teknolojik anlamada geline son durum sunulmuş, daha sonra bu birimlerin güç sistemlerinde meydana getirdikleri güç kalitesi problemleri ile FV-DÜB'leri barındıran sistemler için hazırlanmış uluslararası güç kalitesi standartları irdelenmiştir. Son olarak, FV-DÜB barındıran sistemler için güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesinde uygulanan yöntemler tanıtılmıştır.

## 2. FV-DÜB teknolojisi

FV elektrik üretim birimleri, şebekeye bağlı olmayan ve şebekeye bağlı olan şeklinde iki ana sınıfa ayrılırlar. Şebekeye bağlı olmayanlar, elektrik dağıtım sisteminin ulaşmadığı yerlerdeki tüketicilerin beslenmesi için tek başına veya diğer enerji kaynaklarıyla (rüzgar türbinleri, dizel generatörler ve yakıt pilleri gibi) birlikte kullanılan sistemlerdir. Şebekeye bağlı olanlar ise ürettikleri enerjiyi elektrik dağıtım şebekelerine verebilen sistemlerdir [8]. Avrupa'da kurulu olan FV elektrik üretim birimlerinin yaklaşık %98.7'si şebeke bağlı tipte ve %1.3'ü ise şebekeye bağlı olmayan tiptedir [9].

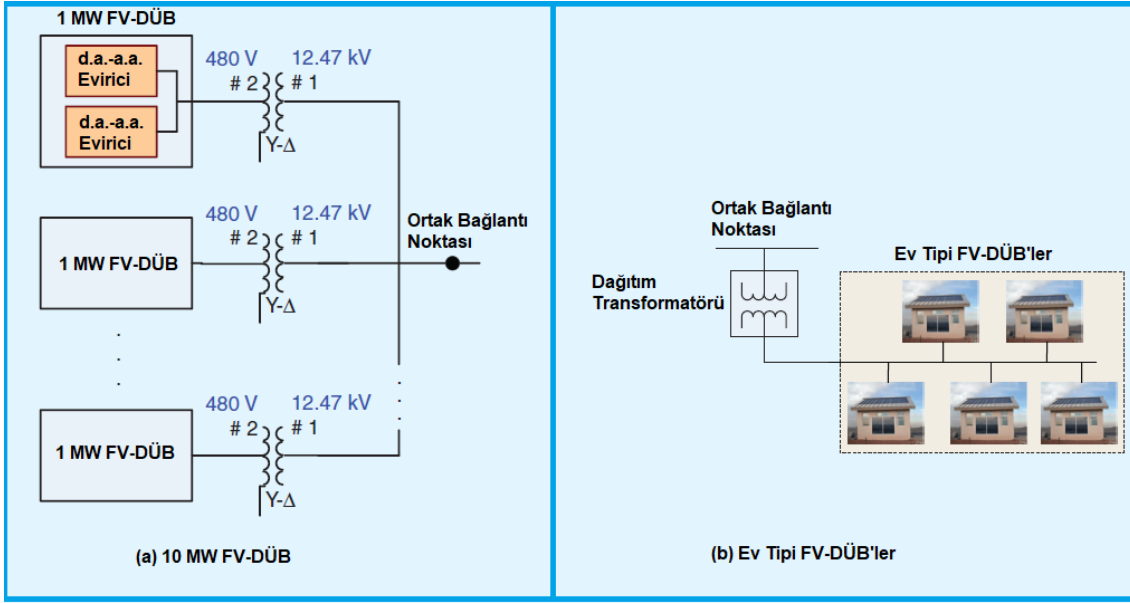
Tipik bir FV-DÜB'ün yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Bu yapıda, FV paneller, d.a.-d.a. dönüştürücü, evirici (d.a.-a.a. dönüştürücü), filtreler ve bağlantı transformatörü bulunur. FV panellerin çıkışındaki d.a. gerilimin evirici giriş gerilim seviyesine ayarlanması amacıyla opsiyonel olarak; d.a.-d.a. dönüştürücü kullanılmaktadır. d.a.-d.a. dönüştürücü çıkışındaki d.a. elektrik enerjisinin a.a. elektrik enerjisine dönüştürülmesi ise eviricilerle gerçekleştirilmektedir. Bu yapıda ayrıca, evirici çıkışındaki bozuk gerilim dalga şeklinin düzeltilmesi için pasif filtre, şebekeye senkronizasyon ve gerilim-akım-güç gibi çeşitli parametrelerin ölçümü için şebeke izleme birimi ve evirici çıkışındaki gerilimi şebeke gerilimine yükseltecek bir transformatör bulunur. Transformatörün sistemde bulunup bulunmayacağı, şebeke gerilim seviyesine, evirici topolojisine ve evirici kontrol yöntemine bağlıdır [10].



Şekil 1. Tipik bir FV-DÜB'ün yapısı [10].

Şebekeye bağlı FV-DÜB'ler güçlerine göre büyük kapasiteli (FV enerji santralleri: 1-10MW güçlerde), orta kapasiteli (10-1000 kW güçlerde) ve küçük kapasiteli (10 kW'a kadar güçlerde) FV sistemler olmak üzere üçe ayrılırlar [4]. Büyük ve küçük kapasiteli FV-DÜB'lere ait bağlantı şemaları Şekil 2'de verilmiştir.

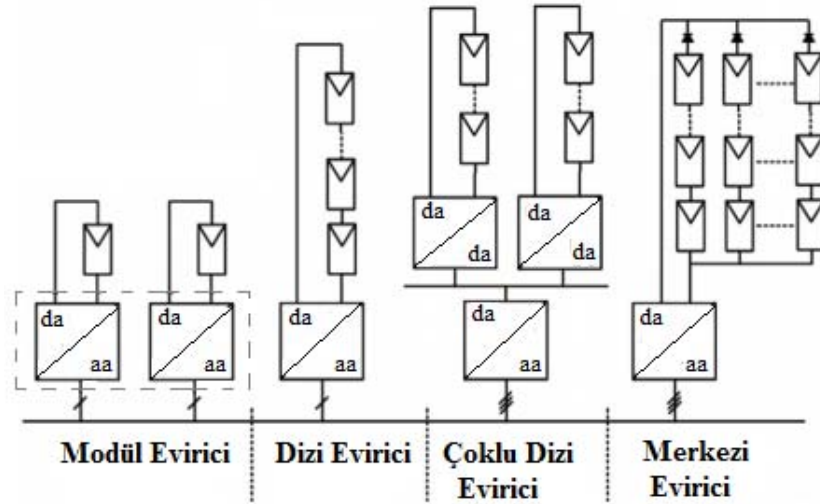
Büyük kapasiteli FV-DÜB'ler üç fazlı sistemlerdir ve tipik olarak bir veya daha fazla dağıtım transformatörü üzerinden şebekeye bağlanırlar. Bu sistemler ayrıca çok sayıda birbirine paralel bağlı evirici modüllerine sahiptirler. Orta ölçeklilerin şebekeye bağlantı şekli güçlerine bağlıdır. Yüzlerce kW gücündeki orta ölçekli FV-DÜB'ler büyük ölçekliler gibi ayrı bir dağıtım transformatörü üzerinden şebekeye bağlanırlar. Diğer taraftan, düşük güçlü orta ölçekli FV-DÜB'ler tüketiciye ait küçük güçlü bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanabilir. Bununla birlikte şu belirtilmelidir ki küçük kapasiteli FV-DÜB'ler tipik olarak herhangi bir bağlantı transformatörüne ihtiyaç duymazlar ve tek fazlıdır [4].



Şekil 2. (a) Büyük ve (b) küçük güçlü FV-DÜB'ler [4].

### 2.1. FV evirici bağlantı konfigürasyonları

Şebekeye bağlı FV-DÜB'ler evirici bağlantı konfigürasyonlarına göre; modül eviricili, dizi eviricili, çoklu dizi eviricili ve merkezi eviricili olmak üzere dört farklı tipte sınıflandırılabilir [9, 11, 12]. Bu konfigürasyonların şematikleri Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. Evirici konfigürasyonları.

Merkezi eviricili konfigürasyonda, istenilen gerilim ve güç seviyesine ulaşmak için gerekli çok sayıda FV modül evirici üzerinden şebekeye bağlanır. 10-250 kW güç aralığında değişen güç değerlerinde tasarlanabilen bu konfigürasyon santrallerde kullanılmaktadır. Diğer taraftan, merkezi eviricili konfigürasyonun bazı önemli dezavantajları vardır. Bunlar; evirici ile modüller arası bağlantı için yüksek gerilim d.a. kablolarının gerekli olması, merkezi azami güç noktası takip (AGNT) sistemi kaynaklı kayıplar, FV modülleri arası uyumsuzluk kaynaklı kayıplar ve FV dizilerinde bulunan diyotlarda meydana gelen kayıplardır. Dizi eviricili konfigürasyon, merkezi eviricili

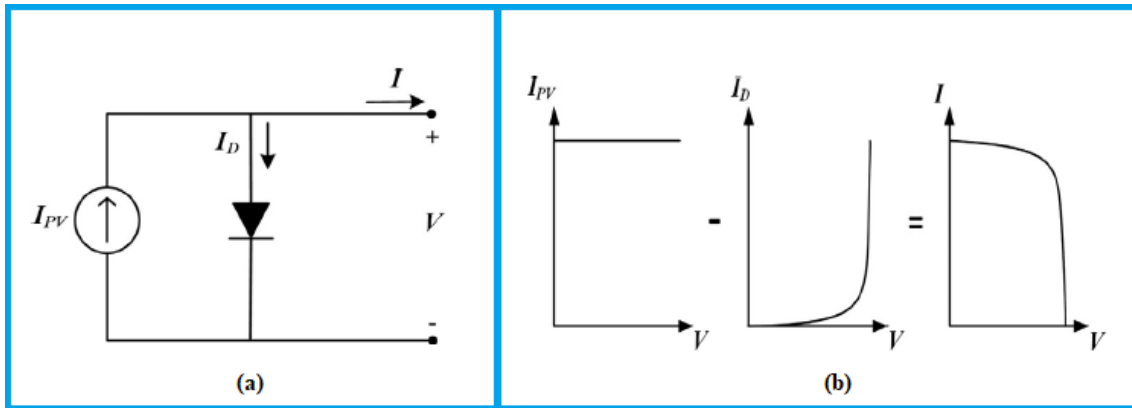
konfigürasyonun küçültülmüş halidir. Bu konfigürasyonda, seri bağlı bir dizi FV modül eviriciye bağlıdır ve bu eviriciler 1 ile 8 kW arası güç değerlerinde üretilmektedir. Dizi eviricili konfigürasyonda, diyot kayıpları yoktur ayrıca her dizi için ayrı AGNT sistemi kullanıldığı için verim, merkezi eviricili konfigürasyona göre daha yüksektir. Çoklu dizi eviricili konfigürasyonda, her bir FV modül dizisi kendi d.a.-d.a. dönüştürücüsü üzerinden ortak eviriciye bağlanır. Bu konfigürasyonda, her bir dizinin AGNT sistemi ayrıdır; böylece her dizi ayrı ayrı kontrol edilebilir durumdadır. Çoklu dizi evirici konfigürasyon, dizi ve merkezi eviricili konfigürasyonların avantajlarına sahiptir; kompakt ve maliyet açısından verimlidir, 8 ile 20 kW aralığında güç değerleri için uygulanmaktadır. Modül eviricili konfigürasyonda, sadece bir FV modül ile bir evirici bağlıdır. Böylece, FV modüller arası uyumsuzluk gibi bir sorunla karşılaşmaz ayrıca FV modül ile evirici arasında optimal çalışma durumu sağlanmış olur. Modül eviricili konfigürasyon günümüzde 150 ile 600 W güç aralığında üretilmektedir, ancak modül sayısı artırılarak pratik şekilde güç değeri yükseltilebilir. Diğer taraftan, tek bir FV modülün eviriciye bağlı olması, gerilimin yükseltilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Dolayısıyla, bu konfigürasyonda evirici d.a.-d.a. dönüştürme devresi içermek zorundadır. Modül eviricili konfigürasyonun, aynı güç değeri için diğer konfigürasyonlara kıyasla çok yüksek fiyatlarda olması, bu konfigürasyonun dezavantajıdır. Bu dört farklı konfigürasyon, verim ve performans bakımından karşılaştırıldığında kötüden iyiye; merkezi evirici, çoklu dizi evirici, dizi evirici ve modül evirici konfigürasyonları olarak sıralanabilir [9, 11, 12].

## 2.2. FV hücresinin eşdeğer devre modeli ve azami güç noktası takibi

Bu kısımda sırasıyla, FV hücresinin modellenmesi ve azami güç noktası takibi üzerine literatür sunulacaktır:

### 2.2.1. FV hücresinin eşdeğer devre modeli

FV hücresinin ideal eşdeğer devresi ve I-V karakteristiği sırasıyla, Şekil 4 (a) ve (b)'de verilmiştir. Bu ideal eşdeğer devrede,  $I_{PV}$  Güneş ışığının hücre üzerine düşmesi neticesinde üretilen elektrik akımını,  $I$  hücrenin çıkış akımını ve  $V$  hücrenin çıkış gerilimini ifade etmektedir.



Şekil 4. FV hücresinin (a) ideal eşdeğer devresi ve (b) I-V karakteristiği [13].

FV hücresi, üzerine Güneş ışığı düşmediği durumda basit bir diyot gibi davranır. Bu sebeple, eşdeğer devrede akım kaynağına paralel bağlı bir diyot bulunur, bu diyotun

çektığı akım eşdeğer devre üzerinde  $I_D$  ile ifade edilmiştir.  $I_D$  akımı, diyotun doyum akımı ( $I_0$ ) ve kalite faktörü ( $a$ ), elektron yükünün mutlak değeri ( $q=1.602176 \times 10^{-19}$  C), Boltzmann sabiti ( $k=1.380653 \times 10^{-23}$  J/K) ve yarı iletken eklemnin Kelvin birimi cinsinden sıcaklığı ( $T$ ) ve diyot gerilimi ( $V$ ) dikkate alınarak Denklem (1)'de verilen biçimde yazılabilir:

$$I_D = I_0 \left[ e^{\left( \frac{qV}{akT} \right)} - 1 \right] \quad (1)$$

Böylece, eşdeğer devrede Kirchoff akımlar kanunu uygulanarak hücrenin çıkış akımı,

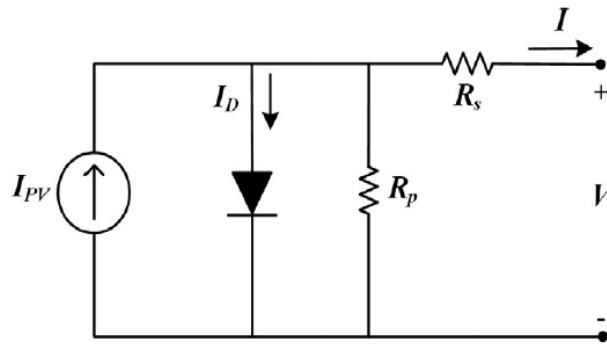
$$I = I_{PV} - I_D = I_{PV} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{qV}{akT} \right)} - 1 \right] \quad (2)$$

ifadesiyle hesaplanabilir.

Bu eşdeğer devreye göre, hücre üzerine düşen Güneş ışığının sabit olduğu durum için  $I_{PV}$ ,  $I_D$  ve  $I$  akımlarının  $V$  ile değişimleri Şekil 4 (b)'de gösterildiği biçimde elde edilir. Bu şekilde verilen I-V eğrisi, FV hücresinin akım-gerilim karakteristiği olarak literatürde isimlendirilmiştir [13]. Bu şekilden görüldüğü üzere, FV hücreleri doğrusal olmayan I-V karakteristiğine sahiptir.

Diğer taraftan, kayıpların seri ve paralel direnç olarak sembolize edildiği ve literatürde yaygın olarak bilinen FV hücresinin gerçekçi eşdeğer devresinin şematığı ise Şekil 5'de sunulmuştur. Bu eşdeğer devrede,  $R_s$  direnci hücre içindeki yarı iletken malzemenin, elektrotların ve yarı iletken malzeme - elektrotlar arası temas noktası dirençlerinin toplamıdır.  $R_p$  direnci ise yarı iletken malzeme içindeki kaçak akımlardan dolayı meydana gelen direnç olarak açıklanabilir. Bu gerçekçi seri ve paralel dirençli FV eşdeğer devresine göre; çıkış akımı Denklem (3)'de verilen ifadeyle hesaplanabilir [13]:

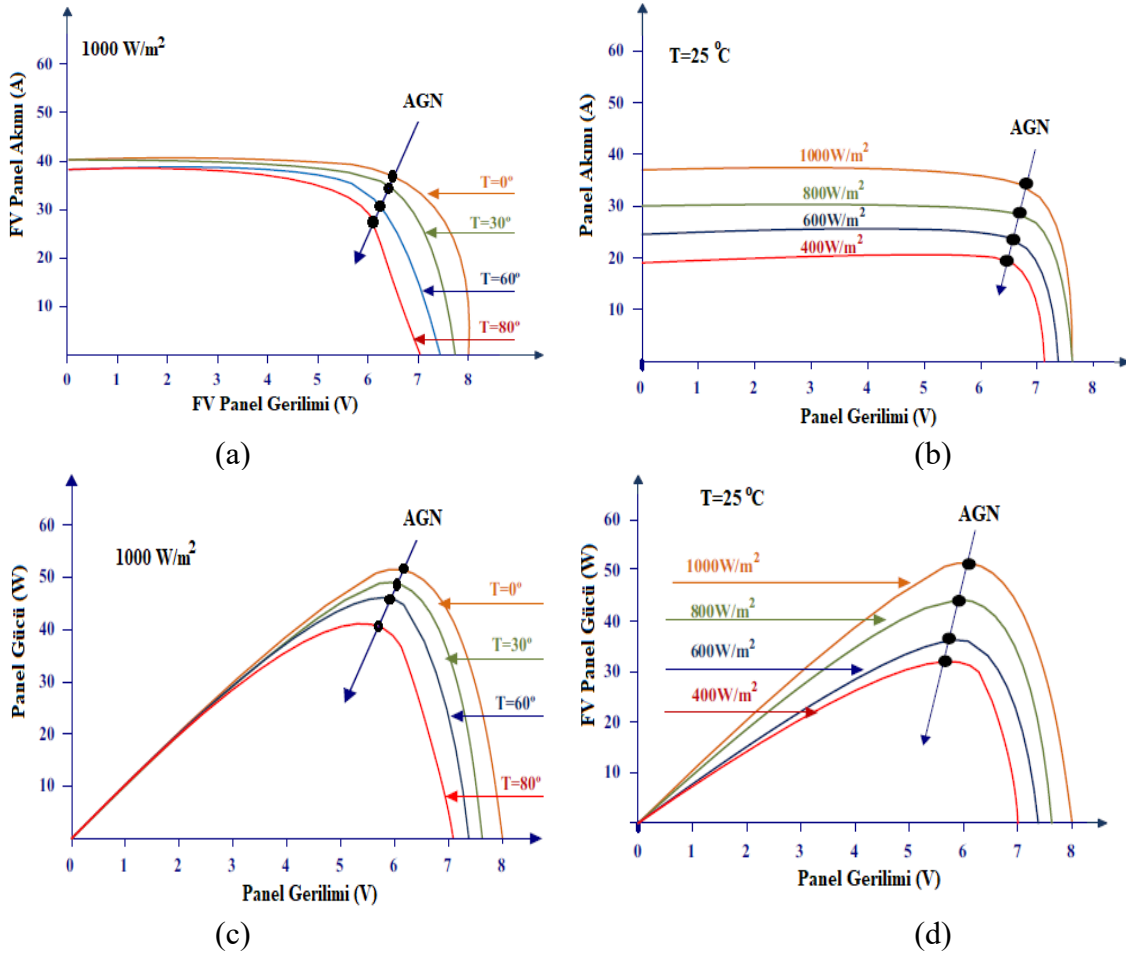
$$I = I_{PV} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{q(V+IR_s)}{akT} \right)} - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_p} \quad (3)$$



Şekil 5. Seri ve paralel dirençli (gerçekçi) FV eşdeğer devresi [13].

### 2.2.2. AGNT yöntemleri

Şekil 6’da sunulan FV panel akımı (I)-FV panel gerilimi (V) ve FV panel gücü (P)- FV panel gerilimi (V) karakteristik eğrileri, FV gerilimi, akımı ve gücünün ortam sıcaklığı ve Güneş ışınımına bağlı olduğunu göstermektedir. Bu karakteristik eğriler üzerinde okla gösterilen noktalar, FV hücrelerinin her bir ortam sıcaklığı-Güneş ışınımı durumu için azami güç noktasını (AGN) göstermektedir. Azami güç noktası takip (AGNT) sistemleri, değişken atmosferik şartlar altında FV hücrelerinden azami güç üretimini sağlayan kontrol devreleridir. Bu devreler AGN’ye karşılık gelen FV işletme gerilimini hesap eder ve gerilimi bu hesapladığı değerde tutacak biçimde d.a.-d.a. dönüştürücü veya evirici devrelerini kontrol eder. Böylece, FV-DÜB’lerin her türlü koşulda azami çıkış gücü üretmesini sağlar [14].

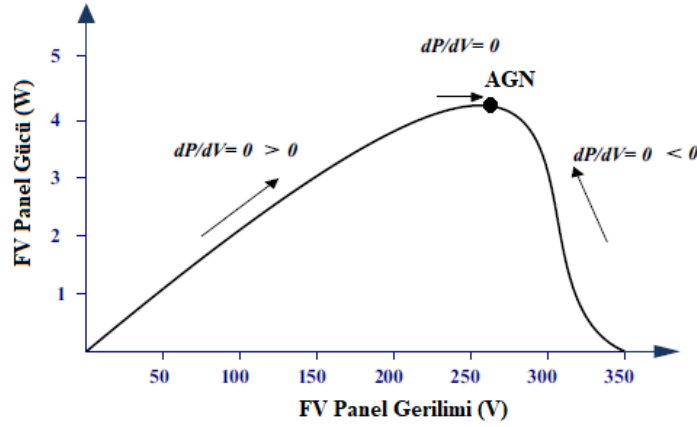


Şekil 6. FV hücrelerinin sabit Güneş ışınımı ( $P=1000 \text{ W/m}^2$ ) ve değişken ortam sıcaklıkları için (a) I-V ve (c) P-V eğrileri, sabit ortam sıcaklığı ( $T=25^\circ\text{C}$ ) ve değişken Güneş ışınimleri için (b) I-V ve (d) P-V eğrileri [14].

Literatürde, AGNT için çok sayıda çevrim içi, çevrim dışı ve akıllı yöntemler önerilmiştir. Ancak, bu yöntemler arasında, yaygın olarak bilinenler; Karıştır-Gözlemle (KG), Artımlı İletkenlik (Aİ), Açık Devre Gerilimi (ADG) ve Kısa Devre Akımı (KDA) temelli kontrol yöntemleri olup ticari ürünlerde uygulama kolaylığı sebebiyle KG yöntemi yaygın olarak kabul görmüştür [14]. KG yöntemi, adım adım gerçekleştirilen gerilim değişimleriyle birlikte FV dizisinin çıkış gücünde meydana gelen değişimlerin değerlendirilmesine dayanır [14, 15]. Bu yöntemde öncelikle, FV dizisinin çıkış

geriliminin ve akımının ölçülen değerleri, kullanılarak FV dizisinin gücü hesap edilir. Daha sonra, FV dizisinin gerilimi küçük bir değerde ( $\Delta V$ ) değiştirilir ve devamında FV dizisinin çıkış gücünde meydana gelen değişim ( $\Delta P$ ) ölçülür. Eğer  $\Delta P$  ve  $\Delta V$ 'nin her ikisi de pozitif veya negatif değerlerde ise; FV çıkış geriliminin, P-V eğrisi üzerinde AGN'nin sol tarafında kalan noktalara denk düştüğü tespit edilir. Bu durumda,  $\Delta V$ 'nin işaretinin pozitif veya negatif olması; sırasıyla AGN'ye yaklaşıldığı veya AGN'den uzaklaşıldığı manasına gelir. Eğer  $\Delta P$  veya  $\Delta V$ 'nin birinin işareti negatif ise; FV çıkış geriliminin, P-V eğrisi üzerinde AGN'nin sağ tarafında kalan noktalara denk düştüğü tespit edilir. Bu durumda,  $\Delta V$ 'nin işaretinin pozitif veya negatif olması; sırasıyla AGN'den uzaklaşıldığı veya AGN'ye yaklaşıldığı manasına gelir.  $\Delta P$  sıfır olduğu durum AGN'ye karşılık gelen çalışma durumudur. Bu algoritmanın diğer yöntemlere göre dezavantajları; adım aralığı küçük seçildiğinde daha yavaş cevap vermesi ve adım aralığı yüksek seçildiğinde ise AGN etrafında dalgalanmalara dolayısıyla verim düşüşüne yol açmasıdır.

Şekil 7'den görüldüğü üzere P-V eğrisinin eğimi ( $dP/dV$ ), eğrinin sol tarafında pozitif, eğrinin sağ tarafında negatif ve tepe noktasında (AGN'de) sıfırdır. Aİ algoritması, P-V eğrisinin eğimine ( $dP/dV$ ) göre AGN tespiti yapan bir algoritmadır [14, 15].



Şekil 7. FV hücreye ait P-V eğrisinin eğimi [14].

Bu yöntemin uygulanmasında FV dizisinin çıkış gerilimi ve akımı belli zaman aralıklarıyla ölçülür. Her bir ölçüm çifti ve bir önceki çifti dikkate alınarak, FV dizisinin iletkenliği  $I/V$  ve artımlı iletkenliği ( $dI/dV = \Delta I/\Delta V$ ) hesaplanır. Böylece, Denklem (4)'de verilen arama kriterine göre, Şekil 7'de verilen P-V eğrisi üzerinde AGN'nin hangi tarafında arama yapıldığı tespit edilir. Aİ algoritmasının, KG algoritmasına göre AGN civarında daha az dalgalanmaya yol açması literatürdeki çalışmalarda belirtilmiştir. Diğer taraftan, Aİ algoritmasının daha karmaşık kontrol devresi gerektirmesi maliyet bakımından dezavantajdır.

$$\text{Aİ arama kriteri} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{AGN noktasında çalışılıyor} \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{P-V eğrisinin sol tarafında çalışılıyor} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{P-V eğrisinin sağ tarafında çalışılıyor} \end{array} \right. \quad (4)$$



ADG yönteminde, açık devre gerilimi ( $V_{AD}$ ) ve AGN için gerekli olan gerilim ( $V_{AGN}$ ) arasında var olan, Denklem (5)'de ifade edilen doğrusal ilişki dikkate alınır [14, 15]. Bu ilişkide,  $K_V$  katsayısı (gerilim faktörü), FV hücrenin karakteristiğine, ortam sıcaklığına ve Güneş ışınımına göre farklı değerler alır.

$$V_{AGN} = K_V V_{AD} \quad (5)$$

ADG yönteminin uygulanmasında, FV diziler ile güç dönüştürücü arasına seri olarak bir statik anahtar bağlanır. Bu anahtar belli zaman aralıklarla açılıp kapatılarak FV çıkışından dönüştürücüye akan akım sıfır yapılır ve böylece FV dizisinin çıkışındaki  $V_{AD}$  ölçülür. Böylece Denklem (5)'den  $V_{AGN}$  hesap edilerek AGNT işlemi gerçekleştirilir. Bu algoritma ölçülen parametre sayısının azlığı ve türev alma işlemine ihtiyaç duymaması sebebiyle KG ve Aİ yöntemlerine göre daha hızlıdır. Bununla birlikte, yöntemin en büyük dezavantajı açık devre geriliminin örnekleme için yapılan anahtarlama işlemi sırasında meydana gelen kayıplardır [14].

KDA yönteminde, kısa devre akımı ( $I_{KD}$ ) ve AGN durumunda ölçülen FV çıkış akımı ( $I_{AGN}$ ) arasında var olan, Denklem (6)'da ifade edilen doğrusal ilişki dikkate alınır [14, 15]. Bu ilişkide,  $K_I$  katsayısı (akım faktörü) FV hücresinin karakteristiğine, ortam sıcaklığına ve Güneş ışınımına göre farklı değerler alır.

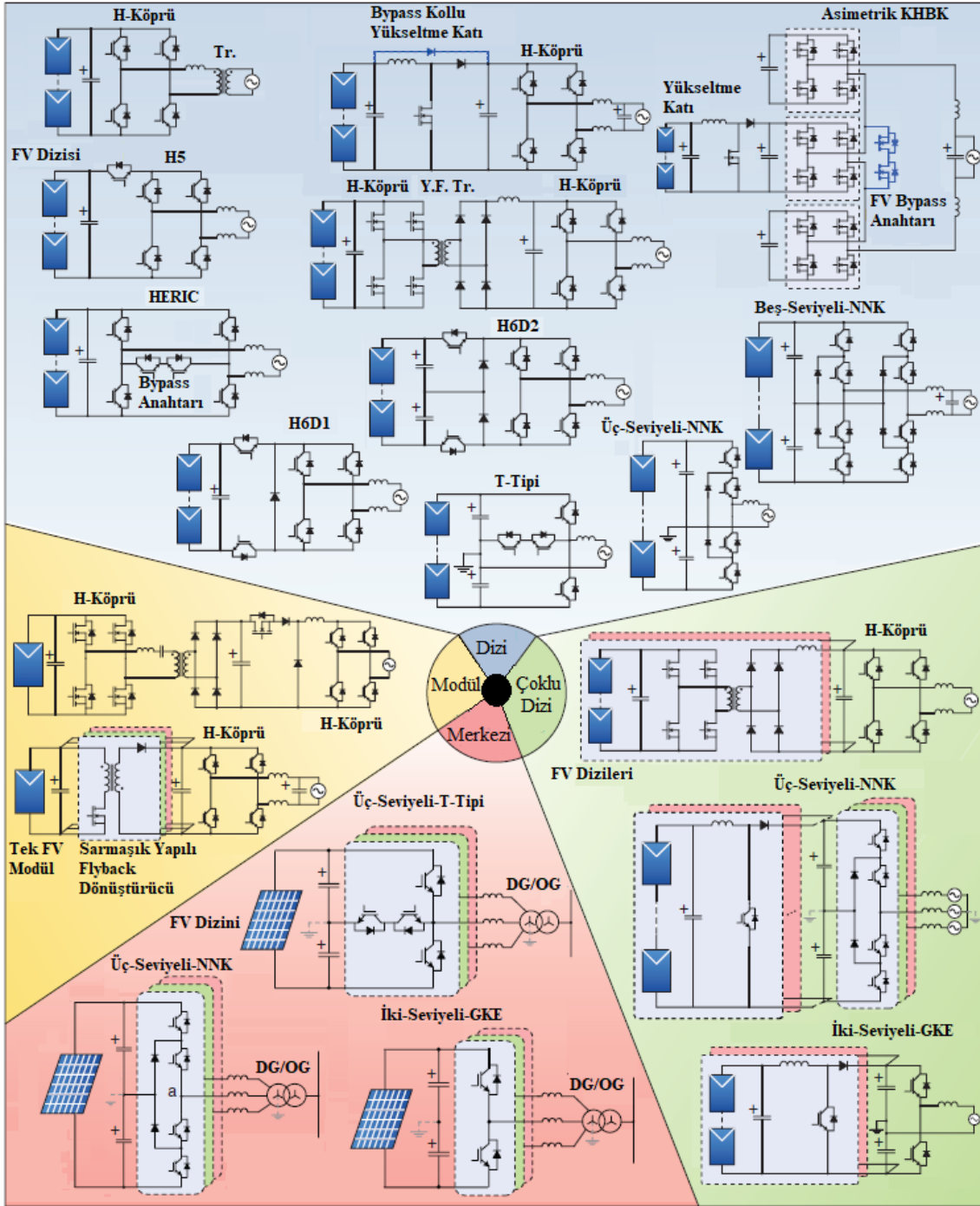
$$I_{AGN} = K_I I_{KD} \quad (6)$$

KDA yönteminin uygulanmasında, FV diziler ile güç dönüştürücü arasına paralel olarak bir statik anahtar bağlanır. Bu anahtar belli zaman aralıklarla açılıp kapatılarak FV çıkışı kısa devre edilir ve FV dizisinin  $I_{KD}$  akımı ölçülür. Böylece Denklem 6'dan  $I_{AGN}$  hesap edilerek AGNT işlemi gerçekleştirilir. ADG ve KDA yöntemlerinin çalışma prensiplerinin benzer olması sebebiyle, bu yöntemlerin diğer iki yönteme (KG ve Aİ) göre avantajları ve dezavantajları aynıdır [14].

### 2.3. FV-DÜB'ler için evirici topolojileri

Modül, dizi, çoklu dizi ve merkezi FV evirici konfigürasyonlarında kullanılan ticarileşmiş çeşitli evirici topolojilerinin şematikleri Şekil 8'de verilmiştir [10].

Bu şekilden, dizi FV konfigürasyonu için transformatör (Tr.) üzerinden şebekeye bağlanan H-köprü, transformatörsüz H-köprü, yüksek frekans transformatörlü (Y.F. Tr.) H-köprü, H5, HERIC, H6D1, H6D2, T-tipi, üç-seviyeli-nötr noktası kilitlemeli (NNK), beş-seviyeli-NNK ve asimetric kaskad bağlı H-köprü (KBHK) topolojilerinin olduğu görülmektedir. Aynı şekil, çoklu dizi FV konfigürasyonu için H-köprü, üç-seviyeli-NNK ve iki-seviyeli- gerilim kaynağı evirici (GKE) topolojilerinin, merkezi FV konfigürasyonu için üç-seviyeli-T-tipi, üç-seviyeli-NNK ve iki-seviyeli-GKE topolojilerinin, modül FV konfigürasyonu için Y.F. Tr.li H-köprü ve sarmaşık yapıllı flyback dönüştürücülü H-köprü topolojilerinin kullanıldığını göstermektedir. Burada şu belirtilmelidir ki dizi FV konfigürasyonu için kullanılan bütün topolojiler çoklu dizi konfigürasyonu için de kullanılabilir, bu topolojiler Şekil 8'de ayrıca çoklu dizi FV konfigürasyonu için tekrar sunulmamıştır.



Şekil 8. FV sistemler için evirici topolojileri [10].

Evirici topolojileri incelendiğinde, topolojilerin transformatörlü ve transformatörsüz olmak üzere iki ana başlık altında toplanabileceği görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi, topolojilerdeki şebeke frekansı bağlantı transformatörleri, evirici çıkışındaki gerilimin, şebeke gerilim seviyesine yükseltilmesi görevindedir. Şebeke frekansı bağlantı transformatörleri, dağıtım transformatörlerinde doymaya sebep olan d.a. akımların şebekeye akışını engeller ve şebeke-FV paneller arası izolasyonu (galvanik izolasyonu) sağlar. Ancak, bu transformatör kullanımı eviricinin boyutunu büyütmemekte, maliyeti arttırmakta ve verimi düşürmektedir. Bu sebeple birçok yeni evirici topolojisinde gerilim yükseltme işlemi, yüksek frekans transformatörleriyle veya d.a.-

d.a. dönüştürücülerle gerçekleştirilmektedir. Yüksek frekans transformatörlü topolojilerde, FV kaynak çıkışındaki d.a. gerilim, bir H-köprü eviriciyle yüksek frekanslı a.a. gerilime dönüştürülür, bu gerilim seviyesi daha sonra transformatörle yükseltilir ve bir köprü doğrultucuyla doğrultularak şebeke frekansında çıkış veren ikinci H-köprü eviriciye verilir. Yüksek frekanslı transformatörler şebeke-FV kaynak arası galvanik izolasyon sağlamakla birlikte d.a. akımın şebekeye akış problemini ortadan kaldırmaz. Diğer taraftan, transformatörsüz evirici tiplerinde, FV panel ve şebeke arası yüksek kaçak akımları önlemek için; (i) özel modülasyon teknikleriyle ortak mod gerilim ayarı, (ii) bypass anahtarlarının kullanımı ve (iii) d.a. ortak bağlantı noktası ile şebeke nötr noktasının aynı yere topraklanması gibi yöntemler tercih edilmiştir [10].

### 3. FV-DÜB'lerin şebekeye olumsuz etkileri ve bağlantı standartları

Son yıllarda, yenilenebilir enerji temelli dağıtık üretim birimlerinin sayılarında ve kapasitelerinde önemli derecede artış meydana gelmiştir [5, 6]. Bu dağıtık üretim birimlerinin, geleneksel elektrik üretim birimlerinden farklı olarak; kısmen tahmin edilebilir ve kesintili üretim karakteristiğine sahip olması yanı sıra güç elektroniği devreleri üzerinden şebekeye bağlanmaları sebebiyle güç kalitesi, kararlılık ve güvenilirlik problemlerine yol açmaları söz konusudur. Bu problemleri önlemek amacıyla, ülkelerin ilgili kurumları/kuruluşları ve çeşitli uluslararası organizasyonlar tarafından FV-DÜB'lerin elektrik güç sistemlerine bağlantısı için gereklilikleri tanımlayan birçok standart hazırlanmıştır [7, 11, 12]. Uluslararası düzeydeki standartlardan yaygın olarak tanınan ve kullanılanları; “Dağıtık kaynakların elektrik güç sistemlerine bağlantısı için IEEE standardı” başlıklı IEEE 1547 [16, 17] ve “FV sistemleri-şebeke arabirimi karakteristikleri” başlıklı IEC 61727 [18] standartlarıdır. IEEE 1547 standardı, anma gücü 10 MVA'nın altındaki DÜB'lerin şebekeye bağlantısı için teknik gereklilikleri ve test prosedürlerini ortaya koymuştur. IEC 61727 standardı ise anma gücü 10 kVA altındaki FV-DÜB'lerin alçak gerilim dağıtım sistemlerine bağlantısı üzerine gereklilikleri tanımlayan standarttır. Bir diğer önemli uluslararası standart ise “FV sistemlerin şebekeye bağlantı arabirimleri için tavsiye edilen uygulamalar” başlıklı IEEE 929 standardıdır [19]. Bu standart, dağıtım sistemine bağlı, anma gücü 10 kW altında olan FV sistemler için bir pratik kılavuz sunmuştur. Bu kılavuz, can güvenliği, sistem koruma, güç kalitesi ve şebekenin işletilmesiyle alakalı hususları kapsamaktadır.

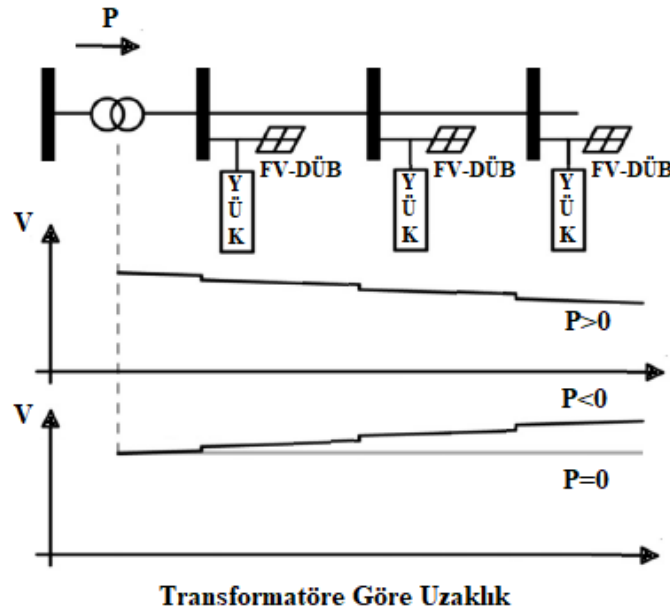
FV-DÜB'lerin sebep olduğu güç kalitesi problemlerinden önde gelenleri; gerilim dalgalanmaları, gerilim yükselmesi, gerilim dengesizliği ve harmonik bozulma ile d.a. bileşene sahip akımların şebekeye enjekte edilmesi olarak sıralanabilir [8, 20, 21]. Aşağıda, bu güç kalitesi problemleri hakkında bilgi verilip; IEEE 1547, IEC 61727 ve IEEE 929 uluslararası standartlarının bunların önlenmesi için getirdiği sınırlamalar tanıtılacaktır.

#### 3.1. Gerilim dalgalanmaları / gerilim yükselmesi

FV-DÜB'lere bağlı meydana gelen gerilim dalgalanma probleminin ana sebebi, bulutlanma ve açık hava gibi atmosferik olaylar neticesinde Güneş enerjisinin kesintili karakterde olmasına (Güneş enerjisinin emre amade olmamasına) bağlı olarak, FV-DÜB'lerin çıkış gücünde meydana gelen değişimler olarak ifade edilebilir [8, 20, 21].

Diğer taraftan, dağıtım sistemlerinde hat kayıplarını minimize etmek ve gerilim profilini iyileştirmek için FV-DÜB'ler tüketicilere yakın noktalara bağlanır ve tüketicilerin güçlerini aşmayacak güç değerlerinde boyutlandırılırlar. Ancak, aksi takdirde, FV-DÜB'ler yükleri beslemenin yanı sıra dağıtım hattını da beslerler. Böylece, yük tarafından hatta doğru ters güç akışı meydana gelir ve yük barasındaki gerilim değeri yükselir. Dolayısıyla ters güç akışı, FV-DÜB'lerin bulunduğu sistemlerde gerilim yükselmesi probleminin önde gelen sebeplerindendir [8, 20, 21]. Şekil 9'da verilen şematik ve grafiklerle, güç akış yönünün gerilim seviyesine etkisi gösterilmiştir. Ters güç akışı, dağıtım hattında meydana gelen kısa devre arıza durumunda, arızanın hem şebeke hem de FV-DÜB tarafından beslenmesine yol açar, bu ise arıza akımının değerini büyütür [8].

IEEE 1547 (2003) ve IEC 61727 standartlarında, FV-DÜB'ler için şebeke geriliminin düzenlenmesinde bir sorumluluk tanımlanmamıştır. Ancak, bu üretim birimlerinin şebekeye bağlandığı durumda, sistem gerilimi ilgili sınırları aşmamalıdır. Diğer taraftan, IEEE 1547 (2014) [17] standardı, DÜB'lerin, aktif ve reaktif güç ayarıyla sistem gerilimini düzenleme işlemine desteğini gerekli görmektedir. Aynı standart sistemdeki gerilim dalgalanmasını, anma geriliminin  $\pm 5\%$ 'i içinde sınırlandırmaktadır.



Şekil 9. FV-DÜB'lerin olduğu sistemlerde gerilim dalgalanması [8].

### 3.2. Gerilim dengesizliği

FV-DÜB'lerin güç kalitesine en önemli olumsuz etkilerinden biri gerilim dengesizliğidir. Gerilim dengesizliği, üç faz gerilimlerinin etkin değerlerinin birbirine eşit olmaması ve/veya aralarında 120°'şer derece faz farkı olmaması durumudur [22, 23]. Geleneksel güç sistemlerinde dengesizliğin sebepleri arasında eşit empedansa sahip olmayan hatlar, tek fazlı yüklerin eşit güçlerde fazlara dağıtılmaması ve asimetrik güç sistem arızaları olarak sayılabilir [23], diğer taraftan; günümüz modern güç sistemleri için bu sebeplere, ev tipi tek fazlı FV-DÜB'lerin fazlara eşit güçlerde dağıtılmaması

eklenmiştir [8, 24]. Dengesizliğin en önemli olumsuz etkilerinden biri asenkron makinalarda aşırı ısınma, ömür kaybı ve tork dalgalanmalarına yol açmasıdır [23].

Üç fazlı FV-DÜB'lerde ise dengesizliğe bağlı olarak çıkış gücünde dalgalanmalar ve çıkış akımının harmonik bozulmasında artış meydana gelmektedir. Literatürdeki birçok çalışmada [25, 26], dengesizliğin üç fazlı FV-DÜB'ler üzerindeki bu olumsuz etkilerini minimize etmeyi amaçlayan kontrol algoritmaları önerilmiştir. IEEE 1547 ve IEC 61727 standartları FV-DÜB'lerin çıkış gerilimi dengesizliği için bir sınırlama tanımlamamıştır. Bununla birlikte, uluslararası standartlar genellikle gerilim dengesizlik oranını (negatif sıra ve pozitif sıra gerilim genliklerinin oranını) %2 ile sınırlandırmıştır [7].

### 3.3. Harmonik bozulma ve doğru akım bileşene sahip akımlar

FV-DÜB'lerin yapısında bulunan evirici devrelerinin, şebekeye enjekte ettiği akımlar sinüzoidal olmayan (harmonik bozulmalı) dalga formuna sahiptir [8, 20]. Gerilim ve akım harmonik bozulması, generatörler, transformatörler, asenkron motorlarda ve kompanzasyon kondansatörlerinde kayıp artışına, aşırı ısınma ve ömür kaybına, asenkron motorlarda güç faktörünün düşmesine ve tork dalgalanmalarına, hat iletkenlerinde kayıp artışlarına, koruma, kontrol ve ölçme sistemlerinin hatalı çalışmasına yol açan önemli bir güç kalitesi problemi [27, 28].

FV-DÜB'lerin akım harmonik bozulma karakteristiğini analiz eden birçok çalışma literatürde mevcuttur [29-31]. Bu çalışmalardan, FV-DÜB'lerin şebekeye enjekte ettiği harmonik akımlarının temel frekans akımına göre bağlı değerlerinin Güneş ışınımıyla ters orantılı ilişkiye sahip olduğu bir başka ifadeyle düşük Güneş ışınımı değerlerinde daha fazla harmonik bozulmaya yol açtığı görülmektedir. Güç faktörünün ise FV-DÜB'lerin akım harmonik bozulmasına önemli bir etkisinin olmadığı [31]'de belirtilmiştir.

FV-DÜB'ler için harmonik sınırlamalar bakımından yaygın olarak dikkate alınan standartlar, IEEE 1547 ve IEC 61727 standartlarıdır [7]. Bu standartların yanı sıra, ortak bağlantı noktası için harmonik sınırlamaları getiren IEEE 519 standardı [32], FV-DÜB'lerin harmonik kirlilik seviyesi dikkate alınarak güç sistemlerine entegrasyonu üzerine yapılmış birçok çalışmada [33-35] dikkate alınmıştır. Bu üç standart tanımladıkları harmonik sınırlamalar bakımından karşılaştırıldığında, IEEE 1547 ve IEC 61727 standartlarının birbirine çok yakın olduğu [7], diğer taraftan IEEE 1547 standardının IEEE 519 standardına göre daha sıkı olduğu [35], ifade edilebilir.

Galvanik izolasyona sahip olmayan (transformatörsüz) FV-DÜB'ler yapılarında evirici devreleri olması sebebiyle şebekeye d.a. akım enjekte ederler. d.a. akım şebeke servis sağlayıcıya ait dağıtım transformatörlerinin çekirdeklerinin doymasına yol açar, bu doyma neticesinde transformatörlerin reaktif güç ihtiyacı ve kayıpları artar. Kayıp artışına bağlı olarak transformatörler aşırı ısınır ve beklenen ömürlerinde kısalma meydana gelir. Bu olumsuz durumu önlemek için standartlar eviricinin şebekeye verdiği d.a. akım değeri için sınırlama getirmiştir. d.a. akım sınır değeri IEEE 1547 standardında anma akımının %0.5'i, IEC 61727 standardında %1'i dir [7].

#### 4. FV-DÜB'lerin bulunduğu sistemlerde güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesi

Bu bölümde, FV-DÜB'lerin bulunduğu sistemlerde gerilim dalgalanması, gerilim yükselmesi, gerilim dengesizliği ve harmonik bozulma problemlerinin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemler sunulacaktır.

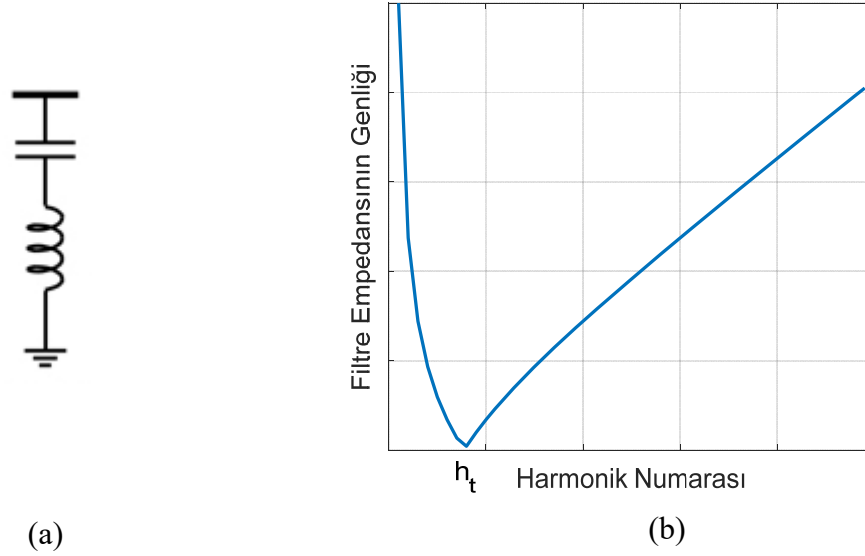
##### 4.1. Batarya enerji depolama sistemleri

FV sistemlerde bataryalar enerji depolama birimi olarak tercih edilmektedir. Batarya enerji depolama elemanları üç çalışma durumuna sahiptir. Bu çalışma durumlarından biri olan yük dengeleme modunda, şebekedeki arzın talebi aştığı zamanlarda tüketilemeyen fazla enerji, talebin arzdan büyük olduğu durumlarda harcanmak üzere batarya bankalarında depolanır. Diğer çalışma durumu olan sınırlama modunda ise, FV paneller tarafından üretilen ihtiyaç fazlası enerji bataryalarda depolanır ve böylece FV-DÜB'lerin talep edilen gücün üzerinde bir güç değerini şebekeye vermesine bağlı gerilim yükselmesi probleminin meydana gelmesi önlenmiş olur. Arbitraj modunda ise enerjinin düşük fiyatlı olduğu durumlarda şebekeden enerji depolanır ve bu depolanan enerji fiyatın yükseldiği durumlarda kullanılır [21].

##### 4.2. Pasif ve aktif filtreler

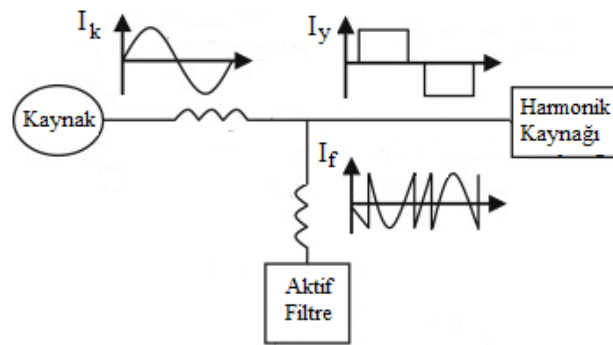
Pasif filtreler bobin, kondansatör ve direnç elemanlarından oluşan belli bir frekans veya frekans aralığına giren harmonik akımlarını süzen devrelerdir. Seri veya paralel tipleri mevcuttur. Seri tipleri evirici ile şebeke bağlantı noktası arasına bağlı olup süzülme istenen harmoniklere yüksek empedans gösterecek şekilde tasarlanırlar ve bu harmonik akımlarını tıklarlar. Paralel pasif filtreler ise şebeke bağlantı noktası ile toprak arasına bağlanırlar ve süzülme istenen harmoniklere düşük empedans gösterirler. Böylece bu harmonik akımları şebeke tarafına akmak yerine filtre üzerinden toprağa akarlar. Paralel pasif filtreler harmonik süzme özelliklerinin yanı sıra reaktif güç kompanzasyonu yetenekleri de olduğu için pratikte daha fazla tercih edilmektedir. Paralel pasif filtrelerin tek-ayarlı, çift-ayarlı, üç-ayarlı, C-tipi ve yüksek geçiren olmak üzere çeşitli tipleri vardır [36]. Şekil 10 (a)'da tek-ayarlı paralel pasif filtrenin bir faz eşdeğer devresi ve Şekil 10 (b)'de bu filtrenin empedans- harmonik numarası karakteristiği görülmektedir. Bu karakteristik eğrisinde  $h_1$  filtrenin ayarlandığı harmonik numarasıdır.

Referans [35] çalışmasında, FV-DÜB'lerin bulunduğu güç sistemlerinde kompanzasyon kapasitörlerinin rezonansa yol açabileceği ve harmonik filtreler kullanılarak bu rezonans durumlarının önlenmesinin yanı sıra uluslararası standartlarda tanımlı harmonik sınırlarını aşmadan sisteme bağlanacak azami FV-DÜB gücünün (sistemin FV-DÜB barındırma kapasitesinin) arttırılabileceği ifade edilmiştir. Bu çalışmaya paralel olarak, evirici ara yüzlü DÜB'ler için sistemin harmonik kısıtlara bağlı barındırma kapasitesinin iyileştirilmesinde pasif filtre kullanımı [37]'de tavsiye edilmiştir. Böylece, [38] ve [39] çalışmalarında, FV-DÜB'lerin harmonik sınırlamalara takılmadan şebekeye azami katılımı için optimal paralel pasif filtre tasarımları sunulmuştur. Bu çalışmalarda, standartlarda belirtilen harmonik sınırlamaların yanı sıra bağlantı noktası gerilim seviyesi ve güç faktörüne ilişkin sınırlamalarda dikkate alınmıştır.



Şekil 10. Tek-ayarlı paralel pasif filtrenin (a) tek-faz eşdeğer devresi ve (b) empedans-harmonik numarası karakteristiği.

Aktif filtreler, sisteme bağlanma şekline göre seri ve paralel olmak üzere iki tipe sahiptir. Bununla birlikte, pasif filtrelerde olduğu gibi aktif filtrelerinde paralel tipi seri tipine göre; reaktif güç kompanzasyonuna imkan tanıma avantajı sebebiyle daha fazla tercih edilmektedir. Paralel aktif filtreler, tüketiciye paralel olarak sisteme bağlanan ve harmonik akım kaynağı şeklinde kontrol edilen güç elektroniği devreleridir. Paralel aktif filtrelerin şebekeye enjekte edeceği akım dalga şekli; uygulanan anlık güç kompanzasyon stratejisine göre değişkenlik gösterir. Sinüzoidal-dengeli akım stratejisinde, aktif güç filtresi yük akımının temel frekans pozitif sıra aktif bileşeni dışındaki kısmını kompanse edecek şekilde sisteme akım enjekte eder [40]. Şekil 11’de sinüzoidal-dengeli akım stratejisine göre çalışan bir paralel aktif filtrenin bağlantı noktasına enjekte ettiği akım ( $I_f$ ) neticesinde; bozulmuş yük akımının ( $I_y$ ) filtrelenerek hat akımının ( $I_k$ ) saf sinüzoidal dalga formuna sahip olması görülmektedir.



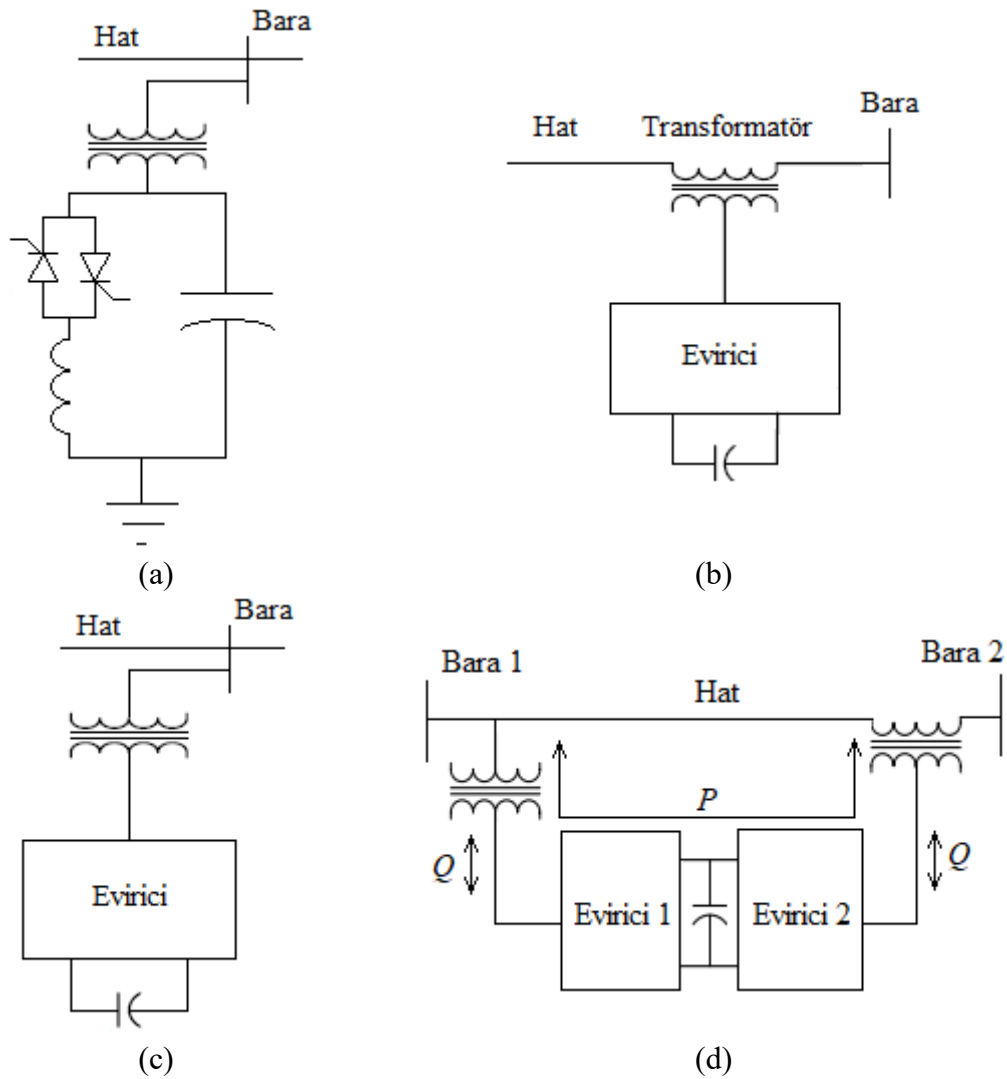
Şekil 11. Paralel aktif filtrenin sisteme bağlantısı ve çalışma prensibi.

FV-DÜB’lerin bulunduğu sistemlerde harmonik bozulma seviyelerinin iyileştirilmesi için literatürde pasif filtrelerin yanı sıra aktif filtreler de kullanılmıştır [41]. Ancak, özellikle son yıllarda yapılan çalışmalarda, ekstra bir aktif filtre kullanımı yerine, FV-DÜB’lerin eviricilerine, kontrol algoritmalarında yapılan düzenlemelerle aktif filtre yeteneği kazandırılması amaçlanmıştır. Böylece, bu aktif filtre yeteneği kazandırılmış eviriciler, güç üretmenin yanı sıra şebeke bağlantı noktasındaki akımların harmonik

bozulma, dengesizlik ve reaktif bileşenlerini kompanse etme özelliklerine sahip olmuştur [42-44].

#### 4.3. Esnek alternatif akım iletim sistemleri

Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) tristör anahtarlamalı ve eviricili sistemler olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Bu sistemler kullanılarak, mekanik anahtarlamalı kompanzatlara göre reaktif gücün dolayısıyla sistem gerilim seviyesinin daha hızlı ve yumuşak kontrolü mümkündür [45]. Ulaşılabilen literatürden, statik var kompanzator (SVC), dinamik gerilim düzenleyici (DVR), dağıtım tipi statik kompenzator (D-STATCOM) ve birleşik güç akış kontrolörü (UPQC) olarak isimlendirilen çeşitli FACTS elemanlarının, FV-DÜB'lerin bulunduğu sistemlerde gerilim profilinin iyileştirilmesi için kullanımı üzerine çalışmalara ulaşılmıştır [46-54]. Bu FACTS elemanlarının şematikleri Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. (a) SVC, (b) DVR, (c) D-STATCOM ve (d) UPQC elemanlarının yapıları.

Şekil 12 (a)'dan SVC'nin paralel bağlı tristör kontrollü reaktör-kondansatör çifti ile şebekeye bağlantı transformatöründen, Şekil 12 (b) ve (c)'den DVR ve D-



STATCOM'un kondansatör, evirici ve bağlantı transformatöründen, Şekil 12 (d)'den UPQC'nin DVR ve D-STATCOM'un birleşiminden oluştuğu görülmektedir [56].

SVC elemanı şebekeye paralel bağlanır ve yapısındaki tristörün tetikleme açıları ayarlanarak ihtiyaç duyulan kapasitif veya endüktif akımın sisteme enjekte edilmesine, böylece gerilimin belirlenen sınırlarda kontrolüne imkan verir. DVR elemanı hatta seri bağlanır ve çalışma prensibi evirici çıkış geriliminin ayarlanması ile hatta seri bağlı transformatörün sekonder tarafındaki bara gerilim profilinin düzenlenmesidir. Bara geriliminin indirilmesi veya yükseltilmesi ihtiyacına göre; DVR sırasıyla indüktif veya kapasitif bir elemanmış gibi davranır. D-STATCOM hatta paralel bağlanır. Bu eleman yapısındaki eviricinin çıkış geriliminin etkin değeri bara gerilimi etkin değerinden büyük ise; eviriciden hatta reaktif akım veya reaktif güç enjekte eder. Evirici çıkış gerilimi etkin değeri, bara gerilimi etkin değerinden küçük olduğu durumda ise; hattan eviriciye doğru reaktif akım akar ve D-STATCOM reaktif güç tüketir.

Referans [46]'da FV-DÜB'ler sebebiyle meydana gelen gerilim yükselmelerinin bastırılması için SVC kullanılmıştır. Aynı çalışmada sunulan analizler; SVC'nin dağıtım transformatörünün alçak gerilim tarafına yerleştirildiği durumda gereken anma gücünün, dağıtım transformatörünün yüksek gerilim tarafına yerleştirildiği durumdaki gerekli anma gücüne göre kayda değer derecede daha küçük olduğunu göstermiştir. [47]'de ise FV-DÜB'lerin ve rüzgar türbinlerinin bulunduğu sistemlerde gerilim profilini iyileştirmek için SVC'lerin optimal boyutlandırma ve yerleştirme problemi, NSGA-II isimli genetik algoritma kullanılarak çözülmüştür. Referans [48]'de çatı tipi tek fazlı FV-DÜB'lerin fazlara eşit güçte paylaştırılmadığı dağıtım sistemlerinde, gerilim profilinin ve dengesizliğinin iyileştirilmesi için DVR elemanı kullanılmıştır. Aynı çalışmada, ayrıca gerilim dengesizliği azaltma yetenekleri bakımından DVR ve D-STATCOM karşılaştırılmış ve bu analizlerde D-STATCOM'un daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte hedeflenen iş için DVR'ın daha düşük anma değerlerine ihtiyaç duyduğu sonucuna varılmıştır. Referans [49]'da Güneş ışınımının çok yüksek olduğu zamanlarda D-STATCOM'ların sistem geriliminin kontrolü için kullanılarak, dağıtım sisteminin FV-DÜB barındırma kapasitesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Analiz sonuçları D-STATCOM kullanımının FV-DÜB barındırma kapasitesini önemli derecede arttırdığını göstermiştir. Başka bir çalışmada [50], d.a. barası kapasite değeri küçültülmüş D-STATCOM'ların alçak gerilim dağıtım sistemlerinde FV-DÜB'lerin sisteme nüfuz etme sınırlarını iyileştirmek için kullanımı çalışılmıştır. Referans [51]'de d.a. barası kapasite değeri küçültülmüş UPFC'lerin, FV-DÜB'lerin yüksek seviyede nüfuz ettiği alçak gerilim dağıtım sistemlerinde gerilim ayarlama ve gerilim dengesizlik problemlerinin çözümünde kullanımı çalışılmıştır. Buraya kadar bahsedilen çalışmaların yanı sıra literatürdeki bazı çalışmalarda [52-55], FV-DÜB'ler DVR, D-STATCOM/STATCOM veya UPFC görevi göreceak biçimde tasarlanmıştır.

## **5. Sonuçlar ve tartışma**

Bu derleme çalışmasında, öncelikle fotovoltaik dağıtık üretim birimlerinde (FV-DÜB) günümüzde gelinek teknolojik durum sunulduktan sonra FV-DÜB'lerin sebep olduğu güç kalitesi problemleri incelenmiştir.

İnceleme çalışması sonucunda, FV-DÜB'lerin, (i) Güneş enerjisinin emre amade olmaması sebebiyle gerilim dalgalanması ve gerilim yükselmesi problemlerine,

(ii) yapılarında evirici var olması sebebiyle harmonik bozulma ve d.a. kirliliği problemlerine, (iii) tek fazlı evsel tiplerinin fazlara eşit dağıtılmaması sebebiyle gerilim dengesizliği problemine yol açtığı görülmüştür. Bu güç kalitesi problemlerinin sınırlandırılması için oluşturulan birçok uluslararası standart olduğu ancak bu standartlardan önde gelenlerinin IEEE 1547, IEEE 929 ve IEC 61727 olduğu tespit edilmiştir.

Son olarak, FV-DÜB'lerin bulunduğu sistemlerde gerilim dalgalanması, gerilim yükselmesi, gerilim dengesizliği ve harmonik bozulma problemlerinin iyileştirilmesinde, batarya enerji depolama sistemleri, pasif/aktif güç filtrelerin ve esnek alternatif akım iletim sistemlerinin (SVC, DVR, D-STATCOM ve UPQC) kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca, literatürdeki bazı çalışmalarda FV-DÜB'lere, aktif filtre, DVR, D-STATCOM ve UPQC olarak çalışma yeteneklerinin kazandırılmasına ilişkin tasarımların yapıldığı görülmüştür.

### Teşekkür

Bu çalışma, 116E110 nolu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- [1] Ackermann, T., Anderson, G. ve Söder, L., Distributed generation: a definition, **Electr. Power Syst. Res.**, 57, 195–204, (2001).
- [2] Paliwal, P., Patidar, N.P. ve Nema, R.K., Planning of grid integrated distributed generators: a review of technology, objectives and techniques, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 40, 557–570, (2014).
- [3] Li, L., Mu, H., Li, N. ve Li, M., Economical and environmental optimization for distributed energy resource system coupled with district energy networks, **Energy**, 109, 947–960, (2016).
- [4] Katiraei, F. ve Aguero, J.R., Solar PV integration challenges, **IEEE Power and Energy Mag.**, 9, 62-71, (2011).
- [5] Jager-Waldau A., PV Status Report 2018, **European Union**, Brussels, (2018).
- [6] Masson G., Orlandi S. ve Reinger M., Global market outlook for photovoltaics: 2014–2018, Brussels, Belgium, **European Photovoltaic Industry Association**, (2013).
- [7] Wu Y.K., Lin J.H. ve Lin H.J., Standards and guidelines for grid-connected photovoltaic generation systems: a review and comparison, **IEEE Trans. Ind. Appl.**, 53, 3205–3216, (2017).
- [8] Mohsen M., Hwai Chyuan O., Chong, W.O. ve Leong, K.Y., Advances and challenges in grid tied photovoltaic systems, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, Volume 49, 121-131, (2015).
- [9] Hassaine, L., OLias, E., Quintero, J. ve Salas, V., Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 30, 796-807, (2014).
- [10] Kouro, S., Leon, J.I., Vinnikov D. ve Franquelo, L.G., Grid-connected photovoltaic systems: an overview of recent research and emerging PV converter technology, **IEEE Ind. Electron. Mag.**, 9, 47-61, (2015).

- [11] Manasseh, O. ve Robert, B., Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 58, 1082-1094, (2016).
- [12] Anzalchi, A. ve Sarwat, A., Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems, **Energ. Convers. Manage.**, 152, 312-327, (2017).
- [13] Chin, V.J., Salam, Z. ve Ishaque, K., Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application, **Appl. Energy**, 154, 500–519, (2015).
- [14] Bhatnagar, P. ve Nema, R.K., Maximum power point tracking control techniques: State-of-the-art in photovoltaic applications, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 23, 224-241, (2013).
- [15] Bendib, B., Belmili, H. ve Krim, F., A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 45, 637-648, (2015).
- [16] IEEE Std 1547-2003, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems, **IEEE Standard**, USA, (2003).
- [17] IEEE Std 1547a-2014, IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems-amendment 1, **IEEE Standard**, USA, 2014.
- [18] IEC 61727-2004, Photovoltaic (PV) systems—characteristics of the utility interface, **IEC standard**, Switzerland, (2004).
- [19] IEEE Std 929-2000, IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems, **IEEE Standard**, USA, (2000).
- [20] Karimi, M., Mokhlis, H., Naidu, K., Uddin, S. ve Bakar, A.H.A., Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – a review, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 53, 594-605, (2016).
- [21] Mejbaul Haque, M. ve Wolfs, P., A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 62, 1195-1208, (2016).
- [22] Von Jouanne A. ve Banerjee B., Assessment of voltage unbalance, **IEEE Trans. Power Del.**, 16, 782–790, (2011).
- [23] Kurt, M.S., Balci, M.E. ve Abdel Aleem, S.H.E., Algorithm for estimating derating of induction motors supplied with under/over unbalanced voltages using response surface methodology, **The JoE**, 12, 627–633, (2017).
- [24] Rodriguez-Calvo, A., Cossent, R. ve Frías, P., Integration of PV and EVs in unbalanced residential LV networks and implications for the smart grid and advanced metering infrastructure deployment, **Int. J. Elec. Power**, 91, 121-134, (2017).
- [25] Shou T., Wang H., Zhu T., Zhu L., Wang Q. ve Lou X., Harmonic current suppression for three phase PV generation system under unbalanced grid voltage. **APPEEC 2013**, 1-6, Kowloon, China, (2013).
- [26] Huang H., Xu Y. ve Yang L., Control scheme of PV inverter under unbalanced grid voltage, **2014 IEEE PES General Meeting**, 1–5, National Harbor, USA, (2014).
- [27] Singh, G.K., Power system harmonics research: a survey, **Eur. Trans. Electr. Power**, 19, 151-172, (2009).
- [28] Kalair, A., Abas, N., Kalair, A.R., Saleem, Z. ve Khan, N., Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 78, 1152-1187, (2017).

- [29] Gianfranco C., Jürgen S. ve Filippo S., Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations, **Sol. Energy**, 83, 1026-1039, (2009).
- [30] Yang D., Dylan Dah-Chuan L., Geoffrey J. ve Cornforth, D.J., Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions, **Sol. Energy**, 94, 182-194, (2013).
- [31] Taylor, T., Gonzalez, O. ve Baghzouz, Y., Analysis of current distortion in a 12 kW photovoltaic system installation, **17th ICHQP**, 243-248, Belo Horizonte, Brazil, (2016).
- [32] IEEE std. 519-2014, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems, **IEEE standard**, USA, (2014).
- [33] Bhowmik, A., Maitra, A., Halpin, S.M. ve Schatz, J.E., Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations, **IEEE Trans. Power Del.**, 18, 619–24, (2013).
- [34] Ravikumar, P., Zeineldin, H.H. ve Xiao, W., Allowable DG penetration level considering harmonic distortions, **IECON Proc. Industrial Electron**, 814–818, Melbourne, Australia, (2011).
- [35] Dartawan, K., Hui L. ve Pterra, M., Harmonics issues that limit solar photovoltaic generation on distribution circuits, **WREF 2012**, 1-7, Denver, USA, (2012).
- [36] Das, J. C., Power system harmonics and passive filter designs, **Wiley-IEEE Press**, New Jersey, USA, (2015).
- [37] Harrison, G.P. ve Djokic, S.Z., Distribution network capacity assessment: incorporating harmonic distortion limits, **IEEE power & energy society general meeting**, 1–7, San Diego, USA, (2012).
- [38] Sakar, S., Balci, M. E., Abdel Aleem, S. H. E. ve Zobaa, A. F., Increasing PV hosting capacity in distorted distribution systems using passive harmonic filtering, **Electr. Power Syst. Res.**, 148, 74-86, (2017).
- [39] Sakar, S., Balci, M.E., Abdel Aleem, S.H.E ve Zobaa, A.F., Integration of large-scale PV plants in non-sinusoidal environments: Considerations on hosting capacity and harmonic distortion limits, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 82, 176-186, (2018).
- [40] Akagi, H., Watanebe, E. H. ve Aredes, M., Instantaneous power theory and applications to power conditioning, **Wiley-IEEE Press**, New Jersey, USA, (2017).
- [41] Huda, A. S. N. ve Živanović, R., Large-scale integration of distributed generation into distribution networks: Study objectives, review of models and computational tools, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 76, 974-988, (2017).
- [42] Tsengenes, G. ve Adamidis, G., A multi-function grid connected PV system with three level NPC inverter and voltage oriented control, **Sol. Energy**, 85, 2595–2610, (2016).
- [43] Noroozian, R. ve Gharehpetian, G.B., An investigation on combined operation of active power filter with photovoltaic arrays, **Int. J. Elec. Power**, 46, 392-399, (2013).
- [44] Zeng, Z., Yang, H., Zhao, R. ve Cheng, C., Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: a comprehensive review, **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 24, 223-270, (2013).
- [45] Gelen, A. ve Yalçınöz, T., Tristör anahtarlamalı kapasitör (TSC) ve tristör anahtarlamalı reaktör-tabanlı atatik VAR kompanzator'ün (TSR-Tabanlı SVC) PI ile kontrolü, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 24, 237-244, (2009).

- [46] Iioka, D., Sakakibara, K., Yokomizu, Y., Matsumura, T. ve Izuhara, N., Distribution voltage rise at dense photovoltaic generation area and its suppression by SVC, **Electr. Eng. Jpn.**, 166, 47-53, (2009).
- [47] Durisic, A.S.Z., Optimal sizing and location of SVC devices for improvement of voltage profile in distribution network with dispersed photovoltaic and wind power plants, **Appl. Energy**, 134, 114-124, (2014).
- [48] Shahnia, F., Ghosh, A., Ledwich, G. ve Zare, F., Voltage unbalance improvement in low voltage residential feeders with rooftop PVs using custom power devices, **Int. J. Elec. Power**, 55, 362–377, (2014).
- [49] Chao-Shun, C., Chia-Hung, L., Wei-Lin, H., Cheng-Ting, H. ve Te-Tien, K., Enhancement of PV penetration with DSTATCOM in Tai power distribution system, **IEEE Trans. Power Syst.**, 28, 1560–1567, (2013).
- [50] Wolfs, P., Improvements to LV distribution system PV penetration limits using a DSTATCOM with reduced DC bus capacitance, **2013 IEEE PES Meeting**, 1–5, Vancouver, Canada, (2013).
- [51] Wolfs, P. A., UPFC with reduced DC bus capacitance for LV distribution networks with high PV penetrations, **22nd AUPEC**, 1–7, Bali, Indonesia, (2012).
- [52] Ramasamy, M. ve Thangavel, S., Experimental verification of pv based dynamic voltage restorer (PV-DVR) with significant energy conservation, **Int. J. Elec. Power**, 49, 296-307, (2013).
- [53] Rajiv, K., Varma, V.K., ve Ravi, S., Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage, **IEEE Trans. Energy Convers.**, 24, 983-985, (2009).
- [54] Yahia, B., Kurt, E., Chenni, R. ve Altın, N., Design and simulation of a unified power quality conditioner fed by solar energy, **Int. J. Hydrogen Energy**, 40, 15267-15277, (2015).
- [55] Sezen, S., Aktas, A., Ucar, M., Ozdemir, E., Design and operation of a multifunction photovoltaic power system with shunt active filtering using a single-stage three-phase multilevel inverter, **Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.**, 25, 1412-1425, (2017).
- [56] Padiyar, K. R., FACTS: Controllers in power transmission and distribution, **Anshan Publishers**, 2009.

---

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. Haziran ve Aralık aylarında olmak üzere yılda iki kez yayınlanır.
- Dergide yayımlanan makaleler başka hiç bir 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).
-