



**SELÇUK  
ÜNİVERSİTESİ**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK - BİLİM VE  
TEKNOLOJİ DERGİSİ**

**SELÇUK UNIVERSITY  
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND  
TECHNOLOGY  
(SUJEST)**

**EISSN 2147-9364**

**HAKEMLİ DERGİDİR**

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering Faculty **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**  
Mühendislik Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**

Chief Editor/Şef Editör

**Assoc. Prof. Dr. Halife KODAZ**

Editors/Editörler

**Prof. Dr. Halil Kursad ERSOY**

**Prof. Dr. Ihsan OZKAN**

**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**

**Assoc. Prof. Dr. Ahmet Afsin KULAKSIZ**

**Assoc. Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN**

**Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM**

**Assist. Prof. Dr. Alpaslan YARAR**

**Assist. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN**

**Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN**

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof. Dr. Dervis KARABOGA, Erciyes University

Prof. Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University

Prof. Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University

Prof. Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Prof. Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University

Prof. Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University

Prof. Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University

Prof. Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Language Editing/Yabancı Dil Editörleri

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Assist. Prof. Dr. Lutfiye KARASAKA

Res. Assist. Ismail KOC

Correspondance Address/Yazışma Adresi

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı  
42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 241 0 634  
Fax : 0 332 241 0 635  
E-mail : [sujest@selcuk.edu.tr](mailto:sujest@selcuk.edu.tr)  
Web : <http://sujest.selcuk.edu.tr>

## **Editorial Board/Yayın Kurulu**

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Mustafa Tabakçi, Konya Technical University, TURKEY

Ömer Kaan Baykan, Konya Technical University, TURKEY

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Devenci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Volkan Kalem, Konya Technical University, TURKEY

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK, BİLİM VE TEKNOLOJİ DERGİSİ**  
**Selcuk University Journal of Engineering, Science and Technology**  
**(SUJEST)**

ISSN 2147 – 9364 (Elektronik)

Cilt	7	Mart	2019	Sayı	1
Volume	7	March	2019	Number	1

**İÇİNDEKİLER (CONTENTS)**

Araştırma Makalesi (Research Article)

- DELME HIZI VE BASKI KUVVETİNİN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**  
Investigation on the Effect of Drilling Speed and Pressure Force on Energy Consumption  
.....Niyazi BİLİM, Emre KARAKAYA 1-11
- FREE VIBRATION ANALYSIS OF AN AIRCRAFT WING BY CONSIDERING AS A CANTILEVER BEAM**  
Ankastre Kiriş Olarak Düşünülen Bir Uçak Kanadının Serbest Titreşim Analizi  
.....Ali DEMİRTAŞ, Meral BAYRAKTAR (English) 12-21
- PURIFICATION PHASES OF ZINC SULPHATE SOLUTION OBTAINED FROM NEUTRAL LEACHING PROCESS OF ZINC CALCINE**  
Purification Phases of Zinc Sulphate Solution Obtained from Neutral Leaching Process of Zinc Calcine  
..... Nurten DEVA, Musa RIZAJ (English) 22-29
- ŞEHİRLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSLARININ BİR BULANIK ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİĞİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ**  
Evaluation of Sustainability Performance of Cities with A Fuzzy Multi Criteria Decision Making Method  
.....Ahmet ŞEPİT, Turan PAKSOY 30-48
- KREN KİRİŞLERİNİN HAREKETLİ TEKİL YÜKE MARUZ SÖNÜMLÜ EULER-BERNOULLİ KİRİŞİ OLARAK MODELLENMESİ VE DİNAMİK ANALİZİ**  
Modeling and Dynamic Analysis Of Crane Beams As Euler-Bernoulli Beam with Damped Subject to Moving Singular Load  
.....C. Oktay AZELOĞLU, Sami KURAL 49-65
- EFFECT OF ASPECT RATIO ON THE FREEZING-THAWING OF A CH CLAY**  
Numune Boyutunun CH Kilinin Donma-Çözülme Üzerindeki Etkisi  
.....R. Kağan AKBULUT, A. Şahin ZAIMOĞLU (English) 66-74

**ANGSTRÖM-PRESCOTT MODELİNİN POLİNOM İLE GELİŞTİRİLMESİ VE DİYARBAKIR GÜNEŞ IŞINIMI VERİLERİNE UYGULANMASI**

Hybrid Model for Solar Irradiation Estimation Using Polynomial and Angström-Prescott Equation

.....Yavuz Selim GÜÇLÜ 75-88

**APPROXIMATE DYNAMIC PROGRAMMING FOR OPTIMAL SEARCH WITH AN OBSTACLE**

Engelli Optimal Arama için Yaklaşımsal Dinamik Programlama

.....Yasin GÖÇGÜN (English) 89-104

**KOBALT KATKILI ÇİNKO OKSİT NANOPARÇACIKLARIN YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Investigation of the Structural Properties of Cobalt Doped Zinc Oxide Nanoparticles

.....Güvenç AKGÜL, Funda AKSOY AKGÜL 105-114

**TAM ZAMANINDA ÜRETİM FELSEFİNE DAYALI SERİ HATTIN SİMÜLASYON TEKNİĞİYLE PERFORMANS ANALİZİ**

Performance Analysis of a Serial Production Line Based on Just in-Time Philosophy Using Simulation Technique

.....Mümüne SERT, Saadettin Erhan KESEN 115-134

**LiBr-H<sub>2</sub>O AKIŞKAN ÇİFTİNİ KULLANAN BİR ABSORBSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMİ İÇİN TERMODİNAMİK VE EKSERJİ ANALİZİ**

Thermodynamic and Exergy Analysis of an Absorption Cooling System for LiBr-H<sub>2</sub>O Fluid Couple

.....Dilek Nur ÖZEN, Kemal Çağrı YAĞCIOĞLU 135-145

**EFFECT OF HEAT-TREATMENT ON PHASE RELATIONSHIPS, MICROSTRUCTURES AND HARDNESS OF Co-Cr-Mo ALLOYS**

Yaşlandırma Süresinin Co-Cr-Mo Alaşımlarının Faz Dönüşümleri, Mikroyapıları ve Sertliğine Etkisi

.....Mehmet YILDIRIM, Ali KELEŞ (English) 146-153

**FARKLI BAĞLANTI YÖNTEMLERİ İLE HİYERARŞİK KÜMELEME TOPLULUĞU**

Hierarchical Clustering Ensemble with Different Linkage Methods

.....Derya BİRANT 154-164

**OPTOELEKTRONİK SENSÖR KULLANARAK NEFESTE BULUNAN SU BUHARI ANALİZİNİN ARAŞTIRILMASI**

Investigation of Analysis of Water Vapor Present in Breath Using an Optoelectronic Sensor

.....İsmail BAYRAKLI 165-170

**PREFABRİKE YAPILARIN RÜZGÂR YÜKÜ GÜVENLİĞİNİN BELİRLENMESİ**

Determination of Wind Load Safety of Prefabricated Structures

.....Mehmet UZUN, M. Tolga ÇÖĞÜRCÜ 171-188

**DEPREM BÖLGESİNDEKİ BAZI ÜLKELERDE EŞDEĞER DEPREM YÜKÜ METODUNUN  
KARŞILAŞTIRILMASI**

Comparison of Equivalent Earthquake Methods in some Countries in Earthquake Zone

.....Mehmet UZUN, Hasan Hüsnü KORKMAZ 189-212

**MEME KANSERİ TANISI İÇİN DERİN ÖZNİTELİK TABANLI KARAR DESTEK SİSTEMİ**

A Deep Feature Based Decision Support System for Breast Cancer Diagnosis

.....Nuh ALPASLAN 213-227

**BİLGİSAYARLI GÖRÜ SİSTEMLERİ İÇİN SİSTEM TASARIMI VE KONTROLÜ**

System Design and Control for Computer Vision Systems

.....Birkan BÜYÜKARIKAN, İsmail Serkan ÜNCÜ 228-240

**ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ SEYİTLER YERLEŞKESİ ENERJİ TALEBİNİN YENİLENEBİLİR  
ENERJİ KAYNAKLARIYLA KARŞILANMASI**

Ensuring the Energy Demand of Artvin Çoruh University Seyitler Campus with Renewable Energy Sources

.....Enes Halit AYDIN, Mehmet ÇUNKAŞ 241-252

**KÖMÜR FLOTASYONUNDA FARKLI YAĞLARIN PERFORMANSLARININ  
KARŞILAŞTIRILMASI**

Comparison of Performance of Different Oils in Coal Flotation

.....Ercan ŞAHİNOĞLU 253-262

## DELME HIZI VE BASKI KUVVETİNİN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Niyazi BİLİM, <sup>2</sup>Emre KARAKAYA

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, KONYA

<sup>2</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, KONYA

<sup>1</sup>nbilim@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>ekarakayamr@gmail.com

(Geliş/Received: 26.04.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.05.2018)

**ÖZ:** Artan sanayileşme ve madencilik gelişmesiyle beraber dünyada son yıllarda sondaj çalışmaları artmıştır. Madencilikte birçok amaçla kaya birimlerinde delikler delinmektedir. Kayaların farklı ekipmanlarla delinmesi esnasında makinelerin performansına birçok faktör etki etmektedir. Araştırmacılar daha verimli bir delme işlemi için, bu faktörler içerisinde, değiştirilebilir parametreler üzerinde çalışmalar sürdürmektedirler. Delinebilirlik analizlerinde delme hızı önemli bir göstergedir. Kaya madde ve kütlelerinde verimli bir delmenin gerçekleştirilebilmesi için, delme hızının genelde yüksek olması arzu edilir. Fakat delme hızının artması için uygulanan prosedürler tüketilen enerjinin de artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, delme işleminde enerji tüketiminin daha önceden tahmin edilebilmesi maden projeleri için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, yedi farklı kaya biriminde 11 farklı baskı kuvvetinde ve dört farklı dönme hızında delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Delme deneyleri sonucunda elde edilen verilerle güç tüketimlerinin değişimi araştırılmıştır. Ayrıca, delme hızıyla enerji tüketimi arasında ilişkiler değerlendirilerek bazı eşitlikler geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Delinebilirlik, Delme hızı, Dönme hızı, Baskı kuvveti, Döner delme, Karotlu sondaj

### Investigation on the Effect of Drilling Speed and Pressure Force on Energy Consumption

**ABSTRACT:** With increasing industrialization and the development of mining, drilling work has increased in recent years in the world. In mining, holes are drilled in rock for many purposes. Many factors influence the performance of the machines during drilling of the rocks with different equipment. Researchers continue to work on changeable parameters, including these factors, for a more efficient drilling operation. In drillability analysis, drilling speed is an important indicator. It is desirable that the drilling speed is generally high so that efficient drilling can be achieved in the rock material. But the procedures applied to increase the drilling speed cause the exhausted energy to increase. For this reason, it is very important for the mining projects that the energy consumption can be predicted beforehand in the drilling process. In this study, drilling experiments were carried out in seven different rock units at 11 different pressing forces and at four different rotational speeds. The change in power consumption obtained from drilling experiments was investigated. In addition, some equations have been developed by evaluating the relationship between drilling speed and energy consumption

**Key Words:** Drillability, Drilling speed, Drill rotation speed, Pressure force, Rotary drilling, Core drilling

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Delme işlemleri (sondaj) madencilik ve diğer mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeraltı, açık ocak, baraj, tünel, yol inşaatı ve kanalizasyon sistemlerinde geliştirme ve

üretim faaliyetleri sırasında farklı amaçlarla (maden arama ve üretim, patlatma, drenaj, enjeksiyon, kontrol sondajı, doğal taş madeninde elmas tel delikleri, temel açma çalışmaları) delikler delinmektedir. Bu çalışmaların sağlıklı yürüyebilmesi için, delme çalışmaları esnasında karşılaşılabilecek olan sorunların tahmin edilebilmesi gereklidir. Verimli bir delme işlemi yapabilmek için öncelikle delinecek olan formasyon hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olunmalıdır. Daha sonra bu formasyona uygun delici seçimi ve delme parametreleri (baskı kuvveti, su miktarı, dönüş hızı vb) belirlenmelidir.

Madencilikte delme çalışmaları, madenin ilk arama safhasından başlayarak üretimin tüm aşamalarında devam eden ve son aşamasına kadar devamlılığını koruyan önemli faaliyetlerden biridir (Taheri ve diğ., 2016). Delme çalışmalarına birçok faktör etki edebilir. Ancak delmeyi etkileyen en önemli faktörler jeolojik özellikler ve formasyonun mekanik özellikleridir (Protodyakonov, 1963; Tandanand ve Unger, 1975; Pathinkar ve Misra, 1976; Rabia, 1985). Proje planlaması ve maliyet analizleri için delme hızının tahmin edilmesi hayati önem taşımaktadır.

Kayacın delinebilirliği bir delme matkabının kayaç içinde ilerleme yapabilme hızı olarak tanımlanmaktadır (Tamrock, 1987). Delinebilirlik, delici ucun kayaç içinde belirli bir zamanda kayacı delerek ilerlemesidir. Genellikle metre/dakika olarak tanımlanır. Ayrıca, kaya kütleğinde delik delme kolaylığı olarak ifade edilebilir. Bir kayacın delinebilirliği, delici ucun (matkabın) delme hızı, delme işinde harcanan spesifik enerji gibi birçok şekilde tanımlanabilmektedir. Delinebilirlik ile delme hızı aynı kavram olarak tanımlanmaktadır. Delinebilirlik kolay veya zor olarak delinme hızı ise hızlı veya yavaş olarak ifade edilmektedir (Bilim, 2011).

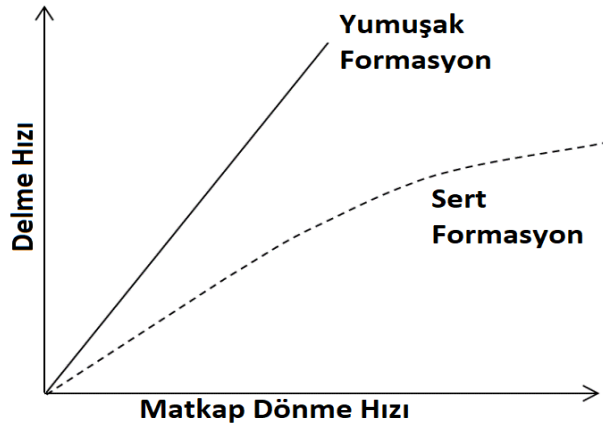
Günümüzde genel olarak iki farklı delme yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar döner delme ve darbeli delme işlemleridir. Dolayısıyla yapılan tasarımlar bu yöntemler arasından seçilecek delme sistemine göre yapılmaktadır. Bu yöntemlerin delme sistemlerinin birbirinden farklı olması nedeniyle yapılacak olan delinebilirlik analizleri her yöntem için ayrı ayrı oluşturulmalıdır. Dolayısıyla geliştirilecek olan delinebilirlik tahmin modellerinin de her yöntem için ayrı ayrı türetilmesi gerekmektedir.

Delinebilirliğe etki eden birçok parametre vardır. Etki eden faktörlere göre delme hızı değiştirilebilir ve değiştirilemeyen faktörler olarak kategorize edilebilir (El Kacimi ve diğ., 2017). Bunlar makine ve ekipmana bağlı parametreler (delme makinesinin tipi, dönme hızı, baskı kuvveti, matkap tipi vb.), delme işlemine bağlı parametreler (delme metotları, makinenin çalışma ve bakımı, makine operatörünün deneyimi, v.b.) ile jeolojik parametrelerdir (kaya tipi, kayaların mekanik özellikleri, süreksizlikler, mineral kompozisyonu). Makine, ekipman ve delme işlemine bağlı parametreler kontrol edilebilir parametreler olup, jeolojik özelliklere bağlı parametreler ise kontrol edilemeyen parametrelerdir (Karaman, 2008).

Kaya madde ve kütleğine (jeolojik) bağlı parametreler, delici ekipmanlara bağlı parametreler ve işletme parametreleri delme performansını ve matkap aşınmasını etkilemektedir. Delme ekipmanlarına bağlı parametreler ve işletme parametreleri değişken ve kontrol edilebilir olabilmektedir. Ancak, kayaç özellikleri ve jeolojik koşullar kontrol edilemeyen parametrelerdir (Zahri ve diğ., 2016).

Matkap dönme hızının artırılması belli sınırlar içinde delme hızında da artışına neden olmaktadır. Yumuşak formasyonlarda, eğer kırıntılar kesildiği anda temizlenirse, delme hızındaki artış ile dönme hızındaki değişim orantılı olmaktadır. Sert formasyonlarda, dönme hızının artışı yumuşak formasyonlar kadar etkin değildir (Şekil 1). Matkap dönme hızının artırılması genel olarak delme hızının artırılması için avantaj sağlamaktadır. Fakat matkap ve diğer ekipmanların aşınması dönüş hızı arttıkça artmaktadır.





**Şekil 1.** Matkap dönme hızı ile delme hızı arasındaki ilişki

Figure 1. Relationship between drill rotation speed and drilling speed

Rais ve diğ. (2017) Cezayir'deki bir açık ocak fosfat madeninde yapmış oldukları çalışmada, patlatma deliklerinin delinmesinde kullanılan delici makinanın delme hızına etki eden parametreleri araştırarak bir tahmin modeli önermişlerdir. Delici makinanın baskı gücü ve dönme hızı parametrelerine bağlı olarak bir matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bu modelin, delici makinanın verimliliğini artırmak ve matkap aşınmasını en aza indirmek için kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Ekincioğlu ve diğ. (2013) doğal taşlar üzerinde gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, delme oranı indeksi (DRI) ile spesifik enerji ve kayaçların fiziko-mekanik özellikleri arasında güçlü ilişkilerin varlığını tespit etmişlerdir.

Shaabani, ve diğ. (2016) tek eksenli basınç dayanımının delinebilirliği karakterize etmek için pek uygun olmadığını, bunun yerine delme oranı indeksinin (DRI) karbonatlı kayaçlarda delinebilirlik hakkında daha güvenilir sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Bilim ve diğ. (2017) Delici makinaların matkabının dönme hızı ile delinebilirlik arasında ilişkilerin durumunu analiz etmek amacıyla doğal taşlarda delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta, matkap dönme hızının delme esnasında en etkin parametrelerden birisi olduğunu açıklamışlardır.

## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada araziden elde edilen doğal taşlar üzerinde laboratuvar ortamında karot alma makinesi ile delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler esnasında delme işlemi boyunca harcanan güç üç fazlı güç ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Araziden elde edilen kayaçların adları, lokasyonları ve jeolojik kökenleri Çizelge 1'de listelenmiştir. Deneylerin doğal taşlar üzerinde yapılmasının ana sebebi deney sonucunun yorumlanmasını zorlaştıracak olan heterojen davranış gösteren özelliklerin sabit tutulmasını sağlamaktır. Deney numuneleri İç Anadolu Bölgesinden temin edilmiş olup farklı özelliğe sahip yedi numune tercih edilmiştir.

**Çizelge 1.** Kayaçların isimleri ve jeolojik sınıfları

Table 1. Names and geological classes of rocks

Kayaç Adı	Jeolojik Sınıfı
Ankara Bazalt	Magmatik
Sille Andezit	Magmatik
Sivrihisar Beyaz Mermer	Metamorfik
Afyon Dolomit	Metamorfik
Beyşehir Mermer	Metamorfik
Karaman Traverten	Sedimanter
Polatlı Traverten	Sedimanter

Bu numunelerin delinme hızlarını belirlemek için laboratuvar ölçekli döner delme sistemine sahip bir karot alma cihazı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan karot alma makinesi 4 farklı devirde (dönüş hızı) ve farklı baskı kuvvetlerinde delme işlemini gerçekleştirebilecek özelliktedir. Delme işlemi uygulanan kayalarda toz oluşumunun engellenmesi, karotiyerin ucunda yer alan, kesme işlemi sağlayan preslenmiş elmas taneciklerini soğutmak için ve kırıntıları uzaklaştırmak için sulu kesim yapan bir sistemi barındırmaktadır. Karot alma makinesinde tungsten karbür içeren karot uçları kullanılmıştır. Delme deneyleri 54-72 mm çaplarında iki farklı delici uç ile gerçekleştirilmiştir.

Bir sistemde tüketilen enerjinin bileşenlerini ölçme işleminde kullanılan ölçü aletlerine güç analizörü denir. Güç analizörleri çok fazlı sistemlerde her faz için ayrı ayrı akım, gerilim ve güç değerlerinin ölçülmesini sağlayan ve dahili veya harici belleğe sahip olan modeller ile bu verilerin kaydedilmesini sağlayan ekipmanlardır. Güç analizörleri, şebekedeki elektrik parametrelerinin kontrolü, ölçümü ve izlenmesi için kullanılmaktadırlar. Güç analizörleri üç, iki ve tek fazlı sistemlerde ölçüm sağlayabilmektedir.

Karot alma makinesinde delme deneyleri yapılırken harcanan enerji miktarının analiz edilmesi için kullanılan güç analizörünün görüntüsü Şekil 2’de sunulmuştur.



**Şekil 2.** 3 fazlı güç analizörü

**Figure 2.** 3-phase power analyzer

Güç analizörünün (Şekil 2) gücü ölçülecek üç fazlı bir cihaza bağlantısının yapılabilmesi için cihazın elektrik panosunun olması gerekmektedir. Fakat delme deneylerinde kullanılan karot alma cihazı bir panoya bağlı olmadığı için ölçümlerin panoya gerek kalmadan yapılması için “3 faz bağlantı aparatı” olarak adlandırılan ek bir cihaz tasarlanmıştır (Şekil 3). Bu tasarım sayesinde, hem ölçümlerin kolay yapılması sağlanmış hem de güç ölçümlerin gerçekleştirilmesi iş sağlığı ve güvenliği şartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.** 3 faz bağlantı aparatı  
Figure 3. 3 phase connection aparate

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, farklı bölgelerden temin edilen 7 farklı doğal taş numuneleri üzerinde laboratuvarında döner delici bir karot alma makinesi kullanılarak farklı şartlarda delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Delme deneyleri farklı baskı kuvvetleri ve dönme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde soğutma ve kırıntı temizleme parametresinin delinebilirlik üzerine etkisini saf dışı bırakmak için su debisi deneyler boyunca sabit tutulmuştur.

Karot alma makinesinde makine ekipmanlarının değiştirilebilir parametrelerinden birisi olan baskı kuvvetinin kademeli olarak artırılması ile gerçekleştirilen delme deneylerinde su debisi, delik çapı ve matkap dönme hızı gibi değiştirilebilir parametreler sabit tutulmuştur. Karot alma makinesinin baskı kuvvetini karotiyerin kendi ağırlığından başlayarak 1-10 kg arasında 11 farklı baskı kuvvetinde ve 54-72 mm çapında iki farklı matkap çapı ile delme işlemi yapılırken güç tüketimleri ölçülmüştür. Bu delme deneylerinde gerçekleştirilen işlemler ve elde edilen sonuçlar aşağıda ana başlıklar altında sıralanmıştır.

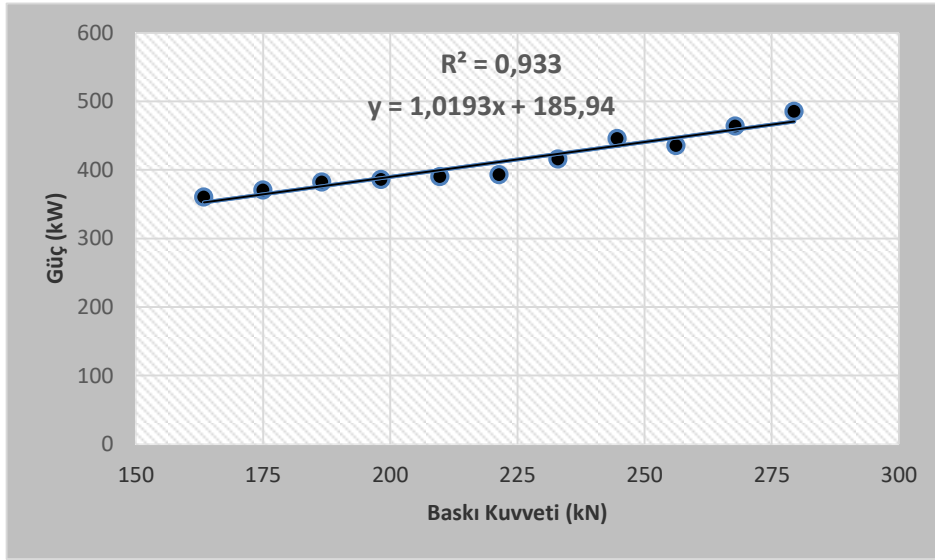
#### **Baskı Kuvveti İle Güç Tüketimi Arasındaki İlişkiler (Relations Between Pressure Force and Power Consumption)**

Bu delme deneyleri 7 farklı doğal taş numunesi üzerinde, karot alma makinesinin baskı kuvveti delicinin kendi ağırlığından başlayarak sırasıyla 1-2-3-4....-10 kg' a kadar artırılarak 11 farklı baskı kuvvetinde ve 54-72 mm çapında iki farklı matkap çapında gerçekleştirilmiştir. Delme deneyleri uygulanırken delici makinenin elektriksel güç tüketim değerleri ölçülmüştür. Karot alma makinesinin, devir sayısı, su debisi, delik çapı gibi özellikleri sabit tutulurken baskı kuvveti kademeli olarak değiştirilmiştir. Delme deneylerinde harcanan güç, enerji analizörü ile ölçülmüştür.

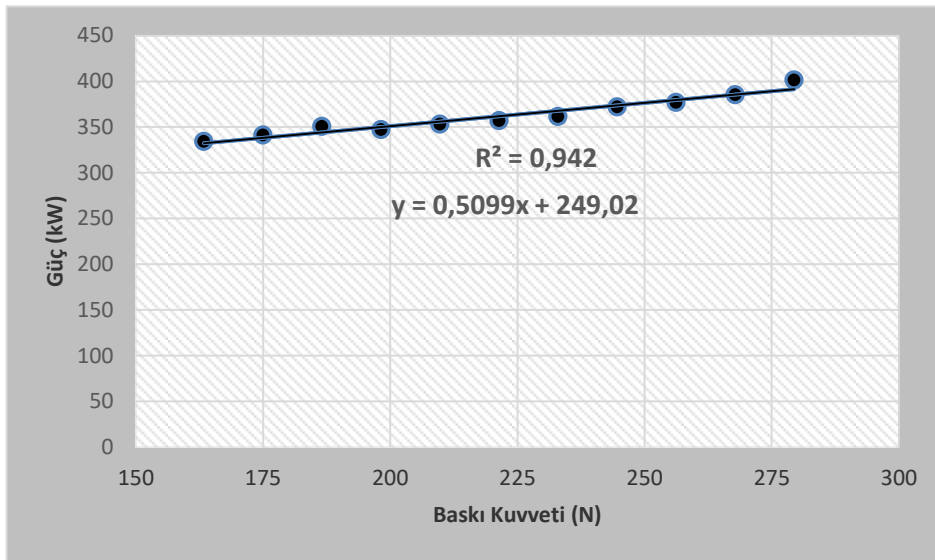
Delici uç üzerine farklı ağırlıklar takılarak delinebilirlik deneyleri gerçekleştirilirken baskı kuvvetinin sabit olmasını sağlamak amacıyla bu ağırlıklar dışında ek bir baskı kuvveti oluşturulmamıştır. Laboratuvar ölçekli karot alma makinesi dikey bir delme sistemine sahiptir. Bu nedenle delme esnasında kayaca gelen baskı kuvveti, kayaç üzerindeki ağırlık ile yerçekimi ağırlığından ibarettir. Deney sonuçlarında sunulan baskı kuvvetleri, yerçekimi ivmesi ile uygulanan sabit ağırlığın çarpımı sonucunda türetilmiştir.

Delme deneyleri, 54-72 mm çapında iki farklı matkap çapında yedi farklı doğal taş üzerinde gerçekleştirilerek farklı karotiyer çaplarında delme hızı, baskı kuvveti ve güç gibi faktörlerin değişimi izlenmiştir. Her iki matkap çapında da farklı baskı kuvvetlerine delme deneyleri uygulanarak her bir deney gerçekleştirilirken eş zamanlı olarak güç tüketimleri ölçülmüştür. Deneyler sonucunda baskı kuvveti ile güç arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Yedi farklı doğal taş numunesinden örnek olarak Sivrihisar beyaz mermer ve Polatlı traverten olarak adlandırılan kayaçlar üzerinde 54 mm'lik matkap çapında gerçekleştirilen delme deneylerinden elde edilen baskı kuvveti-güç arasındaki ilişkiler Şekil 4 ve 5'te sunulmuştur.

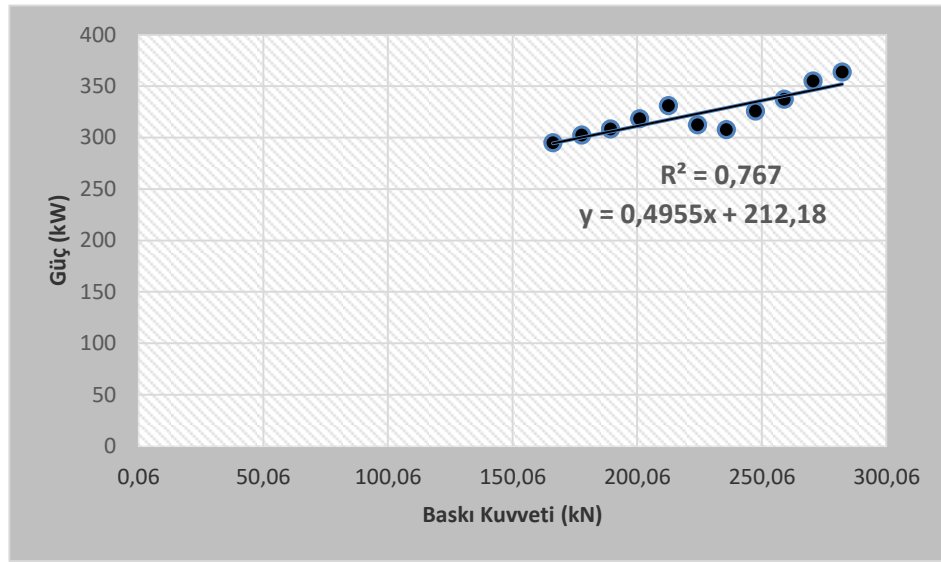


**Şekil 4.** Baskı kuvveti-güç tüketimi arasındaki ilişkinin (Sivrihisar beyaz mermer, 54 mm delik çapı)  
**Figure 4** The relationship between compression force and power consumption (Sivrihisar white marble, 54 mm hole diameter)



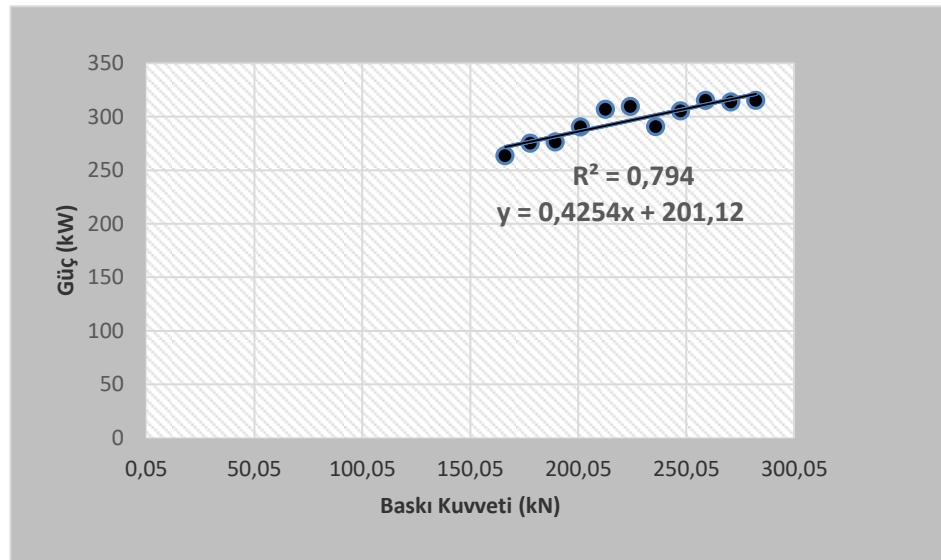
**Şekil 5.** Baskı kuvveti- güç tüketimi arasındaki ilişki (Polatlı traverten, 54 mm delik çapı)  
**Figure 5.** Relation between pressure force and power consumption (Polarized traverten, 54 mm hole diameter)

72 mm'lik matkap çapında gerçekleştirilen delme deneylerinden elde edilen ölçüm sonuçlarına dayanılarak oluşturulan baskı kuvveti-güç arasındaki ilişkiler Şekil 6 ve 7'de sunulmaktadır.



**Şekil 6.** Baskı kuvveti-güç tüketimi arasındaki ilişki (Sivrihisar beyaz mermer, 72 mm delik çapı)

**Figure 6.** Relation between compression force and power consumption (Sivrihisar white marble, 72 mm hole diameter)



**Şekil 7.** Baskı kuvveti-güç tüketimi arasındaki ilişki (Polatlı traverten, 72 mm delik çapı)

**Figure 7.** Relation between pressure force and power consumption (Polarized traverten, 72 mm hole diameter)

Baskı kuvveti-güç arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler incelendiğinde baskı kuvveti ile gücün doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca delme işlemi sağlayan matkap çapının artması ile baskı kuvveti-güç arasındaki ilişki kuvvetinin biraz azaldığı görülmektedir.

54 mm'lik matkap ile delme işlemi gerçekleştirilen diğer kayaların baskı kuvveti-güç arasındaki belirlilik katsayıları ve türetilen eşitlikler Çizelge 2'de sunulmuştur. Türetilmiş olan tüm eşitlikler doğrusal denklem şeklinde türetilmiştir. Ayrıca tüm eşitliklerin anlamlılık değeri (p) % 95 güven aralığındadır. Başka bir ifade ile anlamlılık katsayılarının 0,05'den küçüktür. Dolayısıyla türetilen tüm eşitliklerin anlamlılıkları ve belirlilik katsayıları ( $R^2$ ) oldukça yüksektir.

Çizelge 2. Baskı kuvveti-güç arasında türetilen eşitlikler

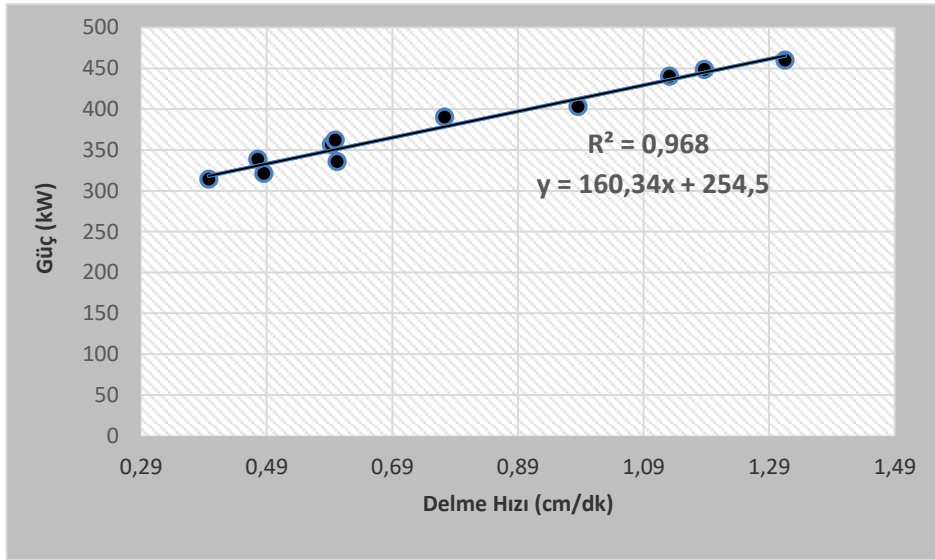
Table 2. Equations derived from force-force

Kayaç Adı	Belirlilik katsayısı (R <sup>2</sup> )	Denklem
Beyşehir Mermer	0,942	$y = 0,733x + 285,72$
Afyon Dolomit	0,841	$y = 1,254x + 101,38$
Karaman Traverten	0,962	$y = 0,710x + 205,33$
Sille Andezit	0,982	$y = 0,373x + 234,97$
Ankara Bazalt	0,904	$y = 0,278x + 239,66$
Polatlı Traverten	0,942	$y = 0,5099x + 249,02$
Sivrihisar Beyaz Mer.	0,933	$y = 1,0193x + 185,94$

### Delme Hızı İle Güç Tüketimi Arasındaki İlişkiler (Relations Between Drilling Speed and Power Consumption)

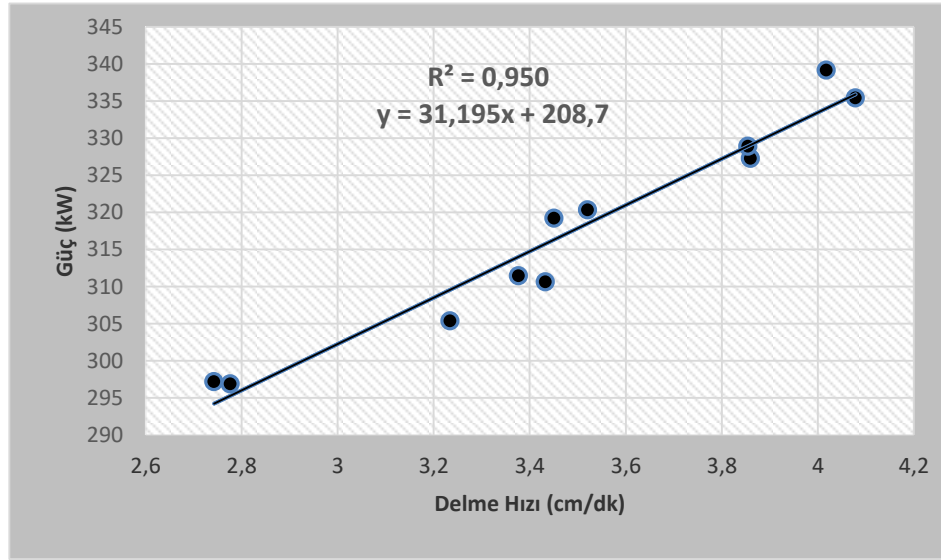
Delme hızı ile güç değişimleri arasındaki ilişkileri irdelemek amacıyla kayalarda delme hızı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde numuneden alınan karot boyu ve delme süresi ölçülmektedir. Ölçülen karot boyu ve delme süresi yardımıyla delme hızları hesaplanmaktadır.

Bu delme işleminde kırmızı andezit ve Afyon gri mermer adlı doğal taşlar için 54 mm'lik delici ucun kullanılması ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sayısal değerlerin sonuçları Şekil 8 ve 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. Delme hızı-güç arasındaki ilişki (Afyon gri mermer, 54 mm)

Figure 8. The relationship between piercing speed and power (Afyon gray marble, 54 mm).



Şekil 9. Delme hızı-güç arasındaki ilişki (Sille andezit, 54 mm)

Figure 9. Relationship between drilling speed and power (Sille Stone, 54 mm)

54 mm'lik matkap ile delme işlemi gerçekleştirilen kayaların delme hızı-güç arasındaki belirlilik katsayıları ve türetilen eşitlikler Çizelge 3' de sunulmuştur.

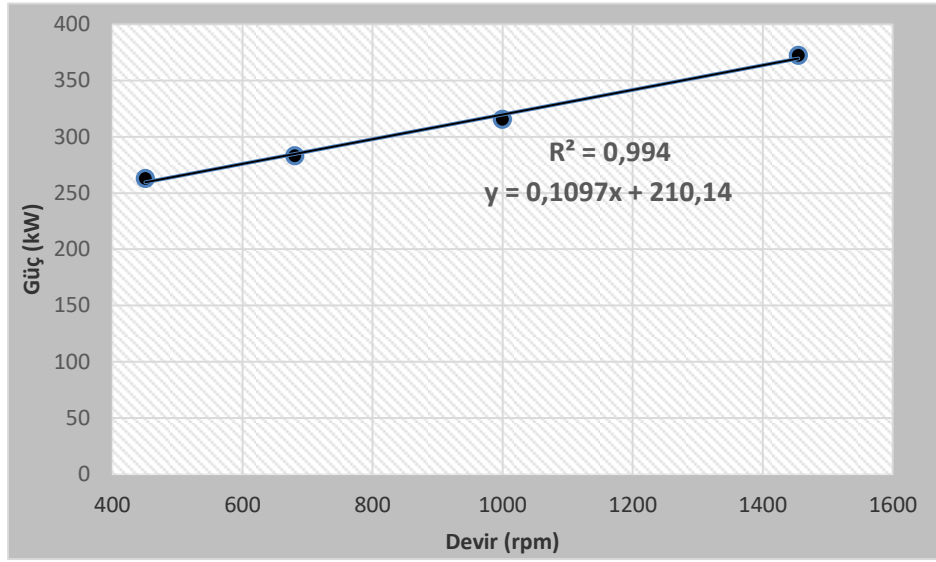
Çizelge 3. Delme hızı ile güç arasında türetilen denklemler

Table 3. Equations derived between drilling speed and power

Kayaç Adı	Belirlilik katsayısı (R <sup>2</sup> )	Denklem
Beyşehir Mermer	0,965	$y = 122,46x + 279,86$
Sivrihisar Beyaz Mermer	0,853	$y = 149,32x + 243,05$
Karaman Traverten	0,869	$y = 94,876x + 252,4$
Polatlı Traverten	0,881	$y = 47,569x + 296,99$
Ankara Bazalt	0,828	$y = 50,664x + 247,54$
Afyon Dolomit	0,968	$y = 160,34x + 254,5$
Sille Andezit	0,950	$y = 31,195x + 208,7$

#### Dönme Hızı İle Güç Tüketimi Arasındaki İlişkiler (Relations Between Rotational Speed and Power Consumption)

Bu deney işleminde karot alma makinesinin sahip olduğu dört farklı dönüş hızı (devir), baskı kuvveti, su debisi, matkap çapı sabit tutularak kesme işlemi yapıp dönüş hızı-ilerleme hızı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Tipik bir örnek olarak 54 mm çaplı delici uç ile Karaman traverten isimli kayaç üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 10'da görülmektedir. Deney sonucu elde edilen sayısal veriler ışığında oluşturulan grafik Şekil 10'da sunulmuştur. Bu numunede görüldüğü gibi dönme devri arttıkça harcanan gücün doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Devir ile güç arasındaki ilişki (Karaman traverten, 54 mm)

Figure 10. Relation between power and power (Karaman traverten, 54 mm)

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Maden ocaklarında, tünellerde, zemin etütlerinde veya patlatma işlemlerinde delme işlemleri çok büyük yer kaplamaktadır. Delme işlemlerini gerçekleştiren makinelerin bir kısmının elektrikli olduğu düşünüldüğünde delici makinenin delme işlemini yapmak için harcadığı birim enerji maliyeti, doğrudan makine ekipmanına bağlı değiştirilebilir faktörlerle (su debisi, devir sayısı, delik çapı, baskı kuvveti vb.) doğru orantılıdır. Bu düşünce doğrultusunda bu çalışmada makine ekipmanına bağlı değiştirilebilir faktörlerden bazıları sabit tutularak diğer faktörler değiştirilerek elektriksel ölçüm sağlanmıştır. Yapılan bu çalışma özellikle elektrik enerjisi ile çalışan delici makineler için delik delme işlemlerinde harcanan gücü tahmin edebilmek amacıyla bir enerji tahmin modeli oluşturmayı hedeflemektedir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlarla delici makinelerin değiştirilebilir parametreleri delme işlemi yapılacak kayaca göre değiştirilerek, delme işleminde en az enerji harcanması ve maksimum verim elde edilmesini öngörülmektedir.

Enerji tahmin modeli oluşturmak amacıyla yapılan delme deneylerinde baskı kuvveti kademeli olarak artırılıp su debisi, delme çapı, matkap dönüş hızı gibi değişkenler sabit tutularak delme işlemlerinde harcanan güç ölçülmüştür. Bu işlemler sonucunda baskı kuvveti-güç, delme hızı-güç ve dönme hızı-güç arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Ayrıca delici uç çapı, su debisi ve baskı kuvveti gibi değişkenler sabit tutularak karot alma makinesinin sahip olduğu 4 farklı dönüş hızında delme işlemi yapılarak devir-güç parametreleri arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Bu ilişkilere baktığımızda baskı kuvveti arttıkça delme hızı artmakta ve ayrıca baskı kuvveti, delme hızı, devir gibi değişkenler arttıkça harcanan güçte artmakta olup bu parametreler arasında doğru orantılı ilişkiler görülmüştür. Buna ek olarak delici uç çapının değişimi ile ilgili yapılan deneylerde delici uç çapı arttıkça delme hızı düşmekte ve baskı kuvveti-güç, delme hızı-güç gibi birimler arasındaki ilişkilerin zayıfladığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- ADITC, 2015. Australian Drilling Industry Training Committee Limited. "The Drilling Manuel, Fifty Edition", CRC Press Taylor & Francis Group,
- Bilim, N., Dündar, S., Kekeç, B., Dursun, A.E. 2017. Investigation of the Effect of Drill Bit Rotation Speed on the Sustainable Drilling. Proceeding of 8th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry (SDIMI 2017). 25-28 June 2017, Beijing, China, 206-210.



- Bilim N., 2011. Determination of Drillability of Some Natural Stones and Their Association with Rock Properties, *Sci. Res. Essays*, vol, 6, 382 - 387.
- Ekincioglu, G., Altindag, R., Sengun, N., Demirdag, S., Guney, A. 2013. Investigation of the Relationships between Drilling Rate Index (DRI), Physico-mechanical Properties and Specific Cutting Energy for Some Carbonates Rocks. *ISRM International Symposium - EUROCK 2013*, 23-26 October, Wroclaw, Poland.
- El Kacimi, Y., Azaroual, M. A., Touir, R., Galai, M., Alaoui, K., Sfaira, M., ... & Kaya, S. (2017). Corrosion inhibition studies for mild steel in 5.0 M HCl by substituted phenyltetrazole. *Euro-Mediterr J En-viron Integr*, 2(1), 1.
- Karaman, E., 2008. Sert kayalardaki delinebilirlik tayini. Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 56s.
- Pathinkar A.G., Misra G.B., 1976. A Critical Appraisal of the Protodyakonov Index, *International Journal Of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol, 13, 249 - 251.
- Protodyakonov M.M., 1963. Mechanical Properties and Drillability of Rocks, *Proceedings of the 5th Symposium Rock Mechanics*, Minnesota, USA, 103-118.
- Rabia H., 1985. *Oilwell Drilling Engineering: Principles and Practise*, Graham & Tromtman, Huddersfield, England, 322 s.
- Rais, K., Kara, M., Gadri, L., Hadji, R., Khochman, L. 2017. Original approach for the drilling process optimization in open cast mines; case study of kef essenoun open pit mine northeast of Algeria. *Mining Science*, vol. 24, 2017, 147-159.
- Shaabani, E., Rezaeian, M., Moein, M.J.A., Maarefvand, P. Experimental investigation into rate of penetration in carbonated rocks. *International Journal of Oil Gas and Coal Technology*. Vol: 11, issue:4, 339-349.
- Taheri A., Qao Q. & Chanda E., 2016. Drilling penetration rate estimation using Rock Drillability Characterization index, *Journal of The Institution of Engineers (India)*, serie D, 1 – 12
- Tamrock, 1987. *Handbook of Underground Drilling*, Tamrock Drills SF-33310 Tampere, Finland, 327 s.
- Tandanand S., Unger H.F., 1975, *Drillability Determination A Drillability Index of Percussive Drills*, US Bureau of Mines, RI 8073
- Zahri, F., Boukelloul, M. L., Hadji, R., & Talhi, K., (2016). Slope stability analysis in open pit mines of Jebel Gustar career, NE Algeria, multisteps approach. *Mining Science*, 23, 137-146.



## FREE VIBRATION ANALYSIS OF AN AIRCRAFT WING BY CONSIDERING AS A CANTILEVER BEAM

<sup>1</sup>Ali DEMİRTAŞ, <sup>2</sup>Meral BAYRAKTAR

<sup>1,2</sup>Department of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Faculty, Yildiz Technical University,  
Besiktas, 34349 Istanbul, Turkey

<sup>1</sup>alidemirrtas@gmail.com, <sup>2</sup>mbarut@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 25.08.2017; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.03.2018)

**ABSTRACT:** The present paper presents the modal analyses of a NACA 4415 airfoil profiled wing. Theoretical and numerical calculations are performed by considering the aircraft wing as a cantilever beam. The model is created and modal analyses are performed by using commercially available packages of SolidWorks and Ansys, respectively. The natural frequencies and the related mode shapes are obtained. The results of theoretical calculations are compared with the numerical modal analyses. The study has a conclusion that an aircraft wing can be considered as a cantilever beam that by ignoring the whole forces on the aircraft (except for gravity).

**Keywords:** Airfoil, Wing, Cantilever Beam, Modal Analysis

### Ankastre Kiriş Olarak Düşünülen Bir Uçak Kanadının Serbest Titreşim Analizi

**ÖZ:** Bu çalışmada NACA 4415 profiline sahip uçak kanadının modal analizi sunulmuştur. Uçak kanadı bir ankastre kiriş olarak düşünülerek teorik ve nümerik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Kanadın modellenmesi ve modal analizi ticari paket programları SolidWorks ve Ansys ile yapılmıştır. Analiz sonucunda uçak kanadı modelinin doğal frekansı ve buna bağlı mod şekilleri elde edilmiştir. Teorik hesaplar neticesinde elde edilen sonuçlar nümerik modal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuç, eğer yer çekimi kuvveti hariç diğer tüm kuvvetler ihmal edilirse, uçak kanadının ankastre bir kiriş olarak değerlendirilebileceği yönündedir.

**Anahtar Kelimeler:** Ankastre kiriş, Kanat, , Modal analizi, Uçak kanadı.

## INTRODUCTION

The modal analysis is a common method used to investigate dynamical behaviors of mechanical structures under the dynamics excitation. Emitted noise reduction from the system to the environment is enabled by the modal analysis. It helps finding out the reasons of vibrations which cause damage on the system and used for reducing it. In short, one can improve the performance of a system by using modal analysis method. Two primarily known methods of modal analysis are the numerical modal analysis and the experimental modal analysis. The mathematical model is derived from the measurement input data, which is handled by the experimental modal analysis. The modal is constructed from two different levels of analysis and the primary part is used for determining the curve FRF (Ewins, 2000). FRF frequency response function is a mathematical representation of the relationship between the input and the output of a system.

The free vibration analysis of an aircraft wing is one of the hardest problems to deal with in the process of designing an aircraft. A fundamental aspect in examining gust responses and aeroelastic phenomena is to investigate the natural frequencies and modes. The wings of an aircraft are usually consisted of thin-walled, non-uniform and arbitrary shaped structures which usually have sweep and dihedral angles and are tapered. These properties come with complicated effects that require sophisticated structural modeling. There are three different models that can be used for structural analysis of an aircraft wing. These models are consisted of "one-dimensional (beams), two-dimensional (plates, shells) and three-dimensional (solids)". One of the main advantages of one-dimensional model is that it requires less computational effort compared to the analysis of shells or solids. Euler-Bernoulli and Timoshenko models can be given as well-known examples to classical beam models. The last one includes transverse shear-deformation and rotary inertia effect. As the non-classical effects increase, the classical beam models become obsolete due to their feasibility. Non-classical effects in a wing structure are usually caused by in and out of plane, warping, twisting, bending-torsion coupling, and higher-order shear effects, among others (Carrera et al., 2012).

Free vibration analysis of beams has been extensively investigated by many researchers since the beams are fundamental models for the structural elements of many engineering applications. Free vibration analysis on elastic foundation or Winkler foundation have been studied by Thambiratnam and Zhuge (1995), Ozturk and Coskun (2013) Kaçar et al.(2011). Nirmall and Vimala (2016) has investigated the vibration characteristics of beams made up of three different materials such as aluminum, brass, mild steel with respect to different parameters by theoretical and analytical method by using ansys software. They have reported that the natural frequency increases with decreases in thickness for each material.

Jaworski and Dowell (2008) have investigated the flexural-free vibration of a cantilevered beam with multiple cross-section steps theoretically and experimentally. They have compared the experimental results against Euler-Bernoulli beam theory solutions from Rayleigh-Ritz and component modal analyses, as well as finite element results using the commercial package ANSYS.

Amarendra and Rapuri (Amarendra and Rapuri, 2016) performed dynamic analysis of a doubly tapered and twisted beam (a geometrical approximation of a blade) and validated values of natural frequencies with the results of Gupta and Rao (Gupta and Rao, 1978). They also performed computational fluid dynamics (CFD) analysis to determine the lift and drag forces, their magnitude and directions on the blade. The obtained results of CFD analysis was used to conduct a stress analysis in ANSYS workbench by considering the designed geometry. These stresses were used for repetitive cycle for a fatigue analysis performed in the same workbench module.

Rajappan and Pugazhenthhi (Rajappan and Pugazhenthhi, 2013) have studied bending finite element analysis (FEA) of monocoque laminated composite aircraft (subsonic and supersonic) wing using ANSYS by considering various airfoil thickness and ply angles. The physical structure modeled was a shell aircraft wing of airfoil cross section NACA 4412 series with fiber laminated composite structure.

Erdener and Yaman (Erdener and Yaman, 2003) investigated the static and the dynamic characteristics of an aircraft wing in order to see the effects of probable internal fuel and the external stores on the dynamic characteristics by using MSC/PATRAN and MSC/NASTRAN. It was concluded that the natural frequencies for the 1st and 4th modes decrease about 66% rate in the case of full fuel and considering all external forces.

Khadse, N.A. and Zaweri, (Khadse and Zaweri, 2015) studied on the modal analyses of an aircraft wing that was considered as a cantilever beam. The structure of the aircraft consisted of NACA 64A215. The computer aided model (CAD) model of the wing was developed by using PROE 5.0 and modal analysis was carried out by means of ANSYS WORKBENCH 14.0. The six- modes of vibration were obtained as a result of theoretical and numerical studies

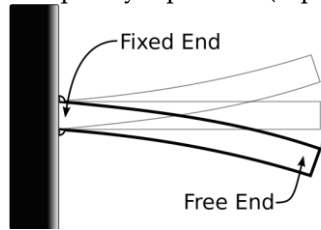
Lengvarský et al. (Lengvarský et al., 2013) carried out modal analyses on titan cantilever beam. They obtained mode shapes and natural frequencies by ANSYS and SolidWorks with numerical formulation

of the direct solver including the block Lanczos method as 94.02 [Hz], 207.58 [Hz], 324.32 [Hz], 570.47 [Hz], 823.64 [Hz].

In the present study, natural frequency and mode shapes of an aircraft wing were obtained by considering the wing as a cantilever beam. The wing model was created in SolidWorks by selecting the airfoil profile as NACA 4415. The model, then was simulated in ANSYS by applying proper boundary conditions to perform numerical modal analyses. The results of numerical modal analysis were compared with the results of theoretical approach of cantilever beam.

## THEORETICAL CALCULATION

For a cantilever beam shown in Figure 1, the natural frequency for each mode was calculated from Euler-Bernoulli Beam Theory's natural frequency equations (Eq.1,2,3) (Rao, 2011):



**Figure 1.** Cantilever beam.

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (1)$$

where E (Pa) is Young Modulus, I (kg/m<sup>2</sup>) is moment of inertia, m (kg/m) is mass per unit length, L (m) is length.  $\beta_n L$  is obtained by means of Eq.2 and Eq.3;

$$\frac{d^2}{dx^2} \left\{ EI \frac{d^2 Y(x)}{dx^2} \right\} = \omega^2 m(x) Y(x) \quad (2)$$

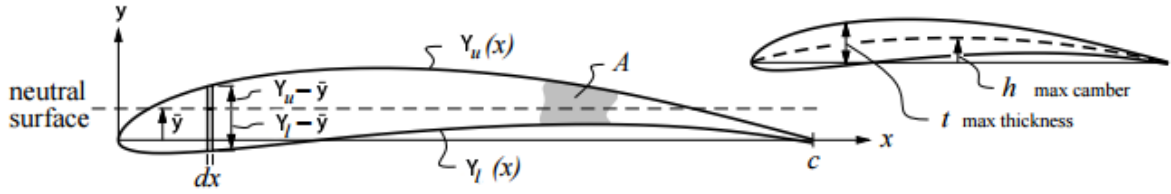
$$\beta^4 = \frac{\omega^2 m}{EI} \quad (3)$$

The magnitudes of  $(\beta_n L)$  are given in Table 1:

**Table 1.** Magnitude of  $(\beta_n L)$  (Rao, 2011).

$n$	$(\beta_n L)$
1	1,8751
2	4,69409
3	7,8539
4	10,99557
5	14,1372
6	17,279

The span wise bending stiffness distribution  $EI(z)$  ( $\text{Pa}\cdot\text{kg}/\text{m}^2$ ) along the primary axis of loading is required to calculation of the vertical deflection of a wing.  $E$  ( $\text{Pa}$ ) is a simple scaling factor for a uniform wing made of solid material. The moment of inertia of the airfoil cross-sections about the bending axis- $x$  (called the bending inertia), is related  $Y_u(x)$  and  $Y_l(x)$  as shown in Figure 2. Both the area  $A$  ( $\text{m}^2$ ) and total bending inertia  $I$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) are the integrated contributions of all the infinitesimal rectangular sections, each  $dx$  (wide) and  $Y_u - Y_l$  (height). The inertia of each such section was appropriately taken about the neutral surface position  $\bar{y}$  defined for the entire cross section (MIT Open Courseware).



**Figure 2.** Quantities for determining and estimating the bending inertia of an airfoil section) (MIT OpenCourseWare).

The corresponding equations are provided below (Eq.4-Eq.10).

$$A = \int_0^c (Y_u - Y_l) dx \quad (4)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \int_0^c \frac{1}{2} (Y_u^2 - Y_l^2) dx \quad (5)$$

$$I = \int_0^c \frac{1}{3} [(Y_u - \bar{y})^3 - (Y_l - \bar{y})^3] dx \quad (6)$$

$$t = \max\{Y_u(x) - Y_l(x)\} \quad (7)$$

$$h = \max\{[Y_u(x) + Y_l(x)]/2\} \quad (8)$$

$$K_A \leftarrow \frac{1}{c^2 \tau} A \int_0^c [Y_u(x) - Y_l(x)] dx \quad (9)$$

$$K_I \leftarrow \frac{1}{c^4 \tau (\tau^2 + \varepsilon^2)} \int_0^c \frac{1}{3} [(Y_u - \bar{y})^3 - (Y_l - \bar{y})^3] dx \quad (10)$$

But there are approximate values for  $K_I$  and  $K_A$  for most common airfoils as  $K_I=0.036$  and  $K_A=0.6$ .  $A$  ( $\text{m}^2$ ) and  $I$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) can be calculated as given in Eq.11 and Eq.12, respectively.

$$A \cong K_A c t \quad (11)$$

$$I \cong K_I c t (t^2 + h^2) \quad (12)$$

### Theoretical Analyses of NACA4415 Profiled Wing

The calculations of area and moment of inertia for NACA 4415 profiled wing were performed by getting the data from Airfoil Tools. The chord length and wing length was selected as 1 m and 5 m, respectively while the material was considered as Aluminium Alloy 6061.

For the calculation of Eq.7 and Eq.8 from airfoil data of NACA 4415, the .dat file was imported in to Microsoft Excel and it was organized and presented in Table 2.

**Table 2.** Organized columns from the data of airfoil profile

$x$	$Y_u(x)$	$Y_l(x)$	$Y_u(x) - Y_l(x)$	$[Y_u(x) + Y_l(x)]/2$
1	0	0	0	0
0,99893	0,00039	-0,00011	0.0005	0.00014
0,99572	0,00156	-0,00042	0.00198	0.00057
0,99039	0,00349	-0,00092	0.00441	0.001285
0,98296	0,0061	-0,00156	0.00766	0.00227
0,97347	0,00932	-0,00227	0.01159	0.003525
0,96194	0,01303	-0,00297	0.016	0.00503
0,94844	0,01716	-0,00364	0.0208	0.00676
0,93301	0,02166	-0,00431	0.02597	0.008675
0,91573	0,02652	-0,00502	0.03154	0.01075
0,89668	0,03171	-0,00583	0.03754	0.01294
0,87592	0,03717	-0,00674	0.04391	0.015215
0,85355	0,04283	-0,00775	0.05058	0.01754
0,82967	0,04863	-0,00886	0.05749	0.019885
0,80438	0,05453	-0,01006	0.06459	0.022235
0,77779	0,06048	-0,01136	0.07184	0.02456
0,75	0,06642	-0,01277	0.07919	0.026825

After MAX command was applied to the columns named  $Y_u(x) - Y_l(x)$  and  $[Y_u(x) + Y_l(x)]/2$  rows,  $t$  (m) and  $h$  (m) values were determined as;

$$t = \tau = 0,14994 \text{ m and } h = \varepsilon = 0,040095 \text{ m}$$

Substituting the obtained results in Eq.11;

$$A \cong K_{Ac}t = K_{Ac}^2\tau = 0,6 \times 12 \times 0,14994 = 0,089964 \text{ [m}^2\text{]}$$

Moment of inertia was obtained from Eq.12;

$$I \cong K_{Ict}(t^2 + h^2) = K_{Ic}^4\tau(\tau^2 + \varepsilon^2) = 0,036 \times 1^4 \times 0,14994 \times (0,14994^2 + 0,040095^2) = 0,00013003187461173 \text{ [m}^4\text{]}$$

According to material selection of wing (Aluminum Alloy 6061), following parameters were used;(MatWeb ASM Aerospace Specification Metals)

$$E = 69 \times 10^9 \text{ [Pa]}$$

$$I = 0,00013003187 \text{ [m}^4\text{]}$$

$$m = \rho \times A = 2700 \times 0,089964 = 242,9028 \text{ [kg/m]}$$

$$L = 5 \text{ [m]}$$

$$\text{So, the natural frequencies were obtained as; } \omega_n f = (B_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} = (B_n L)^2 \sqrt{\frac{69 \times 10^9 \times 0,00013003187}{242,9028 \times 5^4}} =$$

$$(B_n L)^2 \times 7,6876$$

As a result, the natural frequency of each mode which is obtained by using

$$\omega_n f = (B_n L)^2 \times 7,6876 \text{ was presented in Table 3.}$$

**Table 3.** Natural frequency results

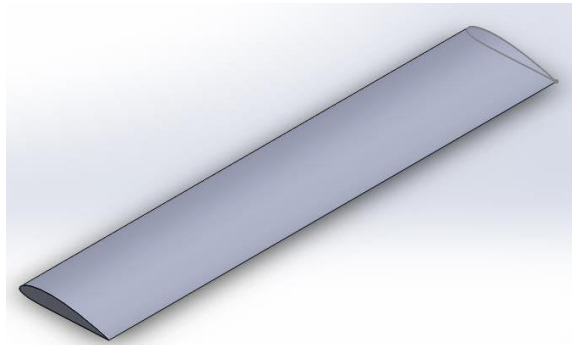
	$B_n L$	$\omega_n f$ [rad/sec]	$f_n f$ [Hz]
1	1.8751	27,0296	4,301895
2	4.69409	169,3923	26,95962
3	7.8539	474,2	75,47127
4	10.99557	929,4505	147,9266
5	14.1372	1536,447	244,5331
6	17.279	2295,239	365,2987

## MODAL ANALYSES

In order to predict the dynamic behavior of the structure properly via forming FEM, the model should be validated by tests. In the validation process, obtained test data were used for comparing with the predicted data obtained by FEM. If the model is incapable to predict the dynamic properties of the structure accurately, it has to be included some useful information about the dynamic properties of the structure (Bagul et al., 2014). In the study of Bagul et al., the confirmation has been performed by using ANSYS Workbench .

The modeled structure was an aircraft wing of airfoil cross section NACA 4415 series with Aluminum Alloy 6061. The chord length of the airfoil is 1 m and wing length is 5 m.

After the wing model was created in SolidWorks (Figure 3), it was treated as cantilevered beam which was fixed at one end and free at the other end.

**Figure 3.** The model of the wing.

The total number of nodes generated in the meshing of the test structure is 16202, and the total number of elements is found to be 2890. The mesh structure was presented in Figure 4.

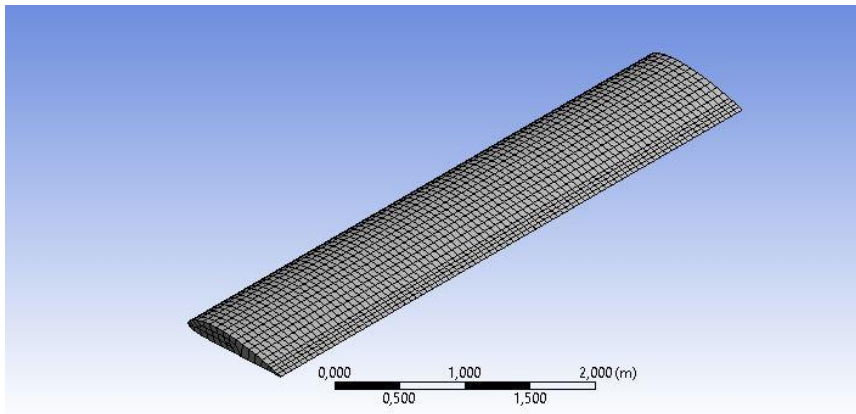
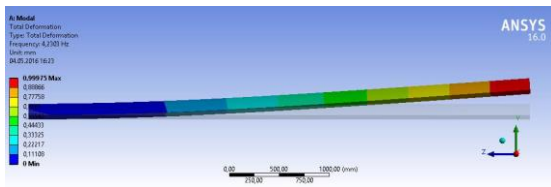
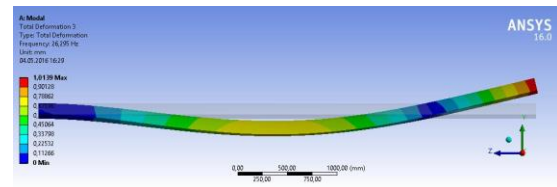


Figure 4. The obtained modes of the wing

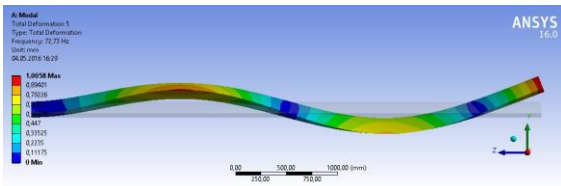
The modal analyses were performed by using ANSYS and the obtained modes of the wing were presented in Figure 5. The related frequencies were also given in Table 4.(Torsional modes and frequencies were ignored).



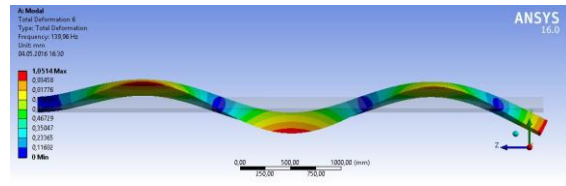
a) 1<sup>st</sup> mode



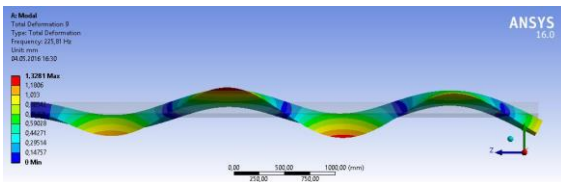
b) 2<sup>nd</sup> mode



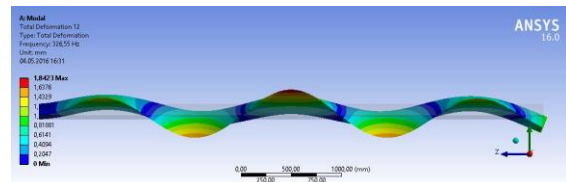
c) 3<sup>rd</sup> mode



d) 4<sup>th</sup> mode



e) 5<sup>th</sup> mode



f) 6<sup>th</sup> mode



**Figure 5.** The obtained modes & mode shapes of the wing**Table 4.** Natural frequency results of numerical modal analysis.

Natural Frequency	
Modes	Frequency (Hz)
1	4,2446
2	26,374
3	72,916
4	140,23
5	226,03
6	326,32

## COMPARISON OF RESULTS AND DISCUSSION

In this section, results of numerical modal analyses and analytical method are compared. The obtained natural frequencies of both analysis (modal and theoretical) are presented in Table 5 and plotted in Figure 6. As it can be seen there are a good agreement between two methods at the first mode. As the mode number increases the error ratio between numerical and theoretical methods increases. These errors may have been caused by the empirical formulas (Eq.11 and Eq.12) and the meshing quality that affects greatly a FEA results.

**Table 5.** Comparison of results by considering error ratio.

Modes	Natural frequencies (Hz)		Error ratio (%)
	Theoretical results	Numerical results	
1 <sup>st</sup>	4,301895	4,2446	1,349833
2 <sup>nd</sup>	26,95962	26,374	2,220444
3 <sup>rd</sup>	75,47127	72,916	3,504402
4 <sup>th</sup>	147,9266	140,23	5,488555
5 <sup>th</sup>	244,5331	226,03	8,186126
6 <sup>th</sup>	365,2987	326,32	11,94493

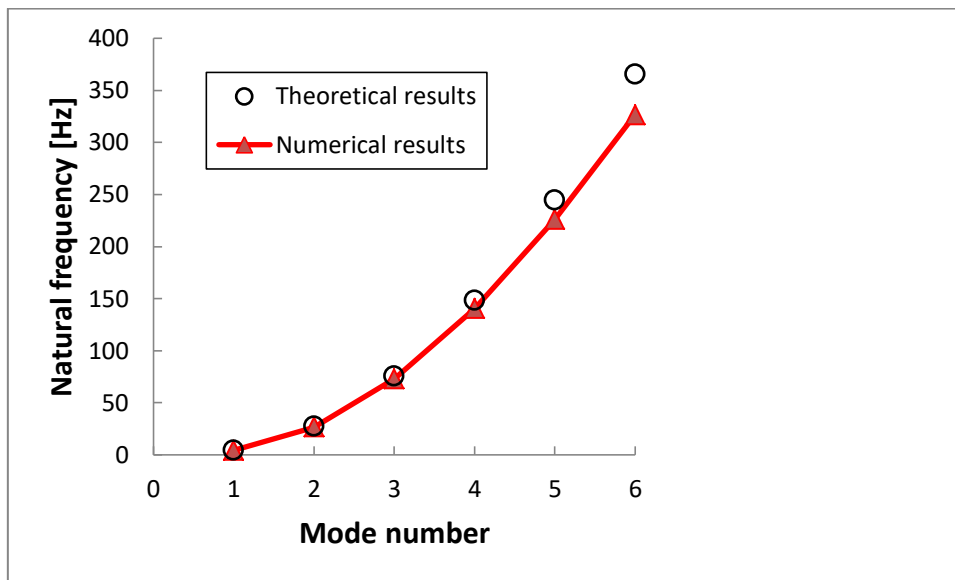


Figure 6. Comparative curves of cantilever beam frequency.

## CONCLUSION

In this study, the wings of aircraft was considered as a cantilever beam in order to perform modal analysis. The results of numerical modal analysis and theoretical approach method of cantilever beam were compared. It was seen that natural frequency obtained from numerical and theoretical approaches are in good agreement. The validation of modal analysis of cantilever beam proved that the procedure opted for numerical modal analysis of aircraft wing and its result are correct.

## SYMBOLS

$\omega_n$ : Natural Frequency [rad/sec]

$f_n$ : Natural Frequency [Hz]

$\beta_n$ : Natural Angle [rad]

L: Length [m]

E: Young Modulus [Pa]

I: Moment of Inertia [ $\text{kg/m}^2$ ]

m: Mass per length [kg/m]

A: Area [ $\text{m}^2$ ]

$Y_u(x)$ : Maximum Y(x) value of The Wing [m]

$Y_l(x)$ : Minimum Y(x) value of The Wing [m]

$\bar{y}$ : Average value of  $Y_u$  and  $Y_l$  [m]

$K_A$ : Proportionality coefficient of Area

$K_I$ : Proportionality coefficient of Moment of Inertia

t: Maximum Thickness of The Wing [m]

h: Maximum Camber of The Wing [m]

c: Chord Length of The Wing [m]

## REFERENCES

Airfoil Tools, <http://www.airfoildata.com>, visit date: August 23, 2017

Amarendra K., Rapuri, A.K., 2016, Dynamic Analysis of A Wind Turbine Blade, *Advanced Research Journals of Science and Technology (ARJST)*, 134-139

- Bagul A. D., Barijibhe R. B. and Patil A. V., 2014, Vibrational Analysis of Gearbox Casing Component using FEA Tool ANSYS and FFT Analyser, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 3 Issue 2.
- Carrera E., Marco Petrolo M., Varello, A., 2012, Advanced Beam Formulations for Free-Vibration Analysis of Conventional and Joined Wings, *J. Aerosp. Eng.*, 25(2), 282-293, 2012.
- Erdener. Ö. and Yaman. Y., 2003, Bir Uçak Kanadının Yapısal Modelinin Geliştirilmesi, *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu (UMTS)*.
- Ewins, D.J., 2000, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. England: Wiley, Second Edition
- Gupta, R.S. and Rao, S.S., 1978, Finite Element Eigenvalue Analysis of Tapered and Twisted Timoshenko Beams. *Journal of Sound and Vibration* 56(2), pp 187- 200.
- Jaworski, J.W. and Dowell, E.H., (2008), Free vibration of a cantilevered beam with multiple steps: Comparison of several theoretical methods with experiment, *Journal of Sound and Vibration* Vol. 312, Issues 4–5, pp 713-725
- Kacar, A., Tan, H.T. and Kaya, M.O., 2011. Free Vibration Analysis Of Beams On Variable Winkler Elastic Foundation By Using The Differential Transform Method, *Mathematical and Computational Applications*, Vol. 16, No. 3, pp. 773-783.
- Khadse, N.A. and Zaveri, S.R., 2015, Modal Analysis of Aircraft Wing using Ansys Workbench Software Package, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN: 2278-0181, IJERTV4IS070291, Vol. 4, Issue 7.
- Lengvarský, P., Bocko, J., Hagara, M., 2013, Modal Analysis of Titan Cantilever Beam Using ANSYS and SolidWorks, *American Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 7, 271-275.
- MIT OpenCourseWare, <http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/systems-labs-06/spl10b.pdf>, visit date: August 23, 2017
- MatWeb ASM Aerospace Specification Metals  
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>, visit date: November 6, 2017
- Nirmall, T. and Vimala, S., (2016). Free Vibration Analysis of Cantilever Beam of Different Materials, *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 9, pp 6521-6524.
- Ozturk, B. and Coskun, S.B., 2013, Analytical Solution for Free Vibration Analysis of Beam on Elastic Foundation with Different Support Conditions, *Mathematical Problems in Engineering* Volume <http://dx.doi.org/10.1155/2013/470927>.
- Rajappan, R. and Pugazhenti, V. , 2013, Finite Element Analysis of Aircraft Wing Using Composite Structure, *The International Journal of Engineering And Science (IJES)*, Volume2, Issue 2, Pages 74-80 ISSN: 2319 – 1813 ISBN: 2319 – 1805.
- Rao, S.S. , 2011, *Mechanical Vibrations*, 5th Edition, Pearson.
- Thambiratnam, D. and Zhuge, Y., 1996. Free Vibration Analysis of Beams on Elastic Foundation, *Computers & Structures* Vol. 60. No 6. pp 971-980.



## PURIFICATION PHASES OF ZINC SULPHATE SOLUTION OBTAINED FROM NEUTRAL LEACHING PROCESS OF ZINC CALCINE

<sup>1</sup>Nurten Deva, <sup>2</sup>Musa Rizaj

<sup>1,2</sup>University of Mitrovica, Department of Metallurgy and Materials, KOSOVA

<sup>1</sup>nurtendeva@hotmail.com, <sup>2</sup>mrizaj@hotmail.com

(Geliş/Received: 07.03.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.08.2018)

**ABSTRACT:** The aim of this paper is based in analyze of the zinc sulphate solution obtained from neutral leaching process of zinc calcine in "Trepca" and its purification from impurities. This solution besides zinc contains also and other impurities such as (Cu, Cd, Co, Ni, As, Ge, Sb, Se, Te, Ag etc.), which are with different concentrations. The sulphate solution can released from metal impurities based on the fact that they have higher electro - chemical potential than zinc and, as such, during the refining process they separate and precipitate in metallic form. Treatment of solution with appropriate technological methods technologically is very important in continuation of the electrolysis process and is accompanied by economic effects, because of non-ferrous and rare metals benefit. In this paper are described the phases of the purification process including acidic purification, cooling, needed materials and equipments for the refining process. Also, special attention is dedicated to the factors that have influence in the process development such as concentration, temperature, time, compressed air, etc.

**Key Words:** Zinc, Sulphate solution, Purification process, Impurities,

### INTRODUCTION

The zinc industry is one of the most important nonferrous industries in world, based in the demand for zinc which is in increase stage, therefore this effects in rapid development of its industry, and his influence in economy in general is very obvious. Zinc sulfide ores are the main source of zinc metal in the world, however, some zinc is produced from oxide-carbonate ores and different secondary resources such as zinc ash, zinc dross, flue dusts of electric arc furnace, leach residues, etc. Most of the zinc smelting production processes, which includes roasting, leaching, purification and electrolysis, are hydrometallurgical. For the zinc electrolysis process, the purity of the used zinc sulphate solution is an imperative. In the roast-leach process, very pure zinc sulphate solution must be prepared for zinc electrowinning, because the zinc ion is less noble than the hydrogen ion. The purity of electrolyte guarantees both obtaining high-grade cathode zinc deposit and reducing the amount of energy consumed for its procurement which considerably decreases the cost of zinc. The purity of the zinc sulphate solution, which is fed for electrolysis, is of great importance since the purity and structure of cathode zinc depend on it, as well as the coefficient of current utilization, the power consumption, the voltage of the tanks and other indices, which determine the zinc cost price (Boyanov et al., 2004). In the most common hydrometallurgical zinc process, ZnO-rich calcine is first produced from sulphide or oxide-carbonate concentrates and then leached with hot sulphuric acid solution. After liquid/solid separation, the pregnant solution is purified and electrowon for metallic zinc production (Turan et.al., 2004).

Therefore, the purification process is one of the most important unit processes in zinc hydrometallurgy. In hydrometallurgical zinc production, the purity of incoming solution subject to electrolysis is of great importance.

The aim of this paper is description of the phases of purification process of zinc sulphate solution gained from neutral leaching process in Trepca Company, including acidic purification and cooling along with specific equipment and materials. This paper as well described impurities which are contents

of solution, and their negative effects in next process such is electrolysis process of zinc. Even a small amount of these metallic ions of impurities in the solution may hinder zinc deposition during the electrolysis process. The primary objective of the zinc sulphate solution purification process is to obtain an electrolyte solution that is suitable for zinc electrolysis. Since the zinc powder as material is expensive, its consumption should be minimized during the purification process. In previously published literatures, there have been studies related this issue (Fosnacht et al., 1983; Nyman et al., 1992). Most research has focused on experiments for determining the optimum purification conditions, such as solution temperature, zinc dust particle size, the quantity of zinc dust added, activators concentration and reaction time ( Van Der Pas et al., 1996; Moghaddam et al., 2006).

Previously studies has been interested related this issue and published literatures regarding this topic (Ha M K, et.al., 2001; Li et.al., 2012). The membrane filter press (MFP), which is a common machine on solid-liquid separation, has advantages of low cost, high solid content and outstanding efficiency that has been widely used in various industries. The use of a MFP is found to be completely feasible and effective to leach and recover zinc from leaching residues of zinc calcine (Ru et al., 2015). Thereby, improving the technology of zinc production at the stages of solution purification and electro-winning of zinc is relevant. The negative influence of impurities can be reflected both in the decline of the current efficiency - it leads to an increase of the electricity consumption, and in the decrease of the cathode zinc quality due to the increased content of impurities (Sethurajan et al., 2017).

The metal impurities, which are more precious than zinc, can influence the purity of the cathode sediment through co-sedimentation and some of the impurities (cobalt, nickel and copper) facilitate the reverse dissolution of zinc (Muresan et al., 1996) by forming microgalvanic cells with it (Karoleva V., 1986). The harmful effect of these impurities is increased at higher temperatures and acidity of electrolyte, as well as at the simultaneous presence of Sb and Ge, Co and Cu and other elements in the solution. Table 1 shown in which form are metals present in the original zinc concentrate of Trepca company, respectively their mineralogical composition in Zn concentrate in percentage.

**Table 1.** – The mineralogical composition of Zn concentrate

Minerals	Total %	Zn %	Pb %	Cu %	Cd %	Fe %	CaO %	MgO %	SiO <sub>2</sub> %	S %	Other %
ZnS	72.14	48.44								23.70	
PbS	2.56		2.22							0.34	
CuFeS <sub>2</sub>	1.44			0.50		0.44				0.50	
CdS	0.29				0.23					0.60	
FeS <sub>2</sub>	0.67					0.31				0.36	
FeS	15.99					10.17				5.82	
CaO	0.46						0.46				
MgO	0.26							0.26			
SiO <sub>2</sub>	2.12								2.12		
Other	4.07										4.07
Total	100.00	48.44	2.22	0.50	0.23	10.92	0.46	0.26	2.12	30.78	4.07

## BASICS OF PURIFICATION PROCESS OF ZINC SULPHATE SOLUTION

The purification of zinc sulphate solution from the impurities (metals) is done by separation and cementation and their recovery in metallic forms is overviewed based on the fact that these metals have higher electro-chemical potentials than zinc. The operation factors that have the most profound effect on the process such as impurity concentration, temperature, time, etc. are analyzed, too. The presence of impurities in a zinc electrolyte solution is problematic for the electro-winning process. Impurities act as

catalysts for hydrogen evolution, which leads to a large drop in current efficiency. Therefore, adequate purification of the zinc electrolyte before electrowinning is essential (Dreher et.al., 2001).

Purification of zinc sulphate solution process shown that this process play important role related the technological, economical and environmental advantages in industry. This process is dependant of numerous process parameters that need to be controlled carefully for future process such is electrolysis of zinc. A proper technique control can make more efficient this process in the industrial practice in all its steps by properly controlling of all process parameters including the quality of solution, adding of reagents, the speed, duration and temperature of the process (Friedrich et.al., 2002).

Depending on the concentration and properties of impurities in the zinc sulphate various chemical and electrochemical refining methods can be used for their recuperation. One of the most known methods is the precipitation or cementation process in which metals of different electrochemical potential are separated by cementation (Kazanbaev et al., 2006). Cementation is the simplest and oldest hydrometallurgical process. It has been used in extractive metallurgy to recover valuable metals as well as to remove unwanted impurities ( Pietrzyk, et al., 2017; Fugleberg, 2014).

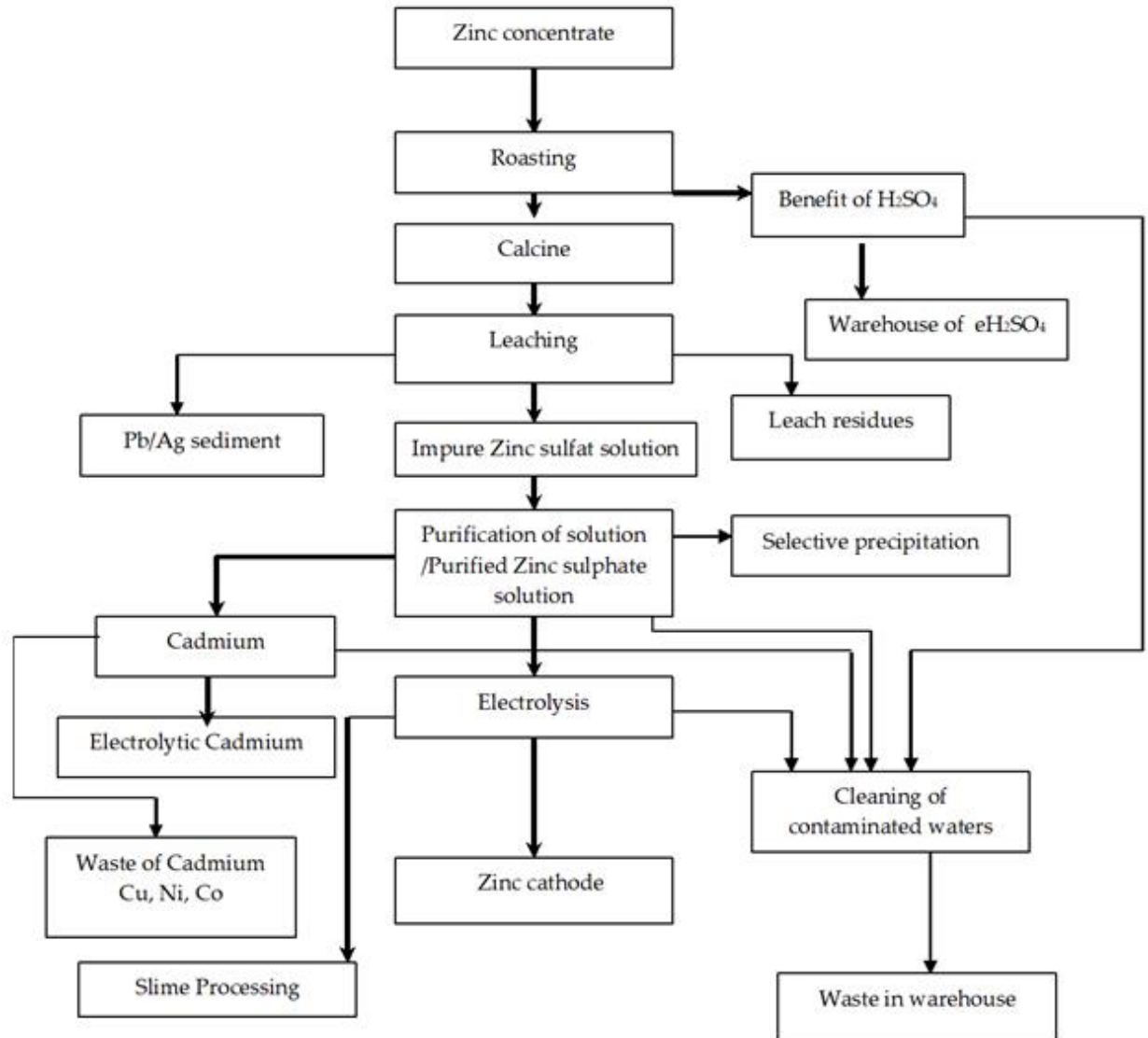
Impurities in the zinc sulphate solutions, depending on their concentration and some common properties during the separation process, can be classified into the following groups:

- I. Fe, Al, As, Sb, Ge, In, Ga, Si
- II. Cu, Cd, Co, Ni, Ta
- III. Cl, Fl,
- IV. K, Na, Mg, Mn

The zinc sulphate solution is considered to have a high refined degree if it is a very clear solution and has the following characteristics (Purification process, 1982):

solid substances <0.5 g/l,  
Fe<sup>2+</sup> <5 mg/l,  
total Fe <15 mg/l,  
Sb + As <1 mg/l and  
pH = 5–5.5 (Purification process, 1982)

Various methods such as hydrolyse, cementation, catalyst addition etc. can be used to selectively recover the impurities in these groups. These methods have been subject of several research articles and patens (Nelson et al., 2000), but their application in the industrial practice has still difficulties especially in the selection of optimum factors that influence these processes. Trepca company, as per design capacity, can produce about 90,000 t/year zinc sulphate solutions obtained as a by-product of neutral leaching of zinc calcine (Purification Process, 1982). The overall technological flowsheet of zinc production in the Trepca smelter is described in Figure 1.



**Figure 1.** Technological flowsheet for zinc production in the Trepca Smelter

Pyrometallurgical and hydrometallurgical routes or their combination can be employed for treating secondary materials. The hydrometallurgical processes are regarded as more eco-friendly for treating such materials having a low zinc content (Ha M K, et al., 2001).

In the hydrometallurgical process, ores containing zinc are pretreated in hot conditions and then dissolved using sulfuric acids into a zinc sulphate solution. This solution is then purified from various impurity metals such as cobalt, nickel, cadmium, antimony etc., by cementation (Lew, 1994). These metal ions must be removed as they would disturb the following electrolysis of zinc. Cobalt and related metals such as nickel cause damage to the cathode used in the electrolysis process as well as contributing to re-dissolution of zinc (Boyanov et al., 2004).

In the hydrometallurgical zinc production process, metallic zinc is produced by reducing it from aqueous solution. The essential part of the process is the purification of zinc sulphate solution, where all elements nobler than zinc are removed by deposition from the solution. Controller performance is highly dependent on the reliability of information which is received from measuring devices and from reference measurements. Measured process data is inherently inaccurate and these measurement errors can be caused by random noise, deteriorating, malfunctioning or wrongly calibrated instruments. The correlation analysis used here applies conversely in process control. The results have been exploited in

the process control of solution purification. In the case of the cobalt removal process, it was necessary to get the continuous solution purification process working reliably and with a high enough deposition efficiency ( Nási , 2007). As zinc consumption is gradually increasing all the time in the world, many zinc plants are looking for possible expansions. Their preliminary profitability calculations can show that a possible total expansion is not economical, when they are looking to expand the whole roasting/acid plant – leaching – solution purification – electrowinning – casting route, as the possible market price for the sulphuric acid is low or the sulphuric acid market is too far away. Based on these facts, their economical study often indicates that implementing a zinc concentrate direct leaching option could be more favourable ( Svens, 2012).

Due to the relatively low concentration limits, the preparatory purification is of great importance (Han et al., 2016). Cementation is widely used in hydrometallurgical zinc refining to purify zinc sulphate solutions from impurities. The purification is achieved through electrochemical reactions causing the impurity metals to precipitate on the surface of zinc dust. These reactions are commonly known as cementation reactions. A cementation reaction can be described as electrochemical precipitation where the most noble metal ions in a solution are reduced to solid metal through deposition on the surface of a less noble metal which is oxidized (Sethurajan et al., 2017). In the case of zinc purification, the impurity metals are the nobler metals that are to be reduced while zinc, often in the form of zinc dust, is the less noble metal providing the electrons (Lew, 1994; Free, 2013).

There are many companies over the world that employed more less similar methods or some other variations within the purification process of zinc sulphate solution obtained from neutral leaching process of zinc calcine.

## PURIFICATION PHASES OF SULPHATE SOLUTION OBTAINED FROM THE LEACHING PROCESS OF ZINC CALCINE

Based on the analysis presented in the technical documentation of smelter we have these average concentrations of impurities in sulphate solution obtained during the leaching process are given in Table 2.

**Table 2.** Concentrations of impurities in sulphate solution

Elements	Concentration (mg/l)
Cu	0.2-1.2
Cd	0.2-1.2
Co	1.0-10
Ni	20-50
As	0.1-0.5
Ge	0.1-0.5
Sb	0.1-0.5
Se	0.1-0.5
Te	0.1-0.5
Ag	0.1-0.5

The purpose of the purification of the sulphate solution obtained from leaching process of zinc calcine, which is the subject of this study, is the process with aim to release the sulphate solutions from impurities and produce a highly refined solution in order that the subsequent process of electrolysis, achieves the best possible quality of zinc and make an efficient use of electricity. The zinc sulphate solution is considered to have a high refined degree if it is a very clear solution and has the following characteristics: solid substances <0.5 g/l, Fe<sup>2+</sup> <5 mg/l, total Fe <15 mg/l, Sb + As <1 mg/l and pH = 5–5.5.



Refining of the zinc sulphate in Trepca smelter is carried out in two phases: cold and hot. The refined solution is subsequently mixed with acid, cooled and sent for electrolysis. The residues of the process are treated to increase the recovery coefficient of cadmium and zinc .

### Cold Refining

The cold refining is the first phase of the purification process, that enable selective multi-tank sedimentation of impurities such as Cu, Cd, Tl and part of Ni (approximately 12 mg/l). This is carried out through the added zinc powder. The amount of zinc powder needed for the process , is calculated according to the following equation:

$$Zn(g/l) = 0.5(g/l) + 1.2Cu(g/l) + 1.5Cd(g/l) \quad (1)$$

The zinc powder is used not only in the first tank but also and in the second tank, in order to precipitate any Cd amount which may have accidentally penetrated. Generally, in the cold refining stage the precipitation of Cu and 95% of Cd is achieved as well as part of As, Sb, Tl, Ge and Ni. Duration time of reaction is an important factor in this phase and normally is about 45 mins but longer times especially longer than an hour and a half can cause oxidization of Cd which can pass again in the solution. To increase the speed of filtration the solution needs to be heated in the last tank. Precipitation of the Co and especially of Ni, is done successfully by adding of As and Sb. However if the content of As and Sb in the neutral solution is high- an indication that As and Sb were not removed at the right degree during neutral leaching - Co and Ni can partly precipitate thus increasing the undesirable quantities of Co and Ni in CdSO<sub>4</sub> solution. The filtrate is sent to hot refining stage and the sedimentation is sent for further processing of Cu and Cd (Purification Process, 1982).

### Hot Refining

Elements which have not precipitated in the first phase such as Ni, Co, Sb, Ge as well and other impurities can be removed during this second phase. This is done by adding zinc powder and antimony oxide (Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) and increasing the temperature up to 90 °C. The amount of zinc powder needed for process is calculated according to the following equation:

$$Zn(g/l) = 1(g/l) + 100Cd(g/l) + 50Ni(g/l) \quad (2)$$

Zinc powder particles must be smaller than 75 µm, in order to speed up their solubility and to avoid using excessive amount of zinc powder.

Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is used as addition because along with the added zinc metal powder it creates a catalyst that accelerates the solubility of zinc and the precipitation of Co and Ni. However, the amount of Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> added to the solution should be limited because a larger than necessary amount causes reversed dissolution of Co precipitate. Furthermore the excess of Sb does not fully precipitate and this has an impact on the process of electrolysis.

In this stage Pb is also added into the solution in the form of oxide or sulphate in order to:

- reduce the repetitive tendency of dissolution of Co precipitate,
- reduce the formation of basic zinc sulphate,
- improve the conditions to remove the Tl.

The solution should be kept in the reservoir a few hours, then empties as necessary because if the solution stays for longer periods, impurities such as Co dissolve and Zn gets oxidized which makes the

filtration process difficult. Normally the duration of chemical reaction in this phase is 3 hours and the temperature 90–95 °C. The solution is filtered and the filtrate is checked for quality. The process is considered cleaned if the filtrate contains approximately 0.15 mg/l Co, and 0.01 mg/l Sb. After filtration when the temperature is about 80 °C, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte is added into the cleaned solution until it reaches a concentration of 2–3 g/l free H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. This is done in order to avoid the closing of the pipes. The solution is then cooled to near 30 °C and send to electrolysis. The process continues with re-pulping of Co, Ni, Cu and Cd, in order to increase the yield of Zn. Filtering residues are then sent for processing of Co/Ni (Purification Process, 1982).

The process of refining of sulphate solutions and recovering of valuable materials from it is a complex process whose normal running and its efficiency depends on numerous process parameters. These parameters in the Trepca process include the content of solid substances, Fe<sup>2+</sup>, Fe total and Sb + As concentration of pH of solution, added amount and the size of particles of zinc powder during cold and hot refining, processing time and temperature, the speed of filtration, lead quantity, mixing with the electrolyte.

## CONCLUSION

Purification of zinc sulphate solution process shown that this process play important role related the technological, economical and environmental advantages in industry. This process is dependant of numerous process parameters that need to be controlled carefully for future process such is electrolysis of zinc. A proper technique control can make more efficient this process in the industrial practice in all its steps by properly controlling of all process parameters including the quality of solution, adding of reagents, the speed, duration and temperature of the process. This purification way the of sulphate solution can maximize the economic benefits by efficiently separating of valuable metals that are present in the solution including Cu, Cd, Co, Ni, As, Ge, Sb, Se and Te. Based on the above data, it is evident that the selective recovery of these metals from these solutions represents a significant economic added value ,and from the environmental point of view this eliminates the need of unnecessary and sometimes risky land filling with valuable metals. In this point of view, in order to revive and improve operation practices as per design capacity in the Trepca Company, a new project needs to be undertaken, in order to increase efficiency of the process through proper control and optimization. The drawbacks of the conventional zinc solution purification process are an economical and technical incentive to search for ways to improve the performance of the purification systems.

## REFERENCES

- Boyanov, S.B., Victoria, V.K., Nikolai, K.K., 2004, "Purification of zinc sulfate solutions from cobalt and nickel through activated cementation", *Hydrometallurgy* 73, 163–168.
- Dreher T.M., Nelson A., Demopoulos G.P., Filippou D., 2001, "The Kinetics of Cobalt Removal by Cementation from an Industrial Zinc Electrolyte in the Presence of Cu, Cd, Pb, Sb and Sn Additives" *Hydrometallurgy*, 60, pp. 105-116,
- Friedrich Berndt., Kruger Joachim, Mendez Bernal Graciella ,2002 " Alternative solution purification in the hydrometallurgical zinc production", *Savez Inzenjera metalurgije Jugoslavije*
- Free M, lebrary (e-book collection).2013 *Hydrometallurgy: fundamentals and applications*. Hoboken, N.J: TMS-Wiley;
- Fosnacht, D. R., O'Keefe T. J., 1983, "The effects of certain impurities and their interactions on zinc electrowinning", *Metallurgy Transactions*, 14, 645-655
- Fugleberg S., 2014, "Improving the competitiveness of the electrolytic zinc process by chemical reaction engineering approach" *Laboratory of Industrial Chemistry and Reaction Engineering*,
- Ha M K, et.al., Kumar V, Singh R J,2001 " Review of hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes ", *Resources Conservation and Recycling*, 2001, 33(1): 1-22

- Han J., Liu W., Qin W., Zheng Y., and Luo H., 2016, "Optimization Study on the Leaching of High Iron-Bearing Zinc Calcine After Reduction Roasting," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 47, no. 1, pp. 686–693,
- Karoleva V., "Metallurgy of non-ferrous metals", V.2, *Technika, Sofia*, 1986 (in Bulgarian)
- Kazanbaev L.A., Kozlov P.A., Kubasov V.L., Kolesnikov A.V., 2006 "Zinc Hydrometallurgy", *Ore and Metals*, p. 176
- Lew R. W., 1994. "The removal of cobalt from zinc sulphate electrolytes using copper-antimony process" Vol. British Columbia, Vancouver, Canada,
- Li Mi, Peng Bing, Chai Li-yuan, Peng Ning, Yan Huan, Hou Dong-ke, 2012 " Recovery of iron from zinc leaching residue by selective reduction roasting with carbon ", *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 237–238: 323–330
- Moghaddam J., Sarraf-Mamoory R., Abdollahy M., Yamini Y., 2006 "Purification of zinc ammoniacal leaching solution by cementation: Determination of optimum process conditions with experimental design by Taguchi's method" , *Separation and Purification Technology*, 51, 157-164
- Muresan L., Maurin G., Oniciu L. and Gaga D., *Hydrometallurgy*, 43 (1996) 345.
- Näsi J., 2007 " Intensified use of process measurements in hydrometallurgical zinc production processes" Faculty of Technology of the University of Oulu
- Nelson A., Demopoulos G.P. and Houlachi G., 2000 "The effect of solution constituents and novel activators on cobalt cementation", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol 39, No 2, pp. 175-186. Process Chemistry Centre .Department of Chemical Engineering, Åbo Akademi University Turku/Åbo Finland
- Nyman B., Aaltonen A., Hultholm S. E., K. Karpale, 1992 " Application of new hydrometallurgical developments in the Outokumpu HIKO process", *Hydrometallurgy*, 29(1992), 461-478
- Pietrzyk S., Palimaka P., Stępień M., Krawczykowska A., Tora B., Fatyga M., Pajor G., and Mańka A., 2017 "Silver recovery from zinc metallurgical sludge – analysis of solutions" *E3S Web of Conferences 18* , 01027 MEC2017
- Purification Process, Vieille Montagne, 1982 Operating Guide, Book III, Trepcia mine, zinc plant, 1982, Mitrovica, Kosovo
- Ru, Zhen-guang, Pan Cen-xuan, Liu Gui-hua, Wang Xue-ting, Dou Guang-yu, Zhu Ke-song, 2015 "Leaching and recovery of zinc from " Leaching residue of zinc calcine based on membrane filter press" *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 25, 622–627
- Sethurajan M., Huguenot D., R. Jain et al., 2017 "Leaching and selective zinc recovery from acidic leachates of zinc metallurgical leach residues", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 324, pp. 71–82,
- Svens K., 2012 "Direct leaching alternatives for zinc concentrates", T.T. Chen Honorary Symposium on Hydrometallurgy, *Electrometallurgy and Materials Characterization*, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)
- Turan M. Deniz, Altundogan H. Soner, Tumen Fikret, 2004 "Recovery of zinc and lead from zinc plant residue", *Hydrometallurgy* 75 (2004) 169–176,
- Van Der Pas V., Dreisinger D. B., 1996 "A fundamental study of cobalt cementation by zinc dust in the presence of copper and antimony additives", *Hydrometallurgy*, 43, 187-205



## ŞEHİRLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERFORMANSLARININ BİR BULANIK ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEKNİĞİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

<sup>1</sup>Ahmet ŞEPİT, <sup>2</sup>Turan PAKSOY

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü*  
<sup>1</sup>sepit.ahmet@gmail.com1, <sup>2</sup>tpaksoy@yahoo.com

(Geliş/Received: 20.06.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.08.2018)

**ÖZ:** Ekonomik, sosyal ve çevresel aktiviteleri ile insanların genel olarak birlikte yaşadıkları alanlar olan şehirlerin doğaya çok sayıda zararı bulunmaktadır. Bu zararların önlenmesi için şehirlerin daha sürdürülebilir hale getirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin 9 şehrinin sürdürülebilirlik performanslarının çok kriterli karar verme yöntemlerinden birinin kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çevre, enerji ve sosyoekonomi alanlarından seçilen 11 kriter, uzman görüşlerine bağlı olarak ağırlıklandırılmıştır. Bu ağırlık değerleri illerin kriterlere göre verileri ile çok kriterli karar verme yöntemlerine göre aralık değerlendirme yapılarak belirsizliklerin daha kolay ortadan kaldırılabilirdiği BAHF (Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi) yönteminde kullanılmış ve sonucun bulunması sağlanmıştır. Uzman görüşlerine bağlı olarak kriterler arasından en belirleyici öneme sahip olan kriter "mutsuzluk" olarak hesaplanmıştır. Değerlendirilen iller arasından en iyi sürdürülebilirlik performansına sahip olan il Afyonkarahisar olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** BAHF, Çok Kriterli Karar Verme(ÇKKV), Sürdürülebilirlik Performansı, Sosyoekonomi

### Evaluation of Sustainability Performance of Cities with A Fuzzy Multi Criteria Decision Making Method

**ABSTRACT:** Cities, where humans generally live together with economic, social and environmental activities, have lots of damages to nature. To be able to prevent these damages it is needed to make cities more sustainable. In this research, it is aimed to evaluating sustainability performances of 9 cities of Turkey using with one of the multi-criteria decision making techniques. 11 criterias which are chosen from environment, energy and socio-economy branches are weighted based on expert judgements. These weight values with values of cities among the criterias have been used in the FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) method which be able to getting rid of uncertainties easier than multi criteria decision making methods and it is provided that the result found out. Between the criterias based on expert judgements Unhappines have been calculated as the most determinative criteria. Between the cities had been evaluated Afyonkarahisar have been calculated as the city having the best score of sustainability performance.

**Key Words:** FAHP, Multi-Criteria Decision Making(MCDM), Sustainability Performance, Socio-economy

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şehirler, bilindiği üzere ekonomik ve sosyal faydalarını doğal kaynakları tüketerek ve atık oluşturarak devam ettirdiği için doğal olarak sürdürülebilir değildir (Mori ve Christodoulou, 2012;

Shen ve diğ. 2012; Zhang ve diğ. 2016). Güneş enerji panelleri, hidroelektrik, rüzgâr enerjisi kullanımı gibi dönüştürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşsa da şehirler, giderek artan nüfusları ile sera gazı salınımı ve atık üretiminde başı çekmektedirler.

Literatürde doğanın yapısının bozulmasının özellikle de atmosferdeki sera gazı artışının temel sebebinin insan faaliyetleri olduğuna yönelik birçok bilimsel kanıt bulunmaktadır. Bu küresel problemle baş edebilmek için tüm seviyedeki hükümet birimlerinin ve vatandaşların yerel, ulusal ve uluslararası boyutlarda iklim değişikliği politikaları için karar verme mekanizmalarında yer alması ve düşük karbonlu toplumlara acil dönüşümlerinin gerekliliği, 1992 Rio Dünya Zirvesi'nden günümüze sürdürülebilir gelişme ilkelerine bağlı olarak bilim adamları ve uygulayıcılar arasında kabul edilmektedir.

Yeşil şehirler, temiz hava ve suya sahip, büyük enfeksiyon hastalıkları salgınlarında düşük risk taşıyan, doğal afetlere dirençli, yeşil aktiviteleri destekleyen ve nispeten düşük ekolojik etkiye sahip olarak vasıflandırılmış şehirler olarak tanımlanmaktadır (Kahn, 2006; Wałtróbski ve diğ., 2016).

Doğal yapının değişmesi ve kalkınma amaçlı ancak çevreye zararlı sosyo-ekonomik faaliyetlerin artması da kentsel yapıların uygunsuz ya da yetersiz ve dirençsiz hale gelmesine sebep olmaktadır. Doğal afetlere karşı hazırlıksız, kirliliğin artışına çözüm bulamamış, atık yönetimini başaramayan şehircilik sistemleri oluşmaktadır. Bu durum altyapı sistemleri yetersizliği, salgın hastalıkların artışı, su kaynaklarının azalması gibi sonuçlar doğurmaktadır (IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Yukarıda ifade edilenlerin bazıları gelişen teknolojik araçlar ve metotlarla öngörülebilirken bazıları ise öngörülememektedir.

İnsanoğlu için büyük metropol düzenleri ve kirliliğin yoğun olduğu şehircilikten çok doğal yapıları olan, çevreci ve sürdürülebilir şehirler yaşam alanı olmalıdır. Buna binaen teknoloji ile doğal çevrenin iç içe olabileceği, doğal alanlarının ve altyapı sistemlerinin sürdürülebilirliğini sağlamış şehirler tercih edilebilirlik açısından ön plana çıkacaktır.

Avrupa Yeşil Şehirler Endeksi, BM-Habitat Dünya Şehirlerinin Uyumu Raporu, Sürdürülebilir ve Uyumlu Şehirler anlayışları ve belgeleri dünya üzerindeki şehirlerin sürdürülebilirlik, yeşil alan oranı, çevre kirliliği gibi birçok konuda değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda şehirlerin bu konuda markalaşması sağlanmakta, diğer bütün şehirlerin de yarış halinde olarak daha sürdürülebilir ve yaşanabilir hale gelmesine yardımcı olmaktadır.

Günümüzde endüstri ve servis aktivitelerinin dünyanın taşıma kapasitesi üzerindeki oldukça yıkıcı etkileri sebebiyle sürdürülebilir gelişim göstergeleri çok daha kritik hale gelmektedir (Eğilmez ve Park, 2014; Eğilmez ve Tatari, 2011). Dolayısıyla yapılması gereken şey doğanın yoğun endüstri ve servis aktiviteleri sonucu yıpranmasını önlemek için proaktif çözüm yolları bulmaya çalışmaktır.

Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılan Bulanık Mantık, kesin sınırları olmayan problemleri tanımlamak ve çözmek için geliştirilmiş bir yöntemdir (Paksoy ve diğ. 2013). McNeill ve Thro'nun (1994) çalışmalarında sunduğu basitlik, kolaylık, güçlülük, insan düşünme yapısına benzeyen dilsel değişkenler kullanması gibi pozitif yanları bulunmaktadır. ÇKKV metotları çok kriter ve tekrarlayan karar verme prosesleri içeren karar verme problemlerini tanımlamak ve çözmekle ilgilidir (Küçükvar, Küçük, Eğilmez ve Tatari, 2014; Eğilmez, Gümüş ve Küçükvar, 2015).

Şehir sürdürülebilirlik değerlendirmesine dahil edilen kriter, karmaşık ve çeşitli ilişkilere sahiptir. Örneğin hızlı gelişmiş bir gayri safi yurtiçi hasıla değerine sahip şehir çevresel yıpranma bedeliyle birlikte anılabilir (Mori ve Christodoulou, 2012; Zhang ve diğ. 2016). Sürdürülebilirlik kriteri sayısının genellikle çok olması ve kriterlerin muhakkak ortak bir ölçüde ifade edilmemiş olması sebebiyle şehir sürdürülebilirlik değerlendirmesi çok kriterli karar verme (ÇKKV) olarak formüle edilebilir (United Nations, 2007; Zhang ve diğ. 2016). ÇKKV yöntemlerinde uzman görüşlerine başvurulması ve bu görüşlerin doğrudan kullanımı söz konusudur. Uzmanların karar verirken net değerlendirme yapmaları karmaşık kriterlerin kıyaslandığı durumlarda sağlıklı sonuçlar doğurmayabilir. Bu sebeple bir aralık değerlendirmesi yapılabilen, uzman değerlendirmelerinin değer aralığı içerisinde sunulabildiği bir Bulanık ÇKKV yöntemi bu çalışmada kullanılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde kaynak araştırması başlığı adı altında sürdürülebilirlik göstergeleri ve kriterleri tanıtılmış, karşılaştırmalı bir literatür araştırması yapılmıştır. Üçüncü bölümde Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden, sanayi ve hizmet sistemleri gelişmiş 9 il seçilerek sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmiştir. Dördüncü ve beşinci bölümlerde ise çalışma sonuçları ve önerileri sunulmuştur.

#### KAYNAK ARAŞTIRMASI (LITERATURE SEARCH)

Spesifik olarak çevresel etki kategorileri sera gazları (GHG) salınımı, enerji tüketimi, zehirli madde salınımı, su çekilmeleri ve zararlı atık üretimi sürdürülebilirlik araştırmalarındaki tüm çevresel etki değerlendirme çalışmalarının temel taşları haline gelmişlerdir (Bevilacqua, Ciarapica ve Giacchetta, 2012; Eğilmez, Küçükvar ve Tatari, 2013; Eğilmez, Küçükvar, Tatari ve Bhutta, 2014; Küçükvar ve Tatari, 2013; Eğilmez, Gümüş ve Küçükvar, 2015).

Moreno ve diğerlerinin (2014) çalışmasında ECI (European Common Indicators) (1999-2003), LASALA ("Local Authorities" Self-Assessment Local Agenda 21, 1999-2002) gibi şehir kıyaslamada kullanılacak sürdürülebilirlik göstergelerini standartlaştırma örnekleri sunulmuştur. Belirlenen kriterler dünya çapında birçok çalışmada kullanılsa da çalışmaların ana amacına göre kriterlerin farklılık göstermesi sebebiyle kriterlerin net bir şekilde belirlenmesi güçtür (Eğilmez, Gümüş ve Küçükvar, 2015).

Sürdürülebilirlik performansı gösterge kategorileri arasında Çevresel Koruma Ajansı (EPA) gibi hükümet kuruluşlarının birçok raporunda altını çizdiği enerji ve su tüketimi, hava kirliliği ve CO<sub>2</sub> salınımı, geri dönüşüm ve atık üretimi, arazi ve bina iz bölgeleri, ulaşım tabanlı performanslar temel ve yaygın olarak değinilen gösterge kategorileri olarak gösterilebilirler (Eğilmez, Gümüş ve Küçükvar, 2015).

Sürdürülebilirlik göstergeleri şehirlerin sürdürülebilirlik performanslarını hesaplamak için geliştirilmiş olsalar da metropollerini tüm sürdürülebilirlik göstergeleri üzerinden kıyaslamak önemlidir. Yine de sürdürülebilirlik göstergeleri genellikle gösterge kategorilerinin farklı ölçü gruplarıyla sunulduğu, enerji, su kaynakları, hava kirliliği, ulaşım, sivil altyapı gibi çeşitli alanları içeren şekilde düşünülmüştür (Olewiler, 2006). Bu sebeple şehirlerin sürdürülebilirlik performans ölçümü için Karar Verme Yöntemleri kullanılmalıdır.

Eğilmez ve diğ. (2015) çalışmalarında 16 adet sürdürülebilirlik göstergesini kullanmışlardır. Bu göstergeler, göstergelerin bağlı olduğu ana konu ve göstergelerin sanayi, hükümet, akademi kuruluşlarından seçilen ve oluşturulan ankete katılmayı kabul eden 10 tane uzmana sunulan ankette her göstergenin kendilerine göre önemini Çok Çok Düşük, Çok Düşük, Düşük, Orta, Yüksek, Çok Yüksek, Çok Çok Yüksek olmak üzere 7 dilsel ifadeyle seçmeleri istenmiştir. Bu değerlerin kullanım sıklığına yani oranına göre oluşturulan Histogram tablosu (5-10-15-40-15-10-5) dilsel değerlerin yüzdesini temsil etmektedir, her gösterge için kıyaslanan tüm illerdeki değerleri içerisinden histogram hazırlanıp bu değerler de dilsel değerlere dönüştürülmüş ve şehirlerin sürdürülebilirlik skor hesaplaması sezgisel yöntemle yapılmıştır. Eğilmez ve diğ. (2015) çalışmasında göstergelerin hesaplanan ağırlık yüzdeleri Çizelge 1.de sunulmuştur.

Eğilmez ve diğ. (2015) çalışmasının tablosunda görüldüğü gibi en önemli iki gösterge olarak kişi başına CO<sub>2</sub> salınımı ve işe toplu taşıma, bisiklet ile ya da yaya giden çalışan oranı göstergeleri çıkmıştır.

**Çizelge 1.** Eğilmez ve diğ. (2015) çalışmasında kullanılan sürdürülebilirlik göstergeleri tablosu

Table 1. Indicators used in Egilmez et. al. 2015 research

Sıra	Gösterge açıklaması	Ana konu	Ağırlık (%)
I1	Kişi başına CO <sub>2</sub> salınımı (metrik ton)	Hava	12,5
I2	Kişi başına elektrik tüketimi (Gj)	Enerji Kullanımı	6,5
I3	Toplam alandaki yeşil alan yüzdesi (%)	Alan Kullanımı	9,0
I4	Nüfus yoğunluğu (insan/mil <sup>2</sup> )	Alan Kullanımı	4,8
I5	LEED sertifikalı bina sayısı (binalar/100000 insan)	Binalar	4,8
I6	İşe toplu taşıma, bisiklet ile ya da yaya giden çalışan oranı (%)	Ulaşım	11,3
I7	Toplu taşıma ağı uzunluğu (mil/mil <sup>2</sup> )	Ulaşım	4,2
I8	Yıllık yapılan araç mesafesi (mil/insan)	Ulaşım	3,9
I9	Maksimum toplu taşıma araçları ulaşılabilirliği (araçlar/mil <sup>2</sup> )	Ulaşım	6,0
I10	Ev-iş arası ortalama süre (dakika)	Ulaşım	5,0
I11	Dönüştürülen kentsel atık oranı (%)	Atık	6,3
I12	Günlük bir insanın su tüketimi (galon)	Su	7,5
I13	Su dağıtım sistemindeki kaçaklar (%)	Su	4,2
I14	Yıllık nitrojen oksit salınımı (pound/insan)	Hava	3,1
I15	Yıllık parçacık madde (PM <sub>10</sub> ) emisyonu (pound/insan)	Hava	7,2
I16	Yıllık sülfür dioksit salınımı (pound/insan)	Hava	3,8

Baycan-Levent ve diğ. (2009) çalışmasında 24 Avrupa şehrinin kentsel yeşil alan performansları, bir MCA(Multi-Criteria Analysis) yöntemi olan Rejim Analizi yöntemiyle ölçülmüş ve kıyaslanmıştır. Çalışmaya dahil edilen şehirlerin ilgili gösterge kriterler hususunda son 10 yıldaki durum değişimleri (artış ya da azalış) dikkate alınarak rejim analizi yapılmıştır. Baycan-Levent ve diğ. (2009) çalışmasında kullanılan ve hem niteliksel hem de niceliksel konu başlıklarını içeren yeşil alan performans ölçüm kriterleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

**Çizelge 2.** Baycan-Levent ve diğ. (2009) çalışmasında kullanılan sürdürülebilirlik göstergeleri tablosu

Table 2. Indicators used in Baycan-Levent et. al. 2009 research

Sıra	Gösterge açıklaması	Ana konu
I1	Toplam alan üzerinden yeşil alan oranı (%)	Miktar ve kullanılabilirlik
I2	1000 şehir sakinine düşen yeşil alan oranı (m2)	Miktar ve kullanılabilirlik
I3	Yerel yeşil alan sistemi varlığı	Miktar ve kullanılabilirlik
I4	Son 10 yılda toplam yeşil alandaki değişimler	Değişimler
I5	Diğer fonksiyonlara kıyasla yeşil alanın şehir için önemi	Planlama
I6	Kentsel yeşil alanların planlanması için genel hedef ve stratejilerin varlığı	Planlama
I7	Kentsel yeşil alanlar için özel planlama araçları varlığı	Planlama
I8	Şehir sakinlerinin katılımıyla tecrübe	Planlama
I9	Son iki yılda yeşilleşme amaçlı bütçedeki değişimler	Finansman
I10	Temsilcilerin kendi değerlendirme bakış açısından hedefler doğrultusunda kentsel yeşil alan politikalarının başarı seviyesi	Seviye

Wałtróbski ve diğ., (2016) çalışmasında da karar süreci başlangıcı olarak görülebileceği üzere Roy'un (1996) karar süreci dört aşamalı modeli aşağıdaki maddeleri içermektedir:

1. Karar nesnesinin saptanması ve A karar alternatifleri kümesinin tanımlanması,
2. Sonuçların analizi ve C kararlı kriter kümesinin geliştirilmesi,
3. Kapsamlı tercihler ve operasyonel kümelenen performansların modellenmesi,
4. Önermenin sorgulanması ve geliştirilmesi.

Roy'un (1996) metodundaki 3. madde kapsamında AHP ve BAHP gibi metotlar bulunabilmektedir. İkili karşılaştırma sürecinde ise bulanık sayıları kullanan birçok çalışma yapılmıştır. Kahraman ve diğ. 1998, AHP'de bulanık ağırlıklandırma ile öncelik değerlerini elde etmek için bir metot geliştirmişlerdir. Kuo ve diğ. (2002) yaptıkları çalışmada tesis yeri seçimi problemi için bir karar destek sistemi geliştirmişler ve önerdikleri sistemde hiyerarşik yapının geliştirilme ve değerlendirme aşamasında BAHP yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada BAHP metotlarından Buckley (1985) yöntemi kullanılacaktır.

### Literatür Karşılaştırması (Literature Comparison)

Bu bölümde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin kullanıldığı sürdürülebilirlik çalışmaları karşılaştırmalı bir şekilde Çizelge 3.te sunulmuştur.

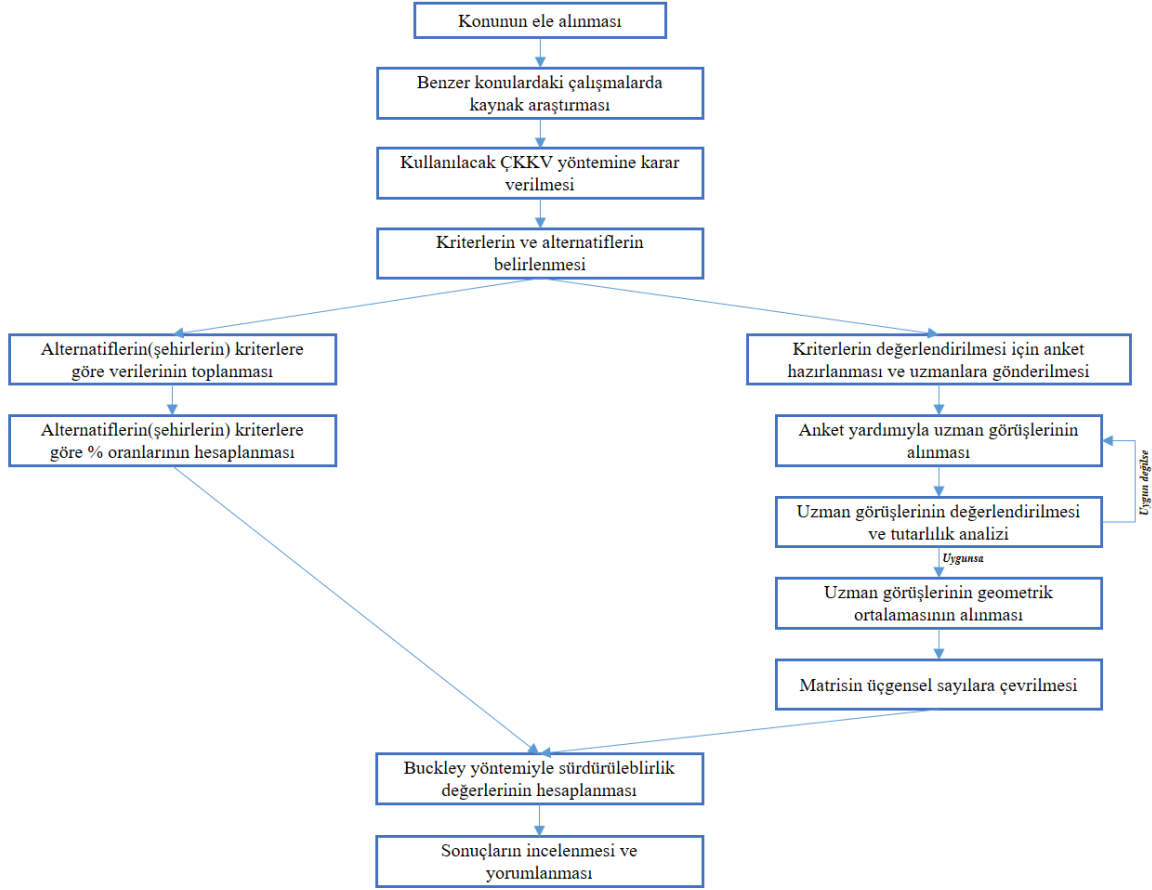


**Çizelge 3.** Bu çalışmayla ilişkili konulara sahip ve benzer yöntemler kullanılan çalışmalar için literatür karşılaştırma tablosu**Table 3.** Comparison schedule of researches having the same approaches and techniques

Çalışma Künyesi-Yazar Adı	Çalışma Alanı	Kullanılan Yöntem	Ülke
Baycan-Levent, Vreeker, Nijkamp (2009)	Urban Green Spaces	MCA (Regime Analysis), Anket	15 Avrupa Ülkeleri
Achillas, Moussiopoulos, Karagiannidis, Banias, Perkoulidis (2013)	Waste Management	MCDA	Yunanistan
Tsai, Lin, Lee, Chang, Hsu (2013)	Environmental Sustainability	MCDM	Tayvan
Hsu, Kuo, Shyu, Chen (2014)	Low Carbon Supplier for Hotels	FDM, DEMATEL, DANP, VIKOR	Tayvan
Kucukvar, Gumus, Egilmez, Tatari (2014)	Sustainability Performance of Pavements	TOPSIS, IFDM	ABD
Yan, Lai, Lin (2014)	Green Building	DEMATEL, DANP, VIKOR	Tayvan
Chang, Chen, Hsu, Hu, Tzeng (2015)	Alternative Fuel Vehicles	DEMATEL, ANP	Tayvan
Egilmez, Gumus, Kucukvar (2015)	Sustainability, Performance Benchmarking	MCDM, IFDM	ABD
Kumar, Katoch (2015)	Hydropower Projects	MCDM, AHP	Hindistan
Kuo, Hsu, Li (2015)	Green Supplier Selection	DANP, VIKOR	Tayvan
Hu, Chen, Tzeng (2016)	Sustainability of Sports Industry	MADM, DEMATEL, VIKOR	Tayvan
Ignatius, Rahman, Yazdani, Šaparauskas, Haron (2016)	Green Building	MCDM, Fuzzy ANP-QFD	Litvanya
Lu, Kuo, Lin, Tzeng, Huang (2016)	Sustainable Development Strategies	DANP, VIKOR	Tayvan
Wątróbski, Ziemia, Jankowski, Ziolo (2016)	Renewable Energy Sources	MCDA (AHP, PROMETHEE)	Polonya
Zhang, Xu, Liu (2016)	Green Supply Chain	MCDM, Fuzzy QUALIFLEX	Çin
Zhao, Li (2016)	Electric Vehicles	Fuzzy GRA-VIKOR, Delphi	Çin
AHP, Analytic Hierarchy Process			
ANP, Analytic Network Process			
DANP, DEMATEL-Based Analytic Network Process			
DEMATEL, The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory			
FDM, Fuzzy Decision Making			
GRA-VIKOR, Grey Relational Analysis VIKOR			
IFDM, Intuitionistic Fuzzy Decision Making			
MADM, Multiple Attribute Decision Making			
MCA, Multi-Criteria Analysis			
MCDA, Multi-Criteria Decision Analysis			
MCDM, Multi-Criteria Decision Making			
PROMETHEE, Preference Ranking Organization Method For Enrichment Evaluations			
QFD, Quality Function Deployment			
QUALIFLEX, The Qualitative Flexible Multiple Method			
TOPSIS, The Technique For Order Preference By Similarity To Ideal Solution			
VIKOR, Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje			

## MATERYAL VE YÖNTEM (Material and Method)

Bu çalışmanın hiyerarşik aşamaları Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmanın hiyerarşik aşamaları

Figure 1. Hierarchical levels of the research

## Sürdürülebilirlik Kriterleri (Sustainability Criterias)

Bu çalışmada sürdürülebilirlikleri açısından değerlendirilmek üzere Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden, sanayi ve hizmet sistemleri gelişmiş 9 il seçilerek çalışmaya dâhil edilmiştir. 2016 yılı TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verilerine göre nüfus sıralamasında ilk 5 şehir alınmış, diğer iller ise keyfi olarak seçilmiştir. Yapılan seçim sonucunda Türkiye'nin nüfus sıralamasında 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 14 ve 31. sırayı alan iller çalışmaya dâhil edilmiştir. Bu iller; Afyonkarahisar, Ankara, Antalya, Bursa, Gaziantep, İstanbul, İzmir, Konya ve Manisa'dır (Şekil 2.de sunulmuştur).



**Şekil 2.** Türkiye Haritası üzerinde çalışmada kıyaslanan illerin gösterimi  
**Figure 2.** (Indicating of the compared cities on Turkish Map)

Kaynak araştırması bölümünde sunulan sürdürülebilirlik göstergeleri ve kriterleri konusundaki tüm çalışma ve verilerden yola çıkılarak illeri kıyaslayabilmek için kriterlerin çevre, enerji ve sosyoekonomi branşlarından oluşması gerektiği görülmektedir. Bu üç konu içerisinde seçilen kriterler ve kıyaslanacak illere göre değerlerini içeren tablo Çizelge 4'te sunulmuştur. Çizelge 4'te sunulan veriler TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), OGM (Orman Genel Müdürlüğü), TTD (Türk Toraks Derneği) kaynaklarından edinilmiştir. Bu kurumlarda bazı veriler için her yıl veri güncelleme çalışması yapılmaması sebebiyle ilgili verinin istatistiği yapılmış en güncel yıl verileri sunulmaktadır. Tüm kriterlerin negatif yönlü kriterler olması için ise pozitif yöndeki kriter verileri terse çevrilerek negatif yönde kritere çevrilmiştir (örneğin mutluluk verisi mutsuzluk verisine çevrilmiştir).

#### **Kriterlerin Uzmanlarca Değerlendirilmesi (Evaluating of the criterias by the experts)**

Bu çalışmada kullanılacak 11 sürdürülebilirlik kriterinin ikili karşılaştırma matrisini oluşturabilmek adına uzman görüşlerine başvurulmuştur. Bu görüşler hazırlanan anket yardımıyla elde edilerek bulanık değerlere dönüştürülmüştür. Uzmanlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı çalışanlarından seçilmiştir. Yanlı cevaplar verilmemesi adına çalışmada kullanılan illerin şube müdürlükleri dışında Hatay ve Çorum illeri Çevre ve Şehircilik İl Müdürlükleri çalışanlarından uzman ekip oluşturulmuştur. Kodlamaları ile (örneğin U1 kodu 1. Uzmanı temsil edecek şekilde) U1, U3, U4, U5, U6 Hatay İl Şubesinde mühendis pozisyonunda; U8 ve U9 Çorum İl Müdürlüğünde mühendis pozisyonunda çalışanlardır. U2 ve U7 Hatay İl Müdürlüğünde birim müdürü; U10 ise Çorum İl Müdürlüğünde birim müdürü pozisyonunda çalışanlardır. Anket mail yoluyla uzmanlara ulaştırılmış ve uzmanlar tarafından doldurularak yine mail yoluyla alınmıştır.

Çizelge 4. Kıyaslanan illerin seçilen kriterler açısından değerleri (TÜİK, OGM, TTD verileri)

Table 4. The values of the compared cities upon the criterias

Kriter Sırası	Kriter Açıklaması	Veri Yılı	Ana Konu	Afyonkarahisar	Ankara	Antalya	Bursa	Gaziantep	İstanbul	İzmir	Konya	Manisa
1	Kişi başına yıllık mesken ve sanayi elektrik tüketimi (kWh)	2014	Enerji	1260	1194	1276	2679	2373	1342	3415	1628	1986
2	Solunum sistemi hastalıkları sebebiyle ölüm sayısı (kişi/yıl)	2016	Çevre	648	2361	1016	1718	739	7090	3365	1461	1258
3	Şehir alanına göre ormanlık olmayan(bozuk+normal orman harici) alan (%)	2017	Çevre	83	85	45	55	88	55	60	87	59
4	Havadaki partikül madde (PM <sub>10</sub> ) kirliliği (µg/m <sup>3</sup> )	2017	Çevre	78	67	50	84	54	48	46	69	71
5	Kişi başına düşen yıllık tehlikeli atık miktarı (kg/kişi)	2015	Çevre	7,74	18,92	5,28	25,50	3,22	8,94	56,19	13,48	23,40
6	Kişi başına düşen motorlu araç sayısı (araç/nüfus)	2017	Çevre	0,30	0,35	0,43	0,29	0,25	0,27	0,31	0,32	0,41
7	Kişi başına yıllık su tüketimi (m <sup>3</sup> /nüfus)	2016	Çevre	35,87	49,91	68,67	48,90	66,55	51,20	42,59	54,56	50,04
8	Mutsuzluk (%)	2013	Sosyoekonomi	23,6	43,8	50,2	38,9	41,9	41,6	41,8	34,4	36,1
9	Nüfus yoğunluğu (kişi/km <sup>2</sup> )	2016	Sosyoekonomi	50,98	208,59	115,41	268,32	290,20	2710,88	355,19	52,92	104,73
10	Göçle oluşan nüfus artışının toplam nüfusa oranı-göç hızı(%)	2016	Sosyoekonomi	0	0,003	0,003	0,007	0	0	0,006	0,001	0,003
11	İşsizlik oranı (%)	2013	Sosyoekonomi	5,6	10,2	7,9	6,6	6,9	11,2	15,4	4,7	5,1

### Karar Verme, Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (Decision Making, Fuzzy Analytic Hierarchy Process)

Karar verme, genel olarak seçenek kümesinden, en az bir amaç doğrultusunda ve bir ölçüte dayanarak en uygun, mümkün bir ya da birkaç seçeneği seçme sürecidir. Buna göre karar verme süreci karar verici, seçenekler, ölçütler, çevresel etkiler, karar vericinin öncelikleri ve kararın sonuçları elemanlarını içerir. Süreç, karar vericinin mevcut seçenekler arasından bir seçim, sıralama ya da sınıflandırma yapması şeklinde bitebilir. Bu aşamada en doğru kararı vermek için çok ölçütlü karar verme yöntemleri karşımıza çıkmaktadır. Belirli kriterlerin genel olarak ikili karşılaştırmalarının esas alındığı çok ölçütlü karar verme yöntemleri en doğru kararın verilmesine sayısal verilerle yardımcı olmaktadır (Evren ve Ülengin, 1992).

Analitik Hiyerarşi Prosesi: İlk olarak Saaty (1980) tarafından önerilen Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) Yöntemi, çok sayıda alternatif içinden seçim yapmada yararlanılan ve birden fazla karar vericinin süreçte yer alabildiği çok kriterli karar verme yöntemlerinden biridir. Seçim sürecinde yer alan kriterler nicel ya da nitel olabilir. Karar verici/vericilerin tecrübe ve bilgileri AHP sayesinde karar verme sürecinde yer alabilir. AHP, bir problemi küçük parçalara ayırır, ikili karşılaştırmalara tabi tutar, her hiyerarşi için öncelikleri belirler ve böylece belli bir mantıksal süreci düzenler (Ecer ve Küçük, 2008).

AHP yöntemi, uzmanların bilgilerini ele alsa da insani düşünme tarzını yansıtmamaktadır (Kahraman ve diğ. 2003). Ayrıca, ikili karşılaştırma sürecinde, belirsizlik ve kararsızlık durumlarını ele almada yetersiz olmasından dolayı da eleştirilmektedir. Bu nedenlerden dolayı önerilen, Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (BAHP)'nde kesin değerlerin kullanıldığı AHP' den farklı olarak, kıyaslama oranları bir değer aralığında verilmektedir. Böylece karar verme sürecindeki belirsizliğin daha kolay üstesinden gelinebilmektedir (Karakaşoğlu, 2008).

Literatürde, çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen birçok BAHP yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler, bulanık küme teorisi kavramlarını kullanarak alternatif seçimi ve gerekçe problemlerine sistematik yaklaşımlardır. Karar vericiler genellikle aralık değerlendirmeleri sabit değerlendirmelerden daha güvenli bulmaktadırlar. Bunun nedeni, karşılaştırma yönteminin bulanık doğası gereği karar vericilerin tercihleri hakkında kesin olmamalarıdır (Çitli, 2006). Bulanık AHP' de önerilen yöntemlerden bazıları:

-Van Laarhoven ve Pedrcyz (1983): Üçgen üyelik fonksiyonları ile tanımlanan bulanık oranları karşılaştırmışlar ve Saaty (1980)' nin önerdiği klasik AHP yönteminin uzantısı olan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu modelde, üçgen bulanık sayılarla ifade edilen bulanık oranlar kıyaslanmaktadır. Hesaplama adımları AHP yöntemi ile aynıdır. Bulanık ağırlıklar ve bulanık performans değerleri, Lootsma' nın logaritmik en küçük kareler yöntemi kullanılarak elde edilmektedir.

-Buckley (1985): Yamuk üyelik fonksiyonları ile karşılaştırma oranlarının bulanık önceliklerini belirlemiş ve yamuk bulanık sayıları kullanarak yeni bir model geliştirmiştir. Yeni modelde, Saaty (1980)' nin önerdiği klasik AHP yönteminin başka bir uzantısı olan  $\alpha_j$  bulanık kıyaslama oranlarını kullanmıştır. Ayrıca Van Laarhoven ve Pedrcyz (1983)' nin yöntemindeki sorunlara dikkat çekmiştir.

-Chang (1996): Karşılaştırmalar için üçgen bulanık sayıları kullanmış ve ikili karşılaştırmalar için genişletme analizi yöntemini önermiştir.

Bu çalışmada kullanılacak yöntem olan Buckley (1985) yönteminin denklem aşamaları aşağıdaki gibidir (Paksoy ve diğ. 2013):

Adım1. Bulanık ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulması

$$\begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \dots & \tilde{a}_{1j} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{a}_{i1} & \dots & \tilde{a}_{ij} & \dots & \tilde{a}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \dots & \tilde{a}_{nj} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix}$$

$\tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1$  ve  $\tilde{a}_{ij} \cong w_i / w_j$  olur.

Adım2. Her bir kriter için;

$r_i = (\tilde{a}_{i1} \times \tilde{a}_{i2} \times \dots \times \tilde{a}_{in})^{1/n}$  değerleri bulunur.

Adım3. Her kriterin bulanık ağırlıkları;

$w_i = r_i \times (r_1 + r_2 + \dots + r_n)^{-1}$

burada  $r_k = (l_k, m_k, u_k)$  olmak üzere

$(r_k)^{-1} = (1/u_k, 1/m_k, 1/l_k)$  olur ve  $\times$  bulanık çarpma,  $+$  bulanık toplama işlemidir.

$MC_i$  ana kriterleri,  $SC_{ij}$  alt kriterleri ve  $A_k$  alternatifleri göstermek üzere ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, s$ );

Ana kriterlere ilişkin bulanık ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak ana kriterlerin ağırlıkları hesaplanır  $\rightarrow w_{MC_i} (i=1, 2, \dots, n)$

Adım4. Her bir alt kriterin kendi ana kriterine göre değerlendirildiği bulanık ikili karşılaştırma matrisleri kullanılarak alt kriterlerin ağırlıkları hesaplanır  $\rightarrow w_{ASC_{ij}} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$

Adım 5. Her bir alternatifin ( $A_k, k = 1, 2, \dots, s$ ) her bir alt kriterine göre değerlendirildiği bulanık ikili karşılaştırma matrislerinden yararlanarak alternatiflerin ağırlıkları hesaplanır  $\rightarrow w_{ASC_{ij}}$

Adım 6. i. ana kriter ( $MC_i$ )'e ilişkin alt kriterler ( $SC_{ij}$ )'in alternatif öncelik ağırlıkları: her bir alt kriterin ağırlıkları ile alternatiflerin ağırlıklarının çarpılıp toplanması ile elde edilir.  $A_{ij} = \sum_{j=1}^m w_{SC_{ij}} \times w_{ASC_{ij}}$   $m$

Adım 7. Alternatiflerin hedefe ilişkin ağırlıkları, i. ana kriter ( $MC_i$ )'in ağırlıkları ile  $A_{ij}$  ağırlıklarının çarpılıp toplanması ile elde edilir.  $A_k = \sum_{i=1}^n w_{MC_i} \times A_{ij}$   $n$   $i=1$  ve  $\sum_{k=1}^s A_k = 1$   $s$   $k=1$ ;  $k=1, 2, \dots, s$

Burada;  $i = 1, 2, \dots, n$  ana kriter sayısını,  $j = 1, 2, \dots, m$  alt kriter sayısını ve  $k=1, 2, \dots, s$  alternatif sayısını göstermektedir.

İkili karşılaştırma matrislerindeki belirgin tutarsızlıklar çoğunlukla karar vericilerin (uzmanların) karşılaştırılan alternatif değerlendirmelerinin verilen aralık değerlerine (Çizelge 6'da sunulan çevrim değerleri) çevriminde yaptıkları ihmallere temelli hatalarından kaynaklanmaktadır (Laininen ve Hamalainen 2003, Wałtróbski ve diğ. 2016). Bu tutarsızlıkların belirlenmesi için Saaty'nin (1980) çalışmasındaki Tutarlılık Oranı kullanılır (Paksoy ve diğ. 2013).

Tutarlılık göstergesi (CI) =  $(\lambda_{maks} - n) / n$

Rasgele tutarlılık oranı (RI) =  $1,98(n-2) / n$  (veya Çizelge 5'ten seçilerek)

Tutarlılık oranı (CR) =  $CI / RI$

Hesaplanan Tutarlılık oranı (CR) < 0,1 ise ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu sonucuna varılır.

**Çizelge 5.** Matris boyutuna göre rasgele tutarlılık değerleri

Table 5. Values of random consistency depending on matrix size

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51

## ARAŞTIRMA SONUÇLARI, BULGULAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Çevre ve Şehircilik Bakanlığı çalışanlarından oluşmuş 10 kişilik uzman grubundan Çizelge 4. ile sunulan kriterlerin birbirlerine göre değerini hesaplamaya yarayan anketi doldurmaları

istenmiştir. Uzman görüşleri mail yoluyla elde edildikten sonra bu değerler ölçeklere dönüştürülmüş ve ölçeklerden oluşan 10 adet tablonun önce tutarlılık oranları hesaplanmış (Çizelge 6'da sunulmuştur) sonra da geometrik ortalaması alınmıştır, geometrik ortalama değerleri Çizelge 7'de sunulan değerler (Paksoy ve diğ. 2013) kullanılarak bulanık değerlere dönüştürülmüştür. Bu veriler, seçilen BAHF yöntemi olan Buckley Yöntemi'nde kullanılarak CoA kriter ağırlık merkezleri (Çizelge 8'de sunulmuştur) bulunmuştur.

**Çizelge 6.** Uzmanların değerlendirme matrislerinin tutarlılık değerleri

Table 6. Consistency values of evaluating matrices of experts

Uzman	CI-Tutarlılık Oranı
U1	0,082
U2	0,077
U3	0,076
U4	0,074
U5	0,099
U6	0,078
U7	0,073
U8	0,099
U9	0,075
U10	0,058

**Çizelge 7.** Kriter değerlendirme değerleri

Table 7. Evaluating values of criteria

Dilsel Değişken	Bulanık Ölçek	Karşılık Ölçek
Eşit derecede önem	(1, 1, 1)	(1/1, 1/1, 1/1)
Orta derecede önem	(1, 3, 5)	(1/5, 1/3, 1/1)
Kuvvetli derecede önem	(3, 5, 7)	(1/7, 1/5, 1/3)
Çok kuvvetli derecede önem	(5, 7, 9)	(1/9, 1/7, 1/5)
Mutlak derecede önem	(7, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/7)
	(1, 2, 3)	(1/3, 1/2, 1)
	(3, 4, 5)	(1/5, 1/4, 1/3)
Ara değerler	(5, 6, 7)	(1/7, 1/6, 1/5)
	(7, 8, 9)	(1/9, 1/8, 1/7)

**Çizelge 8.** CoA kriter ağırlık merkezleri**Table 8.** CoA, Center of area, gravity

Kriter	$w$	CoA
elektrik	wC1	0,039
ölüm	wC2	0,078
ormansız	wC3	0,093
pm10	wC4	0,115
atık	wC5	0,078
araç	wC6	0,065
su	wC7	0,060
mutsuz	wC8	0,183
nüfus	wC9	0,063
göç	wC10	0,063
işsiz	wC11	0,163

Alternatiflerin (iller) kriterlere göre değerlerini içeren Çizelge 4'teki değerlerin ortalamaları alınarak ortalama değer tablosuna dönüştürülmüştür. Son aşamada ise alternatiflerin kriterlere göre ortalama değer tablosu kriterlerin ağırlık değerleri CoA ile çarpılarak sonuç matrisi elde edilmiştir, sonuç matrisinin satır toplamları ise illerin sürdürülebilirlik performanslarının değerlerinin bulunmasını sağlamıştır (Çizelge 9'da sunulmuştur).

Çalışmada kullanılan kriterlerin uzman görüşleri neticesinde hesaplanan ağırlıklarından yola çıkılarak ele alınan 11 kriterden en belirleyici olanı 0,183 ağırlık değeri ile Mutsuzluk kriteri olarak bulunmuştur. Bu kriteri 0,163 ağırlık değeri ile İşsizlik Oranı kriteri ikinci sırada ve 0,115 ağırlık değeri ile Havadaki Partikül Madde (PM<sub>10</sub>) Kirliliği kriteri üçüncü sırada takip etmiştir. 10 uzman içerisinde 5 ve 8 numaralı uzmanların değerlendirmeleri tutarlı olarak hesaplanamadığı için uzmanlardan düzeltme talep edilerek değerlendirmeleri revize edilmiştir.

Çalışmada kullanılan kriterlerin tamamının negatif kısıtlar olması, ele alınan problemin bir minimizasyon problemi olmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple sürdürülebilirlik performansları içerisinde 0,074 değeri ile en düşük değere sahip olan il olan Afyonkarahisar, karşılaştırılan 9 il arasında en sürdürülebilir il olarak bulunmuştur. Bu ili 0,089 değerle Konya ili ikinci sırada ve 0,090 değerle Gaziantep ili üçüncü sırada takip etmiştir.

Çalışmada hazırlanan duyarlılık analizi sonucunda tutarlılık verileri duyarlılığı Çizelge 10'da, uzman görüşlerinde herhangi bir kriter için değerlendirme değişimlerinde yaşanacak değişimlerin izlenebilmesi için dinamik duyarlılık analizi yapılarak Çizelge 11'de sunulmuştur.

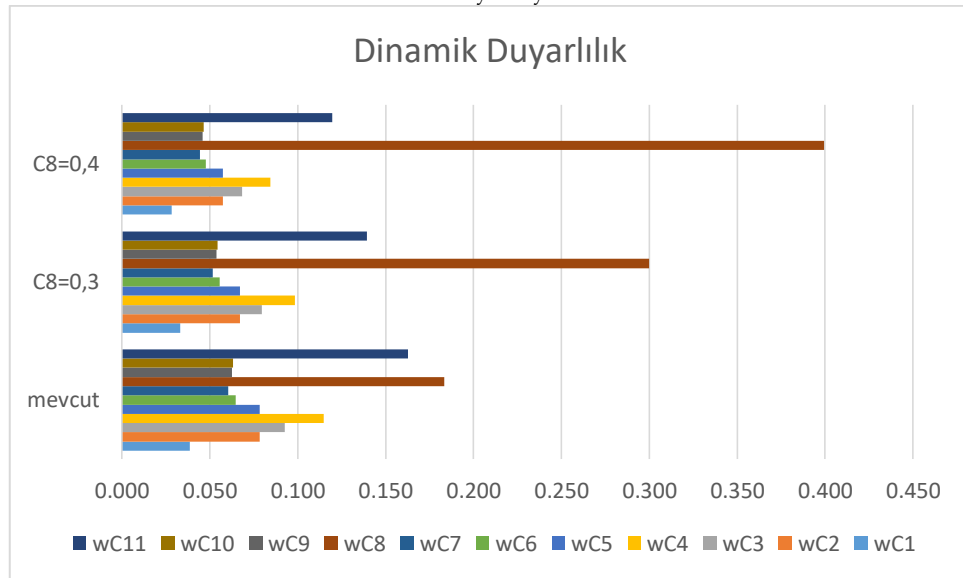


**Çizelge 9.** İllerin (Alternatiflerin) sürdürülebilirlik değerleri**Table 9.** Sustainability values of the cities

Şehir	Kod	Sürdürülebilirlik Değeri
Afyonkarahisar	A1	0,074
Ankara	A2	0,119
Antalya	A3	0,097
Bursa	A4	0,122
Gaziantep	A5	0,090
İstanbul	A6	0,153
İzmir	A7	0,156
Konya	A8	0,089
Manisa	A9	0,100

**Çizelge 10.** Tutarlılık için duyarlılık analizi**Table 10.** Sensitivity analysis for consistency

	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9	U10
CI	0,133	0,125	0,123	0,119	0,161	0,126	0,118	0,160	0,121	0,094
RI	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62	1,62
CR	0,082	0,077	0,076	0,073	0,099	0,078	0,073	0,099	0,075	0,058

**Çizelge 11.** Kriterler için duyarlılık analizi**Table 11.** Sensitivity analysis for criterias

## SONUÇLARIN İRDELENMESİ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER (DISCUSSIONS AND SUGGESTIONS)

Eğilmez ve diğ. (2015) çalışmasının 10 uzman tarafından yapılan değerlendirmeler sonucu oluşan ağırlıklara bakılarak en önemli üç göstergesinin kişi başına CO<sub>2</sub> salınımı, işe toplu taşıma, bisiklet ile ya da yaya giden çalışan oranı ve toplam alandaki yeşil alan yüzdesi göstergeleri olduğu görülmektedir ki bu sonuçlar, çalışmada uzmanların çevresel etmenlere daha çok önem verdiğini göstermektedir. Ancak Eğilmez ve diğ. (2015) çalışmasında sosyoekonomik göstergelerin kullanılmamış olması çalışmada çevresel kriterlerin öne çıkmasına sebep olmuş olabilir. Bu çalışmada ise uzman görüşleri neticesinde

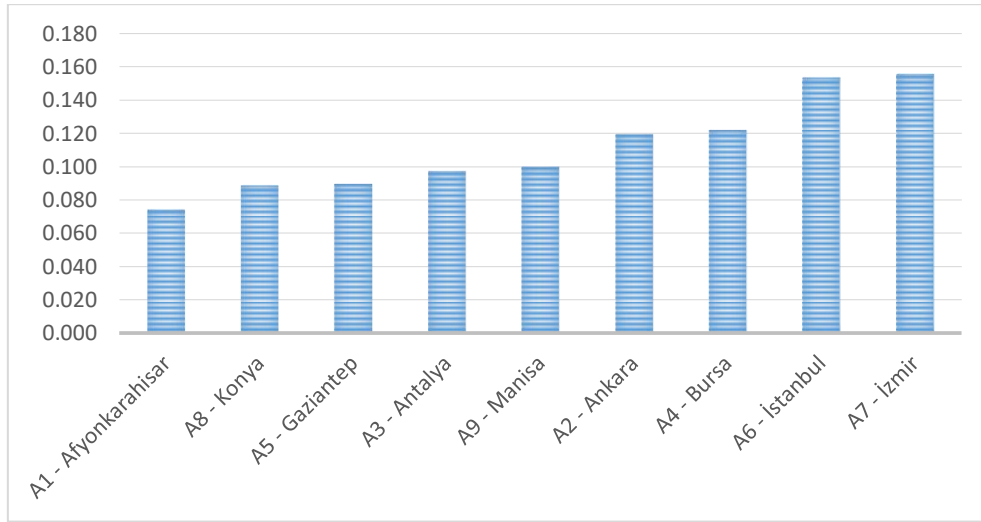
hesaplanan ağırlıklardan yola çıkılarak ele alınan 11 kriterden en önemli üçü mutsuzluk, işsizlik oranı ve havadaki partikül madde (PM<sub>10</sub>) kirliliği kriterleri olarak öne çıkmaktadır.

Uzman görüşleri sonucu şehirlerin sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde 1 enerji, 6 çevre ve 4 sosyoekonomi alanlarından olmak üzere toplam 11 adet kriter içerisinde önem sıralamasında ilk ikisinin sosyoekonomi alanından olması, şehirlerin sürdürülebilir olabilmesi için şehrin sakinlerinin sosyal yaşam ve ekonomik yönlerden refahının en belirleyici etmen olduğu yorumunun yanlış olmayacağına bir işaretir.

Bu çalışmada 3 ana başlıktan gelen 11 değerlendirme kriteri ile değerlendirilen 9 il arasından en sürdürülebilir ilk üç il olan Afyonkarahisar, Konya ve Gaziantep'in sıralamada ilk üç sırayı almasının en değerli iki kriter olan sosyoekonomik mutsuzluk ve işsizlik oranı kriterlerinde başarıya sahip olmalarından kaynaklandığı görülmektedir.

Değerlendirmeye alınan iller arasında nüfus açısından en büyük 4 il olan İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa'nın sürdürülebilirlik sıralamasında son 4 sırada bulunması ise metropol yaşamının çevresel, sosyoekonomik ve enerji alanlarının tamamında negatif sonuçlara yol açtığına kanıt olarak görülmektedir.

Şekil 3'te ise şehirlerin sürdürülebilirlik performanslarının en iyiden en kötüye sunumu görülmektedir.



Şekil 3. İllerin sürdürülebilirlik performansları

Figure 3. Sustainability performances of the cities

### Öneriler (Suggestions)

Seçilen illerin seçilen kriterlere göre değerlerinin alınması için TÜİK, OGM ve TTD verileri kullanılmıştır. Ancak bu verilerinin tamamını ortak bir zaman dilimi için bulunması sağlanamamaktadır. Bu verilerin zaman dilimlerinin ortak hale getirilmesi, TÜİK ve diğer kurum verilerinin güncelleştirilme periyotlarının takip edilmesi ile verilerin güncellenerek bu çalışmadaki çözüm yöntemlerinin bu periyotlar dâhilinde tekrar tekrar uygulanması daha güncel sonuçların alınmasını sağlayabilecektir.

Çalışmada sadece 9 şehir ve 11 kriter kullanılmıştır. Bu çalışmanın hem ülkemiz hem de dünyada daha aktif kullanılabilmesi için hem daha farklı kriterler hem de daha farklı illerin bu kıyaslamaya eklenmesi daha yararlı ve kullanılabilir sonuçların elde edilmesine vesile olabilecektir.

Çalışmanın iki ana veri seti bulunmaktadır. Birinci veri seti Çizelge 4'de sunulan kriterlerin illere göre değerleri, ikinci veri seti ise uzman görüşlerinin kriterlerin birbirine göre ağırlıklarını değerlendirdikleri matrislerdir. Bu çalışmada ortaya çıkan sonuçların geçerlilikleri uzmanların tekrar

kriterleri değerlendirmesi ve önceki değerlendirmeleri ile kıyaslanarak kararlarında sapma olup olmadığı test edilerek elde edilebilir. Yeni kararlar ışığında Buckley yöntemi tekrar uygulanarak yeni çözüm elde edilebilir. Ayrıca bu çalışmada 11 sürdürülebilirlik kriteri açısından kıyaslanan 9 ilin farklı kriterler belirlenerek ve aynı uzmanlar tarafından kriterlerin değerlendirilmesi verileri ile tekrar aynı yöntem kullanılarak kıyaslanması gibi bir çalışma yapılırsa çıkan sonucun bu çalışmaya yakın ya da aynı sonuçları içeriyor olması bu çalışmanın sonuçlarının doğruluğunu gösterebilecek yollardandır.

#### AÇIKLAMA (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Ahmet ŞEPİT'in "Şehirlerin Sürdürülebilirlik Performanslarının Bir Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Tekniği ile Değerlendirilmesi" başlıklı Konya Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yürüttüğü yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Katkılarından ötürü danışman ve hakem öğretim üyelerimize sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Achillas, C., Moussiopoulos, N., Karagiannidis, A., Baniyas, G., Perkoulidis, G., 2013, The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review, *Waste Management & Research*, 31 (2): 115-129.
- Arslan, T., Khisty, C.J., 2005, A rational reasoning method from fuzzy perceptions in route choice, *Fuzzy Sets And Systems*, 150 (3): 419-435.
- Baky, I.A., 2009, Fuzzy goal programming algorithm for solving decentralized bi-level multi-objective programming problems, *Fuzzy Sets and Systems*, 160 (18): 2701-2713.
- Baycan-Levent, T., Vreeker, R., Nijkamp, P., 2009, A multi-criteria evaluation of green spaces in European cities, *European Urban and Regional Studies*, 16(2): 193-213.
- Baykal, N., Beyan, T., 2004, Bulanık mantık: ilke ve temelleri, Bıçaklar Kitabevi, Ankara.
- Bellman, R.E., Zadeh, L.A., 1970, Decision making in a fuzzy environment, *Management Science*, 17 (4): 141-164.
- Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., & Giacchetta, G. (2012). Design for environment as a tool for the development of a sustainable supply chain (p. 383). New York: Springer.
- Bilbao-Terol, A., Arenas-Parra, M., Cañal-Fernández, V., 2012, A fuzzy multi-objective approach for sustainable investments, *Expert Systems with Applications*, 39 (12): 10904-10915.
- Bouzon, M., Govindan, K., Rodriguez, C.M.T., Campos, L.M.S., 2016, Identification and analysis of reverse logistics barriers using fuzzy Delphi method and AHP, *Resources, Conservation and Recycling*, 108 (2016): 182-197.
- Buckley, J.J., 1985, Ranking alternatives using fuzzy members, *Fuzzy Sets and Systems*, 15 (1): 21-31.
- Byun, D.H., The AHP approach for selecting an automobile purchase model, *Information & Management*, 38 (5): 289-297.
- Chandran, B., Golden, B., Wasil, E., 2005, Linear programming models for estimating weights in the analytic hierarchy process, *Computers & Operations Research*, 32 (9): 2235-2254.
- Chang, D.S., Chen, S.H., Hsu, C.W., Hu, A.H., Tzeng, G.H., 2015, Evaluation framework for alternative fuel vehicles: sustainable development perspective, *MDPI Journals of Sustainability* 2015, 7, 11570-11594.
- Chang, D.Y., 1996, Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95 (3): 649-655.
- Cilliers, E.J., Timmermans, W., Van den Goorbergh, F., Slijkhuis, J., 2015, Green place-making in practice: from temporary spaces to permanent places, *Journal of Urban Design*, 20 (3): 349-366.
- Çitli, N., 2006, Bulanık çok kriterli karar verme, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Deng, H., 1999, "Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison", *International Journal of Approximate Reasoning*, 21(3), 215-231.

- Ecer, F., Küçük, O., Tedarikçi seçiminde analitik hiyerarşi yöntemi ve bir uygulama, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 11 (1): 355-369.
- Egilmez, G., & Tatari, O. (2011). A dynamic modeling approach to highway sustainability: Strategies to reduce overall impact. *Transportation Research Part A*, 46(7), 1086–1096.
- Egilmez, G., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2013). Sustainability assessment of U.S. manufacturing sectors: An economic input output-based frontier approach. *Journal of Cleaner Production*, 53, 91–102.
- Egilmez, G., Kucukvar, M., Tatari, O., & Bhutta, M. K. S (2014). Supply chain sustainability assessment of the U.S. food manufacturing sectors: A life cyclebased frontier approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 82, 8–20.
- Egilmez, G., & Park, Y. S. (2014). Transportation related carbon, energy and water footprint analysis of U.S. manufacturing: An eco-efficiency assessment. *Transportation Research Part D*, 32(October), 143–159.
- Egilmez, G., Gumus, S., Kucukvar, M., 2015, Environmental sustainability benchmarking of the U.S. and Canada metropolises: An expert judgment-based multi-criteria decision making approach, *Cities* 42, 31-41.
- Environmental Protection Agency (EPA) (2013). Environmental indicators. Green communities. <http://www.epa.gov/greenkit/indicator.htm>.
- Evren, R., Ülengin, F. (1992), Yönetimde Çok Amaçlı Karar Verme, İTÜ Yayınları, İstanbul.
- Güngör, İ., Büyüker İşler, D., 2005, Analitik hiyerarşi yaklaşımı ile otomobil seçimi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 1 (2): 21-33.
- Hsu, C.W., Kuo, T.C., Shyu, G.S., Chen, P.S., 2014, Low carbon supplier selection in hotel industry, *MDPI Journals of Sustainability* 2014, 6, 2658-2684.
- Hu, K.H., Chen, F.H., Tzeng, G.H., 2016, Evaluating the improvement of sustainability of sports industry policy based on MADM, *MDPI Journals of Sustainability* 2016, 8, 606.
- Ignatius, J., Rahman, A., Yazdani, M., Šaparauskas, J., Haron, S.H., 2016, An integrated fuzzy ANP-QFD approach for green building assessment, *Journal of Civil Engineering and Management*, 22 (4): 551-563.
- IPCC (2007a). Climate change 2007: synthesis report, intergovernmental panel on climate change, IPCC (2007b). Third Assessment Report Working Group II: Impacts, *Adaptation and Vulnerability*, Annex I, Glossary, 941-953.
- Kahn, M.E. Green Cities: Urban Growth and the Environment; Brookings Institution Press: Washington, DC, USA, 2006.
- Kahraman, C., Ulukan, Z., Tolga, E., 1998, "A fuzzy weighted evaluation method using objective and subjective measures", *Proceedings of the International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems*, 1, 57-63.
- Kahraman, C., Cebeci, U., Ulukan, Z., 2003, Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP, *Logistics Information Management*, 16 (6): 382-394.
- Kahraman, C., Cebeci, U., Ruan, D., 2004, Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey, *International Journal of Production Economics*, 87 (2): 171-184.
- Kaplan, S., 2007, Hava savunma sektörü tezgah yatırım projelerinin bulanık AHP ile değerlendirilmesi, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Karakaşoğlu, N., 2008, Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri ve uygulama, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Kucukvar, M., & Tatari, O. (2013). Towards a triple bottom-line sustainability assessment of the U.S. construction industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(5), 958–972. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0545-9>.
- Kucukvar, M., Gumus, S., Egilmez, G., Tatari, O., 2014, Ranking the sustainability performance of pavements: An intuitionistic fuzzy decision making method, *Automation in Construction*, 40 (2014) 33-43.

- Kumar, D., Katoch, S.S., 2015, Sustainability assessment and ranking of run of the river (RoR) hydropower projects using analytical hierarchy process (AHP): a study from Western Himalayan Region of India, *Journal of Mountain Science* 12 (5): 1315-1333.
- Kuo, R.J., Chi, S.C., Kao, S.S., 2002, "A decision support system for selecting convenience store location through integration of fuzzy AHP and artificial neural network", *Computers in Industry*, 47(2), 199-214.
- Kuo, T.C., Chia, W.H., Li, J.Y., 2015, Developing a green supplier selection model by using the DANP with VIKOR, *MDPI Journals of Sustainability* 2015, 7, 1661-1689.
- Kwiesielewicz, M., Uden, E.V., 2004, Inconsistent and contradictory judgements in pairwise comparison method in the AHP, *Computers & Operations Research*, 31 (5): 713-719.
- Laininen, P., Hamalainen, R.P., 2003, Analyzing AHP-matrices by regression. *European Journal of Operational Research*, 148, 514-524.
- Lu, I.Y., Kuo, T., Lin, T.S., Tzeng, G.H., Huang, S.L., 2016, Multicriteria decision analysis to develop effective sustainable development strategies for enhancing competitive advantages: case of the TFT-LCD industry in Taiwan, *MDPI Journals of Sustainability* 2016, 8, 646.
- McNeill, F.M., Thro, E., 1994, Fuzzy logic: a practical approach, Academic Press, London.
- Moreno Pires, S., Fidélis, T., & Ramos, T. B. (2014). Measuring and comparing local sustainable development through common indicators: Constraints and achievements in practice. *Cities*, 39, 1-9.
- Mori, K., Christodoulou, A., 2012, Review of sustainability indices and indicators: towards a new city sustainability index (CSI). *Environ. Impact Assess. Rev.* 32(1): 94-106.
- Olewiler, N. (2006). Environmental sustainability for urban areas: The role of natural capital indicators. *Cities*, 23(3), 184-195.
- O'neil, J.A., Gallagher, C.E., 2014, Determining what is important in terms of the quality of an urban green network: a study of urban planning in England and Scotland, *Planning, Practice & Research*, 29 (2): 202-216.
- Orman Genel Müdürlüğü, İllere Göre Orman Varlığı, <https://www.ogm.gov.tr/Sayfalar/Ormanlarimiz/İllere-Gore-Orman-Varligi.aspx>, [Ziyaret Tarihi: 1 Aralık 2017].
- Paksoy, T., Yapıcı Pehlivan, N., Özceylan, E. 2013, Bulanık Küme Teorisi, Nobel Yayıncılık, Ankara, 195-296.
- Roy, B., 1996, Multicriteria Methodology for Decision Aiding; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
- Saaty, T.L., 1980, The analytic hierarchy process, McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T. L., 2001, Decision making with dependence and feedback-the analytic network process, RWS Publications, Pittsburgh, USA.
- Saaty, T.L., Özdemir M.S., 2003, Why the magic number seven plus or minus two, *Mathematical and Computer Modeling*, 38 (3-4): 233-244.
- Scholl, A., Laura, M., Roland, H., Michael, S., 2005, Solving multi attribute design problems with analytic hierarchy process and conjoint analysis: an empirical comparison, *European Journal of Operational Research*, 164 (3): 760-777.
- Shen, L., Peng, Y., Zhang, X., Wu, Y., 2012, An alternative model for evaluating sustainable urbanization, *Cities* 29(1): 32-39.
- Triantaphyllou, E., Lin, C.-T., 1996, Development and evaluation of five fuzzy multiattribute decision-making methods, *International Journal of Approximate Reasoning*, 14: 281-310.
- Tsai, W.H., Lin, S.J., Lee, Y.F., Chang, Y.C., Hsu, J.L., 2013, Construction method selection for green building projects to improve environmental sustainability by using an MCDM approach, *Journal of Environmental Planning and Management*, 56 (10): 1487-1510.
- Türkiye İstatistik Kurumu, Temel İstatistikler, <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temellist>, [Ziyaret Tarihi: 1 Aralık 2017].

- Türk Toraks Derneği Güz Sempozyumu, Hava Kirliliği ve Akciğer Sağlığı, <http://www.ttdhavakirliligi.org/>, [Ziyaret Tarihi: 24 Kasım 2017].
- United Nations, 2007, *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*, third ed. United Nations Publication, New York.
- Van Laarhoven, P.J.M., Pedrcyz, W.A., 1983, Fuzzy extension of Saaty's priority theory, *Fuzzy Sets and Systems*, 11 (1-3): 229–241.
- Wątróbski, J., Ziemba, P., Jankowski, J., Zioło, M., 2016, Green energy for a green city-a multi-perspective model approach, *MDPI Journals of Sustainability* 2016, 8,702.
- Weck, M., Klocke, F., Schell, H., Rüenauer, E., 1997, "Evaluating alternative production cycles using the extended fuzzy AHP method", *European Journal of Operational Research*, 100(2), 351- 366.
- Yan, A.T., Lai, M.J., Lin, C.Y., 2014, An evaluation model for improving green building by integrating DEMATEL based ANP and VIKOR, 2014 *International Symposium on Computer, Consumer and Control*.
- Zahedi, F., 1987, A utility approach to the with analytic hierarchy process, *Mathematical Modeling*, 9 (3-5): 387-395.
- Zanakis, S.H. , Solomon, A. ,Wishart, N., Dublish, S., 1998, Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods, *European Journal of Operational Research*, 107: 507–529.
- Zhang, L., Xu, Y., Yeh, C.H., Liu, Y., Zhou, D., 2016, City sustainability evaluation using multi-criteria decision making with objective weights of interdependent criteria, *Journal of Cleaner Production*, 131 (2016): 491-499.
- Zhang, X., Xu, Z., Liu, M., 2016, Hesitant trapezoidal fuzzy QUALIFLEX method and its application in the evaluation of green supply chain initiatives, *MDPI Journals of Sustainability* 2016, 8, 952.
- Zhao, H., Li, N., 2016, Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective, *MDPI Journals of Energy* 2016, 9,270.

## KREN KİRİŞLERİNİN HAREKETLİ TEKİL YÜKE MARUZ SÖNÜMLÜ EULER-BERNOULLİ KİRİŞİ OLARAK MODELLENMESİ VE DİNAMİK ANALİZİ

<sup>1</sup>C. Oktay AZELOĞLU, <sup>2</sup>Sami KURAL

<sup>1,2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
<sup>1</sup>azeloglu@yildiz.edu.tr, <sup>2</sup>samikural@gmail.com

(Geliş/Received: 27.03.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.05.2018)

**ÖZ:** Hareketli yük problemi pek çok mühendislik alanını etkileyen önemli bir konudur ve krenlerde dinamik etkilere neden olmaktadır. Günümüzde, krenler daha yüksek hızlarla çalıştığından, kren tasarımında hareketli yükten kaynaklanan dinamik etkilerin çok iyi incelenmesi ve analiz edilmesi gerekir. Bu nedenle, bu çalışmada hareketli yüke maruz kren kirişlerinin dinamik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, kren ana kirişini temsil eden basit mesnetli, homojen, izotropik bir Euler-Bernoulli tipi kiriş için hareketli yük problemi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Hareketli yük kiriş tekil bir kuvvet şeklinde etki ettirilmiş ve kiriş önceki çalışmalardan farklı olarak sönümsüz değil, hafif sönümlü olarak ele alınmıştır. Bu matematiksel ifadelerin çözümünden kren kirişleri için yer değiştirmeleri, eğilme momentini, kesme kuvvetlerini veren matematik modeller elde edilmiştir. Matematik modeller Matlab programında algoritmalar oluşturularak çözülmüş ve çeşitli çalışma senaryoları için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Senaryolar, farklı hızlar ve farklı kütle oranları için belirlenmiş ve her bir senaryo için kirişte sönümlü durumda oluşan yer değiştirmeler, eğilme momenti, kesme kuvveti değerleri grafikler ve çizelgeler halinde verilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca, sonuçlar statik durumla da karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, yüksek hızlarda çalışan krenler için statik hesapların yetersiz kaldığını göstermektedir. Krenlerde, hareketli yükten kaynaklanan dinamik etkilerin çalışma senaryolarına göre analiz edilmesi ve tasarımın buna göre yapılması uygun olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Dinamik davranış, Hareketli yük, Kren kirişleri, Sönümlü matematik model

### Modeling and Dynamic Analysis Of Crane Beams As Euler-Bernoulli Beam with Damped Subject to Moving Singular Load

**ABSTRACT:** The moving load problem is an important issue that affects many engineering fields and causes dynamic effects in the cranes. Nowadays, as the cranes are operated with higher speeds, in the design of the cranes, the dynamic behaviors arising from the moving loads should be investigated and analysed accurately. Therefore, dynamic behaviors of the crane beams under the moving load were investigated in this study. For that purpose, the moving load problem was mathematically stated for a simply supported, homogeneous, an isotropic Euler-Bernoulli type beam representing the main beam of the crane. The moving load is acted as a concentrated, singular load on the beam and the crane beam was obtained as damped, not undamped unlike the previous studies. Thus, from the solution of these mathematical expressions, the mathematical models which gives the deflections, bending moment, shear forces were obtained for the crane beams. Then, the algorithms were created in the Matlab program and the simulation studies were carried out for various working scenarios. The scenarios were determined for different speeds and different mass ratios and every scenario was evaluated by the diagrams and tables the deflections, bending moment, shear force that occurred on the beam in the damped situation. Besides, the results were also compared with the static situation. As a result, the studies show that static calculations are inadequate for cranes working in high speed. So, it will be appropriate both to analyze

dynamic behaviors arising from the moving load according to the working scenarios and to design according to obtained results for the cranes.

**Keywords:** Crane beams, Dynamic behavior, Mathematical model with damped, Moving load

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hareketli yük altındaki kiriş benzeri yapıların titreşim analizi, yapı dinamiğinde ve üzerinde hareket eden yükler bulunan demir yolu, karayolu köprülerinde, viyadüklerde ve buna benzer birçok mühendislik alanında önemli bir konudur (Di Lorenzo ve diğ., 2017). Hareketli yükler transport sistemlerinde özellikle krenlerde de önemli dinamik etkilere neden olurlar. Son yıllarda hareketli yüklerin daha hızlı hareket ettirilmesi beklenirken aynı zamanda daha ince ve hafif yapıların tasarlanması istenmesi hareketli yük probleminin neden olduğu dinamik etkileri arttırmaktadır (Di Lorenzo ve diğ., 2017).

Hareketli yük problemi günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından teorik ve deneysel çalışmalarla incelenmiştir. (Fryba, 1999), kiriş üzerinde hareket eden yüklerin etkilerini geniş bir yelpazede incelemiştir. Çalışması hareketli yük altındaki kirişlerin dinamik davranışları için temel kaynak niteliğindedir. (Azeloğlu ve diğ., 2015), hareketli yük altında çalışan kren kirişlerinin deformasyon analizlerini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Bu amaçla bir sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve nümerik modelin sonuçlarının geçerliliğini doğrulamak için deneyler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. (Esen, 2009,2010), doktora tezinde hareketli yüke maruz köprülü kren kirişlerinin sönümsüz dinamik davranışlarını Newmark metodu ve basit mesnetli Euler-Bernoulli kirişi için çıkarılan hareket denklemlerinden elde edilen matematik modellerle incelemiştir. Bu çalışmadan farklı olarak kiriş sönümsüz olarak ele alınmış ve analizlerde sonlu elemanlar yöntemine göre çözüm yapan SAP 2000 paket programı kullanılmıştır. (Yang ve diğ., 2000), hareketli osilatör problemi olarak adlandırılan 1 boyutlu elastik sistemi incelemiştir. Problem, bağlı yer değiştirme modeli kullanılarak formüle edilmiştir. Birleşik hareket denklemleri, doğrudan sayısal yöntem ile çözülebilmesi için integral denklemlere dönüştürülmüştür. Yay ve basit mesnetli kiriş için sayısal sonuçlar sunulmuştur ve hareketli kuvvet sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. (Pesterev ve diğ., 2003), bu çalışmada hareketli bir kuvvete maruz bir kirişin titreşim problemini incelemiştir. Çalışmanın amacı, hareketli bir kuvvetin herhangi bir hız değerinde kirişin maksimum sehimini bulmak için basit bir araç geliştirmektir. Maksimum davranış fonksiyonunu her iki ucu sabit mesnetli kiriş için sayısal olarak ve basit mesnetli kiriş için ise analitik olarak hesaplamışlardır. Daha yüksek titreşim modlarının maksimum sehim üzerindeki etkisini de incelemiştir. (Low, 1997), bu çalışmada, çoklu kütleleri taşıyan değişik kirişler için öz fonksiyonların kullanılmasıyla bir titreşim analizi yapmıştır. Analitik sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Mod şekillerini içeren bir karşılaştırma çalışması yapılmış ve polinom yaklaşımlarıyla incelemiştir. (Foda ve diğ., 1998), basit mesnetli üzerinde hareketli kütle olan Bernoulli-Euler kirişinin davranışını saptamak için bir dinamik Green fonksiyonu yaklaşımı kullanmışlardır. Önerilen metod kirişin sehimini için basit matris açıklamalarını ihtiva etmektedir. Çeşitli hız ve kütle oranları için kirişin dinamik davranışlarını incelemiştir. (Azeloğlu ve Kural, 2017), yaptıkları çalışmada kren kirişlerini tekil kuvvete maruz sönümsüz durumdaki bir Euler-Bernoulli kirişi olarak ele almışlar ve yer değiştirmeleri veren matematik modeli elde ederek farklı senaryolara göre benzetim çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Ancak bu çalışmada kiriş sönümsüz olarak ele alınmış ve eğilme momentlerini ve kesme kuvvetini veren matematik modeller elde edilmemiştir. Hareketli yük probleminin çözümüne ilişkin çalışmalar literatürde devam etmektedir.

Bu çalışmada hareketli yüke maruz kren kirişlerinin dinamik davranışları incelenmiştir. Literatür incelemesinde yer verilen diğer araştırmacıların ve yazarların çalışmalarında kren kirişlerinin sönümsüz olarak incelendiği görülmektedir. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak kren kirişi hafif sönümlü olarak ele alınmış ve incelenmiştir. Bu amaçla, kren ana kirişini temsil eden basit mesnetli, homojen,

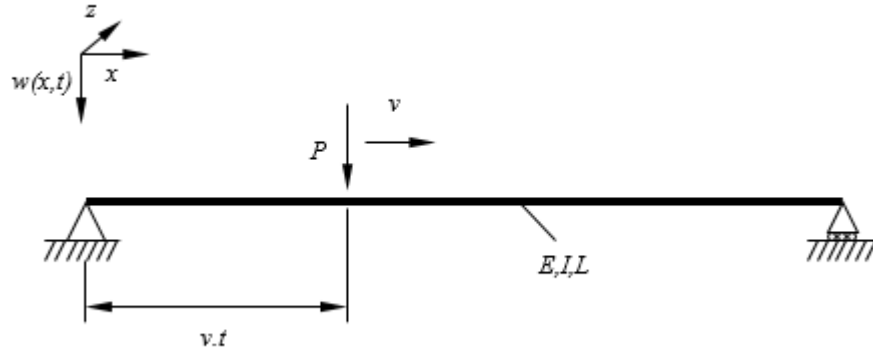


izotropik bir Euler-Bernoulli tipi kirişinin hareket denklemleri sınır ve başlangıç koşullarından elde edilerek hareketli yük için çözülmüş ve hafif sönümlü durum için sistemin dinamiğini yansıtan matematik modeller elde edilmiştir. Bu matematik modeller Matlab programında algoritma oluşturularak çözülmüş ve kren kirişi üzerinde farklı hız ve yük değerleri için belirlenen çalışma senaryolarına göre benzetim çalışmaları yapılmış ve sonuçlar grafikler ve çizelgeler halinde verilmiştir. Ayrıca bir değerlendirme yapılabilmesi açısından sonuçlar statik durumdaki değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç kısmında benzetim çalışmalarından elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilmiş ve kren kirişlerinin tasarımı açısından bazı konstrüktif öneriler sunulmuştur.

## MATEMATİK MODEL (MATHEMATICAL MODEL)

### Problemin Formülasyonu (Formulation of The Problem)

Üzerinde hareketli yük bulunan basit mesnetli, homojen, izotropik Euler-Bernoulli tipi kirişin fiziksel modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Yük kirişin sol tarafından sağ tarafına sabit bir hızda hareket etmektedir. Kirişin dönme ataleti ve kayma yer değiştirmesi dikkate alınmamaktadır.



Şekil 1. Tekil kuvvet şeklinde bir hareketli yüke maruz kren kirişi

Figure 1. A crane beam subjected to a moving load in the form of singular force

Basit mesnetli, homojen, izotropik bir Euler-Bernoulli tipi kirişin dinamik düşey yer değiştirmelerinin kısmi diferansiyel denklemi aşağıda gösterilmiştir (Fryba, 1999).

$$EI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + 2\mu\omega_b \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} = P\delta(x - vt) \quad (1)$$

Burada,  $E$  Young modülü,  $I$  atalet momenti,  $\mu$  kirişin birim ağırlığı,  $x$  kirişin koordinat eksenini,  $t$  zaman,  $w(x, t)$  kirişin düşey yer değiştirmesi,  $\omega_b$  sönümlü dairesel frekansı,  $P$  hareketli tekil yüke eşdeğer kuvveti,  $\delta(x - vt)$  Dirac-delta fonksiyonudur.

Basit mesnetli bir kirişin sınır ve başlangıç şartları ( $x=0$  ve  $x=L$  için), (2) ve (3) eşitliklerindeki gibi ifade edilebilir.

$$w(0, t) = w(L, t) = \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

$$w(x, 0) = \frac{\partial w(x, 0)}{\partial t} = 0 \quad , t=0 \text{ için} \quad (3)$$

Mekanikte Dirac-delta fonksiyonu,  $\delta(x)$ ,  $x=0$  noktasında hareket eden birim konsantre kuvvet olarak düşünülebilir. Dirac-delta fonksiyonu (4) eşitliğinde Heaviside fonksiyonunun dağılımsal türevi olarak tanımlanmıştır.  $H(x)$  fonksiyonu, Heaviside birim fonksiyonu olarak eşitlik (5)'deki gibi tanımlanmaktadır (Fryba, 1999), (Mikvsinski ve diğ., 1957).

$$\delta(x) = \frac{dH(x)}{dx} \quad (4)$$

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{için } x < 0 \\ 1 & \text{için } x \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Kiriş üzerindeki yükü ifade eden genelleştirilmiş bir fonksiyon olan Dirac-delta fonksiyonu (6) ve (7) ifadelerinde gösterilmiştir.

$$p(x,t) = \delta(x)P \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)dx = 1 \quad (7)$$

Dirac-delta fonksiyonunun aşağıdaki ilişkileri mevcuttur ( $a, b, \xi$  sabit sayılar ve  $f(x)$ ,  $[a,b]$  aralığında sürekli bir fonksiyondur).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-a)f(x)dx = f(a) \quad (8)$$

$$\int_a^b \delta(x-\xi)f(x)dx = \begin{cases} 0 & \text{için } \xi < a < b \\ f(\xi) & \text{için } a < \xi < b \\ 0 & \text{için } a < b < \xi \end{cases} \quad (9)$$

Dirac-delta fonksiyonunun  $n$ 'inci dereceden genelleştirilmiş türevi daha genel olarak (10) ifadesindeki gibi düzenlenir.

$$\int_a^b \delta^{(n)}(x-\xi)f(x)dx = \begin{cases} 0 & \text{için } \xi < a < b \\ (-1)^n f^{(n)}(\xi) & \text{için } a < \xi < b \\ 0 & \text{için } a < b < \xi \end{cases} \quad (10)$$

Sınır ve başlangıç koşulları olan denklem (2) ve (3), denklem (1) ile birlikte integral dönüşüm metodu yardımıyla çözülmüştür. İlk olarak denklem (1)'in her bir terimi  $\sin(j\pi x/L)$  ile çarpılmış ardından  $0$  ve  $L$  aralığında  $x$ 'e bağlı olarak integrali alınmıştır. Denklem (1)'i çözmek için ek açıklamalarda verilen Fourier sinüs sonlu integral dönüşümü yardımıyla denklem (11) elde edilmiştir.

$$V(j,t) = \int_0^L w(x,t) \sin \frac{j\pi x}{L} dx$$

$$, j=1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

$$w(x,t) = \frac{2}{L} \sum_{j=1}^{\infty} V(j,t) \sin \frac{j\pi x}{L}$$

Denklem (11), orijinal  $w(x,t)$ 'nin dönüşümünün  $V(j,t)$  olduğunu göstermektedir. Verilen yöntemler ile sınır koşulları (2) ve Dirac fonksiyonun, (8) eşitliğindeki özelliklerini kullanarak ek açıklamalarda verilen Fourier sinüs sonlu integral dönüşüm metodu yardımıyla (12) eşitliği elde edilmiştir.

$$\frac{j^4 \pi^4}{L^4} EIV(j,t) + \mu \ddot{V}(j,t) + 2\mu \omega_b \dot{V}(j,t) = P \sin \frac{j\pi vt}{L} \quad (12)$$

Basit mesnetli bir kirişin  $j$ 'inci mod titreşimindeki doğal dairesel frekansı denklem (13)'de gösterilmiştir.

$$\omega_j^2 = \frac{j^4 \pi^4}{L^4} \frac{EI}{\mu} \quad (13)$$

Doğal frekans ise denklem (14)'de verilmiştir.

$$f_j = \frac{\omega_j}{2\pi} = \frac{j^2 \pi}{2L^2} \left( \frac{EI}{\mu} \right)^{1/2} \quad (14)$$

Hareketli yükün kirişi etkileyen dairesel frekansı ise denklem (15)'de ifade edilmektedir.

$$\omega = \frac{\pi v}{L} \quad (15)$$

(12) eşitliği, denklem (13), (14) ve (15) kullanılarak düzenlendiğinde (16) ifadesi elde edilir.

$$\ddot{V}(j,t) + 2\omega_b \dot{V}(j,t) + \omega_j^2 V(j,t) = \frac{P}{\mu} \sin j\omega t \quad (16)$$

(16) ifadesini çözmek için ek açıklamalarda verilen Laplace-Carson integral dönüşüm metodu kullanılmıştır. Bu amaçla, denklem (16) ilk olarak  $e^{-pt}$  ile çarpılmış ve her bir terimi  $t$ 'ye bağlı olarak 0 ve  $\infty$  aralığında integrali alınmış ardından  $p$  ile çarpılmıştır. Burada,  $p$  kompleks düzlemdeki bir değişkendir. Laplace-Carson integral dönüşüm metodu ve yukarıdaki işlemlerin uygulanmasıyla (17) eşitliği elde edilmiştir.

$$V^*(j, p) = p \int_0^{\infty} V(j, t) e^{-pt} dt \quad (17)$$

$$V(j, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a_0 - i\infty}^{a_0 + i\infty} e^{tp} \frac{V^*(j, p)}{p} dp$$

(17) ifadesinde ikinci eşitlikte yer alan  $a_0$  integralin, kompleks değişken  $e^{tp} V(j, t) / p$ 'nin fonksiyonunun tüm tekil değerlerinin sağında kalan sanal eksene paralel düz bir çizgi boyunca alındığını ifade etmektedir. Bu nedenle bütün tekilliklerin gerçek argümanı  $a_0$ 'dan küçüktür (Fryba, 1999).

Denklem (16), (17) eşitliği, başlangıç koşulları (3) ve ek açıklamalarda verilen Laplace-Carson integral dönüşüm metoduna göre dönüştürülerek (18) eşitliği elde edilir ve (19) ifadesindeki gibi düzenlenebilir.

$$p^2 V^*(j, p) + 2\omega_b p V^*(j, p) + \omega_j^2 V^*(j, p) = \frac{Pj\omega}{\mu} \frac{p}{p^2 + j^2 \omega^2} \quad (18)$$

$$V^*(j, p) = \frac{Pj\omega}{\mu} \frac{p}{p^2 + j^2 \omega^2} \frac{1}{p^2 + 2\omega_b p + \omega_j^2} \quad (19)$$

Kompleks değişkenli fonksiyon (19) eşitliğinin kutuplarının pozisyonuna bağlı olarak, analizi daha kolay hale getiren birkaç durum arasında ayırım yapılabilmesi için aşağıdaki iki boyutsuz parametre tanımlanmıştır. Burada, hız parametresini (20) ve sönümleme parametresini ifade eden (21) aşağıda verilmiştir (Fryba, 1999).

$$\alpha = \frac{\omega}{\omega_j} = \frac{v}{2f_j L} = \frac{T_j}{2t} = \frac{vL}{\pi} \left( \frac{\mu}{EI} \right)^{(1/2)} = \frac{v}{v_{kr}} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{\omega_b}{\omega_j} = \frac{\omega_b L^2}{\pi^2} \left( \frac{\mu}{EI} \right)^{(1/2)} \quad (21)$$

(20) ve (21) eşitliklerinde kullanılan bazı değerler aşağıda verilmiştir. Bunlar: (22) eşitliği,  $j$ 'inci mod serbest titreşim periyodudur. (23) eşitliği, kiriş üzerinde hareket eden yükün hareket süresidir. (24) eşitliği, hareketli yükün kritik hızıdır.

$$T_j = \frac{1}{f_j} \quad (22)$$

$$t = \frac{L}{v} \quad (23)$$

$$v_{kr} = 2f_j L = \frac{\pi}{L} \left( \frac{EI}{\mu} \right)^{1/2} \quad (24)$$

(25) eşitliği,  $x=L/2$  noktasında statik tekil bir kuvvet  $P$  ile yüklü bir kirişin statik yer değişimini ifade etmektedir.

$$v_0 = \frac{PL^3}{48EI} \approx \frac{2PL^3}{\pi^4 EI} \quad (25)$$

Hafif sönümlü ( $\beta \ll 1$ ) bir kirişin dairesel frekansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\omega'_{(j)}{}^2 = \omega_{(j)}^2 - \omega_b^2 \quad (26)$$

Hafif sönümleme durumunda (19) eşitliğinin dört kutbu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} 1.kutup &= i.j.\omega, & 3.kutup &= -\omega_b + i\omega'_{(j)}, \\ 2.kutup &= -i.j.\omega, & 4.kutup &= -\omega_b - i\omega'_{(j)}. \end{aligned} \quad (27)$$

$p^2 + 2\omega_b p + \omega_{(j)}^2 = (p + \omega_b)^2 + \omega'_{(j)}{}^2$  olduğundan orijinal  $V(j,t)$ , ek açıklamalarda verilen Çizelge A2'de bulunan son eşitlik yardımıyla hesaplanabilir. Denklem (11)'deki birinci eşitlik yine aynı denklemdeki ikinci eşitlikte yerine konulup, ters Fourier dönüşümü yapıp,  $t \leq T$  için bazı düzenlemelerden sonra kirişteki sehimin analitik ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir (Fryba, 1999), (Esen, 2009).

$$\begin{aligned} w(x,t) &= \frac{2PL^3}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2 [j^2 (j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2 \beta^2]} \cdot \sin \frac{j\pi x}{L} \\ &\left[ j^2 (j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha [j^2 (j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2]}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} \cdot e^{-\omega_b t} \cdot \sin \omega'_{(j)} t - 2j\alpha\beta (\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cdot \cos \omega'_{(j)} t) \right] \quad (28) \end{aligned}$$

Eğilme momenti ( $M(x,t)$ ) ve Kesme kuvveti ( $T(x,t)$ ) ifadeleri, eşitlik (28)'in denklem (29) ve (30)'da bulunan eşitliğinde yerine yazılıp gerekli işlemlerin uygulanmasıyla elde edilmiştir.

$$M(x,t) = -EI \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \quad (29)$$

$$T(x,t) = -EI \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} \quad (30)$$

$P$ , tekil kuvvetinin statik olarak uygulandığı durumda kiriş orta açıklığındaki statik eğilme momenti ve kesme kuvveti (31) ve (32) eşitliklerinde gösterilmiştir (Fryba, 1999).

$$M_0 = \frac{PL}{4} \quad (31)$$

$$T_0 = P \quad (32)$$

Sonuç olarak hareketli tekil kuvvete maruz kirişte eğilme momenti ve kesme kuvvetini veren genel denklemler aşağıda gösterilmiştir.

$$M(x,t) = M_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{8j^2}{\pi^2} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2[j^2(j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2]} [j^2(j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha[j^2(j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2]}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t - 2j\alpha\beta(\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cos \omega_{(j)} t)] \quad (33)$$

$$T(x,t) = T_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2j^3}{\pi} \cos \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2[j^2(j^2 - \alpha^2)^2 + 4\alpha^2\beta^2]} [j^2(j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \frac{j\alpha[j^2(j^2 - \alpha^2) - 2\beta^2]}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t - 2j\alpha\beta(\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cos \omega_{(j)} t)] \quad (34)$$

### Sönümlü Matematik Model (The Mathematical Model with Damped)

Denklem (28), sırasıyla sınır ve başlangıç koşulları olan denklem (2) ve (3)'e göre tekrar düzenlenir, hafif sönümlü durum  $\alpha \neq j$ ,  $\beta \ll 1$  ve  $x \leq x$ ,  $v.t \leq L$  için düzenlenirse hafif sönümlü durumda kirişin zamana bağlı düşey yer değiştirmelerini veren (35) ifadesi elde edilir (Fryba, 1999).

(Azeloğlu ve diğ., 2013), kren kirişlerinde Rayleigh sönüm prensibine göre hesaplanan sönüm parametresini  $\beta=0,01$  olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada da sönüm parametresi  $\beta=0,01$  olarak alınmıştır.

$$w(x,t) = \frac{2PL^3}{\pi^4 EI} \sum_{j=1}^{\infty} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2(j^2 - \alpha^2)} \left( \sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t \right) \quad (35)$$

Bu çalışmada (35) ifadesi, kren kirişlerinde hareketli yük altındaki hafif sönümlü dinamik yer değiştirme davranışlarını veren matematik model olarak kullanılacaktır.

Bu durumda, hafif sönümlü haldeki kiriş için eğilme momenti ve kesme kuvvetini veren formülasyonlar ise aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$M(x,t) = M_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2} \sin \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j^2(j^2 - \alpha^2)} \left( \sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t \right)$$

$$(36) T(x,t) = P_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \cos \frac{j\pi x}{L} \frac{1}{j(1 - \alpha^2 / j^2)} \left( \sin j\omega t - \frac{\alpha}{j} e^{-\omega_b t} \sin \omega_{(j)} t \right)$$

(37)

## BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDIES)

Bu bölümde, önceki bölümden elde edilen hafif sönümlü durumdaki matematik modeller Matlab programı kullanılarak simüle edilmiştir. Daha sonra çeşitli çalışma senaryoları için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Senaryolarda kiriş üzerindeki hareketli yükün hızı ( $v$ ), sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 m/s olarak alınmıştır. Bu durumda yük,  $t=0$  anında kirişin sol ucunda olup ve  $t=L/v$  anında kirişin sağ ucuna ulaşmaktadır. Kirişe ait parametreler ise Çizelge 1'de verilmiştir. Bu çalışmada,  $m$  kiriş üzerindeki hareketli yükün ağırlığı yani tekil kuvveti  $P$ 'yi ifade etmektedir.  $M$  ise kirişin özgül ağırlığını göstermektedir. Senaryolarda kütle oranı sırasıyla ( $m/M$ ), 0,2 ve 0,4 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak kütle oranları ve hızlara bağlı olarak toplam 12 senaryo için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 1.** Bu uygulamada kullanılan kren kirişinin malzeme özellikleri

*Table 1. The material properties of the crane beam used in this study*

Parametreler	Semboller	Değerler
Kiriş kesit alanı	A	$1,25 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
Young modülü	E	$2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Kiriş uzunluğu	L	20 m
Atalet momenti	I	$2,7 \times 10^{-5} \text{ m}^4$
Yer çekimi ivmesi	g	$9,81 \text{ m/s}^2$
Kirişin malzeme yoğunluğu	$\rho$	$7900 \text{ kg/m}^3$
Kirişin kütlesi	$M=\rho AL$	2000 kg
Kirişin uzunluk birimi başına kütlesi	$\mu$	100 kg/m

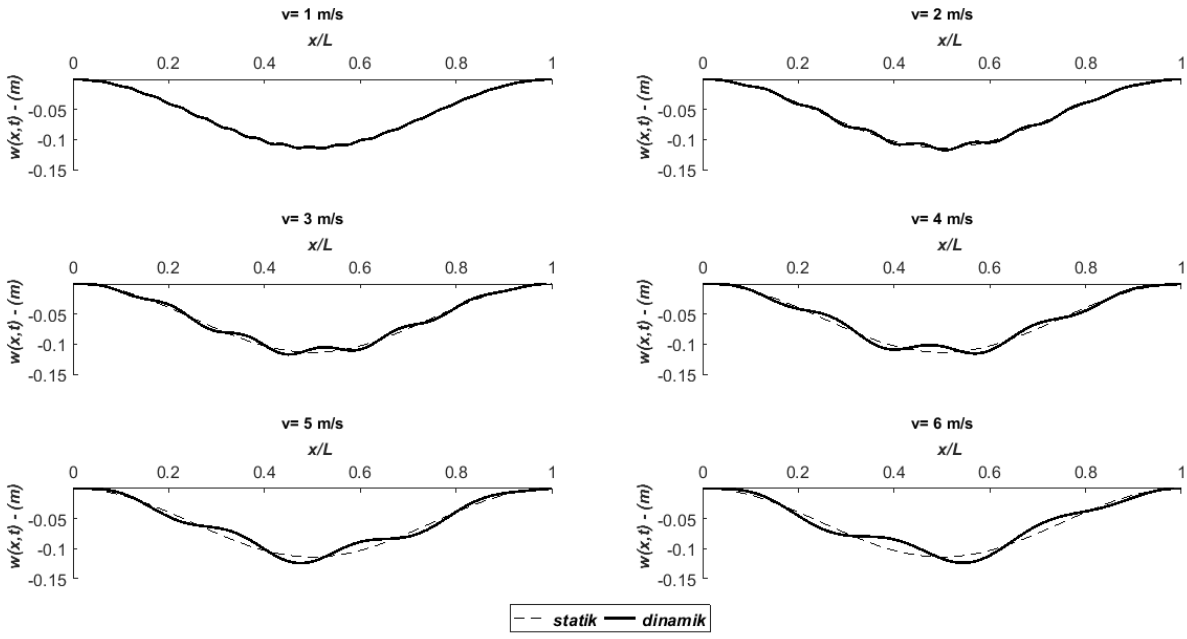
Uygulamalarda, sisteme ait hız parametrelerini ( $\alpha$ ) bulmak için kritik hız değeri ( $v_{kr}$ ) hesaplanmıştır. Bu amaçla denklem (24) ve Çizelge 1'deki değerler kullanılmıştır. Bu sistem için elde edilen kritik hız değeri 37,4 m/s olarak hesaplanır. Buna göre her bir hıza karşılık gelen hız parametresi Çizelge 2'de verilmiştir. Ardından tanımlanan senaryolar için benzetim çalışmalarına başlanmıştır. Tekil yükün hızı, kritik hız değerine yaklaştıkça kiriş üzerinde anormal salınım hareketleri meydana gelmektedir. Kritik hız değerini geçtiğinde ise kirişte rezonans oluşmaktadır. Böyle bir durumda kirişin dinamik davranışlarını saptamak için yapılan benzetim çalışmaları uygun olmayan sonuçlar verecektir.

**Çizelge 2.** Farklı hızlardaki hız parametreleri

*Table 2. Speed parameters at various speeds*

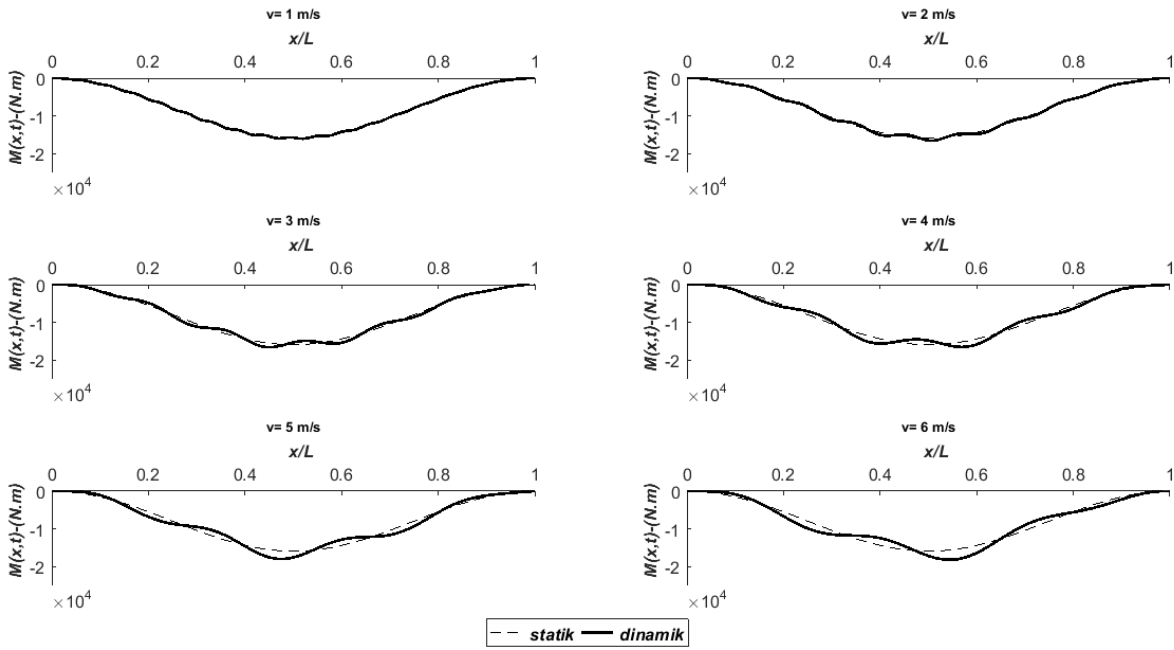
v [m/s]	1	2	3	4	5	6
$\alpha$	0,0267	0,0535	0,0802	0,1069	0,1337	0,1604

İlk olarak, kütle oranı ( $m/M$ ) 0,2 ve belirlenen hızlara göre benzetim çalışmaları yapılmıştır. Sönümlü kiriş için elde edilen dinamik yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri grafikler ve çizelgeler halinde verilmiştir.



Şekil 2. Kütle oranı ( $m/M=0,2$ ) için değişik hızlardaki kirişin yer değiştirme grafiği

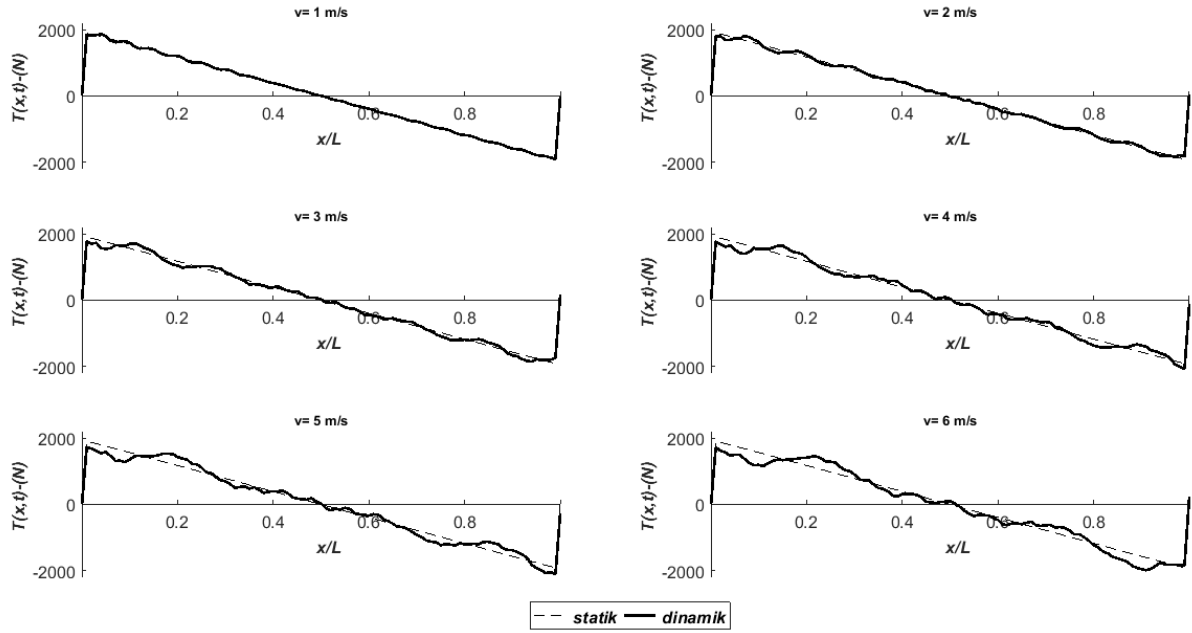
Figure 2. The deflection graph of the beam at various speeds for mass ratio 0.2



Şekil 3. Kütle oranı ( $m/M=0,2$ ) için değişik hızlardaki kirişin eğilme momenti grafiği

Figure 3. The bending moment graph of the beam at various speeds for mass ratio 0.2

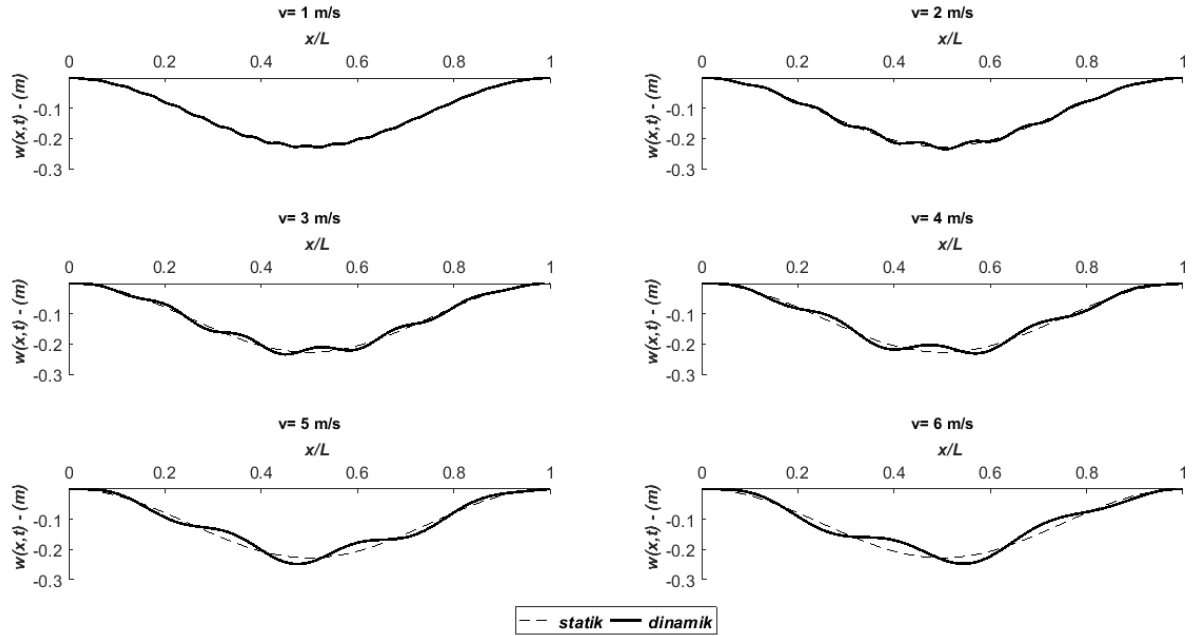




Şekil 4. Kütle oranı ( $m/M=0,2$ ) için değişik hızlardaki kirişin kesme kuvveti grafiği

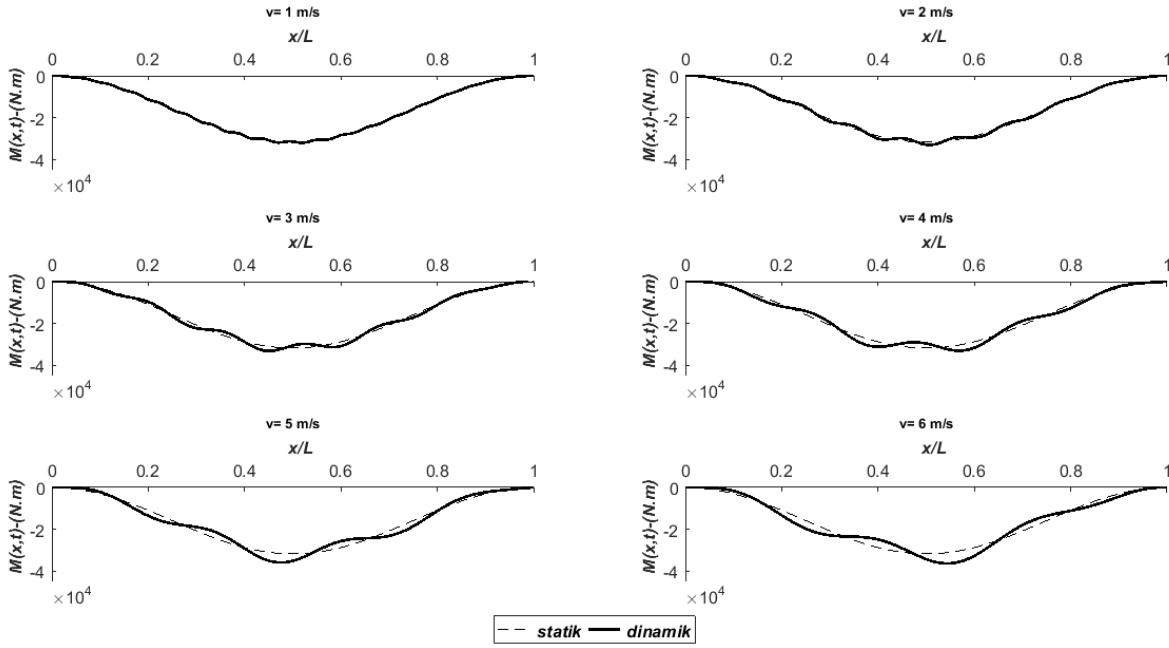
Figure 4. The shear force graph of the beam at various speeds for mass ratio 0.2

İkinci olarak, kütle oranı ( $m/M$ ) 0,4 ve belirlenen hızlara göre benzetim çalışmaları yapılmıştır. Sönümlü kiriş için elde edilen dinamik yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri grafikler ve çizelgeler halinde verilmiştir.



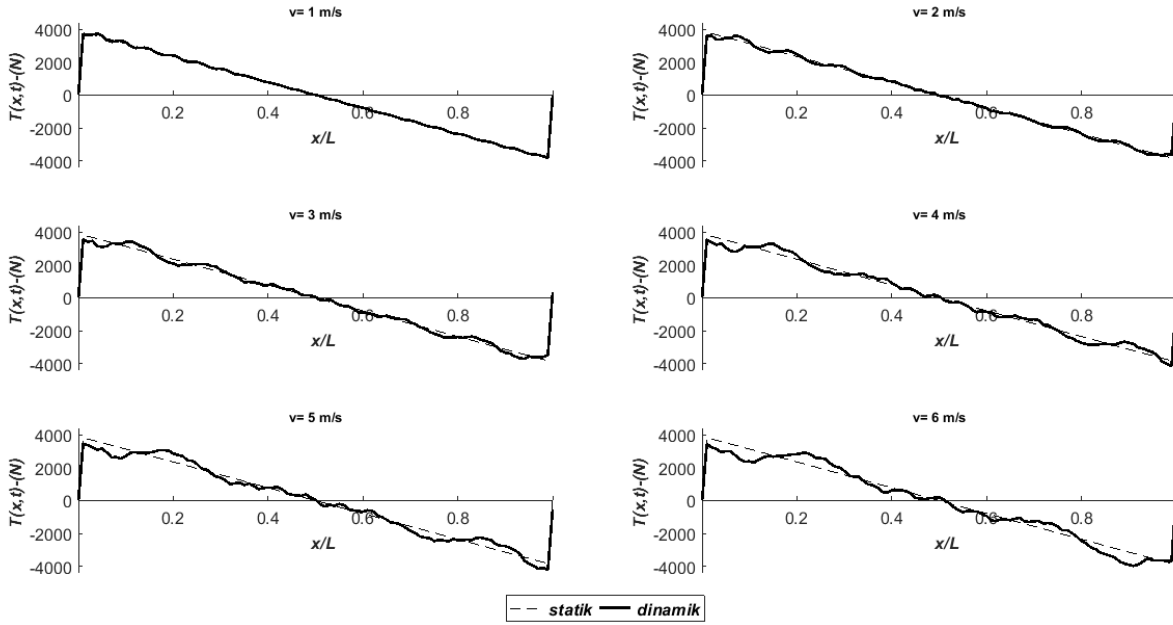
Şekil 5. Kütle oranı ( $m/M=0,4$ ) için değişik hızlardaki kirişin yer değiştirme grafiği

Figure 5. The deflection graph of the beam at various speeds for mass ratio 0.4



**Şekil 6.** Kütle oranı ( $m/M=0,4$ ) için değişik hızlardaki kirişin eğilme momenti grafiği

*Figure 6.* The bending moment graph of the beam at various speeds for mass ratio 0.4



**Şekil 7.** Kütle oranı ( $m/M=0,4$ ) için değişik hızlardaki kirişin kesme kuvveti grafiği

*Figure 7.* The shear force graph of the beam at various speeds for mass ratio 0.4

Grafiklerde verilen sonuçlar Çizelge 3, 4 ve 5'de görüldüğü gibi sayısal olarak verilmiştir. Çizelgelerde değerler karşılaştırma açısından sönümlü ve statik olarak sunulmuştur.

**Çizelge 3.** Kütle oranları (0,2 ve 0,4) için kirişin sönümlü ve statik maksimum yer değiştirme değerleri*Table 3. The damped and static maximum deflection values of the beam for mass ratio 0.2 and 0.4*

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	W <sub>statik</sub> (max) [m]	W <sub>sönümlü</sub> (max) [m]	W <sub>statik</sub> (max) [m]	W <sub>sönümlü</sub> (max) [m]
1	-0,114	-0,114	-0,227	-0,230
2	-0,114	-0,118	-0,227	-0,235
3	-0,114	-0,117	-0,227	-0,234
4	-0,114	-0,116	-0,227	-0,231
5	-0,114	-0,124	-0,227	-0,248
6	-0,114	-0,123	-0,227	-0,247

**Çizelge 4.** Kütle oranları (0,2 ve 0,4) için kirişin sönümlü ve statik maksimum eğilme momenti değerleri*Table 4. The damped and static maximum bending moment values of the beam for mass ratio 0.2 and 0.4*

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	M <sub>statik</sub> (max) [kNm]	M <sub>sönümlü</sub> (max) [kNm]	M <sub>statik</sub> (max) [kNm]	M <sub>sönümlü</sub> (max) [kNm]
1	-16,00	-16,10	-32,00	-32,20
2	-16,00	-16,60	-32,00	-33,12
3	-16,00	-16,61	-32,00	-33,23
4	-16,00	-16,54	-32,00	-33,10
5	-16,00	-18,00	-32,00	-36,00
6	-16,00	-18,20	-32,00	-36,40

**Çizelge 5.** Kütle oranları (0,2 ve 0,4) için kirişin sönümlü ve statik maksimum kesme kuvveti değerleri*Table 5. The damped and static maximum shear force values of the beam for mass ratio 0.2 and 0.4*

v, (Yükün hızı) [m/s]	Kütle Oranları, (m/M)			
	m/M= 0,2		m/M = 0,4	
	T <sub>statik</sub> (max) [kN]	T <sub>sönümlü</sub> (max) [kN]	T <sub>statik</sub> (max) [kN]	T <sub>sönümlü</sub> (max) [kN]
1	±1,90	-1,91	±3,81	-3,82
2	±1,90	-1,84	±3,81	-3,67
3	±1,90	-1,85	±3,81	-3,70
4	±1,90	-2,08	±3,81	-4,16
5	±1,90	-2,10	±3,81	-4,21
6	±1,90	-2,00	±3,81	-4,00

Grafikler ve çizelgeler incelendiğinde hareketli tekil kuvvetin hızı arttıkça kirişte meydana gelen salınımların arttığı, yer değiştirme ve eğilme momenti grafiklerinden de görüldüğü gibi kiriş orta noktasından sapmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Hız parametresi ( $\alpha$ ) değeri ile doğru orantılı olan tekil yük hızının artışı kirişteki salınım hareketlerini arttırmıştır. Bunun yanı sıra, maksimum yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerini çok az değiştirmiştir. Kütle oranlarındaki artışın kirişin salınımı üzerinde büyük bir etki yaratmadığı ve bunun sadece maksimum yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerini arttırdığı Çizelge 3, 4 ve 5 yardımıyla görülebilmektedir. Şekil 2, 3, 5 ve 6 'da kiriş üzerinde maksimum değerlerin oluştuğu yerler incelendiğinde, bu noktaların hızla bağlı olarak kirişin orta noktasından saptığı görülmektedir. Sonuçları genelleştirerek ele alırsak

çalışma hızına göre orta noktadan sağa veya sola doğru minimum %4 ila maksimum %14 oranında sapmalar gözlenmektedir. Şekil 4, 7 ve Çizelge 5'de de görüldüğü gibi kiriş üzerindeki maksimum kesme kuvveti değerlerinin olduğu yerler hızla bağlı olarak kirişin sağ uç mesnet noktasından minimum %2 ila maksimum %8 oranında sola saptığı görülmektedir. Sönümlü dinamik yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerleri kiriş üzerindeki belirli noktalarda ve hızlarda statik değerleri aşmıştır. Sonuç olarak, kren kirişi tasarımlarında statik davranışların yanı sıra sönümlü dinamik davranışların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, hareketli yüke maruz kren kirişi üzerinde hareketli tekil yük bulunan basit mesnetli, homojen, izotropik bir Euler-Bernoulli tipi sönümlü kiriş olarak ele alınmış ve kirişin yer değiştirmelerini, eğilme momentlerini ve kesme kuvvetlerini veren matematiksel ifadeler elde edilmiştir. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak kren kirişi hafif sönümlü olarak ele alınmış ve incelenmiştir. Elde edilen matematik çözümler Matlab programında oluşturulan algoritmalar yardımıyla sayısal olarak simüle edilmiş ve prototip bir kren kirişi üzerinde farklı hız ve farklı kütle oranlarına göre belirlenen senaryolar için sonuçlar elde edilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde dinamik durumdaki yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti değerlerinin statik durumdaki değerleri aştığı görülmektedir. Bu durum özellikle yüksek hızlarda çalışan krenlerde sadece statik hesaplar göz önüne alınarak yapılacak olan tasarımın yetersiz olacağını göstermektedir. Bu alanda çalışan konstrüktörlerin kren kirişlerinin tasarımında statik hesapların yanı sıra krenin çalışma senaryolarına göre sönümlü matematik modeli kullanarak dinamik analizleri gerçekleştirmesi ve tasarımın buna göre yapılması daha uygun olacaktır. Ayrıca, bu çalışmada hafif sönümlü durumdaki kiriş için elde edilen sonuçlar, yazarların önceki çalışmalarında sönümsüz durumdaki kiriş için elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırdıklarında sönümsüz ve hafif sönümlü durumdaki kirişin orta noktasından yüzde sapma miktarlarının çok fazla değişmediği sadece hafif sönümlü durumda maksimum dinamik yer değiştirme, eğilme momenti ve kesme kuvveti miktarlarının sönümsüz duruma göre daha az olduğu görülmüştür.

## SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$A$	Kirişin kesit alanı
$\rho$	Kiriş malzeme yoğunluğu
$g$	Yer çekimi ivmesi
$E$	Kirişin Young Modülü
$x$	Kiriş koordinat ekseni
$z$	Kiriş koordinat ekseni
$H(x)$	Heaviside fonksiyonu
$a, b, \xi$	Sabit katsayılar
$p$	Laplace-Carson integral dönüşümünde kompleks sayı
$V(j, t)$	$w(x, t)$ fonksiyonun Fourier sinüs sonlu integral dönüşümü
$V^*(j, p)$	$V(j, t)$ fonksiyonun Laplace-Carson integral dönüşümü
$t$	Kiriş üzerindeki yükün hareket süresi
$L$	Kirişin uzunluğu
$m$	Hareketli yükün toplam ağırlığı
$M$	Kirişin ağırlığı
$f_j$	Doğal frekans
$T_j$	$j$ 'inci mod serbest titreşim periyodu
$I$	Kirişin kesitinin atalet momenti
$N$	Newton
$j$	Titreşim mod sayısı

$T$	Zaman
$m$	Metre
$s$	Saniye
$i$	Kompleks sayı
$\alpha$	Hız parametresi
$\beta$	Sönüm parametresi
$\delta(x)$	Dirac delta fonksiyonu
$\mu$	Kirişin birim uzunluk başına kütlesi
$\omega$	Yük hareketini ifade eden dairesel frekans
$\omega_b$	Sönüm dairesel frekansı
$\omega_j$	$j$ 'inci mod titreşimindeki doğal dairesel frekans
$\dot{\omega}_j$	Kirişin $j$ 'inci mod sönümlü dairesel frekansı
$v$	Yükün hızı
$v_0$	Statik kuvvet ile yüklü kirişin orta açıklığındaki sehimi
$v_{kr}$	Kritik hız
$P$	Hareketli tekil yüke eşdeğer kuvvet
$w(x,t)$	$x$ noktasında ve $t$ zamanındaki kirişin dinamik düşey yer değiştirmesi
$M(x,t)$	Kirişin $x$ noktasında ve $t$ zamanındaki dinamik eğilme momenti
$T(x,t)$	Kirişin $x$ noktasında ve $t$ zamanındaki dinamik kesme kuvveti
$m/M$	Kütle oranı
$n$	Tam sayı
$M_0$	Statik eğilme momenti
$T_0$	Statik kesme kuvveti

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Azeloğlu, C.O., Sağırılı, A. ve Edinçliler, A., 2013, "Mathematical modelling of the container cranes under seismic loading and proving by shake table", *Nonlinear Dyn*, Vol. 73, pp. 143-154.
- Azeloğlu, C.O., Hasan, A.G., Özen, S., Çolak Çakır, Ö.Ü. ve Sağırılı, A., 2015, "Theoretical and experimental deformation analysis of crane beams subjected to moving load", *Sigma Journal Engineering and Natural Sciences*, Vol. 33, pp. 653-663.
- Azeloğlu, C.O., Kural, S., "Investigation dynamic behaviors of crane beams under moving load", *3rd Conference on advances in mechanical engineering (ICAME)*, Istanbul, 886-894, 19-21 December 2017.
- Di Lorenzo, S., Di Paola, M., Failla, G. ve Pirota, A., 2017, "On the moving load problem in Euler-Bernoulli uniform beams with viscoelastic supports and joints", *Acta Mech*, Vol. 228, pp. 805-821.
- Esen, İ., 2009, Hareketli yük altındaki köprülü kren kirişinin dinamik analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Esen İ., 2010, "Hareketli yük altındaki köprülü kren kirişinin dinamik analizi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, pp. 145-156.
- Fryba, L., 1999, *Vibration of solids and structures under moving loads*, Thomas Telford Ltd., Prague.
- Foda M.D., Abduljabbar Z., 1998, "A dynamic green function formulation for the response of a beam structure to a moving mass", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 210, pp. 295-306.
- Hasan, A.G., 2012, *Hareketli yüke maruz Euler-Bernoulli kirişinin dinamik davranışlarının incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Koçar, I. ve Ştimac, I., "Dynamic analysis of loads moving over structures", *4th International Congress of Croatian Society of Mechanics*, Bizovac, Croatia, 1-6, 18-20 September 2003.
- Low, K. H., 1997, "An analytical-experimental comparative study of vibration analysis for loaded beams with variable boundary conditions", *Computers and Structures*, Vol. 65, pp. 97-107.

- Mikvsinski, J. ve Sikorski, R., 1957, "The elementary theory of distributions (I)", *Rozprawy matematyczne*, Vol. 12, pp. 1-54.
- Pesterev, A.V., Yang, B., Bergman, L.A. ve Tan, C.A., 2003, "Revisiting the moving force problem", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 261, pp. 75-91.
- Xu, X., Xu, W. ve Genin, J., 1997, "A non-linear moving mass problem", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 204, pp. 495-504.
- Yang, B., Tan, C.A. ve Bergman, L.A., 2000, "Direct numerical procedure for solution of moving oscillator problems", *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 462-469.

#### EK AÇIKLAMALAR (APPENDIX)

#### Çizelge A1. Fourier sinüs sonlu integral dönüşümü

Table A1. The Fourier sine finite integral transformation

Orijinal	Dönüşüm
$f(x) = \frac{2}{L} \sum_{j=1}^{\infty} V(j,t) \sin \frac{j\pi x}{L}$	$F(j) = \int_0^L f(x) \frac{2}{L} \sin \frac{j\pi x}{L}$
$\frac{d^4 f(x)}{dx^4}, (f(0) = f(L) = f''(0) = f''(L) = 0)$	$\frac{j^4 \pi^4}{L^4} F(j)$
$af(x)$	$aF(j)$
$\delta(x-a)$	$\sin \frac{j\pi a}{L}$

**Çizelge A2.** Laplace-Carson integral dönüşümü*Table A2. The Laplace-Carson integral transformation*

<b>Dönüşüm</b>	<b>Orijinal</b>
$F(p) = p \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$	$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{F(p)}{p} e^{pt} dp$
$a$	$a$
$\sum_j^n a_j F_j(p)$	$\sum_j^n a_j f_j(t)$
$p^n F(p) - p^n f(0_+) - p^{n-1} \frac{df(0_+)}{dt} - \dots - p \frac{d^{n-1} f(0_+)}{dt^{n-1}}$	$\frac{d^n f(t)}{dt^n}$
$\frac{p}{p^2 + a^2}$	$\frac{1}{a} \sin at$
$\frac{p}{(p^2 + c^2)[(p+a)^2 + b^2]}$	$\frac{1}{(a^2 + b^2 - c^2)^2 + 4a^2 c^2} \left[ \frac{a^2 + b^2 - c^2}{c^2} (1 - \cos ct) + \frac{3a^2 - b^2 + c^2}{a^2 + b^2} (1 - e^{-at} \cos bt) - \frac{2a}{c} \sin ct + \frac{a(3b^2 - a^2 - c^2)}{b(a^2 + b^2)} e^{-at} \sin bt \right]$
$\frac{p}{(p^2 + a^2)(p^2 + b^2)}$	$\frac{1}{ab(a^2 - b^2)} (a \sin bt - b \sin at)$



## EFFECT OF ASPECT RATIO ON THE FREEZING-THAWING OF A CH CLAY

<sup>1,\*</sup>R. Kağan AKBULUT, <sup>2</sup>A. Şahin ZAIMOĞLU

<sup>1,\*</sup>Atatürk University, Technical Vocational School of Higher Education, Department of Construction, 25240  
Erzurum / TURKEY

<sup>2</sup>Atatürk University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 25240 Erzurum / TURKEY

<sup>1,\*</sup>rkakbulut@atauni.edu.tr, <sup>2</sup>zaimoglu@atauni.edu.tr

(Geliş/Received: 31.01.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 28.05.2018)

**ABSTRACT:** The geotechnical properties of fine grained soils which depends on the variation of aspect ratio ( $\xi$ =length/diameter) exposed to freezing-thawing is not known clearly. The effect of aspect ratio on unconfined compression strength and freezing-thawing resistance of fine grained soils after 0, 5, 10, and 20 freezing-thawing cycles have been investigated in this study. The freezing-thawing test was conducted in an automatic freezing-thawing cabinet, the freezing and thawing temperatures of which were selected as  $-20^{\circ}\text{C}$  and  $+25^{\circ}\text{C}$ , respectively. The unconfined compression test was conducted in an unconfined compression testing apparatus, the loading ratio of which was 0.8 mm/min. These values were held constant throughout the test. Tests were conducted on cylindrical samples with different  $\xi$  (length/diameter) ratios prepared at standard Proctor energy. The test results indicated that, as  $\xi$  ratio decrease and the number of freezing-thawing cycles increase, unconfined compression strength decrease and freezing-thawing grain loss increase.

**Key Words:** Aspect ratio, CH clay, Freezing-thawing, Unconfined compression strength

### Numune Boyutunun CH Kilinin Donma-Çözülme Üzerindeki Etkisi

**ÖZ:** Donma-çözölmeye maruz zeminlerin davranışı numune boyutuna ( $\xi$ =boy/çap) bağlı olarak nasıl değişeceği tam olarak bilinmemektedir. Bu çalışmada numune boyutunun ince daneli zeminlerde 0, 5, 10 ve 20 donma-çözölme çevrim sonrası serbest basınç mukavemeti ve donma-çözölme dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Donma-çözölme deneyi donma sıcaklığı  $-20^{\circ}\text{C}$  çözölme sıcaklığı  $+25^{\circ}\text{C}$  olan otomatik donma-çözölme kabininde, serbest basınç deneyi yükleme hızı 0.8 mm/dk olan serbest basınç deney aletinde yapılmıştır. Bu değerler deney sırasında sabit tutulmuştur. Deneyler standart proktor enerjisinde hazırlanmış farklı  $\xi$  (boy/çap) oranlarına sahip silindirik numuneler üzerinde yürütölmüştür. Deney sonuçlarından numunelerin  $q$  oranı ve donma-çözölme çevrim sayısının artmasıyla serbest basınç mukavemeti ile donma-çözölme dayanıklılığının azaldığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Boy/çap oranı, CH kil, Donma-çözölme, Serbest basınç dayanımı

## INTRODUCTION

Foundation soils are exposed to freezing-thawing at least once a year in cold-climate regions. This phenomenon affects some engineering features of fine-grained soils, such as water content, bearing capacity, and permeability adversely. It is mentioned in the following references that freeze-thawing causes structural and volumetric changes in clayey soils (Wang et al., 2017; Wang et al., 2018; Xu et al., 2018; Lu et al., 2018). Andersland and Ladanyi (2004) indicated that freezing, thawing, and redistribution



of water in the ground during seasonal temperature changes are responsible for variations in soil properties and the behavior of foundation materials.

The depth to which these soil materials are affected requires prediction of the seasonal frost penetration (Andersland and Ladanyi, 2004). Therefore, studies regarding changes in geotechnical features of soils arising from freezing-thawing have taken part in literature prevalently in recent years (Yarbaşı et al., 2007; Altun et al., 2009; Zaimoğlu, 2010; Hazırbaşa and Güllü, 2010; Ghazavi and Roustaie, 2010; Bello, 2011).

The aspect ratios used in these studies vary depending on either the preferred standards or particular preferences (Yazıcı and Sezer, 2007; Yarbaşı et al., 2007; An et al., 2008; Del Viso et al., 2008; Zaimoğlu, 2010; Hazırbaşa and Güllü, 2010; Ghazavi and Roustaie, 2010).

The aspect ratios used in these studies vary depending on either the preferred standards or particular preferences (Yazıcı and Sezer, 2007; Yarbaşı et al., 2007; An et al., 2008; Del Viso et al., 2008; Zaimoğlu, 2010; Hazırbaşa and Güllü, 2010; Ghazavi and Roustaie, 2010). The aspect ratio is supposed to affect some of the post-experimental determined geotechnical properties of soils. It has been stated in literature that, some of the determined engineering properties of concrete samples, such as unconfined compression resistance and durability, were significantly affected by aspect ratio (Yazıcı and Sezer, 2007; An et al., 2008; Del Viso et al., 2008). Additionally, Yalçın (2013) mentioned that the strength of sample decrease with increasing specimen size for the geometrically similar tested concrete samples. Yavuz et al., (2001) investigated the influence of sample size on the uniaxial compressive strength on the cubic shaped samples of different size for this purpose they used white marble and red travertine. Researchers reported that increasing specimen size is to cause significantly reduction of uniaxial compressive strength of rock and coal specimens. They are attributed this situation some studies (Hoek and Brown, 1980; Bieniawski, 1968; Swain, 1968; Kaczynski, 1986). Koç and Şener (2004) pointed out that stress decreases as the size increases on elements have a geometrically same but different size. The another study is conducted on concrete specimens of different sizes in Felekoğlu and Türkel (2005). Researchers stated "Due to the size effect, the relative strength of specimens varies at different dimensions" in their studies. Gök (2010) implied that the compressive strength increases while the sample size decreases. The researcher explained this increment in two theme: (1) Concrete surface in contact with the heads of the test press in small sample size is smaller than big ones. (2) Small-sized concrete samples' cross sectional areas and volumes are also naturally small. The extension of the sample size, statistically, increases micro-cracks or the amount of other faulty parts of the samples.

The variation pattern of freezing-thawing behavior under different soil and test conditions depending on the aspect ratio is not known clearly. There are scarcely any studies in literature researching the effects of aspect ratio used in soil freezing-thawing tests on the engineering properties of soils. Since decisions to be made at the field applications depends on the outcomes of laboratory tests, utmost attention should be given to determining aspect ratio to be tested in laboratories. The effect of aspect ratio on the unconfined compression strength and freezing-thawing resistance of fine grained soils after 0, 5, 10, and 20 freezing-thawing cycles have been investigated in this study. Tests were conducted on cylindrical samples with different  $\xi$  ratios prepared at standard Proctor energy. Stress-strain, freezing-thawing grain loss, and unconfined compression strength of samples with different  $\xi$  ratios were determined at the end of each freezing-thawing cycle. Test results were discussed comparatively.

## **MATERIAL and METHOD**

### **Experimental Study**

The clay soil utilized in the study was obtained from the Oltu-Erzurum vicinity in the Eastern Anatolia Region of Turkey. In this region, there is a long winter and snow remains on the ground from November until the end of April. From the data obtained at a station in Erzurum between 1988 and 2005,

the long term mean temperature is about 5.1°C, daily temperature average is 15.0°C, the highest temperature measured so far is 35.6°C and the lowest temperature is -37.2°C (Toy et al., 2007). This soil resembles an area exposed to freezing–thawing and is used a great deal in engineering work in Erzurum. The fine-grained soil used in tests was sieved from 200 No (0,074mm) and kept in a stove at  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  for 24 hours. The soil was classified as high plasticity clay (CH) based on the Unified Soil Classification System (USCS). Some of the engineering properties of the clay soil are given in Table 1.

**Table 1.** Some properties of the clay used in tests

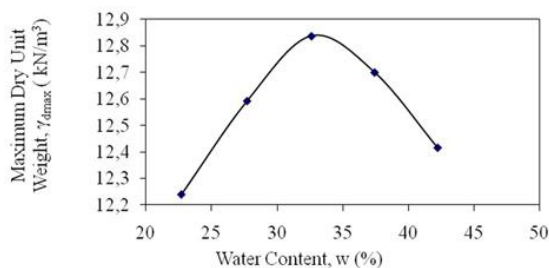
Properties	Value
Specific gravity, $G_s$	2.67
Liquid limit, $w_L$ (%)	83
Plastic limit, $w_P$ (%)	34
Plasticity index, $I_P$ (%)	49
Optimum water content*, $w_{opt}$ (%)	32.7
Max. Dry unit weight*, $\gamma_{dmax}$ (kN m <sup>-3</sup> )	12.8
Soil class	CH

\* Obtained from standard Proctor tests.

The standard compaction test was conducted in accordance with ASTM D 698-78. The samples with specified optimum water content and maximum dry unit weight were prepared in different compaction molds under constant standard compaction energy in the following aspect ratios: 38mm x 76mm ( $\xi_1=2.0$ ), 50mm x 100mm ( $\xi_2=2.0$ ), 101.5mm x 116mm ( $\xi_3 \approx 1.14$ , standard compaction mold), and 151.7mm x 127.4mm ( $\xi_4 \approx 0.84$ , CBR test mold). Aspect ratios and some properties are given in Table 2. For CH clay the relationship between the water content and the dry unit weight is illustrated in Figure 1 (a). Also, the samples prepared at different aspect ratios are shown in Figure 1 (b).

**Table 2.** Aspects ratios and some properties

Symbol	Diameter (mm)	Length (mm)	Surface Area (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Aspect Ratio
$\xi_1$	38	76	11.34	86.18	2.0
$\xi_2$	50	100	19.63	196.3	2.0
$\xi_3$	101.5	116	80.87	938.09	1.14
$\xi_4$	151.7	127.4	180.65	2301.48	0.84



(a)



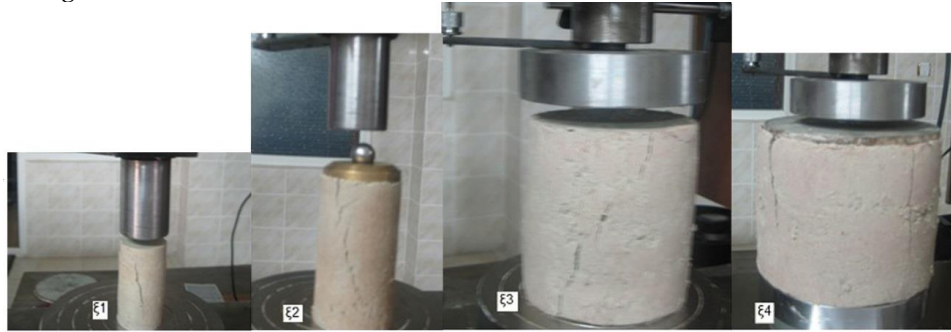
(b)

**Figure 1.** (a) Relationship between the maximum dry unit weight - water content, (b) Samples with different  $\xi$  ratio

Freezing-thawing tests were conducted in a programmable freezing-thawing cabinet, which was 110cm x 55cm x 55cm in size, -25°C of minimum temperature, and 60°C maximum temperature. The

samples were wrapped by aluminum foil sheets throughout the freezing-thawing test as illustrated in Figure 3 to prevent any changes in their water content (Kvárnó and Øygarden, 2006). Furthermore, small amounts of Vaseline were smeared on foil sheets to prevent aluminum foil from adhering to samples (Qi et al., 2008; Güllü and Hazırbaba, 2010). In the literature, there are numerous studies of freeze-thaw tests on fine-grained soils with various numbers of cycles, temperatures, and time intervals (Liu et al., 2010; Ghazavi and Roustaie, 2010; Hazırbaba et al., 2011). The number of cycles were selected as 0, 5, 10, and 20 in this study. The freezing and thawing temperatures were selected as  $-20^{\circ}\text{C}$  and  $25^{\circ}\text{C}$ , respectively, for each cycle and the waiting time for each temperature was selected as 6 hours (Ghazavi and Roustaie, 2010). The samples on which a freezing-thawing cycle completed were taken out of the freezing-thawing cabinet so as to determine their freezing-thawing grain loss. Residuals on samples were removed by an appropriate brush and then their weights were measured.

The unconfined compression test in accordance with ASTM D 2166 was conducted end of each prescribed number of cycles on samples with different  $\xi$  ratios. Stress and strain values of samples were determined by means of a deformation-controlled unconfined compression testing apparatus, the loading ratio of which was 0.8 mm/min. Images of some samples with  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ , and  $\xi_4$  ratios after the unconfined compression test are shown in Figure 2, while images of excessively deformed samples are provided in Figure 3.



**Figure 2.** The appearance after unconfined compression test ( $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  and  $\xi_4$ )



**Figure 3.** Deformed samples after freezing-thawing ( $\xi_3$  and  $\xi_4$ )

The grain losses of the samples after freezing and thawing (FTG) are calculated in percentages as in the following (Taşpolat et al., 2006):

$$\text{FTG (\%)} = (\text{IW} - \text{FTAW}) / \text{IW} * 100 \quad (1)$$

where: IW = initial weight of samples, and FTAW = weights of samples after freezing and thawing.

The fact that the grain losses derived from Formula 1 is minimal indicates that the freezing-thawing resistances of these samples are high. In other words, the lower FTG values the better freezing-thawing resistance.

All tests were repeated on three samples for each number of freezing-thawing cycles for the reliability of the results and the averages of which are used in evaluations.

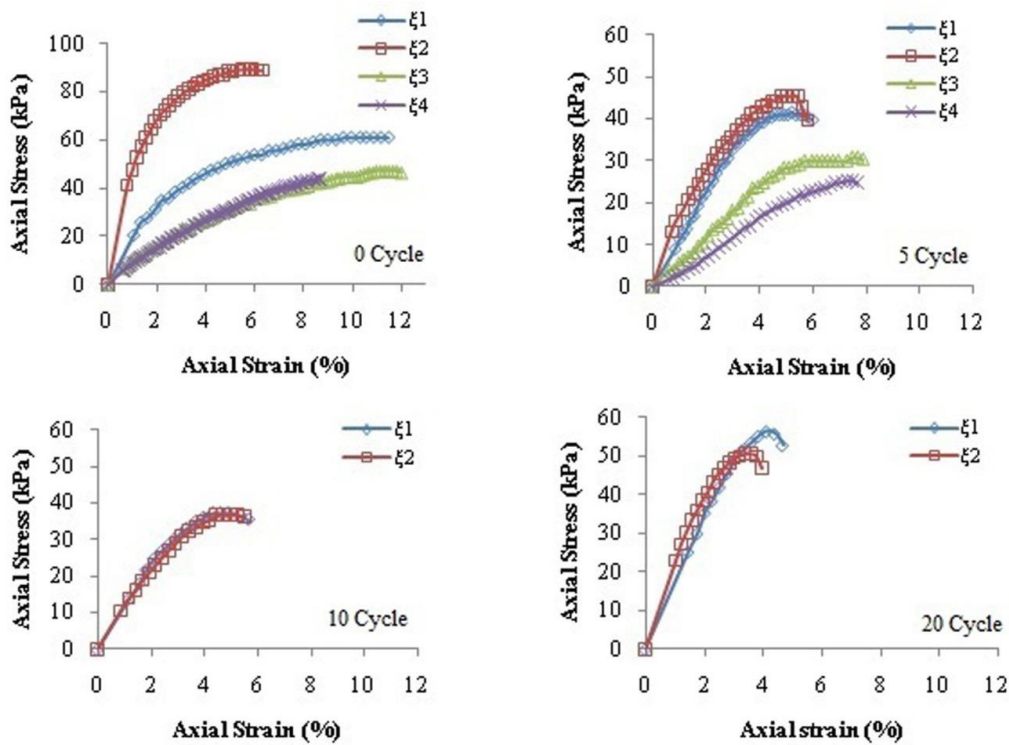
## RESULTS AND DISCUSSION

The unconfined compression strength (UCS) of the tested samples are given in Table 3. The stress - strain curves of the samples having  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ , and  $\xi_4$  ratios after each freezing-thawing cycle, where the unconfined compression strength values specified in Table 3 were used, are shown in Figures 4.

Since , some large cracks were observed on samples with  $\xi_3$  and  $\xi_4$  ratios at the end of 10 and 20 freezing-thawing cycles, the stress - strain curves of these samples could not be plotted (Figure 3) and also UCS values could not be determined.

**Table 3.** Unconfined compressive strengths of the samples

	Unconfined compressive strengths (kPa)			
	0	5	10	20
$\xi_1$	61.18	41.38	37.18	56.38
$\xi_2$	89.38	45.21	36.72	50.40
$\xi_3$	47.29	30.71	--	--
$\xi_4$	43.97	25.24	--	--

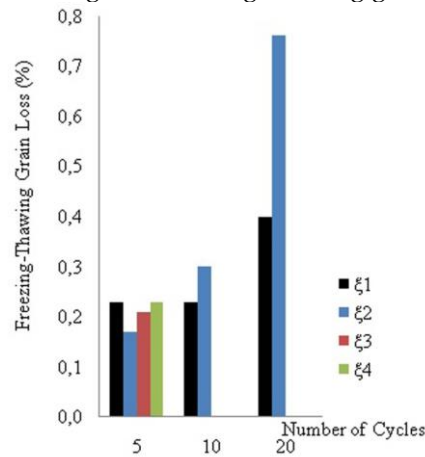


**Figure 4.** Stress – strain curves (0 cycle-5 cycle-10 cycle-20 cycle)

It has been observed from Figure 5 that, the initial elasticity modulus (tangent of stress - strain curve) decreases as the  $\xi$  ratio decreases. It has been observed on Figure 4 associated with Table 3 that, the decrease of the  $\xi$  ratio generally leads to a decrease in the unconfined compression strength in all freezing-thawing cycles. This decrement is due to arise from pore water pressures in a sample because of its size (Sakamoto and Shogaki, 2003). Likewise, it might be attributed that there is a terminal density (or terminal void ratio) for every soil and every process (Narsilio and Santamarina, 2008). Besides, this decrement is further anticipated to be affected by the change of contact area between the steel plate of the testing apparatus and the surface of samples with different  $\xi$  ratios. Yazıcı and Sezer (2007), who conducted compression strength tests on cylindrical concrete samples with different sizes, emphasized

that a greater length/diameter ratio leads to less compression strength and stated that this was due to small samples have small surfaces contacting to the steel plate of the testing apparatus. In addition, samples with smaller volume of specimens (i.e.,  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ) have less micro cracks in comparison with samples with larger volume of specimens (i.e.,  $\xi_3$ ,  $\xi_4$ ), so that samples with larger  $\xi$  ratios may have higher unconfined compression strength. The study conducted by Yazıcı and Sezer (2007) promotes this conclusion. Furthermore, An et al., (2008) and Del Viso et al., (2008) highlighted in their studies on reactive powder concretes with different sizes and high-strength concretes, respectively that, samples with larger sizes have less strength.

The freezing-thawing grain loss-cycle number graphic plotted for samples with  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$ , and  $\xi_4$  ratios at the end of each freezing-thawing cycle is shown in Figure 5. It is also shown from Figure 5 that freezing-thawing resistances as a percentages of freezing-thawing grain loss of the samples.



**Figure 5.** The variation of freezing-thawing grain losses

If there are grain losses of more than 15% in freezing-thawing tests, resistance of soil against freezing-thawing are not calculated (Hassini, 1992). Therefore, freezing-thawing grain loss (>15%) in samples with  $\xi_3$  and  $\xi_4$  ratios as a result of 10 and 20 freezing-thawing cycles were not considered.

The fact that decreasing  $\xi$  ratio leads to an increase on freezing-thawing grain loss at the end of each freezing-thawing cycle numbers (5, 10, and 20) are shown in Figure 6 (Wang et al., 2007; Ghazavi and Roustaie, 2010). It has been anticipated that, this fact arises from the force of ice created by water within pores throughout the freezing-thawing process, which separates soil grains from each other and consequently increases the pore volume (Wang et al., 2007).

$P_{max}$  value, which is the stress value corresponding to 20% of total axial strain, was calculated by multiplying of the cross-sectional areas of the samples for only go to residual curves. The  $\xi - P_{max}$  graph plotted using unconfined compression strength values are illustrated in Figure 6.

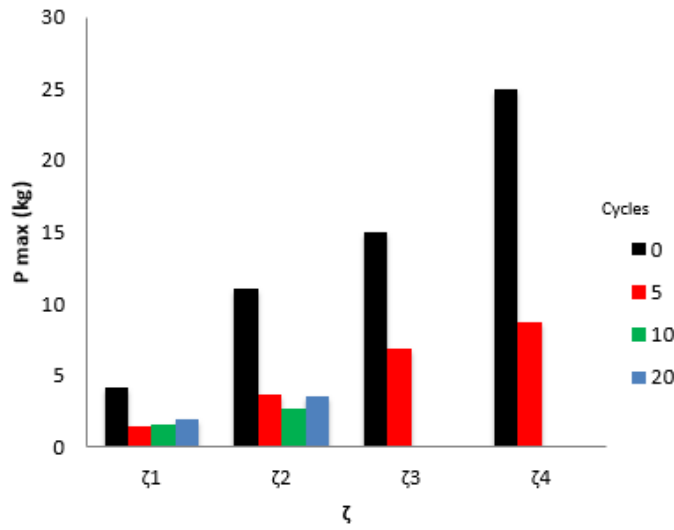


Figure 6.  $\xi$  -  $P_{max}$  curve

Figure 6 indicates that a decrease in  $\xi$  ratio generally leads to an increase in  $P_{max}$  values. This fact is anticipated as arising from the increase in surface areas (Sakamoto and Shogaki, 2003; Yazıcı and Sezer 2007; An et al., 2008; Del Viso et al., 2008). Similarly, despite  $\xi_1 = \xi_2 = 2.0$ , since the surface area of the sample with  $\xi_2$  ratio is greater than the sample with  $\xi_1$  ratio, the  $P_{max}$  value appears to be greater in Figure 6. This result indicates that the surface areas of the soil samples should also be considered in freezing-thawing tests.

It has been observed based on all test results that aspect ratio is effective on some engineering properties of fine-grained soils exposed to freezing-thawing. Therefore, the aspect ratio used for evaluating test results should be taken into consideration.

## CONCLUSION

In this study, a series of freezing-thawing tests were performed in a laboratory on clay soils with different aspect ratios. At the end of each freezing-thawing cycle number, the unconfined compression tests were performed on the samples. The following general conclusions were obtained from the tests:

- The initial elasticity modulus decreased as  $\xi$  ratio decreased.
- A decrease in the  $\xi$  ratio led to a decrease in unconfined compression strength in each freezing-thawing cycle in generally.
- It has been determined that freezing-thawing grain loss increases as the  $\xi$  ratio decreases.
- It has been identified that surface area and volume of samples should also be considered in freezing-thawing tests.

The variation patterns of freezing-thawing behavior depending on aspect ratios under different soil and test conditions are not identified clearly. Therefore, similar future studies on different soil classes and different  $\xi$  ratios would be beneficial for providing solutions to various engineering problems.

## ACKNOWLEDGMENTS

Support has been provided for this research work from the funds of the Scientific Research Project of Ataturk University. The authors express their gratitude to Ataturk University for this support.

## REFERENCES

- Altun, S., Sezer, A., Erol, A., 2009, "The Effects of Additives and Curing Conditions on the Mechanical Behavior of a Silty Soil", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.56, No.2-3, pp. 135-140.
- An, M., Zhang, L., Yi, Q., 2008, "Size Effect on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete", *J. China Univ. Mining & Technology*, Vol.18, pp. 279-282.
- Andersland O.B., Ladanyi B., 2004, *Frozen Ground Engineering*, 2nd edn. USA. John Wiley & Sons.
- ASTM D 2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D 698-78, Fundamental Principles of Soil Compaction, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Bello, A.A., 2011, "Analysis of Shear Strength of Compacted Lateritic Soils", *The Pacific Journal of Science and Technology*, Vol.12 No.1, pp. 425-434.
- Del Viso, J.R., Carmona, J.R., Ruiz, G., 2008, "Shape and Size Effects on the Compressive Strength of High-Strength Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.38, pp. 386-395.
- Felekoğlu, B., Türkel, S., 2010, "Effects of Specimen Type and Dimensions on Compressive Strength of Concrete", *Gazi University Journal of Science*, Vol.18, No.4, pp. 639-645.
- Ghazavi, M., Roustaie, M., 2010, "The Influence of Freeze-thaw Cycles on the Unconfined Compressive Strength of Fiber-reinforced Clay", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.61, pp. 125-131.
- Gök, G., 2010, *Değişik Geometrideki Betonların Basınç Dayanımlarının Çeşitli Su/Çimento Oranlarına ve Çimento Miktarlarına Göre İncelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Gullu, H., Hazirbaba, K., 2010, "Unconfined Compressive Strength and Post-Freeze-Thaw Behaviour of Fine-Grained Soils Treated with Geofiber and Synthetic Fluid", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.62, pp. 142-150.
- Hassini, S., "Some Aspects of Landfill Design", *Mediterranean Conf on Environmental Geotechnology*. Cesme, Turkey. Environmental Geotechnology, pp.137-144. 1992.
- Hazirbaba, K., Gullu, H., 2010, "California Bearing Ratio Improvement and Freeze-Thaw Performance of Fine-Grained Soils Treated with Geofiber and Synthetic Fluid", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.63, pp. 50-60.
- Hazirbaba, K., Zhang, Y., Hulsey, J.L., 2011, "Evaluation of Temperature and Freeze-Thaw Effects on Excess Pore Pressure Generation of Fine-Grained Soils", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.31, pp. 372-384.
- Hoek, E., Brown, E.T, 1980. *Underground Excavations in Rock* (No. Monograph).
- Kaczynski, R.R., "Scale Effect During Compressive Strength Tests of Rocks", *Proceedings of the Fifth International Congress, International Association of Engineering Geology*, 20-25 October 1986, Buenos Aires, Argentina. Volumes 1, 2 And 3. Publication Of: Aa Balkema, 1986.
- Koç, V., Şener, S., 2003, "Hafif ve Normal Betondan Yapılmış Çift Konsol Numunelerin Basınç Göçmesinde Boyut Etkisi", *Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi*, pp. 137-141.
- Kvárnó, H.S., Öygarden. L., 2006, "The influence of Freeze-Thaw Cycles and Soil Moisture on Aggregate Stability of Three Soils in Norway", *Catena*. Vol.67, pp. 175-182.
- Liu, J., Wang, T., Tian, Y., 2010, "Experimental Study of The Dynamic Properties of Cement- and Lime-Modified Clay Soils Subjected to Freeze-Thaw Cycles", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.61, pp. 29-33.
- Lu, J., Zhang, M., Zhang, X., Pei, W., Bi, J., 2018, "Experimental Study on the Freezing–thawing Deformation of a Silty Clay", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 151, pp. 19-27.
- Narsilio, G.A., Santamarina, J.C., 2008, "Terminal Densities", *Geotechnique*, Vol.58, No.8, pp.669-674.
- Qi, J., Wei, M., Song, C., 2008, "Influence of Freeze-Thaw on Engineering Properties of Silty Soil", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.53, pp. 397-404.

- Sakamoto, R., Shogaki, T., "Effect of Specimen Size on Unconfined Compressive Strength Properties for Natural Clay Deposits", *Proceedings of the Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*, May 25-30, 2003.
- Swain, R., 1968, "Strength-Size Effects in Brittle Model Tests Simulating Underground Rock Fracture", *The Mining Engineer*, Vol.88, pp. 211-214.
- Taşpolat, L.T., Zorluer, İ., Koyuncu, H., 2006, "Effect of Waste Marble Powder on Freezing-Thawing of Impermeable Clay Liners", *Technical Research*, Vol.2, pp. 11-16.
- Toy, S., Yilmaz, S., Yilmaz, H., 2007, "Determination of Bioclimatic Comfort in Three Different Land Uses in the City of Erzurum Turkey", *Building and Environment*, Vol.42, pp. 1315-1318.
- Wang, D., Ma, W., Niu, Y.H., Chang, X., Wen, Z., 2007, "Effects of Cyclic Freezing and Thawing on Mechanical Properties of Qinghai-Tibet Clay", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 48, pp. 34-43.
- Wang, S., Yang, Z. J., Yang, P., 2017, "Structural Change and Volumetric Shrinkage of Clay Due to Freeze-thaw by 3D X-ray Computed Tomography", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 138, pp. 108-116.
- Wang, S., Yang, P., Yang, Z. J., 2018, "Characterization of Freeze-thaw Effects Within Clay by 3D X-ray Computed Tomography", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 148, pp. 13-21.
- Xu, J., Ren, J., Wang, Z., Wang, S., Yuan, J., 2018, "Strength Behaviors and Meso-structural Characters of Loess after Freeze-thaw", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 148, pp. 104-120.
- Yalçın, E., 2013, "Dowel Numunelerinde Boyut Etkisi", *Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi*. Vol.25, No.2, pp. 129-136.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E., Akbulut, S., 2007, "Modification of the Geotechnical Properties, as Influenced by Freeze-Thaw, of Granular Soils with Waste Additives", *Cold Regions Science and Technology*. Vol.48, pp. 44-54.
- Yavuz, H., Sari, D., Varol, M., "Mermer ve Travertenin Tek Eksenli Basınç Dayanımının Belirlenmesinde Boyut ve Şekil Etkisi", *Türkiye III. Mermer Sempozyumu*, Bildiriler Kitabı, 209-217, 2001.
- Yazıcı, Ş., Sezer, İ.G., 2007, "The Effect of Cylindrical Specimen Size on the Compressive Strength of Concrete", *Building and Environment*, Vol.42, pp. 2417-2420.
- Zaimoğlu, A.S., 2010, "Freezing-thawing Behaviour of Fine-Grained Soils Reinforced with Polypropylene Fibers", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.60, pp. 63-65.



## ANGSTRÖM-PRESCOTT MODELİNİN POLİNOM İLE GELİŞTİRİLMESİ VE DİYARBAKIR GÜNEŞ IŞINIMI VERİLERİNE UYGULANMASI

<sup>1</sup>Yavuz Selim GÜÇLÜ

<sup>1</sup>*Istanbul Medeniyet Üniveristesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Üsküdar, İSTANBUL*  
[yavuzselim.guclu@medeniyet.edu.tr](mailto:yavuzselim.guclu@medeniyet.edu.tr)

(Geliş/Received: 03.03.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.06.2018)

**ÖZ:** Dünyanın en önemli enerji kaynağı güneş enerjisi, çeşitli alanlarda farklı konular altında araştırılmaktadır. Özellikle, fosil yakıt kaynaklarının azalmasından beri güneş enerjisinin değeri ve önemi daha da artmıştır. Güneş enerjisi ile ilgili ilk araştırmalar 20. yüzyılın ilk çeyreğinde başlamış ve bu tür çalışmaların ilki güneş ışınımının güneşlenme süresine karşı tahmin edildiği çalışmadır. Bu makalenin hedefi, güneş ışınımının tahmini konusunda yeni bir yöntem niteliğindeki polinom çözümlene (analiz) yolunu sunmak ve uygulamaktır. Bununla birlikte, polinom çözümlenmesi güneş ışınımını tahmin etmekte yetersiz kalacağından, Polinom ile doğrusal (lineer) bir model özelliğine sahip Angström-Prescott yaklaşımı önerilmiştir. PoLin (POLinom-LINEer) modelinin temel ilkesi, salınımı (periyodiklik) veriden ayırmak ve daha sonra Angström-Prescott modelini arınmış veriye uygulamaktır. Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu bölgesi şehirlerinden Diyarbakır kapsamında sunulan yaklaşımın sonuçları ANFIS, HarLin ve Angström-Prescott modelleri ile karşılaştırılarak gerekli tavsiyeler sunulmuştur. PoLin modelinin çıktıları meşhur (klasik) Angström Prescott, HarLin ve ANFIS modellerinden daha başarılı bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** ANFIS, Angström-Prescott; Güneş ışınımı; Güneşlenme süresi; HarLin; Polinom.

### Hybrid Model for Solar Irradiation Estimation Using Polynomial and Angström-Prescott Equation

**ABSTRACT:** The world's most important energy source, solar energy, is being investigated in a variety of areas under different fields. Especially since the decline of fossil fuel resources, the importance of the solar energy has increased even more. Initial researches on solar energy started in the first quarter of the 20<sup>th</sup> century and solar irradiation was estimated versus sunshine duration. This study suggests similar procedure to harmonic analysis application to solar irradiation and sunshine duration data. Basis of the methodology is combined application of the POLynomial and classical LINEar regression analysis. Therefore, it is referred to PoLin model as a hybrid model. It isolates first the periodicity from the daily values, and then linear regression analysis is applied first to order stationary data. PoLin results are compared with the classical Angström-Prescott, HarLin, and ANFIS models. In the application, solar irradiation site is considered from solar energy potential location in Turkey, namely, at Diyarbakır. Estimations by PoLin model appears more successful than ANFIS, HarLin and Angström-Prescott approaches.

**Key Words:** ANFIS, Angström-Prescott; HarLin; Polinom; Solar irradiation; Sunshine duration.

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güneş, enerjisinin bir kısmını ışınım ile dünyaya aktarır. Aynı noktada ölçülmüş güneş ışınımı ile güneşlenme süresi arasında doğru orantılı bir ilişki bulunduğu ise iyi bilinen bir gerçektir. Ayrıca güneş ışınım hesapları kapsamında etkin tahminler ortaya koymak diğer bir ifadeyle tahminleri iyileştirmek hedeflenen önemli konulardandır.

İklim değişikliğinin etkileri ile önemli temiz enerji kaynağı güneş enerjisine duyulan ihtiyaç sürekli artmaktadır çünkü fosil yakıtların yoğun kullanımından ötürü artan sera gazları küresel ısınmayı tetiklemektedir. Bu yüzden geleneksel enerji dağıtım teşkilatları ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bütünleşmesi (entegrasyonu) ile sera gazı salınımının azaltılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda temiz ve yenilenebilir enerji alanlarına odaklanan çok sayıda iklim değişikliği tabanlı araştırmalar bulunmaktadır (Şen, 2008).

Güneş enerjisinden azami fayda sağlamak ve verimliliğini belirlemek adına aynı noktada güneş ışıını ve güneşlenme süresinin eş zamanlı elde edilmesi son derece önem arz etmektedir. İşte bu ilişkiyi göstermek için ilk önce Kimball (1919) sonra da Angström (1924) denklemler geliştirmişlerdir. Daha sonra Prescott (1940) Angström denklemini atmosfer dışı güneş ışıını ve güneşlenme süresi ile boyutsuzlaştırarak geliştirmiştir ve ilgili denklem 1940'tan beri Angström-Prescott ibaresiyle anılmaktadır. Aynı amaca hizmet eden diğer bir denklem Page ve diğ. (1964) tarafından geliştirilmiştir ve yanal güneş ışıını da nazarı itibara alınmıştır. Ayrıca bu doğrusal ilişkinin farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş çeşitli sürümlerine de rastlamak mümkündür (Swartman ve Ogunlade, 1967; Sabbagh ve diğ., 1977; Rietveld, 1978; Dogniaux ve Llemoine, 1983; Gopinathan, 1988; Lewis, 1989; Soler, 1990; Hinrichsen, 1994; Şen, 2001, 2008; Lia ve diğ., 2011; Korachagaon ve Bapat, 2012; Almorox ve diğ., 2013). Şahin ve Şen (1998) doğrusal modellerde katsayıları hesaplamak için dinamik bir yöntem geliştirmiştir. Ayrıca, Şahin (2007), güneş ışıını ve güneşlenme süresini tahmin etmek için bir başka pratik yaklaşım ortaya koymuştur.

Ögelman ve diğ. (1984) aynı veri takımlarını kullanarak ikinci dereceden denklem tasarlarırken Akınoğlu ve Ecevit (1990) benzer çalışma sunmuşlardır. Samuel (1991) ise yazdığı eserde ilk defa üçüncü dereceden denklem ile güneşlenme süresinden güneş ışıını tahmin etmiştir. Ancak birinci dereceden denklemde hesaplanması gereken katsayılar iki iken ikinci dereceden denklemde üç ve üçüncü dereceden denklemde dördüttür. Kullanışlılık, anlaşılabilirlik ve basitlik açısından katsayıların azlığı önemli bir meseledir. Şu da bir gerçek ki artan katsayı miktarlarına rağmen ilerleyen teknoloji sayesinde bilgisayarlar bu durumun üstesinden kolayca gelebilmektedir. Şen (2007) çok basit bir biçimde eğriselliği yakalamak için sadece iki katsayı içeren üssel fonksiyon tasarlamıştır. Yapay zekâ yöntemlerinden bulanık mantık ve yapay sinir ağlarından faydalanan bazı araştırmacılar güneş ışıını tahmini konusunda literatüre önemli katkılar sunmuşlardır (Benghanem ve diğ., 2009; Rahimikhoob, 2010; Chen ve diğ., 2013; Wu ve diğ., 2014; Güçlü ve diğ., 2015, 2018). Şen (2017) "ihtimali yenilikçi güneş ışıını tahmini" başlığı ile yazdığı makalede ilgili konuya yeni bir soluk getirmiştir.

Yukarıda bahsedilen eserlere bakıldığında önerilen modellerin zaman bağımlılığını içermediği göze çarpmaktadır. Güçlü ve diğ. (2014a, b) zaman bağımlılığını da içeren basit bir yaklaşım sunmuşlardır ve ANFIS ile kıyaslayarak ilgili bölgeler için bağımlılık modelinin başarısını ortaya çıkarmışlardır. Ek olarak, Tolabi ve diğ. (2014) yeni bir sınıflandırma ile güneş ışıını tahmin modellerini üç başlık altında toplayarak kıyaslamalar yapmıştır. Bu başlıklar; deneysel (ampirik), benzetim (simülasyon) ve en iyileme (optimizasyon) modelleridir.

Meteorolojik verilerdeki salınımın Dünya'nın kendi ekseni ve ayrıca güneş etrafındaki hareketinden kaynaklandığı bilinen bir hakikattir. Bu dönme hareketleri neticesinde saatlik, günlük, aylık ve mevsimsel ölçümlerde salınımlar kendini göstermektedir. Bazı araştırmacılar salınımları dikkate alarak çeşitli eserler yazmışlardır (Balling, 1983; Amato ve diğ., 1986; Baldasano ve Berna, 1988; ve Şahin ve diğ., 2001).

Bu çalışmanın maksadı POLinom ile LİNeer (PoLin) regresyon çözümleme (analiz) yöntemlerini birleştirmek suretiyle daha iyi güneş ışıını tahminleri üretmektir. Hedefe ulaşmak için Diyarbakır'da ölçülen günlük güneşlenme süresi ve güneş ışıını verileri kullanılacaktır. Başarı durumu ise 2015'te geliştirilen HarLin yaklaşımı, meşhur Angström-Prescott denklemi ve ANFIS modeli ile kıyaslanarak gözler önüne serilecektir. Ek olarak, güneş ışıını hidrolojinin önemli konularından terleme-tutma-buharlaştırma (evapotranspirasyon) için girdi niteliği taşımaktadır. Dolayısıyla, güneş enerjisi alanına olduğu gibi bu çalışmanın hidrolojiye de önemli katkı sunacağı düşünülmektedir.

## YÖNTEM (METHODOLOGY)

Burada, literatürde bulunan Angström-Prescott denklemi, ANFIS ve HarLin modeli ilk aşamada tüm ayrıntıları ile aktarılacaktır. Bu çalışma ile ilk defa gündeme getirilen PoLin ise dördüncü alt başlık ile sunulacaktır.

### Angström-Prescott Denklemi (Angström-Prescott Equation)

Denklem 1, Angström-Prescott tarafından güneş ışınımı ile güneşlenme süresi arasında doğrusal ilişki bulunduğu düşünülerek güneş ışınımı tahmini için önerilmiştir.

$$\left( \frac{H}{H_0} \right) = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) \quad (1)$$

Denklemdaki simgelerin açıklamaları şu şekildedir;

S: Günlük doğal güneşlenme süresi,

So: Günlük atmosfer dışı güneşlenme süresi,

H: Günlük doğal güneş ışınımı,

Ho: Günlük atmosfer dışı güneş ışınımı,

a ve b: Denklemin sabit katsayılarıdır.

Boyutsuzlaştırılan bu denklem günlük verilere uygulanabildiği gibi aylık ölçümlere tatbiki de mümkündür.

### ANFIS (ANFIS)

Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Yapısı, ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System), girdi ve çıktı değişkenlerinin eğitimini yapan ve dünyada birçok uygulamada yoğun bir kullanıma sahip bir yazılımdır (Jang, 1992). Bu önemli yazılım girdilerin çıktılarla en iyi biçimde uygunluğunu sağlayarak tahmin yapmaya fırsat tanımaktadır. ANFIS iki aşamalı içeriğe sahiptir. Esasında Sugeno Bulanık Çıkarım Yapısını (BÇY) (Şekil 1) kullanır fakat verilerin eğitimi aşamasında yapay sinir ağlarından (YSA) da destek alır (Şen, 2004). Model üretirken verilerin eğitimi safhasında şu hususlar son derece önemlidir ve aynı anda sağlanmalıdır; birincisi hataların toplamının sıfıra eşit veya sıfıra çok yakın olmasıdır, ikincisi ise hataların karelerinin toplamının seçenekler arasında en küçük olmasıdır. ANFIS bu iki noktayı dikkate alarak verileri eğiterek en uygun modeli meydana getirmektedir. Güçlü ve diğ. (2014b, 2015) bir girdi ve bir çıktılı ANFIS mimarisinin örneğini göstermişlerdir (Şekil 2).

Sugeno BÇY'nda (Takagi ve Sugeno, 1985; Sugeno, 1985) veri dizisinin girdi kısmı bulanık alınırken, çıktı kısmı düz (klasik) mantıktaki gibi kesin ifadelerle belirtilir. Bunun için ortaya koyulan uygulamalarda iki seçenek vardır. Bir yapıda girdi bulanık, çıktı kısmı sabit değer kabul edilebilir veya doğrusal bir denklem alınabilir (Şekil 1) (w simgeleri üyelik derecelerini ifade etmektedir).

Mesela, Şekil 1'den yola çıkarak bir girdi-bir çıktı (Güneşlenme Süresi, GS:girdi ve Güneş Işınımı, GI:çıkıtı) ve üç üyelik fonksiyonlu bir yapıda aşağıda belirtilen kurallar çerçevesinde çıktı kısmı sabit düşünülebilir ( $c_1$ ,  $c_2$  ve  $c_3$  sabit değerlerdir). Bir girdi ve bir çıktılı sistemlerde kural sayısı girdinin üyelik fonksiyonu sayısınınca yazıldığı unutulmamalıdır.

1-Eğer GS Kısa ise GI= $c_1$ 'dir,

2-Eğer GS Orta ise GI= $c_2$ 'dir,

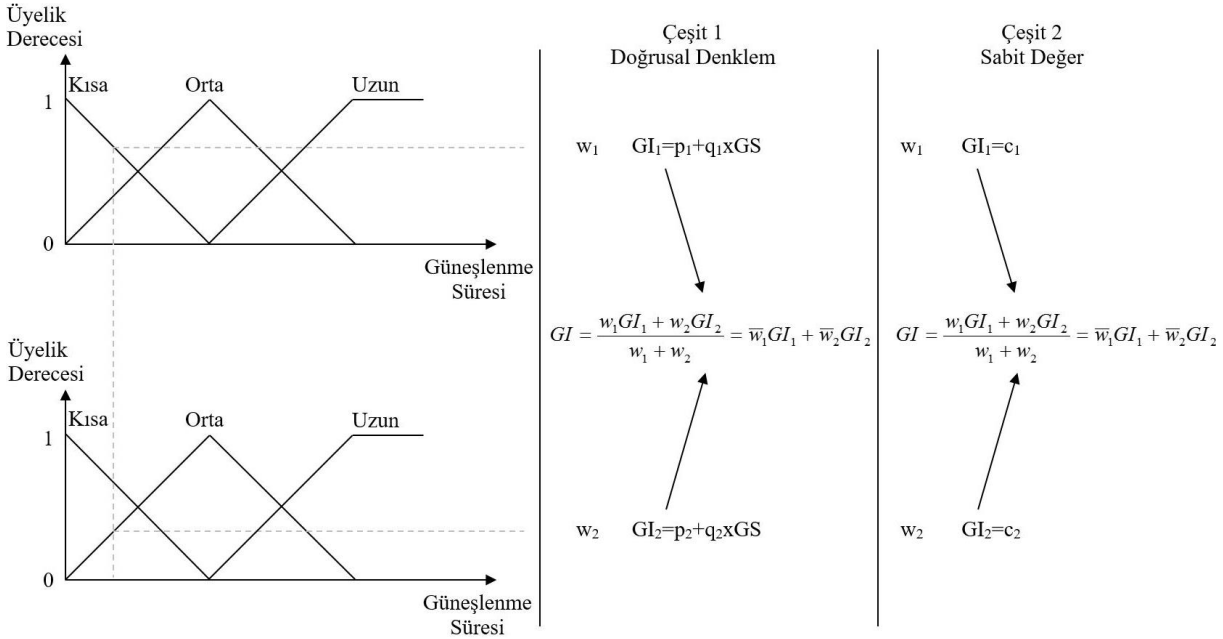
3-Eğer GS Uzun ise GI= $c_3$ 'tür.

Çıktı doğrusal bir fonksiyon biçiminde de dikkate alınabilir ve aşağıdaki kurallar yazılabilir ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  ve  $q_3$  lineer fonksiyon katsayılarıdır).

1-Eğer GS Kısa ise GI= $p_1+q_1 \times GS$ 'dir,

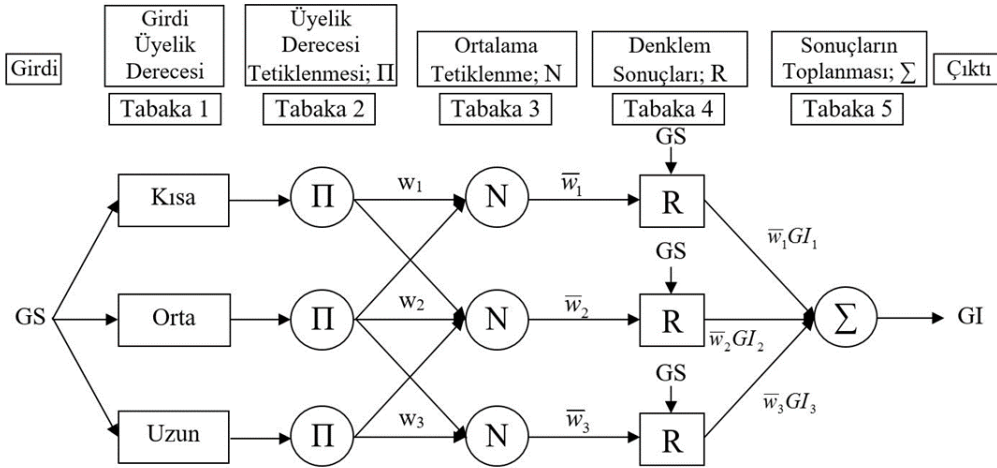
2-Eğer GS Orta ise GI= $p_2+q_2 \times GS$ 'dir,

3-Eğer GS Uzun ise GI= $p_3+q_3 \times GS$ 'dir.



Şekil 1. Sugeno BÇY çeşitleri

Figure 1. Sugeno Fuzzy Inference System types



Şekil 2. Bir girdi ve bir çıktılı ANFIS mimarisi

Figure 2. ANFIS architecture with one input-one output

Burada ANFIS ve Sugeno BÇY çok ayrıntıya girilmeden aktarılmıştır. Ross (1995) tarafından yazılan eser bulanık mantık üzerine çok kapsamlı bir içeriğe sahiptir ve mühendislik uygulamaları kapsamında son derece ayrıntılı bilgiler sunmaktadır.

### HarLin Modeli (HarLin Model)

Belli bir salınımına sahip veri takımını görselleştirmek adına Güçlü ve diğ. (2015)'nin yaptığı gibi bir düzenleme yapılabilir (Çizelge 1). Çizelgede  $Y_{ij}$  değerleri günlük ölçümleri ifade ederken satırlar yıl ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ), sütunlar ise günlerdir ( $i = 1, 2, 3, \dots, 365$ ). HarLin için ilk adım her bir günün aritmetik ortalamasını almaktır. Çizelge 1'deki son satır 365 günün günlük ortalamalarını içermektedir.

**Çizelge 1.** Günlük ortalama hesabı.

Table 1. Calculation of daily averages.

Yıllar	Günler				
	Y <sub>1,1</sub>	Y <sub>1,2</sub>	.....	Y <sub>1,364</sub>	Y <sub>1,365</sub>
Y <sub>2,1</sub>	Y <sub>2,2</sub>	.....	Y <sub>2,364</sub>	Y <sub>2,365</sub>	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
Y <sub>n-1,1</sub>	Y <sub>n-1,2</sub>	.....	Y <sub>n-1,364</sub>	Y <sub>n-1,365</sub>	
Y <sub>n,1</sub>	Y <sub>n,2</sub>	.....	Y <sub>n,364</sub>	Y <sub>n,365</sub>	
Günlük ortalamalar	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_2$	.....	$\bar{Y}_{364}$	$\bar{Y}_{365}$

Harmonik çözümlene Denklem 2 ve Denklem 3 'teki gibi sinüs ve kosinüs dalgalarından müteşekkildir (Şen, 2002).

$$\bar{Y}_i = a \sin\left(2\pi \frac{i}{T} + \varphi\right) + \bar{Y} \quad (i= 1, 2, 3, \dots, 365) \quad (2)$$

$$\bar{Y}_i = a \cos\left(2\pi \frac{i}{T} + (\varphi + \pi/2)\right) + \bar{Y} \quad (i= 1, 2, 3, \dots, 365) \quad (3)$$

Aşağıda sunulan Denklem 4 ise Denklem 2'nin genişletilmiş halidir.

$$\bar{Y}_i = a \cos(\varphi) \sin\left(2\pi \frac{i}{T}\right) + a \sin(\varphi) \cos\left(2\pi \frac{i}{T}\right) + \bar{Y} \quad (4)$$

Denklemin içindeki ifadeler şu şekilde açıklanabilir;

a: Harmonik katsayısı,

$\varphi$ : Faz açısı,

T: Temel salınım süresi (365),

$\bar{Y}$ : Günlük ortalamaların ortalamasıdır (Denklem 5).

$$\bar{Y} = \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} \bar{Y}_i \quad (5)$$

Denklem 4'te bulunan  $a \cos(\varphi)$  ve  $a \sin(\varphi)$  A ve B harfleri ile nitelendirilirse o zaman denklemin yeni halini şöyle yazmak imkân dâhilindedir;

$$\bar{Y}_i = A \sin\left(2\pi \frac{i}{T}\right) + B \cos\left(2\pi \frac{i}{T}\right) + \bar{Y} \quad (6)$$

Aynı zamanda A ve B katsayılarına ait eşitlikler sırasıyla aşağıda sunulmuştur.

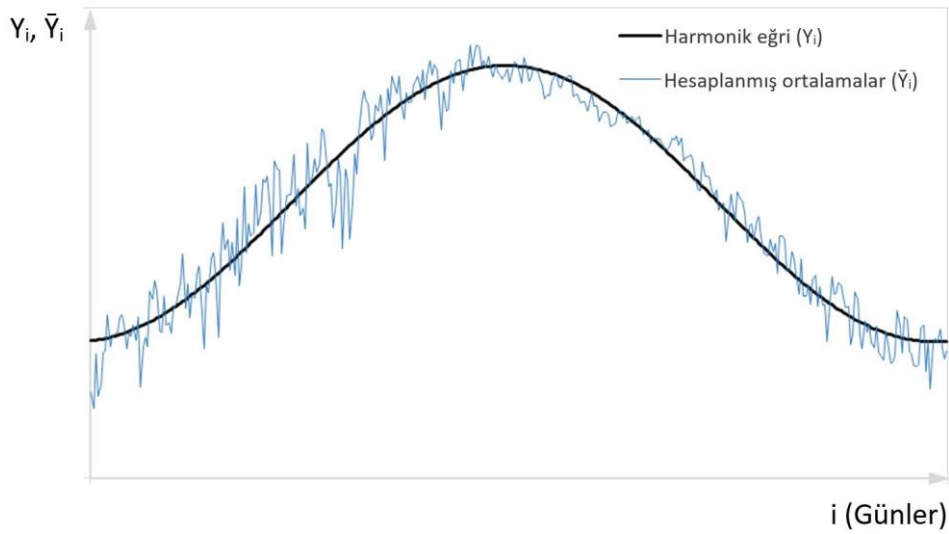
$$A = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^T \bar{Y}_i \sin\left(2\pi \frac{i}{T}\right) \quad (7)$$

$$B = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^T \bar{Y}_i \cos\left(2\pi \frac{i}{T}\right) \quad (8)$$

A ve B katsayılarının elde edilişlerine dair atılan adımlar burada yazılmamıştır ancak Güçlü ve diğ. (2015) makalelerinde tüm ara adımlara yer vermişlerdir.  $\bar{Y}_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 365$ ) ölçümlerine göre A, B ve  $\bar{Y}$  değerleri hesaplandıktan sonra harmonik denklemin en kapsamlı ve süreklilik arz eden evrensel hali yazılabilir.

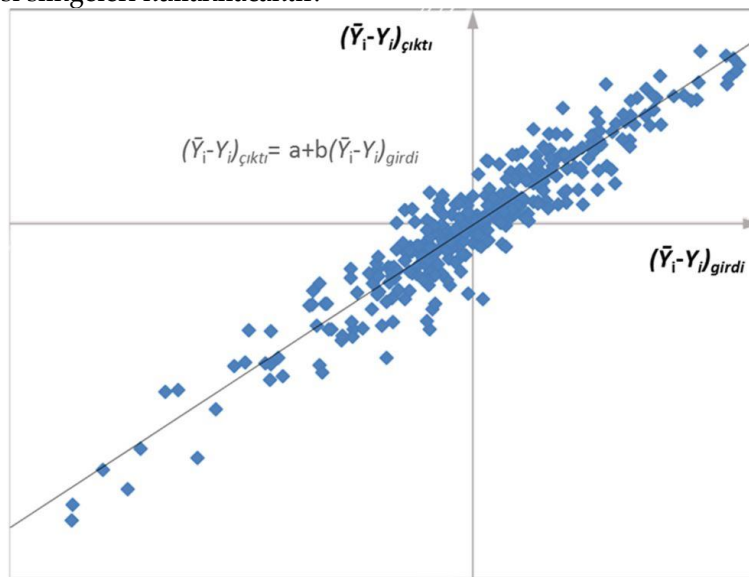
$$Y_i = A \sin\left(2\pi \frac{i}{T}\right) + B \cos\left(2\pi \frac{i}{T}\right) + \bar{Y} \quad (9)$$

Ölçülmüş  $\bar{Y}_i$  ve buna göre hesaplanmış  $Y_i$  değerleri Şekil 1 üzerinde resmedilmiştir.



**Şekil 1.** Temsili harmonik tahmin eğrisi ve hesaplanmış günlük ortalamalar  
*Figure 1. Sample harmonic analysis line and calculated daily averages*

Şimdiden sonra HarLin yönteminin ikinci safhasını uygulamak için Şekil 1'deki  $\bar{Y}_i$  ve  $Y_i$  değerleri arasındaki farkları göz önüne alarak doğrusal model katsayılarını ( $a$  ve  $b$ ) belirlemek gerekir (Şekil 2). Çizelge 1, Şekil 1 ve 2'de belirtilen evrensel  $\bar{Y}_i$  ve  $Y_i$  simgeleri yerine uygulama aşamasında güneş ışıını ve güneşlenme süresi simgeleri kullanılacaktır.



**Şekil 2.** Fark değerler için regresyon çözümleme örneği  
*Figure 2. Linear regression analysis for difference values*

Günlük değerlerin tahmini için HarLin modeli kullanılabilir durumdadır. İki bileşenden müteşekkil  $Y_T$  (Tahmini değer) Denklem 10 ile ( $Y_H$ , harmonik model sonucu ve  $Y_L$ , doğrusal regresyon sonucu) elde edilebilecektir.

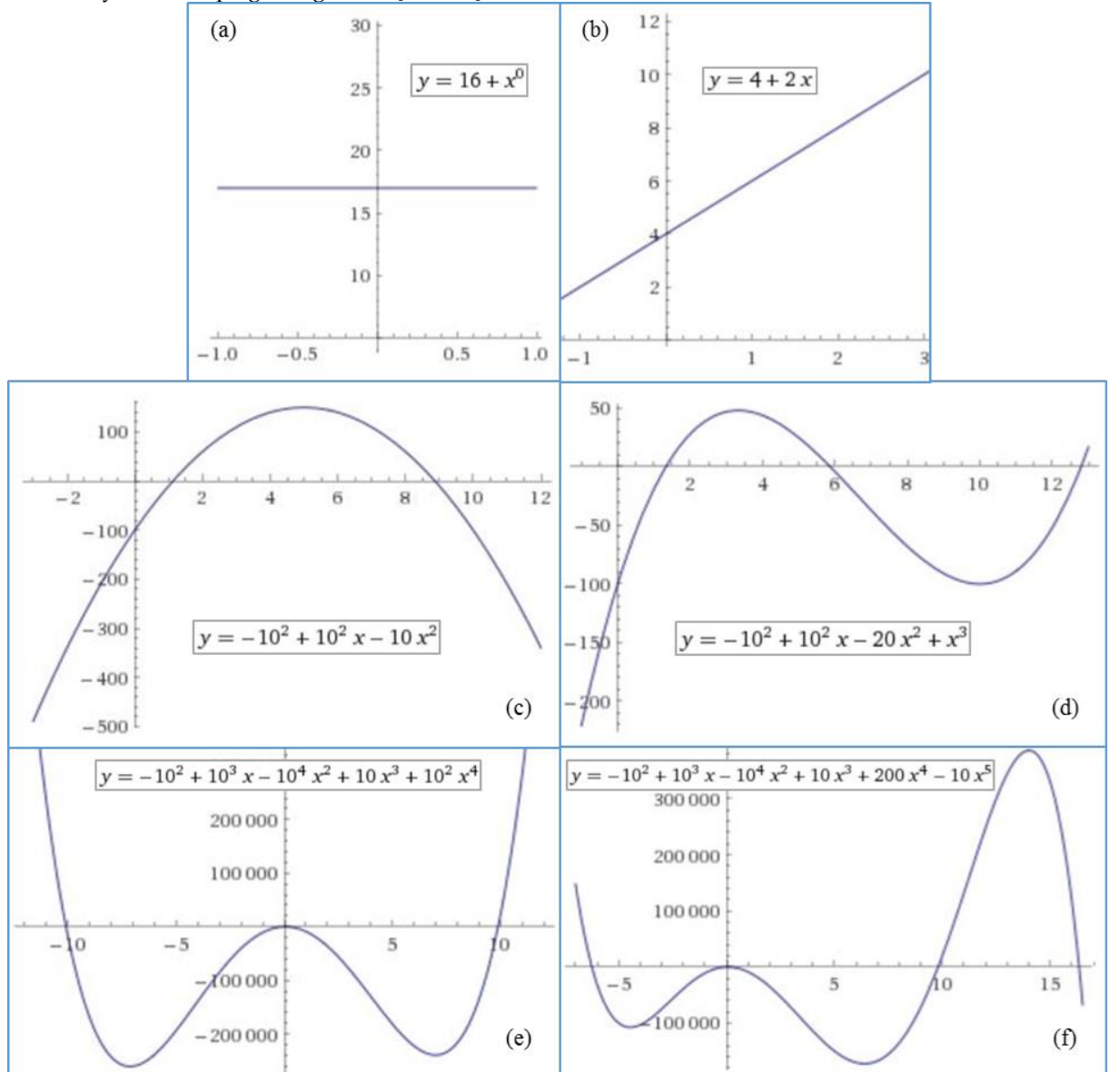
$$Y_T = Y_H + Y_L \quad (10)$$

### PoLin Modeli (PoLin Model)

Bu çalışmanın özgün çıktısı PoLin yaklaşımı, HarLin modelinin yerine kullanılabilir ve daha iyi sonuçlar üretecek düşüncesiyle tasarlanmıştır çünkü harmonik eğri tamamen simetriktir ve  $183 \pm n$

değerleri bir birine daima eşittir. Burada 183 değeri yılın tam ortasındaki gündür. Mesela, birbiriyle ikili eşleştirilmiş 182 ve 184 ( $n=1$ ), 130 ve 236 ( $n=53$ ), 83 ve 283 ( $n=100$ ), 1 ve 365 ( $n=182$ ) günlerinin harmonik eğri değerleri birbirine eşittir. Burada özgün yaklaşım harmonik eğri yerine en uygun polinom denklemi ayarlayıp kullanmaktır çünkü polinom her bir gün için değişik ve en uygun değeri belirlemeye yarayacaktır.

Bir saçılma diyagramına polinom uydurulurken en önemli husus saçılan veri topluluğunun kaç dönüme sahip olduğu tespit edilmesidir çünkü diyagrama kaçınıcı dereceden bir polinom ayarlanacağı dönüm sayısına göre belirlenmektedir. Eğer saçılmış verilere bir polinom uydurulacaksa dönüm sayısından bir fazla dereceden denklem ayarlanmalıdır. Örneğin dönüm sayısı 2 ise o zaman üçüncü dereceden bir denklem verilere en uygun eğriyi temsil edecektir. Şekil 3'te (Wolfram Alpha, 2018) farklı dönüm sayısına sahip eğriler görselleştirilmiştir.



Şekil 3. Çeşitli dereceden polinomlar ve temsil ettiği eğriler

Figure 3. Different polynomials and their curves

Şekil 3(a) sıfırıncı dereceden bir denklem özelliğinden ötürü sadece bir noktayı ifade etmektedir. Şekil 3(b) ise birinci dereceden bir denklemin çıktısıdır ve dönüm noktası yoktur (sıfırıdır). Dolayısıyla sifira bir eklendiğinde şekle bakmadan dahi denklemin birinci dereceden elde edileceği malumdur. Şekil

3'ün diğer grafiklerine bakıldığında eğrilerdeki dönüm sayılarının bir fazlası dereceden denklemler içereceği aşikârdır.

Yukarıda sunulan bilgi ve şekillerden yola çıkarak bu çalışmada belli bir salınımaya sahip veri topluluğunun nasıl bir dağılım göstereceği ve kaç dönüm yapacağı önem arz etmektedir. Şekil 1 dikkatlice gözlemlendiğinde verilerin en başında, en sonunda ve ortasında bulunmak üzere toplam üç dönüm sarih bir şekilde belirlemektedir. Dolayısıyla bu salınımaya uydurulacak en uygun polinom dördüncü dereceden bir denklemdir.

PoLin yaklaşımı özünde Çizelge 1'deki işlemleri içerir fakat günlük değerlerin ortalamasına harmonik analiz yerine polinom uydurmayı hedefler. Daha somut ifadeyle, bu çalışma Denklem 9 yerine Denklem 11'in kullanılmasını tavsiye etmektedir.

$$Y_i = a_0 + a_1 g_i + a_2 g_i^2 + a_3 g_i^3 + a_4 g_i^4 \quad (11)$$

Denklemde  $a_0, a_1, a_2, a_3$  ve  $a_4$  katsayılar  $g_i$  ( $i= 1, 2, 3, \dots, 364, 365$ ) ise gün değerlerini ifade etmektedir.  $Y_i$  de güneş ışınımı veya güneşlenme süresine karşılık gelmektedir.

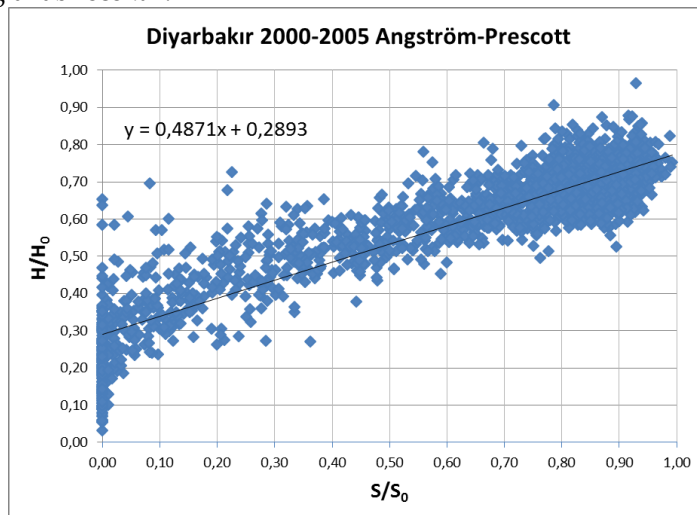
Bu aşamadan sonra Şekil 1 için polinom kullanılır ve sonucuna göre de Şekil 2 ortaya koyulur. Günlük değerlerin tahmini için PoLin modeli kullanılabilir durumdadır. Denklem 10'a benzer bir şekilde Denklem 12 yazılır ancak denklemde  $Y_H$  yerine  $Y_P$  (Dördüncü dereceden polinom sonucu) simgesi yer almaktadır.

$$Y_T = Y_P + Y_L \quad (12)$$

#### UYGULAMA (APPLICATION)

Uygulama için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Diyarbakır ölçüm noktasında elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu nokta  $40^\circ 13.5'D$  enlem ve  $37^\circ 54.5'K$  boylamında konumlanmaktadır. Veri takımı, 2000'den 2008'e kadar günlük güneş ışınımı ve güneşlenme süresi ölçümlerini içermektedir. Veriler eğitim ve doğrulama için iki takıma ayrılırken eğitim verileri 2000 ila 2005 yıllarını kapsar ve kalan veriler doğrulama amaçlıdır.

Klasik Angström-Prescott modeli için yapılan doğrusal regresyon çözümlemesi sonucuna göre  $a$  ve  $b$  katsayıları sırasıyla 0,2893 ve 0,4871 hesaplanmıştır (Şekil 4). Bu aşamadan sonra, tahminler Angström-Prescott modeli ile sağlanabilecektir.



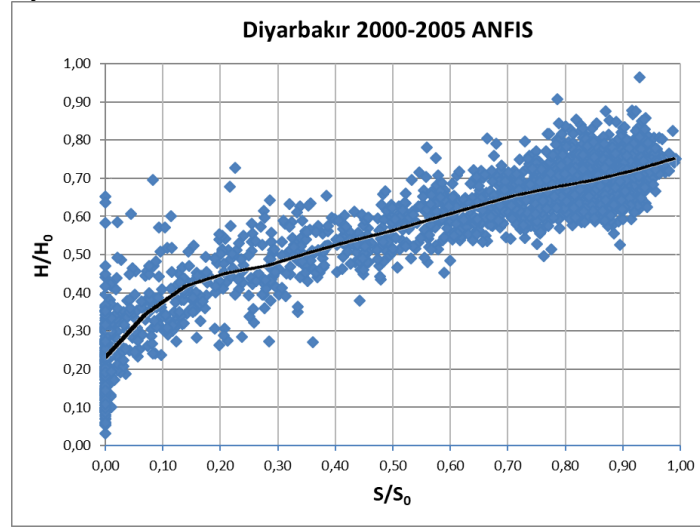
Şekil 4. Angström-Prescott model eğrisi ve katsayıları

Figure 4. Scatter diagram for classical Angström-Prescott model

Diğer modellerdeki gibi bir girdi ve bir çıktılı ANFIS tahmin modeli, Şekil 1 ve 2'deki yapıya göre şekillendirilmiştir. Verilerin eğitim sürecinde girdiler beş tane üçgen alt kümeye ayrılırken buna karşılık çıktılar doğrusal denklemler seçilmiştir. Dolayısıyla yapılan eşleştirme ile toplam beş kural ile tahmin modeli tesis edilmiştir. Sonuç olarak, ANFIS modeli Şekil 5'teki gibi eğrisel bir forma sahiptir. Bu

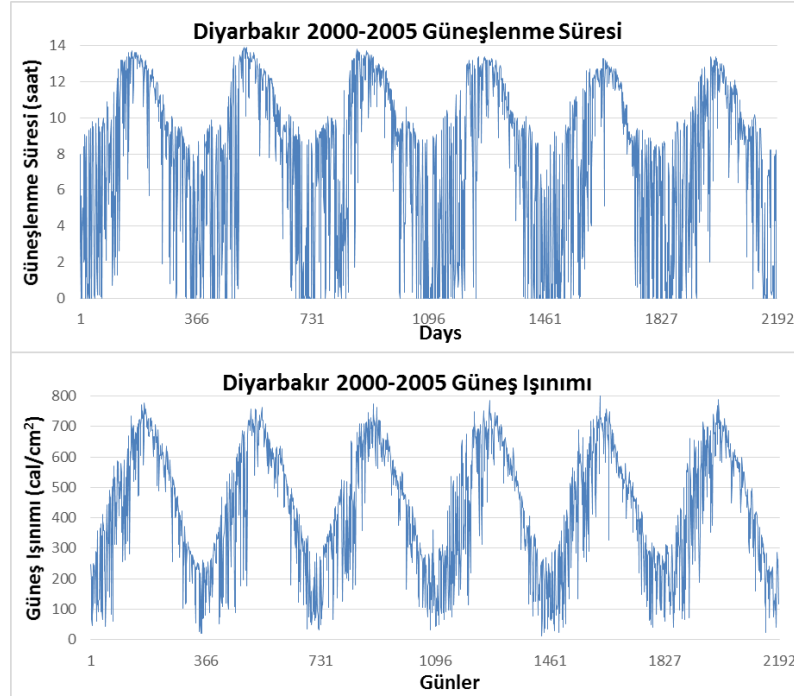


adımından sonra gözlemlenen değerler ile tahmin edilen veriler karşılaştırılacaktır ve diğer modellere nispeten hata oranları kıyaslanacaktır.

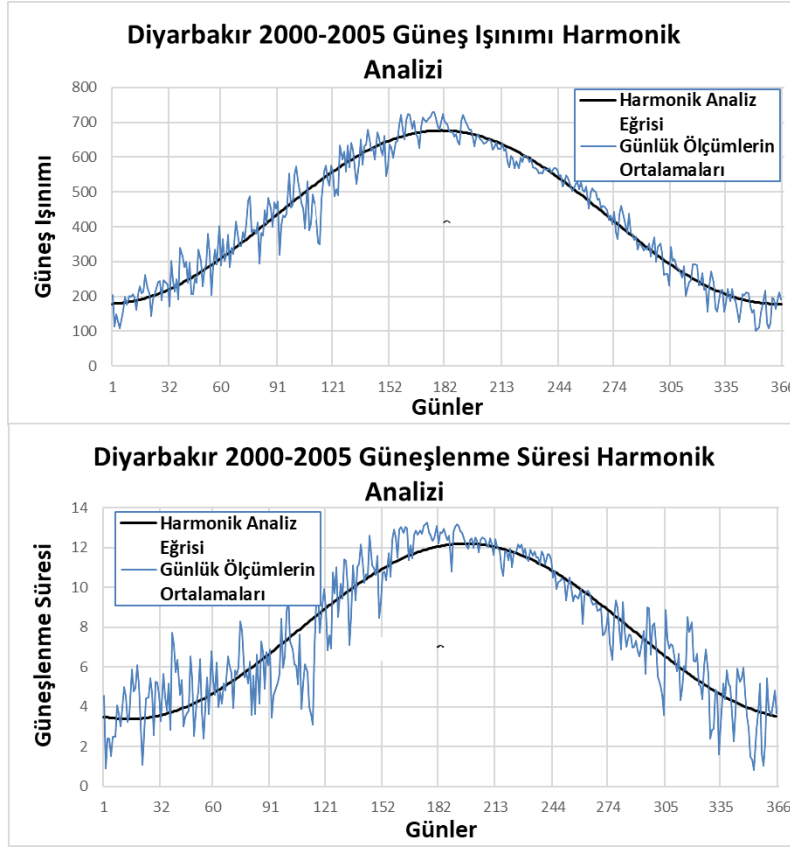


Şekil 5. ANFIS model eğrisi  
Figure 5. ANFIS model curve

2000-2005 yılları arasında ölçülen güneşlenme süresi ve güneş ışınımı için zaman dizileri Şekil 6'da gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, güneş ışınımı ve güneşlenme sürelerinin düzenli salınım yaptığı çok açıktır. Harmonik analiz sonuçları, Şekil 7'de güneşlenme süresi ve güneş ışınımı için sunulmuştur. Öte yandan Denklem 9'daki A, B ve  $\bar{Y}$  katsayıları, harmonik çözümleme sonuçlarına göre Çizelge 2'de yazılmıştır.



Şekil 6. Güneşlenme süresi ve güneş ışınımı zaman dizisi  
Figure 6. Time series for measured sunshine duration and solar irradiation



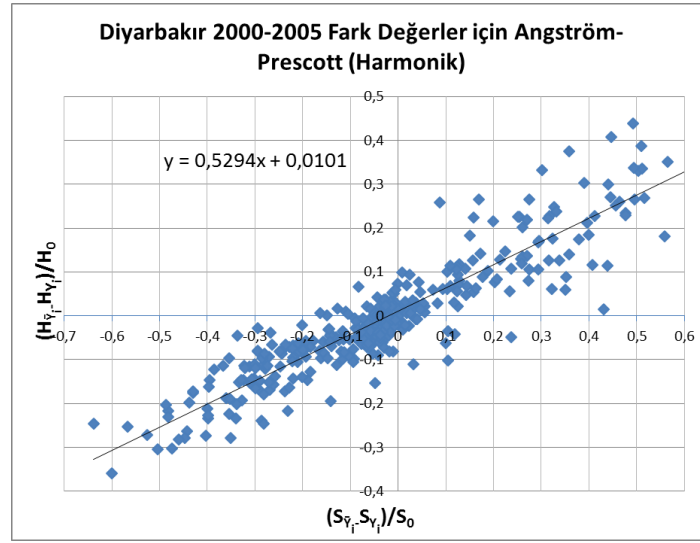
Şekil 7. Güneş ışınımı ve güneşlenme süresi harmonik analiz görselleri  
 Figure 7. Harmonic analysis illustration for solar irradiation and sunshine duration

Çizelge 2. A, B ve  $\bar{Y}$  katsayıları.

Table 2. A, B and  $\bar{Y}$  coefficients.

	Güneşlenme Süresi	Güneş Işınımı
$\bar{Y}$	7,790594	427,5009
A	-1,080406	10,5402
B	-4,276403	-248,7756

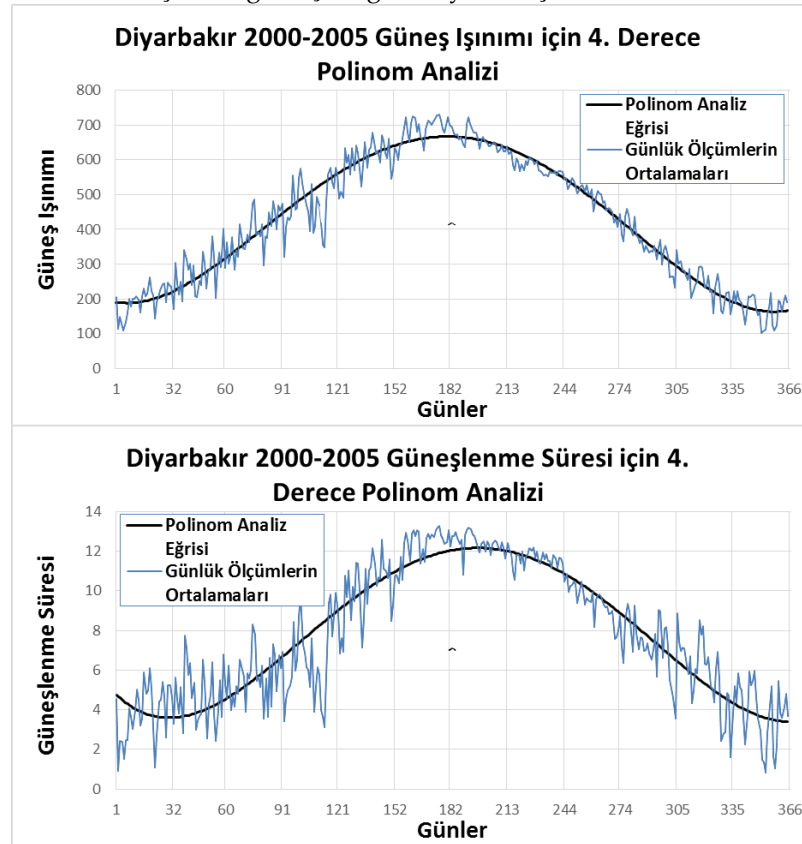
HarLin modeli için doğrusal regresyon analizi niteliğindeki Angström-Prescott denklemi kullanılmıştır. Harmonik analiz değerlerinin ( $Y_i$ ) ölçülmüş günlük değerlerin ortalamalarından ( $\bar{Y}_i$ ) farkları dikkate alınarak bu analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 8’de sunulmuştur ve Angström-Prescott denklemi için katsayılar  $a=0,0101$  ve  $b=0,5294$ ’dir.



Şekil 8. Harmonik fark değerler için Angström-Prescott model eğrisi ve katsayıları

Figure 8. Scatter diagram for classical Angström-Prescott model for harmonic difference values

Tahminler HarLin modeli ile sağlanabilecektir çünkü ilgili tüm katsayılar elde edilmiştir. Uygulamanın son aşamasında PoLin modeline ait katsayılar belirlenecektir. Yöntem kısmında söylendiği üzere harmonik eğri yerine dördüncü derece bir polinom ile güneş ışınımı ve güneşlenme süresi ortalama değerlerine uygun eğri uydurulmuştur. Polinom ayarlama neticesi, Şekil 9'da güneşlenme süresi ve güneş ışınımı için ortaya koyulmuştur. Denklem 11'deki  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  ve  $a_4$  katsayılar, polinom analiz sonuçlarına göre Çizelge 3'te yazılmıştır.



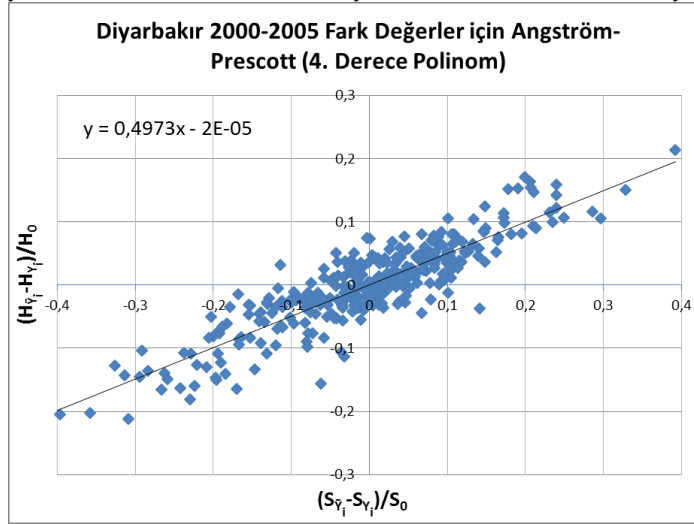
Şekil 9. Güneş ışınımı ve güneşlenme süresi polinom analiz görselleri

Figure 9. Polynomial analysis illustration for solar irradiation and sunshine duration

**Çizelge 3.**  $a_0, a_1, a_2, a_3$  ve  $a_4$  katsayıları.*Table 3.*  $a_0, a_1, a_2, a_3$  and  $a_4$  coefficients.

	Güneşlenme Süresi	Güneş Işınımı
$a_0$	4.848	190.81
$a_1$	-0.0919	-0.9250
$a_2$	$1.919 \cdot 10^{-3}$	0.0709
$a_3$	$-8.551 \cdot 10^{-6}$	$-3.772 \cdot 10^{-4}$
$a_4$	$1.083 \cdot 10^{-8}$	$5.186 \cdot 10^{-7}$

PoLin için HarLin'deki gibi Lineer Angström-Prescott denklemi kullanılmıştır. Polinom çözümleme sonuçlarının ( $Y_i$ ) ölçülmüş günlük değerlerin ortalamalarından ( $\bar{Y}_i$ ) farkları dikkate alınarak bu analiz gerçekleştirilmiştir. Netice Şekil 10'da aktarılmıştır ve Angström-Prescott model katsayıları  $a=-0,00002$  ve  $b=0,4973$ 'tür. Sonuç itibarıyla, tahminler tüm modeller Angström-Prescott, HarLin ve PoLin ile elde edilebilecektir çünkü aynı veriler kullanılmak suretiyle her bir modele ait katsayılar bulunmuştur.

**Şekil 10.** PoLin fark değerler için Angström-Prescott model eğrisi ve katsayıları*Figure 10.* Scatter diagram for classical Angström-Prescott model for polynomial difference values

Üç modele göre belirlenen tahminlerin hataları, Ortalama Mutlak Hata (OMH) adıyla anılan Denklem 13'teki ifadeye göre hesaplanmıştır ( $N$ , 2006-2008 arası veri sayısı).

$$OMH = \frac{1}{N} \sum \sqrt{(\text{Ölçüm} - \text{Tahmin})^2} \quad (13)$$

Angström-Prescott, ANFIS, HarLin ve PoLin modelleri ile belirlenen tahminlerin ortalama hatası sırasıyla  $40,18 \text{ cal/cm}^2$ ,  $44,71 \text{ cal/cm}^2$ ,  $37,28 \text{ cal/cm}^2$  ve  $36,67 \text{ cal/cm}^2$ 'dir. Angström-Prescott modeline kıyasla yüzde anlamında bir değerlendirme yapıldığında ANFIS tahminlerinin zayıflığı göze çarpmaktadır çünkü başarı oranı %11,3 daha azdır. HarLin ise Angström-Prescott denklemine göre %7,2 daha başarılıdır. Bu çalışmada ilk defa önerilen PoLin modelinin başarı oranı ise Angström-Prescott'a göre yükselmiştir ve %8,8 hesaplanmıştır.

## SONUÇ (CONCLUSION)

Günümüzde temiz enerji kaynakları yoğun bir şekilde araştırılmaktadır çünkü fosil yakıtların aşırı kullanımı sebebiyle sera gazları salınımı artmaktadır ve küresel ısınma (iklim değişikliği) kendisini iyiden iyiye hissettirmektedir. Sonuçta, rüzgâr, güneş, güneş-hidrojen, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi temiz enerji kaynaklarına teknolojik ve bilimsel manada daha fazla odaklanılmaktadır.

Bu makalede güneş ışınımı tahmini için polinom analiz ve klasik Angström-Prescott denklemi dikkate alınarak yeni bir yaklaşım PoLin modeli önerilmiştir. Literatürde, güneş ışınımı tahmini için

çeşitli modeller önerilmektedir ancak sadece bir tanesi harmonik analizi içermektedir. Bu çalışmada harmonik denklemin bir takım sakıncalarından bahsederek onun yerine polinom kullanılması uygun görülmüştür. Önerilen yöntem, güneş ışınımı hesaplamaları için HarLin gibi basit ve yeni bir yaklaşımdır.

Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilen Diyarbakır verilerinin 2000-2005 arasındaki modelleri eğitmek için geri kalanlar ise sınama için kullanılmıştır. PoLin modeli yapılan kıyaslamalar sonucunda en başarılı neticeleri ortaya koymuştur. Ortalama mutlak hata denklemine göre yeni model, meşhur Angström-Prescott ile kıyaslandığında yaklaşık %9 daha başarılı tahminler elde etmiştir. Esinlenen HarLin modelinin başarısı ise yaklaşık %7 ile sınırlı kalmıştır. ANFIS yaklaşımının çıktıları ise yaklaşık %11 daha kötü elde edilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akınoğlu B.G., and Ecevit, A. (1990) Construction of a quadratic model using modified Angström coefficients to estimate global solar radiation, *Solar Energy*, 45:85–92.
- Almorox, J., Bocco, M., and Willington, E. (2013) Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina, *Renewable Energy*, 60:382-387
- Amato U., Andretta A., Banoli B., Coluzzi B., Cuomo V., Fontana F., Serio C., (1986) Markov processes and Fourier analysis as a tool describe and simulate Daily solar irradiance. *Solar Energy* 37(3):179-94.
- Angström, A. (1924) Solar Terrestrial Radiation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50:121–126.
- Baldasano J.M., Clar J, Berna A., (1988) Fourier analysis of Daily solar radiation data in Spain. *Solar Energy* 41(4):327-34.
- Balling R., Cervený R.S., (1983) Spatial and temporal variations in long-term normal percent possible solar radiation levels in the United States. *J Climate Appl Met* 22:1726-1732.
- Benghanem M., Mellit A., and Alamri S.N., (2009) ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data: A case study, *Energy Conversion and Management*, 50:1644–1655.
- Chen, S.X., Gooi, H.B., and Wang M.Q. (2013), Solar radiation forecast based on fuzzy logic and neural networks, *Renewable Energy*, 60, 195–201.
- Dogniaux, R., and Lemoine, M. (1983) Classification of radiation sites in terms of different indices of atmospheric transparency. In Palz W. (éditeur), *Solar Energy R&D in the European Community, Series F, Vol. 2, Solar Energy Data*. D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, 94-107.
- Gopinathan, K. K., (1988) A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration, *Solar Energy*, 41:499-502.
- Güçlü, Y. S., Dabanlı, İ., and Şişman, E., (2014a) Short- and Long-Term Solar Radiation Estimation Method, *Progress in Exergy, Energy, and the Environment*, DOI 10.1007/978-3-319-04681-5\_48, Springer, Cham.
- Güçlü, Y. S., Yeleşen, M. Ö., Dabanlı, İ., and Şişman, E., (2014b) Solar Irradiation Estimations and Comparisons by ANFIS, Angström-Prescott and Dependency Models, *Solar Energy*, 109:118-124.
- Güçlü, Y. S., Dabanlı, İ., Şişman, E., and Şen, Z. (2015). HARmonic–LINear (HarLin) model for solar irradiation estimation. *Renewable Energy*, 81, 209-218.
- Güçlü Y.S., Dabanlı İ., Şişman E., and Şen Z. (2018). Improving of the Angström-Prescott Model Using Harmonic Analysis, *Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 2*, DOI 10.1007/978-3-319-62575-1\_43, Springer, Cham.
- Hinrichsen, K. (1994) The Angström formula with coefficients having a physical meaning, *Solar Energy*, 52:491–495.
- Jang, J.S.R. (1992) Self-learning fuzzy controller based on temporal back-propagation. *IEEETrans Neural Networks*, 3 (5) 714-723.

- Korachagaon, I., Bapat, V.N. (2012) General formula for the estimation of global solar radiation on earth's surface around the globe, *Renewable Energy*, 41:394–400.
- Lewis, G. (1989) The Utility of the Angström –Type Equation for the Estimation of Global Radiation, *Solar Energy*, 43(5):297-299.
- Lia, H., Maa, W., Liana, Y., Wanga, and X., Zhaob, L. (2011) Global solar radiation estimation with sunshine duration in Tibet, China, *Renewable Energy*, 36(11):3141–3145.
- Ögelman, H., Ecevit A., and Taşemiroğlu, E. (1984) Method for estimating solar radiation from bright sunshine data, *Solar Energy*, 33:619–625.
- Page, J. K. (1964) The estimation of monthly ea values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N–40°S, *Proceedings of the UN conference on new sources of energy*, paper no. 598, 4, pp 378–390.
- Prescott J. A. (1940) Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. Roy. Soc. S. A.* 64: 114-18.
- Rahimikhoob, A. (2013) Estimating global solar radiation using artificial neural network and air temperature data in a semi-arid environment, *Renewable Energy*, 35(9):2131–2135.
- Rietveld, M. R. (1978) A new method for estimating the regression coefficients in the Formula relating solar radiation to sunshine, *Agric. Meteorol.*, 19:243–252.
- Ross T. J. (1995) Fuzzy logic with engineering applications. New York: McGraw Hill Co.
- Sabbagh, J. A., Sayigh, A. A. M., and El-Salam, E. M. A. (1977) Estimation of the total solar radiation from meteorological data, *Solar Energy*, 19(3): 307-311.
- Samuel T. D. M. A. (1991) Estimation of Global Radiation for Sri Lanka, *Solar Energy*, 47(5):333-337.
- Soler, A. (1990) Monthly specific Rietveld's Correlations. *Solar and Wind Technology*, 2/3, 305-306.
- Sugeno, M. (1985) Industrial Applications of Fuzzy Control North-Holland, New York.
- Swartman, R. K., and Ogunlade, O. (1967) Solar Radiation Estimates from Common Parameters, *Solar Energy*, 11, 170-172.
- Şahin, A. D., (2007) A new formulation for solar irradiation and sunshine duration estimation, *International Journal of Energy Research*, 31:109–118
- Şahin, A. D., Kadioğlu, M., and Şen, Z. (2001) Monthly clearness index values of Turkey by harmonic analysis approach, *Energy Conversion and Management* 42:933-940.
- Şahin, A. D., and Şen, Z. (1998) Statistical analysis of the Angström formula coefficients and application for Turkey, *Solar Energy*, 62:29–38.
- Şen, Z. (2001) Angström equation parameter estimation by unrestricted method, *Solar Energy*, 71:95–107.
- Şen., Z. (2002) "İstatistik Veri İşleme Yöntemleri" (In Turkish), Turkish Water Foundation Publications, pp.243, Istanbul.
- Şen, Z. (2004) Yapay Sinir Ağları İlkeleri, Turkish Water Foundation Publications, Istanbul.
- Şen, Z. (2007) Simple nonlinear solar irradiation estimation model, *Renewable Energy*, 32:342–350.
- Şen, Z. (2008) "Solar energy fundamentals and modeling techniques", Springer, London.
- Şen, Z. (2017). Probabilistic innovative solar irradiation estimation. *International Journal of Energy Research*, 41(2), 229-239.
- Takagi, T., and Sugeno, M. (1995) Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15, 1, 116-132.
- Tolabi, H. B., Moradi, M.H. and Ayob, S. B. M., (2014) A review on classification and comparison of different models in solar radiation estimation, *International Journal of Energy Research*, 38:689–701.
- Ulgen, K. and Hepbasli, A. (2002) Estimation of solar radiation parameters for Izmir, Turkey, *International Journal of Energy Research*, 26:807–823
- Wolfram Alpha, Computational Knowledge Engine, <https://www.wolframalpha.com/>, ziyaret tarihi: 10 Ocak 2018.
- Wu, J., Chan, C. K., Zhang, Y., Xiong, B. Y., Zhang Q. H. (2014), Prediction of solar radiation with genetic approach combing multi-model framework, *Renewable Energy*, 66:132-139.

## APPROXIMATE DYNAMIC PROGRAMMING FOR OPTIMAL SEARCH WITH AN OBSTACLE

Yasin GÖÇGÜN

*Altınbaş University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering,  
34217, İstanbul, Turkey  
yasin.gocgun@altinbas.edu.tr*

(Geliş/Received: 30.04.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.08.2018)

**ABSTRACT:** In this paper, we study a class of optimal search problems where the search region includes a target and an obstacle, each of which has some shape. The search region is divided into small grid cells and the searcher examines one of those cells at each time period with the objective of finding the target with minimum expected cost. The searcher may either take an action that is quick but risky, or another one that is slow but safe, and incurs different cost for these actions. We formulate these problems as Markov Decision Processes (MDPs), but because of the intractability of the state space, we approximately solve the MDPs using an Approximate Dynamic Programming (ADP) technique and compare its performance against heuristic decision rules. Our numerical experiments reveal that the ADP technique outperforms heuristics on majority of problem instances. Specifically, the ADP technique performs better than the best heuristic policy in 17 out of 24 problem sets. The percent improvement in those 17 problem sets is on average 7.3%.

*Key Words:* Approximate dynamic programming, Markov decision processes, Optimal search

### Engelli Optimal Arama için Yaklaşımsal Dinamik Programlama

**ÖZ:** Bu makalede her biri bir şekilde sahip olan, arama bölgesi hedef ve engel içeren optimal arama problemlerini çalışmaktayız. Arama bölgesi küçük grid hücrelerine bölünmüştür ve araştırmacı her bir zaman periyodunda minimum maliyetle hedefi bulma amacıyla bu hücrelerden birini inceler. Araştırmacı hızlı ama riskli eylemi veya yavaş fakat güvenilir olanı seçebilir ve bu eylemler için farklı ücret öder. Bu problemleri Markov Karar Süreçleri (MKS) ile formüle etmekteyiz, fakat durum uzayının çetinliğinden dolayı MKS'leri bir Yaklaşımsal Dinamik Programlama (YDP) tekniği kullanarak yaklaşık olarak çözmekteyiz ve onun performansını sezgisel karar kurallarıyla karşılaştırmaktayız. Nümerik deneylerimiz problem örneklerinin çoğunda YDP tekniğinin sezgisel yöntemlerden üstün olduğunu ortaya çıkarmıştır. Spesifik olarak YDP tekniği 24 problem kümesinden 17'sinde en iyi sezgisel yöntemden daha iyi sonuç vermektedir. Bu 17 problem kümesindeki yüzde gelişme ortalama %7,3'tür.

*Anahtar Kelimeler:* Markov karar süreçleri, Optimal arama, Yaklaşımsal dinamik programlama

### INTRODUCTION

In many search problems, a region of interest is examined to find a stationary or moving target, whose location is only known probabilistically. Optimality criteria typically include maximizing the probability of detecting the target subject to a constraint on search effort, or minimizing the expected cost until locating the target. Optimal search problems arise in diverse settings such as mobile robot missions (Derr and Manic, 2009), visual search and detection (Najemnik and Geisler, 2008), and event

detection in sensor network (Wettergren, 2008). For example, large areas of the ocean may be searched in order to detect an enemy submarine in military applications, or to find someone lost at sea in search and rescue operations.

Our work is motivated by a much smaller-scale search that occurs during the course of minimally invasive surgery (MIS). While pre-operative images are certainly helpful, surgeons performing MIS still do not know exactly where certain critical structures lie at the start of the actual operation. Since real-time imaging is infeasible in many cases, surgeons must effectively use their surgical instruments to search through tissues and past other structures to locate a target organ of interest (e.g., the kidney) safely and efficiently.

Towards that end, we consider a class of optimal search problems where the search region contains a stationary target and a stationary obstacle, whose locations are known through a joint probability distribution. By “target” we mean the object that when found, ends the search problem and stream of costs. Note that while we use the term “obstacle”, we do not mean that it is necessarily something to be avoided. In fact, it may serve as a landmark towards finding the target, and therefore search strategies may try to find the obstacle before the target. For example, in minimally-invasive kidney operations, surgeons typically first try to find the ureter, which they can then follow along until it connects to the kidney. We also consider that the two objects may have shapes and occupy more than one cell of the search grid (as is the case with organs in MIS). We assume that upon finding one cell containing part of the object, the searcher knows the precise location of the entire object. At each step, the searcher chooses which cell to examine next and which of two actions to take on that cell: a quick-but-risky or a slow-but-safe action. In the context of MIS, the analogy is a choice between quickly cutting through the tissue that obstructs the surgeon’s view (risking cutting a critical structure just behind the tissue), or slowly peeling away layers of tissue to safely explore whether the structure is there or not. In the remainder of the paper, we shall refer to these two choices as “cut” or “explore.” While our motivating example is MIS and we adopt some language particular to that setting, we note that the tradeoffs involved apply to other search problems where views are obstructed, paths must be cleared to find objects, and there is a concern about damaging them along the way. For example, this applies to archeological excavations as well.

We aim to determine an optimal search policy; that is, the sequence of cells to be visited, along with the search action to choose at each of those cells, so as to minimize the total expected cost until locating the target. We formulate this as a Markov Decision Process (MDP), a mathematical framework used to model systems that evolve probabilistically over time. MDPs have been applied to diverse problems in fields such as manufacturing, healthcare, and logistics. In our problem, exact solutions for the underlying MDP model are computationally intractable. Therefore, we use Approximate Dynamic Programming (ADP) techniques to approximately solve our MDP model. We will compare the performance of ADP policies with heuristics under various instances of input parameters.

Depending on the nature of a search problem, different search algorithms can be used. Example of search algorithms include suboptimal control algorithms (Shechter et al., 2015), particle swarm optimization algorithms (Derr and Manic, 2009), and Bayesian algorithms (Chung and Burdick, 2007).

In this paper, we make the following contributions:

- Differing from the related literature, we introduce a class of optimal search problems where the search region contains both a target and an obstacle. Additionally, unlike the objects studied in the search literature, each of target and obstacle we consider has some shape.
- We provide an MDP model for this class of problems.
- We utilize an ADP-based approximation technique for approximately solving the underlying MDP. In particular, we approximately solve the search problem using direct-search based ADP, which is a relatively new technique for optimal search problems.
- We compare the resulting ADP policy with easy-to-use heuristics under diverse scenarios.



- Our numerical experiments reveal that the ADP policy outperforms heuristics on majority of problem instances. Hence, we demonstrate that direct-search based ADP is a viable technique for optimal search problems that have target and obstacle.

The paper is organized as follows. In Section 2, we provide the relevant literature. Section 3 includes the description of the search problem and the MDP model. The details of the ADP technique used to solve our MDP model are given in Section 4. We provide numerical results in Section 5. Finally Section 6 includes discussion of the numerical experiments and provides concluding remarks.

## LITERATURE REVIEW

Optimal search problems have been studied for several decades (Benkoski et al., 1991; Dobbie, 1968; Haley and Stone, 1980; Stone, 1975; Washburn, 2002). The work on these problems can be mainly categorized as searches for a moving target (Dell et al., 1996; Eagle and Yee, 1990; Singh and Krishnamurthy, 2003; Botea et al., 2013) or for a stationary target (Singh and Krishnamurthy, 2003; Botea et al., 2013; Chung, 2010; Lossner and Wegener, 1982; Ross, 1969; Snider, 2011; Kulich et al., 2014). Since we consider a stationary obstacle and target, we discuss here more the latter set of papers. Ross (1969) studies a search problem where a reward is received upon finding the target and the searcher may decide to stop searching if the reward does not justify the search costs. The author characterizes the form of the optimal strategy for this problem. Wegener (1980) considers features such as overlook probabilities that depend on the number of times a particular cell is searched. The objective is to minimize the expected time of the search. Lossner and Wegener (1982) study a search problem where a switching cost is incurred when going from searching one cell to another and provide conditions under which optimal strategies exist. Chung and Burdick (2007) study a search problem that aims to minimize the time until a decision is made regarding the target's location. The authors consider the likelihood that the target does not lie in any of the search cells, and propose a Bayesian framework which aims to improve the decision. Chung (2010) studies probabilistic search for a stationary target in a discretized search region considering imperfect detections. Snider (2011) studies an optimal search problem where a target is hidden at a location with a known distribution and a searcher tries to find it using another distribution, with the objective of minimizing the average number of steps to locate the target. Kulich et al. (2014) study the problem of finding an optimal path in order to find a stationary object located in an environment whose map is not a priori known. The authors present several strategies for this problem and statistically evaluate their performance for search in comparison to exploration. Shechter et al. (2015) consider the search for a single stationary target. They consider both unconstrained and constrained versions of the search problem. In the unconstrained search, the searcher is allowed to visit cells in any order, whereas the constrained search requires that the searcher visit adjacent cells. The authors provide structural results for the unconstrained search problem and approximately solve reasonably-sized problems of the constrained search using two suboptimal control algorithms.

Furthermore, Nitinavarat and Veerevalli (2017) develop an adaptive search policy for the problem of universal search and stop. The authors show that the knowledge of the target distribution "only useful for improving the reliability for detecting that the target is missing". El-Hadidy and El-Bagoury (2015) work on a search problem where a single searcher tries to detect a three-dimensional randomly located target in a known zone, with the objective of minimizing the expected value of the time required to detect the target. Gabal and El-Hadidy (2015) study a search problem where a single searcher searches for a randomly located target in a bounded known region. The authors aim to minimize the expected value of the time for detecting the target. El Hadidy (2016) studies a search problem where  $n$  searchers try to detect an  $n$ -dimensional randomly moving target. The author shows that there is a fuzzy optimal search plan that minimizes the expected value of the first meeting time.

The search literature also includes the application of approximation methods for dynamic programming formulations of optimal search problems. Zhao et al. (2008) study decentralized Bayesian-search problems where multiple autonomous agents search unknown number of targets. The authors formulate these problems as a decentralized optimal control problem using dynamic programming, and they propose a policy iteration algorithm for approximately solving these types of problems.

Our work differs from the search literature in the following aspects. We study a class of search problems with objects having shapes and consider their joint uncertainty. While many papers in the search literature discuss structural properties of the optimal solution, our problem is analytically intractable, and therefore we focus on the performance of suboptimal policies obtained through ADP methods. Our ADP approach is essentially a one-step lookahead method, which is a well known and standard technique for dealing with large state space MDPs (Bertsekas and Tsitsiklis, 1996). However, instead of approximating the cost-to-go through a simple greedy heuristic, we consider a more rigorous approach to approximation based on ADP methodologies. By using basis functions tuned offline to approximate cost-to-go functions, the ADP approach also offers considerable run-time advantages over traditional lookahead approaches, which is critical in settings like MIS.

## PROBLEM DESCRIPTION AND MATHEMATICAL FORMULATION

We consider the following class of optimal search problems.

- The search region is discretized into  $N$  cells. Without loss of generality, we assume our search takes place over a two dimensional grid.
- There is a stationary target and a stationary obstacle, both of which have some known shape (i.e., they can occupy multiple cells in the search region). If any part of the target (obstacle) is found in a particular cell, then the cell locations of the other parts of the target (obstacle) are known with certainty.
- The initial locations of the target and the obstacle are known probabilistically. We indicate a joint probability distribution of a representative cell for the target and obstacle, since knowing where this marker cell is resolves the location uncertainty of the other parts of that object.
- The target/obstacle is detected with certainty when the searcher examines a cell containing it.
- At each step of the search, the searcher makes two types of actions: 1) which cell to visit next, and 2) which type of search action to choose on the cell visited: a slow but safe exploring or a quick but risky cutting of the cell (i.e., explore or cut).
- The following cost parameters are considered:
  - (a)  $c_H^T$  : cost of hitting the target
  - (b)  $c_H^O$  : cost of hitting the obstacle
  - (c)  $c_E$  : cost of exploring a cell

Note that the first two costs are incurred only if the cut action is taken on a cell containing the target (obstacle), while the third cost is a fixed cost of choosing to safely explore. If the target is located at any step, the problem ends. Otherwise, the joint probability distribution of the representative target and obstacle cells gets updated appropriately (i.e., via Bayes' rule). The objective of the search is then to determine an optimal sequence of cells to be visited, along with the action to choose on each cell, which minimizes the expected cost until locating the target.

We next provide an MDP model for this class of search problems.

### The MDP Model

Markov Decision Process (MDP), also known as stochastic dynamic programming, is a mathematical framework used to model systems that evolve probabilistically over time. An MDP consists of the following components:

- Stage: It consists of time periods through which the system evolves.
- State: States capture the key features of the system at various time-points.
- Action: One of the feasible actions is chosen at each state.
- Probabilistic state transitions: An action chosen at each state makes the process probabilistically evolve to a new state.
- Reward/cost: A reward/cost is associated with each state-action pair.

The objective of an MDP is to compute an action in each state so as to maximize expected net reward (or minimize expected cost). MDPs for small-sized problems are optimally solved whereas for large-sized problems, approximate dynamic programming (ADP) techniques are used to obtain approximate solutions.

In order to efficiently express the components of our MDP model when considering objects with shape, we compute the probability of an object being in a particular cell in terms of the probability distribution of a representative cell of that object. Specifically, a particular cell of the obstacle is marked  $O_1$  and a specific cell of the target is marked  $T_1$ . We assume that the rest of cells of each object are completely known upon finding one of its components and therefore it is sufficient to represent states in terms of the joint probability distribution of the marker cells for obstacle and target, respectively. Without loss of generality, we will refer to the example of an "L" shaped target and obstacle in Figure 1 throughout rest of the section to explain various aspects of the MDP components. Random variables  $O_1, O_2, O_3$ , and  $T_1, T_2, T_3$  are used to represent the locations of the cell components of the obstacle and the target, respectively. For specific locations of the objects given in Figure 1, the values of  $O_1, O_2, O_3$  are 2, 1, and 7, respectively, and the values of  $T_1, T_2, T_3$  are 35, 34, and 40, respectively. Based on the above discussion, we assume that we can know the entire location of the obstacle and the target through representative cells  $O_1$  and  $T_1$ , respectively.

### State Space

The state space of our MDP model takes the following form:

$$s = p_{ij}, i=1, K, N, j=1, K, N$$

where  $p_{ij}$  is probability that  $O_1 = i$  and  $T_1 = j$ ,  $i = 1, K, N$ , and  $j = 1, K, N$ .

The relationship between the search space and the entries of the probability matrix (hereafter to be called the " $P$  matrix") is illustrated in figures 1 and 2. Here the search region consists of  $N = 48$  (6\*8) cells and entry  $p_{2,35}$  would indicate the a priori probability that  $O_1 = 2$  and  $T_1 = 35$ .

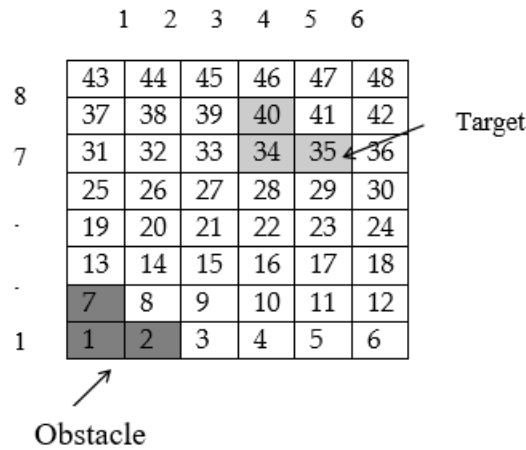


Figure 1. Search space

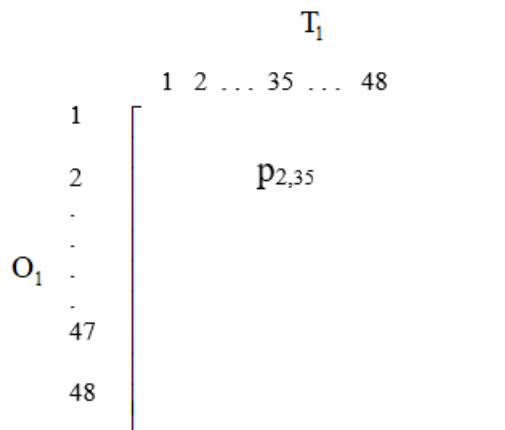


Figure 2. The Probability matrix

**Action Space**

The action space takes the following form:

$$a=(a_1,a_2),$$

where  $a_1 \in A_k$  is the location of the cell to be searched ( $A_k \subset \{1, K, N\}$  is the set of feasible cells that can be searched at step  $k$  (i.e., in our case, the cells adjacent to those already searched)), and  $a_2 \in \{E, C\}$  is the action chosen for the cell to be searched ( $E$  and  $C$  stand for “explore” and “cut”, respectively.).

**Probability Updates**

After searching a cell, say,  $i$ , at the current step, the process moves to a new state, which requires the update of the entries of the  $P$  matrix. Depending on whether an object is found in cell  $i$ , the probability updates will be different, which is explained next.

**Case 1: Finding nothing in the cell:** As an example, suppose cell 28 is searched and nothing is found there. Then we know that  $O_1, O_2,$  and  $O_3$  are not there, which equivalently means that  $O_1$  cannot be in cells 28, 29, or 23 by its geometry. (Note that, since we update the  $P$  matrix by considering only  $O_1$ , we zero out only 23<sup>rd</sup>, 28<sup>th</sup>, and 29<sup>th</sup> rows and columns. For instance, we do not zero out rows and

columns corresponding to cells 22, 27, and 33 since  $O_1$  can still be in one of those cells. In particular, while cell 28 is empty, the obstacle can be found in cells 32,33, and 38, or in cells 21, 22, and 27, or in cells 26, 27, and 32). The same holds for  $T_1$ . Therefore, as suggested in Figure 3, we perform the Bayesian update of the  $P$  matrix by zeroing out the appropriate rows and columns, and renormalizing the remaining probabilities. We can easily adapt the updating method to consider the geometry of any other shape.

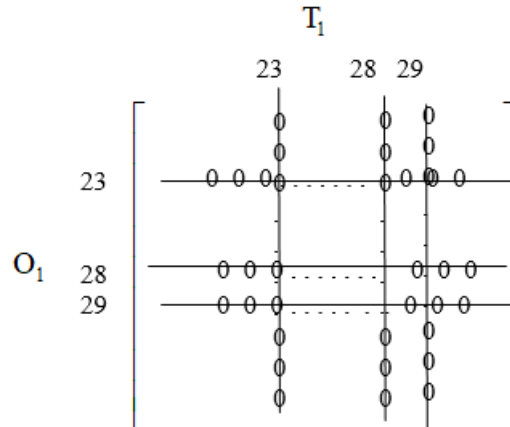


Figure 3. The view of the the probability matrix when no object is found.

**Case 2: Finding the obstacle:** As discussed, finding any part of the obstacle is equivalent to finding  $O_1$  in its respective cell. Suppose the obstacle found is situated as shown. Since it becomes known that  $O_1$  is in cell 28, we first update the  $P$  matrix by zeroing out all other rows except for row 28. Furthermore, by the geometry of  $T$ , if  $O$  takes up cells 27, 28, 33, then  $T_1$  cannot be in those cells nor cells 22, 23, 29, nor 34, and we put zeroes in the corresponding columns for  $T_1$ . Note that  $T_1$  cannot be in cell 34 since we know in this case that the target would have to occupy cells 34, 33, and 39, which is impossible as cell 33 is occupied by the obstacle. Finally, we renormalize the remaining probabilities in row 28 to update the  $P$  matrix.

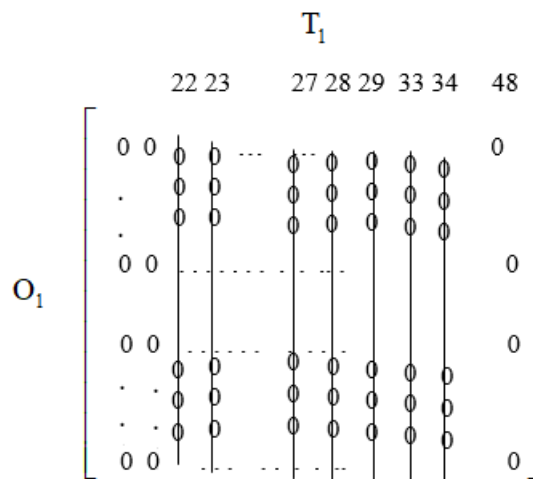


Figure 4. The view of the search space and the probability matrix when the obstacle is found

**Case 3: Finding the target:** As stated earlier, when any component of the target is detected in cell  $i$ , the search problem ends. In addition, when the exact location of the target is known but not detected through the "cut" or "explore" action, the problem still ends.

### Immediate Costs

At any step of the search, an immediate cost is incurred upon choosing a cell to be searched along with the action to be performed on the selected cell. This cost equals the fixed exploration cost for the "explore" action, whereas it equals the expected cost of hitting an object on the selected cell for the "cut" action.

### The Cost-to-Go Function

The cost-to-go function for a given state  $s$  is expressed as follows:

$$V(s) = \min_{i \in A_k} \{ \min \{ c_E + P(O_1=i)V(s^1) + P(O_2=i)V(s^2) + P(O_3=i)V(s^3) + (1 - P(T \in i) - P(O \in i))V(s^4), P(T \in i)c_H^T + P(O \in i)c_H^O + P(O_1=i)V(s^1) + P(O_2=i)V(s^2) + P(O_3=i)V(s^3) + (1 - P(O \in i) - P(T \in i))V(s^4) \} \}, \quad (1)$$

where  $s^1$  is the new state upon finding  $O_1$  in cell  $i$  (obtained using the probability updates described earlier),  $s^2$  is the new state upon finding  $O_2$  in cell  $i$ ,  $s^3$  is the new state upon finding  $O_3$  in cell  $i$ , and  $s^4$  is the new state upon finding no object in cell  $i$ . Note that by the optimality equations, conditional on visiting a particular cell, we can easily determine the optimal action of "cut" or "explore" because both actions have the same expected cost to go thereafter. However, it is the choice of which cell to visit next that greatly complicates things.

Our state space consists of all probability maps that could result after different sequences of cell visits, which makes exact solution with traditional MDP algorithms intractable for even moderately sized grids. Instead, we approximately solve the MDP using ADP techniques.

## APPROXIMATE DYNAMIC PROGRAMMING

ADP has been widely used to deal with MDP's curse of dimensionality in diverse fields such as manufacturing, construction, healthcare, and revenue management (Powell, 2007). These techniques are classified as linear programming (LP)-based ADPs and simulation-based ADPs. LP-based ADPs start with a linear program whose optimal solution equals the optimal value function in Bellman's equations of the underlying MDP (in our problem, optimal value function corresponds to  $V(s)$  of Eq. (1)). Because of an inordinate number of variables and constraints, the resulting LP is approximately solved using techniques such as column generation and constraint sampling (Adelman, 2003; Adelman, 2004; De Farias and Roy, 2003). Simulation-based ADPs differ from LP-based ADPs in that they employ simulation models such as statistical sampling and reinforcement learning methods for estimating the value functions (Bertsekas and Tsitsiklis, 1996; Chang et al., 2007; Sutton and Barto, 1998).

In both LP and simulation-based approaches, a core concept in ADP is the approximation of the value function through a combination of basis functions. The intuition behind basis functions are that they represent some essential features of the state that may be predictive of the value of being in that state (Bertsekas and Tsitsiklis, 1996). One of the common ways of approximating the value function through basis functions is linear approximation, which takes the following form:

$$V(s) \approx \sum_{k=1}^K r_k \Phi_k(s), \quad (2)$$

where  $r_k$  for  $k=1, K, K$  are tuning parameters and  $\Phi_k(s)$  for  $k=1, K, K$  are basis functions. After the value function is approximated, the approximation parameters are tuned iteratively to obtain an ADP policy. More specifically, ADP techniques aim to find the optimal parameter vector that minimizes a certain performance metric such as the sum of squared differences between the approximate cost-to-go function and the estimated cost-to-go function over sampled states. The resulting optimization problem is typically solved using regression-based techniques (Bertsekas and Tsitsiklis, 1996; Powell, 2007); however, we apply direct search, an approach that tunes the ADP parameters by solving an optimization problem that aims to maximize the performance of the policy resulting from those parameters (Maxwell et al., 2013; Shechter et al., 2015). The ADP policy is then obtained using the approximate value functions.

### Retrieving the ADP Policy from the Approximate Value Function

After the parameter tuning phase is performed and hence the approximate value of a given state is available (i.e., the approximate value of  $V(s)$  for a state  $s$ ) due to having final values of  $r_k$ 's in Eq. (2), the ADP policy is retrieved by computing a decision vector (i.e.,  $(a_1, a_2)$ ) for any desired state of the system. That decision vector is myopic with respect to value function approximation of our MDP. Mathematically, the decision retrieval problem for a particular state  $s$  of our MDP model is expressed as follows:

$$\min_{i \in A_k} \{ \min \{ c_E + P(O_1=i)\tilde{V}(s^1) + P(O_2=i)\tilde{V}(s^2) + P(O_3=i)\tilde{V}(s^3) + (1 - P(T \in i) - P(O \in i))\tilde{V}(s^4), P(T \in i)c_H^T + P(O \in i)c_H^O + P(O_1=i)\tilde{V}(s^1) + P(O_2=i)\tilde{V}(s^2) + P(O_3=i)\tilde{V}(s^3) + (1 - P(O \in i) - P(T \in i))\tilde{V}(s^4) \} \}, \quad (3)$$

where  $\tilde{V}(s^i)$  for  $i=1, K, 4$  is the approximate value of state  $s^i$ .

Note that the structure of our problem enables us to calculate the expected cost of the search exactly, owing to the fact that state transitions of our MDP model are deterministic. We therefore do not need to evaluate policies using simulation as in simulation-based ADPs. In this sense, our way of implementing ADP differs from both simulation-based ADPs and LP-based ADPs.

We next discuss the details about basis functions and the parameter tuning method we chose for solving the MDP model introduced earlier.

### Basis Functions

While basis functions can take on a wide variety of forms and calculations, based on our motivating scenario (MIS), we consider easy-to-calculate basis functions, which may be better suited to real-time decision making. We experimented with several different forms of the basis function, and settled on the following one to test extensively in numerical experiments.

**Component-based Basis Functions:** Each basis function equals the probability that any component of the target or obstacle is located at a distinct cell. These basis functions have the following form.

$$\Phi_k(s) = p_k(s),$$

where  $p_k(s)$  is  $P(T \in k \cup O \in k)$  at state  $s$ . In other words, to each cell there is a corresponding basis function that indicates the probability of finding any part of the obstacle or target there. Using these basis functions, we have the following approximation for  $V(s)$ :

$$\tilde{V}(s) = \sum_{k=1}^N r_k p_k(s).$$

### Direct Search

We tune parameters using direct search, an approach described in the ADP literature (Adelman, 2004). Whereas regression-based techniques seek good approximations to the value function, direct search focuses on the ultimate goal of finding good policies. In other words, it tackles an optimization problem where the variables consist of feasible  $r$ 's and the objective function value is the expected cost of the policy induced by the corresponding parameter vector. The resulting optimization problem takes the following form:

$$\min_{r \in R^N} E[\sum_{t=0}^T c(s_t, \pi_r(s_t))], \quad (4)$$

where  $T$  is a random variable denoting the final step of the search,  $s_t$  is the state at step  $t$  of the search,  $\pi_r$  is the policy obtained by the parameter vector  $r$ ,  $\pi_r(s_t)$  is the action dictated by the policy  $\pi_r$  in the state at stage  $t$ , and  $c(s_t, \pi_r(s_t))$  is immediate cost incurred at step  $t$  as a result of choosing  $\pi_r(s_t)$ . Here,  $\pi_r$  is obtained by solving the aforementioned decision retrieval problem via the parameter vector  $r$  used to approximate the value function for each possible state visited during the search. The objective function in Eq. (4) is the expected cost of the policy  $\pi_r$ . With the implementation of direct search, we obtain the values of  $r$ 's in Eq. (2) and thus have the approximate value of a given state.

We employ Simulated Annealing (SA) as a method for seeking a vector  $r$  that solves the optimization problem of Eq. (1). In other words, we heuristically solve this optimization problem using SA and hence obtain good but not optimal solutions for the  $r$  vector. The main reason for choosing SA over other heuristic algorithms is its ability to find high-quality solutions quickly (Suman and Kumar, 2006).

### Simulated Annealing for Direct Search

SA is one of the efficient heuristic algorithms used to solve global optimization problems (Suman and Kumar, 2006). Its features were inspired from an annealing process in which a material is cooled slowly to alter its properties such as strength and hardness. Starting from an initial temperature, the annealing process cools the material slowly by periodically reducing the temperature, with the objective of minimizing its energy level (Suman and Kumar, 2006).

At a given feasible solution, the SA algorithm generates a new feasible solution using a neighbourhood scheme. It accepts the new feasible solution when its objective function value is better than that of the current solution; otherwise, the new worse solution is accepted with a probability which is decreasing in the absolute difference between the values of the current and new solution, and increasing in the current temperature. To implement this, a uniform  $[0,1]$  random number is generated, and if it is less than the following term, the current solution is replaced by the new solution:

$$e^{-\frac{\Delta E}{T}},$$

where  $\Delta E$  is the absolute difference between the values of the new and current solution, and  $T$  is the current temperature.

The key feature of SA is that it does not get stuck in local minima because of its ability to visit worse solutions, and therefore has the potential to reach a global minima. After a certain number of iterations, the temperature of the SA algorithm is periodically decreased in order to lower the probability of accepting a worse solution. The algorithm stops after a certain number of iterations or after a stopping criteria is met.



The features of our SA algorithm for solving the optimization problem in direct search are listed below.

- **Initial Solution:** Each component of the vector  $r$  is set to a Uniform  $[0, 2\sqrt{N}]$  random number.
- **Neighbourhood Scheme:** At each iteration, a new solution is generated by perturbing each component of a randomly chosen fraction of  $r$  with a random quantity using a Uniform  $[0, \sqrt{N}]$  distribution. The fraction value is fixed at 0.75.
  - **Temperature Schedule:** After every  $m$  iterations, temperature  $T$  is set to  $T(1-\varepsilon)$ , where  $\varepsilon \in (0,1)$ .
  - **Parameter Values:** Number of iterations  $K$ ,  $m$ ,  $\varepsilon$ , and initial temperature are set to 500, 10, 0.1, and 1, respectively.

### A Pseudo-code for Direct-search based ADP

The pseudo code for our ADP algorithm is given below.

Step 1. Come up with basis functions for the value function approximation.

Step 1.1. Determine the number of basis functions and hence the size of the parameter vector  $r$  (referring to Eq. (2)).

Step 2. Apply direct search for tuning parameter vector  $r$ .

Step 2.1. Solve the optimization problem in Eq. (4) heuristically using SA algorithm.

Step 2.1.1. At each step of SA, determine a parameter vector  $r$  using the neighborhood scheme.

Step 2.1.2. Evaluate the objective function in Eq. (4) using the current solution (i.e., the parameter vector  $r$  determined in Step 2.1.1.)

Step 2.1.3. Revise the current solution by either accepting the worse solution or changing it with a better solution. Go to Step 2.1.2 until the SA algorithm ends.

Step 3. Retrieve the ADP Policy from the approximate value function

Step 3.1. Solve the optimization problem in Eq. (3) to obtain a decision vector for any desired state of the system.

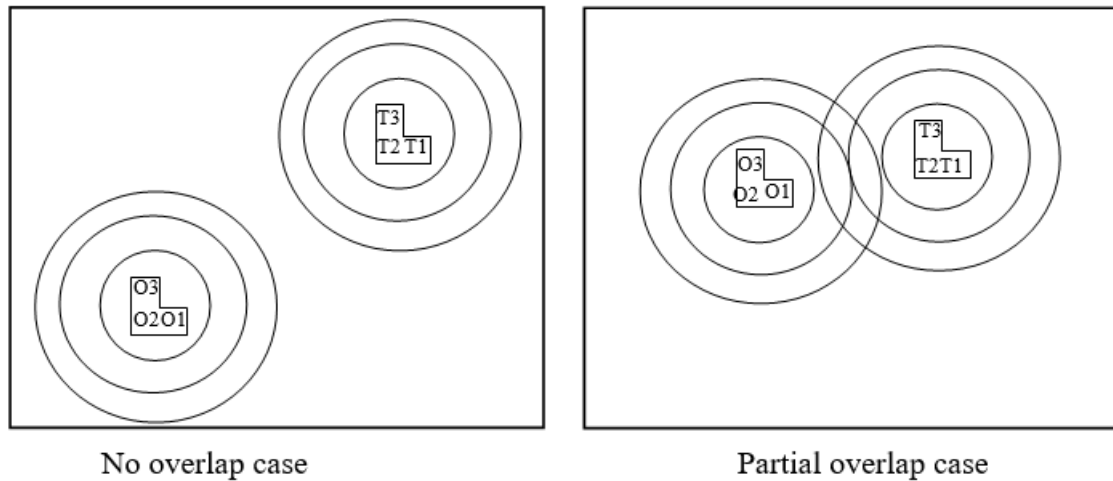
## NUMERICAL EXPERIMENTS

We studied the search problem on a two-dimensional grid. Problem instances were generated for a variety of cases determined by the shapes and the location distributions of the objects. Specifically, we considered two different cases based on the shapes of the objects: 1) Unit-shape case, in which each of the objects occupies a single cell, and 2) L-shape case, in which each of the objects occupies three cells (as shown in Figure 1). The location distributions of both of the objects were determined using a discretized bivariate Gaussian distribution. We followed a two-step approach for constructing the joint probability distribution of  $O_1$  and  $T_1$ . First we considered possible locations of  $O_1$  in the search region, and then considered possible locations of  $T_1$  conditioned on each location of  $O_1$ . The resulting values for  $P(O_1)$  and  $P(T_1|O_1)$  were then used to construct the  $P$  matrix describing  $P(O_1 \cap T_1)$ . The location distribution of  $T_1$  can then be obtained through the marginal distribution of the  $P$  matrix. Furthermore, we also considered the rigid connection case where upon finding the obstacle in the search region, the exact location of the target is known. In this rigid case, finding the location of  $O_1$  or  $T_1$  resolves the uncertainty of the other in that  $T_1$  is located exactly at some fixed offset from  $O_1$  (e.g., 3 to the right and 3 up).

The size of the search region was determined based on different levels of the variance of the location distributions so as to provide sufficient coverage of the possible object locations. We considered a  $13 \times 13$  search region, which can be regarded as a region for a reasonably-sized problem. The covariance of the Gaussian distribution for the obstacle was set to the identity matrix  $\mathbf{I}$ , which means that  $\sigma$  equals 1. The covariance of the Gaussian distribution for the target conditional on the location of the obstacle was set to  $0.25\mathbf{I}$  and 0, corresponding to two different cases: the *scaled case* (i.e., the variance for the conditional target distribution  $P(T_1 | O_1)$  is scaled) and the *rigid case*. For each level of standard deviation, we generated two different cases: 1) complete overlap, in which the location distributions of the objects overlap each other (i.e., both objects have the same expected location); 2) partial overlap, in which there is a partial overlap between the location distributions of the objects (see Figure 5). These cases were constructed through different considerations of the distance between the mean locations of the objects. As an example, the complete overlap corresponds to an offset of (0,0) for the expected location of  $T_1$  relative to the expected location of  $O_1$ , while the partial overlap case uses an offset of (3,3).

We used different levels for the cost parameters in order to see their effects on the performance of various decision rules. Specifically, for each combination of standard deviation, problem size, and offset, we generated three problem sets for each of the Unit-shape cases and the L-shape cases by varying the hitting costs of the target and the obstacle. Finally, the exploration cost of a cell was fixed at 1.

In implementing our SA algorithm, we used multiple replications. Specifically, the number of replications was set to 5 for each problem set. This means that the SA algorithm starts with a distinct vector of  $r$  at each replication. The best value obtained after running SA with five replications was reported as the expected cost of the ADP policy.



**Figure 5.** The depiction of the search region for the partial overlap case. The cocentric circles represent contour lines of the bivariate Gaussian distribution for the obstacle and the target, respectively.

### Heuristic Decision Rules for Comparison

We compared the performance of the ADP policy against the following two heuristics:

**MinProb:** This policy chooses at each step of the search the cell with the lowest probability that an object (i.e., a target or an obstacle) is located therein, and then chooses the cut or explore action according to the minimum of the exploration cost and the expected cost of hitting an object for that cell. Note that when the cost of hitting the target and the obstacle are equal, this policy is a greedy policy in the sense of choosing the action which yields the smallest immediate cost.

MaxProb: At each step of the search, MaxProb chooses the cell with the highest probability that an object (i.e., a target or an obstacle) is located therein. Therefore, this heuristic may be considered greedy in the sense of trying to locate an object as quickly as possible. After choosing the cell to examine, the MaxProb policy chooses the action ("cut" or "explore") on the chosen cell according to whichever yields the smallest immediate cost.

## Results

Computational results for the different cases are reported in Tables 1-4. Each table lists the percentage improvement obtained by the ADP policy over the best of the greedy policies for each of the problem sets. As can be seen from all of the tables, the Maxprob heuristic performs much better than the Minprob heuristic in every case. Therefore, the final column of each table represents the percent improvement of the ADP policy over the Maxprob heuristic.

We begin by giving the results for the rigid case (Tables 1 and 2). These results reveal that the ADP policy outperforms MaxProb, the best greedy heuristic, in most of the problem sets in the L-shape case (Table 2), whereas it generally performs better than MaxProb in the Unit-shape case (Table 1). The average improvements over MaxProb are about 5% and 5.8% for the Unit-shape rigid case and the L-shape rigid case, respectively. On the other hand, the ADP policy outperforms MaxProb in the L-shape scaled case, while it performs roughly the same as MaxProb in the Unit-shape scaled case (Tables 3 and 4). In particular, the ADP policy performs on average 6.3% and 0.4% better than MaxProb in the L-shape scaled case and the Unit-shape scaled case, respectively. Finally, note that the maximum improvement over MaxProb is about 17% (see Tables 1 and 2).

**Table 1.** The results for the Unit-shape rigid case.

Offset	$c_H^T$	$c_H^O$	MinProb	MaxProb	ADP	% Imprv.
1	50	150	17.62	6.16	5.61	8.93
	100	100	18.87	6.54	6.18	5.5
	150	50	18.91	6.81	5.64	17.18
2	50	150	16.45	6.37	6.42	-0.78
	100	100	18.87	6.76	7.2	-6.51
	150	50	20.07	7.05	6.66	5.53

**Table 2.** The results for the L-shape rigid case.

Offset	$c_H^T$	$c_H^O$	MinProb	MaxProb	ADP	% Imprv.
1	50	150	17.62	4.33	4.35	-0.46
	100	100	18.87	4.71	4.64	1.49
	150	50	18.91	4.94	4.3	12.96
2	50	150	16.41	4.58	4.55	0.66
	100	100	18.76	4.94	4.79	3.04
	150	50	19.9	5.21	4.32	17.08

The expected costs of the search for the ADP policy and MaxProb are affected by the shapes of the objects as well as the uncertainty of the location of the target. In particular, the expected costs of the search for the ADP policy and MaxProb are higher in the Unit-shape case than in the L-shape case for a fixed type of location distributions (Table 1 versus Table 2, and Table 3 versus Table 4). While the larger objects (e.g., L-shape vs. Unit-shape) have more surface area that might be accidentally

damaged, they also eliminate more cells from the probability matrix when nothing is found. This advantage in the uncertainty reduction apparently outweighs the higher risk of hitting the object. As expected, the expected costs for these policies are higher in the scaled case than in the rigid case when both objects have the same shape (Table 1 versus Table 3, and Table 2 versus Table 4). When the uncertainty of the location of the target conditional on the location of the obstacle is low (corresponding to the rigid case), finding the obstacle during the search yields more information, thereby resulting in smaller expected cost.

It is also worth noting that the performance of the ADP policy with respect to Maxprob decreases with the increase in offset for the unit-shape case. Whereas the ADP policy becomes a more viable method with the increase in offset for the L-shape rigid case.

**Table 3.** The results for the Unit-shape scaled case.

Offset	$c_H^T$	$c_H^O$	MinProb	MaxProb	ADP	% Imprv.
0	50	150	20.94	8.58	7.98	6.99
	100	100	23.19	8.68	8.2	5.53
	150	50	24.36	8.59	8.52	0.81
1	50	150	23.2	7.53	7.96	-5.71
	100	100	24.3	7.78	7.84	-0.77
	150	50	24.76	8.03	8.37	-4.23

**Table 4.** The results for the L-shape scaled case.

Offset	$c_H^T$	$c_H^O$	MinProb	MaxProb	ADP	% Imprv.
0	50	150	20.99	5.89	4.98	15.45
	100	100	23.13	5.98	5.31	11.20
	150	50	24.15	5.97	5.43	9.05
1	50	150	23.2	5.35	5.29	1.12
	100	100	24.3	5.61	5.64	-0.53
	150	50	24.76	5.87	5.79	1.36

## DISCUSSION

We studied a class of optimal search problems where the objective is to find a stationary target with minimum expected cost. Differing from other related work in the literature, we considered a search region with objects (i.e., a target and an obstacle) that have shapes and whose locations are known through a joint probability distribution. We formulated these problems as an MDP, which is intractable to exact solution methods because of the size of its state space. To approximately solve these problems, we employed an ADP technique via direct search, which tunes the resulting ADP policy based on its performance. As a direct search method, we invoked a Simulated Annealing (SA) algorithm that solves the resulting optimization problem where the variables are the ADP approximation parameters.

As noted earlier, ADP techniques have been successfully used for solving a variety of large-scale MDPs. Our work demonstrated that employing these techniques to solve optimal search problems can yield promising results as long as the approximation architecture used to approximate the value function of the underlying MDP is properly determined. In particular, our numerical experiments revealed that the ADP policy generally performs better than easy-to-use heuristic decision rules in the majority of the cases. Furthermore, we observed that, the success of the ADP technique for these problems is highly contingent on the set of basis functions chosen for the approximation architecture. For example, we tried one set of basis functions which were the entries of the  $P$  matrix itself, but this resulted in poor performance of the ADP policy. We also tried basis functions calculated by solving

some sub-problems via greedy heuristics, but these were computationally expensive, and would be impractical for real-time decision making such as MIS. It is therefore crucial to try a variety of basis functions before finalizing the components of the ADP technique.

A challenge in applying direct search for tuning the ADP parameters is that in the end, we do not know for sure if we have chosen basis functions that could not possibly yield good policies, or if our global optimization approach simply did not find a good set of tunable parameters. As noted, our motivating problem is MIS, which would require fast real-time decision making. This puts practical constraints on the types of basis functions that may be considered. Moreover, it may not be reasonable to invest the huge computational effort to search for a variation of ADP that outperforms a heuristic policy. In practice, whether to apply an easy-to-use decision rule or ADP would depend on the problem parameters.

## REFERENCES

- Adelman D. "Price-directed replenishment of subsets: methodology and its application to inventory routing". *Manufacturing and Service Operations Management*. 5, 4, 348-371, 2003.
- Adelman D. "A price-directed approach to stochastic inventory routing". *Operations Research*. 52, 4, 499-514, 2004.
- Benkoski S J, Monticino, M. G., Weisinger, J. R.. "A survey of the search theory literature". *Naval Research Logistics*. 38, 469-494, 1991.
- Bertsekas D, Tsitsiklis J. "Neuro-Dynamic Programming", Athena Scientific, 1996.
- Botea A, Baier J, Harabor D, Hernandez C. "Moving target search with compressed path databases". In *Proceedings of ICAPS-13*, 2013.
- Chang HS, Fu MC, Hu J, Marcus SI. "Simulation-based algorithms for Markov Decision Processes", Springer, 2007.
- Chung TH, Burdick JW. "A decision-making framework for control strategies in probabilistic search". *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- Chung TH. "On probabilistic search decisions under searcher motion constraints". *Algorithmic Foundations of Robotics*, 2010.
- De Farias DP, Roy BV. "The linear programming approach to Approximate Dynamic Programming". *Operations Research*. 51, 850-865, 2003.
- Dell RF, Eagle JN, Martins, G. H. A., Santos, A. G. "Using multiple searchers in constrained-path, moving-target search problems". *Naval Research Logistics*. 43, 463-480, 1996.
- Derr K, Manic, M. "Multi-robot, multi-target particle swarm optimization search in noisy wireless environments". *Proceedings of the 2nd conference on human system interactions*, Catania, Italy, 2009.
- Dobbie JM. "A survey of search theory". *Operations Research*. 16(3), 527-537, 1968.
- Eagle JN, Yee JR. "An optimal branch-and-bound procedure for the constrained path, moving target search problem", *Operations Research*. 38, 110-114, 1990.
- El-Hadidy, M. A. A., El-Bagoury, A. A. H., "Optimal search strategy for a three-dimensional randomly located target", *International Journal of Operational Research*. 29, 2015.
- El-Hadidy, M. A. A. "Fuzzy Optimal Search Plan for N-Dimensional Randomly Moving Target", *International Journal of Computational Methods*. 13, 2016.
- Gabal, H. M. A., El-Hadidy, M. A. A., "Optimal searching for a randomly located target in a bounded known region", *International Journal of Computing Science and Mathematics*. 6, 2015.
- Haley WB, Stone LD. "Search Theory and Applications", Plenum Press, New York, 1980.
- Kulich M, Preucil L, Jose J, Bront M. "Single robot search for a stationary object in an unknown environment", *IEEE International Conference on Robotics Automation*, 2014.
- Lossner U, Wegener I. "Discrete sequential search with positive switch cost". *Mathematics of Operations Research*. 7(3), 426-440, 1982.

- Maxwell MS, Henderson SG, and Topaloglu H. "Tuning Approximate Dynamic Programming Policies for Ambulance Redeployment via Direct Search". *Stochastic Systems*. 3, 1-40, 2013.
- Najemnik J, Geisler WS. "Eye movement statistics in humans are consistent with an optimal search strategy", *J. Vis.* 8, 1-14, 2008.
- Nitinawarat, S., Veeravalli, V. V., "Universal scheme for optimal search and stop", *Bernoulli*. 23, 1759-1783, 2017.
- Powell WB. "Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality", Wiley, 2007.
- Ross SM. "A problem in optimal search and stop". *Operations Research*. 17, 984-992, 1969.
- Shechter SM, Ghassemi F, Gocgun Y, Puterman ML. "Trading off quick versus slow actions in optimal search". *Operations Research*. 63, 353-362, 2015.
- Singh S., Krishnamurthy, V. "The optimal search for a markovian target when the search path is constrained: the infinite-horizon case". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003.
- Snider J. "Optimal random search for a single hidden target". *Physical Review*. 83, 011105, 2011.
- Stone LD. "Theory of Optimal Search", Academic Press, 1975.
- Suman B, Kumar B. "A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization". *Journal of the Operational Research Society*. 57, 1143-1160, 2006.
- Sutton RS, Barto AG. "Reinforcement Learning : an introduction", MIT Press, 1998.
- Washburn A." Search and Detection", Fourth Edition, Institute for Operations Research and the Management Sciences, 2002.
- Wegener I. "The discrete sequential search problem with nonrandom cost and overlook probabilities". *Mathematics of Operations Research*. 5, 373-380, 1980.
- Wettergren TA. "Performance of search via track-before-detect for distributed sensor networks", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 44, 2008.
- Zhao Y, Patek SD, Beling PA. "Decentralized Bayesian Search Using Approximate Dynamic Programming Methods". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*, 38, 2008.

## KOBALT KATKILI ÇİNKO OKSİT NANOPARÇACIKLARIN YAPISAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Güvenç AKGÜL, <sup>2</sup>Funda AKSOY AKGÜL

<sup>1</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bor Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, NİĞDE

<sup>2</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, NİĞDE

<sup>1</sup>guvencakgul@gmail.com, <sup>2</sup>fundaaksoy01@gmail.com

(Geliş/Received: 03.02.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 18.06.2018)

**ÖZET:** Bu çalışmada, katkısız ve Co (%1, %3 ve %5 ) katkı ZnO nanoparçacıkları ucuz ve kolay bir yöntem olan mekanik bilyeli öğütme tekniği ile üretildi. Elde edilen nanoyapılı ürünlerin kristal özelliklerini ve yerel atomik yapılarını belirlemek için X-ışını kırınımı ve sinkrotron-temelli X-ışını soğurma spektroskopisi ölçümleri kullanıldı. Tüm örnekler için wurtzite yapısı gözlemlendi. X-ışını soğurma spektroskopisi sonuçları, Co<sup>2+</sup> iyonlarının saptanabilir herhangi bir ikincil faz oluşturmadan ZnO wurtzite örgüsündeki Zn<sup>2+</sup> bölgelerine başarıyla geçtiğini açıkça gösterdi. Co katkı ZnO nanoparçacıkların yapısal özelliklerini detaylı şekilde inceleyen bu çalışma, katkı ZnO'nun hem spintronik hem de diğer nanoteknolojik uygulama alanlarındaki potansiyel kullanımına önemli bir katkı oluşturabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Co katkı ZnO, X-ışını kırınımı, X-ışını soğurma spektroskopisi, Wurtzite yapısı

### Investigation of the Structural Properties of Cobalt Doped Zinc Oxide Nanoparticles

**ABSTRACT:** In this study, pure and Co (1%, 3% and 5%) doped ZnO nanoparticles were fabricated through mechanical ball milling technique, which is an inexpensive and easy method. X-ray diffraction and synchrotron-based X-ray absorption spectroscopy measurements were used to determine the crystalline properties and local atomic structures of the obtained nanostructured products. A wurtzite structure was observed for all the samples. X-ray absorption spectroscopy results was clearly indicated that the Co<sup>2+</sup> ions were successfully substituted into the Zn<sup>2+</sup> sites of the ZnO wurtzite lattice without forming any detectable secondary phases. The present study, investigating the structural properties of Co doped ZnO nanoparticles in detail, could make a significant contribution to the potential use of doped ZnO in both spintronic and other nanotechnological applications.

**Key Words:** Co doped ZnO, X-ray diffraction, X-ray absorption spectroscopy, Wurtzite structure

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nanoteknoloji biliminin temelini oluşturan ve boyutları 1-100 nanometre (nm) aralığında olan materyallerin üretimi, temel fiziksel özelliklerinin incelenmesi ve teknolojik uygulamaları son zamanlarda malzeme biliminin en önemli konuları arasında yer almaktadır (Hasan, 2015). Nanoyapılı materyallerin sentezlenebilmesi, yeni fonksiyonel cihazların ve teknolojilerin üretimi ve rasyonel tasarımı konusunda yeni fikirlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Nanomateryaller günümüzde çevresel, biyomedikal, tarımsal, gıda güvenliği, enerji dönüşümü ve havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır (Boisseau ve Loubaton, 2011; Chattopadhyay ve diğ., 2011; Arora ve diğ., 2014).

Nanoyapılı materyaller üzerine yapılan yoğun bilimsel çalışmalar, bu tür malzemelerden biri olan nanoparçacıkların çeşitli alanlarda kullanımının önemini de arttırmıştır. Nanoboyutlu materyallerin fiziksel özellikleri, kuantum boyutu etkilerinden ötürü diğer kütleli malzemelerden oldukça farklıdır. Nanometre ölçekli parçacık büyüklüğü sebebiyle kütleli yapılara kıyasla daha büyük yüzey alanına sahip olan nanoparçacıklar, kendilerine has elektronik, optik, termal ve manyetik özelliklere sahiptirler. Nanoparçacıkların fiziksel özelliklerinin bu denli üstün olmasında, boyutlarının yanı sıra uygun elementlerle kontrollü şekilde katılabilmelerinin ve bu şekilde fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kolayca değiştirilebilmesinin de büyük etkisi vardır (Singhal ve diğ., 2012; Tseng ve diğ., 2012; Lastovina ve diğ., 2016; Franco ve diğ., 2016). Nanometre boyutlu yapıya sahip malzemelerin hazırlanması için yeni yöntemlerin geliştirilmesi, nanoyapı tabanlı yeni nesil cihazların tasarlanması ve üretilmesi için oldukça önemlidir.

Son zamanlarda çinko oksit (ZnO), titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>), bakır oksit (CuO ve Cu<sub>2</sub>O) ve kobalt oksit (CoO ve Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) gibi nanoyapılı metal oksit yarıiletken materyaller, nanoteknolojik uygulama amaçlı yapılan yoğun araştırmalarda popüler bir konu haline gelmiştir. Nanoyapılı ZnO, yapısında çinko (Zn) ve oksijen (O) atomlarını bulunduran hekzagonal wurtzite kristal yapısına sahip inorganik bir yarıiletken olup, yüksek iletkenliği ve geçirgenliğinden dolayı metal oksit yarıiletken materyaller arasında en çok dikkat çeken ve yoğun biçimde çalışılanıdır (Pearton, 2003). Doğrudan band yapısına ve yaklaşık 3,3 eV gibi geniş bir yasak band aralığına sahip olan ZnO, geniş serbest-ekziton bağlama enerjisi (60 meV), toksik olmayan yapısı, kimyasal kararlılığı, düşük maliyetli üretimi ve oda sıcaklığındaki karakteristik elektriksel ve optik özellikleri nedeniyle nanobilimin optoelektronik, güneş pilleri ve spintronik gibi araştırma uygulamaları için oldukça önemli bir materyaldir. ZnO kristal yapısı içerisine yabancı atomlar uygun yöntemlerle eklendiğinde elektrik, optik ve manyetik özelliklerinde kayda değer iyileşmelerin meydana geldiği gözlenmiştir. Elektron veya deşik gibi taşıyıcıların yükünün ve spininin aynı anda kullanımını içeren spintronik çalışmalarında, taşıyıcıların spinlerini kontrol etmek için manyetik olmayan ZnO yarıiletkeninin yapısına geçiş metali elementleri eklenmektedir (Pan, 2008; Coey ve diğ., 2008; Dietl, 2010; Ohno, Singh, 2013). Özellikle Co, Mn, Ni, Ag, Al, Ti gibi geçiş metali elementleri ZnO kristal örgüsüne çok küçük oranlarda dahi edildiğinde, yarıiletken malzemenin elektriksel iletim ve manyetik özelliklerinin kontrollü olarak iyileştirilmesi sağlanabilmektedir (Saleh ve diğ., 2014; Kaur ve diğ., 2014; Fabbiyola ve diğ., 2015).

Katkısız ve katkılı ZnO nanoparçacıkların üretiminde birçok yöntem kullanılır. Mekanik bilyeli öğütme (Elilarassi ve diğ., 2012; Shindea ve diğ., 2014), kimyasal buhar biriktirme (An, 2015), kimyasal püskürtme (Gomez, 2005), atmalı lazer depolama (Villanueva, 2006), saçtırmalı kaplama (Kang, 2005) ve sol-jel (Li, 2012) gibi yöntemler bunlardan bazılarıdır. Mekanik bilyeli öğütme yöntemi diğer metotlara kıyasla kolay, zararsız, düşük maliyetli ve katkı oranının kolay ayarlanabilmesi gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Co katkılı ZnO nanoparçacıkları ucuz ve kolay bir yöntem olan mekanik bilyeli öğütme tekniği ile üretildi ve elde edilen nanoparçacıkların yapısal özellikleri incelendi. Co<sup>2+</sup> iyonunun yarıçapı (0,72 Å) diğer geçiş metali elementlerine nazaran Zn<sup>2+</sup> iyonunun yarıçapına (0,74 Å) daha yakın değerde olduğundan, katkılama elementi olarak metalik Co seçildi. Sentezlenen örneklerin kristal yapısı hakkında bilgi edinmek için örneklerin X-ışını kırınımı (XRD) analizleri yapıldı. Katkılı örneklerde, Co ve Zn atomları çevresindeki yerleşik yapı ve dağılımları belirlemek için tahribatsız bir yöntem olan sinkrotron-temelli X-ışını soğurma spektroskopisi (XAS) yöntemi kullanıldı. Bu yöntemde, X-ışını soğurarak atomdan ayrılan elektron, en yakın komşu atomlardan saçılır ve elektrona eşlik eden giden ve gelen dalga fonksiyonlarının üst üste binmesi sonucunda genişletilmiş X-ışını soğurma ince yapı spektroskopisi (EXAFS) sinyalleri oluşur. Kaydedilen EXAFS sinyalleri incelenerek, bir atoma en yakın komşu atomlar arası uzaklık ve ortalama komşu atom sayısı gibi yerel atomik yapı hakkında bilgiler elde edilir. Aynı zamanda amorf yapıların yerleşik atomik yapısı hakkında da doğrudan bilgi elde etmek mümkün olduğundan, bu özellik EXAFS tekniğinin önemini arttırmaktadır.



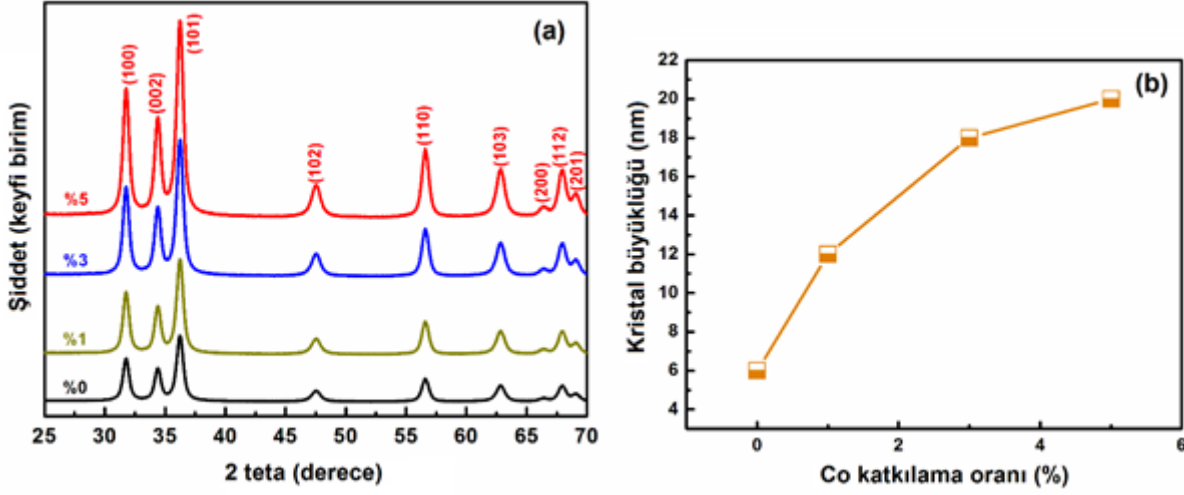
## MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışma kapsamında sentezlenen %1, %3 ve %5 oranlarında Co katkılı ZnO nanoparçacıkların üretimi için mekanik bilyeli öğütme yöntemi kullanıldı. Örneklerin hazırlanmasında çinko oksit kaynağı olarak %99,9 saflıkta ZnO tozu (Sigma-Aldrich), metalik kobalt kaynağı olarak da %99,5 saflıkta Co tozu kullanıldı (Sigma-Aldrich). İlk olarak mekanik bilyeli öğütme tekniğinin parametreleri olan metalik bilye çeşidi, bilye-toz oranı, öğütme hızı ve öğütme zamanı optimize edildi. %1, %3 ve %5 mol katkı oranını sağlayacak şekilde ZnO ve Co tozları uygun miktarlarda tartıldı. Örneklerin hazırlanmasında mekanik bilyeli bir öğütücü (Fritsch Planetary premium line P7) ile 5 mm çapında zirkonya bilyeleri kullanıldı. Örnekler temiz oda şartlarında hazırlandı ve üretim esnasında tüm karışımlar için bilye-toz oranı 10:1 ve öğütme hızı dakikada 500 dönme olarak sabit tutuldu. Öğütme işlemi 5 saat boyunca gerçekleştirildi ve bu işlem tamamlandıktan sonra, numunelere atmosferik ortamda 250 °C sıcaklıkta 2 saat süresince tavlama işlemi uygulandı. Son aşamada uygulanan presleme işleminde, farklı sıkıştırma basınçları uygulanan numuneler 10 mm çapında ve 0,5 mm kalınlığında diskler haline getirildi. Presleme işleminden sonra, elde edilen numuneler hemen yapısal karakterizasyon ölçümlerine tabi tutuldu.

Katkısız ve Co katkılı ZnO örneklerin kristal özellikleri, dalgaboyu 1,54059 Å olan  $\text{CuK}\alpha$  radyasyonu ile desteklenmiş Rigaku Miniflex model XRD sistemi ile incelendi. Üretilen örneklerin yerleşik atomik yapısını belirlemek için sinkrotron-temelli XAS ölçümleri kullanıldı. Ölçümler, Stanford Sinkrotron Işınımı Laboratuvarı'nda (SSRL) bulunan 4-3 numaralı deney istasyonunda yapıldı. Ölçümlere başlamadan önce enerji aralığı 2,4 – 14 keV olan X-ışınının kalibrasyonu yapıldı ve ölçümler oda sıcaklığında, Zn ve Co atomlarının K-ucu için alındı. Deneysel olarak elde edilen XAS verilerinin analizi için *IFEFFIT* programı kullanıldı (Ravel, 2005).

## BULGULAR ve SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS and DISCUSSIONS)

Mekanik bilyeli öğütme yöntemi ile üretilen Co katkılı ZnO nanoyapıların kristal yapısını ve yapı içinde var olan fazları belirlemek için XRD ölçümleri yapıldı. Şekil 1 (a) %1, %3 ve %5 oranında Co katkılı ZnO örneklerin XRD desenlerini göstermektedir. Karşılaştırma amacı ile katkısız örneğin (%0) XRD deseni Şekil 1 (a)'ya eklendi. Polikristal yapıya sahip olduğu açıkça görülen tüm örneklerin kristal yapısında sadece ZnO wurtzite fazı (JCPDS kart no. 36-1451) gözlemlendi. XRD ölçüm sınırları içerisinde, üretilen örneklerde Co ile ilgili herhangi ikincil faza veya kirliliğe rastlanmadı. Ayrıca, artan Co katkı oranı ile birlikte kırınım pikleri daha şiddetli hale geldi ve pikler darlaşarak keskinleşti. Bu sonuç, artan katkı oranı ile örneklerin kristal yapısının iyileştiğini gösterdi. Katkısız ve katkılı tüm örneklerde görülen en şiddetli pik, ZnO nanoparçacıklarda tercih edilen kristal büyüme düzleminin (101) olduğunu ortaya koydu.

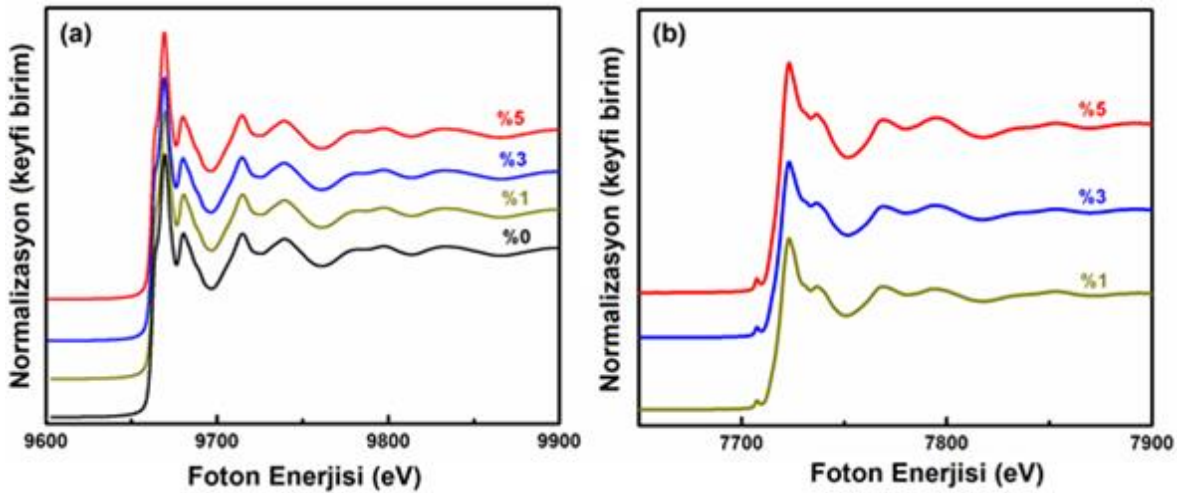


Şekil 1. Katkısız ve Co katkılı ZnO nanoparçacıkların XRD desenleri (a) ve ortalama kristal büyüklükleri (b)

Figure 1. X-ray diffraction patterns (a) and average crystallite sizes (b) of undoped and Co doped ZnO nanoparticles

Örneklerin ortalama kristal büyüklüğü, XRD ölçümlerinden elde edilen sonuçların analiz edilmesiyle belirlendi. Katkısız ve Co katkılı nanoparçacıkların kristal büyüklüğünü hesaplamak için  $D = (0,9\lambda)/(\beta\cos\theta)$  ile tanımlanan Scherrer formülü kullanıldı. Burada  $D$  ortalama kristal büyüklüğü,  $\lambda$  ölçümde kullanılan X-ışınının dalgaboyu,  $\beta$  en şiddetli pikin yarı-şiddet genişliği ve  $\theta$  ise kırınım açısıdır. Örneklerin XRD deseninde  $36,2^\circ$  açı değerinde gözlenen (101) kırınım piki, kristal boyutunu hesaplamada kullanıldı. Katkısız ZnO örneğin ortalama kristal büyüklüğü yaklaşık 6 nm olarak bulundu. %1, %3 ve %5 oranında Co katkılı örneklerin ortalama kristal büyüklüğü ise sırasıyla yaklaşık 12, 18 ve 20 nm olarak hesaplandı. Şekil 1 (b), Co katkılama oranına bağlı olarak örneklerin kristal büyüklüğündeki değişimi göstermektedir.

Co katkılı ZnO nanoparçacıkların yerleşik atomik özellikleri, sinkrotron-temelli XAS ölçümleri vasıtasıyla incelendi. Katkısız ve %1, %3 ve %5 oranında Co katkılı ZnO örneklerdeki Zn ve Co atomlarının K-ucu için normalize edilmiş X-ışını soğurma yakın uç yapısı (XANES) spektrumları Şekil 2 (a) ve Şekil 2 (b)'de görülmektedir.



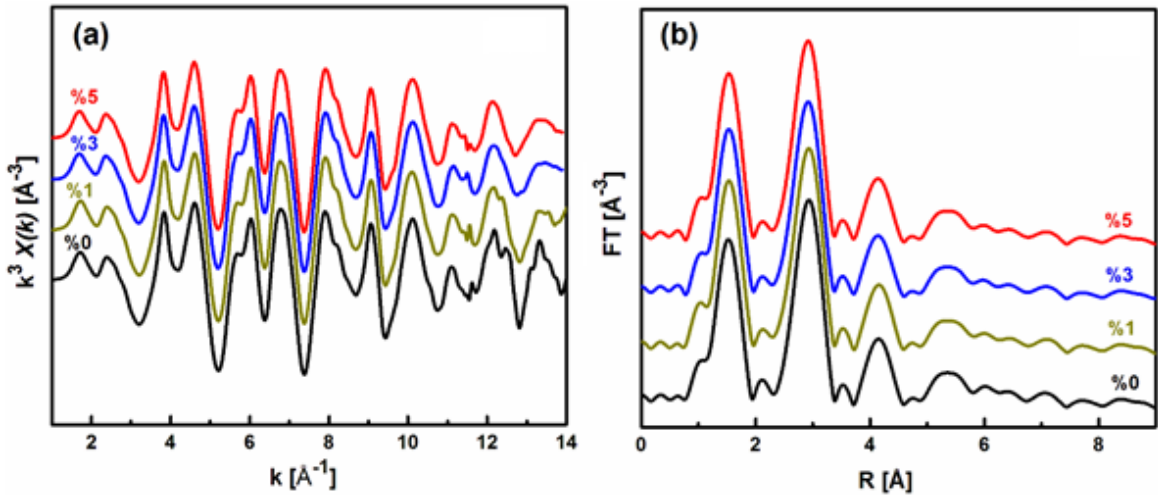
Şekil 2. Katkısız ve Co katkılı ZnO nanoparçacıkların Zn K-ucu (a) ve Co K-ucu (b) XANES spektrumları

Figure 2. XANES spectra of Zn K edge (a) and Co K edge (b) of undoped and Co doped ZnO nanoparticles

Şekil 2 (a) ve (b)'den görüldüğü gibi katkılı örneklerdeki Zn ve Co atomlarının  $K$  uçları için ölçülen XANES spektrumları hem birbirine hem de katkısız örneğin spektrumuna oldukça benzerdir. Zn atomunun  $K$ -ucu XANES spektrumlarında, 9670 eV foton enerjisi civarında ZnO yapısına ait karakteristik bir pik göze çarpmaktadır. Diğer taraftan, ZnO yapısındaki Zn atomu  $3d$  bandının elektronlarca tamamen doldurulmasından dolayı hem katkısız hem de katkılı örneklerde herhangi bir ön-uç piki görülmemektedir. Zn atomu  $K$ -ucu XANES spektrumlarının enerji konumlarında herhangi bir kayma oluşmadığı yine Şekil 2 (a)'da görülmektedir. Bu sonuçlar, Co katkılama oranına bağlı olarak ZnO wurtzite kristal örgüsü içerisinde herhangi bir yapısal değişikliğin oluşmadığını ve tüm katkılama oranları için  $\text{Co}^{2+}$  iyonlarının kristal örgüdeki  $\text{Zn}^{2+}$  iyonlarının yerine başarılı bir şekilde geçtiğini açıkça ortaya koydu. Ek olarak, örneklerin XANES spektrumlarında metalik Zn ve Co atomlarının birikimini işaret eden herhangi bir ekstra pike rastlanmadı.

Co katkılı ZnO nanoparçacıkların Co atomu  $K$ -ucu XANES spektrumları Şekil 2 (b)'de görülmektedir. Şekil 2 (a)'da görülen Zn atomu  $K$ -ucu XANES spektrumlarının aksine, Co atomu  $K$ -ucu XANES spektrumları yaklaşık 7709 eV X-ışını enerjisi civarında küçük bir ön-uç pikine sahiptir. Örneklerdeki Co atomu  $1s$  elektronlarının tam dolu olmayan  $4p-3d$  hibridize olmuş enerji durumlarına geçişlerinden kaynaklanan bu karakteristik pik, tüm katkılama oranları için  $\text{Co}^{2+}$  iyonlarının büyük çoğunluğunun ZnO kristal yapısı içerisine tetrahedral düzende yerleştiğini göstermektedir.

Co'nun farklı katkılama oranlarına bağlı olarak ZnO'nun yerleşik atomik yapısındaki değişimleri daha ayrıntılı şekilde incelemek için üretilen örneklerin Zn ve Co  $K$ -ucu EXAFS ölçümleri yapıldı (Şekil 3). Yerleşik atomik yapı hakkında değerli bilgiler alınabilen EXAFS, katkılama atomlarının ev sahibi kristal yapısındaki etkilerini inceleyen çalışmalarda başvurulan en önemli tekniktir. EXAFS, X-ışınının soğurulması sonucunda soğurma atomundan (bu çalışmada Zn veya Co atomları) ayrılan enerjik elektronların en yakın komşu atomlardan tekli ve çoklu saçılmalarını içerir.



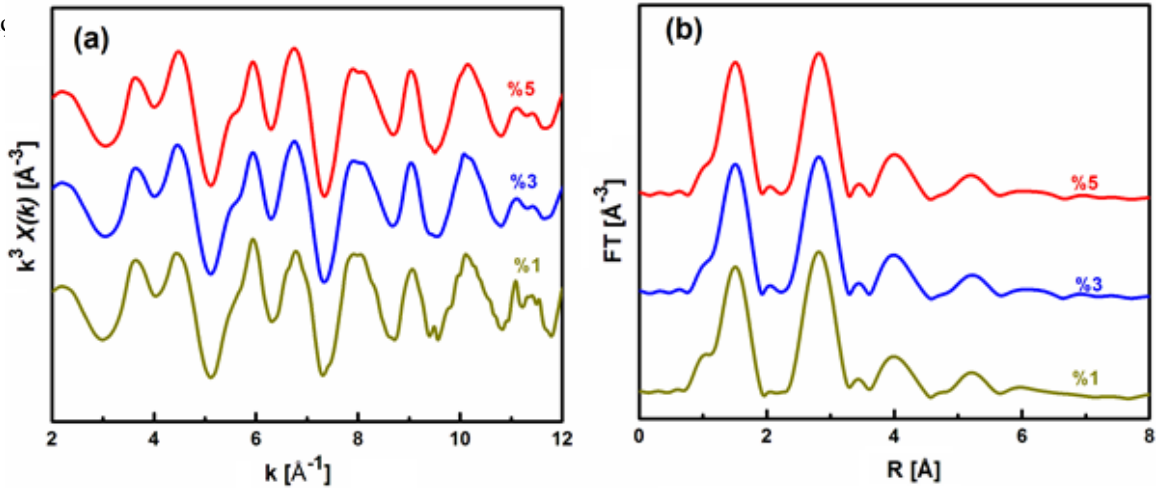
**Şekil 3.** Katkısız ve Co katkılı ZnO nanoparçacıkların  $k$ -uzayındaki Zn  $K$ -ucu deneysel EXAFS spektrumları (a) ve gerçek uzaydaki Fourier dönüşüm fonksiyonları (b)

*Figure 3. Experimental Zn K-edge EXAFS spectra in  $k$ -space (a) and Fourier transformation functions in real space (b) of undoped and Co doped ZnO nanoparticles*

Şekil 3 (a), katkısız ve %1, %3 ve %5 oranlarında Co katkılı ZnO nanoparçacıkların  $k$ -uzayındaki deneysel Zn  $K$ -ucu EXAFS sinyallerini göstermektedir. Şekildeki spektrumlara karşılık gelen saçılmanın  $k = 2 - 14 \text{ \AA}^{-1}$  aralığında Fourier dönüşümü (FT) ile elde edilen gerçek uzaydaki radyal dağılım fonksiyonları ise Şekil 3 (b)'de görülmektedir. Şekil 3 (a)'da görüldüğü gibi katkılı örnekler için benzer EXAFS sinyalleri elde edilmiştir. XRD ölçümlerini de destekleyen bu sonuç, tüm katkılama oranları için kristal yapının değişmediğini ve halen ZnO yapısının korunduğunu göstermektedir. Bir başka ifadeyle,

XANES ölçümlerinin de işaret ettiği gibi %1, %3 ve %5 katkılama oranlarının her birinde  $\text{Co}^{2+}$  iyonları ZnO kristal örgüsünde bulunan  $\text{Zn}^{2+}$  iyonlarının yerine geçerek ev sahibi yapıyı bozmamıştır. Şekil 3 (b)'de verilen FT fonksiyonları incelendiğinde üç tane ana pik göze çarpmaktadır. %1, %3 ve %5 oranlarında Co katkılı örneklerdeki Zn atomuna en yakın birinci, ikinci ve üçüncü kabuktaki Zn-O, Zn-Co ve Zn-Zn koordinasyonlarına karşılık gelen bu piklerin konumları (R değerleri), sırasıyla Zn-O, Zn-Co ve Zn-Zn atomları arasındaki bağ uzunluklarını Angström (Å) cinsinden göstermektedir. Şekil 3 (b)'de katkısız (%0) örneğe ait FT fonksiyonunda görülen 1,6 Å ve 2,9 Å civarındaki iki belirgin pik ise, bu örnekteki Zn atomuna en yakın birinci ve ikinci kabuktaki Zn-O ve Zn-Zn koordinasyonlarına tekabül eder. 4 Å civarındaki pik, üçüncü koordinasyon kabuğundan kaynaklanmaktadır. Katkısız ZnO nanoparçacıkları ile karşılaştırıldığında, %1, %3 ve %5 Co katkılı örneklere ait piklerin hem pozisyonlarının hem de şiddetlerinin katkılama oranı ile kayda değer miktarda değişmediği görülmektedir. Katkısız örnekteki Zn-Zn koordinasyonuna karşılık gelen 2,9 Å civarındaki pik ile %1 katkılı örnekteki Zn-Co koordinasyonuna karşılık gelen pikin aynı R değerine yani aynı bağ uzunluğuna sahip olması, katkılama işlemi ile ZnO örgüsüne eklenen Co atomlarının yapıdaki Zn atomlarının yerine geçtiğini ortaya koymaktadır. Artan katkılama oranı ile bu pikin konumunu ve genlik değerini koruması, ev sahibi ZnO yapısına eklenen Co atomlarının Zn atomlarının yerine geçmeye devam ettiğinin açık bir göstergesidir.

Şekil 4 (a), %1, %3 ve %5 Co katkılı ZnO nanoparçacıkları için Co atomunun K-ucu EXAFS spektrumlarını göstermektedir. Şekil 4 (b) ise, EXAFS salınımına karşılık gelen saçılmanın  $k = 2 - 12 \text{ \AA}^{-1}$  aralığında Fourier dönüşümü ile elde edilen gerçek uzaydaki radyal dağılım fonksiyonlarıdır. Şekil 4 (a)'dan da görüldüğü üzere, farklı oranlarda Co katkılı ZnO örnekleri için pik konumlarında dikkate değer bir farkın olmadığı birbirine oldukça benzer EXAFS sinyalleri ölçülmüştür. Şekil 4 (b)'de görülen ilk iki pik, örneklerdeki Co atomuna en yakın birinci ve ikinci kabuktaki Co-O ve Co-Zn koordinasyonundan kaynaklanmaktadır. Diğerlerine göre daha zayıf şiddette olan üçüncü pik ise Co atomuna en yakın üçüncü kabuktaki Co-Co koordinasyonuna atfedilebilir. Farklı Co katkılama oranlarına sahip ZnO nanoparçacıkların Şekil 4 (b)'deki FT fonksiyonları karşılaştırıldığında, pik pozisyonlarında ve genliklerinde büyük bir fark göze çarpmamaktadır. Bu bulgu, tüm katkılama oranları için  $\text{Co}^{2+}$  iyonlarının ana wurtzite ZnO örgüsündeki  $\text{Zn}^{2+}$  bölgelerine büyük oranda geçtiğini açıkça göstermektedir.

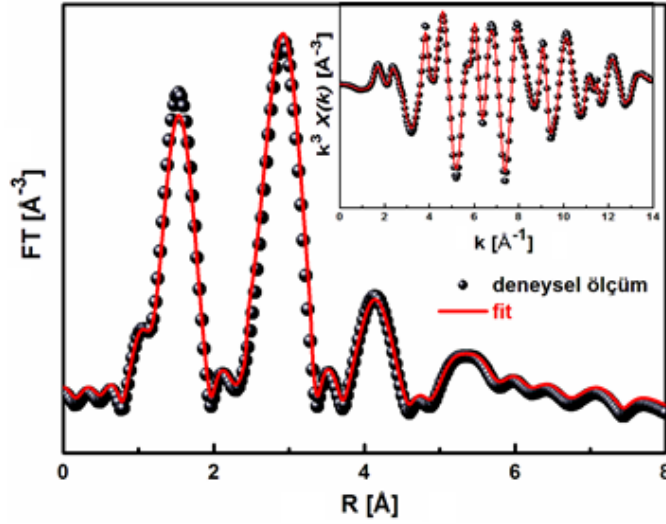


**Şekil 4.** Co katkılı ZnO nanoparçacıkların k-uzayındaki Co K-ucu deneysel EXAFS spektrumları (a) ve gerçek uzaydaki Fourier dönüşüm fonksiyonları (b)

*Figure 4. Experimental Co K-edge EXAFS spectra in k-space (a) and Fourier transformation functions in real space (b) of Co doped ZnO nanoparticles*

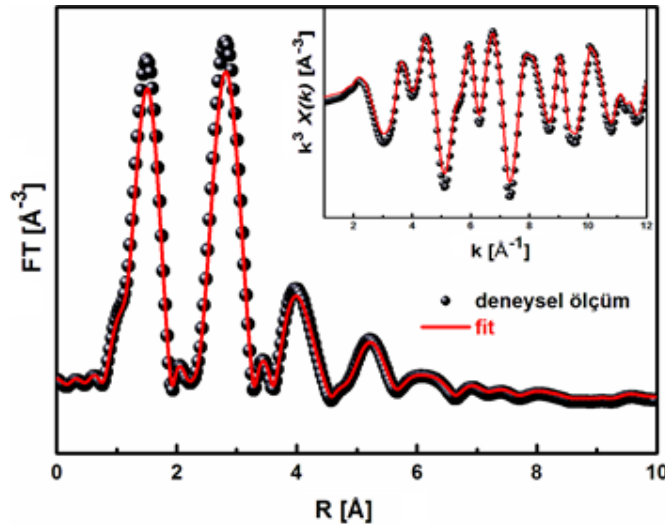
Nanoteknolojinin birçok alanında potansiyel uygulama bulan nanoyapılı ZnO'nun bilinen fiziksel özelliklerini daha da geliştirmek için Co gibi manyetik özellik taşıyan elementlerle katkılama işleminden

sonra materyalin yapısını ve yerleşik atomik düzenini doğru bir şekilde belirlemek, özellikle spintronik uygulamalarında kullanılabilirliğini artırmak açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada, mekanik bilyeli öğütme yöntemi kullanılarak hazırlanan Co katkılı ZnO nanoparçacıkların EXAFS verileri *IFEFFIT* programı ile detaylı şekilde analiz edildi. Deneysel EXAFS spektrumlarının analizi sürecinde, *IFEFFIT* ile bağlantılı çalışan *ARTEMIS* programı yardımıyla EXAFS sinyallerine uygun fitler yapıldı ve böylece nanoyapılı numunelerin yerleşik atomik parametreleri belirlendi (Ravel, 2005). %3 Co katkılı ZnO nanoparçacıkların Zn K-ucu ve Co K-ucu için yapılan en uygun fitler, sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



**Şekil 5.** %3 Co katkılı ZnO nanoparçacıkların Zn K-ucu için en iyi FT fiti. Ekli küçük resim aynı örneğin deneysel Zn K-ucu EXAFS spektrumu ile Artemis fitini göstermektedir

*Figure 5.* Best fit of FT function for 3% Co doped ZnO nanoparticles. Inset shows experimental Zn K-edge EXAFS spectrum of the same sample with Artemis fit



**Şekil 6.** %3 Co katkılı ZnO nanoparçacıkların Co K-ucu için en iyi FT fiti. Ekli küçük resim aynı örneğin deneysel Co K-ucu EXAFS spektrumu ile Artemis fitini göstermektedir

*Figure 6.* Best fit of FT function for 3% Co doped ZnO nanoparticles. Inset shows experimental Co K-edge EXAFS spectrum of the same sample with Artemis fit

Katkısız ve %1, %3 ve %5 Co katkılı ZnO nanoparçacıkların deneysel Zn K-ucu ve Co K-ucu EXAFS sinyallerinin fit analizinden elde edilen en yakın komşu uzaklığı (R) ile en yakın komşu sayısı (N) gibi

yerleşik atomik yapı parametreleri Çizelge 1’de listelenmiştir. Çizelgedeki sonuçlardan, katkısız ZnO yapısındaki bir Zn atomuna en yakın komşu O atomu sayısının 4 ve Zn-O bağ uzunluğunun ise yaklaşık 1,99 Å olduğu görülmektedir. EXAFS verilerinin analizinden elde edilen bu yerleşik atomik yapı parametreleri, wurtzite yapısındaki ZnO’nun bilinen yapısal değerleri ile oldukça uyumludur (Djenadic ve diğ., 2010). Diğer taraftan %1, %3 ve %5 Co katkılı ZnO örnekler için Co-O ve Co-Zn atomları arasındaki bağ uzunluklarının, katkısız ZnO örneğindeki Zn-O ve Zn-Zn bağ uzunluklarına oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu bulgu, tüm katkı oranlarında Co<sup>2+</sup> iyonlarının ZnO wurtzite örgüsündeki Zn bölgelerine geçtiğinin kanıtıdır.

**Çizelge 1.** Farklı oranlarda Co katkılı ZnO nanoparçacıkların deneysel Zn K-ucu ve Co K-ucu EXAFS verilerinin analizinden elde edilen yerleşik atomik yapı parametrelerinin sonuçları (N: en yakın komşu sayısı ve R: en yakın komşu uzaklığı)

**Table 1.** Results of local atomic structure parameters obtained from the analysis of experimental Zn K-edge and Co K-edge EXAFS data of Co doped ZnO nanoparticles with different doping ratios (N: nearest neighbor number, R: nearest neighbor distance)

	%1 Co katkılı ZnO		%3 Co katkılı ZnO		%5 Co katkılı ZnO	
	N	R(Å)	N	R(Å)	N	R(Å)
Zn-O	4,03 ± 0,02	1,95 ± 0,01	4,02 ± 0,01	1,98 ± 0,02	3,99 ± 0,01	1,96 ± 0,02
Zn-Co	1,22 ± 0,01	3,03 ± 0,01	1,21 ± 0,01	3,21 ± 0,01	1,23 ± 0,01	3,18 ± 0,01
Zn-Zn	10,6 ± 0,02	3,22 ± 0,02	10,2 ± 0,02	3,33 ± 0,02	9,78 ± 0,01	3,29 ± 0,02
Co-O	4,01 ± 0,01	1,93 ± 0,01	4,01 ± 0,01	1,96 ± 0,01	3,88 ± 0,01	1,97 ± 0,01
Co-Zn	10,4 ± 0,02	3,21 ± 0,01	9,91 ± 0,02	3,21 ± 0,01	9,68 ± 0,02	3,24 ± 0,01
Co-Co	1,02 ± 0,02	3,15 ± 0,02	1,23 ± 0,01	3,15 ± 0,02	1,73 ± 0,01	3,07 ± 0,02

<i>Katkısız ZnO</i>	
N	R(Å)
Zn-O	4,01 ± 0,01
Zn-Zn	11,1 ± 0,01

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada %1, %3 ve %5 Co katkılı ZnO nanoparçacıkları kolay ve ucuz bir yöntem olan mekanik bilyeli öğütme tekniği ile üretildi. Elde edilen örneklerin kristal özellikleri ve yerleşik atomik yapıları XRD ve sinkrotron-temelli XAS teknikleri ile incelendi. XRD ölçümleri, katkısız örneğin ZnO wurtzite yapısına sahip olduğunu ve Co elementi ile farklı oranlarda katkılama işlemi yapıldığında ise örneklerin wurtzite yapısını değiştirmediklerini gösterdi. ZnO yapısına %1, %3 ve %5 oranlarında Co katkılı olduğunda, Co<sup>2+</sup> iyonlarının wurtzite örgüsündeki Zn<sup>2+</sup> iyonlarının yerine başarıyla geçtiği ve yapıda saptanabilir herhangi bir ikincil fazın oluşmadığı X-ışını soğurma spektroskopisi sonuçları ile ortaya kondu. Manyetik özelliğe sahip Co ile katkılanmış ZnO nanoparçacıkların yapısal özelliklerinin detaylı şekilde incelenmesini ele alan bu çalışma, katkılı ZnO’nun hem spintronik hem de diğer nanoteknolojik uygulama alanlarındaki potansiyel kullanımına önemli bir katkı oluşturabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- An H.R., Ahn H.J., Park J.W., 2015, “High-Quality, Conductive, and Transparent Ga-doped ZnO Films Grown by Atmospheric-Pressure Chemical-Vapor Deposition”, *Ceramics International*, Vol. 41, No. 2, pp. 2253-2259.
- Arora S.K., Foley R.W., Youtie J., Shapira P., Wiek A., 2014, “Drivers of Technology Adoption- The Case of Nanomaterials in Building Construction”, *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 87, pp. 232-244.
- Boisseau P., Loubaton B., 2011, “Nanomedicine, Nanotechnology in Medicine”, *Comptes Rendus Physique*,

- Vol. 12, pp. 620-636.
- Chattopadhyay S., Chen L.C., Chen K.H., 2011, "Energy Production and Conversion Applications of One-dimensional Semiconductor Nanostructures", *NPG Asia Materials*, Vol. 3, No. 6, pp. 74-81.
- Coey J.M.D. and Chambers S.A., 2008, "Oxide Dilute Magnetic Semiconductors—Fact or Fiction ?" *MRS Bulletin*, Vol. 33, No. 11, pp. 1053-1058.
- Dietl T., 2010, "A Ten-Year Perspective on Dilute Magnetic Semiconductors and Oxides", *Nature Materials*, Vol. 9, pp. 965-974.
- Djenadic R., Akgül G., Attenkofer K., and Winterer M., 2010, "Chemical Vapor Synthesis and Structural Characterization of Nanocrystalline  $Zn_{1-x}Co_xO$  ( $x=0-0.50$ ) Particles by X-ray Diffraction and X-ray Absorption Spectroscopy", *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 114, pp. 9207-9215.
- Elilarassi R. and Chandrasekaran G., 2012, "Synthesis and Characterization of Ball Milled Fe-doped ZnO Diluted Magnetic Semiconductor", *Optoelectronics Letters*, Vol. 8, No. 2, pp. 109-112.
- Fabbiyola S., John K.L., Aruldoss U., Bououdina M., Dakhel A.A., JudithVijaya J., 2015, "Synthesis of Co-doped ZnO Nanoparticles via Co-precipitation: Structural, Optical and Magnetic Properties", *Powder Technology*, Vol. 286, pp. 757-765.
- Franco Jr A., Pessoni H.V., 2016, "Optical Band-gap and Dielectric Behavior in Ho – doped ZnO Nanoparticles", *Materials Letters*, Vol. 180, pp. 305-308.
- Gomez H., Maldonado A., Olvera M.L. and Acosta D.R., 2005, "Gallium-doped ZnO Thin Films Deposited by Chemical Spray", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 87, No. 1-4, pp. 107-116.
- Hasan S., 2015, "A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types", *Research Journal of Recent Sciences*, Vol. 4, pp. 9-11.
- Kang D.J., Kim J.S., Jeong S.W., Roh Y., Jeong S.H. and Boo J.H., 2005, "Structural and Electrical Characteristics of R.F. Magnetron Sputtered ZnO Films", *Thin Solid Films*, Vol. 475, No. 1-2, pp. 160-165.
- Kaur J., Singhal S., 2014, "Facile Synthesis of ZnO and Transition Metal Doped ZnO Nanoparticles for the Photocatalytic Degradation of Methyl Orange", *Ceramics International*, Vol. 40, No. 5, pp. 7417-7424.
- Lastovina T. A., Bugaev A. L., Kubrin S. P., Kudryavtsev E. A., and Soldatov A. V., 2016, "Structural Studies of Magnetic Nanoparticles Doped With Rare-Earth Elements", *Journal of Structural Chemistry*, Vol. 57, No. 7, pp. 1444-1449.
- Li J., Xu J., Xu Q., Fang G., 2012, "Preparation and Characterization of Al Doped ZnO Thin Films by Sol-gel Process", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 542, pp. 151-156.
- Ohno H., 2010, "A Window on the Future of Spintronics", *Nature Materials*, Vol. 9, pp. 952-954.
- Pan F., Song C., Liu X.J., Yang Y.C., Zeng F., 2008, "Ferromagnetism and Possible Application in Spintronics of Transition-metal-doped ZnO Films", *Materials Science and Engineering R*, Vol. 62, No. 1, pp. 1-35.
- Pearson S.J., 2003, "Wide Band Gap Ferromagnetic Semiconductors and Oxides", *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, No. 1, pp. 1-13.
- Ravel B., Newville M., 2005, "ATHENA, ARTEMIS, HEPHAESTUS: Data Analysis for X-ray Absorption Spectroscopy using IFEFFIT", *Journal of Synchrotron Radiation*, Vol. 12, pp. 537-541.
- Saleh R., Djaja N. F., 2014, "Transition-metal-doped ZnO Nanoparticles: Synthesis, Characterization and Photocatalytic Activity under UV Light", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 130, pp. 581-590.
- Singhal S., Kaur J., Namgyal T., Sharma R., 2012, "Cu-doped ZnO Nanoparticles: Synthesis, Structural and Electrical Properties", *Physica B*, Vol. 407, No. 8, pp. 1223-1226.
- Singh R., 2013, "Unexpected Magnetism in Nanomaterials", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 346, pp. 58-73.
- Shindea K.P., Pawar R.C., Sinha B.B., Kim H.S., Oh S.S., Chung K.C., 2014, "Optical and Magnetic

Properties of Ni Doped ZnO Planetary Ball Milled Nanopowder Synthesized by Coprecipitation", *Ceramics International*, Vol. 40, No. 10, pp. 16799-16804.

Tseng Y.C., Lin Y.J., Chang H.C., Chen Y.H., Liu C.J., Zou Y.Y., 2012, "Effects of Ti Content on the Optical and Structural Properties of the Ti-doped ZnO Nanoparticles", *Journal of Luminescence*, Vol. 132, No. 2, pp. 491-494.

Villanueva Y.Y., Liu D.R. and Cheng P.T., 2006, "Pulsed Laser Deposition of Zinc Oxide", *Thin Solid Films*, Vol. 501, No. 1-2, pp. 366-369.



## TAM ZAMANINDA ÜRETİM FELSEFİNE DAYALI BİR SERİ ÜRETİM HATTININ SİMÜLASYON TEKNİĞİYLE PERFORMANS ANALİZİ

<sup>1</sup>Mümüne SERT, <sup>2</sup>Saadettin Erhan KESEN

<sup>1,2</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, KONYA  
<sup>1</sup>mine.sygl@gmail.com, <sup>2</sup>sekesen@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 20.07.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.08.2018)

**ÖZ:** Literatürde tam zamanında üretim sistemi konusunda siparişlerin tek tip üründen oluştuğu varsayılmıştır. Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak siparişlerin farklı ürün bilgilerini içerebildiği üretim sistemi üzerinde durulmuştur. Kanban kartları ile çalışan bir akış tipi üretim hattı çeşitli varsayımlar altında SIMAN dili kullanılarak modellenmiştir. Çeşitli faktörler belirlenerek üç farklı deney seti oluşturulmuştur. Bu deney setleri ile faktörlerdeki değişikliklerin etkisi gözlemlenmiştir. Faktörlerdeki değişimin etkisini gözlemek için farklı performans ölçütleri belirlenmiştir. Sonuçlar istatistiksel olarak yorumlanmış ve analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akış tipi üretim, Çekme sistemi, Çizelgeleme, Kanban kartları, Simülasyon.

### Performance Analysis of a Serial Production Line Based on Just in-Time Philosophy Using Simulation Technique

**ABSTRACT:** In the literature, it is assumed that the orders are made of a single type of product in a just-in-time production system. In this study, contrary to the literature, the production system in which orders can contain different product information is studied. A serial production line system working with kanban cards is modeled using the SIMAN language under various assumptions. Three different experiment clusters are designed by determining various factors. The effects of changes in factors are observed with these experimental clusters. Different performance measures are identified to observe the effect of change in factors. Findings of experimental results are reported.

**Keywords:** Flow type production system, Pull system, Kanban cards, Scheduling, Simulation.

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üretici firmalar kalite, hızlı teslimat, düşük fiyat, satış sonrası hizmetler, müşteri beklentilerini iyi anlama ve müşteri beklentilerini karşılayabilme gibi konularda ne kadar başarılı ise o kadar rekabet gücüne sahiptir. Literatürde bu konularda gelişebilmeyi sağlayarak firmalara fikir sağlayabilecek birçok farklı strateji bulunmaktadır. Bu stratejilerden önemli bir tanesi de tam zamanında üretim (TZÜ) sistemi felsefesidir. Tam zamanında üretim sistemi Toyota Motor Company'den "Eiji Toyoda" ve "Taiichi Ohno" tarafından 1970'li yıllarda ortaya çıkarılmış bir kavram olup amacı minimum seviyede stok ile müşteri taleplerine en hızlı şekilde cevap verebilmek olan başarılı bir yöntemdir.

Tam zamanında üretim sisteminin temel özelliği süreç içi stokların azaltılmasını sağlamaktır. Süreç içinde bulunan stoklar, üretim sistemini yavaşlatmakta, üretim sisteminin alanını işgal ederek gelişime kapatmakta ve aynı zamanda işletme sermayesinin bir kısmını atıl olarak bekletilmesi suretiyle fırsat maliyetine yol açmaktadır. TZÜ sisteminin eksik parçaları yerine koyma mantığı ile çalışması nedeniyle

klasik sistemlere göre taleplere daha çabuk cevap verebilmektedir. Tam zamanında üretim sistemi ile ihtiyaç duyulan ürün, en az miktarda iş gücü ve alan kullanarak, ihtiyaç duyulan zamanda, ihtiyaç duyulan miktar kadar üretilebilmektedir.

Bu çalışmada klasik TZÜ felsefesi altında çalışan sisteme ek olarak farklı özelliklere sahip bir üretim sistemi üzerinde durulmuştur. Bu çalışma ile daha önce tam zamanında üretim sistemlerinin simülasyon uygulamalarında değinilmemiş bir konuda literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Gerçek hayatta müşteri siparişleri birden fazla üründen ve adetten oluşabilmektedir. Bununla birlikte sisteme gelen her talebin bir teslim tarihi vardır. Bu teslim tarihlerinden daha geç yapılan teslimatlar, memnuniyetsizlik doğurduğu için istenmemektedir ve geciken işlerin mümkün olduğunca azaltılması gerekmektedir. Gerçek hayatta önemli olan bu kısıtlamalar çalışma içerisine dahil edilmiştir. Bu çalışmanın literatüre katacağı yenilik olan sipariş politikası ise şu şekildedir. Daha önce literatürde TZÜ sistemlerinin simülasyonu uygulamaları konusunda gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde siparişlerin yani üretim taleplerinin hep tek tip ürün için sisteme geldiği görülmüştür. Ancak gerçek bir üretim sistemi düşünülüğünde bu durumun gerçekçi olmadığı görülmektedir. Bu çalışmada sisteme gelen siparişlerin bilgisi birden fazla ürünü ve her ürün için birden fazla adeti içerebilmektedir. Sistem akış tipine sahiptir ve talep ve üretim zamanlarının stokastik bir dağılıma uyduğu varsayımı altında çalışmaktadır.

Bahsedilen çerçeve içerisinde üretim sistemi SIMAN dili kullanılarak modellenmiş, simülasyon kodu doğrulandıktan ve modelin geçerliliği sağlandıktan sonra farklı faktörlere göre üç farklı deney seti tanımlanmıştır. Bu deney setleri içerisinde bulunan deneyler sonuçlandırılmış, belirlenen performans ölçütlerine göre deney sonuçları istatistiksel olarak analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.

## LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Tam zamanında üretim literatürü oldukça geniştir. Bu çalışmalar içerisinde simülasyon tekniği kullanılmış olanlar aşağıdaki gibi derlenmiştir.

TZÜ sistemi simülasyon modeli, TZÜ sistemine dâhil edilen kanban sayısındaki değişiklikler, işlem zamanlarındaki değişkenlikler ve talep düzeylerinin işlenmesi için fazla mesai talepleri değerlendirilmesi üzerine yapılmıştır. İki kanban akışına sahip çok hatlı çekme TZÜ sistemini modellemek için SLAM II dili kullanılmıştır (Huang ve diğ., 1983). Bir başka çalışma ile TZÜ sistemi bir ilaç firması için simüle edilmiştir. Üç istasyonlu bir sistemde tek kart kullanılmış ve çeşitliliğin çok fazla olması nedeniyle ürünlerin bir kısmı ihmal edilmiştir (Chukwuedozie ve diğ., 2017). Bir kimyasal şirket için önerilen TZÜ sisteminin tasarımında ve analizinde simülasyon modelleme yaklaşımı çalışması sunulmaktadır. Simülasyon yaklaşımı, iki hücre tasarımını karşılaştırmak ve yeni TZÜ sistemi altında operatör ve malzeme işleyicileri için kullanım seviyelerini tahmin etmek için kullanılmıştır (Wielgama ve Mills, 1995).

TZÜ sistemi inşaat sektöründe de uygulanmaktadır. Bir prefabrik inşaat projesinin imalatı, nakliyesi ve yerinde montajı konuları üzerine yapılan simülasyon çalışmasında tek makine parti çizelgeleme problemi bakış açısı ile maksimum üretim verimliliği için çözümler arayan bir dinamik programlama algoritması, geçiş maliyetleri ve üretim tarih sınırlamaları dikkate alınarak geliştirilmiştir (Liulin Kong ve diğ., 2017). Yine inşaat sektöründe bir başka çalışmada bir inşaat planlama aşamasında verimlilik dinamiklerini tahmin etmek için Bina Bilgi Modelleme (BBM) ile bütünleştirilmiş bir simülasyon modeli sunulmuştur. Bu model ile operasyonel düzeyde verimliliği etkileyen kritik faktörler incelenmiş ve sonrasında verimlilik dinamikleri tahmin edilmiştir. Bu çalışmanın doğruluğunun araştırılması için yapısal bir çelik modeline uygulanmıştır (Woon Seong Jeong ve diğ., 2016).

TZÜ sisteminden bağımsız olarak literatürde teslim tarihinin temel alındığı çalışmalar tarandığında temel amacı üretim siparişlerinin teslim tarihinin gecikmesini engellemek olan üretim sisteminin modellenmesi ile alakalı bir başka çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada siparişlerin farklı miktarlarda olduğu ve farklı parçaların tamamlanmasını gerektirdiği esnek üretim sistemindeki programlama problemi üzerinde durulmuştur. Siparişlerin rassal olarak sürekli geldiği ve hepsi için bir teslim

tarihinin olduğu varsayılmaktadır. Bu çalışma içerisinde Gecikme Tahmin Yöntemi (Tardiness Estimating Method) isimli yeni bir kural önerilmiştir (Yi-Chi Wang ve diğ., 2016).

Toplam TZÜ sistemi; TZ üretim sistemi, TZ satın alma sistemi ve TZ satış sisteminin TZ bilgi sistemi ile yönetilen bir tedarik zinciri yönetimi olarak tanımlanabilir. Toplam TZÜ sistemi ile ilgili olarak bir Toplam-Tam Zamanında (T-TZ) stratejisinin bir tedarik zinciri bağlamında etkisinin değerlendirildiği bir çalışma incelenmiştir (Kenneth W. Green Jr ve diğ., 2014). Bir başka çalışmada stokastik bir süreç için çift kanban sistemi ile esnek bir montaj ve demontaj sisteminin tasarımı ve performans değerlendirmesi için simülasyon modeli geliştirilmiştir (Roongrat Pisuchpen 2012).

TZÜ sisteminin her planlama aşaması için kanbanların sayısını esnek bir şekilde belirlemek ve belirli bir planlama ufku için toplam envanter maliyetini en aza indirmek için tam sayılı doğrusal programlama tekniği kullanılarak yeni yöntemlerin önerildiği bir başka çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntemler sabit ve esnek kanban belirlemeye yarayan iki farklı doğrusal programlama modelidir. Bu modeller ile her bir planlama ufku için kanban sayısı sabit ya da esnek olarak hesaplanmakta ve bu sonuç doğrultusunda toplam envanter maliyeti minimum seviyeye indirilmesi amaçlanmaktadır. Önerilen doğrusal programlama modelleri klasik kanban belirleme yöntemleri ile karşılaştırılarak etkinliği değerlendirilmiştir (Husseini ve diğ., 2006). Sabit sayılı kanban kartına sahip geleneksel kanban sistemlerinin kararsız bir ortamda tatmin edici şekilde çalışmadığını savunulan bir başka çalışmada Husseini ve diğ. (2006) tarafından önerilen programa yöntemi kullanılmış ve talep koşullarındaki dalgalanmalarda maliyet avantajını göstermek ve özellikle de YSA aracılığıyla simülasyonun bu yöntem için basitleştirilmiş bir temsilini sağladığını ve zaman tasarrufu olduğunu kanıtlamak amaçlanmıştır (A.F. Guneri ve diğ., 2008).

131 farklı TZÜ sistemine uygun ve TZÜ sistemine uygun olmayan firmalardan oluşan bir örneklem kullanılarak istatistiksel olarak TZÜ sistemini benimsemenin performansı etkileyip etkilemediği bir başka çalışmanın konusu olmuştur (Adam S. Maiga ve Fred A. Jacobs 2009). Otomotiv bileşenlerinin üretimini gerçekleştiren bir çalışmanın temel amacı, seçilen anahtar TZÜ sistemi parametrelerinin bir otomotiv bileşen üretim ortamında performans üzerindeki etkisini belirlemek için bilgisayar tabanlı simülasyon araçları ve doğrusal matematiksel modelleme uygulanarak süreç optimizasyonunu sağlamaktır (Y.G. Sandanayake ve diğ., 2008).

Bir diğer çalışmada dinamik üretim sistemlerinin bilgisayar simülasyonunun entegrasyonu ve varyans analizi ile pratik olarak TZÜ sistemlerine yeniden uyarlamak için bir çerçeve sunulmuştur. Bu çalışmanın amacına ulaşmak için, öncelikle, gerçek sistem tamamen modellenmiş ve simüle edilmiştir. İkinci olarak, entegre simülasyon modeli, varyans analizi ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. Üçüncü olarak, optimum (en uygun) TZÜ tasarımı, gerçek sistemin sınırlamalarını ve dinamik davranışını modelleyerek geliştirilmiş ve test edilmiştir. Bu yöntem bir otomatik üretim hattı ve bir ağır haddehane atölyesi için uygulanmış ve test edilmiştir (A. Azadeh ve diğ., 2005). TZÜ ortamında üretim yapan bir sistemin simülasyon modeli geliştirilmiştir. Modelde hücre ve iş karakteristiklerinin sisteme etkisi incelenmiş, daha sonra sıralama kurallarının üç performans ölçütüne (ortalama tezgâh yararlanma oranı, ortalama akış zamanı, ortalama üretim miktarı) göre karşılaştırılması için deneyler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir (Torkul ve Kurt, 2001).

Farklı TZÜ sistemi senaryoları altında çalışan bir dizi programlama kuralının performansının simülasyon değerlendirmesi çalışmasında amaç farklı üretim senaryoları altında programlama kurallarının sistem performansını etkileyip etkilemediğinin araştırılması olmuştur. Farklı üretim senaryoları; kurulum süresinin kısaltılması, sistemdeki gevşeklik miktarı (sistemdeki kanbanların sayısı ile ölçülür), belirsizliğin ortadan kaldırılma derecesi (işlem sürelerinin rassallığı tarafından belirlenir) ve üretim gereksinimlerinin karmaşıklığı olarak tanımlanabilir (Sin-Hoon Hum ve Chee-Kwong Lee, 1998). Çok parçalı, çok satırlı ve çok aşamalı bir TZÜ sisteminin performansının açık bir şekilde inceleyen bir başka çalışmada sistemin farklı faktör ayarları altında nasıl tepki verdiğinin gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma yapılırken SLAM II dili kullanılmıştır (Baykoç ve Erol, 1998). Bir üretim sistemi için gerçekleştirilen farklı bir çalışma ile talepteki değişkenlik katsayısı değerinin, işlem zamanlarındaki değişkenliğin, TZÜ sistemi politikalarındaki değişkenliğin, sistemde bulunan kanban

sayısındaki değişkenliğin ve hat uzunluğundaki değişkenliğin etkileri ayrıca son olarak itme ve çekme sistemlerinin karşılaştırılmasını içeren kapsamlı bir deneysel çalışma sunulmuştur. Çalışmada tek tip ürün olduğu varsayılmıştır. Burada modelleme aracı olarak ARENA kullanılmıştır (Savsar ve Al-Jawinib, 1995). Birden fazla ürün çeşitliliğinin olduğu bir diğer çalışma ile makine arızalarının da değerlendirildiği ve ürünlerin farklı kuyruk sıralamalarına göre işleme alındığı TZÜ sistemi simülasyonu modellenmiştir. Bu çalışmada farklı performans kriterleri için baz model üzerinde çeşitli deneyler yapılarak performanslar değerlendirilmiştir (Yavuz ve Şatır, 1995). Bu çalışma ile üzerinde çalışılmış olan imalat sisteminden en önemli farkı Yavuz ve Şatır (1995) tarafından gerçekleştirilmiş olan çalışmada gelen siparişlerin içeriğinin tek ürün çeşidine sahip olmasıdır. Üzerinde çalışılmış olan imalat sisteminde ise gelen siparişlerin içeriği birden fazla ürünü içerebilmektedir.

Literatür araştırması sonucunda tam zamanında üretim sistemi konusunda yapılan çalışmalar içerisinde üretim sistemine gelen siparişlerin hep tek tip ürünü içerdiği görülmektedir. Ancak gerçek üretim sistemlerinde bu durum her zaman mümkün değildir. Bu nedenle üzerinde çalışılmış olan makalede literatürde değinilmediği görülen sipariş içeriğinin farklı ürünlerden oluşabilmesi konusu değerlendirilmiş, SIMAN dili ile modellenmiş ve üç farklı deney seti ile sistemin etkinliği değerlendirilmiştir.

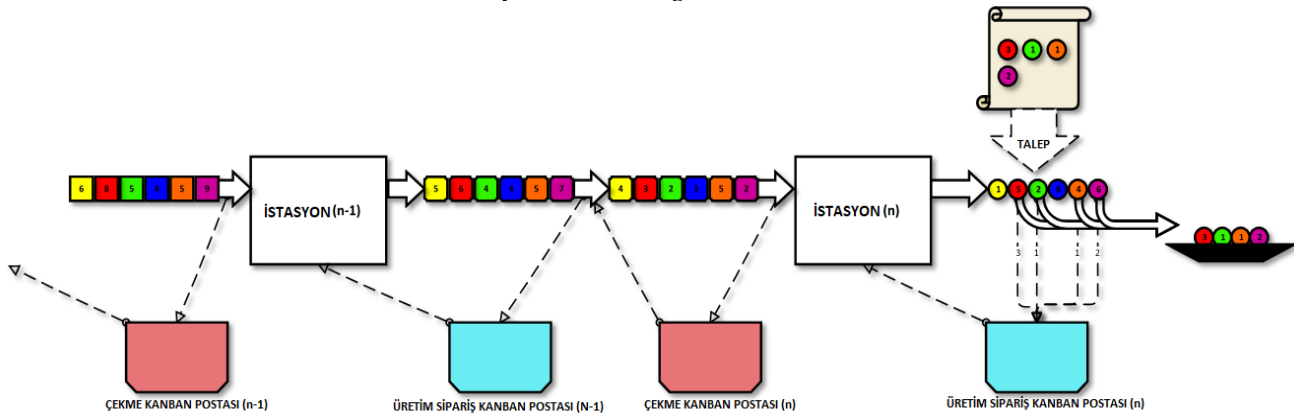
### MODELLENEN İMALAT SİSTEMİNİN ÖZELLİKLERİ (FEATURES OF MANUFACTURING SYSTEM MODELLED)

Modellenen sistem beş istasyonlu akış tipine sahip seri bir üretim hattıdır. Bu üretim hattı TZÜ sistemi felsefesi altında çalışmaktadır. Modellenen imalat sisteminde ürün çeşidi bir adet ile sınırlı değildir. Sistem birden fazla ürün çeşidi üretme kapasitesine sahiptir. Modellenen imalat sistemine gelen her talep için üretim zamanlarını da dikkate alarak sistem bir teslim tarihi atamaktadır. Atanan teslim tarihinden sonra biten işler gecikmiş işler olarak nitelendirilmektedir. Taleplerin gecikmesi istenmeyen bir durumdur.

İş istasyonlarında ürünler farklı iş tiplerine göre farklı üretim zamanlarına sahip olabilirler. Aynı ürün tipi için istasyonlardaki üretim zamanları ise dengelenmiştir. Bu dengelemenin amacı sistemde dar boğaz oluşmasını engellemektir.

Sistemin temel işleyişi müşterilerden farklı miktarda ve farklı tipte ürünlerden oluşabilen üretim talebinin gelmesi ve talebin üretim operasyonlarından geçerek teslim tarihinden önce tamamlanması şeklindedir.

Sistem klasik üretim sistemlerinin çoğunlukla tercih ettiği itme sistemi yerine çekme sistemi ile çalışmaktadır. Çekme sisteminin işleyişi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çekme sisteminin işleyişi

Figure 1. Operation of pull system

Şekil 1 üzerindeki çekme sisteminin işleyişi şu şekilde açıklanabilir. Talebin gelmesi çekme sisteminin harekete geçmesini tetikleyen unsurdur. Talebin gelmesi ile son istasyonun (n) çıkış

kuyruğundan talep içeriğinde bulunan ürünlerden belirtilen adetlerde çekilir ve üretim ihtiyacını belirtmek üzere üretim sipariş kanban kutusuna (n) bir kart bırakılır. İstasyon (n) boş, giriş kuyruğunda üretilecek olan ürün için gerekli ürün var ve üretim sipariş kanban kutusunda (n) kart var ise giriş kuyruğundan bir ürün çekilerek üretime başlanır. Bu arada üretime giren ürün için çekme kanban kutusuna (n) bir adet kart bırakılır. Çekme kanban kutusuna (n) bir kart düşmesi önceki operasyonun başlamasını tetikler ve önceki istasyonun (n-1) çıkış kuyruğundaki ürün bir sonraki istasyonun (n) giriş kuyruğunda yerini alır. Önceki istasyondan (n-1) bir ürün eksilmesi ile üretim kanban sipariş kutusuna (n-1) bir kart düşer ve bu işlemler tedarikçiye doğru devam eder.

Üretim sipariş kanbanı ve çekme kanbanı arasındaki temel fark şu şekilde açıklanabilir. Üretim sipariş kanbanı istasyon içinde bilgi iletimini sağlayarak aynı istasyonda üretimi tetiklerken çekme sipariş kanbanı istasyonlar arasında bilgi iletimi sağlayarak önceki istasyondan ürün çekilmesini tetikler. Çekme kanbanı ayrıca dolaylı olarak önceki istasyonun üretime başlamasını da tetikler.

Makinelerdeki işlem zamanlarının ve talepler arasında geçen zamanın bir olasılık dağılımına uyduğu varsayılmaktadır. Üretilen tüm ürünler sırası ile aynı istasyonlardan geçmektedir.

### BAZ MODEL (BASE MODEL)

Yapılacak olan deneylerin şartlarının eşit hale getirilmesi amacıyla bir baz model oluşturulmuştur. Böylelikle deney şartları sabit tutularak yalnızca deney yapılacak parametrelerin etkisi değerlendirilebilir. Oluşturulan baz modelde, hat uzunluğu 5 istasyon olarak belirlenmiştir. Hat boyunca üretilen ürün tipi sayısı 2 olarak belirlenmiştir.

Taleplerde bulunan sipariş miktarı her bir ürün için maksimum 3 adet olarak sabitlenmiştir. İşlem zamanındaki değişkenlik katsayısı (standart sapma / ortalama) 0,1 seçilmiştir. Talep gelişleri Çizelge 1'de tanımlanan değerler için orta seviye olarak seçilmiştir.

**Çizelge 1.** Talep hızı değerleri

*Table 1. Demand rate values*

Talep Hızı	Ortalama
Düşük	UNIF(40, 60)
Orta	UNIF(20, 40)
Yüksek	UNIF(10, 30)

Kanban sayısı 2 olarak belirlenmiştir. Gelen talepler için teslim tarihinin atanması sırasında kullanılan izin faktörü Çizelge 2'de tanımlananlar arasında *Dar* olarak seçilmiştir. İzin faktörü olarak belirtilen kavram teslim tarihi belirlenirken teslim tarihini stokastik tablo değere dönüştüren bir katsayı olarak tanımlanabilir. Teslim tarihinin sadece işlem zamanları ortalaması toplamının talebin geldiği zamana eklenerek hesaplanması gerçekçi olması bakımından yetersizdir. İstasyonların o talebi gerçekleştirebilmesi için henüz müsait olmadığı yani istasyonların dolu olabildiği ve işlem zamanlarının stokastik olduğu bilinmektedir. Bu durumda teslim tarihinin stokastik bir değer olarak belirlenebilmesi için bir izin faktörüne ihtiyaç vardır. İzin faktörü modellenen sistemde düzgün dağılıma uygun olarak belirlenmiştir. Bu faktörün dağılım aralığının geniş olarak belirlenmesi sistemi rahatlatır. Ya da faktörün dağılım aralığının dar olarak belirlenmesi sistemi zorlayabilir.

Çizelge 2. İzin faktörü değerleri

Table 2. Permission factor values

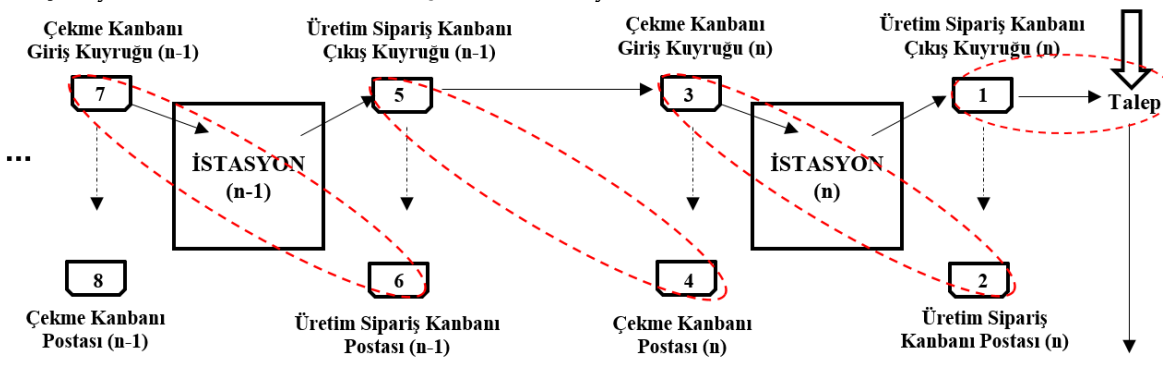
İzin Faktörü	Ortalama
Dar	UNIF(0,5; 1,0)
Orta	UNIF(1,5; 2,0)
Geniş	UNIF(2,5; 3,0)

Hat üzerinde istasyonlardaki üretim zamanlarının ortalamalarının ve standart sapmalarının eşit olan normal dağılıma uygun olduğu varsayılmıştır. Simülasyon zamanı 30 gün yani 43200 dakika olarak kabul edilmiştir.

Sistem modellenirken SIMAN dili kullanılmıştır. Modellenen sistemin baz modeli üzerinde kullanılan modüller şu şekilde açıklanabilir:

Taleplerin gelişi CREATE bloğu yardımıyla oluşturulmuştur. Gelen siparişlerin CR, MST, teslim tarihi gibi değerleri ASSIGN bloğu yardımı ile atanır. Sisteme düşen talepler arasında  $[0, 0, \dots, 0]$  şeklinde içeriği boş bir talep üretilmiş olabilir. Olasılık dağılımları göz önünde bulundurulduğunda bu mümkün olabilecek bir durumdur. Bu şekilde gelen taleplerin sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir. Bunun için BRANCH bloğu yardımı ile bu boş talepler ayıklanır ve DISPOSE bloğu yardımı ile sistemden uzaklaştırılır. Talep içeriğine göre ilgili miktarda ve ilgili çeşitte varlık DUPLICATE bloğu yardımı ile oluşturulur ASSIGN bloğu yardımı ile iş tipinin ataması yapılır. Sonrasında ise varlıklar son istasyonun çıkış kuyruğundan talebi karşılamak ve çekme işlemini gerçekleştirmek üzere üretim sistemine gönderilir.

Üretim sisteminde son istasyondan talebin karşılanması amacıyla çıkan parçaların üretilmesi için çekme sistemi çalışır. Çekme sistemi için her bir istasyona ait dört adet kuyruk bulunmaktadır. Bu kuyruklar QUEUE bloğu ile oluşturulmuştur. Bu kuyruklar her istasyon için; çekme kanbanı giriş kuyruğu, çekme kanbanı postası, üretim sipariş kanbanı postası ve üretim sipariş kanbanı çıkış kuyruğudur. Çekme sisteminin işleyişi hatırlanırsa gelen taleple ürünlerin eşleşmesi ile ürünler müşteriye iletilmektedir. Bu sistem Şekil 2 ile detaylı olarak tanımlanabilir.



Şekil 2. Çekme sistemi kanbanların eşleşmesi

Figure 2. Matching of pulling system kanbans

Son istasyondan çıkan ürünler üzerinde bulunan üretim sipariş kanbanı ile üretim sipariş kanbanı çıkış kuyruğunda (1) konteyner içerisinde beklemektedir. Gelen talep ile bekleyen ürünlerin talebi karşılanması durumunda talebi karşılayan ürünler talep ile eşleşir. Eş zamanlı olarak üretim sipariş kanban postasına (2) sistemden çıkan ürünlerin yerine yenilerinin üretilmesi için üretim sipariş kanbanı bırakılır. Üretim sipariş postasına (2) düşen kanban ile çekme kanbanı giriş kuyruğundaki (3) kanbana bağlı konteynerin eşleşmesi ile istasyon çekme kanbanı giriş kuyruğunda (3) bekleyen ürünü alarak üretime başlamaktadır. Üretime başlanırken bir önceki istasyona çekme kanbanı giriş kuyruğundaki (3) ürünlerin eksildiği ve yerine yenilerinin üretilmesi gerektiği bilgisinin verilmesi amacıyla çekme kanban

postasına (4) çekme kanbanı bırakılır. Çekme kanban postasında (4) bulunan kanban ile bir önceki istasyonun üretim sipariş kanbanı çıkış kuyruğundaki kanbanlar (5) eşleşir ve istasyonun girişine ürünler çekilir. Çekilen ürünlerin yerine yenilerinin üretilmesi için üretim sipariş kanban postasına (6) bir kanban bırakılır ve sistem bu şekilde geriye doğru çalışır.

Burada istasyonlar STATION bloğu ile oluşturulmuştur. Kuyruklardaki kanbanların eşleşmeleri MATCH bloğu yardımı ile yapılmıştır. Şekilde kırmızı daire ile MATCH bloğu ile eşlenen kanbanlar gösterilmektedir. Kesikli oklar kanban hareketlerini düz oklar ise ürün veya ürüne bağlı kanban hareketlerini göstermektedir.

İstasyonlarda üretimi tamamlanan ürünler bitmiş ürün stokunda kendilerine özel kuyruklara iletilmektedir. Kuyruklar önündeki ürünler WAIT bloğu ile talep içerisindeki tüm ürünler tamamlanana kadar beklemektedir. Talep içerisindeki ürünlerin tamamlanması SCAN bloğunda tanımlanan şartın sağlanması ile modele bildirilir. Şartın sağlanmasından sonra SIGNAL bloğu ile WAIT bloklarına ürünlerin kuyruktan çıkmaları sinyali gönderilir ve ürünler DISPOSE bloğu ile sistemden çıkar. Buradaki bahsedilen şart gelen talep içeriğindeki tüm ürünlerin hazır hale gelip gelmediğini sorgulamaktadır.

SCAN bloğu önünde bulunan QUEUE bloğunda daha önce tanımlanmış olan sipariş toplama kuralları işletilmektedir.

Sistemde saydırma işlemleri COUNT, sistem içerisinde geçen zamanların tutulması işlemleri TALLY blokları ile gerçekleştirilmiştir.

## PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ (PERFORMANCE MEASURES)

Modellenen sistem üzerinde yapılan deneylerin değerlendirilmesi için bazı performans ölçütleri belirlenmiştir. Bu ölçütler aşağıda sıralandığı gibidir.

- i. **Ortalama Hattının Kullanım Oranı (OHKO):** Hat kullanım oranı istasyonların doluluk oranları ile ölçülmektedir
- ii. **Ortalama Ara Stok Miktarı (OASM):** İstasyonlara ait kuyrukların ortalama olarak ne kadar uzun olduğunu göstermektedir.
- iii. **Ortalama Üretilen Ürün Sayısı Oranı (OÜÜSO):** Gelen siparişlerin karşılanma oranını göstermektedir.
- iv. **Ortalama Servis Oranı (OSO):** Bu ölçüt literatürde TZÜ sistemlerinde daha önce değerlendirilmemiştir. Gerçekleştirilen çalışmada teslim süresinin dikkate alınması ile bu performans ölçütü önem kazanmıştır. Ortalama servis oranı gecikmeyen siparişlerin toplam siparişlere oranıdır. Bu oran sistemin siparişleri karşılayabilme oranını göstermektedir.
- v. **Ortalama Talep Karşılama Zamanı (OTKZ):** Bu performans ölçütüne göre talep geldiği zaman ve talebin karşılandığı zaman arasında geçen sürelerin ortalaması değerlendirilmektedir.
- vi. **Ortalama Karşılanan İki Talep Arası Süre (OKİTAS):** Ardışık olarak karşılanan iki talep zamanları arasındaki sürelerin ortalamasıdır.
- vii. **Ortalama Ürün Teslim Süresi (OÜTS):** Ürünün sistemde dolaştığı zaman olarak tanımlanabilir.
- viii. **Ortalama Talep Gecikmesi (OTG):** Bu ölçüt siparişlerin gecikme sürelerinin ortalaması olarak tanımlanabilir.
- ix. **Maksimum Talep Gecikmesi (MTG):** Tüm geciken işlerin içerisinde en fazla geciken talebin gecikme süresi olarak tanımlanır.

## BULGULAR VE SONUÇLAR (FINDINGS AND RESULTS)

Deneylerin oluşturulması için bir takım faktörler belirlenmiştir. Belirlenen faktörler aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

**I. İşlem Zamanındaki Değişkenlik:** İşlem zamanlarındaki değişkenlik faktörü istasyonlarda işlem gören parçaların işlem zamanlarındaki değişkenliği içermektedir. Değişkenlik CV değeri ile ölçülmektedir. CV değeri sistemde standart sapmanın ortalamaya olan oranı ile hesaplanmaktadır.

**II. Kanban Sayısı:** Sistemdeki maksimum ara stok miktarını belirler.

**III. Üretim Sipariş Miktarı:** Taleplerde bulunan sipariş miktarı her bir ürün için kaç adet olabileceği bilgisini vermektedir.

**IV. Talep Belirsizliği Derecesi:** Gelen taleplerin ortalama olarak hangi aralıklarda geleceğini belirler.

**V. Sipariş Toplama Kuralları:** Gelen taleplerin farklı kurallara göre karşılanma önceliğini belirtmektedir. Öncelik verilen sipariş bekleyen siparişler arasında ilk olarak karşılanmaktadır.

**VI. İzin Faktörü:** İzin faktörü gelen talepler için makul bir teslim tarihi belirlemek amacıyla kullanılır. Teslim Tarihi=Sipariş Varış Zamanı +Ortalama Operasyon Zamanı \* İzin Faktörü olarak ifade edilir.

Bu faktörlerin etkileşimlerinin değerlendirilmesi amacıyla üç farklı deney seti oluşturulmuştur. Oluşturulan deney setleri MINITAB istatistiksel paket programı yardımı ile ANOVA testi ile istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. İstatistiksel değerlendirme yapılırken güven aralığı %95 olarak belirlenmiştir.

Oluşturulan deneyler ve deneylerin etkileşim grafikleri aşağıda verilmiştir.

#### Deney Seti 1 (Experimental Set 1)

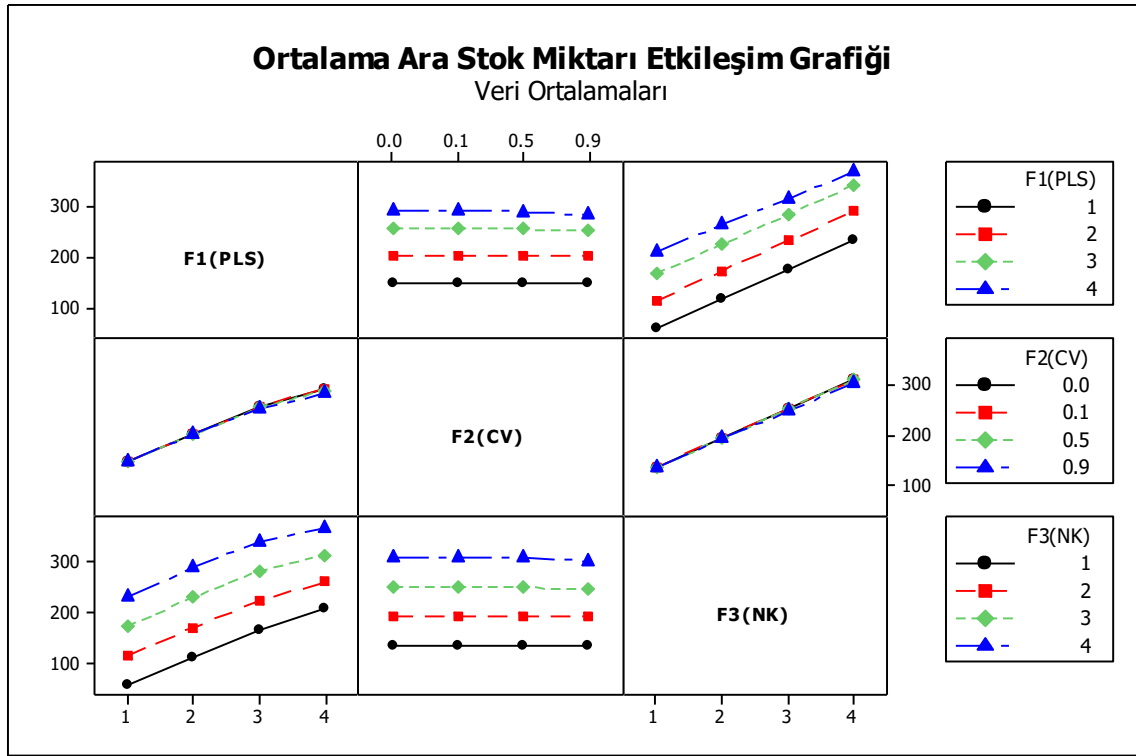
İlk deney ile üretim sipariş miktarındaki artışı ve işlem zamanlarındaki değişkenliği kanban sayısı nasıl tolere edeceği araştırılmıştır. Bu deney setinde kullanılan faktörler ve seviyeleri Çizelge 3 ile verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4 üretim sipariş miktarı (PLS), işlem zamanındaki değişkenlik (CV) ve kanban sayısı (NK) olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Deney seti 1

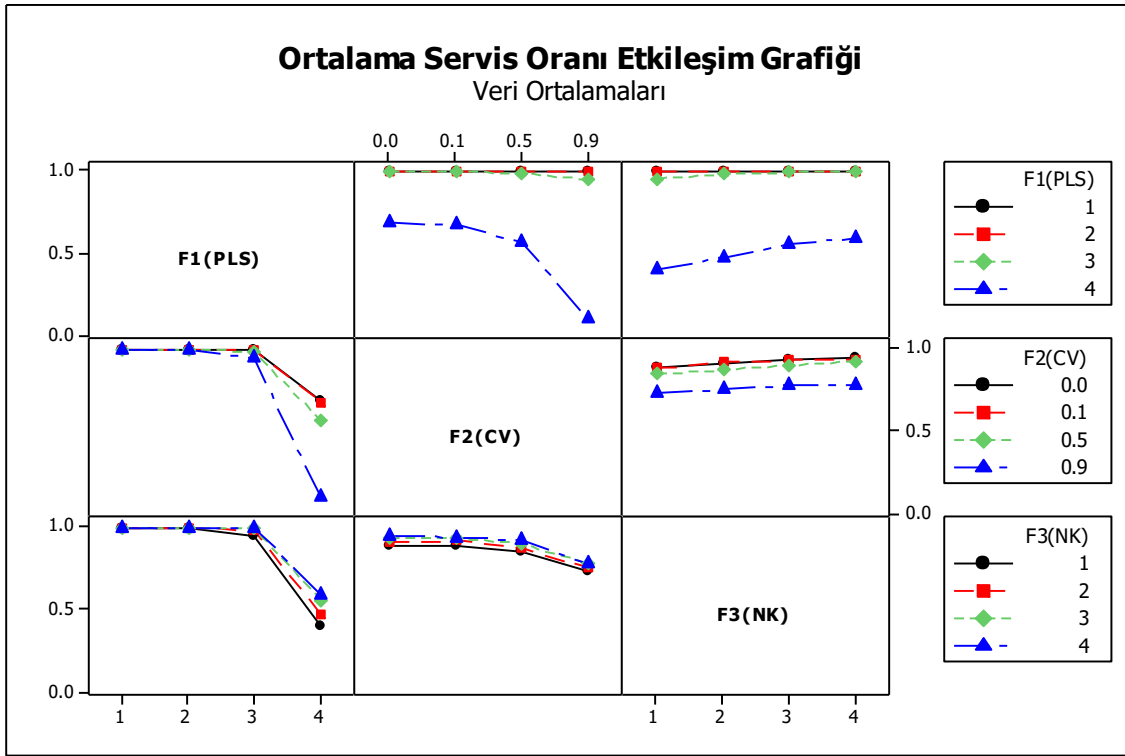
*Table 3. Experimental set 1*

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Üretim Sipariş Miktarı (p)	1	2	3	4
İşlem Zamanındaki Değişkenlik	0	0,1	0,5	0,9
Kanban Sayısı	p	p+1	p+2	p+3





Üretim sipariş miktarı ile işlem zamanındaki değişkenlik grafiğine bakıldığında üretim sipariş miktarının artışı ile ortalama ara stok miktarının arttığı görülmektedir. Üretim sipariş miktarı 4 değerindeyken işlem zamanındaki değişkenliğin artması ortalama ara stok miktarını düşürmüştür. Üretim sipariş miktarı ve kanban sayısının etkileşiminde üretim sipariş miktarının her değeri için kanban sayısının artışı ile ortalama ara stok miktarı artmıştır. İşlem zamanındaki değişkenlik ve kanban sayısının etkileşiminde kanban sayısının artması ile işlem ortalama ara stok miktarı artmıştır.



Etkileşim grafiğinde üretim sipariş miktarının işlem zamanındaki değişkenlik faktörü ile etkileşiminde azalan bir eğriyi takip ettiği ancak üretim sipariş miktarının kanban sayısı ile etkileşiminde artış gösteren bir eğriyi takip ettiği görülmektedir. Bu durum sistemi zorlayıcı bir faktör olan üretim sipariş miktarının kanban sayısı ile dengelenebildiğini açıklamaktadır.

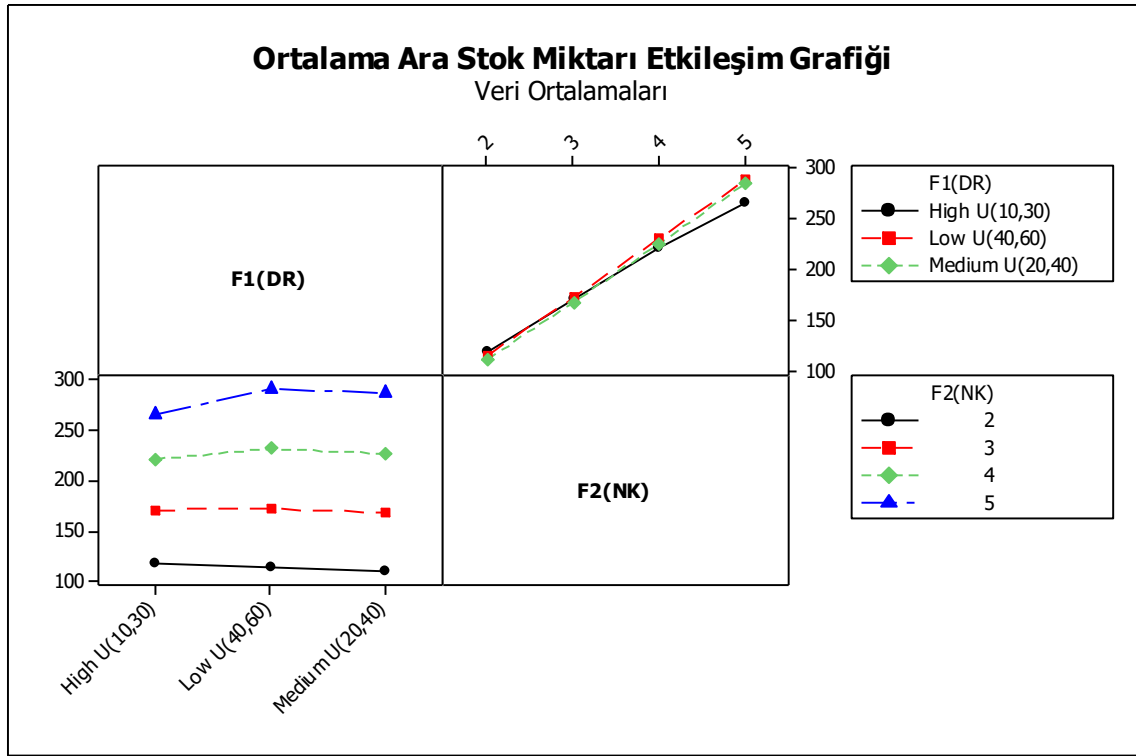
#### Deney Seti 2 (Experimental Set 2)

İkinci deney seti ile talep hızı (DR) ve kanban sayısı (NK) faktörlerinin etkileri ve etkileşimleri değerlendirilmiştir. Bu deney setinde kullanılan faktörler ve seviyeleri Çizelge 4 ile verilmiştir. Grafiklerde (Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8) talep hızı DR ve kanban sayısı NK olarak gösterilmiştir. Grafiklerde talep hızının "LOW" olarak gösterilmesi talep hızının düşük olduğu, "MEDIUM" olarak gösterilmesi talep hızının orta olduğu ve "HIGH" olarak gösterilmesi talep hızının yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

**Çizelge 4.** Deney Seti 2

*Table 4.* Experimental set 2

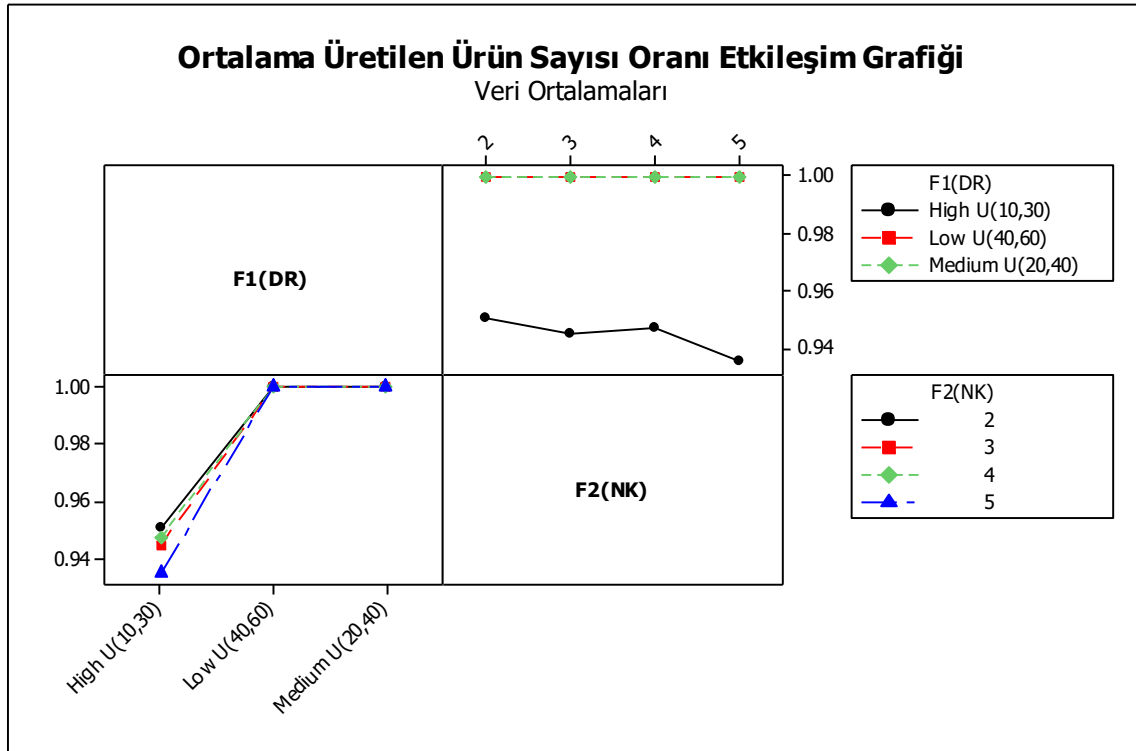
Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Talep Hızı	Düşük	Orta	Yüksek	-
Kanban Sayısı	2	3	4	5



Şekil 5. Deneysel set 2 ortalama ara stok miktarı etkileşim grafiği

Figure 5. Experimental set 2 average intermediate stock amount chart

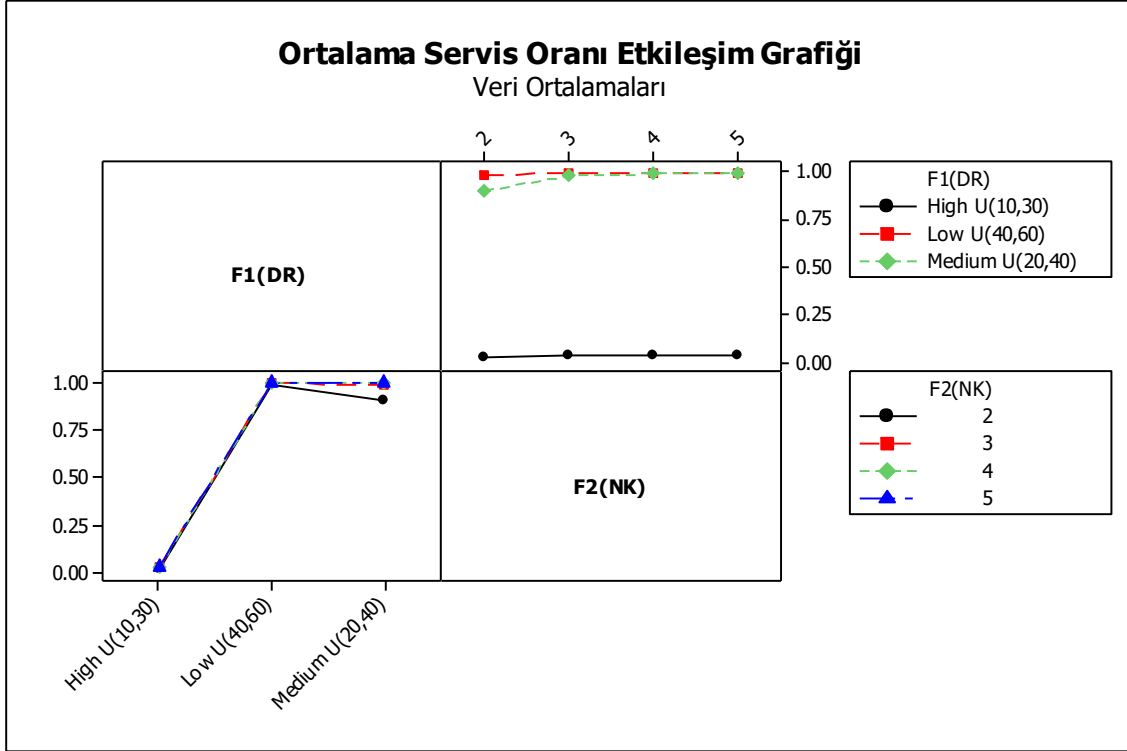
Talep hızı ve kanban sayısının ikili etkileşiminde büyük bir fark oluşturmamasına rağmen talep hızının artışı ile kanban sayısının artışı ortalama ara stok miktarının artışını azaltmıştır.



Şekil 6. Deneysel set 2 ortalama üretilen ürün sayısı oranı etkileşim grafiği

Figure 6. Experimental Set 2 average number of produced products chart

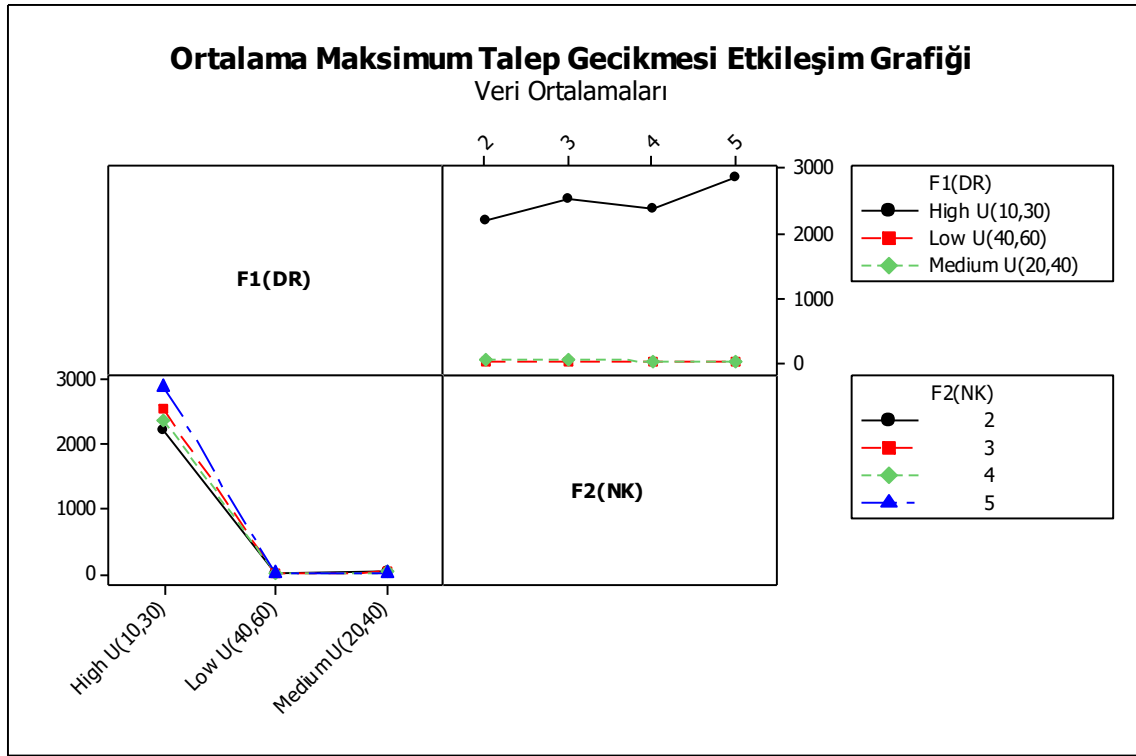
Talep hızının düşük ve orta değerinde kanban sayısının değişimi ortalama üretilen ürün sayısı oranını etkilemezken talep hızının yüksek seviyesinde kanban sayısının değişimi sistemi etkilemektedir. Kanban sayısının 2 olarak seçilmesi ile talep hızının yüksek değerinde ortalama üretilen ürün sayısı oranı en yüksek değeri aldığı görülmektedir.



Şekil 7. Deney Seti 2 ortalama servis oranı etkileşim grafiği

Figure 7. Experimental set 2 average service rate chart

Talep hızı ve kanban sayısının etkileşiminde kanban sayısı artırılarak yükselen talep hızının oluşturduğu ortalama servis oranındaki düşüş az miktarda da olsa azaltıldığı görülmektedir.



Şekil 8. Deney seti 2 ortalama maksimum talep gecikmesi etkileşim grafiği

Figure 8. Experimental set 2 average maximum demand delay chart

Talep hızı ve kanban sayısının etkileşiminde kanban sayısının artması ile ortalama maksimum talep gecikmesinin arttığı görülmektedir.

### Deney Seti 3 (Experimental Set 3)

Üçüncü deney setinde izin faktörü, üretim sipariş miktar ve sipariş toplama kurallarının etkileri ve etkileşimleri değerlendirilmiştir. Grafiklerde (Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12) izin faktörü AF, üretim sipariş miktarı PLS sipariş toplama kuralları OCR olarak gösterilmiştir. İzin faktörünün dar olarak verilmesi gecikmeye sebep olabilirken geniş olarak verilmesi gecikmeleri azaltabilir. Grafiklerde izin faktörünün "LOOSE" olarak gösterilmesi izin faktörünün gevşek olduğu, "MEDIUM" olarak gösterilmesi izin faktörünün orta olduğu ve "TIGHT" olarak gösterilmesi izin faktörünün dar olduğu anlamına gelmektedir. Üretim sipariş miktarının artması sistemi zorlayan bir unsurdur. Sipariş toplama kuralları sisteme gelen taleplerin hangi kurala göre önceliklendirileceğini belirtir. Dört adet sipariş toplama kuralı değerlendirilmiştir. Bunlar sisteme ilk gelen siparişin karşılandığı anlamına gelen FIFO kuralı, kuyrukta bulunanlar arasında teslim tarihi en erken olana öncelik verilmesi anlamına gelen EDD kuralı, kritik oran anlamına gelen CR kuralı ve minimum gevşek zaman anlamına gelen MST kuralıdır. CR kuralında aşağıdaki fonksiyon ile kritik oran hesaplanır ve CR değeri düşük olana öncelik verilir.

$$CR = (\text{Teslim Tarihi} - \text{Şimdiki Zaman}) / \text{İş Süresi}$$

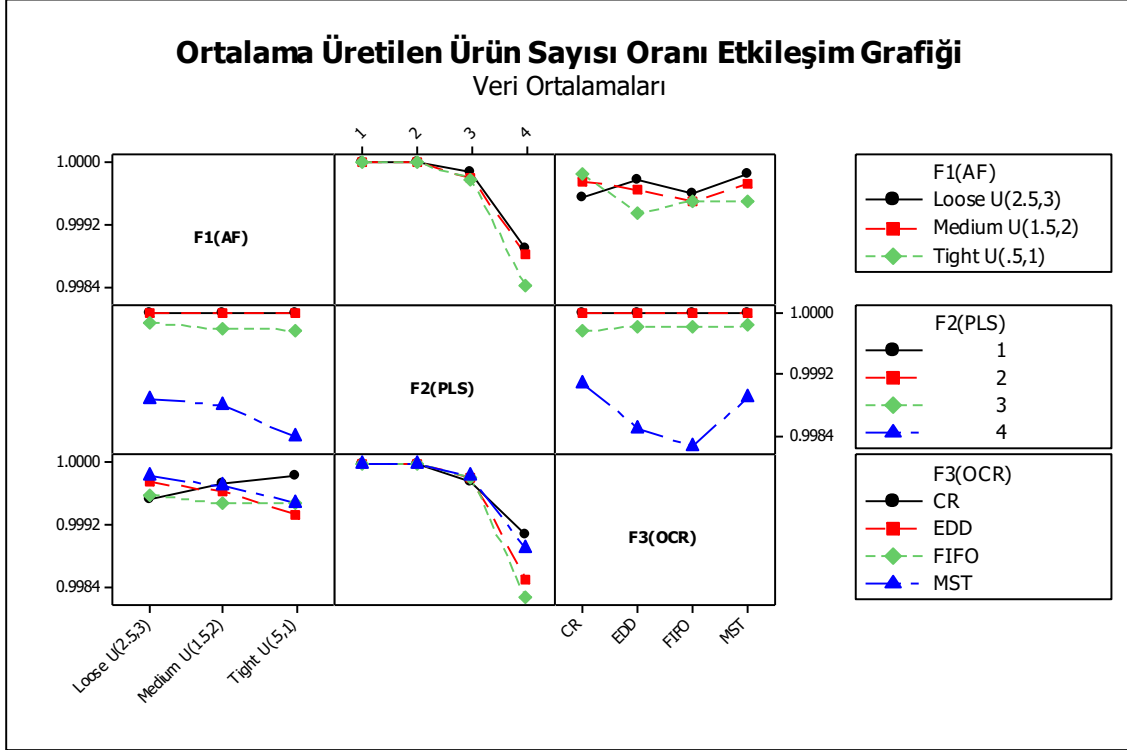
MST kuralında aşağıdaki fonksiyon ile MST değeri hesaplanır ve MST değeri düşük olana öncelik verilir.

$$MST = \text{Teslim Tarihi} - \text{Şimdiki Zaman} - \text{İş Süresi}$$

Bu deney seti ile bu üç faktörün birbiri ile etkileşimi ve üretim sipariş miktarındaki artışın ve izin faktörünün daralmasının sipariş toplama kuralları ile nasıl etkileneceği değerlendirilmiştir. Aynı zamanda izin faktörü ile oluşabilecek gecikmelerin sipariş toplama kuralları ile azaltılıp azaltılamayacağı araştırılacaktır. Bu deney setinde kullanılan faktörler ve seviyeleri Çizelge 5 ile verilmiştir.

Çizelge 5. Deney seti 3  
Table 5. Experimental set 3

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
İzin Faktörü	Dar	Orta	Geniş	-
Üretim Sipariş Miktarı	1	2	3	-
Sipariş Toplama Kuralları	FIFO	EDD	CR	MST



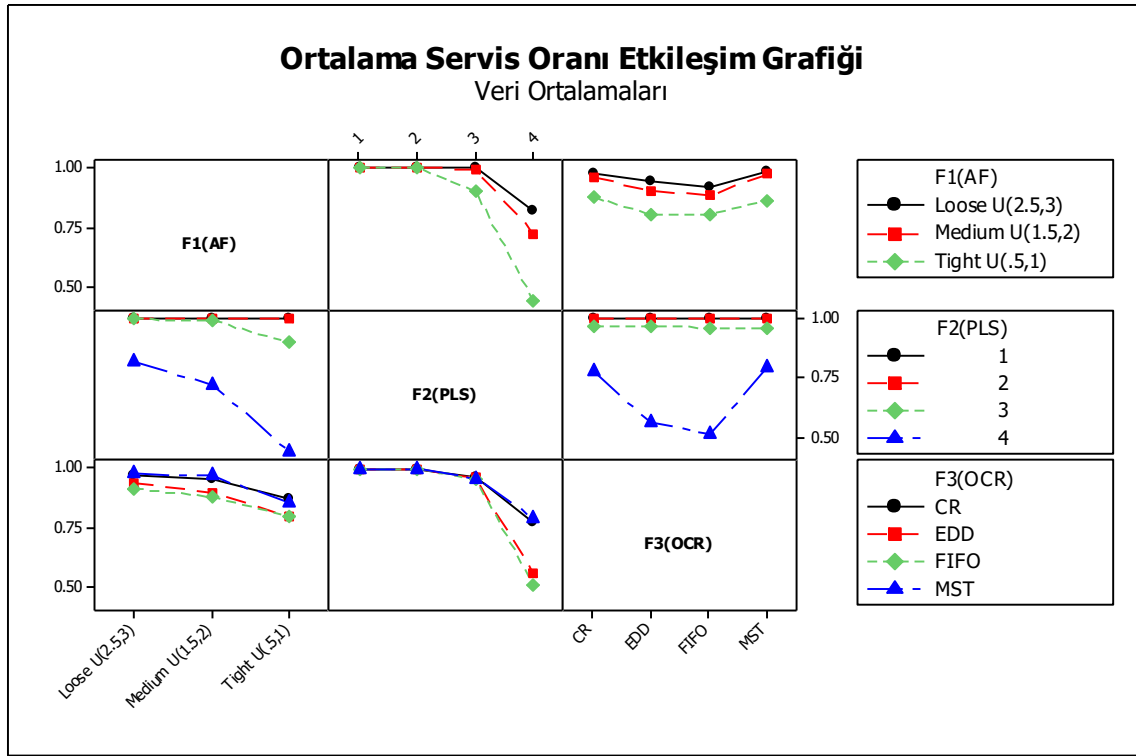
Şekil 9. Deney seti 3 ortalama üretilen ürün sayısı oranı etkileşim grafiği

Figure 9. Experimental Set 3 average number of produced products chart

İzin faktörü ve üretim sipariş miktarı etkileşiminde üretim sipariş miktarının 3 ve 4 olduğu durumlarda izin faktörü daraldıkça ortalama üretilen ürün sayısı oranının azaldığı görülmektedir.

İzin faktörü ve sipariş toplama kurallarının etkileşiminde izin faktörünün daralması ile EDD, FIFO ve MST kuralları seçildiğinde ortalama üretilen ürün sayısı oranı azalmakta ancak CR kuralı seçildiğinde artmaktadır.

Üretim sipariş miktarı ve sipariş toplama kurallarının etkileşiminde üretim sipariş miktarı 4 olduğu durumda ortalama üretilen ürün sayısı oranı performans ölçütü bakımından en iyi sonucu CR kuralı vermiştir. Burada en başarısız sonuç FIFO kuralı ile elde edilmiştir.



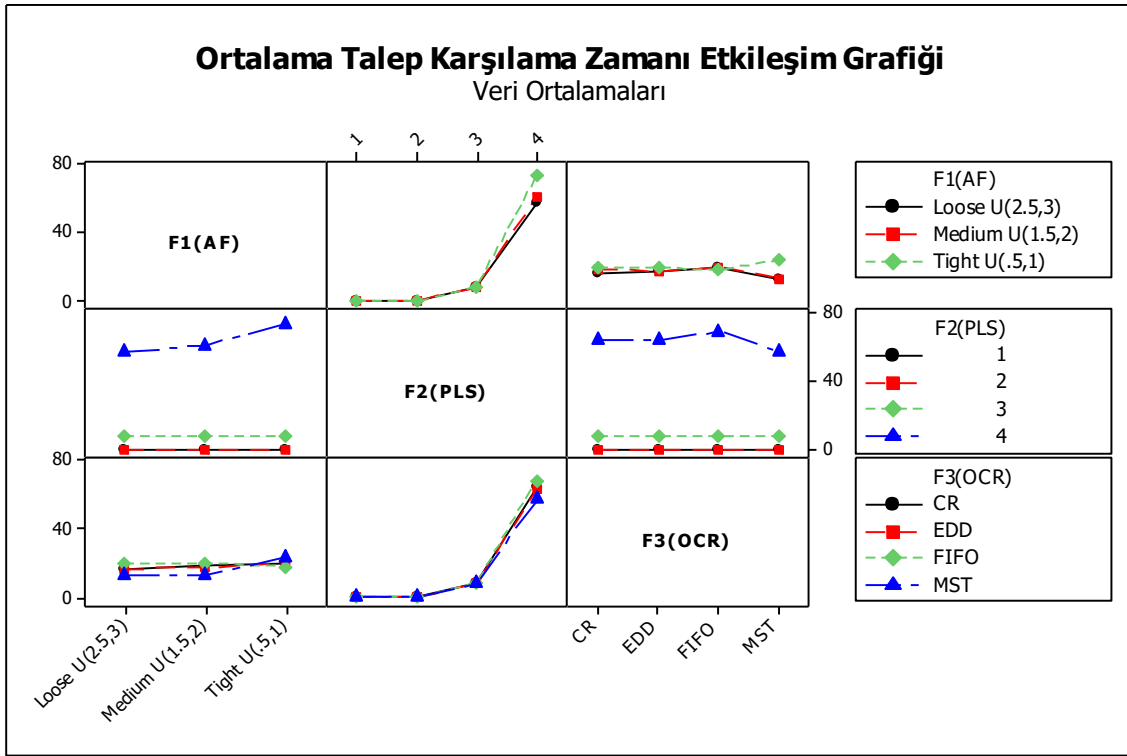
**Şekil 10.** Deneysel Seti 3 ortalama servis oranı etkileşim grafiği

*Figure 10. Experimental set 1 average service rate chart*

İzin faktörü ve üretim sipariş miktarının etkileşiminde dikkat çeken durum üretim sipariş miktarının 1 ve 2 olduğu durumlarda izin faktörünün değişimi ortalama servis oranını etkilememiştir. Üretim sipariş miktarı 3 ve 4 olduğunda izin faktörü gevşetildikçe ortalama servis oranı artmaktadır.

İzin faktörü ve sipariş toplama kurallarının etkileşiminde CR ve MST kuralları diğer kurallara göre ortalama sipariş miktarı performans ölçütü için daha iyi sonuç vermiştir. FIFO kuralı diğer kurallara göre daha başarısız olmuştur.

Üretim sipariş miktarı ve sipariş toplama kurallarının etkileşiminde üretim sipariş miktarı 1 ve 2 değerinde iken sipariş toplama kurallarının değişiminden ortalama servis oranı etkilenmemiştir. Üretim sipariş miktarı 3 değerindeyken sipariş toplama kurallarından CR kuralı diğerlerine göre daha başarılı olmuştur. Üretim sipariş miktarının 4 olduğu durumda sipariş toplama kurallarının etkisi daha net bir şekilde fark edilmektedir. Burada CR ve MST kuralları ortalama servis oranını yükseltmiş ancak FIFO ve EDD kuralları düşürmüştür.



**Şekil 11.** Deney Seti 3 ortalama talep karşılama zamanı etkileşim grafiği

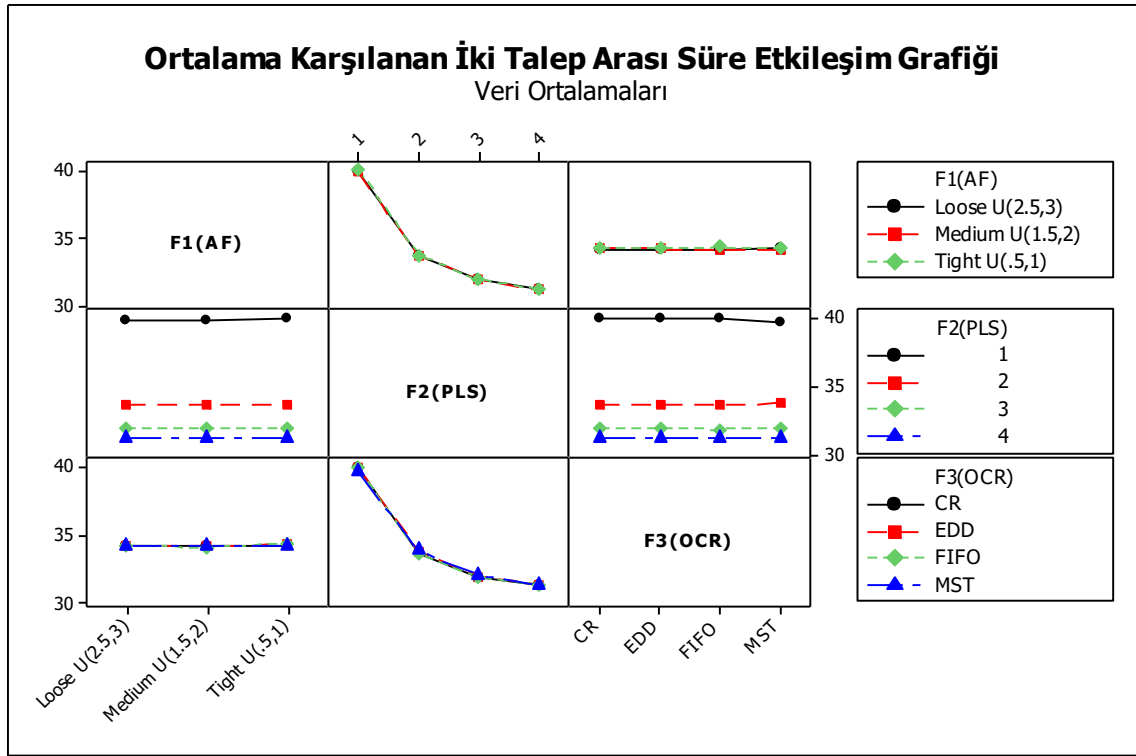
*Figure 11.* Experimental set 3 average demand satisfy time graph

İzin faktörü ve üretim sipariş miktarının etkileşiminde üretim sipariş miktarı 1, 2 ve 3 değerindeyken izin faktörünün değişiminin ortalama talep karşılama zamanına etki etmediği görülmektedir. Üretim sipariş miktarı 4 değerindeyken izin faktörünün daraltılması ortalama talep karşılama zamanını arttırmıştır.

İzin faktörü ve sipariş toplama kurallarının etkileşiminde izin faktörünün dar olarak seçildiği durumda en başarılı sipariş toplama kuralı MST olmuştur. İzin faktörü genişken en başarılı sipariş toplama kuralı FIFO kuralı olmuştur.

Üretim sipariş miktarı ve sipariş toplama kurallarının etkileşiminde sipariş toplama kurallarının değişimi ortalama talep karşılama zamanına büyük bir etkisi olmamıştır.





**Şekil 12.** Deney Seti 3 Ortalama Karşılanan İki Talep Arası Süre Etkileşim Grafiği  
*Figure 12. Experimental set 3 average interval between two demands duration graph*

Üretim sipariş miktarı ve sipariş toplama kurallarının etkileşiminde üretim sipariş miktarının 1 değerinde MST kuralının az bir miktarda ortalama karşılanan iki talep arası süreyi düşürdüğü gözlenmektedir. Üretim sipariş miktarının 2 değerinde ise MST kuralının az bir miktarda ortalama karşılanan iki talep arası süreyi arttırdığı gözlenmektedir. Diğer etkileşimlerin sistem üzerinde etkisi olmamıştır.

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada tam zamanında üretim felsefesi altında çalışan bir üretim sistemi modellenmiştir. Üzerinde çalışılmış ve sonuçları bu makale içerisinde aktarılmış olan model tam zamanında üretim sistemi altında çalışan bir üretim hattıdır.

Bu çalışmada beş istasyonlu, akış tipi üretim gerçekleştiren, birden fazla ürün çeşitliliğine sahip, üretim zamanlarının ve taleplerin rassal değişken olduğu tam zamanında üretim sistemi modellenmiştir. Sistem iki tip kanban ile çalışmaktadır. Bunlar üretim sipariş kanbanı ve çekme kanbanıdır. Üretim sisteminde kanbanlar anlık olarak kontrol edilmektedir. Modellenen üretim sisteminde gelen taleplerin sipariş içeriğinde birden fazla ürün ve her bir ürün için farklı miktarlar barındırabilir. Bu sipariş esnekliği literatürde daha önce değinilmemiştir. Sisteme gelen her bir talep için bir teslim tarihi atanmaktadır. Atanan teslim tarihinden sonra tamamlanan işler gecikmiş işler olarak nitelendirilmektedir.

Tam zamanında üretim sistemi için önemli olan bir takım faktörlerin bu çalışma ile etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma içerisinde değerlendirilen faktörler, işlem zamanındaki değişkenlik, kanban sayısı, üretim sipariş miktarı, talep hızı, sipariş toplama kuralları ve izin faktörüdür.

Bahsedilen faktörlerin değerleri belirlenerek bir baz sistem SIMAN dili kullanılarak modellenmiştir. Bu faktörlerin değişiminin değerlendirilmesi için dokuz farklı performans ölçütü belirlenmiştir. Bu baz model üzerinde faktörlerin etkilerinin belirlenen performans ölçütleri üzerinde değerlendirilmesi amacıyla üç farklı deney seti oluşturulmuştur. Bu deney setlerinde belirlenen faktörlerin değişiminin

etkileri MINITAB programı ile istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İstatistiksel olarak yapılan testlerde ANOVA yöntemi kullanılmıştır. Güven aralığı %95 olarak belirlenmiştir.

Test sonuçlarının özeti Çizelge 6 üzerinde verilmiştir. Üç farklı deney için faktörlerin performans ölçütleri üzerinde istatistiksel olarak etkisi var ise "E", istatistiksel olarak etkisi bulunmuyor ise "H" harfi ile gösterilmiştir. Çizelge 6 üzerinde belirtilen PLS üretim sipariş miktarı, CV işlem zamanındaki değişkenlik, NK kanban sayısı, DR talep hızı, AF izin faktörü ve OCR sipariş toplama kuralları faktörlerini ifade etmektedir. "\*\*\*" işareti ile faktörlerin etkileşimleri tanımlanmıştır.

**Çizelge 6.** Deney Sonuçları (istatistiksel olarak etkisi var "E", istatistiksel olarak etkisi yok "H")

*Table 6. Experiment Results (statistically significant "E", no statistical significant "H")*

FAKTÖRLER	PERFORMANS ÖLÇÜTLERİ								
	OHKO	OASM	OÜÜS O	OSO	OTKZ	OKİTA S	OÜTS	OTG	MxTG
<b>DENEY 1</b>									
PLS	E	E	E	E	E	E	E	E	E
CV	E	E	E	E	E	E	E	E	E
NK	H	E	H	E	H	H	E	H	H
PLS*CV	E	E	E	E	E	E	E	E	E
PLS*NK	H	E	H	E	H	H	E	H	H
CV*NK	H	E	H	H	H	H	H	H	H
PLS*CV*NK	H	E	H	E	H	H	E	H	H
<b>DENEY 2</b>									
DR	E	E	E	E	E	E	E	E	E
NK	H	E	E	E	H	H	E	H	E
DR*NK	H	E	E	E	H	H	E	H	E
<b>DENEY 3</b>									
AF	H	H	H	E	E	E	H	E	H
PLS	E	E	E	E	E	E	E	E	E
OCR	H	H	H	E	H	H	H	H	E
AF*PLS	H	E	H	E	E	H	H	E	E
AF*OCR	H	H	E	E	E	H	H	H	H
PLS*OCR	H	H	E	E	H	E	H	H	E
AF*PLS*OCR	H	H	E	E	E	H	H	E	H

Deney sonuçları incelendiğinde genel olarak üretim sipariş miktarının artması ile sistemin zorlandığı görülmektedir. Üretim sipariş miktarı arttıkça performansta düşüş görülmektedir. İşlem zamanındaki değişkenliğin artması yine sistemi zorlayan bir faktör olduğu görülmektedir. Kanban sayısının artması sistemin zorlayıcı faktörlerini rahatlatıcı görev almıştır. Sipariş toplama kurallarından CR kuralı ortalama üretilen ürün sayısı oranı ve ortalama servis oranı bakımından daha başarılı olurken ortalama talep gecikmesi ve maksimum gecikme bakımından EDD kuralının daha başarılı olduğu görülmektedir. İzin faktörü daraldıkça sistem zorlanmaktadır.

İleriki çalışmalarda yol göstermesi açısından bir takım öneriler verilebilir. Gerçekleştirilen çalışmada istasyon sayısı beş istasyon ile sınırlandırılmıştır. İstasyon sayısı faktörler içerisine dâhil edilerek istasyon sayısının değişiminin etkileri gözlemlenebilir. Sistem akış tipine sahip seri bir üretim sistemi için modellenmiştir. Sistem atölye tipinde incelenerek esnek üretim sisteminde faktörlerin etkileri değerlendirilebilir. Makine arızaları modellenen sistemde değerlendirilmemiştir. Büyük ve küçük makine arızalarının sisteme ne tür etkiler oluşturabileceği üzerinde çalışılabilir. Modellenen sistemde taşıma zamanları değerlendirilmemiştir. İleriki çalışmalarda taşıma süreleri dâhil edilebilir, taşıma ekipmanları tanımlanabilir veya taşıma ekipmanlarının arızalanma durumları da sisteme eklenebilir.

Çalışmada kanbanlar anlık olarak takip edilmektedir. Kanbanların belirli periyotlarda takip edildiği ve bu periyodun uzun ya da kısa olması sisteme ne tür etki edeceği araştırılabilir.

#### AÇIKLAMA (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Mümüne SERT'in "Tam Zamanında Üretim Felsefine Dayalı Seri Hattın Simülasyon Tekniğiyle Performans Analizi" başlıklı Konya Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yürüttüğü yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Azadeh, A., B. Bidokhti, S.M.R. Sakkaki, 2005. Design of practical optimum JIT systems by integration of computer simulation and analysis of variance, *Computers & Industrial Engineering*, 49: 504–519
- Baykoç, Ö. F., Serpil Erol, 1998. Simulation modelling and analysis of a JIT production system, *Int. J. Production Economics*, 55: 203-212
- Ezema, C. N., Eric C. Okafor, Christiana C. Okezie, 2017. Industrial design and simulation of a JIT material handling system, Ezema et al., *Cogent Engineering*, 4: 1292864
- Green Jr, K. W., R. Anthony Inman, Laura M. Birou, Dwayne Whitten 2014. Total JIT (T-JIT) and its impact on supply chain competency and organizational performance, *Int. J. Production Economics*, 147: 125–135
- Güneri, A.F., A. Kuzu, A. Taskin Gumus, 2008. Flexible kanbans to enhance volume flexibility in a JIT environment: a simulation based comparison via ANNs, *International Journal of Production Research* 47: 6807–6819
- Huang, P. Y., Rees, L. P. and Taylor, B. W., 1983. A simulation analysis of the Japanese JIT technique (with kanbans) for a multiline. Multistage Production System, *Decision Sciences*, 14: 326-343.
- Hum, S. H., Chee-Kwong Lee, 1998. JIT Scheduling Rules: a Simulation Evaluation, *Omega, Int. J. Mgmt Sci.*, Vol. 26, No. 3, pp. 381-395
- Husseini, S.M.M., O'Brien, C., and Hosseini, S.T., 2006. A method to enhance volume flexibility in JIT production control. *International Journal of Production Economics*, 104 (2), 653–665.
- Jeong, W. S., Soowon Chang, JeongWook Son, June-Seong Yi, 2016. BIM-Integrated Construction Operation Simulation for Just-In-Time Production Management, *Sustainability*, 8: 1106
- Kong, L., Heng Li, Hanbin Luo, Lieyun Ding, Xiaochun Luo, Martin Skitmore, 2017. Optimal single-machine batch scheduling for the manufacture, transportation and JIT assembly of precast construction with changeover costs within due dates, *Automation in Construction*, 81: 34–43
- Maiga, A. S., Fred A. Jacobs, 2009. JIT performance effects: A research note, *Advances in International Accounting*, 25: 183–189
- Pisuchpen, R. 2012. Integration of JIT flexible manufacturing, assembly and disassembly using a simulation approach, *Emerald Insight*, Vol. 32 Issue: 1, pp.51-61
- Sandanayake, Y.G., C.F. Oduoza, D.G. Proverbs, 2008. A systematic modelling and simulation pproach for JIT performance optimisation, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24: 735– 743
- Savsar, M., Abdullah Al-Jawinib, 1995. Simulation analysis of just-in-time production systems, *Int. J. Production Economics*, 42: 67-78
- Torkul, O., Esra Kurt, 2001. Tam Zamanında İmalat Ortamında Sıralama Kurallarının Karşılaştırılması İçin Bir Benzetim Modeli, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5.Cilt, 1.Sayı: 21-27
- Wang, Y. C., Toly Chen, Hsiangtsai Chiang, Hui-Chen Pan, 2016, A simulation analysis of part launching and order collection decisions for a flexible manufacturing system, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 69: 80–91
- Wielgama, P. S., & Mills, R. G. S., 1995. Use of simulation in the design of a JIT system, *International Journal of Operations and Production Management*, 15(9)

Yavuz, H., A. Satır, 1995. A kanban-based simulation study of a mixed model just-in-time manufacturing line, *International Journal of Production Research*, 33: 1027-1048

## LiBr-H<sub>2</sub>O AKIŞKAN ÇİFTİNİ KULLANAN BİR ABSORBSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMİ İÇİN TERMODİNAMİK VE EKSERJİ ANALİZİ

<sup>1</sup>Dilek Nur ÖZEN, <sup>2</sup>Kemal Çağrı YAĞCIOĞLU

<sup>1,2</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, KONYA  
<sup>1</sup>dnozen@konya.edu.tr, <sup>2</sup>kemalcagri@hotmail.com

(Geliş/Received: 30.07.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.08.2018)

**ÖZ:** Absorpsiyonlu soğutma sistemleri soğutma ve ısıtma amaçlı kullanılarak, çevre korumasının yanında enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Sistem diğer soğutma sistemlerine göre daha karmaşık ve soğutma etki katsayısı daha küçük olmasına rağmen atık enerjilerin ve yenilenebilir enerjilerin değerlendirilmesinde en uygun sistemlerdir. Sıkıştırma işlemi diğer sistemlerde kompresörle yapılmasına rağmen, absorpsiyonlu sistemlerde bu işlem absorber ve kaynatıcıdan oluşan bir sistemle gerçekleştirilir. Bu çalışmada, bir absorpsiyonlu soğutma sisteminin termodinamik ve ekserji analizi, LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için yapılmıştır. Analiz Matlab bilgisayar programında oluşturulan bir matematik model ile gerçekleştirilmiştir. Farklı kaynatıcı, buharlaştırıcı ve absorber çıkış sıcaklıklarında sistemin Performans Katsayısı (STK) ve Ekserji kaybı incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları artan kaynatıcı (T<sub>k</sub>) ve buharlaştırıcı sıcaklıklarının (T<sub>b</sub>) ekserji kaybını arttırdığını ve absorber çıkış sıcaklığının (T<sub>abs</sub>) artması ile ekserji kayıplarının azaldığını göstermiştir. Ayrıca kaynatıcının çalışma koşullarının çoğunda ekserji kaybının en yüksek oranı sergilediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Absorpsiyonlu Soğutma, Ekserji, Enerji, Entropi, LiBr/H<sub>2</sub>O,

### Thermodynamic and Exergy Analysis of an Absorption Cooling System for LiBr-H<sub>2</sub>O Fluid Couple

**ABSTRACT:** Absorption cooling systems are used for cooling and heating, saving energy as well as environmental protection. Although the system is more complex than the other cooling systems and the cooling efficiency coefficient is smaller, it is the most suitable system for evaluating waste and renewable energies. Although compression is done by compressor in other systems, in absorptive systems this process is done with a system consisting of absorber and generator. In this study, an energy and exergy analysis of an absorbent refrigeration system was made for the LiBr-H<sub>2</sub>O fluid couple. The analysis was carried out using a mathematical model developed in the Matlab program. The Performance Coefficient (STK) and Exergy loss of the system were investigated at different generator, evaporator and absorber temperatures. The results of the study showed that loss of exergy was reduced by decreasing T<sub>g</sub>, T<sub>e</sub> and increasing T<sub>abs</sub> temperatures, and the loss of exergy in most of the operating conditions of the generator exhibited the highest rate.

**Key Words:** Absorption refrigeration , Energy; Entropy; Exergy; LiBr/H<sub>2</sub>O;

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ve dünyadaki hızlı nüfus artışı ile birlikte enerji ihtiyacı gittikçe artmaktadır. Buna karşılık ülkemizde ve dünyada enerji sıkıntısı yaşanmaktadır. Klasik enerji türlerinin sürekli artan bu

enerji ihtiyacını karşılayamayacağı öngörülmektedir. Petrol ve mevcut enerjilerin fiyatları, enerji kaynaklarının sınırlı olması ve bu kaynakların gün geçtikçe azalmasından dolayı artmaktadır. Alternatif enerji kaynakları arayışı yenilenebilir enerji kaynaklarını ön plana çıkarmaktadır. Absorbsiyonlu soğutma sistemleri yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Absorbsiyonlu soğutma sistemleri için gereken büyük miktarda ısı enerjisine rağmen, döngüyü çalıştırmak için gereken mekanik enerji çok düşük olmaktadır. Bu nedenle, bu tür soğutma sistemlerinde ihtiyaç duyulan ısı enerjisini, jeotermal veya güneş enerjisi gibi ucuz enerji kaynaklarından sağlama sisteminin işletme maliyetlerini azaltmaktadır.

Son yıllarda, Absorbsiyonlu soğutma sistemlerinin iyileştirilmesi çalışmalarına olan ilgi ve yapılan bilimsel çalışmalar yoğun bir şekilde artmıştır.

Kaita, (2001), yüksek sıcaklıklarda buhar basıncını, LiBr çözeltilerinin entalpi ve entropisini hesaplayabilen denklemler geliştirmiştir. Geliştirilen denklemler, ağırlıkça% 40-65 ve ayrıca 40-210°C sıcaklıklarında kullanılmaktadır ve üçlü etkili LiBr-su soğutucuların modellenmesi ve tasarımı için faydalı olmuştur.

Ganesh ve Srinivas (2011), güç uygulama sistemleri için amonyak su karışımının termodinamik özelliklerini 100 bar'a kadar değerlendirmişlerdir. Kalina döngüsünü simüle etmede kullanılacak olan termodinamik özellikleri hesaplamak için yeni MatLab kodu geliştirmişlerdir. MatLab'da geliştirilen program, termodinamik özelliklerin hızlı bir şekilde hesaplanmasını sağlamıştır.

Patel ve diğ., (2012) tek aşamalı lityum bromür-su absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji analizini gerçekleştirmişlerdir. Kaynatıcı ve kondenser çıkış sıcaklığının artmasıyla kaynatıcı ve absorber üzerindeki ısı yükünün arttığını ve hem buharlaştırıcı hem de kaynatıcı çıkış sıcaklığının aynı anda arttığında azaldığını göstermişlerdir. Aynı zamanda, kondenser ve kaynatıcı çıkış sıcaklığı arttıkça STK'nın kademeli olarak azalmaya başladığını, ancak ekserji veriminin önce kondenser çıkış sıcaklığındaki artışla lineer olarak arttığını ve daha yüksek kondenser çıkış sıcaklığında düşmeye başladığını bulmuşlardır.

Touaibi ve diğ. (2013), 10 kW'lık bir soğutma kapasitesine sahip bir güneş enerjisi termal kollektör alanı tarafından sağlanan ısı ile tahrik edilen tek etkili LiBr-H<sub>2</sub>O absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Bazı bileşenlerin toplam ekserji kaybına katkısının çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca ekserji analizinin çalışma sıcaklıklarına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermişlerdir.

Farshi ve diğ., (2014) amonyak / tuz absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin ilk ve ikinci yasa analizini yapmışlardır. Çeşitli işletim parametrelerinin performans üzerindeki etkisini ve bu döngülerde kristalleşme olasılığını incelemişlerdir. Bu çalışma, düşük kaynatıcı sıcaklıkları için, amonyak / LiNO<sub>3</sub> döngülerinin daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Yüksek kaynatıcı sıcaklıkları için, amonyak / NaSCN döngüleri daha iyi performansa sahiptir, ancak bu karışım için izin verilen kaynatıcı sıcaklıkları aralığı oldukça sınırlıdır.

Garousi ve diğ. (2014), ısı kaynağı olarak güneş enerjisi kullanan LiBr-H<sub>2</sub>O absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Bu çalışmada absorberin ayrıntılı ekserji analizi, ekserji yıkımının gerçek nedenlerini ortaya koymuştur.

Urueta ve diğ. (2014), ısıtma ve soğutma için adyabatik absorberli LiBr-H<sub>2</sub>O absorpsiyonlu sistemlerinin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmiştir. En çok göze çarpan etki, absorber ve kaynatıcı için ekserji verimliliği durumunda gözlemlenmiştir. Bu parametre, absorber çıkış sıcaklığının artmasıyla artmıştır. Kaynatıcı sıcaklığı arttığında karşıt etki gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar adyabatik absorpsiyonlu sistemin ekserji etkinliğini etkileyebilecek parametrelerin tanımlanmasını sağlamıştır.

Bouaziz ve Lounissi, (2015) güneş enerjisi için yeni bir çift etkili hibrit absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji araştırmasını sunmuşlardır. Çalışmanın sonuçları, yeni konfigürasyonun performansının, iki aşamalı geleneksel konfigürasyonun performansından daha iyi olduğunu ortaya koymuştur.

Azhar ve Siddiqui, (2016), maksimum STK değerini ve ekserji verimliliğini elde etmek için çift etkili bir LiBr-H<sub>2</sub>O absorpsiyonlu soğutma sisteminin enerji ve ekserji analizlerini gerçekleştirerek optimum

çalışma sıcaklıklarını bulmuşlardır. Sonuçlar, artan evaporatör sıcaklığı ile ekserji verimi azalırken STK değerinin arttığını göstermiştir.

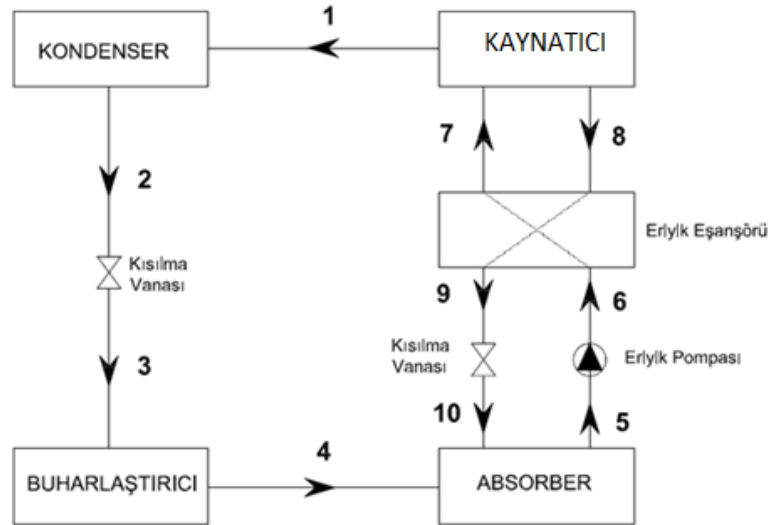
Anusha ve Chaitanya (2017) absorpsiyonlu soğurma soğutma sistemlerinin performans analizini değerlendirmişlerdir. Onlar, NH<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> / LiNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> / NaSCN absorpsiyon çiftlerinin termodinamik analizini gerçekleştirmişlerdir ve Amonyak / NaSCN ve amonyak / LiNO<sub>3</sub>'ün, amonyak / H<sub>2</sub>O çiftinden daha iyi performans verdiğini göstermişlerdir.

Urueta ve diğ. (2017), adyabatik absorberli yeni bir tek etkili LiBr-H<sub>2</sub>O absorpsiyonlu sistemini tasarlamış ve performans analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışma performansının sistem performansı üzerindeki etkisini; soğutma kapasitesi, STK değeri, çözelti alt soğutması ve ekserji verimliliği açısından araştırılmışlardır. Onlar dolaşım oranının adyabatik absorpsiyon sisteminin performansını etkileyen temel bir parametre olduğunu ve adyabatik absorberlerin kullanımının, absorpsiyonlu sistemlerinin performansını artırabildiğini göstermişlerdir.

Literatür ekserji analizinde çalışma sıcaklıklarının ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışmada LiBr-H<sub>2</sub>O çözelti çiftini kullanan tek aşamalı bir absorpsiyonlu soğutma sisteminin farklı çalışma sıcaklıkları için birinci ve ikinci kanun analizi yapılmıştır.

### SİSTEM TANIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Şekil 1'de LiBr-H<sub>2</sub>O çözelti çifti için termodinamik ve ekserji analizinin gerçekleştirildiği absorpsiyonlu soğutma sisteminin şematik bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin şematik görünümü

Figure 1. Schematic view of the absorption cooling system

Sistem analizi için hazırlanan matematik modelde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- 1- Yoğuşturucudaki ve kaynaticıdaki basınç, soğutucu akışkanın yoğuşturucu sıcaklığında sahip olduğu doyma basıncıdır.
- 2- Absorberdeki ve buharlaştırıcıdaki basınç, soğutucu akışkanın buharlaştırıcı sıcaklığında sahip olduğu doyma basıncıdır.
- 3- Soğutucu buharının, kaynaticıdan ayrılırken sahip olduğu basınç ve sıcaklığı, kaynaticının basınç ve sıcaklığıdır.
- 4- Soğutucu akışkanın fazı yoğuşturucudan ayrılırken, doymuş sıvıdır ( $X=0$ ).
- 5- Soğutucu akışkanın fazı buharlaştırıcıdan ayrılırken, doymuş buhardır ( $X=1$ ).
- 6- Çözelti absorberden ayrılırken absorber çıkış sıcaklık ve basıncında denge halindedir.

7- Çözeltinin absorberden çıkış sıcaklığı, soğutucu akışkanın yoğuşturucudan çıkış sıcaklığına eşittir. ( $T_3=T_2$ )

8- Pompa gücü çok küçük olduğu için dikkate alınmamıştır.

### SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ (THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE SYSTEM)

LiBr-H<sub>2</sub>O çözeltisini kullanan bir Absorbsiyonlu soğutma sisteminde soğutucu akışkan H<sub>2</sub>O'dur. LiBr-H<sub>2</sub>O çözeltisini kullanan sistemde konsantrasyon, LiBr miktarına göre belirlenmektedir. Bu sebeple LiBr-H<sub>2</sub>O çözeltisini kullanan sistemde zengin eriyik kavramı, soğutucu akışkanın buharlaştığı kaynatıcı çıkışında tanımlanmaktadır. Sistem ile ilgili temel denklemler aşağıda verilmiştir.

Eşanjör etkinliği denklem (1) ile verilmiştir ve bu çalışmada % 65 olarak alınmıştır.

$$\varepsilon = \frac{T_8 - T_9}{T_8 - T_6} \quad (1)$$

LiBr-H<sub>2</sub>O çözeltisini kullanan sistem için dolaşım oranı aşağıdaki denklem ile bulunmuştur.

$$f = \frac{x_7}{(x_8 - x_7)} \quad (2)$$

Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir. Sistemin her bir elemanı için enerji denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_c \dot{h}_c - \dot{m}_g \dot{h}_g \quad (3)$$

Isı etkileşimi sonucu taşınan ekserji  $\dot{E}_q$ , iş etkileşimi  $\dot{E}_w$  sonucu taşınan ekserji ve kütle akışına bağlı olarak giren  $\dot{E}_g$  ve çıkan  $\dot{E}_c$  ekserjiler aşağıda tanımlandığı gibidir.

$$\dot{E}_q = \sum (1 - \frac{T_0}{T}) \dot{Q} \quad (4)$$

$$\dot{E}_w = \sum \dot{W} \quad (5)$$

$$\dot{E} = \sum (\dot{m} \Psi)$$

(6)

Bu çalışmada akışkan çiftinin kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik olmadığı için kimyasal ekserji dikkate alınmamıştır.

Fiziksel ekserji denklem (7) ile verilmiştir.

$$\Psi = \Psi^{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (7)$$

Denklem (7)'de akışkanın ölü hal basınç ve sıcaklığındaki entalpi ve entropi miktarlarını sırasıyla  $h_0$  ve  $s_0$  değerleri belirtmektedir. Bu çalışmada ölü hal 101.325 kPa ve 25 °C değerleri kabul edilmiştir.

Tersinmezlik değeri sürekli akışlı açık bir sistem için aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$I = \sum (\dot{m}_g \Psi_g) - \sum (\dot{m}_c \Psi_c) + \sum \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_0}{T_K} \right) - \sum \dot{W} \quad (8)$$

Sistemin STK değeri denklem (9) ile verilmiştir.

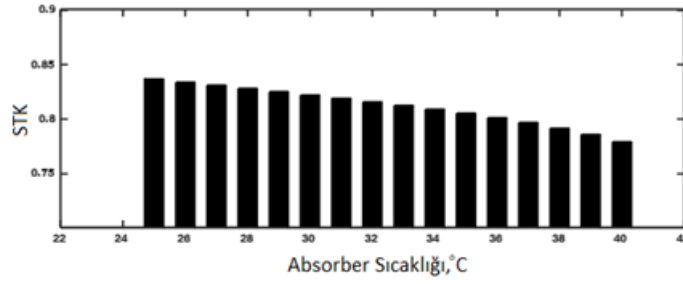
$$STK = \frac{Q_b}{Q_k} \quad (9)$$

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 1'de şematik gösterimi yapılan absorbsiyonlu soğutma sisteminde, LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için termodinamik ve ekserji analizi yapılmıştır. Analiz için Matlab bilgisayar programında bir matematik model oluşturulmuş ve farklı kaynatıcı, buharlaştırıcı ve absorber çıkış sıcaklıklarında sistemin STK değeri ve ekserji kayıpları (%) incelenmiştir.

Şekil 2 - Şekil 10, sistemin STK değerinin ve her bir bileşenin ekserji kaybının kaynatıcı, absorber ve buharlaştırıcı sıcaklıkları ile değişimini göstermektedir. Çözelti tarafındaki genleşme valfinin ekserji kaybı incelenmiş, soğutucu akışkan tarafındaki genleşme valfinin ekserji kaybı çok küçük değerlerde olduğu için dikkate alınmamıştır.

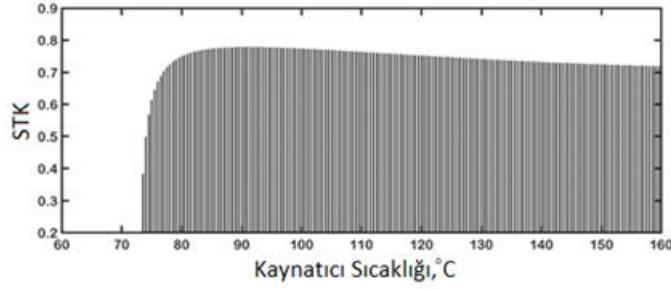




Şekil 2. STK değerinin absorber çıkış sıcaklığına ( $T_{abs}$ ) göre değişimi ( $T_b=10^\circ\text{C}$ ,  $T_k=80^\circ\text{C}$ )

Figure 2. Effect of absorber outlet temperature on COP

Şekil 2’de absorber çıkış sıcaklığı değişiminin, STK değerine etkisi görülmektedir. Absorber çıkış sıcaklığının artması, fakir ve zengin eriyik konsantrasyonu arasındaki farkı azaltarak akış oranının artmasına sebep olmaktadır. Buharlaştırıcı sıcaklığı ve absorber basıncı sabit tutulduğu için absorber çıkış sıcaklığı arttıkça akış oranı artmaktadır. Akış oranının artması kaynatıcı kapasitesini artırarak sistemin soğutma performans değerini düşürmektedir.

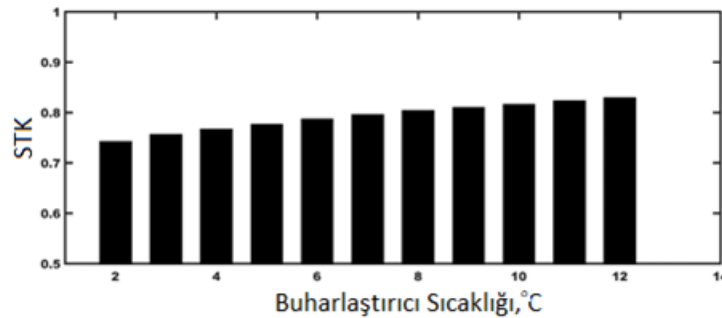


Şekil 3. STK değerinin kaynatıcı sıcaklığına ( $T_k$ ) göre değişimi ( $T_b=10^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs}=T_y=40^\circ\text{C}$ )

Figure 3. Effect of generator temperature on COP

Şekil 3’de kaynatıcı sıcaklığının, absorbsiyonlu soğutma sisteminin STK değerine olan etkisi görülmektedir. Grafik çizimi için  $T_b = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs} = T_y = 40^\circ\text{C}$  olarak alınmıştır. Kaynatıcı sıcaklığının artması ile STK değeri önce artmakta ve belli bir değerden sonra düşüşe geçmektedir.

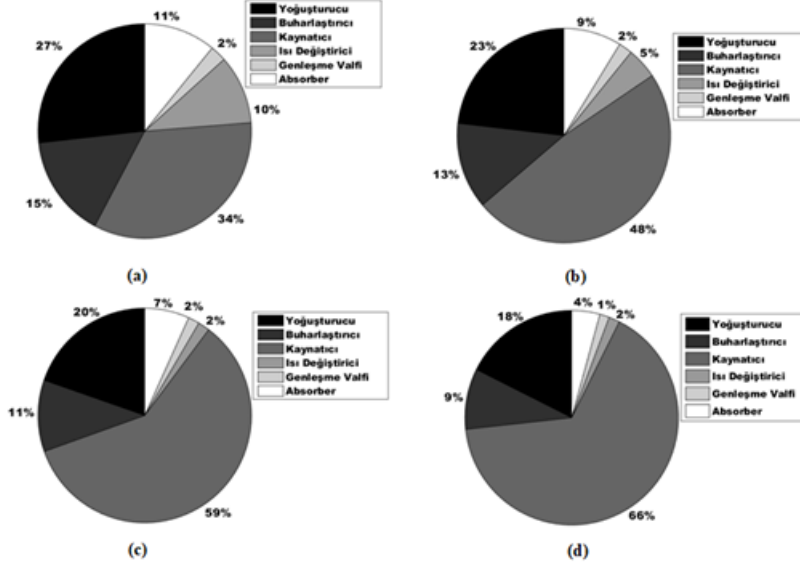
Jeneratör sıcaklığının artması dolaşım oranını düşürmektedir ve bu durum jeneratör kapasitesinin azalmasına neden olmakta ve böylece STK değeri artmaktadır. Yaklaşık olarak 80-85 °C jeneratör sıcaklığı aralığından daha yüksek sıcaklık değerlerinde akışkan çiftinin STK değeri düşmeye başlamaktadır. Buharlaştırıcı sıcaklığı sabit tutulurken jeneratör sıcaklığının artması, ve daha yüksek sıcaklıklarda dolaşım oranındaki azalma oranının düşmesi STK değerinin düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 4. STK değerinin buharlaştırıcı sıcaklığına ( $T_b$ ) göre değişimi ( $T_k=80^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs}=T_y=40^\circ\text{C}$ )

Figure 4. Effect of evaporator temperature on COP

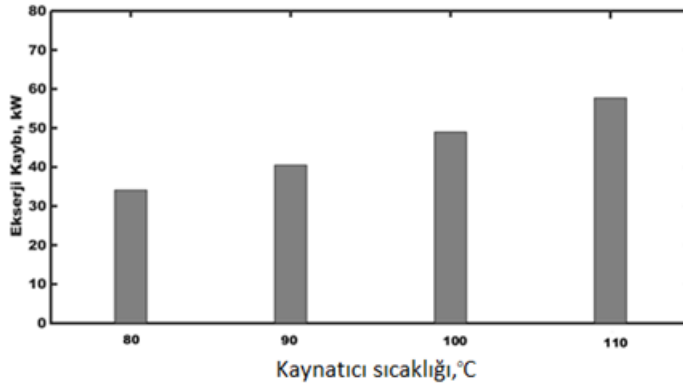
Şekil 4'de STK değerinin buharlaştırıcı sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Buharlaştırıcı sıcaklığının artmasıyla absorpsiyonlu soğutma sisteminin STK değerinin arttığı görülmektedir. Buharlaştırıcı sıcaklıklarındaki artış, zengin ve fakir eriyik konsantrasyonları arasındaki farkı artırmakta ve dolayısıyla dolaşım oranını azaltmaktadır. Dolaşım oranı değerinin azalmasıyla kaynatıcı kapasitesi azalmakta bu nedenle STK artmaktadır. Ayrıca kaynatıcı sıcaklığı ve yoğuşturucu basıncı sabit tutulduğu için buharlaştırıcı sıcaklığı artarken STK değeri de artmaktadır.



Şekil 5. LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için (a)  $T_k = 80^\circ\text{C}$  (b)  $T_k = 90^\circ\text{C}$  (c)  $T_k = 100^\circ\text{C}$  (d)  $T_k = 110^\circ\text{C}$  kaynatıcı sıcaklıklarında sistem elemanlarının ekserji kayıpları ( $T_b = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs} = T_y = 40^\circ\text{C}$ )

Figure 5. Variation of exergy loss of each component with generator temperature (a)  $T_g = 80^\circ\text{C}$  (b)  $T_g = 90^\circ\text{C}$  (c)  $T_g = 100^\circ\text{C}$  (d)  $T_g = 110^\circ\text{C}$  for LiBr-H<sub>2</sub>O fluid pair ( $T_e = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs} = T_c = 40^\circ\text{C}$ )

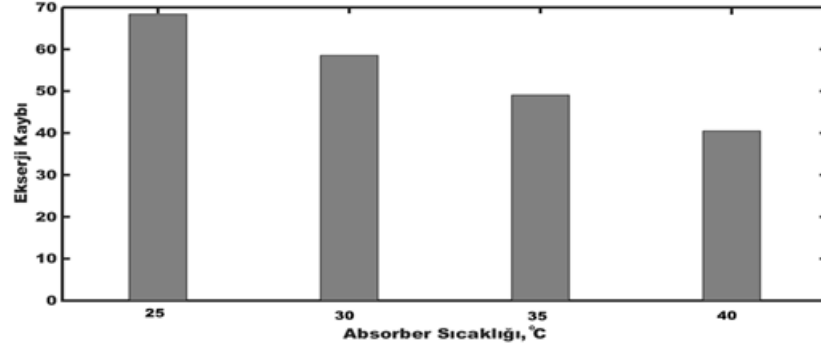
LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti kullanan tek etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi için ekserji kaybının sistemdeki her bir elemanda kaynatıcı sıcaklığına göre değişimini gösteren grafik Şekil 5'de sunulmuştur. Kaynatıcı sıcaklığındaki artış genleşme valfinin ekserji kaybını diğer elemanlara nazaran ihmal edilebilecek bir ölçüde yüzdeler (%) olarak azaltmaktadır. Artan kaynatıcı sıcaklığı ile birlikte çözelti ısı değiştiricisinde ekserji kaybı azalmakta ve  $T_k = 80^\circ\text{C}$  sıcaklıklarında ekserji kaybı en yüksek değerinde olmaktadır. Artan kaynatıcı sıcaklıklarında buharlaştırıcı ve yoğuşturucu üzerindeki ekserji kayıpları ise azalmaktadır.



Şekil 6. LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için kaynatıcı sıcaklığının toplam ekserji kaybına etkisi ( $T_b = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs} = T_y = 40^\circ\text{C}$ )

Figure 6. Variation of total exergy loss of system with generator temperature for LiBr-H<sub>2</sub>O fluid pair ( $T_e = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs} = T_c = 40^\circ\text{C}$ )

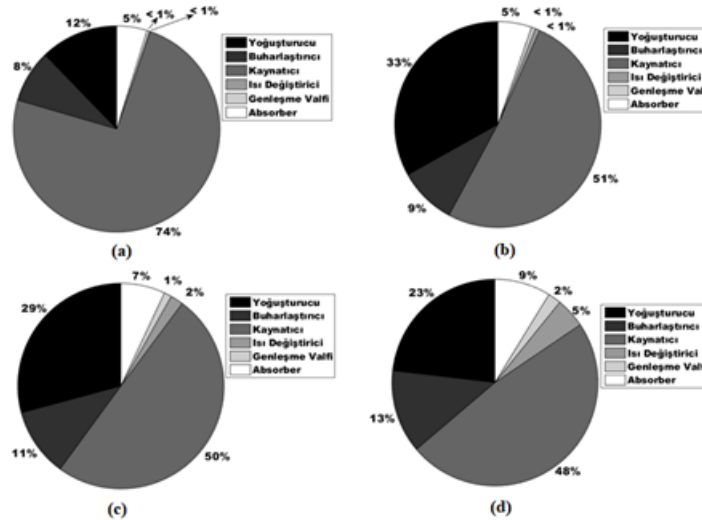
Şekil 5 ve Şekil 6 beraber incelendiğinde soğutma sisteminde en yüksek ekserji kaybının yaşandığı elemanın 110 °C sıcaklığa sahip olan kaynatıcı olduğu görülmektedir. 110°C kaynatıcı sıcaklığında sistemin toplam ekserji kaybı 60 kW değerindedir.



Şekil 7. LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için absorber çıkış sıcaklığının toplam ekserji kaybına etkisi ( $T_b=10^\circ\text{C}$ ,  $T_k=80^\circ\text{C}$ )

Figure 7. Variation of total exergy loss of system with absorber outlet temperature for LiBr-H<sub>2</sub>O fluid pair ( $T_b=10^\circ\text{C}$ ,  $T_g=80^\circ\text{C}$ )

Şekil 7’de absorber çıkış sıcaklığının değişiminin, ekserji kaybına etkisi görülmektedir. Absorber çıkış sıcaklığının artması ile birlikte LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti kullanan sistemin toplam ekserji kaybı azalmaktadır. Sistemin en yüksek ekserji kaybı 25°C absorber çıkış sıcaklığında yaklaşık 70 kW civarındadır ve en yüksek ekserji kaybının yaşandığı eleman Şekil 8’de de görüldüğü üzere kaynatıcıdır.



Şekil 8. LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için (a)  $T_{abs}=25^\circ\text{C}$  (b)  $T_{abs}=30^\circ\text{C}$  (c)  $T_{abs}=35^\circ\text{C}$  (d)  $T_{abs}=40^\circ\text{C}$  absorber çıkış sıcaklıklarında sistem elemanlarının ekserji kayıpları ( $T_b=10^\circ\text{C}$ ,  $T_k=80^\circ\text{C}$ )

Figure 8. Variation of exergy loss of each component with absorber outlet temperature (a)  $T_{abs}=25^\circ\text{C}$  (b)  $T_{abs}=30^\circ\text{C}$  (c)  $T_{abs}=35^\circ\text{C}$  (d)  $T_{abs}=40^\circ\text{C}$  for LiBr-H<sub>2</sub>O fluid pair ( $T_b=10^\circ\text{C}$ ,  $T_g=80^\circ\text{C}$ )

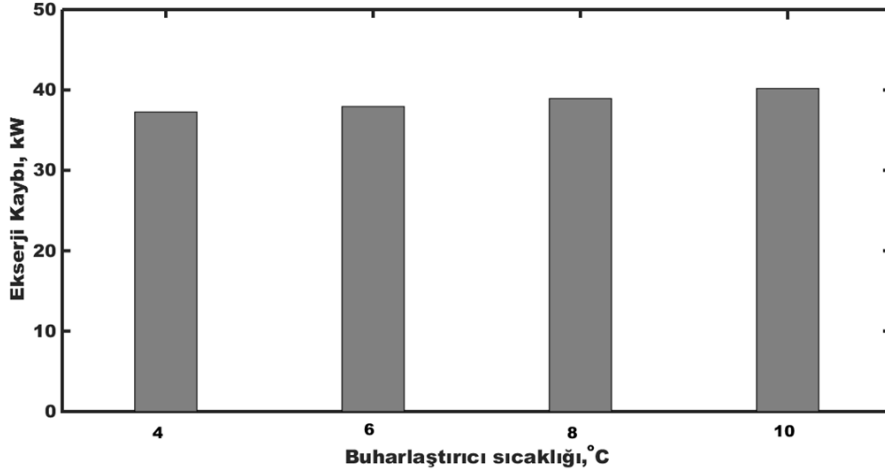
Artan absorber çıkış sıcaklığı ile birlikte kaynatıcıdaki ekserji kayıpları azalmaktadır. 30°C absorber çıkış sıcaklığında yoğuşturucu elemanındaki ekserji kaybı ise Şekil 8’de belirtilen diğer absorber çıkış sıcaklıklarındaki yoğuşturucular ile kıyaslandığında en yüksektir ve bu sıcaklıktan sonra absorber çıkış sıcaklığı arttıkça yüzdelik olarak diğer elemanlara göre azalmaktadır.

Yüksek absorber çıkış sıcaklıklarında buharlaştırıcıdaki ekserji kayıplarının arttığı görülmektedir.  $T_{abs}=25^\circ\text{C}$  absorber çıkış sıcaklığında buharlaştırıcıda ekserji kayıpları en az değerini almaktadır.

LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti kullanan tek etkili absorbsiyonlu soğutma sistemindeki ekipmanlar ayrı olarak değerlendirildiğinde sistem elemanlarından absorber, genleşme valfi, ısı değiştiricisi ve buharlaştırıcıda artan absorber çıkış sıcaklığı birlikte yüzdelik olarak ekserji kayıplarının arttığı,

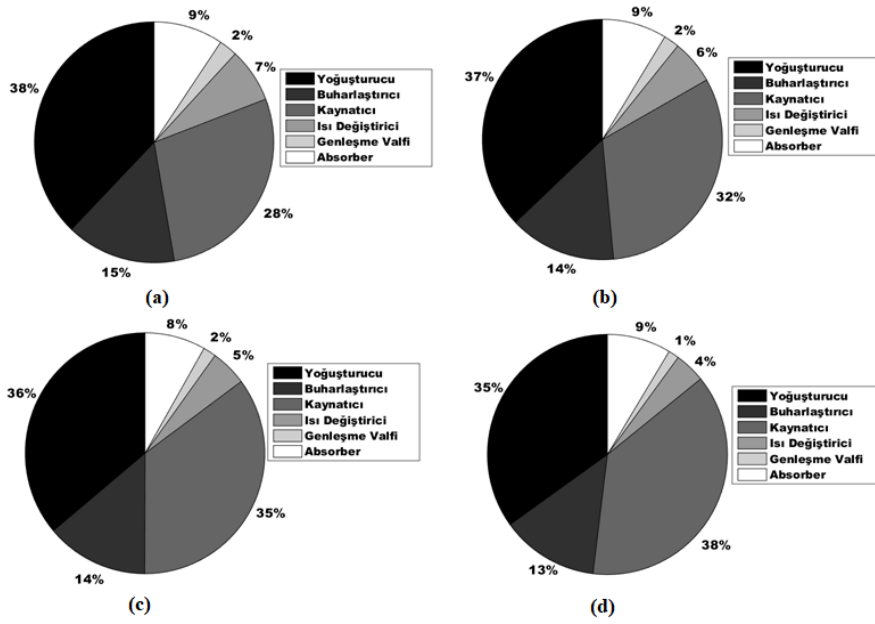
yoğuşturucu ve kaynatıcıda ise artan absorber çıkış sıcaklığı ile birlikte ekserji kayıplarının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti kullanan absorpsiyonlu soğutma sistemi için buharlaştırıcı sıcaklığına göre ekserji kaybının değişiminin gösterildiği Şekil 9 ve Şekil 10 birlikte incelendiğinde en yüksek ekserji kaybının yaşandığı elemanın 10°C buharlaştırıcı sıcaklığındaki kaynatıcı olduğu ve buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça ekserji kaybının arttığı görülmüştür. Sistemin 10°C buharlaştırıcı sıcaklığındaki ekserji kaybı yaklaşık 40 kW'tır.



Şekil 9. LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için buharlaştırıcı sıcaklığının toplam ekserji kaybına etkisi ( $T_k=80^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{abs}}=T_y=40^\circ\text{C}$ )

Figure 9. Variation of total exergy loss of system with evaporator temperature for LiBr-H<sub>2</sub>O fluid pair ( $T_g=80^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{abs}}=T_c=40^\circ\text{C}$ )



Şekil 10. LiBr-H<sub>2</sub>O akışkan çifti için (a)  $T_b=4^\circ\text{C}$  (b)  $T_b=6^\circ\text{C}$  (c)  $T_b=8^\circ\text{C}$  (d)  $T_b=10^\circ\text{C}$  buharlaştırıcı sıcaklıklarında sistem elemanlarının ekserji kayıpları ( $T_k=80^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{abs}}=T_y=40^\circ\text{C}$ )

**Figure 10.** Variation of exergy loss of each component with evaporator temperature (a)  $T_e=4\text{ }^\circ\text{C}$  (b)  $T_e=6\text{ }^\circ\text{C}$  (c)  $T_e=8\text{ }^\circ\text{C}$  (d)  $T_e=10\text{ }^\circ\text{C}$  for LiBr-H2O fluid pair ( $T_g=80\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{abs}=T_c=40\text{ }^\circ\text{C}$ )

Buharlaştırıcı sıcaklığının artması ile birlikte çözelti ısı değiştiricisi ve genişleme valfi ekipmanlarında ekserji kaybının yüzdelik olarak azaldığı görülmüştür.  $T_b=10\text{ }^\circ\text{C}$  buharlaştırıcı sıcaklıklarındaki buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı da ekserji kayıplarının yüzdelik olarak en az olduğu ve bu sıcaklıklardan daha düşük buharlaştırıcı sıcaklıklarında ise ekserji kayıplarının yüzdelik olarak arttığı sonucuna varılmıştır.

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, LiBr-H2O çözelti çifti kullanılarak absorpsiyonlu bir soğutma sisteminin STK değerlerinin değişimi, farklı  $T_b$ ,  $T_{abs} = T_y$  ve  $T_k$  sıcaklıkları için araştırılmış ve her bir bileşendeki ekserji kayıpları analiz edilmiştir. Sonuçlar, artan kaynatıcı sıcaklık ( $T_k$ ) değerleri ile STK değerlerinin önce arttığını ve sonra giderek azaldığını göstermiştir. Ayrıca, STK değerleri artan buharlaştırıcı sıcaklıkları ( $T_b$ ) ve azalan absorber çıkış sıcaklıkları ( $T_{abs} = T_y$ ) ile artmaktadır. Ekserji kayıpları ise artan  $T_k$ ,  $T_b$  ve azalan  $T_{abs} = T_y$  sıcaklıkları ile artmaktadır. Kaynatıcı, çalışma koşullarının çoğunda en yüksek göreceli ekserji kaybını göstermektedir. Bu nedenle, genel sistem performansını etkin bir şekilde geliştirmek için bu bileşen dikkatle düşünülmelidir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma ikinci yazarın yüksek lisans tezinin bir bölümünden oluşmaktadır (Yağcıoğlu, 2018).

## EK: LiBr-H2O ÇÖZELTİ ÇİFTİ İÇİN DENKLEMLER (APPENDIX : EQUATIONS FOR LiBr-H2O SOLUTION PAIR)

$$\log P = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2} \quad (\text{Uemura \& Hasaba, 1964})$$

$$A = 3.1934 + 1.329E - 1X - 1.4278E - 3X^2$$

$$B = 1.0575E3 - 9.4632E1 X + 9.816E - 1X^2$$

$$C = -6.01350E5 + 1.9734E4 X - 2.3701E2 X^2$$

$$h = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^2 A_{ij} X^i T^j \quad (\text{Patterson \& Perez-Branco, 1988})$$

$i$	$A_{i0}$	$A_{i1}$	$A_{i2}$
0	1.134125E0	4.124891E0	5.743693E-4
1	-4.80045E-1	-7.643903E-2	5.870921E-5
2	-2.161438E-3	2.589577E-3	-7.375319E-6
3	2.336235E-4	-9.500522E-5	3.277592E-7
4	-1.188679E-5	1.708026E-6	-6.062304E-9
5	2.291532E-7	-1.102363E-8	3.901897E-11

$$s = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 B_{ij} X^i T^j \quad (\text{Kaita, 2001})$$

$i$	$B_{i0}$	$B_{i1}$	$B_{i2}$	$B_{i3}$
0	5.127558E-01	-1.393954E-02	2.924145E-05	9.035697E-07
1	1.226780E-02	-9.156820E-05	1.820453E-08	-7.991806E-10
2	-1.364895E-05	1.068904E	-1.381109E-09	1.529784E-11
3	1.021501E-08	0	0	0

## Simgeler (Nomenclature)

STK	- soğutma tesir katsayısı
E	- ekserji, [kW]
f	- dolaşım oranı
h	- özgül entalpi, [kJ kg <sup>-1</sup> ]
m	- kütleli debi, [kg s <sup>-1</sup> ]
I	- ekserji yıkımı, [kW]
s	- özgül entropi, [kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
P	- basınç, [kPa]
T	- sıcaklık, [°C]
Q	- ısı, [kW]
X	- kütle konsantrasyonu
W	- iş, [kW]

#### Yunan Simgeleri (Greek symbols)

ε	- ısı değiştiricisi etkinliği
η	- verim
ψ	- özgül ekserji, [kJ kg <sup>-1</sup> ]

#### Altsimge (Subscript)

abs	- absorber
y	- yoğuşturucu
b	- buharlaştırıcı
k	- kaynatıcı
K	- kaynak
p	- pompa
II	- ikinci yasa
o	- ölü hal

#### Üstsimge (Superscript)

ph	- fiziksel
----	------------

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abdulateef, J. M., Sopian, K., Alghoul, M. A., Sulaiman, M. Y., Zaharim, A., & Ahmad, I., 2007, "Solar absorption refrigeration system using new working fluid pairs", *International Journal of Energy*, Vol. 1, No. 3, pp. 82-87
- Alamdari, G. S., 2007, "Simple functions for predicting the thermodynamic properties of ammonia-water mixture", *International Journal of Engineering-Materials And Energy Research Center*, Vol.20, No. 1, pp. 95-104.
- Anusha, B., Chaitanya, B., 2017, "Performance Analysis of Absorption Refrigeration Cycles", *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, Vol. 4, No. 1.
- Azhar, M., Siddiqui, M. A., "Energy and Exergy Analyses for Optimization of the Operating Temperatures in Double Effect Absorption Cycle", *Energy Procedia* Vol. 109, pp. 211-218.
- Bhaumik, M., Mudgal, A., Bhavesh, P., 2017, "Energy and exergy investigation of small capacity single effect lithium bromide absorption refrigeration system", *Energy Procedia*, Vol. 109, pp. 203-210.
- Bouaziz, N., Lounissi, D., 2015, "Energy and exergy investigation of a novel double effect hybrid absorption refrigeration system for solar cooling", *International journal of hydrogen energy*, Vol. 40, No. 39, pp. 13849-13856.

- Bourseau, P., Bugarel, R., 1986, "Absorption-Diffusion Machines: Comparison of the Performances of NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub>-NaSCN", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 9, pp. 206-214.
- Dehua, C., Guogeng, H., Qigi, T., Weier, T., 2014, "Exergy analysis of a novel air-cooled non-adiabatic absorption refrigeration cycle with NH<sub>3</sub>-NaSCN and NH<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub> refrigerant solutions", *Energy Conversion and Management*, pp. 66-78.
- Farshi, L. G., Ferreira, C. I., Mahmoudi, S. S., Rosen, M. A., 2014, "First and second law analysis of ammonia/salt absorption refrigeration systems", *International journal of refrigeration*, Vol. 40, pp. 111-121.
- Ferreira, I., 1984, "Thermodynamic and Physical Property Data Equations for Ammonia-Lithium Nitrate and Ammonia-Sodium Thiocyanate Solutions", *Solar Energy*, Vol. 32, No. 2, pp. 231-236.
- Florides, G., Kalogirou, S., 2003, "Design and Construction of a LiBr-Water Absorption Machine", *Energy Conversion And Management*, Vol. 44, pp. 2483-2508.
- Ganesh, N. S., Srinivas, T., 2011, "Evaluation of thermodynamic properties of ammonia-water mixture up to 100 bar for power application systems", *Journal of mechanical engineering research*, Vol. 3, No. 1, pp. 25-39.
- Garousi, F. L., Infante, F. C., Mahmoudi, S., Rosen, M., 2014, "First and second law analysis of ammonia salt absorption refrigeration systems", *International Journal Of Refrigeration*, Vol. 40, pp. 111-121.
- Lavinia, G., Dobrovicescu, A., Untea, A., 2014, "Energy and exergy analyses of a solar-driven absorption cooling system", *International Journal of Exergy*, Vol. 15, No. 3, pp. 308-327.
- Kaita, Y., 2001, "Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures", *International Journal of refrigeration*, Vol. 24, No. 5, pp. 374-390.
- Kaushik, S., Arora, A., 2009, "Energy and Exergy analysis of single effect and series flow double effect water lithium bromide absorption refrigeration systems", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, pp. 1247-1258.
- Linghui, Z., Junjie, G., 2010, "Second law based thermodynamic analysis of ammonia sodium thiocyanate absorption system", *Renewable Energy*, pp. 1940-1946.
- Patek, J. P., Klomfor, J., 1995, "Simple Functions for Fast Calculations of Selected Thermodynamic Properties of the Ammonia-Water System", *Int.J.Refring*, Vol.4, No. 18, pp. 228-234.
- Patel, H. A., Patel, L. N., Jani, D., Christian, A., 2016, "Energetic Analysis of Single Stage Lithium Bromide Water Absorption Refrigeration System", *Procedia Technology*, Vol. 23, pp. 488-495.
- Urueta, G. G., Huicochea, A., Aumente, P. R., Rivera, W., 2014, "Energy and exergy analysis of water-LiBr absorption systems with adiabatic absorbers for heating and cooling", *Energy Procedia*, Vol. 57, pp. 2676-2685.
- Urueta, G. G., Huicochea, A., Rivera, W., Aumente, P. R., & Oviedo-Tolentino, F., 2017, "Experimental energy and exergy analysis of a novel water-LiBr absorption system", *International Journal of Exergy*, Vol. 23, No. 1, 31-46.
- Touaibi, R., Feidt, M., Vasilescu, E. E., Abbes, M. T., 2013, "Parametric study and exergy analysis of solar water-lithium bromide absorption cooling system", *International Journal of Exergy*, Vol. 13, No. 3, pp. 409-429.
- Yağcıoğlu, K. Ç., 2018, *Absorbsiyonlu Bir Soğutma Sisteminde Farklı Soğutucu Akışkanlar için Termodinamik ve Ekserji Analizi*, Master Thesis, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.



## EFFECT OF AGING TIME ON PHASE TRANSFORMATION, MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF Co-Cr-Mo ALLOYS

<sup>1</sup>Mehmet YILDIRIM, <sup>2</sup>Ali KELEŞ

<sup>1,2</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Metallurgical and  
Materials Engineering, KONYA, TURKEY

<sup>1</sup>[ymehmet@selcuk.edu.tr](mailto:ymehmet@selcuk.edu.tr), <sup>2</sup>[ali.keles1@outlook.com](mailto:ali.keles1@outlook.com)

(Geliş/Received: 08.08.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.09.2018)

**ABSTRACT:** The effect of heat-treatment on phase relationships, microstructures and hardness of Co-Cr-Mo alloys were investigated in detail. The samples were produced by investment casting technique and subsequently solutionized (1240 °C for 4 h) and aged (720 °C for 2, 4, 8 and 16 h). Phase analysis of the samples were performed via X-ray diffraction analysis, microstructural examination were done by light optical and scanning electron microscopy. The microstructures of as-cast and short-time (2 and 4 h) aged samples were composed of FCC  $\gamma$ -Co matrix phase and fine  $M_{23}C_6$  (where M= Co, Cr and Mo) precipitates. Increasing the aging time to 8 and 16 h led to partial transformation of FCC  $\gamma$ -Co matrix phase into HCP  $\epsilon$ -Co phase. The volume fraction of  $\epsilon$ -Co phase increased with increasing aging time. Moreover, hardness of the Co-Cr-Mo samples were significantly enhanced with formation of  $\epsilon$ -Co phase.

**Key Words:** Co-Cr-Mo alloys, Hardness, Microstructure

### Yaşlandırma Süresinin Co-Cr-Mo Alaşımlarının Faz Dönüşümleri, Mikroyapıları ve Sertliğine Etkisi

**ÖZ:** Bu çalışmada, ısıt işlemin Co-Cr-Mo alaşımlarının faz ilişkileri, mikroyapıları ve sertliklerine etkisi detaylı biçimde incelenmiştir. Alaşım hassas döküm yöntemiyle üretilmiş, takiben çözeltiye alma (1240 °C'de 4 saat) ve yaşlandırma (720 °C'de 2, 4, 8 ve 16 saat) ısıt işlemleri uygulanmıştır. Numunelerin faz analizleri X-ışınları kırınım yöntemiyle, mikroyapıları ise optik ve taramalı elektron mikroskopisi yöntemleriyle incelenmiştir. Dökülmüş haldeki ve kısa süre (2 ve 4 saat) yaşlandırılmış numunelerin mikroyapıları YMK kristal yapısına sahip  $\gamma$ -Co matris fazı ve  $M_{23}C_6$  (M= Co, Cr ve Mo) tipi ince karbür çökeltilerinden meydana gelmektedir. Artan yaşlandırma süresi ile birlikte  $\gamma$ -Co matris fazı kısmen  $\epsilon$ -Co fazına dönüşmüştür.  $\epsilon$ -Co fazının miktarı artan yaşlandırma süresi ile artmıştır. Ayrıca,  $\epsilon$ -Co fazının oluşumu alaşımın sertliğini önemli ölçüde arttırmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Co-Cr-Mo alaşımları, Mikroyapı, Sertlik

## INTRODUCTION

For almost 80 years Co-Cr-Mo alloys have been used as dental and orthopedic implant materials due to their good corrosion and wear resistance, high strength and toughness, elevated fatigue resistance and excellent biocompatibility (Giacchi et al., 2011; Mendes et al., 2017; Zhuang and Wagner, 1989; Bates and Knapton, 1977). Co-Cr-Mo alloys, also known as ASTM F75 (Standard for Co-28Cr-6Mo Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants), is composed of 58-69 wt.% Co, 26-30 wt.% Cr, 5-7 wt.% Mo and various elements (ASTM F75 Standard; Davis, 2003; Disegi et al., 1999). In this alloy system, Co is responsible for the modulus of elasticity, Cr provides biocompatibility and also contributes to the



corrosion resistance by forming a protective chromium oxide ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) layer, while Mo contributes to the mechanical properties (Matkovic et al., 2004).

Strengthening mechanism of Co-Cr-Mo alloys is combination of solid solution hardening of Co matrix phase and precipitation hardening due to the formation of  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  carbides (Matkovic et al., 2004; Northwood, 1985; Pickering, 1978). According to the Co-Cr binary phase diagram (Massalski and Okamoto, 1990), Cr has an extended solid solubility in Co and they form two Co-rich solid solutions: (i)  $\gamma$ -Co phase with FCC crystal structure and (ii)  $\epsilon$ -Co phase with HCP crystal structure.  $\epsilon$ -Co phase is harder than  $\gamma$ -Co phase and enhances the mechanical properties. Moreover, presence of W in alloy composition stabilizes the  $\epsilon$ -Co phase in the matrix (Matkovic et al., 2004).

Co-Cr-Mo alloys can be manufactured by various techniques such as powder metallurgy, forging and investment casting technique. Among these methods, investment casting technique is attractive since orthopedic implants having complex shape can be produced at very low cost with dimensions and tolerances very close to the final dimensions (Escobedo et al., 1996; Giacchi et al., 2011). However, poor mechanical properties is the main disadvantage of investment casting technique compared to powder metallurgy and forging. Cast Co-Cr-Mo alloys exhibit lower fatigue resistance and low ductility along with casting and solidification defects such as micro porosity, chemical inhomogeneity large grain sizes (Giacchi et al., 2011; Pickering, 1978; Shi et al., 1994; Lee et al., 2005).

Co-Cr-Mo alloys like other biomedical materials used for dental and orthopedic implants should have reliable physical and mechanical properties (Lee et al., 2006). For example, they should not be fractured in vivo. Thus, their poor mechanical properties should be improved. Proper heat-treatment and alloying additions appear to be effective methods to improve insufficient mechanical properties (Lee et al., 2005).

This study aims to investigate the effect of heat-treatment on phase relationships, microstructures and hardness of commercial purity Co-Cr-Mo alloys produced by investment casting technique in detail.

## MATERIAL AND METHOD

The Co-Cr-Mo alloy was produced by investment casting technique in protective argon atmosphere (details is described elsewhere (Yıldırım and Keleş, 2018)). The chemical composition of the as-cast sample was determined using Oxford Foundry Master Model optical emission spectrometer, and the results are listed in Table 1. The composition of the investigated sample matches with the composition given in the ASTM F75 Standard.

**Table 1.** Chemical composition of investigated Co-Cr-Mo sample determined from optical emission spectroscopy analysis

Element	Co	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	Ni	C	W
wt.%	64.1	27.7	6.19	0.627	0.681	0.369	0.0385	0.184	< 0.02

Small samples with rectangular cross sections (20 x 10 mm) were cut and then subjected to the heat-treatment. The heat-treatment consisted of a solution treatment at 1240 °C for 4 h followed by water quenching. Aging of the solution treated sample was carried out at 720 °C for 2, 4, 8 and 16 h. All heat-treatment process was performed in a Protherm 130/9 model electrical furnace.

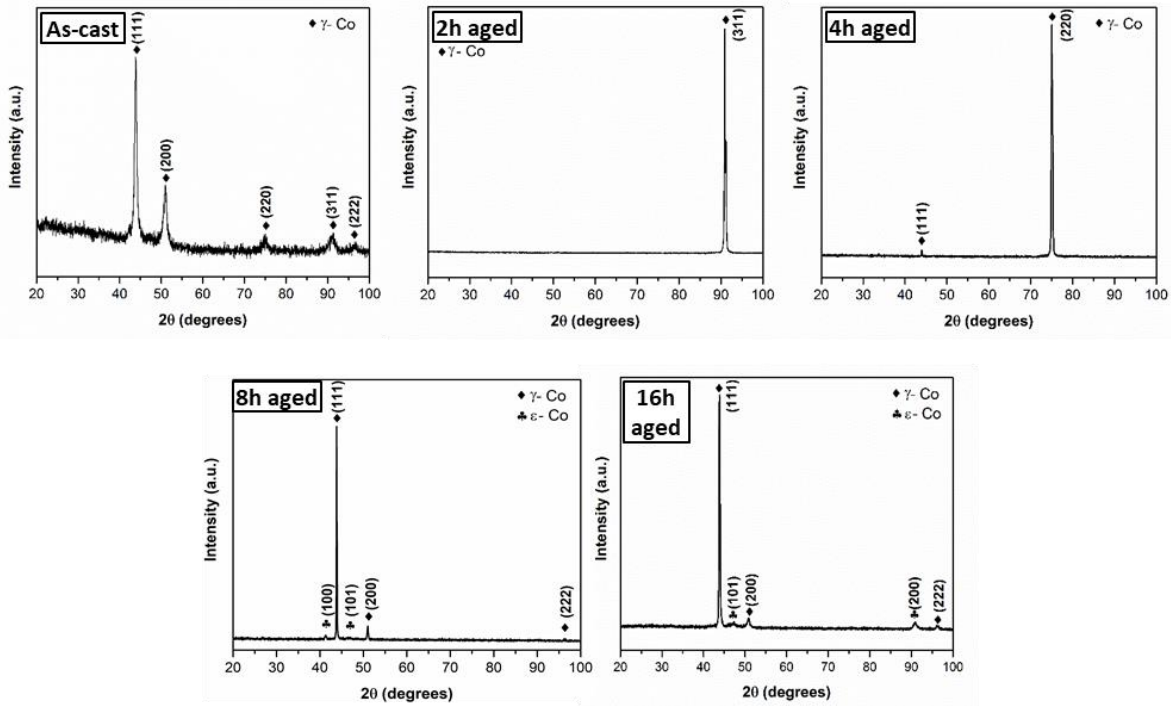
The phase analysis of the as-cast and aged Co-Cr-Mo samples were carried out using X-ray diffraction (XRD) analyses. XRD analyses were conducted using a Bruker D8 Discover Model diffractometer with  $\text{Cu-K}\alpha$  radiation ( $\lambda=1.54056 \text{ \AA}$ ) and an X-ray source operating voltage of 40 kV. XRD scans were performed in the  $2\theta$  range of 20-100 ° using a scanning rate of 2°/min.

Samples for microstructural examination were mechanically grinded (with 120-1200 grit SiC papers), and then polished with 1  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  suspension. Finally, samples were electrochemically etched with chromic acid solution at a voltage of 4 V for 12 s. The microstructures of the samples were examined by Nikon Eclipse MA100 Model inverted optical microscope and SM Zeiss LS-10 Model scanning electron microscope (SEM) equipped with energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS).

Rockwell-C hardness measurements were performed using a Digirock RBOV Hardness Tester. 10 kg of preloading, 150 kg of loading and loading time of 10s were used for the hardness testing. The mean hardness values were determined by averaging at least three measurements obtained from each polished sample.

## RESULTS AND DISCUSSION

The XRD patterns of the as-cast and aged Co-Cr-Mo alloys are shown in Figure 1. The diffraction patterns of as-cast and short-time (2 and 4 h) aged samples revealed that  $\gamma$ -Co phase with FCC crystal structure (JCPDS Card No: 15-0806) was the only detected phase, while the peaks observed in the long-time (8 and 16 h) aged samples indicated that  $\gamma$ -Co phase is the predominant phase with a small amount of  $\epsilon$ -Co phase having HCP crystal structure (JCPDS Card No: 05-0727). However, any diffraction lines corresponding to the neither intermetallic compounds nor carbides were detected.



**Figure 1.** XRD patterns of as-cast and aged Co-Cr-Mo alloys

The relative amounts of FCC  $\gamma$ -Co and HCP  $\epsilon$ -Co phases were predicted by measuring the integrated intensities of the FCC (200) and HCP (101) peaks. The weight fraction of the HCP  $\epsilon$ -Co phase was calculated according to the following equation, developed by Sage and Guillaud (Sage and Guillaud, 1950),

$$f^{HCP} (\text{wt. } \%) = \frac{I_{101}^{HCP}}{I_{101}^{HCP} + 1.5I_{200}^{FCC}} \quad (1)$$

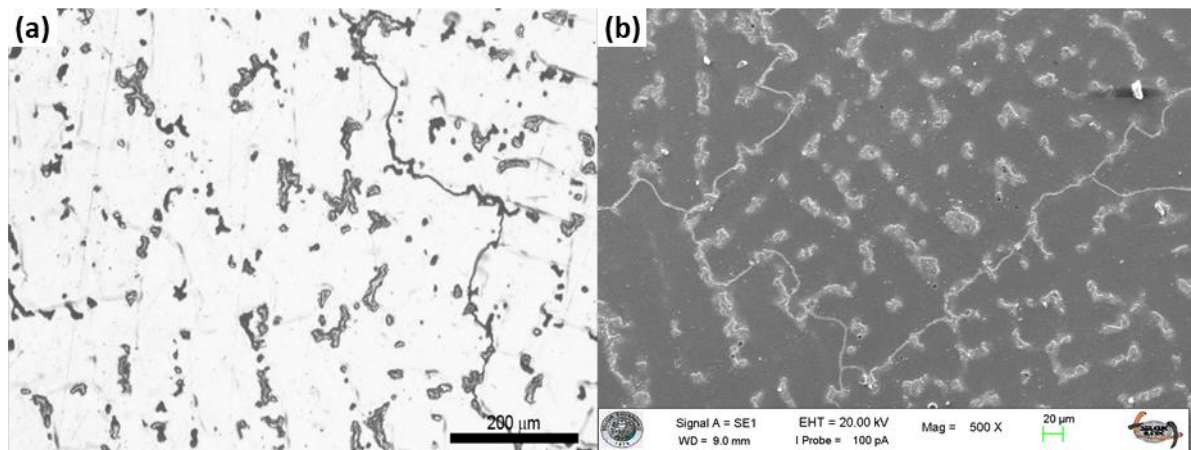
where  $f$  is fraction of corresponding phase and  $I$  is the integrated intensity of the peak present on the XRD diagram. The weight fraction of the HCP  $\epsilon$ -Co phase was found to be 3.1 % and 12.5 % for 8 and 16 h aged samples, respectively. Moreover, the lattice parameters of  $\gamma$ -Co phase in as-cast and aged samples were calculated by applying well-known Bragg's Law, and the results are given in Table 2. The calculated lattice parameters for investigated samples were much higher than that of pure  $\gamma$ -Co phase given as 3.545 Å in standard card file of JCPDS No: 05-0727. The reason for the higher lattice parameter

can be attributed to the atomic radius differences among constituent elements forming the lattice. The solvent element Co, present in the highest quantity of 64 %, and the main solute element Cr, present as 27.7 % in the alloy, have very similar atomic radius of 0.125 nm. However, presence of Mo, which has a larger radius (0.136 nm) than Co and Cr, is believed to increase the lattice parameter of  $\gamma$ -Co phase.

**Table 2.** Calculated lattice parameters of  $\gamma$ -Co phase in as-cast and aged Co-Cr-Mo alloys

Sample	Lattice parameter (Å)
As-cast	3.5769
2h aged	3.5811
4h aged	3.5707
8h aged	3.5790
16h aged	3.5829

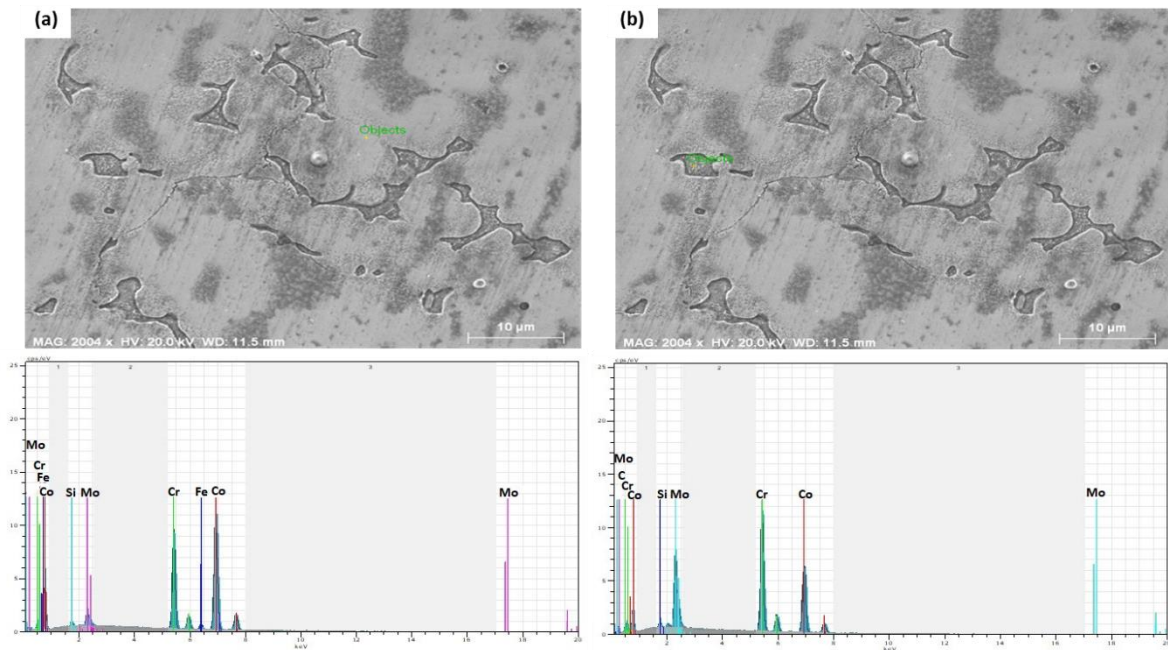
Optical and SEM micrographs of as-cast Co-Cr-Mo samples are given in Figure 2. The microstructure of the as-cast Co-Cr-Mo alloy consisted of  $\gamma$ -Co based dendrites and fine precipitates present at interdendritic zones and grain boundaries. These precipitates can be identified as  $M_{23}C_6$  (where M= Co, Cr and Mo) carbides according to the EDS measurements (Figure 3). The measured compositions of  $\gamma$ -Co matrix phase and precipitates are listed in Table 3. Based on these results, measured composition of  $\gamma$ -Co phase was similar to the composition obtained from spectrometric analysis. Exact composition of the precipitates should be determined via EPMA-WDS analysis since the EDS is a semi-quantitative technique. However, the observed microstructures of as-cast alloy agreed well with those reported in the literature (Giacchi et al., 2011; Sims et al., 1987; Ramirez et al., 2009; Kilner et al., 1982). In addition, some amount of solidification and casting defects such as micropores and flaws were observed in the microstructure of as-cast alloy. The presence of such defects was probably due to the high pouring temperature.



**Figure 2.** (a) Optical and (b) SEM micrographs of as-cast Co-Cr-Mo alloys

The optical micrographs of aged Co-Cr-Mo samples are shown in Figure 4. The microstructure of the as-cast sample significantly changed after solutionizing and aging treatments. The microstructures of short-time (2 and 4 h) aged samples consisted of  $\gamma$ -Co based coarse grains and  $M_{23}C_6$  carbides distributed along the grain boundaries as a hard skeleton, while the microstructures of long-time (8 and 16 h) aged samples consisted of mainly  $\gamma$ -Co based coarse grains and small amount of  $\epsilon$ -Co martensite type microstructures with grain boundary  $M_{23}C_6$  carbides. The grain sizes of aged samples varied between 200-350  $\mu\text{m}$  depending on the aging time. 8 and 16 h isothermal aging resulted in the transformation of FCC  $\gamma$ -Co phase into HCP  $\epsilon$ -Co phase. The  $\epsilon$ -Co phase, also known as athermal martensite, nucleated randomly at the grain boundaries and inside the grains of FCC  $\gamma$ -Co phase developing a pearlite-like

morphology having thick and discontinuous bands. The reason for the dual phase formation, FCC to HCP transformation, can be explained with stacking faults.

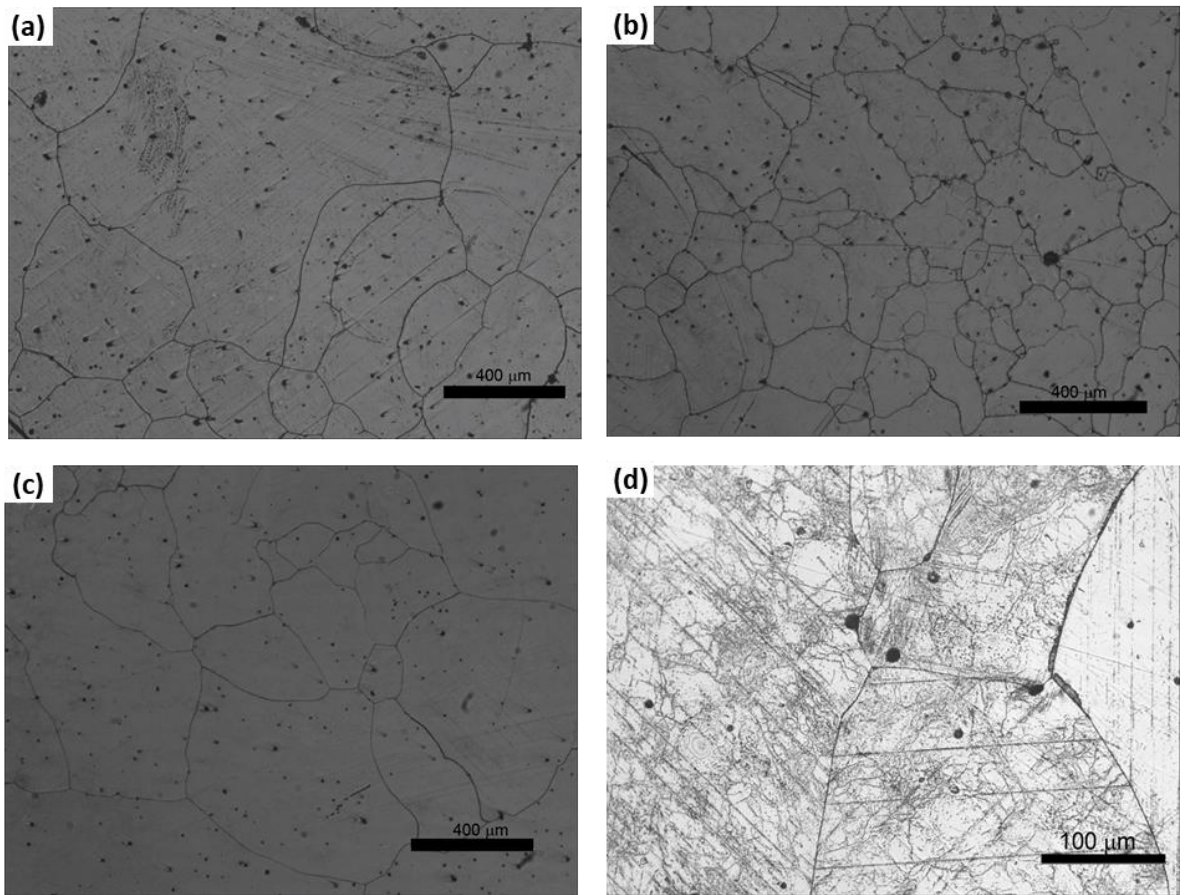


**Figure 3.** EDS analysis of as-cast Co-Cr-Mo alloys (a)  $\gamma$ -Co based matrix phase and (b)  $M_{23}C_6$  carbides.

**Table 3.** Chemical composition of the  $\gamma$ -Co phase and  $M_{23}C_6$  carbide determined from EDS analysis (wt.%)

Element	Co	Cr	Mo	Fe	Si	Others
$\gamma$ -Co phase	67.1	26.6	5.18	2.5	0.6	Balance
$M_{23}C_6$ carbide	34.9	31.9	18.4	1.9	0.8	Balance

It is well-known that when dislocations separate into Shockley partials because of the low stacking fault energy, FCC stacking faults are formed (Garcia et al., 1999; Lopez and Garcia, 2008). These stacking faults can be considered as potential HCP  $\epsilon$ -Co nucleus since Shockley partial dislocations on FCC planes produce HCP crystals. Olson and Cohen (Olson and Cohen, 1976) presented that high temperature annealing above  $\gamma$ -Co  $\leftrightarrow$   $\epsilon$ -Co transformation temperature led to formation of stacking faults. Therefore, as this study also shows, potential nucleation sites for HCP  $\epsilon$ -Co phase would be increased with increasing aging temperature and time (Garcia et al., 1999).



**Figure 4.** Optical micrographs of aged Co-Cr-Mo alloys (a) 2 h, (b) 4 h, (c) 8 h and (d) 16h.

The results of the hardness measurements for as-cast and aged samples are listed in Table 4. As-cast and short-time aged samples exhibited very similar hardness values. However, long-time aging increased the hardness values significantly. This increase is directly attributed to the FCC  $\gamma$ -Co  $\leftrightarrow$  HCP  $\epsilon$ -Co transformation after certain aging time. HCP  $\epsilon$ -Co phase is harder than FCC  $\gamma$ -Co phase and age hardening of Co-Cr-Mo samples increased the amount of HCP  $\epsilon$ -Co phase. The measured hardness values for the investigated samples mainly met the ASTM F75 standard hardness values (25-35 HRC) except for 16 h aged sample. The high hardness value for 16h aged sample may result in fracture of the sample. In order to avoid fracture, such a long aging time should not be preferred.

**Table 4.** Hardness values for as-cast and aged Co-Cr-Mo alloys

Sample	Hardness (HRC)
As-cast	27.1
2h aged	24.7
4h aged	25.7
8h aged	36.7
16h aged	42.1

The present study reports promising properties of Co-Cr-Mo alloys. 8 h aged sample presented here exhibit good structural and mechanical properties and can be used as a material for orthopedic and dental implants.

## CONCLUSIONS

The effect of heat-treatment on phase relationships, microstructures and hardness of Co-Cr-Mo alloys were investigated in detail and the following conclusions can be drawn.

- The microstructure of the as-cast alloy consisted of  $\gamma$ -Co based dendrites and fine  $M_{23}C_6$  carbides at interdendritic zones and grain boundaries.
- After solution and aging treatments  $M_{23}C_6$  carbides distributed along the grain boundaries of  $\gamma$ -Co based coarse grains.
- Transformation of FCC  $\gamma$ -Co  $\leftrightarrow$  HCP  $\varepsilon$ -Co was observed after 8 and 16 h aging time.
- FCC  $\gamma$ -Co  $\leftrightarrow$  HCP  $\varepsilon$ -Co transformation led to significant increase in hardness values.
- High hardness value of 42.1 HRC for 16 h aged sample did not meet the ASTM F75 standard.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Selçuk University Scientific Research Projects Fund under grant number 17201148. The author Ali KELEŞ gratefully acknowledge Sistem Ortopedi, where he worked as a metallurgical and materials engineer formerly, for production of the samples.

## REFERENCES

- ASTM F75-12 Standard, 2012, "Co-28Cr-6Mo Alloy castings and casting alloy for surgical implants".
- Bates, J. F., Knapton, A. G., 1977, "Metals and alloys in dentistry", *International Metals Review*, Vol. 22, No 1, pp. 39-60.
- Davis, J. R., 2003, *Handbook of materials for medical devices*, ASM International, Materials Park, OH, USA.
- Disegi, J. A., Kennedy, R. L., Pilliar, R., 1999, *Cobalt based alloys for biomedical applications*, ASTM, West Conshohocken, PA, USA.
- Escobedo, J., Mendez, J., Cortes, D., Gomez, J., Mendez, M., Mancha, H., 1996, "Effect of nitrogen on the microstructure and mechanical properties of a CoCrMo alloy", *Materials and Design*, Vol. 17, pp. 79-83.
- Garcia, A. J. S., Medrano, A. M., Rodriguez A.S., 1999, "Formation of HCP martensite during the isothermal aging of an FCC Co-27Cr-5Mo-0.05C orthopedic implant alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30A, pp. 1177-1184.
- Giacchi, J. V., Morando, C. N., Fornaro, O., Palacio, H. A., 2011, "Microstructural characterization of as-cast biocompatible Co-Cr-Mo alloys", *Materials Characterization*, Vol. 62, pp. 53-61.
- Kilner, T., Pilliar, R. M., Weatherly, G. C., Alibert, C., 1982, "Phase identification and incipient melting in a cast CoCr surgical implant alloy", *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol. 16, pp. 63-79.
- Lee, S. H., Takahashi, E., Nomura, N., Chiba, A., 2005, "Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Ni- and C-Free Co-Cr-Mo alloys for medical applications", *Materials Transactions*, Vol. 46, No 8, pp. 1790-1793.
- Lee, S. H., Takahashi, E., Nomura, N., Chiba, A., 2006, "Effect of carbon addition on microstructure and mechanical properties of a wrought Co-Cr-Mo implant alloy", *Materials Transactions*, Vol. 47, No 2, pp. 287-290.
- Lopez, H. F., Garcia, A. J. S., 2008, "Martensitic transformation in a cast Co-Cr-Mo-C alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39A, pp. 8-18.
- Massalski, T.B., Okamoto, H., 1990, *Binary Alloy Phase Diagrams*, ASM International, Materials Park, OH.
- Matkovic, T., Matkovic, P., Malina, J., 2004, "Effects of Ni and Mo on the microstructure and some other properties of Co-Cr dental alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 366, pp. 293-297.

- Mendes, P. S. N., Lins, J. F. C., Mendes, P. S. N., Prudente, W. R., Siqueira, R. P., Pereira, R. E., Rocha, S. M. S., Leoni, A. R., 2017, "Microstructural Characterization of Co-Cr-Mo-W Alloy as Casting for Odonatological Application", *International Journal of Engineering Research and Application*, Vol. 7, No 3, pp. 34-37.
- Northwood, D. O., 1985, "The development and applications of zirconium alloys", *Materials and Design*, Vol. 6, No 2, pp. 58-70.
- Olson, G. B., Cohen, M., 1976, "A general mechanism of martensitic nucleation: Part I. General concepts and the FCC  $\rightarrow$  HCP transformation", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 7, No 12, pp. 1915-1923.
- Pickering, F. B., 1978, *Physical metallurgy and design of steels*, Applied Science, Essex, UK.
- Ramirez, V. L. E., Castro, R. M., Herrera, T. M., García, L. C. V., Almanza, C. E., 2009, "Cooling rate and carbon content effect on the fraction of secondary phases precipitate in as-cast microstructure of ASTM F75 alloy", *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1681-1687.
- Sage, M., Gillaud, C., 1950, "Méthode d'analyse quantitative des variétés allotropiques du cobalt par les rayons X", *Review Metallurgy*, Vol. 47, No 2, pp. 139-145.
- Shi, L., Northwood, O. D., Zhengwang, C., 1994, "The properties of a wrought biomedical cobalt-chromium alloy", *Journal of Materials Science*, Vol. 29, No 5, pp. 1233-1238.
- Sims, C. T., Hagel, W., Stoloff, N., 1987, *The superalloys II: High temperature materials for aerospace and industrial power*, Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Yıldırım, M., Keleş, A., 2018, "Production of Co-Cr-Mo Biomedical Alloys via Investment Casting Technique", *Turkish Journal of Electromechanics & Energy*, Vol. 3, No 1, pp. 12-16.
- Zhuang, L. Z., Wagner, E. W., 1989, "Effects of cooling rate control during the solidification process on the microstructure and mechanical properties of cast Co-Cr-Mo alloy used for surgical implants", *Journal of Materials Science*, Vol. 24, No 2, pp. 381-388.



## FARKLI BAĞLANTI YÖNTEMLERİ İLE HİYERARŞİK KÜMELEME TOPLULUĞU

Derya BİRANT

*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İZMİR*  
[derya@cs.deu.edu.tr](mailto:derya@cs.deu.edu.tr)

(Geliş/Received: 13.03.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.11.2018)

**ÖZ:** Kümeleme topluluğu, yüksek kümeleme performansı sağlaması nedeniyle son yıllarda tercih edilen bir teknik haline gelmiştir. Bu çalışmada, Bağlantı-tabanlı Hiyerarşik Kümeleme Topluluğu (BHKT) olarak isimlendirilen yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, topluluk elemanları farklı bağlantı yöntemleri kullanarak hiyerarşik kümeleme yapmakta ve sonrasında çoğunluk oylaması ile ortak karar üretmektedir. Çalışmada kullanılan bağlantı yöntemleri: tek bağlantı, tam bağlantı, ortalama bağlantı, merkez bağlantı, Ward yöntemi, komşu birleştirme yöntemi ve ayarlı tam bağlantıdır. Ayrıca çalışmada, farklı boyutlardaki hiyerarşik kümeleme toplulukları incelenmiş ve birbiriyle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, hiyerarşik kümeleme toplulukları 8 farklı veri setinde uygulanmış ve tek bir kümeleme algoritmasına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bağlantı yöntemleri, Hiyerarşik kümeleme, Kümeleme topluluğu

### Hierarchical Clustering Ensemble with Different Linkage Methods

**ABSTRACT:** Clustering ensemble has become a preferred technique in recent years due to the high clustering performance it provides. In this study, a new approach called Link-based Hierarchical Clustering Ensemble (LHCE) is proposed. In the proposed approach, the ensemble members perform hierarchical clustering using different linkage methods and then make joint decisions with majority voting. Linkage methods used in this study are single linkage, complete linkage, average linkage, centroid linkage, Ward method, neighbor joining and adjusted complete linkage. In this study, hierarchical clustering ensembles with different sizes were also investigated and compared with each other. In the experimental studies, hierarchical clustering ensembles were applied on 8 different datasets and better results were obtained rather than a single clustering algorithm.

**Key Words:** Clustering ensemble, Hierarchical clustering, Linkage methods

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kümeleme, veri elemanlarının sahip oldukları özelliklere göre belirli bir yakınlık kriteri ile değerlendirilerek gruplara ayrılmasıdır. Kümeleme, sınıflandırmadan farklı olarak eğitim aşaması içermeyen bir yöntemdir. Etiketli olmayan verileri yakınlığa (benzerliğe) göre bir gruba dahil etmektedir. Başlıca kümeleme yöntemleri: bölümlenmeli, hiyerarşik, yoğunluk tabanlı, ızgara tabanlı ve model tabanlı yöntemlerdir. Bu makalede sunulan çalışmada, hiyerarşik kümeleme yöntemi kullanılmaktadır.

*Hiyerarşik kümeleme*, örnekleri birbirlerine yakınlıklarına göre değişik aşamalarda bir araya getirerek kümeleri ardışık bir biçimde oluşturmaktadır. Temelde iki yaklaşıma sahiptir: birleştirici (agglomerative) ve ayrıştırıcı / bölücü (divisive) (Rafsanjani ve diğ., 2012). *Birleştirici hiyerarşik kümelemede*, her bir örnek başlangıçta ayrı bir küme olarak kabul edilir, her adımda kümelerin birbirlerine uzaklıkları hesaplanır ve en yakın iki küme birleştirilerek bir üst küme oluşturulur. Böylece,



her adımda küme sayısı bir azaltılır ve işlem bütün örneklerin dahil olduğu tek bir büyük küme oluşuncaya kadar devam ettirilir. Bu süreç, dendogram olarak adlandırılan hiyerarşik bir ağaç diyagramı ile görselleştirilebilmektedir. *Ayrıştırıcı hiyerarşik kümelemede* ise, tam tersi bir biçimde, tüm örnekler başlangıçta tek bir küme olarak kabul edilir ve her aşamada benzer olmayan gözlemler belirlenerek daha küçük kümeler oluşturulur. Bu süreç, her gözlem tek başına küme oluşturuncaya kadar sürdürülür. Bu makalede sunulan çalışmada, birleştirici hiyerarşik kümeleme yöntemi kullanılmaktadır.

Son yıllarda, sınıflandırıcı toplulukları (classifier ensembles) ile elde edilen yüksek başarılar kümeleme alanının da ilgisini çekmiş ve tek bir kümeleyici kullanmak yerine bir *kümeleme topluluğu* (veya *kümeleyici topluluğu*) (clustering ensemble) oluşturulması ve topluluk elemanlarının ortak karar vermesinin sağlanması gündeme gelmiştir. Yapılan çalışmalar (Sarumathi ve diğ., 2015; Cornuejols ve diğ., 2018), kümeleme topluluğu içerisindeki farklı kümeleyicilerin fikir birliği sonucunda çıkan ortak çözümün, tek bir kümeleme algoritmasının ürettiği çözümden daha doğru olduğunu göstermiştir.

Bu motivasyondan yola çıkarak, bu makalede Bağlantı-tabanlı Hiyerarşik Kümeleme Topluluğu (BHKT) olarak isimlendirilen yeni bir kümeleme topluluğu yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, her bir topluluk elemanı aynı hiyerarşik kümeleme algoritmasını farklı bir bağlantı yöntemi ile çalıştırmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağlantı yöntemleri şunlardır: tek bağlantı (single linkage), tam bağlantı (complete linkage), ortalama bağlantı (average linkage), merkez (centroid) bağlantı, Ward yöntemi, komşu birleştirme (neighbor joining) yöntemi ve ayarlı tam bağlantı (adjusted complete linkage).

Kümeleme topluluğunu oluşturacak kümeleyicilerin türü, sayısı ve kararlarının birleştirilmesinde (consensus) kullanılan yöntem, ortak üretilecek çözümü etkileyen önemli faktörlerdir. Bu makaledeki çalışmanın bir amacı da, hiyerarşik kümeleme için en uygun (optimum) sayıda ve bağlantı türünde en doğru sonuca ulaştıran topluluk elemanlarının belirlenmesidir. Bu amaca yönelik olarak, alternatif topluluk tasarımları, makine öğrenmesi çalışmalarında sıklıkla kullanılan 8 veri seti üzerinde denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, hiyerarşik kümeleme toplulukları, tek bir kümeleyiciye göre doğruluk açısından daha yüksek başarı göstermiştir.

## İLGİLİ ÇALIŞMALAR (RELATED WORK)

Literatürdeki *topluluk öğrenmesi* (ensemble learning) çalışmaları ilk olarak *gözetimli* (supervised) öğrenme yaklaşımı olan sınıflandırma üzerinedir, ancak sonrasında aynı başarıyı sağlayabilmek için *gözetimsiz* (unsupervised) öğrenme olan kümeleme konusunda da çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır (Sarumathi ve diğ., 2015; Cornuejols ve diğ., 2018). Ancak, kümeleme algoritmalarının sonuçlarının birleştirilerek ortak karar üretilmesi çok kolay bir işlem değildir. Kümeleme topluluklarının başarısını etkileyen faktörlerin detaylı olarak araştırılması gerekmektedir (Amasyalı ve Ersoy, 2008).

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde, kümeleme topluluğu konusu üzerine farklı alanlarda çalışıldığı görülmektedir, örneğin; turizm (D'Urso ve diğ., 2013), kimya (Saeed ve diğ., 2012), biyoloji (Pirim ve Şeker, 2012), yüksek hızlı tren (Xiao ve diğ., 2016) ve elektrik enerjisi (Khan ve diğ., 2016). Kümeleme toplulukları farklı türlerde oluşturulabilmektedir: sıralı kümeleme (sequential clustering), kooperatif kümeleme (cooperative clustering) ve işbirlikçi kümeleme (collaborative clustering) toplulukları bulunmaktadır (Cornuejols ve diğ., 2018). Bazı kümeleme topluluğu çalışmaları *torbalama* (bagging) tabanlı (D'Urso ve diğ., 2013), bazıları ise *hızlandırma* (boosting) tabanlı (Smeraldi ve diğ., 2011) olarak gerçekleştirilmiştir.

Literatürdeki bazı çalışmalar (Smeraldi ve diğ., 2011; D'Urso ve diğ., 2013) topluluğun üretim aşamasına odaklanmıştır, bazıları (Saeed ve diğ., 2012; Xiao ve diğ., 2016) ise sonuçların birleştirilmesi aşamasını iyileştirmeye yönelik yapılmıştır. Son yıllarda, kümeleme topluluğu içerisindeki başarılı kümeleme çözümlerini seçen, *budama* (pruning) yöntemi sonrasında ortak karar üreten çalışmalar (Yu ve diğ., 2014; Zhao ve diğ., 2017; Akyüz ve Otari, 2017) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, *ağırlıklı* (weighted) kümeleme topluluğu yaklaşımlarının da denendiği (Liu ve diğ., 2017) ve başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

K-means algoritması en yaygın kullanılan kümeleme algoritmalarından birisi olduğu için, kümeleme topluluğu çalışmalarında da yine bu algoritmanın sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Liu ve diğ., 2017; Yang ve diğ., 2017; Ren ve diğ., 2017). Ancak, hiyerarşik kümeleme algoritmasını da kullanan çeşitli kümeleme topluluğu çalışmaları (Li ve Chen, 2009; Rashedi ve Mirzaei, 2013; Xiao ve diğ., 2016) mevcuttur. Li ve Chen (2009), hiyerarşik kümeleme topluluğu ve birliktelik kuralları (association rules) konularını birleştiren hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Rashedi ve Mirzaei (2013), hızlandırma (boosting) tabanlı bir hiyerarşik kümeleme topluluğu önermiş, her bir örneğe bir ağırlık değeri atayarak iteratif bir yol izlemişlerdir. Xiao ve arkadaşları (2016) yarı denetimli (semi-supervised) hiyerarşik kümeleme topluluğu önermiş ve çalışmalarında CHAMELEON algoritmasını kullanmışlardır.

Bu makalede sunulan çalışmada, mevcut çalışmalardan farklı olarak, hangi bağlantı yöntemleri ve üye sayısı ile en iyi hiyerarşik kümeleme topluluğunun üretilebileceği araştırılmaktadır. Literatürdeki bazı çalışmalar (Gionis ve diğ., 2007; Yi ve diğ., 2012) birkaç farklı bağlantı türünü içeren hiyerarşik kümeleme algoritmasını topluluk oluşturulmasında kullanmıştır. Ancak, bu çalışmalar sadece hiyerarşik kümeleme algoritmaları kullanmamış, aynı zamanda başka kümeleme algoritmalarını da (k-means, k-medoids, fuzzy c-means gibi) topluluğa dahil etmişlerdir. Ayrıca, kümeleme sonuçlarının birleştirilmesinde de bu çalışmadakinden farklı algoritmalar kullanmışlardır.

### Hiyerarşik Kümeleme (Hierarchical Clustering)

Hiyerarşik kümelemenin her aşamasında, Öklid veya başka bir uzaklık ölçütü kullanarak, birleştirilecek olan birbirine en benzer iki kümenin belirlenmesinde farklı yaklaşımlar uygulanabilmektedir. İki küme arasındaki uzaklığın hesaplanmasında kullanılan başlıca yöntemler: tek bağlantı, tam bağlantı, ortalama bağlantı, merkez bağlantı, Ward yöntemi, komşu birleştirme yöntemi ve ayarlı tam bağlantıdır.

*Tek bağlantı (single-link):* İki küme ( $k_1$  ve  $k_2$ ) arasındaki uzaklık ( $U$ ),  $k_1$  kümesi ile  $k_2$  kümesinin birbirine en yakın olan iki elemanı ( $x_1$  ve  $x_2$ ) arasındaki uzaklık olarak kabul edilir. En kısa mesafe esasına dayandığı için *en yakın komşuluk* tekniği olarak da bilinmektedir (Murtagh ve Contreras, 2017).

$$U(k_1, k_2) = \min_{x_1 \in k_1, x_2 \in k_2} U(x_1, x_2) \quad (1)$$

*Tam bağlantı (complete-link):* İki küme ( $k_1$  ve  $k_2$ ) arasındaki uzaklık ( $U$ ),  $k_1$  kümesi ile  $k_2$  kümesinin birbirine en uzak olan iki elemanı ( $x_1$  ve  $x_2$ ) arasındaki uzaklık olarak kabul edilir. Kümeler arası eleman çiftleri arasındaki maksimum uzaklık dikkate alındığı için *en uzak komşuluk* tekniği olarak da bilinmektedir (Murtagh ve Contreras, 2017).

$$U(k_1, k_2) = \max_{x_1 \in k_1, x_2 \in k_2} U(x_1, x_2) \quad (2)$$

*Ortalama bağlantı (average-link):* Birinci küme ( $k_1$ ) ile ikinci küme ( $k_2$ ) elemanları arasındaki bütün uzaklıklar hesaplanır ve bunların ortalaması iki küme arasında uzaklık ( $U$ ) olarak kabul edilir. Başka bir deyişle, karşılıklı iki küme arasındaki tüm mesafelerin ortalamasıdır (Murtagh ve Contreras, 2017).

$$U(k_1, k_2) = \frac{1}{|k_1|} \frac{1}{|k_2|} \sum_{x_1 \in k_1} \sum_{x_2 \in k_2} U(x_1, x_2) \quad (3)$$

*Merkez (centroid) bağlantı:* Birinci kümenin ( $k_1$ ) merkezi ( $p$  elemanlı ortalama vektör) ve ikinci kümenin ( $k_2$ ) merkezi arasındaki uzaklık hesaplanır (Murtagh ve Contreras, 2017).

$$U(k_1, k_2) = U\left(\left(\frac{1}{|k_1|} \sum_{x \in k_1} \vec{x}\right), \left(\frac{1}{|k_2|} \sum_{x \in k_2} \vec{x}\right)\right) \quad (4)$$

*Ward yöntemi*: Bir kümenin merkezinde bulunan örneğin, kümenin içinde bulunan örneklerden ortalama uzaklığını dikkate alır. Yani, toplam küme içi varyansı minimize etmeyi hedefler. Bu amaçla, küme içi kareli sapmalardan yararlanarak hata kareler toplamını hesaplar (Murtagh ve Contreras, 2017).

$$TU_{k_1 \cup k_2} = \sum_{x \in k_1 \cup k_2} U(x, \mu_{k_1 \cup k_2})^2 \quad (5)$$

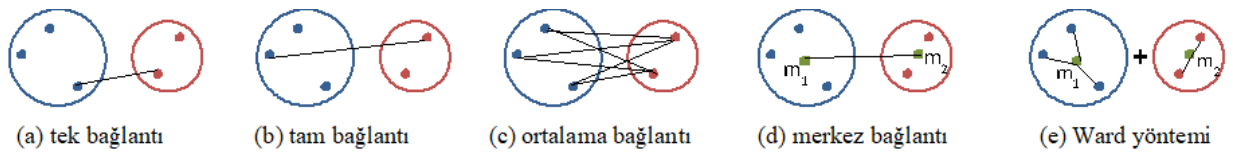
*Komşu birleştirme yöntemi (neighbor joining)*: Diğer yöntemlere göre daha karmaşık olan bu yöntem aşağıdaki adımları içermektedir (Sharma ve diğ., 2018).

- Tüm ikili uzaklıklar (pairwise distances) hesaplanır.
- Göreceli uzaklıkları (relative distances) minimum olan iki eleman  $i$  ve  $j$  seçilir.
- Seçilen elemanlara ( $i$  ve  $j$ ) ilişkin satırlar ve sütunlar uzaklık matrisinden silinir.
- Seçilen elemanları temsil edecek yeni ana elemanın (parent node) ( $k$ ) diğer elemanlara olan uzaklıkları hesaplanır ve uzaklık matrisine eklenir.
- İki eleman kalıncaya kadar aynı işlemler tekrarlanır.

*Ayarlı tam bağlantı (adjusted complete-link)*: İki kümenin ( $k_1$  ve  $k_2$ ) birbirine en uzak olan iki elemanlarının ( $x_1$  ve  $x_2$ ) arasındaki uzaklıktan, kümelerin *küme içi uzaklık* (KİÜ) (within cluster distance) değerlerinden büyük olanının çıkartılması ile elde edilir. Başka bir deyişle,  $k_1$  ve  $k_2$  kümelerinin birleşimi ile elde edilen "küme içi uzaklık" değerinden, kümelerin ayrı ayrı "küme içi uzaklık" değerlerinden büyük olanının çıkartılmasıyla hesaplanır (Kamvar ve diğ., 2002).

$$U(k_1, k_2) = \max_{x_1 \in k_1, x_2 \in k_2} U(x_1, x_2) - \max_{i \in \{1,2\}} KİÜ(k_i) \quad (6)$$

Hiyerarşik kümelemede yaygın olarak kullanılan bağlantı yöntemleri Şekil1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Hiyerarşik kümelemede kullanılan alternatif bağlantı yöntemleri

Figure 1. Alternative linkage methods used in hierarchical clustering

### Kümeleme Topluluğu (Clustering Ensemble)

Kümeleme toplulukları, tek bir kümeleyici kullanmak yerine; birden fazla kümeleyici kullanmak ve sonrasında her bir topluluk elemanının ürettiği çıktıları en iyi şekilde birleştirmek ilkesiyle çalışır. Kümeleme topluluklarının oluşturulması iki temel aşama içermektedir: *topluluk üretimi* (ensemble generation) ve *fikir birliği* (consensus) *fonksiyonunun uygulanması*.

Başlıca kümeleme topluluğu üretme yöntemleri şunlardır: (Vega-pons ve Ruiz-Shulcloper, 2011)

- *Farklı kümeleme algoritmaları*  
Topluluk elemanları farklı kümeleme algoritmaları (örneğin; k-means, bulanık c-means, hiyerarşik kümeleme, beklenti maksimizasyonu (EM) gibi) çalıştırmaktadır. Böylece farklı bakış açısına sahip çözümlerin birleştirilmesi ile başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir. (Pirim ve Şeker, 2012; Yi ve diğ., 2012)

- *Farklı parametreler veya farklı başlangıçlar*  
Tek bir kümeleme algoritmasının farklı parametreler ile çalıştırılması sonucu oluşan kümeleme çözümleri birleştirilmektedir (Akyüz ve Otar, 2017). Örneğin; k-means algoritması farklı rastgele sayılar ile başlatılabilmekte veya farklı uzaklık metrikleri (Euclidean, Manhattan, Minkowski, vb.) kullanılabilmektedir.
- *Farklı nesnelere*  
Veri setinden rastgele nesne seçimleri ile farklı alt gruplar oluşturulabilmekte, böylece kümeleme topluluğunun kendi içinde çeşitlilik (diversity) içermesi sağlanabilmektedir. Örneğin; önyükleme (bootstrap) yöntemi kullanılabilmektedir. (Alqurashi and Wang, 2018)
- *Farklı özellik seçimleri*  
Kümeleyicilerin veri koleksiyonunun rastgele seçilen farklı özellik alt-grupları üzerinde verdikleri kararlar birleştirilmektedir. (Yu ve diğ., 2014)
- *Farklı nesne temsilleri* (object representation)  
Veri dönüştürme veya yeni özellik çıkarımı gibi yöntemlerle farklı nesne temsilleri yapılabilmektedir. (Sarumathi ve diğ., 2015)
- *Alt uzaylara izdüşüm* (projection to subspaces)  
Yüksek boyutlu verinin kümelenmesinde izdüşümler yöntemi ile verinin boyutu düşürülebilmektedir. (Akyüz ve Otar, 2017)

Bazı çalışmalar (Akyüz ve Otar, 2017) ise birden fazla yaklaşımı bir arada uygulamaktadır. Bu makaledeki çalışmada, ikinci sıradaki yaklaşım uygulanmakta, yani aynı kümeleme algoritması farklı yöntem parametreleri ile çalıştırılarak topluluk oluşturulmaktadır.

Kümeleme topluluğu oluşturulmasının ikinci aşaması olan “fikir birliği fonksiyonunun uygulanmasında” kullanılan başlıca yöntemler şunlardır: (i) etiketleme / oylama tabanlı yöntemler, (ii) eş-ilişkili matris tabanlı yöntemler, (iii) grafik tabanlı yöntemler, (iv) hiyerarşik yöntemler ve (v) medyan bölme tabanlı yaklaşımlar. Bazı çalışmalarda (Yu ve diğ., 2014; Yi ve diğ., 2014; Zhao ve diğ., 2017; Yang ve diğ., 2017; Ren ve diğ., 2017), kümeleme çözümlerinin birbirleri ile olan yakınlığını ya da çeşitliliklerini ölçen Normalize Karşılıklı Bilginin (Normalized Mutual Information) maksimize edilmesi hedeflenmektedir. Bu makaledeki çalışmada ise oylama tabanlı bir yöntem kullanılmıştır.

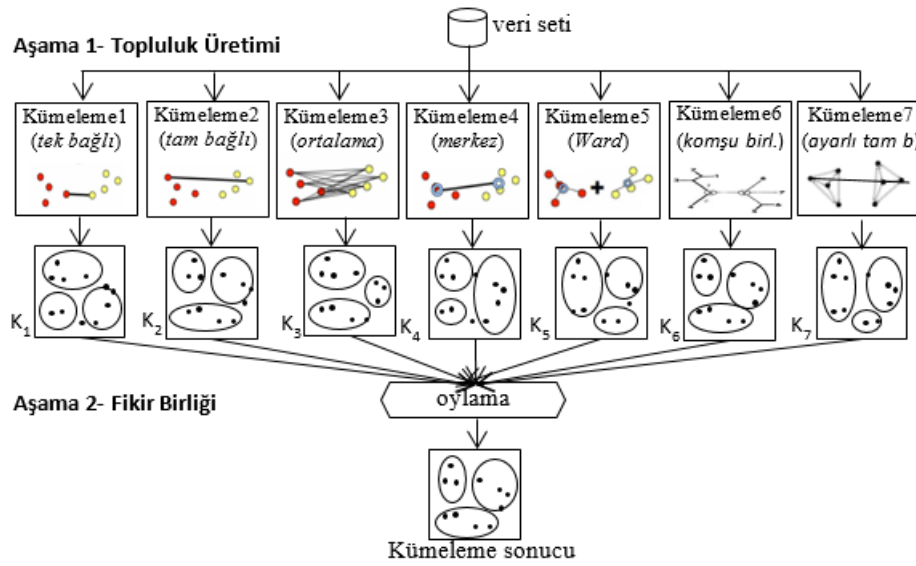
Kümeleme topluluklarının sağladığı başlıca avantajlar aşağıda listelenmektedir:

- *Doğruluk (Accuracy)*: Toplu karar sayesinde, kümeleme algoritmasının yanlış seçim yapma olasılığı azalmaktadır. Çünkü yanlış karar vermeleri için kümeleyicilerin yarıdan fazlasının yanlış karar vermiş olması gerekir. Azınlıkta bulunan yanlış kümelemeler dikkate alınmamakta, böylece tek bir kümeleme algoritmasına göre ortalamada daha iyi performans elde edilebilmektedir.
- *Sağlamlık (Robustness)*: Birden fazla modelin iyi sonuçları birleştirilmekte, böylelikle daha sağlam ve güvenilir kümeleme sonuçları elde edilebilmektedir.
- *Kararlılık (Stability)*: Gürültü ve aykırı değerlere karşı daha düşük hassasiyetli sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca, sonuçların algoritma parametrelerine bağımlılığını azaltabilmektedir.
- *Yenilik (Novelty)*: Kümeleme toplulukları, tek bir kümeleme algoritmalarıyla erişilemeyen çözümlerin bulunmasına izin vermektedir.
- *Model seçimi (Model selection)*: Kümeleme toplulukları, elde edilecek son kümelerin sayısını belirlemek için temel çözümler arasındaki eşleşmeyi göz önünde bulundurarak model seçim problemine bir yaklaşım sağlamaktadır.
- *Bilginin yeniden kullanımı (Knowledge reuse)*: Geçmiş zamanlarda elde edilmiş olan kümeleme sonuçlarının birleştirilerek yeniden kullanılması mümkündür.
- *Dağıtık hesaplama ve paralelleştirme (Distributed computing and parallelization)*: Dağıtık veri kaynaklarında paralel bir şekilde elde edilen kümeleme sonuçlarının bir merkezde birleştirilebilmesine imkan tanır.
- *Çoklu bakış (Multiple views)*: Farklı kümeleme algoritmalarının aynı problem için kullanılabilmemesini ve böylece farklı bakış açısına sahip çözümlerin bileştirilebilmesini sağlar.

Ayrıca, farklı özellik seçimleri veya nesne seçimleri ile farklı açılardan yapılan değerlendirmeler birleştirilebilir.

## ÖNERİLEN HİYERARŞİK KÜMELEME TOPLULUĞU (PROPOSED HIERARCHICAL CLUSTERING ENSEMBLE)

Bu makalede, BHKT (Bağlantı-tabanlı Hiyerarşik Kümeleme Topluluğu) adı verilen yeni bir hiyerarşik kümeleme topluluğu yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen yaklaşıma göre, birleştirici (agglomerative) hiyerarşik kümeleme yönteminin farklı bağlantı türleri (tek, tam, ortalama, merkez, vb.) ile çalıştırılması sonucu oluşan kümeleme çözümleri oylama yöntemi ile birleştirilmektedir. Şekil 2’de önerilen yaklaşımın genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2. Önerilen yaklaşım: BHKT (Bağlantı-tabanlı Hiyerarşik Kümeleme Topluluğu)

Figure 2. Proposed approach: LHCE (Link-based Hierarchical Clustering Ensemble)

Önerilen yaklaşımda kullanılan çoğunluk oylaması (majority voting) tekniğine ilişkin bir örnek Şekil 3’de gösterilmektedir. Veri örneklerinin ( $\ddot{o}_1, \ddot{o}_2, \ddot{o}_3, \ddot{o}_4, \ddot{o}_5$ ) her bir kümeleyici ( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ ) sonucuna göre yer aldığı küme numarası bir matris olarak düşünülebilir. Oylama işlemi ile her bir örnek en çok hangi kümeye yerleştirildiyse, nihai sonuçta o kümede yer alır. Mesela,  $\ddot{o}_1$  örneğinin dört kümeleyici tarafından 1 nolu kümeye, bir kümeleyici tarafından da 2 nolu kümeye yerleştirildiği görülmektedir. Bu durumda, çoğunluk kararı ile  $\ddot{o}_1$  örneği 1 nolu kümede yer alacaktır.

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K^*$
$\ddot{o}_1$	1	1	1	2	1	1
$\ddot{o}_2$	1	1	1	1	1	1
$\ddot{o}_3$	2	2	3	2	2	2
$\ddot{o}_4$	2	2	2	2	2	2
$\ddot{o}_5$	3	3	1	3	2	3
$\ddot{o}_6$	3	3	3	3	3	3

Şekil 3. Çoğunluk oylaması tekniği ile kümeleme sonuçlarının birleştirilmesi

Figure 3. Combining clustering results by majority voting technique

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışmalarda, önerilen hiyerarşik kümeleme topluluğunun (BHKT) performansını etkileyen kümeleyicilerin türü ve sayısı faktörleri araştırılmıştır.

### Veri Setleri (Datasets)

Deneysel çalışmalarda kullanılan, farklı özelliklere (gürültü, eksik veri, farklı veri türleri vb.) sahip, farklı alanlara ilişkin ve kümelemeye uygun 8 veri seti, UCI makine öğrenmesi veri havuzundan (UCI, 2018) alınmıştır. Kullanılan veri setlerine ait örnek sayısı, küme sayısı, özellik sayısı ve veri türleri bilgileri Çizelge 1’de sunulmaktadır.

**Çizelge 1.** Veri setleri hakkında bilgi

*Table 1.* Information about datasets

No	Veri Seti	Örnek Sayısı	Küme Sayısı	Özellik Sayısı	Özellikler	
					Sürekli	Ayrık
1	blogger	100	2	5	0	5
2	breast-cancer	286	2	9	0	9
3	dermatology	366	6	34	1	33
4	ecoli	336	8	7	7	0
5	iris	150	3	4	4	0
6	seeds	210	3	7	7	0
7	seismic-bumps	2584	2	18	14	4
8	zoo	101	7	16	1	15

### Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmada, hiyerarşik kümeleme topluluklarının performansını etkileyen kümeleyici türü ve sayısı faktörleri 8 veri seti üzerinde araştırılmıştır. Çizelge 2’de sunulan üç deney gerçekleştirilmiş, her bir deneyde farklı özelliklere sahip bir kümeleme topluluğu denenmiş ve elde edilen doğruluk değerleri karşılaştırılmıştır. Kümeleme toplulukları (3-BHKT, 5-BHKT ve 7-BHKT) oluşturulurken, olası tüm kombinasyonlar denenmemiş, bağlantı türlerinin tek başlarına gösterdikleri başarılar göre seçim yapılmıştır. Çünkü, yüksek doğruluğa sahip kümeleme sonuçlarının oylamaya dahil edilmesi, nihayi sonucun da daha iyi olmasını sağlayacaktır.

**Çizelge 2.** Hiyerarşik kümeleme toplulukları

*Table 2.* Hierarchical clustering ensembles

Deney No	Topluluk Adı	Eleman Sayısı	Kümeleyici Türleri						
			Tek Bağlı	Tam Bağlı	Ortalama Bağlı	Merkez Bağlı	Ward Yöntemi	Komşu Birleştirme	Ayarlı Tam Bağlı
1	3-BHKT	3	√	√	√				
2	5-BHKT	5	√	√	√	√	√		
3	7-BHKT	7	√	√	√	√	√	√	√

Birinci kümeleme topluluğu (3-BHKT), üç elemandan oluşmaktadır: birinci eleman tek bağlantı, ikinci eleman tam bağlantı, üçüncü eleman ile ortalama bağlantı yöntemi ile hiyerarşik kümeleme yapmaktadır. Veri setlerindeki örneklerin sınıf etiketleri mevcut olduğundan, küme sayısı etiket sayısına eşit olacak şekilde verilmiştir. Çoğunluk kararı ile oluşturulan nihai kümeleme sonuçlarının doğruluk değerleri sınıf etiketleri ile karşılaştırılarak hesaplanmıştır. Uzaklık metriği olarak Öklid uzaklık ölçütü kullanılmıştır. Çizelge 3’ün 1., 2., ve 3. kolonlarında, üç farklı bağlantı türünün ayrı ayrı uygulanması

sonucu elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Çizelge 3'ün 8. kolonunda (3-BHKT) ise üç farklı bağlantı türü ile elde edilen çözümlerin oylama ile birleştirilmesi sonrası elde edilen sonuçlar verilmektedir. Kümeleme doğruluk oranları incelendiğinde, tüm veri setlerinde 3-BHKT yönteminin, tek bir kümeleme algoritmasına göre eşit veya daha doğru sonuçlar ürettiği görülmektedir.

İkinci kümeleme topluluğu (5-BHKT), beş farklı bağlantı yöntemini (tek, tam, ortalama, merkez ve Ward) kullanan beş ayrı kümeleyiciden oluşmaktadır. Çizelge 3'deki 5-BHKT yaklaşımına ilişkin sonuçlar karşılaştırıldığında, çoğu veri setinde (8 tanenin 6 tanesinde) 5-BHKT yönteminin, tek bir kümeleyiciye göre eşit veya daha başarılı performans gösterdiği gözlenmektedir. Ortalamada, tek bir kümeleme algoritması ile en fazla %78,39 başarı elde edilebilirken, bu oran 5-BHKT yönteminde %80,60'dır.

Üçüncü kümeleme topluluğu (7-BHKT), yedi farklı bağlantı yönteminin tümünü oylama işlemi ile birleştirmektedir. Çizelge 3'deki sonuçlar incelendiğinde, bu kümeleme topluluğunun veri setlerin yarısında daha başarılı olduğu, ancak ortalama doğruluk oranı (%80,46) olarak tüm tekli kümeleyicilerden daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 3. Karşılaştırma sonuçları

Table 3. Comparison results

Veri seti	Kümeleme Doğruluğu (%)									
	Tek bağlı	Tam bağlı	Ort. bağlı	Merkez bağlı	Ward	Komşu birleşt.	Ayarlı tam bağlı	3-BHKT	5-BHKT	7-BHKT
blogger	70,00	70,00	58,00	67,00	50,00	68,00	63,00	70,00	<b>72,00</b>	68,00
breast-cancer	<b>70,63</b>	55,59	69,93	<b>70,63</b>	66,43	70,28	<b>70,63</b>	<b>70,63</b>	<b>70,63</b>	70,28
dermatology	30,87	65,03	66,12	66,12	63,66	30,60	30,87	<b>71,31</b>	69,13	66,94
ecoli	44,94	62,50	74,40	77,38	54,17	42,56	44,05	77,08	<b>77,68</b>	77,38
iris	66,00	88,00	<b>88,67</b>	66,00	83,33	33,33	66,00	<b>88,67</b>	83,33	83,33
seeds	34,76	84,29	89,52	91,90	86,67	33,33	33,81	90,95	89,52	<b>94,29</b>
seismic-bumps	93,38	93,00	93,38	93,38	58,86	<b>93,42</b>	93,38	93,38	93,38	93,38
zoo	87,13	84,16	87,13	70,30	65,35	40,59	40,59	89,11	89,11	<b>90,10</b>
<b>Ortalama</b>	62,21	75,32	78,39	75,34	66,06	51,51	55,29	<b>81,39</b>	80,60	80,46

Çizelge 3'ün sol tarafındaki sonuçlar (ilk 7 kolon), her bir kümeleme türünün ayrı ayrı uygulanmasıyla elde edilmiştir. Çizelge 3'ün sağ tarafındaki 3-BHKT, 5-BHKT ve 7-BHKT isimli kolonlardaki sonuçlar ise, sırasıyla ilk 3, 5, ve 7 farklı kümeleme türleri ile elde edilen çözümlerin oylama işlemi ile birleştirilmesi sonrası elde edilmiştir. Çoğunluk oylaması (majority voting) tekniği ile her bir örnek en çok hangi kümeye yerleştirildiyse, nihai sonuçta o kümede yer almaktadır. Mesela, 5-BHKT isimli kümeleme topluluğunda, bir örneği dört kümeleyici 2 nolu kümeye, bir kümeleyici 3 nolu kümeye yerleştiriyorsa, çoğunluk kararı ile söz konusu örnek 2 nolu kümeye yerleştirilir. Kaç tane örneğin doğru kümeye yerleştirildiğine bakılarak Çizelge 3'de verilen "Kümeleme Doğrulukları" hesaplanmıştır.

Farklı eleman sayısına sahip hiyerarşik kümeleme topluluklarının (3-BHKT, 5-BHKT ve 7-BHKT) 8 veri seti üzerinde elde ettikleri doğruluk oranlarının ortalaması sırasıyla %81,39, %80,60 ve %80,46'dır. Dolayısıyla, ortalama en yüksek başarının (%81,39) üç elemanlı kümeleme topluluğu (3-BHKT) ile elde edildiği görülmektedir.

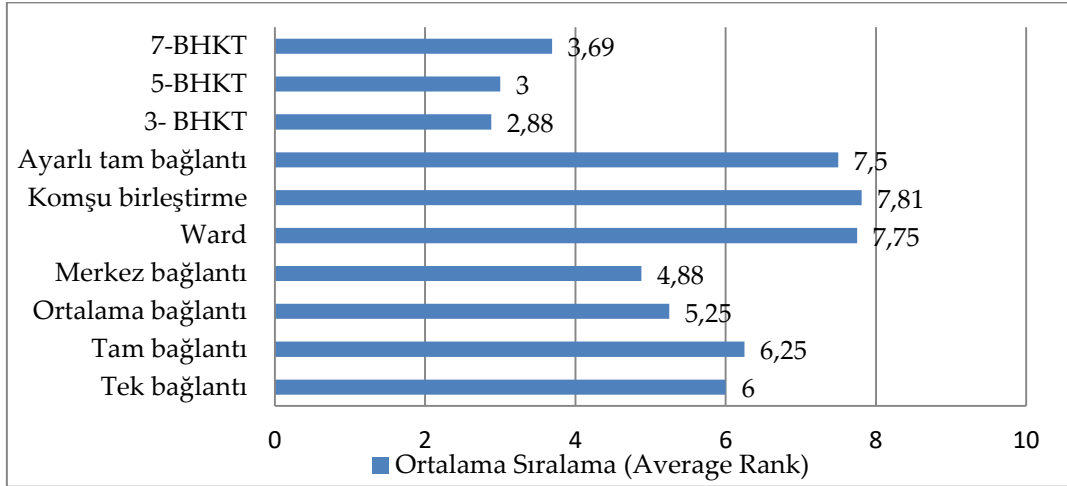
Çizelge 4'de her bir yöntemin 8 veri seti üzerinde elde ettiği başarı sıraları (rank) ve ortalamaları gösterilmektedir. Örneğin; tam bağlı hiyerarşik kümeleme yönteminin diğer 9 yöntemle göre veri setlerinde elde ettiği başarı sıralarının ortalaması  $(3 + 10 + 6 + 6 + 3 + 7 + 9 + 6) / 8 = 6,25$ 'dir. Aynı değere sahip birden fazla yöntem olması durumunda, ortalama başarı sırası atanmıştır. Örneğin; "iris" isimli veri setinde en yüksek değer (%88,67) iki tane olduğu için, 1. ve 2. belirlenmemiş, iki yöntemle de 1.5 başarı sırası verilmiştir.

Çizelge 4. Yöntemlerin başarı sıralamaları

Table 4. The ranks of the methods

Veri seti	Tek bağlı	Tam bağlı	Ort. bağlı	Merkez bağlı	Ward	Komşu birleşt.	Ayarlı tam bağlı	3-BHKT	5-BHKT	7-BHKT
blogger	3	3	9	7	10	5,5	8	3	1	5,5
breast-cancer	3	10	8	3	9	6,5	3	3	3	6,5
dermatology	8,5	6	4,5	4,5	7	10	8,5	1	2	3
ecoli	8	6	5	2,5	7	10	9	4	1	2,5
iris	8	3	1,5	8	5	10	8	1,5	5	5
seeds	8	7	4,5	2	6	10	9	3	4,5	1
seismic-bumps	5	9	5	5	10	1	5	5	5	5
zoo	4,5	6	4,5	7	8	9,5	9,5	2,5	2,5	1
<b>Ortalama</b>	6,00	6,25	5,25	4,88	7,75	7,81	7,50	2,88	3,00	3,69

Şekil 4’de gösterilen ortalama başarı sonuçlarına göre, kümeleme topluluklarının (3-BHKT, 5-BHKT ve 7-BHKT) veri setlerinde kümeleme doğruluğu olarak hep ilk sıralarda yer aldığı görülmektedir. Alternatif yedi farklı bağlantı türü karşılaştırıldığında en kötü sonuçların “komşu birleştirme”, Ward ve “ayarlı tam bağlantı” yöntemleri ile elde edildiği gözlenmiştir. Kümeleme toplulukları (3-BHKT, 5-BHKT ve 7-BHKT) oluşturururken bu sonuçlar göz önüne alınmış, olası tüm kombinasyonlar denenmemiştir. Çünkü, doğruluk oranı düşük kümeleme sonuçlarının oylamaya girmesi nihayi sonucu daha iyi hale getirmeyecektir. Tüm olası kombinasyonlar denenmeden, tek başına yüksek kümeleme doğruluğuna sahip olan bağlantı türleri 3-BHKT ve 5-BHKT çözümleri için seçilmiştir. Son olarak da, hepsi birden 7-BHKT çözümünde denenmiştir.



Şekil 4. Alternatif yöntemlerin başarı sıralarının ortalaması

Figure 4. Average ranks of alternative methods

Topluluk öğrenmesi yöntemlerinin, tekli yöntemlere göre veri setleri üzerindeki kazanma - kaybetme - berabere kalma sayıları bir matris olarak Çizelge 5’te sunulmaktadır. Örneğin, matristeki 5-2-1 değeri, 8 veri setinin 5 tanesinde 7-BHKT yönteminin başarılı olduğunu, 2 tanesinde tek-bağlı hiyerarşik kümeleme algoritmasının daha iyi performansa sahip olduğunu ve 1 veri setinde de bu iki yöntemin berabere kaldığını ifade etmektedir. Çizelge 5’deki sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, veri seti sayısı olarak kümeleme topluluğu yöntemlerinin, tek bir kümeleme algoritmasına göre daha başarılı olduklarını söylemek mümkündür.



**Çizelge 5.** Yöntemler arasındaki kazanma - kaybetme - berabere kalma sayıları*Table 5. The number of wins - losses - ties among the methods*

	Tek Bağlantı	Tam Bağlantı	Ortalama Bağlantı	Merkez Bağlantı	Ward Yöntemi	Komşu Birleştirme	Ayarlı tam Bağlantı
<b>3-BHKT</b>	5-0-3	7-0-1	6-0-2	4-2-2	8-0-0	7-1-0	6-0-2
<b>5-BHKT</b>	6-0-2	7-1-0	5-1-2	5-1-2	7-0-1	7-1-0	6-0-2
<b>7-BHKT</b>	5-2-1	6-2-0	6-1-1	5-1-2	7-0-1	5-1-2	6-1-1

**SONUÇ ve GELECEK ÇALIŞMALAR (CONCLUSION and FUTURE WORK)**

Kümeleme toplulukları, farklı kümeleme çözümlerini dikkate alarak ortak bir karar alma gayesindedir. Bu çalışmada, Bağlantı-tabanlı Hiyerarşik Kümeleme Topluluğu (BHKT) olarak isimlendirilen yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımda, her bir topluluk elemanı hiyerarşik kümeleme algoritmasını farklı bir bağlantı yöntemi ile çalıştırmakta ve sonrasında sonuçlar çoğunluk oylaması ile birleştirilmektedir. Çalışmada, hiyerarşik kümeleme topluluklarının performansını etkileyen kümeleyici türü ve sayısı faktörleri incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, hiyerarşik kümeleme toplulukları 8 farklı veri setinde uygulanmış ve tek bir kümeleme algoritmasına göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak; farklı bağlantı yöntemleri kullanan hiyerarşik kümeleyicilerin sonuçlarını birleştirmenin performansa olumlu bir katkı yaptığını söylemek mümkündür.

Gelecek çalışma olarak; hiyerarşik kümeleme dışındaki diğer kümeleme yöntemlerine (bölümlemeli, yoğunluk tabanlı, ızgara tabanlı ve model tabanlı) yönelik kümeleme topluluklarının oluşturulması planlanmaktadır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Akyüz, S., Otur, B.Ç., 2017, "Doğruluk ve çeşitlilik ödünleşimlerinin eniyilemesi ile kümeleme topluluklarının seçilmesi", *25th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 15-18 Mayıs 2017, Antalya, Türkiye.
- Alqurashi, T., Wang, W., 2018, "Clustering ensemble method", *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, ss. 1-20.
- Amasyalı, M.F., Ersoy, O., 2008, "Kümeleyici topluluklarının başarısını etkileyen faktörler", *IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference (SIU 2008)*, 20-22 Nisan 2008, Aydın, Türkiye.
- Cornuejols, A., Wemmert, C., Gañçarski, P., Bennani, Y., 2018, "Collaborative clustering: Why, when, what and how", *Information Fusion*, Cilt 39, ss. 81-95.
- D'Urso, P., Giovanni, L.D., Disegna, M., Massari, R., 2013, "Bagged clustering and its application to tourism market segmentation", *Expert Systems with Applications*, Cilt 40, ss. 4944-4956.
- Gionis, A., Mannila, H., Tsaparas, P., 2007, "Clustering aggregation", *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, Cilt 1, Sayı 1, ss. 1-30.
- Kamvar, S., Klein, D., Manning, C., 2002, "Interpreting and Extending Classical Agglomerative Clustering Algorithms Using a Model-Based Approach", *19th International Conference on Machine Learning (ICML 2002)*, 8-12 Temmuz 2002, Sydney, Australia, ss. 283-290.
- Khan, I., Huang, J. Z., Ivanov, K., 2016, "Incremental density-based ensemble clustering over evolving data streams", *Neurocomputing*, Cilt 191, ss. 36-43.
- Li, T., Chen, Y., 2009, "Hierarchical clustering ensemble algorithm based association rules", *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 24-26 Eylül 2009, Beijing, Çin, ss. 5320-5323.

- Liu, H., Wu, J., Liu, Tao, D., Fu, Y., 2017, "Spectral ensemble clustering via weighted k-Means: theoretical and practical evidence", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Cilt 29, Sayı 5, ss. 1129-1143.
- Murtagh, F., Contreras, P., 2017, "Algorithms for hierarchical clustering: an overview II", *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, Cilt 7, Sayı 6, ss. 1-16.
- UCI Machine Learning Repository. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>, ziyaret tarihi: 12 Mart 2018.
- Rafsanjani, M.K., Varzaneh, Z.A., Chukanlo, N.E., 2012, "A survey of hierarchical clustering algorithms", *The Journal of Mathematics and Computer Science*, Cilt 5, Sayı 3, ss. 229-240.
- Ren, Y., Domeniconi, C., Zhang, G., Yu, G., 2017, "Weighted-object ensemble clustering: methods and analysis", *Knowledge and Information Systems*, Cilt 51, ss. 661-689.
- Sarumathi, S., Shanthi, N., Ranjetha, P., 2015, "Analysis of diverse cluster ensemble techniques", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer and Information Engineering*, Cilt 9, Sayı 11, ss. 2386-2396.
- Saeed, F., Salim, N., Abdo, A., 2012, "Voting-based consensus clustering for combining multiple clusterings of chemical structures", *Journal of Cheminformatics*, Cilt 4, Sayı 37, ss. 1-8.
- Sharma, A., Jaloree, S., Thakur, R.S., 2018, "Review of Clustering Methods: Toward Phylogenetic Tree Constructions", *International Conference on Recent Advancement on Computer and Communication, Lecture Notes in Networks and Systems*, Cilt 34, ss. 475-480.
- Smeraldi, F., Bicego, M., Cristani, M., Murino, V., 2011, "CLOOSTING: CLustering data with BOOSTING", *MCS 2011, Lecture Notes in Computer Science*, Cilt 6713, ss. 289-298.
- Pirim, H., Seker, S.E., 2012, "Ensemble clustering for biological datasets", *Bioinformatics*, InTech publisher, ss. 287-298.
- Rashedi, E., Mirzaei, A., 2013, "A hierarchical clusterer ensemble method based on boosting theory", *Knowledge-Based Systems*, Cilt 45, ss. 83-93.
- Vega-pons, S., Ruiz-Shulcloper, J., 2011, "A survey of clustering ensemble algorithms", *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Cilt 25, Sayı 3, ss. 337-372.
- Yang, F., Li, T., Zhou, Q., Xiao, H., 2017, "Cluster ensemble selection with constraints", *Neurocomputing*, Cilt 235, ss. 59-70.
- Yi, J., Yang, T., Jin, R., Jain, A.K., Mahdavi, M., 2012, "Robust ensemble clustering by matrix completion", *IEEE 12th International Conference on Data Mining*, ss. 1176-1181.
- Yu, Z., Li, L., Gao, Y., You, J., Liu, J., Wong, H.-S., Han, G., 2014, "Hybrid clustering solution selection strategy", *Pattern Recognition*, Cilt 47, ss. 3362-3375.
- Xiao, W., Yang, Y., Wang, H., Li, T., Xing, H., 2016, "Semi-supervised hierarchical clustering ensemble and its application", *Neurocomputing*, Cilt 173, ss. 1362-1376.
- Zhao, X., Liang, J., Dang, C., 2017, "Clustering ensemble selection for categorical data based on internal validity indices", *Pattern Recognition*, Cilt 69, ss. 150-168.

## OPTOELEKTRONİK SENSÖR KULLANILARAK NEFESTE BULUNAN SU BUHARI ANALİZİNİN ARAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>İsmail BAYRAKLI

<sup>1</sup>Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, AKSARAY

<sup>1</sup>ismailbayrakli@aksaray.edu.tr

(Geliş/Received: 23.01.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.07.2018)

**ÖZ:** Bu çalışma kapsamında, biyomedikal uygulamalar için kullanılabilecek olan eksen-dışı kovuk-artırılmış soğurma spektroskopisine dayalı optoelektronik sensör kullanılarak nefeste bulunan su buharı analiz çalışmaları yapılmıştır. İlk önce HITRAN veri tabanı kullanılarak teorik çalışma yapılmış ve su buharı molekülünün algılanması için kullanılabilecek olan soğurma çizgisi tespit edilmiştir. Ardından, bulunan soğurma çizgisi kullanılarak nefesteki su buharı molekülü analiz edilmiştir. Bunun için 1250-1350 nm aralığında dalga boyu taranabilen dış kavite diyot lazer sistemi kullanılmıştır. Lazerden çıkan ışın, 50 cm odak uzaklığına sahip bir mercek ve bir ayna kullanılarak eksen dışı (off axis, OA) düzenekte, kovuk artırılmış soğurma spektroskopisi kovuğuna bağdaştırılmıştır. Kovuk, 700 nm ile 1650 nm spektral aralığında çok yüksek geri yansımaya katsayısına sahip (% 99.96), 1 m eğrilik yarıçapında ve 2.54 cm çapında iki tane aynadan oluşmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, su moleküllerinin analizi için ilgili spektral alan ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır.

*Anahtar Kelimeler:* Optoelektronik sensör, nefes analizi, lazer spektroskopisi.

### Investigation of Analysis of Water Vapor Present in Breath Using an Optoelectronic Sensor

**ABSTRACT:** In the present study, an off-axis cavity-enhanced absorption spectroscopy (OA-CEAS)-based optoelectronic sensor is reported for analysis of water vapor present in breath. First, theoretical study based on the HITRAN data base was performed in order to determine an isolated absorption line for detection of water vapor. After that, the experimental analysis of water vapor in breath was conducted using the absorption line found out from the theoretical study. A tunable laser system operating between the spectral range 1250 and 1350 nm was used. This laser was coupled into the CEAS cell via a lens with a focal length of 50 cm and a mirror. The cavity consists of two highly reflective mirrors positioned 50 cm apart with a reflectivity of > 99.96% over the spectral range between 700 and 1650 nm with a 2.54 cm diameter and a radius of curvature of 1 m.

*Key Words:* Optoelectronic sensor, breath analysis, laser spectroscopy.

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde birçok hastalığını teşhisi ve tedavisi sürecinin takibi için kullanılan yöntemler hastalara acı vermektedir. Zahmetli ve hastalara acı veren kan verme ve endoskopi gibi yöntemlerin yerini zahmetsiz, ağrısız, girişimsel olmayan, hızlı ve kolayca icra edilebilen ve tekrarlanabilen yöntemlerin alması, herkesin istediği bir gerçektir. Nefes analiz testi, bu yönteme aday en önemli metotlardan birisidir. Bu yöntem, hem hastalar hem de doktorlar için büyük bir kolaylık sağlayacaktır. Diğer bir önemli avantajı ise, hastalıklara bu yöntemle daha erken dönemde müdahale edilerek, meydana

gelebilecek riskler minimum seviyeye çekilebilir. Dolayısıyla bu alandaki gelişmeler, insan sağlığı açısından çok önemlidir.

Nefes analizi uzun bir araştırma geçmişine sahiptir (Huh ve diğ., 1613). Antik çağlardaki hekimler, insan nefesindeki kokudan bazı hastalıkların teşhisi için ipuçları yakalayabilmekteydiler. Ancak modern nefes analizinin başlangıcı, 1971 yılında Pauling ve ekibi tarafından yapılan çalışma kabul edilir (Pauling ve diğ., 1971). Bu çalışmada, normal insan nefesinin, ppb (milyarda bir) veya daha az seviyede yüzlerce uçucu organik bileşen (UOB) içerdiği keşfedilmiştir. O günden bugüne kadar yapılan farklı araştırmalardan insan nefesinin, ppm (milyonda bir) ve ppt (trilyonda bir) seviyelerinde 1.000'den fazla farklı UOB içerdiği tespit edilmiş ve bunlardan sadece bazılarının belli hastalıkların teşhisinde, tedavi süreçlerinin izlenmesinde ve metabolizma bozukluklarının belirlenmesinde kullanılabilme potansiyeli bulunmuştur (Wang ve diğ., 2009), (Risby ve diğ., 2010), (Jiang ve diğ., 2016), (Bielecki ve diğ., 2015).

Nefes analizinin bu uzun geçmişine ve araştırılmasına rağmen, hala hastanelerde rutin bir yöntem olarak kullanılamamaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden bir tanesi, yüksek seçicilikte ve hassasiyette klinik olarak yeterli analiz cihazlarının henüz geliştirilmemiş olmasıdır (Bayraklı, 2017). Tüm eksiklikleri giderebilmek için, yeterli sayıda (yüzlerce, belki binlerce) analizin yapılması gerekmektedir. Bu amaç içinde, ucuz, kullanımı ve bakımı kolay, taşınabilir, anında sonuç veren, yüksek hassasiyette ve çözünürlükte sensörlerin geliştirilmesi çok önemlidir.

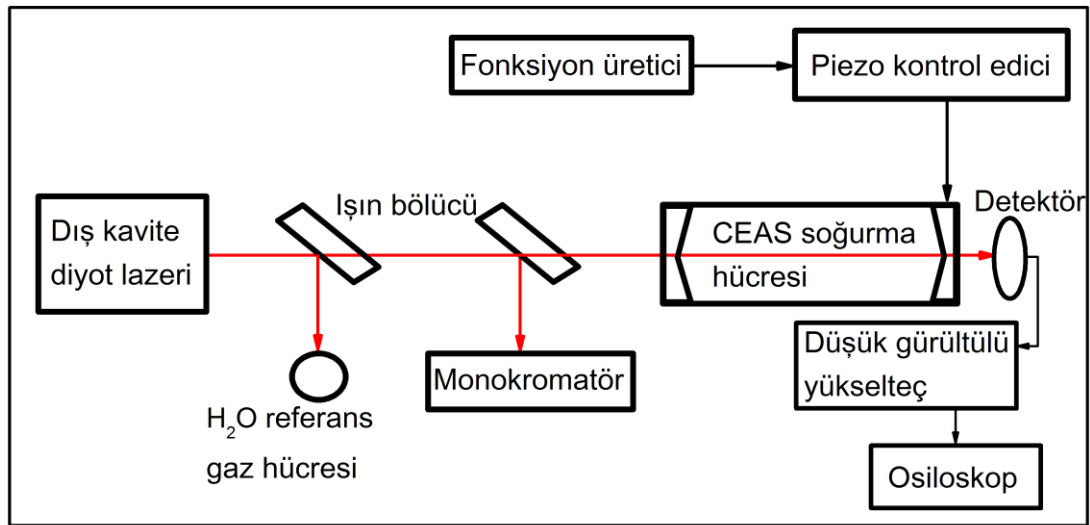
Bizde çalışmalarımızda yukarıdaki özelliklere sahip cihaz tasarlamaktayız. Bu kapsamda önceden, dış kavite diyot lazer ve kovuk-artırılmış soğurma spektroskopisi (CEAS, cavity-enhanced absorption spectroscopy) temelli bir cihaz geliştirdik (Bayraklı ve diğ., 2015), (Bayraklı, 2015-2). Geliştirilen bu sensör, yüksek duyarlılıkta (ppb seviyesinde), seçiciliği yüksek olan, geniş dalga boyu ayar alanına sahip, gerçek zamanda ölçüm yapabilen, oda sıcaklığında çalışabilen, kullanımı kolay, kompakt yapıda olan ve alveol havası ile anatomik ölü boşluk havasını ayırt edebilecek şekilde kurulmuş, karakterize edilmiştir ve biyomedikal uygulamaları yapılmıştır (Bayraklı ve diğ., 2016), (Bayraklı ve diğ., 2016-2).

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda kullanılan optik kovuk, 700 nm ile 1650 nm spektral aralığında yüksek geri yansımaya katsayısına sahip (% 99.96) iki tane özel üretilmiş aynadan oluşmaktadır ve 1400 metrelik bir etkin mesafeye ( $L_{\text{etkin}}$ ) ulaşmıştır. Bu çalışma kapsamında, eksen-dışı kovuk-artırılmış soğurma spektroskopisine dayalı optoelektronik sensör kullanılarak nefeste bulunan su buharının analizi araştırılmıştır. Bu kapsamda, ilk önce, HITRAN veri tabanı kullanılarak, su buharı molekülünün algılanması için kullanılacak soğurma çizgisi tespit edilmiştir. HITRAN kelimesi, *high-resolution transmission molecular absorption* kelimeleri için kullanılan bir kısaltmadır. HITRAN veri tabanı ve bilgisayar kodları kullanılarak ışığın, atmosfer molekülleri tarafından soğurulmasının simülasyonu ve modellenmesi yapılabilir. Bu çalışmanın ardından, bulunan soğurma çizgisi ve (1250-1350 nm aralığında dalga boyu taranabilen) dış kavite diyot lazer ve CEAS soğurma hücresi kullanılarak nefeste bulunan su buharı molekülü analiz edilmiştir.

## DENEY DÜZENEGİ (EXPERIMENTAL SETUP)

Kurulan düzenek, şekil 1'de gösterilmiş ve aşağıda ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Dış kavite lazer düzeneği, Litrow konfigürasyonuna dayanmaktadır. TEC soğutucu üzerine monte edilen kazanç yongası (Thorlabs, SAF), kazanç ortamı olarak kullanıldı. Dış kavite içinde kalan yonga yüzeyinin üzerindeki anti-yansımaya tabasından ve 26.5° açıdan dolayı, bu yüzeyin yansımaya katsayısı % 0.005 civarındadır. Bunlardan dolayı, kazanç yongası, herhangi bir dış kavite düzeneği olmadan lazer olarak çalışmıyor. Bu özellikler sayesinde, Fabry-Perot (FP) yonga kipleri etkin bir şekilde bastırılıyor ve ince ayarı engeleyen veya kısıtlayan kaviteler arasındaki girişimi minimum seviyeye indiriliyor. Yonganın diğer yüzeyi ise, fiber çıkışlı ve % 10'luk bir yansımaya katsayısına sahip. Bu yüzeyden geri yansımayı önlemek için, yüzeyin olduğu tarafta bir tane optik izolator bulunuyor. Bu şekilde, sistemin kararlılığı daha da iyileştiriliyor. Yonga, çıkış yüzeyinin 26.5°'lik açıdan dolayı, yüksek hassasiyetle bir rotasyon platformunun üzerine monte edildi (Thorlabs, PR01/M) ve lazer sürücüsü/TEC kontrol edici (Thorlabs, ITC4005) ile kontrol edilerek CW (continuous wave) kipinde çalışması sağlandı. Yongadan çıkan ve iraksayarak yayılan ışığı, paralel hale getirmek için, (geri yansımaları önlemek amaçlı) anti-yansımaya

tabakalı ve 8 mm odak uzaklığına sahip bir asferik mercek kullanıldı (Thorlabs, A240TM-C). Yonganın lazeri oluşturan aktif bölgesinin, merceğin odak noktasında olması sağlandı. Daha sonra, paralel hale getirilen ışık, yüksek verimlilik elde etmek için TM polarize olmuş şekilde optik kırınım ağının (Thorlabs, GR25-0613) üzerine düşürüldü. Bant geçiren filtre olarak kullanılan optik kırınım ağı, 5 µrad (1 arcsec) minimum hareket ile 360 derece dönebilen piezo sürücülü bir rotasyon platformuna yerleştirildi (Newport, AG-PR100V6, AG-UC8). Yonga ile optik kırınım ağı arası mesafe, yaklaşık 7 cm ve kırınımına uğrayan ışının birinci mertebesi, optik geri besleme sağlıyor. Daha sonra  $\lambda = 2 d \sin\phi$  şartını sağlayan ışık, yonga üzerine tekrar düşerek güçlendiriliyor ( $\lambda$ : Dalga boyu,  $d$ : optik kırınım ağının periyodu,  $\phi$ : Optik kırınım ağının açısı). Diğer kipler ise, yonganın aktif bölgesinin dışında bir yere odaklanarak elimine ediliyor. Bir kipten diğer kipe geçiş, optik kırınım ağın uygun açılarda döndürülmesiyle elde ediliyor. Lazerin dalga boyunun taranması için, optik kırınım ağına monte edilen piezo elemanını kontrol eden piezo kontrol edici (Thorlabs, MDT693B) ve fonksiyon üretici (Tektronix, AFG3021B) kullanılmıştır. Daha sonra, kurulan sistemin optik çıkış gücü, bir optik yükselteç (Thorlabs, S9FC1132P) kullanılarak 100 mW değerine kadar güçlendirilmiştir.



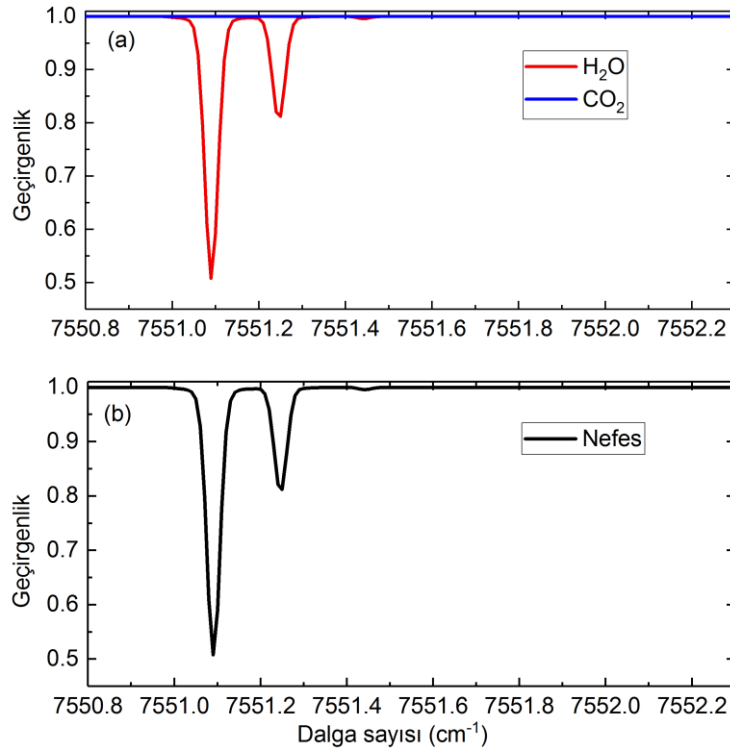
Şekil 1. Deney düzeneği.

Figure 1. Experimental setup.

1250-1350 nm aralığında dalga boyu taranabilen dış kavite diyot lazer sisteminden çıkan lazer ışını, 50 cm odak uzaklığına sahip bir mercek ve bir ayna kullanılarak eksen dışı (off axis, OA) düzeneğe, kovuk artırılmış soğurma spektroskopisi (cavity enhanced absorption spectroscopy, CEAS) kovuğuna bağdaştırıldı. Kovuk, 700 nm ile 1650 nm spektral aralığında çok yüksek geri yansımaya katsayısına sahip (% 99.96), 1 m eğrilik yarıçapında ve 2.54 cm çapında iki tane aynadan oluşuyor (CRD optics). CEAS kovuğundan çıkan ışık, 150 MHz bant genişliğine sahip bir detektöre (Thorlabs, PDA10CF-EC) odaklanmıştır. Detektörden çıkan elektrik sinyali, bir yükselteç yardımıyla güçlendirildikten ve alçak geçiren filtre ile filtrelendikten sonra (SRS, SR560), dijital osiloskop'a gönderilerek ölçümler yapıldı. Daha sonra, Tektronix LabVIEW SignalExpress Analysis Software kullanılarak bilgiler bilgisayar ortamına aktarıldı ve analizler yapıldı. CEAS hücresinden çıkan sinyaldeki sinyal-gürültü-oranını (SNR) iyileştirmek için, hücreyi oluşturan aynalardan birinin konumu, piezo kontrol edici (Thorlabs, MDT693B) ve fonksiyon üretici (Tektronix, AFG3021B) kullanılarak taranmaktadır.

## TEORİK ÇALIŞMA (THEORETICAL STUDY)

Çalışmanın bu kısmında, HITRAN veri tabanı kullanılarak, su buharı molekülünün algılanması için kullanılabilir olan soğurma çizgisi tespit edilmiştir. Ayrıntılı bir araştırmadan sonra, şekil 2(a)'da da görüldüğü gibi, ilgili spektral aralıkta H<sub>2</sub>O, iki tane güçlü soğurma çizgisine sahip. CO<sub>2</sub> ise, ilgili aralıkta şekilde görülmeyecek kadar çok zayıf soğurma çizgilerine sahiptir. Şekil 2(b)'de ise, nefes havası (% 4 H<sub>2</sub>O, % 4 CO<sub>2</sub>, 30 ppb O<sub>3</sub>, 300 ppm N<sub>2</sub>O, 200 ppb CO, 2 ppm CH<sub>4</sub>) için soğurma spektrumu simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalardan da anlaşılacağı gibi, şekilde görülen iki tane H<sub>2</sub>O soğurma çizgisi analizlerde kullanılabilir.



Şekil 2. HITRAN veri tabanı kullanılarak kullanılacak soğurma çizgisinin belirlenmesi. (a) % 4 oranında bulunan H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub> moleküllerine ait soğurma çizgileri. (b) Nefes havasından elde edilen geçirgenlik spektrumu simülasyonu.

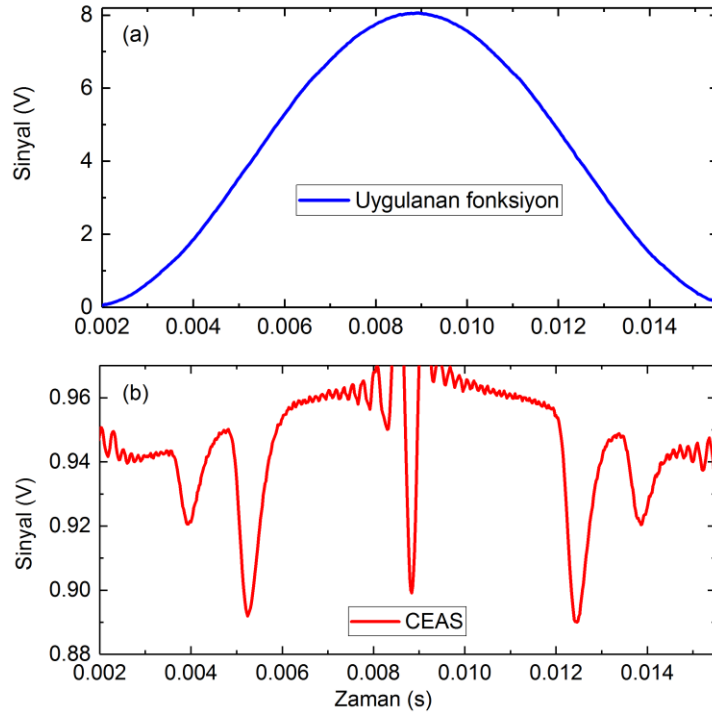
Figure 2. Determination of the absorption line to be used using the HITRAN database (a) Absorption lines of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> (b) Transmission spectrum of simulated breath air

## DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Deneyel çalışma için, CEAS soğurma hücresi, nefes havası ile dolduruldu. Nefes örneği, alveol havasını anatomik ölü boşluk havasını ayırt edebilecek şekilde toplanmıştır. Bunun için, basınca duyarlı vana, T-bağlantı elemanı, toplama torbası (collection bag) ve ayırma torbası (discard bag) kullanılmıştır (Quintron). Yaklaşık 150 ml hacminde olan ve damarlardaki kanda bulunan moleküller ile gaz alışverişine katılmayan kısım olarak adlandırılan anatomik ölü boşluk havası, ilk önce ayırma torbasına toplanır. Bu torba dolduktan sonra, basınca duyarlı vananın diğer ucu açılarak, alveordan gelen hava, toplama torbasına birikir. Bu şekilde, sadece kanda bulunan moleküller ile gaz alışverişine katılan alveol havası toplanmış olur. Toplama torbasındaki havayı, soğurma hücresine aktarmak için, bir tane tek yönlü vana (Hans Rudolph inc.) ve bir tane de kütle akış kontrol edicisi (Alicat, MCV-2SLPM-D/5M) kullanıldı. Soğurma hücresi nefes havası ile doldurulduktan sonra, hücrenin basıncı 30 mbar'a düşürüldü ve ölçümler bu değerde gerçekleştirildi. CEAS soğurma hücresinin FSR (Free Spectral Range =  $c/2L$ , c:

Işık hızı ve L: Kavite uzunluğu (50 cm)) ve Finesse ( $(\pi R/2)/(1-R)$ ) değerleri, 300 MHz ve 7850 olarak bulunmuştur.

Bir önceki teorik çalışmada, lazerin hangi dalga boyu aralığında çalışacağı belirlenmişti. Monokromatör ve içinde % 100 H<sub>2</sub>O buharı bulunan referans gaz hücresi kullanarak, lazerin dalga boyu belirlenen spektral aralığa ayarlandı. Lazer düzeneğine ait optik kırınım ağına monte edilen piezo elemana uygulanan sinüzoidal fonksiyon (şekil 3(a)), lazer dalga boyunun ilgili spektral alanında uygun bir şekilde taranmasını sağladı. Bu şekilde, sadece şekil 2’de gösterilen soğurma çizgilerinin olduğu spektral alan tarandı. CEAS soğurma hücresinden elde edilen sonuç, şekil 3 (b)’de gösterilmektedir. Bu sonucu elde etmek için, detektörden gelen sinyalin 256 defa ortalaması alınmıştır. Böylelikle, sinyal-gürültü-oranı (SNR) artırılarak daha net bir sinyal elde edilmiş oldu. Şekil 3’te görülen grafiklerin x eksenini, aynı zamanda taranan frekans aralığına denk gelmektedir. Bu aralık, şekil 2’deki grafiklerin x eksenini ile aynıdır. Şekil 3a’da gösterilen piezo elemana uygulanan fonksiyon, lazer kavite uzunluğunun değişmesine ve böylelikle lazerin dalga boyunun taranmasına neden olmaktadır. 0 – 8 – 0 V aralığında gerilim uygulandığında optik kırınım ağı geri ve ileri yönde hareket ederek 1,4 cm<sup>-1</sup> dalga sayısı aralığı taranmıştır. Bu şekilde, su molekülüne ait soğurma çizgileri gözlemlenmiştir. 8 V’tan sonra azalan gerilim değerinde fonksiyon uygulanmıştır. Şekil 3(b)’de, tam bu dönüm noktasında ortaya çıkan minimum çizgisi görülmektedir. Bu şekilde, sadece H<sub>2</sub>O molekülünü soğuran bir sistem kurulmuş oldu. Böylelikle, nefes havasında bulunan su buharı analizleri yapılabilir.



Şekil 3. (a) Lazer düzeneğine ait piezo elemana uygulanan sinüzoidal fonksiyon (b) Optik kovuktan elde edilen soğurma çizgisi.

Figure 3. (a) Function applied to the piezo element (b) Absorption lines obtained from the CEAS cell

Elde edilen spektrumdan soğurma çizgisi,  $\alpha = [(I_0/I)-1] / [(1-R)/d]$  formülüne göre hesaplanabilir. Burada,  $I_0$ : Baseline,  $I$ : Deneysel elde edilen spektrum,  $R$ : Aynaların yansımaya katsayısı (0.9998) ve  $d$ : Aynalar arası mesafedir (50 cm). Elde edilen grafiğin altında kalan alandan ve toplam gaz konsantrasyonundan ( $N=P/kT$ ,  $P$ : Basınç,  $T$ : Sıcaklık,  $k$ : Sabit) su molekülünün konsantrasyonu hesaplanabilir. Tüm bu değerlerden, ölçülen nefesteki su molekül seviyesi yaklaşık % 4.5 olarak bulunmuştur. Çalışma farklı nefes örneklerinde denenmiş ve benzer sonuçlar bulunmuştur. Burada elde edilen sonuçlar, HITRAN veri tabanı ile uyumlu sonuçlardır. Bildiğimiz kadarıyla, su moleküllerinin

analizi için ilgili spektral alan ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Bundan sonraki aşamalarda hastanede hastalar üzerine farklı çalışmaların yapılması hedeflenmektedir.

#### SONUÇ (CONCLUSION)

Nefes analiz yöntemi, hastalara acı vermediğinden, anında sonuç alındığından ve kolay bir şekilde tekrarlanabildiğinden dolayı, her geçen gün daha fazla ilgi çekmektedir. Bu makalede, lazer-temelli optoelektronik sensör kullanılarak nefeste bulunan su molekülü analiz çalışmalarının sonuçları verilmektedir. Bu çalışmalar, teorik ve deneysel olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. HITRAN veri tabanı kullanılarak yapılan teorik çalışmada, su molekülünün algılanması için kullanılacak olan izole olmuş soğurma çizgisi tespit edilmiştir. Ardından, bulunan soğurma çizgisi kullanılarak nefesteki su buharı molekülü deneysel olarak analiz edilmiştir. 1250-1350 nm spektral aralığında dalga boyu taranabilen dış kavite diyot lazer sisteminden çıkan ışın, eksen dışı (off axis, OA) düzende, kovuk artırılmış soğurma spektroskopisi kovuğuna bağdaştırılmıştır. Kovuk, 700 nm ile 1650 nm spektral aralığında çok yüksek geri yansımaya katsayısına sahip (% 99.96) iki tane aynadan oluşmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, su moleküllerinin analizi için ilgili spektral alan ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bayraklı, I., Akman, H., 2015, "Ultrasensitive, real-time analysis of biomarkers in breath using tunable external cavity laser and off-axis cavity enhanced absorption spectroscopy," *Journal of Biomedical Optics*, cilt 20, sayı 3, ss. 037001-8.
- Bayraklı, I., 2015, "External cavity diode lasers-based off-axis cavity enhanced absorption spectroscopy in the spectral range between 1000 nm and 1620 nm for trace-gas measurements," *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, cilt 23, sayı 4, ss. 237-243.
- Bayraklı, I., Öztürk, Ö., Akman, H., 2016, "Investigation of acetone, butanol, and carbon dioxide as new breath biomarkers for convenient and non-invasive diagnosis of obstructive sleep apnea syndrome," *Biomedical Chromatography*, cilt 30, sayı 12, ss. 1890-1899.
- Bayraklı, I., Türkmen, A., Koçkar, M. C., 2016, "Examination of feasibility of using breath ammonia analysis based on off-axis cavity-enhanced absorption spectroscopy with external cavity diode laser for non-invasive real-time diagnosis of Helicobacter Pylori," *Applied Spectroscopy*, cilt 70, sayı 8, pp. 1269-1277.
- Bayraklı, I., 2017, "Breath analysis using external cavity diode lasers: a review," *Journal of Biomedical Optics*, cilt 22, sayı 4, pp. 040901, ss. 1-15.
- Bielecki, Z., et al., 2015, "Application of quantum cascade lasers to trace gas detection," *Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences*, cilt 63, ss. 515-525.
- Huh, J., Yi. B. Gam, D., 1613, Korea Traditional Medicine Book, Seoul, Korea: NaeYi Won.
- Jiang, C., Sun, M., Wang, Z., Chen, Z., Zhao, X., Yuan, Y., Li, Y., Wang, C., 2016, "A Portable Real-Time Ringdown Breath Acetone Analyzer: Toward Potential Diabetic Screening and Management," *Sensors*, cilt 16, sayı 1199, ss. 1-15.
- Pauling, L., Robinson, A. B., Teranishi, R., Cary, P., 1971, "Quantitative analysis of urine vapor and breath by gas-liquid partition chromatography," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, cilt 68, sayı 10, ss. 2374-2376.
- Risby, T. H., Tittel, F. K., 2010, "Current status of mid-infrared quantum and interband cascade lasers for clinical breath analysis," *Optical Engineering*, cilt 49, sayı 11, ss. 1-15.
- Wang, C., Sahay, P., 2009, "Breath analysis using laser spectroscopic techniques: breath biomarkers, spectral fingerprints, and detection Limits," *Sensors*, cilt 9, ss. 8230-8262.



## PREFABRİKE YAPILARIN RÜZGÂR YÜKÜ GÜVENLİĞİNİN BELİRLENMESİ

<sup>1</sup>Mehmet UZUN, <sup>2</sup>M. Tolga ÇÖĞÜRCÜ

<sup>1</sup>Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KARAMAN

<sup>2</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KONYA

<sup>1</sup>mehmetuzun@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>mtolgac@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 07.05.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.10.2018)

**ÖZ:** Türkiye’de ve Dünyada son yıllarda oluşan depremlerin özellikle prefabrikte sanayi yapılarına verdiği hasarlar ciddi boyutlarda olmuştur. Prefabrikte Bina sektörü bu depremlerde güvenini önemli derecede kaybetmiş, geniş ve ciddi hasarlarla tanışmıştır. Dünyada kullanılan birçok yönetmelik, prefabrikte yapıların yapım aşamalarını ve gerekli olan sınır kuvvetlerini belirlese de bu tip yapıların en önemli aşaması olan montaj aşaması için yapılmış bir yönetmelik yoktur. Prefabrikte yapılara sadece yatay yük olarak deprem yüklerinin etkilediği bunun yanında bölgesel olarak farklılıklar gösterse de yatay rüzgâr yüklerinin de bu yapıları önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu çalışmada, rüzgâr yükü etkisinde kalarak montaj ve işçilik hataları nedeni ile yıkılmış bir prefabrikte sanayi yapısı incelenmiştir. Görülen hasarların neden-sonuç ilişkisi içinde değerlendirmesi yapılarak montaj aşamasında ve proje aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlardan bahsedilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem, Hasar Türleri, Prefabrik Yapılar, Rüzgâr Yükü, Sanayi Yapıları

### Determination of Wind Load Safety of Prefabricated Structures

**ABSTRACT:** The earthquakes in Turkey and in the world in recent years, especially given that the prefabricated construction industry has been in serious injury. Prefabricated Building’s sector significantly lost confidence in this earthquake is met with extensive and serious damage. Many regulations used throughout the world, the most important stage of construction of prefabricated buildings and border forces, which sets forth the required structure such as a regulation, which is not made for the installation stage. Prefabricated structures that are affected by the earthquake load as horizontal load only if Although regional differences as well as the horizontal wind load has been shown to significantly affect these structures. In this study, the effect of wind loads remained mounting and workmanship have been destroyed because of a prefabricated industrial structure were investigated. Following the assembly stage performing in causation of damage assessment of the matters to be considered at the design stage and have been mentioned.

**Keywords:** Earthquake, Industrial Structures, Prefabricated Building, Type of Damages, Wind Load

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Rüzgâr tahmin edilmesi zor karmaşık bir yapıya sahip ve etkisi düzensiz yani rastgele olarak gerçekleşen bir doğa olayıdır. Rüzgârın bu güçlü etkisinden dolayı tasarım sırasında ve uygulama sırasında etkisi kesinlikle düşünülerek hareket edilmelidir. Rüzgâr, rüzgâr türbülansının ve rüzgâr hızı gradyanının hâkim olduğu atmosferik sınır tabakasının alt kısmında yer aldığından, binalara etkileyen rüzgâr basınçları oldukça dalgalanmaktadır. Doğal rüzgârın binalardaki yüklemeye etkileri, rüzgâr akışı

ile binanın çeşitli bileşenleri arasındaki oldukça karmaşık etkileşimli bir süreçtir (Özmen ve Baydar, 2016).

Sanayileşmenin gittikçe yoğunlaştığı ülkemizde, endüstri yapılarına olan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Özellikle tek katlı geniş açıklıklı sanayi yapıları, hızlı üretim, imalatın fabrikada yapılması, duvarların gerektiğinde bölücü, gerektiğinde ise rijitleştirici eleman olarak kullanılabilmesi gibi avantajları nedeniyle prefabrike olarak çok fazla tercih edilir hale gelmiştir (Ekinci, 1995; Gönül ve Demirel, 2003; Ekinci ve diğ., 2007; Ekinci, 2008). Özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrasında yıkılan kentlerin hızlıca yeniden imarı sırasında prefabrikasyon çok hızlı gelişme göstermiştir (Ersoy, 1987). Avantajları ve hızlı gelişimi sayesinde prefabrike yapıların endüstri yapıları içerisinde uygulama alanı %70 düzeylerine ulaşmıştır (Demirel ve Ulukavak, 1998; Gönül ve Demirel, 2003). Düşük katlı ve çatılı yapısal sistemler endüstri yapılarında olduğu gibi rüzgâr etkilerinde ciddi hasarlara maruz kalabilmektedirler (Huang ve diğ., 2016). Bunun önüne geçebilmek için rüzgâr etkisinin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Rüzgârın doğru bir şekilde yapı üzerindeki etkisinin ortaya konulması ise son derece önemlidir. Rüzgâr yapıya etki eden bir yük olmasına rağmen bu yükleme eşdeğer statik yük olarak ya da zaman tanım alanında tanımlı değişken yük olarak etki ettirilebilir. Ancak bu işlem sırasında rüzgârın rastgele davranışı unutulmamalıdır. Ayrıca son yıllarda yapılan araştırmalar binaların rüzgâr yönüne dik doğrultuda konumlandırılmasının ve burulma salınıminin da rüzgârla aynı yönde olması kadar önemli olduğunu göstermiştir (Kurç ve diğ., 2012).

Tüm dünyadaki yapıların çoğunluğu düşük katlı konut, ticari ve diğer yapılar olarak sınıflandırılabilir. Bu yapıların çoğunluğu tayfunlar ve fırtınalar gibi yüksek şiddetli rüzgârlar sonucu hasar alabilmektedir. Rüzgârın yıkıcı etkisi ise binanın üzerinde ve etrafındaki hava akışından kaynaklanmaktadır. Yapılan araştırmalara göre geçmiş yıllarda rüzgâr hasarı oluşan binaların çoğunluğunda hasar yapıların çatı kaplamasında oluşmaktadır (Kumar ve Stathopoulos, 1998). Yapılarda oluşan hasarlar rüzgâr hesabının önemini ortaya çıkarmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ile rüzgâr etkisi hesabında bazı yöntemler geliştirilmiştir. Gaussian tahmin yöntemi ise bunlardan biridir. Ancak güçlü rüzgârlar gibi çevresel yüklemelerin ölçülmesi Gaussian varsayımından önemli ölçüde sapmalar göstermektedir (Cope ve diğ., 2005).

Rüzgârın karmaşık yapısı ve etkilendiği çok fazla parametrenin olması konu ile ilgili çok fazla çalışmanın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Konu ile ilgili genel olarak çalışmalar maksimum emiş mekanizması, çatılarda çözüm üretilememiş konik girdaplar üzerine olmuştur (Özmen ve Baydar, 2016). Saathoff ve Melbourne maksimum çatı yüklemesi oluşum mekanizmasını araştırarak yüksek basınç oluşumu ve girdap oluşumu üzerine bir çalışma yapmışlardır (Saathoff ve Melbourne, 1989). Guirguisa ve diğ. bir rüzgâr tüneli içinde tek taraflı eğimli çatı binalarının basitleştirilmiş modellerinden geçen rüzgâr akışının özelliklerini incelemiştir (Guirguisa ve diğ., 2007). Ham ve Bienkiewicz, türbülans yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak ayrışma bölgelerindeki maksimum noktasının olasılıksal ve zamansal özelliklerini ele almıştır (Ham ve Bienkiewicz, 2003). Ayrıca aşırı rüzgâr olaylarında düşük katlı yapılara verilen zararı azaltma çabasıyla, standart yük hükümlerine alternatifler araştırılmaktadır (Rigato ve diğ., 2001; Sadek ve Simiu, 2002). Genel olarak geçmiş yıllardaki çalışmalarda rüzgâr yükünün hesaplanması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Hesap yönteminin geliştirilmesi ve rüzgâr sırasındaki yapısal davranışın tahmin edilmesi en önemli çalışma konularından olmuştur. Ancak rüzgâr yükü etkisinde yapılarda oluşan hasarların montaj aşamasında oluşabileceği yönünde çalışmalara rastlanmamıştır.

Bu çalışmada, tek katlı geniş açıklıklı bir sanayi yapısı incelenmiştir. Yapı montaj aşamasında iken şiddetli rüzgâr etkisi ile hasar görmüştür. Yapının projeleri incelenmiş, yapısal modeli oluşturulmuş, yerinde hasarlı elemanlar incelenerek yapının hasar görme sebepleri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

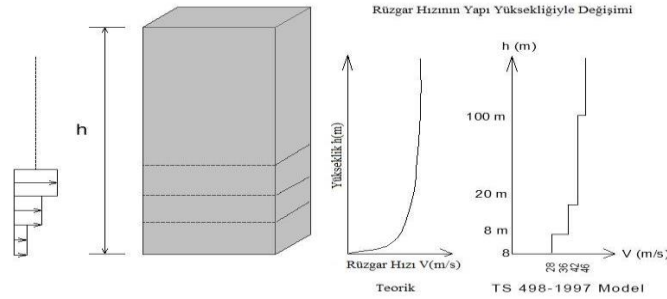
## **MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)**

### **Rüzgâr Yüğü (Wind Load)**

Rüzgâr, atmosferdeki havanın dünya üzerinde yüzeye yakın ve paralel, doğal ve genellikle yatay

olarak oluşan hareketleridir. Rüzgârın oluşmasının temel sebebi, atmosfer basıncının bölgeler arasında farklılık göstermesidir. Rüzgâr, alçak basınçla yüksek basınç bölgesi arasında yer değiştiren hava akımıdır ve yüksek basınçlı alandan alçak basınçlı alana doğru hareket etmesiyle oluşur.

Rüzgâr yükü ise, çok yüksek olmayan yapılar için statik olduğu kabul edilen ve yapıya etki eden tüm rüzgâr yüklerinin vektörel toplamına eşittir. Bu yük, rüzgârın esiş yönünde çarptığı yapı yüzeylerinde basınç, terk ettiği arka yüzeylerde ve yalayıp geçtiği yüzeylerde emme kuvveti oluşur. Basınç ve emme kuvveti, rüzgârın hızına ve yapının geometrisine bağlı olarak değişir. Rüzgâr hızı belli bir yüksekliğe kadar artar daha sonra ise sabit kalır (Şekil 1).



Şekil 1. Rüzgâr hızının yükseklik ile değişimi

Figure 1. Change of wind speed with height

### Prefabrike betonarme binalarda rüzgâr yükü hesabı (Wind load calculation in prefabricated reinforced concrete buildings)

Prefabrike betonarme ve ön gerilmeli betondan imal edilen yapıların hesap esasları ile imalat ve montaj kuralları TS9967'de detaylı olarak verilmiştir. Türkiye de yapılan prefabrike yapıların tamamı bu standartlarda belirtilen kurallar ve sınırlara göre üretilmekte ve monte edilmektedir. Yapılan hesap ve analizlerde ayrıca TS498, TS500 ve 2007 deprem yönetmelikleri de kullanılmaktadır. Ayrıca Avrupa'da EUROCODE 1-EN 1991-1-1-4 2010:12 ve Amerika'da ASCE 7.05 yönetmelik ve kanunları, yapıların tasarımı ve analizinde etkilmesi gereken karakteristik yükleri içermektedir.

### TS 498 yönetmeliği'nde rüzgâr yükü (Wind load in TS 498 regulation)

Hesaplama için verilen açıklamalar bütün yapılar için geçerli olmakla beraber kendi şartnameleri veya standartları olan (köprü, vinçler, yüksek bacalar (fabrika bacası vs. gibi), radyo vs. yayın kuleleri ve yüksek gerilim hatları vb.) yapılar için geçerli değildir. Rüzgâr yükünü her yönde en büyük değerinde tesir eder şekilde göz önüne alınmalıdır. Rüzgâr doğrultusu genellikle yatay kabul edilir.

### Rüzgâr yükü hesabı (Wind load calculation)

#### Rüzgâr yükü hesap değeri (W) (Wind load account value (W))

Rüzgâr yükü hesabı yapının geometrisine bağlıdır (Şekil 2, Şekil 3). Basınç, emme ve sürtünme etkileri birleştirilerek hesaba alınır. Bir yapının bütününde rüzgâr yükü bileşkesinin büyüklüğü;

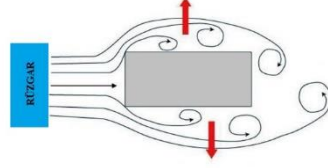
$$W = C_f \cdot q \cdot A \quad (\text{kN}), \quad (1)$$

formülü ile bulunur. Burada;

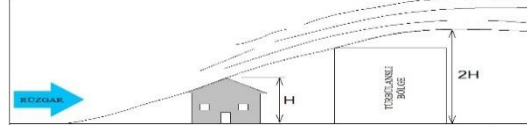
$C_f$ =Aerodinamik yük katsayısı

$q$  = Emme (hız basıncı)( $\text{kN/m}^2$ )

A = Etkilenen yüzey alanı, (m<sup>2</sup>)



Şekil 2. Rüzgâr yükü hesabı yapının geometrisine bağlıdır  
Figure 2. Wind load calculation depends on the geometry of the structure



Şekil 3. Rüzgâr yükü hesabı yapının geometrisine bağlıdır  
Figure 3. Wind load calculation depends on the geometry of the structure

### Aerodinamik yük katsayısı (C<sub>f</sub>) (Aerodynamic load rating (C<sub>f</sub>))

Yük katsayısının (C<sub>f</sub>) belirlenmesi yapı geometrisine ve rüzgârın esiş yönüne bağlıdır. Rüzgâr kanalı deneyinden bu katsayı elde edilir.

### Rüzgâr basıncı (w) (Wind pressure (w))

Yapı üst yüzeyine tesir eden rüzgâr basıncı;

$$w = C_p \cdot q \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

formülü ile bulunur. Burada;

q = Rüzgâr basıncı (kN/m<sup>2</sup>)

C<sub>p</sub> = Emme katsayısı

C<sub>p</sub>, dikkate alınan yüzey için çeşitli esiş yönüne bağlı olarak belirlenir. Rüzgâr basıncı etki yüzeyine dik olarak etki eder.

### Emme hesabı (Hız basıncı)(q) (Suction account (Speed pressure) (q))

$$q = \rho \cdot v^2 / 2g \quad (\text{kN/m}^2), \quad (3)$$

Çok yaklaşık olarak hava birim hacim ağırlığını  $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$  alırsak hız (v) de m/s cinsinden yerine konursa

$$q = v^2 / 1600 \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4)$$

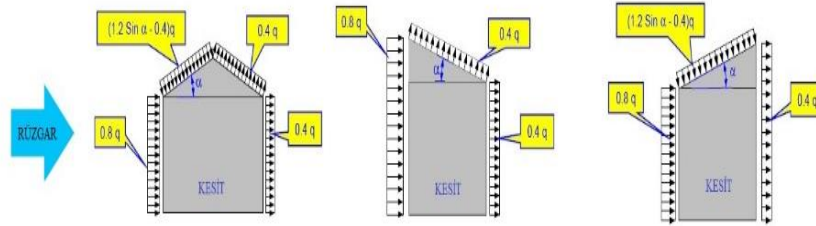
bulunur.

**Çizelge 1.** Yüksekliğe bağlı olarak rüzgâr hızı ve emme oranları

*Table 1. Wind speed and suction rates depending on height*

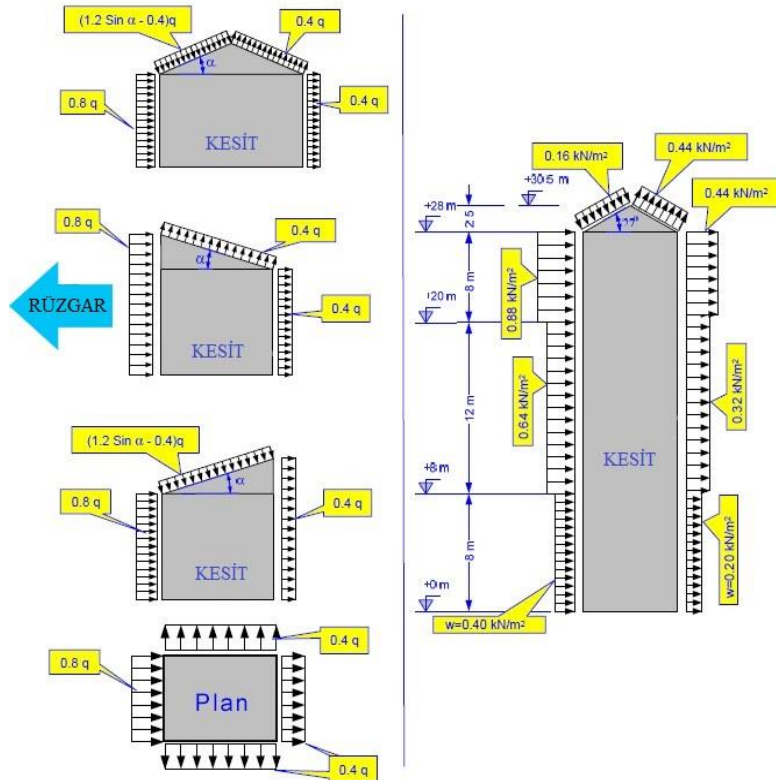
Zeminden Yükseklik (m)	Rüzgâr Hızı (v) m/sn	Emme (q) kN/m <sup>2</sup>
0 - 8	28	0,5
9 - 20	36	0,8
21 - 100	42	1,1
> 100	46	1,3

Yerel topografik şartlar nedeniyle değişik rüzgâr hızları oluşabilir ve bu Çizelge 1 değerinden farklı olabilir. Yüksekte ve sarp bir yamaçtaki yapıda rüzgâr etkisi şiddetli olacağı düşüncesiyle emme  $q = 1,1$  kN/m<sup>2</sup> alınmalıdır.



**Şekil 4.** Planda kare kesitli ve eğik çatılı kapalı yapılarda rüzgâr yükünün ana taşıyıcı sistem doğrultusunda dağıtımı

*Figure 4. Distribution of wind load on mainframe system in closed plan with closed and curved roofs*



**Şekil 5.** Dört tarafı kapalı yapılar ve dört tarafı kapalı yüksek yapılar

*Figure 5. Closed structures on four sides and closed structures on four sides*

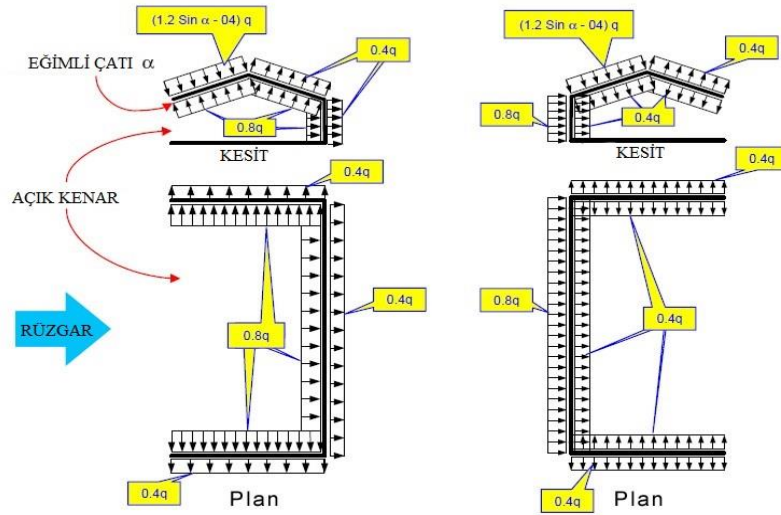
**Çizelge 2.** C katsayısı ve rüzgâr yükünün yapının etkilenen yüzeyinin birim alanına göre dağılımı(Basınç + Emme)

*Table 2. C coefficient and distribution of the wind load affected by the surface area of the structure (Pressure + Suction)*

Yapı Cinsi	Katsayı C	Rüzgâr Yükü W=c*q			
		q=0.50kN /m <sup>2</sup>	q=0.80kN /m <sup>2</sup>	q=1.10 kN/m <sup>2</sup>	q=1.30kN /m <sup>2</sup>
<b>1.Düzlemsel Yüzeyler ile Sınırlandırılmış Yapı Elemanları</b>					
<b>1.1. Kapalı Yapı Elemanları</b>					
<b>1.1.1.Rüzgâr Yönüne Dikey Yüzeylerde</b>					
<b>a. Genel olarak</b>	1.2	0.60	0.96	1.32	1.56
<b>b. Kule tipi yapılarda(*)</b>	1.6	0.80	1.28	1.76	2.08
<b>1.1.2.Rüzgâr yönüne <math>\alpha</math> açısı yapan eğimli yüzeylerde</b>					
<b>a. Genel olarak</b>	1.2sin $\alpha$	0.6 sin $\alpha$	0.96sin $\alpha$	1.32sin $\alpha$	1.56sin $\alpha$
<b>b. Kule tipi yapılarda</b>	1.6sin $\alpha$	0.8 sin $\alpha$	1.26sin $\alpha$	1.32sin $\alpha$	1.56sin $\alpha$
<b>1.2. Kapalı Olmayan Yapı Elemanlarında(**);</b>					
<b>1.1.1 ve 1.1.2 deki verilen değerler geçerlidir.</b>					
Yalnız gayri müsait durumu vermesi halinde bu yükler için ikinci bir hesap daha yapılmalıdır. Bu hesapta rüzgâr yükü çatı iç kısım yüzeyine dik olarak alınır.					
<b>1.3. Zemin üzerinde serbest duran duvarlar;</b>					
Genel olarak yüksekliği, ortama genişliğin 5 katı olan duvarlar	1.6	0.80	1.28	1.76	2.00
<b>2. Taşıyıcı Sistemler ve Taşıyıcı Dolu Duvarlar</b>					
<b>2.1.Taşıyıcı bir duvar ardarda sürekli olan taşıyıcı duvarlardan en öndeki ve diğer duvarların etkilenecek kısmı için</b>					
<b>a. Rüzgar yönüne dikey yüzeylerde</b>	1.6	0.80	1.28	1.76	2.00
<b>b. Rüzgar yönüne <math>\alpha</math> açısı yapan eğimli yüzeylerde</b>	1.6sin $\alpha$	0.8 sin $\alpha$	1.28sin $\alpha$	1.32sin $\alpha$	1.56sin $\alpha$
<b>2.2.Ardarda olan taşıyıcı duvarlarda en öndeki duvar tarafından yüzeyi kapatılan ikinci taşıyıcı duvar ve diğerlerinin rüzgâr yönünde rüzgâra maruz kalmaları halinde</b>					
<b>a. taşıyıcı sistemdeki aralıkların sistem genişliğinden küçük olması ve taşıyıcı dolu duvarların taşıyıcı yüksekliğinden küçük olması halinde</b>	0	0	0	0	0
<b>b. taşıyıcı aralıkları büyük ise</b>					
<b>1. Rüzgar yönüne dikey yüzeylerde</b>	1.2	0.60	0.96	1.32	1.56
<b>11. Rüzgâr yönüne <math>\alpha</math> açısı yapan eğimli yüzeylerde</b>	1.2sin $\alpha$	0.60sin $\alpha$	0.96sin $\alpha$	1.32sin $\alpha$	1.56sin $\alpha$

(\*) Bir yapının kule tipinde bir yapı olduğunun kabulü için cephelerin yüksekliği ortalama yapı genişliğinin en az 5 katı olmalıdır.

(\*\*)Kapalı olmayan yapı elemanı demek, bir cephesinden veya bütün cephelerinden açık olan veya açılabilir şekilde olan veyahut bir veya birçok yerinden en az 1/3 oranında açıklıklar olan yapı demektir.



Şekil 6. Bir tarafı açılabilen veya açık yapı

Figure 6. One side opening or open structure

**Eurocode 1- EN 1991-1-42010:12 rüzgâr yükü hesabı (Eurocode 1- EN 1991-1-42010: 12 Wind load calculation)**

Eurocode 1- EN 1991-1-42010:12 rüzgâr yükü hesabında bir rehber niteliği taşımaktadır. Yapılara etki eden rüzgâr yükünün hesaplanmasında yapı yüksekliği ile ilgili yönetmelikte verilen sınır değer Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. EN 1991 yapı yüksekliği limitleri

Table 3. EN 1991 building height limits

Yapı	EN 1991-1-4 Sınırlandırması
Binalar	Maksimum yükseklik 200 m
Viyadükler	Maksimum açıklık 200 m
Asma Köprüler/Gergi Askılı Köprüler	Özel olarak araştırılmalı
Üst Geçitler	Maksimum açıklık 30 m

Rüzgâr yükü yapının rüzgâra karşı göstereceği tepkiye göre iki gruba ayrılabilir:

- Yarı statik tepki
- Dinamik ve aeroelastik tepki

**Rüzgâr hızı ve rüzgâr basıncı (Wind speed and wind pressure)**

Bölgeye göre farklılık gösteren rüzgâr iklimi, az bitki örtüsüne sahip araziden 10 m yukarıda 10 dakikalık ana rüzgâr hızına bağlı değerler yardımı ile tanımlanır. Temel rüzgâr hızı ise aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0} \quad (5)$$

Burada,

$v_b$  : Temel rüzgâr hızı

$c_{dir}$ : Yön katsayısı

$c_{season}$ : Mevsimsel katsayı

$v_{b,0}$  : Temel rüzgâr hızı temel değeri

$c_{dir}$  ve  $c_{season}$  bölgelere göre değişkenlik gösterir ve çizelgeler halinde verilmiştir. Ancak genel olarak her iki değerde 1 alınabilir. Temel rüzgâr basıncı ile temel rüzgâr hızı arasındaki bağıntı ise aşağıdaki gibidir:

$$q_b = \rho/2 \times v_b^2 \quad (6)$$

Burada,

$\rho$  : Hava özgül ağırlığı ( $1.25 \text{ kg/m}^3$  alınabilir.)

$q_b$  : Temel rüzgâr basıncı

Hız basıncının temel değeri kabul edilen yapının referans yüksekliğindeki değer değiştirilmek zorundadır. Eşdeğer yükseklikteki hız ve rüzgâr hızındaki ani değişimler arazinin pürüzlülüğüne bağlıdır. Yüksekliğe bağlı hız değişimleri ile tanımlanan pürüzlülük katsayısı eşdeğer yükseklikteki ana rüzgâr hızını elde etmek için hesaplanmalıdır.

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b \quad (7)$$

Burada,

$v_m(z)$  : Ana rüzgâr hızı

$c_r(z)$  : Pürüzlülük katsayısı

$c_o(z)$  : Orografi katsayısı (genel olarak 1 alınabilir.)

Pürüzlülük katsayısı bir minimum yüksekliğe bağlıdır. Aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$c_r(z) = k_r \times \ln(z/z_o), z \geq z_{min} \quad (8)$$

$$k_r = 0.19 \times (z/z_{o,11})^{0.07} \quad (9)$$

Burada,

$k_r$  : Arazi katsayısı

$z_o$  : Pürüzlülük uzunluğu

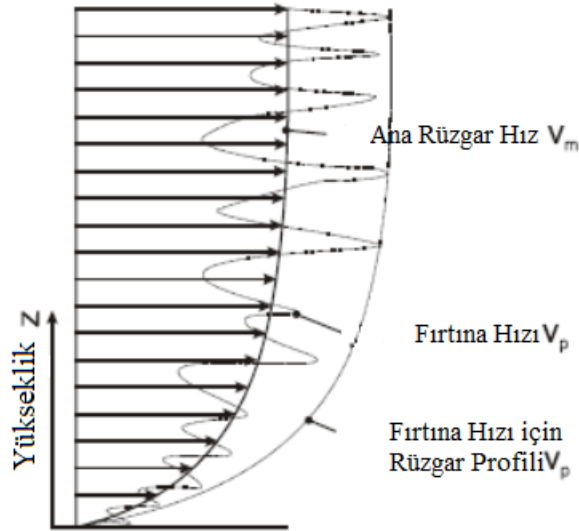
$z_{min}$ : Minimum yükseklik



Şekil 7. Temel rüzgâr hızı için Avrupa rüzgâr haritası

Figure 7. European wind map for basic wind speed





Şekil 8. Yüksekliğe (z) bağlı rüzgâr hızı değişimi  
Figure 8. Wind speed change due to height (z)

Yukarıdaki formülde verilen parametreler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Arazi grupları

Table 4. Land groups

Arazi Grubu	Arazi karakteristiği	z <sub>o</sub> (m)	z <sub>min</sub> (m)
0	Deniz veya sahil bölgesi	0.003	1.0
I	Göller; engel olmayan	0.010	1.0
II	Zayıf bitki örtüsü; engel yüksekliğinin 20 katından daha az uzunluktaki izole edilmiş engel	0.050	2.0
III	Düzenli bitki örtüsü; Ormanlar, kenar mahalleler, köyler	0.300	5.0
IV	Ortalama yüksekliği en az 15 m olan binalarla en az %15'i kaplı olan alanlar	1.000	10.0

Fırtına hızı kabul edilen arazi grubuna bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$v_p(z) = v_m(z) \times G \quad (10)$$

$$G = \sqrt{c_e(z)} = \sqrt{1 + 7 \times I_v(z)} = \sqrt{1 + 7 \times \frac{\sigma_v(z)}{v_m(z)}} = \sqrt{1 + \frac{7 \times k_t}{c_o(z) \times \ln(z/z_o)}} \quad \text{ve } z \geq z_{min} \quad (11)$$

Burada,

G : Fırtına katsayısı

k<sub>t</sub> : Türbülans katsayısı (genellikle 1 alınır.)

Fırtına basıncı aşağıdaki formül ile elde edilir:

$$q_p(z) = q_b(z) \times [c_r(z)]^2 \times [c_o(z)]^2 \times \left[1 + \frac{7 \times k_t}{c_o(z) \times \ln(z/z_o)}\right] \quad (12)$$

Burada c<sub>o</sub>(z) = k<sub>t</sub> = 1.0 alınabilir.

$$\underbrace{q_p(z)}_{\text{maksimum basınç}} = \underbrace{q_b}_{\text{temel basınç}} \times \underbrace{[c_r(z)]^2}_{\text{rüzgâr profili}} \times \underbrace{\frac{7}{\ln(z/z_o)}}_{\text{fırtına katsayısı çarpanı}} \quad (13)$$

**Rüzgâr yükünün hesaplanması (Calculation of wind load)**

Rüzgâr yükü aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$F_w = c_s \times c_d \times c_f \times q_p(z_e) \times A_{ref} \quad (14)$$

Burada,

$F_w$  : Rüzgâr yükü

$c_s$  : Boyut katsayısı (1.0 alınabilir.)

$c_d$  : Dinamik katsayı (1.0 alınabilir.)

$c_f$  : Kuvvet katsayısı

$A_{ref}$  : Referans alanı

$z_e$  : Yapının zemin seviyesinden maksimum yüksekliği

**ASCE 7.05 rüzgâr yükü hesabı (ASCE 7.05 wind load calculation)**

Tasarım rüzgâr yükü binalar ve diğer yapılar için aşağıda verilen yöntemlerden biri ile hesaplanmalıdır:

- **Yöntem 1:** Yüksekliği düşük basit diyaframlı yapılar için basitleştirilmiş yöntem.
- **Yöntem 2:** Düzenli bir şekli olan binalar ve yapılar için analitik yöntem.
- **Yöntem 3:** Geometrik olarak karmaşık binalar ve yapılar için rüzgâr tüneli yöntemi.

**Yöntem 2: analitik yöntem (Method 2: analytical method)**

Temel rüzgâr hızı hesaplamak için rüzgâr yön katsayısı ve rüzgâr önem katsayısı aşağıda verilen çizelgelerden alınmalıdır.

**Çizelge 5. Rüzgâr yön katsayısı  $K_d$**

*Table 5. Wind direction coefficient*

Yapı Türü	Rüzgâr yön katsayısı $K_d$
<b>Binalar</b>	
- Ana rüzgâr yükü taşıyıcı sistem	0.85
- Bileşenler ve kaplamalar	0.85
<b>Kemer Çatılar</b>	0.85
<b>Bacalar, tanklar ve benzer yapılar</b>	
- Kare	0.90
- Altıgen	0.95
- Yuvarlak	0.95
<b>İşaret Levhaları</b>	0.85
<b>Uzay Kafes Sistemler</b>	0.85
<b>Kafesli Kuleler</b>	
- Üçgen, Kare, Dikdörtgen kesitler	0.85
- Diğer bütün kesitler	0.95

**Çizelge 6.** Binaların ve diğér yapıların sel, rüzgâr, kar, deprem ve buz yükleri için doluluk oranları sınıflandırması

*Table 6. Classification of occupancy rates for flood, wind, snow, earthquake and ice loads of buildings and other structures*

Yapı Türleri	Doluluk Oranı Sınıfı
İnsan hayatına göçme veya yıkım olaylarında çok az zarar gösteren binalar ve diğér yapılar: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zirai tesisler</li> <li>- Bazı geçici tesisler</li> <li>- Küçük depolama tesisleri</li> </ul>	I
Sınıflandırmada I, III, IV dışında kalan bütün binalar ve diğér yapılar	II
İnsan hayatına göçme veya yıkım olaylarında ciddi zarar gösteren binalar ve diğér yapılar: <ul style="list-style-type: none"> <li>- 300'den fazla insanın bir alanda toplandığı binalar ve diğér yapılar</li> <li>- 150'den fazla kapasiteli bakım tesisleri olan binalar ve diğér yapılar</li> <li>- 250'den fazla kapasiteli ilk ve orta okul tesisleri olan binalar ve diğér yapılar</li> <li>- 500'den fazla kapasiteli kolejler veya yetişkin eğitim tesisleri içeren binalar ve diğér yapılar</li> <li>- İlk yardım veya cerrahi tesisi bulunmayan 50 veya daha fazla hasta kapasiteli sağlık tesisleri</li> <li>- Gözaltı merkezi ve hapishaneler</li> </ul> <p>Yıkılması veya göçmesi durumunda çok önemli bir ekonomik etkiye veya gündün güne sivil hayatta kitlesel bozulmaya yol açacak, Sınıflandırmada IV'e girmeyen binalar ve diğér yapılar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Enerji yönetim istasyonları</li> <li>- Su arıtma tesisleri</li> <li>- Kanalizasyon arıtma tesisleri</li> <li>- Telekomünikasyon merkezleri</li> </ul>	III
Gerekli tesisler olarak tasarlanan binalar ve diğér yapılar: <ul style="list-style-type: none"> <li>- İlk yardım ve cerrahi tesisi olan hastaneler ve diğér sağlık tesisleri</li> <li>- Yangın, Kurtarma, Ambulans ve polis istasyonları ve ilk yardım araçları garajları</li> <li>- Kasırğa ve depremden sığınmak için tasarlanan acil sığınma evleri</li> <li>- Ulusal savunmada kritik bir önemi olan binalar ve diğér yapılar</li> <li>- Yangına müdahale için gerekli su basıncını sağlamayı sağlayan pompa yapıları ve su depolama tesisleri</li> </ul>	IV

**Çizelge 7.** Rüzgâr önem katsayısı

*Table 7. Wind importance coefficient*

Sınıf	Kasırğa olmamaya eğilimli bölgeler ve kasırğa olmaya eğilimli bölgeler V=85-100 mph ve Alaska	Kasırğa olmaya eğilimli bölgeler V>100 mph
I	0.87	0.77
II	1.00	1.00
III	1.15	1.15
IV	1.15	1.15

Çizelge 8'den maruz kalınan sınıf ve hız basıncı maruz kalma katsayısı yüzey pürüzlülüğü sınıfına bağılı olarak belirlenir ( $K_z$  ve  $K_h$ ).

Çizelge 8. Hız basıncı maruz kalma katsayıları  $K_z$  ve  $K_h$ Table 8. Speed pressure exposure coefficients  $K_z$  and  $K_h$ 

Zeminden yükseklik (z) (m)	Maruz Kalma			
	B		C	D
	Durum 1	Durum 2	Durum 1 ve 2	Durum 1 ve 2
0-4.6	0.70	0.57	0.85	1.03
6.1	0.70	0.62	0.90	1.08
7.6	0.70	0.66	0.94	1.12
9.1	0.70	0.70	0.98	1.16
12.2	0.76	0.76	1.04	1.22
15.2	0.81	0.81	1.09	1.27
18	0.85	0.85	1.13	1.31
21.3	0.89	0.89	1.17	1.34
24.4	0.93	0.93	1.21	1.38
27.4	0.96	0.96	1.24	1.40
30.5	0.99	0.99	1.26	1.43
36.6	1.04	1.04	1.31	1.48
42.7	1.09	1.09	1.36	1.52
48.8	1.13	1.13	1.39	1.55
54.9	1.17	1.17	1.43	1.58
61.0	1.20	1.20	1.46	1.61
76.2	1.28	1.28	1.53	1.68
91.4	1.35	1.35	1.59	1.73
106.7	1.41	1.41	1.64	1.78
121.9	1.47	1.47	1.69	1.82
137.2	1.52	1.52	1.73	1.86
152.4	1.56	1.56	1.77	1.89

**Yüzey Pürüzlülüğü (B):** Tek ailelik mesken veya daha büyük alana sahip sayısız yakın aralıklı engelleri olan diğer alanlar, şehir ve kenar mahalle alanları, ağaçlık alanlar.

**Yüzey Pürüzlülüğü (C):** Genellikle yüksekliği 9.1 m'den az olan dağınık engelleri olan açık arazi.

**Yüzey Pürüzlülüğü (D):** Düz, engebe olmayan alanlar ve kasırgaya eğilimli alanlar dışındaki su yüzeyleri. Bu kategori pürüzsüz çamurlu alanları, tuzlu bölgeleri ve parçalanmamış buz yüzeyleri içerir.

Rüzgar yükü hesabında kullanılacak olan topografik katsayı  $K_{zt}$  genellikle 1.0 alınabilir.

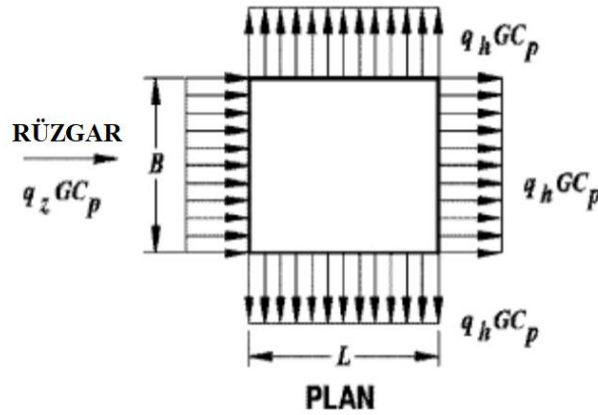
Rüzgâr yükü hesabında kullanılacak olan darbe etki katsayı  $G$  genellikle 0.85 alınabilir.

Dıştan gelen basınç katsayısı  $C_p$  aşağıdaki Çizelge 9'dan alınabilir.

**Çizelge 9.** Duvar basınç katsayısı  $C_p$

*Table 9.* Wall pressure coefficient  $C_p$

DUVAR BASINÇ KATSAYISI $C_p$			
YÜZEY	L/B	$C_p$	HIZ BASINÇ TÜRÜ
Rüzgâr tarafındaki duvar	Bütün değerler için	0.8	$q_z$
Rüzgâr altı tarafındaki duvar	0-1	-0.5	$q_h$
	2	-0.3	$q_h$
	$\geq 4$	-0.2	$q_h$
Yan duvar	Bütün değerler için	-0.7	$q_h$



**Şekil 9.** Rüzgâr yükü dağılımı

*Figure 9.* Wind load distribution

$q_z$  ve  $q_h$  değerleri aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$q_z = q_h = 0.0047 \times K_z \times K_{zt} \times K_d \times V^2 \times I \quad (\text{kg/cm}^2, V(\text{km/h})) \quad (15)$$

Elde edilen parametreler kullanılarak tasarım rüzgâr yükü (F) aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$F = q_z \times G \times C_p \times A_f \quad (16)$$

Burada,

$A_f$  : Tasarımda rüzgâr yönüne dik doğrultudaki duvar alanı ( $\text{m}^2$ )

**Prefabrik Yapıların Projelendirme ve Montaj Aşamasında Yapılması Gerekenler (Things to do during the design and assembly phase of prefabric buildings)**

Prefabrike yapılarda sorunların en yoğun yaşandığı süreci, montaj aşaması oluşturmaktadır. Yani, temel elemanlarının ve kiriş elemanlarının montajı prefabrikasyonda önemli bir sorundur. Doğru yerleştirilmeyen temel soketleri, özellikle diğer elemanların montajında, montaj toleranslarını etkilediği için sorunlar yaratmaktadır. Benzer durum, birleşim yerlerinde de karşımıza çıkmaktadır. Bunlara ilave olarak, yerinde döküm bağ hatıllarının, temel soketleriyle birlikte yapılması gerekirken, birçok yapıda, tüm montaj işlemlerinin bitirilmiş olmasına karşın halen yapılmamış oldukları da gözlemlenmiştir. Yapıların tamamlanması için girişimciye verilen resmi sürenin uzunluğu, yaptırımların yetersizliği, girişimcinin yeterli finansmana sahip olmaması ve bilgi eksikliği nedeniyle montaj süreci, çok uzayabilmektedir. Oysa üretici kuruluşların, montaj için önerdikleri süre ortalama olarak 10 gündür. Dolayısıyla; sistem bütünü içinde tamamen rijitleştirilemeyen yapı elemanları; kısa süre içinde zararsız olan, ancak, uzun süre içinde olumsuz olarak etkileyen hareketler ve yükler altında kalabilir.

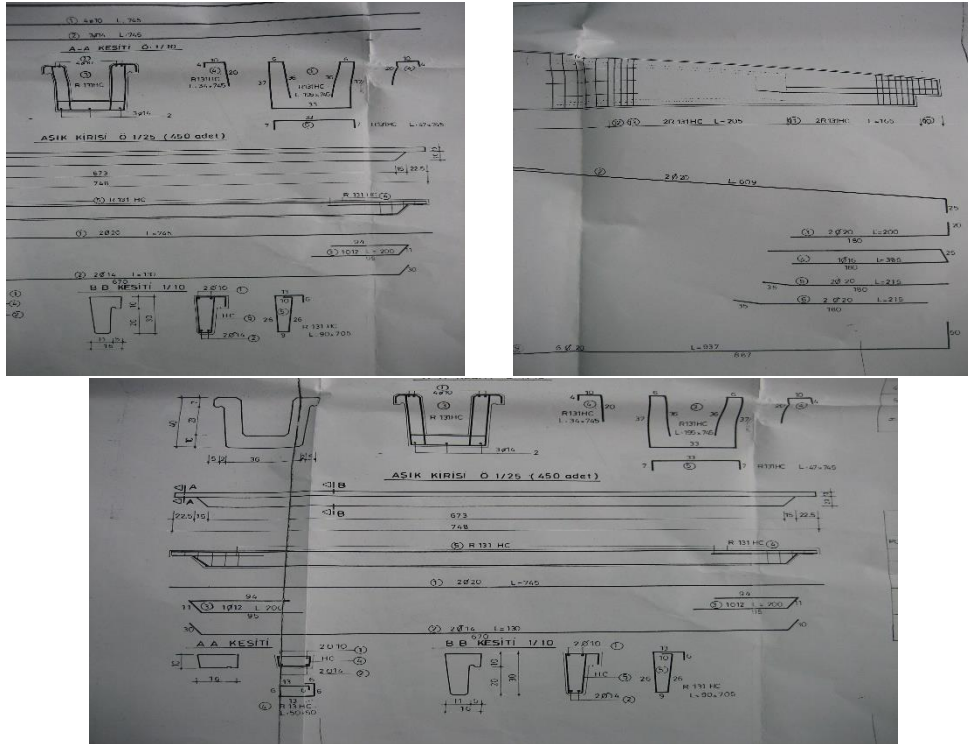
Birleşim bölgeleri zayıf prefabrike çerçevelerde gerekli önlemler alınmadığı takdirde şiddetli

depremler veya montaj aşamasında beklenmeyen yatay yük etkileri altında sorun çıkması kaçınılmaz olacaktır. Zayıf bağlantılı (mafsal gibi) çerçeveler yatay yükler altında yeterli stabiliteye sahip olmayacak ve yeterli enerjiyi tüketemeyecektir. Bu tür çerçevelerden oluşan yapıların yatay yükler etkisinde sağlıklı davranmalarını sağlamanın en uygun yolu, tüm yatay kuvvetleri alabilecek kapasitede perde duvarlar oluşturulmalıdır. Perde duvarların yapılması maliyetli olması nedeniyle tercih edilmediği durumlarda sistemin bir an önce projesine uygun hale getirilmesi için çalışılmalıdır. Montaj aşamasında kullanılan malzemeler projesine uygun seçilmeli ve uygulama aşaması çok çabuk tamamlanmalıdır. Birleşim noktalarında seçilen kamalar ve birleştirme malzemelerinin kalınlıkları uygun hesaplanmalı kesme kuvvetlerini ve sıyrılma boyu iyi hesaplanmalıdır. Bulon veya diğer birleştirme malzemeleri seçilirken işlem hızlı ve dayanıklı malzemeler ile yapılmalı boşluklar hemen doldurulmalıdır. Birleşme noktasının mafsalı davranmasına izin verilmemelidir. Herhangi bir rüzgâr anında yapacağı yatay yer değiştirmeler önceden hesaplanmalı ve bulon kalınlıkları ile boyları en kötü şartlara göre seçilmelidir. Eğer sistemde tüm yatay yükü alabilecek kapasitede perde duvar varsa, çerçeve elemanlarının bağlantılarının daha zayıf olmasında bir sakınca görülmeyebilir. Tek katlı çerçevelerde yapı perdesiz de olsa zayıf birleşimlere(mafsal gibi) izin verilebilir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

### Montaj Hatası Sonucunda Rüzgâr Etkisinde Yıkılmış Bir Prefabrike Yapı Örneği (Example of a Prefabricated Building Destroyed as a Result of Wind Failure)

Konya ili sınırları içerisinde bulunan bir prefabrik sanayi tesisi yapım aşamasında rüzgar yüküne maruz kalmıştır. Yapılan incelemelerde proje aşamasında özellikle makas kirişi ve aşık kirişlerinde yeterli tedbirlerin alındığı askı donatısı, kiriş uç bölgesi etriye sıklaştırmasının yapıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Proje detayları  
Figure 10. Project details

Sahada yapılan incelemelerde ise donatı detaylarının projeye uygun olduğu görülmüştür (Şekil 11).

Ancak makas ve aşık kirişlerinin çoğunluğunda uç bölgelerde kesme hasarları tespit edilmiştir (Şekil 12). Oluşan kesme hasarlarının yapı tamamlanmadan maruz kaldığı rüzgâr yükünün etkisi ile birleşim bölgelerinde zorlanmalara neden olmuştur. Bağlantıların doğru yapılmaması nedeni ile yapı elemanları bu bölgede kesme hasarına maruz kalmıştır (Şekil 13).



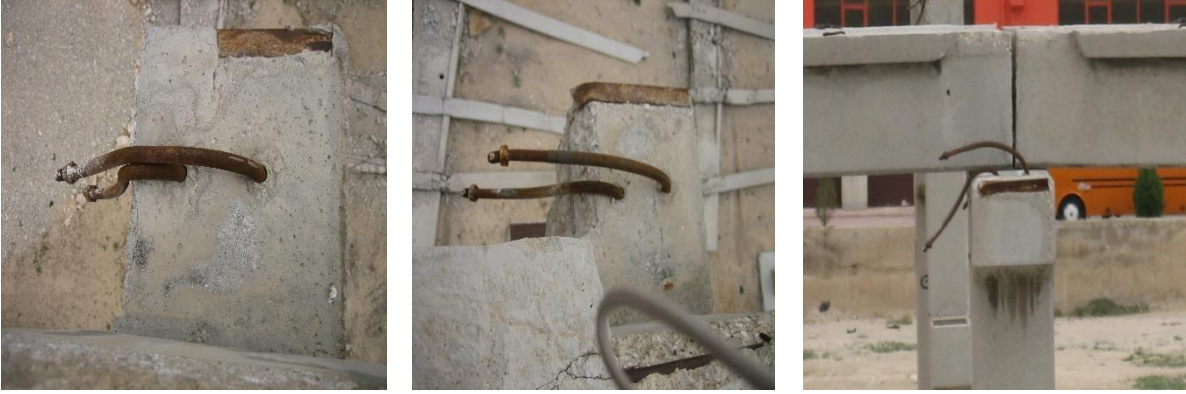
Şekil 11. Aşık kiriş donatı detayı

*Figure 11. Detail of beam girders*



Şekil 12. Kirişlerde oluşan kesme hasarları

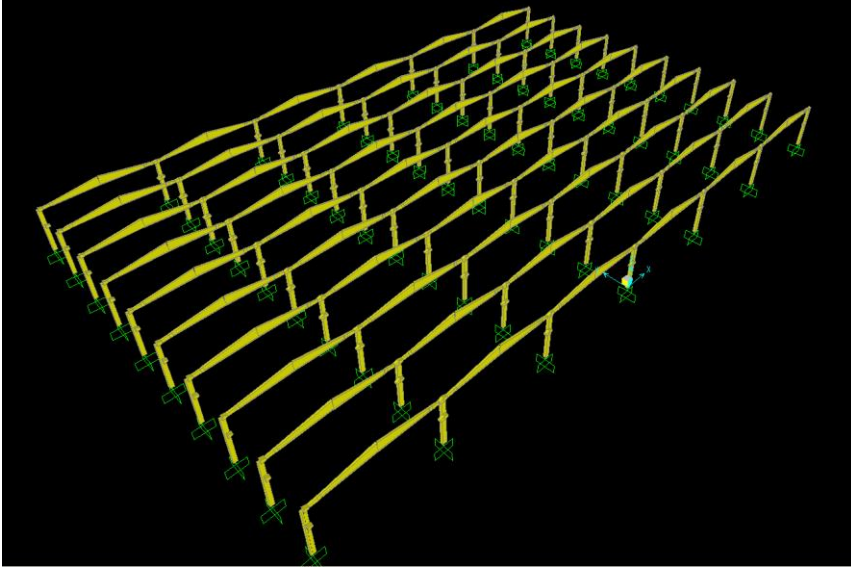
*Figure 12. Cutting damage to beams*



Şekil 13. Bağlantı bölgelerinde oluşan hasarlar

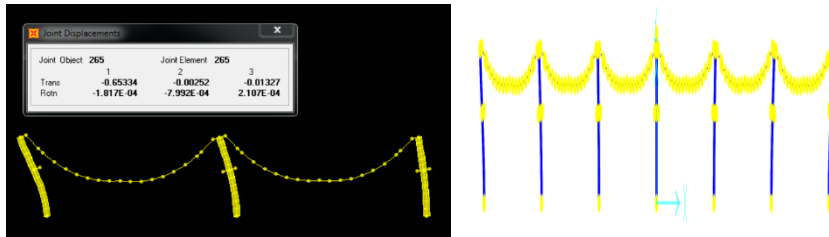
Figure 13. Damage to the connection areas

Sonlu elemanlar metodu ile yapının modeli oluşturularak (Şekil 14) yapılan analizde ise yapının aslında yeterli rijitlikte ve dayanımda olduğu ancak montaj sırasında yapılan hataların yapıda hasara neden olduğu gözlemlenmiştir. Yapım aşamasında 0.9G+1.3W rüzgar yüklemesine maruz bırakılan modelde aşıklarda oluşan yer değiştirmeler Şekil 15’ de verilmiştir. Aşık ve makas uçlarında oluşan kesme kuvvetleri ise proje ile uyumlu olarak Şekil 16’da verildiği gibi elde edilmiştir. Ancak giriş bağlantı noktalarındaki hatalar nedeni ile aşık kirişlerdeki zorlanmalar makas kirişlerde burulmalara neden olmuştur. Yapı modelinde doğru bağlantı modeli ile elde edilen burulma momenti (Şekil 17) değerlerinin çok daha üzerinde burulma momentleri oluşmuştur.



Şekil 14. Yapı modeli

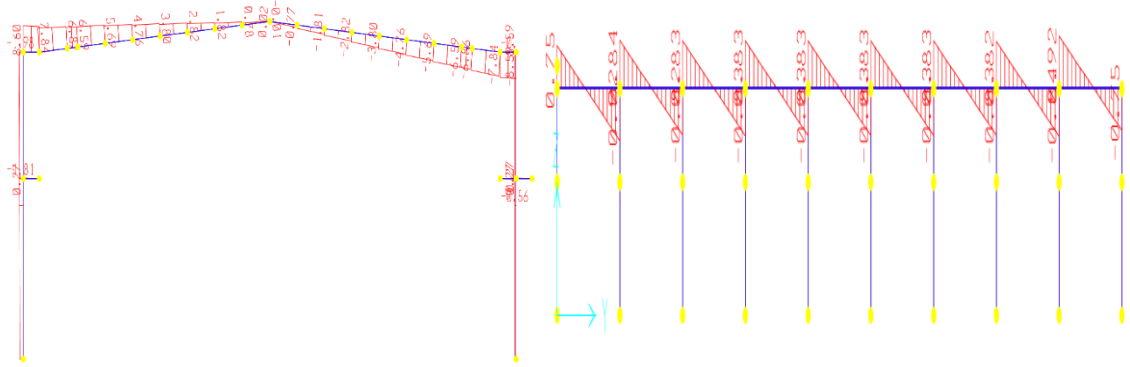
Figure 14. Building model



Şekil 15. Aşıklarda oluşan yer değiştirmeler

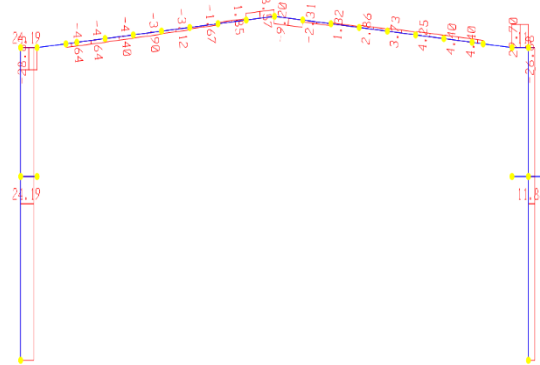
Figure 15. Displacements in beams





Şekil 16. Aşık ve makas kiriş uçlarında oluşan kesme kuvvetleri

Figure 16. Shear forces at beam ends



Şekil 17. Makas kirişte oluşan burulma momenti

Figure 17. Torsional moment in the shear beam

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Sonuç olarak, betonarme ve prefabrike bir yapının deprem ve rüzgar dahil çeşitli yük etkileri altında sağlıklı bir davranış gösterebilmesi için, hesap yeterli değildir. Hesap kadar önemli olan, iyi bir sistem seçilmesi, boyutların doyurucu olması, donatının bilinçli detaylandırılması ve yapıma gereken özenin gösterilmesidir. Sistem seçimi, hesap ve detaylandırmada önkoşul, iyi bir davranış bilgisidir.

Ülkemizde gözlenen hasar ve göçmelerin çok büyük bir yüzdesi hesap yanlışlıklarından değil, sistem ve detay hataları ile özensiz yapımdan kaynaklanmaktadır [8]. Ülkemizde prefabrike elemanlarının kullanım potansiyelini artırmak amacı güden hazır proje uygulama yaklaşımını terk etmeli; malzeme ve iklim şartlarını dikkate alan yerel anlamda özel projeler hazırlama yöntemi benimsenmelidir.

Prefabrike sistemlerin en önemli konusu olan birleşim noktaları, elemanların cinsine ve birleşim yöntemlerine göre çok çeşitli olabilmektedirler. Yatay ve düşey yüklere karşı güvenli olma bu noktaların önemini artırmaktadır. Uygun bir birleşim; teknik, ekonomik ve estetik şartları aynı zamanda yerine getirebilmektedir. Prefabrike elemanlar arasında veya prefabrike elemanlarla yerine dökme beton arasındaki birleşimlerin ve bir birleşim çeşidi olan mesnetlerin projelendirilmesinde aşağıdaki hususlara çok dikkat edilmesi gerekir. Buna göre;

- Birleşim veya mesnet, etkisi altındaki normal kuvvet, eğilme ve burkulma momenti gibi zorlamaları, güvenlikle birleşen elemanların birinden ötekine aktarabilmelidir.
- Birleşim o yapının ömrü boyunca karşılaştacağı yükleri taşıyabilecek dayanımda olmalıdır.
- Birleşim noktaları sürekli bir davranış göstermelidir.
- Birleşimin süneklik katsayısı en az 4 olmalıdır.
- Birleşimin hareket serbestliği (hacim değiştirme) olmalıdır.
- Birleşim veya mesnetteki dönme, yer değiştirme ve deformasyonlarla, birleşen elemanların

birbirine göre deformasyonları kabul edilebilir, sınırlar içinde olmalıdır.

- Birleşim ve mesnetler kolayca kontrol edilmeli ve gerekiyorsa düzeltme yapılabilirdir.
- Birleşim ve mesnetler korozyona karşı korunmalı ve yangına dayanıklı olmalıdır.
- Görünüş (estetik) olarak yapıya katkıda bulunmalıdır.
- Birleşim ve mesnet hesaplarında, sıcaklık değişimi ve sünme etkileri hesaba katılmalı ve bu hesaplar TS. 500'deki esaslara uygun olmalıdır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Cope, A. D., Gurley, K. R., Gioffre, M. ve Reinhold, T. A., 2005, Low-rise Gable Roof Wind Loads: Characterization and Stochastic Simulation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93 (2005), 719-738.
- Demirel, F. ve Ulukavak, G., 1998, Endüstri Yapıları Üretiminde Kullanılan Prefabrike Betonarme İskelet Sistemler ve Ankara'dan Bir Örnek; ANKA-PVC, *Beton Prefabrikasyon Dergisi*, 48, 12-16.
- Ekinci, C. E., 1995, Avrupa Birliği'ne Tam Üyelik Sürecinde Türk Prefabrikasyon Sektörünün İncelenmesi, *Beton Prefabrikasyon Dergisi*, 35, 5-8.
- Ekinci, C. E., Eminel, M. ve Özçetin, Z., 2007, Prefabrikasyonda Doğrular-Yanlışlar. 12. Beton Prefabrikasyon Sempozyumu. İstanbul, Türkiye: 1-9.
- Ekinci, C. E., 2008, Bordo Kitap Yapı ve Tasarımcının İnşaat El Kitabı, *Ankara, Data Yayınları*, p.
- Ersoy, U., 1987, Çerçeve Türü Prefabrike Yapılar için Hesap İlkeleri. 2. Prefabrikasyon Sempozyumu. Ankara.
- Gönül, H. ve Demirel, F., 2003, Prefabrike Endüstri Yapıları Üzerine Bir Alan Araştırması: Diyarbakır Birinci Organize Sanayi Bölgesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 18 (1), 169-184.
- Guirguisa, N. M., Abd El-Aziz, A. A. ve Nassief, M. M., 2007, Study of Wind Effects on Different Buildings of Pitched Roofs, *Desalination*, 209, 190-198.
- Ham, H. J. ve Bienkiewicz, B., 2003, Characteristics of Roof Peak Pressures on Model of The TTU Test Building. 11th International Conference on Wind Engineering. Lubbock, TX: 957-964.
- Huang, G., Luo, Y., Gurley, K. R. ve Ding, J., 2016, Revisting Moment-Based Characterization for Wind Pressures, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 151 (2016), 158-168.
- Kumar, K. S. ve Stathopoulos, T., 1998, Power Spectra of Wind Pressures on Low Building Roofs, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, 665-674.
- Kurç, Ö., Kayışoğlu, B., Shojaee, S. M. N. ve Uzol, O., 2012, Yüksek Binalarda Rüzgar Etkilerinin Rüzgar Tüneli Deneyleriyle Tespiti, *İMO Teknik Dergi*, 389, 6163-6186.
- Özmen, Y. ve Baydar, E., 2016, Experimental Investigation of Wind Pressure Fields on Buildings with Gabled Roofs Having Different Pitch Angles, *Journal of Thermal Science and Technology*, 36 (2), 7-17.
- Rigato, A., Chang, P. ve Simiu, E., 2001, Database-Assited Design, Standardization, and Wind Direction Effects, *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 127 (8), 855-860.
- Saathoff, P. J. ve Melbourne, W. H., 1989, The Generation of Peak Pressures in Separated/Reattaching Flows, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 32 (121-134).
- Sadek, F. ve Simiu, E., 2002, Peak Non-Gaussian Wind Effects for Database-Assisted Low-Rise Building Design, *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 128 (5), 530-539.

## DEPREM BÖLGESİNDEKİ BAZI ÜLKELERDE EŞDEĞER DEPREM YÜKÜ METODUNUN KARŞILAŞTIRILMASI

<sup>1</sup>Mehmet UZUN, <sup>2</sup>Hasan Hüsnü KORKMAZ

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KONYA

<sup>2</sup>Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KONYA

<sup>1</sup>mehmetuzun@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>hhk73@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 16.01.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.10.2018)

**ÖZ:** Deprem hareketinin yapılar üzerinde yıkıcı bir etkisi bulunmaktadır. Bu etkinin yapıların tasarımı sırasında gerçeğe en yakın şekli ile hesap edilmesi ve tasarımın buna göre yapılması toplumun can güvenliği açısından çok büyük önem arz etmektedir.

Deprem hareketinin yapıya etkisinin hesaplanması için birçok metot bulunmaktadır. Bu metotlar içerisinde en sade, en anlaşılır ve uygulaması en kolay olan metot Eş Değer Deprem Yükü Metodudur. Eş Değer Deprem Yükü Metodu genel olarak yapıya deprem esnasında etki edecek yatay yükün belirli katsayılar yardımı ile hesaplanmasına dayanmaktadır. Yapıların deprem sırasındaki karmaşık davranışını basite indirmek için kullanılan bazı katsayılar geliştirilmiştir. Kullanılan katsayılar her ülke için değişmektedir.

Bu çalışmada ülkemiz yönetmeliğinde yer alan Eş Değer Deprem Yükü Metodunun farklı ülkelerdeki Eş Değer Deprem Yükü Metotları ile kıyaslanması yapılmıştır. Yapılan çalışmada 6 katlı betonarme bir yapı ele alınmıştır. Yapının x ve y yönlerinde 2 açıklığı bulunmaktadır. Yapının ağırlığı ve bilinen bazı özellikleri kullanılarak ETABS programında üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Yapının doğal titreşim periyodu programdan alınarak yapıya etki edecek taban kesme kuvvetleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Deprem yönetmelikleri, Eş değer deprem yükü metodu, Sonlu elemanlar metodu, Taban kesme kuvveti, TDY – 2007.

### Comparison of Equivalent Earthquake Methods in some Countries in Earthquake Zone

**ABSTRACT:** Earthquakes have detrimental effects on the structures. The loads due to earthquakes must be correctly determined and structural analysis and designs must be performed according to that predicted lateral loads.

For the representation of lateral seismic forces on the structures, several methods are available. The simplest method among them is the “equivalent lateral load method”. This method depends on the calculation of lateral load that acts to the structure during seismic activity by multiplying the weight with some variable constants. Several constants are developed to represent complex behavior. These variable constants are changing for every countries code or regulation.

In this study, equivalent earthquake load method defined in Turkish Earthquake Code is compared with the regulations on different countries code. A 6-storey reinforced concrete structure is considered in the study. There are 2 spans in the x and y directions of the build. Three-dimensional model is created in the ETABS program using the weight of the structure and some known features. The natural vibration period of the structure is taken from the program and the base shear forces acting on the structure are calculated and compared.

**Key Words:** Base shear, Equivalent earthquake force method, Finite element method, Seismic codes, TEC-2007.

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyadaki en yoğun deprem kuşakları; yeryüzündeki depremlerin %81'inin oluştuğu Pasifik Deprem Kuşağı, %17'sinin oluştuğu Alp-Himalaya Deprem Kuşağı'dır. Türkiye ise bu deprem kuşaklarından Alp-Himalaya Deprem Kuşağı'nda yer almasından dolayı Dünyada depremselliği en yüksek olan ülkelerden birisidir. Deprem Bölgeleri Haritası'na göre, yurdumuzun %92'sinin deprem bölgeleri içerisinde olduğu, nüfusumuzun %95'inin deprem tehlikesi altında yaşadığı ve ayrıca büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajlarımızın %93'ünün deprem bölgesinde bulunduğu bilinmektedir (Ünal, 2012).

Deprem hareketi temelde harmonik bir dalga yayılımı olduğu için kuvvete dönüştürülmesi zordur. En basit hali ile depremin yapı üzerine etki eden bir ivme olduğu düşünülürse yapıda oluşturacağı etkiler bu ivmenin oluşturacağı eylemsizlik momenti ile hesaplanabilmektedir. Yapıya etki edecek bu ivmenin hesaplanması ise çok karmaşık bir konudur. Bu nedenle deprem kuvvetinin hesaplanması için birçok farklı metot ortaya çıkmıştır. Ülkemizde ve birçok farklı ülkede kabul görmüş ve yönetmeliklerde kullanılmasına müsaade edilen yöntemler Eşdeğer Deprem Yüğü Metodu, Mod Birleştirme Metodu, Zaman Tanım Alanında Analiz Metodudur.

Eşdeğer Deprem Yüğü Metodu bu metotlar içerisinde en kolay anlaşılır ve en kolay uygulanabilir olanıdır. Bu metodun temelinde yapının deprem altındaki davranışını etkileyen parametrelerin hesaba alınırken birer katsayı olarak değerlendirilmesi yatar. Kullanılacak bu katsayılar bazı özelliklere dayanmaktadır:

- Yapının ülke içerisindeki fay hatlarına olan uzaklığına
- Yapının yapılacağı zeminin türüne
- Yapıda kullanılacak taşıyıcı sistem türüne
- Yapılacak yapının kullanım amacına
- Yapının doğal titreşim periyoduna

Bu etkileri göz önüne almak için kullanılacak katsayıların değerleri çok büyük önem arz etmektedir. Alınacak değerler gerçekten uzaklaştıkça yapıya etki edeceğini düşünülen deprem kuvveti de gerçekten uzak değerler olacaktır. Gerçek değerden uzaklaşırken deprem kuvvetinin çok fazla artırılması yapıda taşıyıcı sistem elemanlarının kesitlerini artıracaktır. Kesitlerin artması malzeme kullanımını artırarak yapı maliyetlerinde gereksiz yere bir artışa neden olacaktır. Tam tersi düşünülecek olursa katsayıların yanlış alınmasından dolayı yapıya etki edecek deprem kuvveti gerçekten düşük hesaplanırsa deprem esnasında yeterli davranışı gösteremeyecek bir yapı ortaya çıkmış olacaktır.

Farklı birçok ülkede kullanılan Eşdeğer Deprem Yüğü Metodu'nda katsayılar da ülke ülke değişmektedir. Alınan bu farklı katsayılar hesap edilen deprem kuvvetini de değiştirmektedir. Yapılan bu çalışmada ülkemizde alınan katsayıların diğer ülkeler düşünüldüğünde ne kadar güvenli tarafta kaldığı ya da ne kadar yetersiz olduğu araştırılmıştır.

Tekince (2015) yaptığı çalışmada EC – 8 ve DBYBHY – 2007 yönetmeliklerine göre farklı taşıyıcı sistemlere sahip binaların yönetmeliklerde verilen Eşdeğer Deprem Yüğü Metodu ve Mod Birleştirme Metodlarına göre karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu çalışmada farklı zemin türleri, farklı kat sayıları, farklı beton sınıfları dikkate alınarak hesap yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre Eşdeğer Deprem Yüğü Metodu ile yapılan çözümler de elde edilen taban kesme kuvvetleri, görelî kat ötelemeleri, maksimum yer değiştirmeler, kirişlerde oluşan maksimum kesme kuvvetleri ve momentler daima Mod Birleştirme Metoduna göre büyük çıkmıştır. Ayrıca DBYBHY – 2007' de Eşdeğer Deprem Yüğü Metoduna göre yapılan analiz sonucunda elde edilen taban kesme kuvvetleri EC – 8 ' de elde edilen taban kesme kuvvetinden daha büyük çıkmıştır.

Taşkın (2012) yaptığı çalışmada EC – 8, ASCE – 7 ve DBYBHY – 2007 yönetmeliklerine göre 12 kattan oluşan betonarme bir yapıyı hem Eşdeğer Deprem Yüğü Metodu ile hem de Mod Birleştirme Metodu ile çözmüştür. Yapılan çözümde Sap2000 V15 programı kullanılmıştır. Yapıların buldukları ülkelerde depremin en yıkıcı etkiyi oluşturduğu bölgede oldukları kabul edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ise en elverişsiz durumların EC – 8 yönetmeliğine göre elde edildiği en düşük kesit tesirlerinin ise DBYBHY – 2007 yönetmeliğinde elde edildiği ortaya konulmuştur. Ayrıca EC – 8 ve ASCE – 7 yönetmeliklerinde yük kombinasyonları birbirine yakın katsayılar içerdiği için kesit tesirleri de oldukça birbirine yakın çıkmıştır.

Naimi (2010) yaptığı çalışmada İran deprem yönetmeliği ve DBYBHY – 2007 yönetmeliğine göre 5 katlı ve 10 katlı betonarme perdeli binalarda Eşdeğer Deprem Yüğü Metodunu kullanarak analizler yapmıştır. Sap2000 programı kullanılarak yapıda oluşan yer değiştirmeler, eğilme momentleri, taban kesme kuvvetleri ve normal kuvvet sonuçları elde edilmiştir. Bunlar ise iki yönetmelik için ayrı ayrı kıyaslanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ise DBYBHY – 2007 koşullarına göre elde edilen kesit tesirleri İran yönetmeliğine göre daha büyük çıkmaktadır.

Bu çalışmada, 6 farklı ülkenin deprem yönetmelikleri “Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi” açısından incelenmiştir. Çalışmada 6 katlı betonarme bir bina modeli oluşturulmuştur. Binanın x ve y yönünde 2 açıklığı vardır. Binaya mevcut döşemelerden ve kolon ve kiriş sisteminden gelen yükler haricinde, kirişler üzerinde duvar yükü, döşemeler üzerinde ise hareketli yük ve kaplama yükleri tanımlanmıştır. Yapının modeli ETABS programında hazırlanarak depreme esas ağırlığı ve doğal titreşim periyodu programdan alınmıştır. Elde edilen veriler ile her yönetmelik için yapıya etki etmesi beklenen deprem yükü hesaplanmıştır.

#### MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada farklı ülkelere ait deprem yönetmeliklerinde bulunan eşdeğer deprem yükü metodlarının karşılaştırması yapılmıştır. Çalışma için 6 farklı ülkeye ait deprem yönetmeliği incelenmiştir.

#### Hindistan Deprem Yönetmeliği (Criteria For Earthquake Resistant Design Of Structures – IS 1893 )

Depremde etki eden yatay yük yapının deprem hesabına esas bina ağırlığı ile bir katsayının çarpılması sonucu bulunmaktadır. Taban kesme kuvveti Eşitlik 1 formülü ile hesaplanmaktadır.

$$V_B = A_h \cdot W \quad (1)$$

$V_B$  :Toplam taban kesme kuvveti

$A_h$  :Tasarım deprem yükü katsayısı

$W$  : Deprem hesabına esas yapı ağırlığı

Eşdeğer Deprem Yüğü' nün hesaplanması için  $A_h$  katsayısının Eşitlik 2 formülü yardımıyla hesaplanması gerekmektedir.

$$A_h = \frac{Z \cdot I \cdot S_a}{2 \cdot R \cdot g} \quad (2)$$

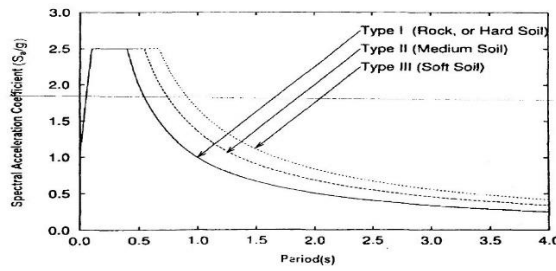
$A_h$  : Tasarım deprem yükü katsayısı

$Z$  : Deprem bölgesi katsayısı (Çizelge 2)

$I$  : Bina önem katsayısı (Çizelge 3)

$S_a / g$  :Ortalama bina ivme katsayısı

$R$  :Yapının deprem hasar performansına bağlı olarak seçilen deprem yükü azaltma katsayısıdır. Yapının gevrek ya da sünek olmasına bağlı olarak belirlenir. (Çizelge 4)



Şekil 1. Spektrum eğrisi (IS 1893)

Figure 1. Spectrum graphic (IS 1893)

$S_a / g$  oranı Şekil 1' deki grafik yardımı ile veya Eşitlik 3, 4 ve 5. formülleri ile hesaplanabilmektedir:

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1 + 15T & 0,00 \leq T \leq 0,10 \\ 2,50 & 0,10 \leq T \leq 0,40 \\ 1,00/T & 0,40 \leq T \leq 4,00 \end{cases} \quad (\text{Tip 1 zemini için}) \quad (\text{IS 1893}) \quad (3)$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1 + 15T & 0,00 \leq T \leq 0,10 \\ 2,50 & 0,10 \leq T \leq 0,55 \\ 1,36/T & 0,55 \leq T \leq 4,00 \end{cases} \quad (\text{Tip 2 zemini için}) \quad (\text{IS 1893}) \quad (4)$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1 + 15T & 0,00 \leq T \leq 0,10 \\ 2,50 & 0,10 \leq T \leq 0,67 \\ 1,67/T & 0,67 \leq T \leq 4,00 \end{cases} \quad (\text{Tip 3 zemini için}) \quad (\text{IS 1893}) \quad (5)$$

Doğal titreşim periyodu yapının kendi titreşimini ifade eder. Bu periyodun hesaplanması için mevcut yapıya bir titreşim verilerek doğal titreşim periyodu hesaplanabilir. Ancak mevcut olmayan bir yapının doğal titreşim periyodunu hesaplamak için geliştirilmiş bazı formüller mevcuttur. Hindistan yönetmeliğinde tuğla duvarsız betonarme çerçeve için kabul edilen formül Eşitlik 6' da verilmiştir.

$$T_a = 0,075 \cdot h^{0,75} \quad (6)$$

$T_a$  : Doğal titreşim periyodu (s)

$h$  :Bina toplam yüksekliği (m)

Yukarıda verilen formüllerde kullanılacak katsayılar Çizelge 1, 2, 3 ve 4'te verilmiştir:

Çizelge 1. Zemin Sınıfları (IS 1893)

Table 1. Soil classes (IS 1893)

ZEMİN TÜRÜ	AÇIKLAMA
Tip 1	Kaya ve sert zeminler ( $N > 30$ )
Tip 2	Orta zeminler ( $10 \leq N \leq 30$ )
Tip 3	Yumuşak zeminler ( $10 > N$ )

N:SPT değeri

Çizelge 2. Deprem bölgesi katsayısı (IS 1893)

Table 2. Seismic zone factors (IS 1893)

DEPREM BÖLGESİ	II	III	IV	V
DEPREM YOĞUNLUĞU	Seyrek	Orta	Yoğun	Aşırı yoğun
Z	0,10	0,16	0,24	0,36

**Çizelge 3.** Bina önem katsayıları (IS 1893)*Table 3. Building importance factors (IS 1893)*

SIRA NO	YAPI TÜRÜ	KATSAYI
1	Önemli hizmet binaları ve hastane, okul gibi kamu binaları; acil durum binaları, televizyon istasyonları, radyo istasyonları, tren yolu istasyonları, sinemalar gibi büyük yığılmaların olduğu salonlar	1,5
2	Diğer bütün binalar	1,0

**Çizelge 4.** Taşıyıcı sistem davranış katsayısı (IS 1893)*Table 4. Structural system behaviour factors (IS 1893)*

SIRA NO	TAŞIYICI SİSTEM TÜRÜ	R
1	Normal betonarme eğilmeye çalışan çerçeve sistem (OMRF)	3,0
2	Özel betonarme eğilmeye çalışan çerçeve sistem (SMRF)	5,0
3	Normal betonarme perdeli sistem	3,0
4	Sünek betonarme perdeli sistem	4,0
5	Normal perdeli OMRF karma sistem	3,0
6	Normal perdeli SMRF karma sistem	4,0
7	Sünek perdeli OMRF karma sistem	4,5

**Yeni Zelanda Deprem Yönetmeliği** (*General Structural Design Loadings For Buildings – NZS 4203:1992*)

Yapıya depremden dolayı etki edecek taban kesme kuvveti yapının deprem hesabına esas olan ağırlığının tasarım deprem yükü katsayısı ile çapılması sonucu bulunur (Eşitlik 7).

$$V = W_t \cdot C \quad (7)$$

$V$  : Toplam taban kesme kuvveti

$W_t$  : Deprem hesabına esas yapı ağırlığı

$C$  : Tasarım deprem yükü katsayısı

Deprem yükünün Eşdeğer Deprem Yükü Metodu ile hesaplanabilmesi için gerekli olan tasarım deprem yükü katsayısı ile ilgili formüller Eşitlik 8 ve 9' da verilmiştir.

$$C = C_b(T_1, \mu) \cdot R \cdot Z \cdot L_u T_1 > 0,4 \quad (8)$$

$$C = C_b(0,4, \mu) \cdot R \cdot Z \cdot L_u T_1 \leq 0,4 \quad (9)$$

$C$  : Tasarım deprem yükü katsayısı

$Z$  : Deprem bölgesi katsayısı

$C_b$  : Ortalama bina ivme katsayısı (Çizelge 5)

$R$  : Yapının risk durumu (Yapı türüne bağlı olarak Çizelge'den seçilir.)

$\mu$  : Süneklik katsayısı (Yapının taşıyıcı sistem türüne göre Çizelge 8'den seçilir.)

$L_u$  : Sınır durum katsayısı (Servis yüklerinin aşılması durumunda 1/6, çökme durumu anında ise 1 alınmaktadır.)

$T_1$  : Doğal titreşim periyodu

Doğal titreşim periyodu hesaplanırken yapıya önceden uygulanan sanal bir yükleme için katların ağırlık merkezlerinin yapacağı yer değiştirmeler hesaplanmaktadır. Bu hesaplanan yer değiştirmeler ve her bir katın kendi ağırlığı kullanılarak yönetmelikte verilen Eşitlik 10 formülü ile yapının doğal titreşim periyodu hesaplanmaktadır.

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot u_i^2)}{g \cdot \sum_{j=1}^n (F_j \cdot u_j)}} \quad (10)$$

$T_1$  : Doğal titreşim periyodu

$W_i$  :Herhangi bir i. katın deprem hesabına esas ağırlığı

$u_i$  :Yapılan sanal yükleme sonucu elde edilen herhangi bir i. katın ağırlık merkezinin yaptığı deplasman

$F_j$  :Herhangi bir i. kata yüklenen sanal kuvvetin değeri

$g$  : Yer çekim ivmesi

$n$ :Yapıdaki toplam kat sayısı

Hesaplamlarda kullanılan  $C_b$  katsayısı yönetmelikte Çizelge 5'teki gibi verilmiştir.

**Çizelge 5.** Hesaplanmış deprem ivmesi katsayıları (NZS 4203:1992)

*Table 5. Calculated earthquake acceleration factors (NZS 4203:1992)*

PERİYOT (s)	YAPISAL SÜNEKLİK KATSAYISI ( $\mu$ )					
	1,0	1,25	2,0	3,0	4,0	6,0
0	0,40					
0,10	0,80					
0,15	1,00					
0,20	1,00					
0,25	0,96					
0,30	0,89					
0,35	0,84					
0,40	0,80	0,69	0,47	0,38	0,28	0,20
0,50	0,73	0,63	0,43	0,34	0,25	0,17
0,60	0,67	0,58	0,39	0,31	0,22	0,14
0,70	0,62	0,53	0,35	0,27	0,19	0,12
0,80	0,57	0,49	0,32	0,25	0,17	0,107
0,90	0,53	0,45	0,29	0,22	0,15	0,095
1,00	0,50	0,42	0,26	0,20	0,13	0,087
1,50	0,33	0,27	0,17	0,127	0,08	0,056
2,00	0,25	0,20	0,13	0,097	0,06	0,042

Yönetmelikte üç farklı zemin tipi belirlenmiştir. Zemin sınıfları birden fazla kriter ile birbirinden ayrılmaktadır. Zemin türleri Çizelge 6' da verilmiştir.

**Çizelge 6.** Zemin Sınıfları (NZS 4203:1992)

*Table 6. Soil classes (NZS 4203:1992)*

ZEMİN TÜRÜ	AÇIKLAMA
a) Kaya ve çok sert zeminler	- 20 m' den daha az drenajsız kesme dayanımı 100 kPa'ı aşan kohezyonlu sert malzeme veya - $N_1 > 30$ olan 20 m' den az çok yoğun kum veya - $N_1 > 30$ olan 25 m' den az yoğun kumlu çakıl
b) Orta zeminler	a veya c' ye dahil olmayan zeminler
c) Esnek veya derin zeminler	- Doğal titreşim periyotları 0,6 s' yi aşan zeminler

$N_1$ :SPT değeri



**Çizelge 7.**Yapının risk durumu (NZS 4203: 1992)*Table 7. Risk condition of building (NZS 4203:1992)*

KATEGORİ	YAPI TÜRÜ	KATSAYI
I	İnsan hayatını korumaya yönelik kullanılan ya da fonksiyonunu kaybetmesinin toplumda büyük bir etki yaratacağı binalar	1,3
II	İnsanların toplu halde buldukları binalar	1,2
III	Toplumda büyük değere sahip olan kamu binaları	1,1
IV	Diğer gruplara girmeyen binalar	1,0
V	İkincil öneme sahip yapılar (ev v.b.)	0,6

**Çizelge 8.**Yapısal süneklik katsayısı (NZS 4203:1992)*Table 8. Structural ductility factor (NZS 4203:1992).*

SIRA NO	TAŞIYICI SİSTEM TÜRÜ	$\mu$
1	Elastik yapılar	1,25
2	Sünekliği sınırlandırılmış sistemler:	
	a) Güçlendirilmiş çerçeveler	-
	b) Eğilmeye çalışan çerçeveler	3
	c) Perdeli sistemler	3
3	Sünek sistemler:	
	a) Güçlendirilmiş çerçeveler	-
	b) Eğilmeye çalışan çerçeveler	6
	c) Perdeli sistemler	5

**Yunanistan Deprem Yönetmeliği** (*Greek Code For Seismic Resistant Structures – EAK2000*)

Deprem hesabına esas yapı ağırlığı kullanılarak yapıya gelen deprem kuvveti hesaplanırken Eşitlik 11 formülü kullanılır.

$$V_0 = M \cdot \phi_d(T) \quad (11)$$

$V_0$  :Toplam taban kesme kuvveti

M : Deprem hesabına esas yapı ağırlığı

$\phi_d(T)$ : Spektral ivme değeri (Şekil 2)

**Çizelge 9.** Zemin Sınıfları (EAK2000)*Table 9. Soil classes (EAK2000)*

ZEMİN SINIFI	AÇIKLAMA
A	- Geniş bir alan boyunca ve çok yüksek derinlikte uzanan çok kuru olmayan kaya veya yarı kaya formatındaki zeminler. - Çok küçük oranda kil – silt karışımı içeren 70 m' den daha az kalınlığı olan tabakalar.
B	- Mekanik özellikleri bakımından granüler madde olarak sayılabilen çok kuru kaya ve zeminler - Kalınlığı 5 m' den fazla orta yoğunluktaki granüler madde tabakaları veya yüksek yoğunluktaki 70 m' den daha fazla kalınlığı olan granüler madde tabakaları
$\Gamma$	- Kalınlığı 5 m' den fazla olan düşük göreceli yoğunluktaki granüler madde tabakaları veya orta yoğunluktaki 70 m' den fazla granüler madde tabakaları
$\Delta$	- Toplam yüksekliği 12 m' den fazla olan yüksek plastisite indeksine sahip ( $I_p > 60$ ) yumuşak killer

$I_p$ :Plastisite indeksi

**Çizelge 10.** Zemin sınıflarına bağlı olarak spektrum eğrisi sınır değerleri (EAK2000)*Table 10. Spectrum graphic limit values according to the soil contions (EAK2000)*

ZEMİN SINIFI	A	B	$\Gamma$	$\Delta$
T <sub>1</sub> (s)	0,10	0,15	0,20	0,20
T <sub>2</sub> (s)	0,40	0,60	0,80	1,20

Yunanistan deprem yönetmeliğinde ülke deprem açısından 4 bölgeye ayrılmıştır. Deprem ivmesi ise Eşitlik 12'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$A = \alpha \cdot g \quad (12)$$

A: Deprem ivmesi

$\alpha$  :Deprem bölge katsayısı (Çizelge 11)

$g$  :Yerçekimi ivmesi

**Çizelge 11.** Deprem bölge katsayıları (EAK2000)*Table 11. Seismic zone factors (EAK2000)*

Deprem Bölgeleri	I	II	III	IV
$\alpha$	0,12	0,16	0,24	0,36

**Çizelge 12.**Bina önem katsayısı (EAK2000)*Table 12. Building importance factor (EAK2000)*

KATEGORİ	YAPI TÜRÜ	KATSAYI ( $\gamma_I$ )
$\Sigma 1$	Halk güvenliği açısından çok az öneme sahip binalar (tarımsal yapılar, ahır, hangar, baraka, kulübe v.b.)	0,85
$\Sigma 2$	Normal mesken binaları, ofis binaları, endüstriyel binalar, oteller	1,0
$\Sigma 3$	Okul binaları, meclis binaları, havaalanları, insanların büyük bir çoğunluğunun günün önemli bir bölümünü geçirdiği binalar, yapım maliyetleri çok yüksek olan binalar (özel endüstriyel binalar v.b.)	1,15
$\Sigma 4$	Deprem sırasında veya depremden hemen sonra kullanılması hayati önem taşıyan binalar (telekomünikasyon binaları, enerji binaları, hastaneler, yangın istasyonları v.b.), sanatsal olarak çok önemli olan anıtsal binalar (müzeler v.b.)	1,30

**Çizelge 13.**Davranış katsayısı (EAK2000)*Table 13. Structural behaviour factors (EAK2000)*

MALZEME	TAŞIYICI SİSTEM TÜRÜ	q
BETONARME	Çerçeveler ve karma sistemler	3,50
	Konsol çalışan duvarları olan yapılar	3,00
	Toplam yapı ağırlığının en az %50' sinin toplam bina yüksekliğinin 1/3' ünden yukarısında olan binalar	2,00

**Çizelge 14.** Temel katsayısı (EAK2000)

Table 14. Foundation factors (EAK2000)

TEMEL TÜRÜ	$\theta$
Bir tane temeli olan binalar	0,90
Radye temelli binalar	0,90
Kazık başlığı kirişlerine oturan kazık temelli binalar	0,90
En az iki temeli olan binalar	0,80
En az bir temeli ve bir radye temeli olan binalar	0,80
Yaygın bir kazık başlığı ile bağlı kazıklar üzerine oturan binalar	0,80

**Çizelge 15.** Sönüm oranları (EAK2000)

Table 15. Damping values (EAK2000)

Yapı Türü	Sönüm Oranı ( $\zeta$ ) (%)	
Çelik	Kaynaklı birleşim	2
	Bulonlu birleşim	4
Beton	Beton	3
	Betonarme	5
	Ön germeli	4
Yığma	Betonarme	6
	Sınırlandırılmış	5
Ahşap	Tutkallı birleşim	4
	Bulonlu birleşim	4
	Çivili birleşim	5

Yukarıdaki çizelgelerden alınan değerler kullanılarak ve yapının spektrum eğrisi dikkate alınarak yapıya gelecek deprem kuvvetini hesaplamada kullanılacak bir katsayı hesap edilir. Bu katsayının hesabında kullanılacak spektrum eğrisi Şekil 2' de verilmiştir. Zemin sınıfına göre spektrum eğrisini sınırlayan değerler Çizelge 10' da verilmiştir. Bu değerler yardımı ile katsayının nasıl hesaplanacağı Eşitlik 13, 14 ve 15 ile birlikte verilmiştir.

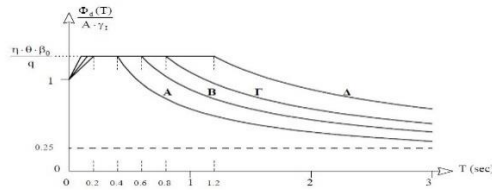
**Şekil 2.** Spektrum eğrisi (EAK2000)

Figure 2. Spectrum graphic (EAK2000)

$$0 \leq T < T_1 \phi_d(T) = \gamma_I \cdot A \left[ 1 + \frac{T}{T_1} \cdot \left( \frac{\eta \cdot \theta \cdot \beta_0}{q} - 1 \right) \right] \quad (13)$$

$$T_1 \leq T \leq T_2 \phi_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot \frac{\eta \cdot \theta \cdot \beta_0}{q} \quad (14)$$

$$T_2 < T \phi_d(T) = \gamma_I \cdot A \cdot \frac{\eta \cdot \theta \cdot \beta_0}{q} \cdot (T_2 / T)^{2/3} \quad (15)$$

$\phi_d(T)$  :Spektral ivme değeri

$\gamma_I$  :Yapı önem katsayısı (Çizelge 12)

A :Deprem ivmesi

T :Doğal titreşim periyodu

$T_1$  :Zemin sınıfına bağlı karakteristik periyot değeri

$T_2$  :Zemin sınıfına bağlı karakteristik periyot değeri

$\eta$  :Sönüm düzenleme katsayısı

$\theta$  :Temel katsayısı (Çizelge 14)

$\beta_0$  :Spektral büyütme katsayısı (2,50 alınabilir.)

q :Yapı davranış katsayısı (Çizelge 13)

$\zeta$  :Sönüm oranı (Çizelge 15)

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\zeta}} \geq 0,7$$

(16)

Sönüm düzenleme katsayısı Eşitlik 16 formülü ile hesaplanır.

$$\frac{\phi_d(T)}{A \cdot \gamma_I} \geq 0,25 \quad (17)$$

Eşitlik 17 formülü her durum için sağlanmalıdır.

Yönetmelikte doğal titreşim periyodunun hesaplanabilmesi için yaklaşık bir yöntem olan Eşitlik 18 formülü verilmiştir. Ancak literatürde kabul görmüş farklı yöntemlerin kullanılmasına da müsaade etmektedir.

$$T = 0,09 \cdot \frac{H}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{\frac{H}{H+\rho \cdot L}} \quad (18)$$

$T$  : Doğal titreşim periyodu

$H$ :Toplam bina yüksekliği

$L$  :Hesap yapılacak yönde binanın plandaki uzunluğu

$\rho$ : Hesap yönündeki toplam duvar kesit alanının hesap yönündeki toplam kolon ve duvar kesit alanına oranı

**İran Deprem Yönetmeliği** (*Iranian Code Of Practice For Seismic Resistant Design Of Buildings – Standard 2800*)

Yapıya etki edecek yatay yük Eşitlik 19 formülü ile hesaplanır.

$$V = C \cdot W \quad (19)$$

$V$ :Toplam taban kesme kuvveti

$W$  : Deprem hesabına esas yapı ağırlığı

$C$ : Deprem katsayısı

Yönetmelikte spektrum katsayısının doğal titreşim periyoduna bağlı olarak nasıl hesaplanacağı aşağıda tanımlanmıştır. Ayrıca Şekil 3' te zemin türlerine bağlı olarak spektrum eğrisi verilmiştir:

$$0 \leq T \leq T_0 B = 1 + S \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (20)$$

$$T_0 \leq T \leq T_s B = 1 + S \quad (21)$$

$$T_s \leq T B = (1 + S) (T_s / T)^{2/3} \quad (22)$$

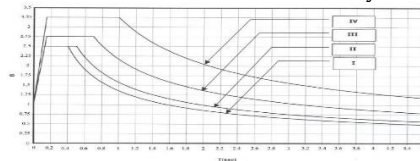
$B$  :Spektrum katsayısı

$T$  :Doğal titreşim periyodu

$T_0$  :Zemin sınıfına bağlı karakteristik periyot değeri

$T_s$  :Zemin sınıfına bağlı karakteristik periyot değeri

$S$  :Spektrum katsayısının hesaplanmasında kullanılan bir katsayı



**Şekil 3.** Spektrum eğrisi (Standard 2800)

*Figure 3. Spectrum graphic (Standard 2800)*

Doğal titreşim periyodu hesaplanırken öncelikle yapıya etki edecek rastgele seçilmiş bir deprem kuvveti katlara yönetmelikte belirtildiği gibi dağıtılır. Seçilen deprem kuvveti etkisi altındaki kat yer değiştirmeleri hesaplanır ve Eşitlik 23 yardımı ile doğal titreşim periyodu hesaplanır.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \delta_i^2)}{g \cdot \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \delta_i)}} \quad (23)$$

$T$  : Doğal titreşim periyodu

$W_i$ :Herhangi bir i. katın depreme esas ağırlığı

$\delta_i$  :Herhangi bir i. katın verilen deprem kuvveti etkisinde yaptığı yer değiştirme

$F_i$ : Herhangi bir i. kata uygulanan deprem kuvveti

$n$  :Toplam kat sayısı

$g$  :Yerçekim ivmesi

Yapıya etki edecek deprem kuvveti depreme esas yapı ağırlığının bir katsayı ile çarpılması sonucu bulunmaktadır. Bu katsayı Eşitlik 24 ile hesaplanmaktadır:

$$C = \frac{A \cdot B \cdot I}{R} \quad (24)$$

C:Deprem katsayısı

A:Deprem ivme katsayısı (Çizelge 17)

B:Spektrum katsayısı (Şekil 4)

I:Yapı önem katsayısı (Çizelge 19)

R:Yapı davranış katsayısı (Çizelge 20)

Deprem yönetmeliğinde toplamda 4 farklı zemin türü tanımlanmıştır. Bu zeminler Çizelge 16' da verilmiştir.

**Çizelge 16.** Zemin Sınıfları (Standard 2800)

*Table 16. Soil Classes (Standard 2800)*

ZEMİN SINIFI	AÇIKLAMA	$\bar{V}_s$ (m/s)
I	- Volkanik kayalar, rijit sedimenter kayalar ve metamorfik kayalar	>750
	- 30 metreden daha fazla kalınlığı olan rijit zeminler (sıkı kum ve çakıl, çok rijit kil)	$375 \leq \bar{V}_s \leq 750$
II	- Gevşek volkanik kayalar, gevşek sedimenter kayalar	$375 \leq \bar{V}_s \leq 750$
	- 30 metreden daha fazla kalınlığı olan rijit zeminler (sıkı kum ve çakıl, çok rijit kil)	$375 \leq \bar{V}_s \leq 750$
III	- Nemden dolayı parçalanmış kayalar	$175 \leq \bar{V}_s \leq 375$
	- Orta seviyede kompaksiyon yapılmış zeminler, taneler arası bağları orta seviye olan kum ve çakıl tabakaları ve orta seviyede kompaksiyon yapılmış killer	$175 \leq \bar{V}_s \leq 375$
IV	- Yüksek seviyede su tabakası nedeniyle aşırı nem içeren yumuşak zeminler	<175

$\bar{V}_s$  (m/s) :Ortalama kayma dalgası hızı

**Çizelge 17.** Deprem ivme katsayısı (Standard 2800)

*Table 17. Seismic acceleration coefficients (Standard 2800)*

Bölge	Açıklama	İvme (g)
1	Aşırı yüksek depremsellik	0,35
2	Yüksek depremsellik	0,30
3	Orta depremsellik	0,25
4	Düşük depremsellik	0,20

**Çizelge 18.** Zemin sınıfına ve deprem bölgesine bağlı olarak spektrum eğrisi sınır değerleri  
(Standard 2800)

*Table 18. Spectrum curve limit values with respect to the soil class and earthquake zones (Standard 2800)*

ZEMİN SINIFI	$T_0$	$T_s$	ORTA VE DÜŞÜK SEVİYEDE DEPREMSELLİK	YÜKSEK VE AŞIRI YÜKSEK SEVİYEDE DEPREMSELLİK
			S	S
I	0,10	0,40	1,50	1,50
II	0,10	0,50	1,50	1,50
III	0,15	0,70	1,75	1,75
IV	0,15	1,00	2,25	1,75

**Çizelge 19.** Bina önem katsayısı (Standard 2800)

*Table 19. Building importance factors (Standard 2800)*

KATEGORİ	KATSAYI (I)
Grup 1	1,40
Grup 2	1,20
Grup 3	1,00
Grup 4	0,80

**Çizelge 20.** Davranış katsayısı (Standard 2800)

*Table 20. Structural response values (Standard 2800)*

TAŞIYICI SİSTEM	YATAY KUVVETİ TAŞIYAN SİSTEM	R	$H_m(M)$
Perdeli Sistemler	Özel betonarme perdeli sistemler	8	50
	Orta betonarme perdeli sistem	7	50
	Normal betonarme perdeli sistem	5	30
	Betonarme yığma	4	15
Moment Taşıyan Çerçeve Sistem	Özel betonarme çerçeve sistem	10	150
	Orta betonarme çerçeve sistem	7	50
	Normal betonarme çerçeve sistem	4	--
Karma Sistemler	Özel betonarme çerçeve + özel betonarme perdeli sistem	11	200
	Orta betonarme çerçeve + orta betonarme perdeli sistem	8	70

### Avrupa Birliği Deprem Yönetmeliği (Eurocode – 8) (Europe unity earthquake code (Eurocode – 8))

Toplam taban kesme kuvveti hesaplanması Eşitlik 25 ile yapılmaktadır.

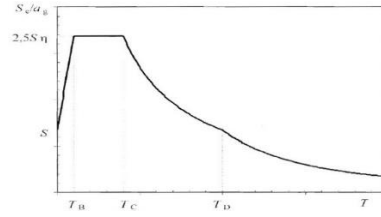
$$F_b = S_d(T) \cdot m \cdot \lambda \quad (25)$$

$F_b$  :Toplam taban kesme kuvveti

$S_d(T)$  : Tasarım spektrum katsayısı

$\lambda$  :  $T \leq 2T_c$  olduğu durumda  $\lambda = 0,85$  alınabilir ya da yapı iki katlıdan daha fazla ise  $\lambda = 1,0$  alınabilir.

Yönetmelikte tanımlanan iki farklı spektrum eğrisi bulunmaktadır. Tip 1 ve tip 2 olarak adlandırılan bu eğrilerden tip 1 deprem yüzey dalgasının magnitüd büyüklüğü ( $M_s > 5,5$ ) 5,5' den büyük ise geçerlidir. Küçük olması durumunda tip 2 geçerli olur. Eğriler %5 sönüm oranı dikkate alınarak hazırlanmış eğrilerdir. Bu eğriler elastik durum için geçerli eğrilerdir. Tasarım sırasında kullanılacak spektrum için denklemler aşağıda verilmiştir. Tip 1 için spektrum eğrisi sınır değerleri Çizelge 21' de verilmiştir. Genel spektrum eğrisi Şekil 4' te Tip 1 spektrum eğrisi ise Şekil 5' de tanımlanmıştır.



Şekil 4. Genel spektrum eğrisi (Eurocode – 8)

Figure 4. General spectrum graphic (Eurocode – 8)

$$0 \leq T \leq T_B S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left( \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right) \quad (26)$$

$$T_B \leq T \leq T_C S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{2,5}{q} \quad (27)$$

$$T_C \leq T \leq T_D S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \frac{T_C}{T} \cdot \frac{2,5}{q} \quad (28)$$

$$T_D \leq T S_d(T) = a_g \cdot S \cdot \left( \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right) \cdot \frac{2,5}{q} \quad (29)$$

$S_d(T)$  :Tasarım spektrum katsayısı

$T$  :Doğal titreşim periyodu

$T_B$  :Zemin sınıfına bağlı karakteristik periyot değeri (Çizelge 22)

$T_C$  :Zemin sınıfına bağlı karakteristik periyot değeri (Çizelge 22)

$T_D$  :Zemin sınıfına bağlı karakteristik periyot değeri (Çizelge 22)

$S$  :Zemin faktörü (Çizelge 22)

$q$  :Yapı davranış katsayısı (Çizelge 24)

$a_g$  : Deprem hareketi katsayısı

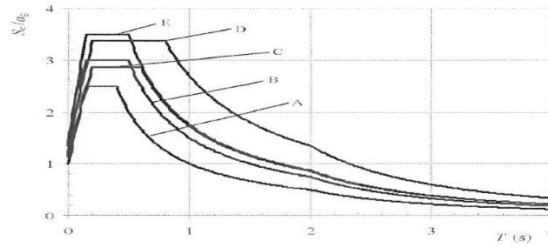
$\gamma_1$  : Yapı önem katsayısı (Çizelge 23)

$a_{gR}$  :Deprem bölge katsayısıdır. Bu katsayı her ülkenin kendi yönetmeliklerinden alınmaktadır.

Ancak her ne olursa olsun  $a_g = 0,08g$  ( $0,78 \text{ m/s}^2$ ) değerini geçemez.

$$a_g = \gamma_1 \cdot a_{gR} \quad (30)$$

$a_g$  Eşitlik 30 formülü ile hesaplanır.



Şekil 5. Tip 1 için elastik spektrum eğrisi (Eurocode – 8)

Figure 5. Spectrum graphic for type 1 (Eurocode – 8)

Çizelge 21. Spektrum eğrisi sınır değerleri (Eurocode – 8)

Table 21. Spectrum graphic limit values (Eurocode – 8)

ZEMİN TÜRÜ	S	T <sub>B</sub> (s)	T <sub>C</sub> (s)	T <sub>D</sub> (s)
A	1,0	0,15	0,40	2,00
B	1,2	0,15	0,50	2,00
C	1,15	0,20	0,60	2,00
D	1,35	0,20	0,80	2,00
E	1,4	0,15	0,50	2,00

Doğal titreşim periyodunun hesaplanabilmesi için yönetmelikte (31) ve (32) olmak üzere iki farklı metot sunulmuştur. Bu metotlar spektrum katsayısını elde edebilmek için ilk etapta kullanılması gereken yaklaşık periyot hesabı için kullanılması gereken formüllerdir.

$$T = C_t \cdot H^{3/4} \quad (31)$$

$$C_t = 0,0075 / \sqrt{A_c} \quad (32)$$

$$A_c = \sum(A_i \cdot (0,2 + (l_{wi} / H)^2)) \quad (33)$$

$T$  : Doğal titreşim periyodu

$C_t$ : Betonarme uzay çerçeve sistemlerde 0,075 alınır. Eğer yapıda perde varsa veya yığma ise Eşitlik 33 formülü ile hesap yapılır.

H: Bina toplam yüksekliği

$A_c$ : İlk kattaki toplam etkili perde alanı (m<sup>2</sup>)

$A_i$ : İlk kattaki hesap doğrultusundaki toplam etkili perde kesit alanı (m<sup>2</sup>)

$l_{wi}$  : İlk kattaki deprem kuvveti uygulama doğrultusuna paralel toplam perde uzunluğu ( $l_{wi}/H \leq 0,9$  olmalı)

$$T = 2 \cdot \sqrt{d} \quad (34)$$

$T$  : Doğal titreşim periyodu

$d$  : Yapıya etki eden düşey yüklerin yatay olarak yapıya etki ettirilmesi sonucu en üst katta elde edilen deplasman

Yönetmelikte 5 farklı zemin tipi tanımlanmıştır. Ayrıca özel olarak iki farklı zemin türü daha tanımlanmıştır. Bu zeminler için belirli kriterler Çizelge 22' de verilmiştir.

**Çizelge 22. Zemin Sınıfları (Eurocode – 8)**

*Table 22. Soil classes (Eurocode – 8)*

ZEMİN SINIFI	AÇIKLAMA	$v_{s,30}$ (m / s)	$N_{SPT}$	$c_u$ (kPa)
A	Kaya ve jeolojik açıdan kaya benzeri formatta olan zeminler (en fazla 5 metre zayıf malzeme içeren)	>800	-	-
B	Mekanik özellikleri derinlikle artan en az 10 m kalınlığında çok yoğun sıkı kum, çakıl veya çok rijit kil zeminler	360 – 800	>50	>250
C	Kalınlığı 50 m' den 100 m' lere kadar olan sıkı yoğun veya orta yoğun kum, çakıl veya rijit kil zeminler	180 – 360	15 – 50	70 – 250
D	Sıkı nemli kohezyonsuz zeminler	<180	<15	<70
E	Kalınlığı 5m ve 20 m arasında olan, $v_s$ değeri C ve D tipteki kadar olan yüzeyinde alüvyal tabaka bulunan altındaki rijit tabakada $v_s > 800$ olan bir zemin profili			
S <sub>1</sub>	En az 10 m kalınlığında yüksek plastisite indeksine sahip (PI>40) yumuşak kil/silt içeren zeminler	<100	-	10 – 20
S <sub>2</sub>	Sıvılaştırılabilen hassas kil tabakaları veya başka bir gruba dâhil olmayan diğer zemin türleri			

$v_{s,30}$  (m / s) : Ortalama kayma dalgası hızı PI: Plastisite indeksi



**Çizelge 23.** Yapı önem katsayısı (Eurocode – 8)*Table 23. Building importance factor (Eurocode – 8)*

YAPI ÖNEM SINIFI	YAPI TÜRLERİ	$\gamma_1$
I	Halk güvenliği açısından çok önemli olmayan binalar (tarımsal yapılar)	0,8
II	Normal yapılar, diğer gruplara dahil olmayan yapı türleri	1,0
III	Deprem dayanımı büyük önem taşıyan yıkılması istenmeyen yapılar (okullar, toplantı ve meclis binaları, kültürel kuruluşlar)	1,2
IV	Deprem sırasında yapının bütünlüğünün korunabilmesi halkın korunması açısından büyük önem taşıyan binalar (hastaneler, yangın istasyonları, enerji merkezleri)	1,4

**Çizelge 24.** Yapı davranış katsayısı (Eurocode – 8)*Table 24. Building behaviour factors (Eurocode – 8)*

YAPI TÜRÜ	DAVRANIŞ KATSAYISI ( $q_0$ )
Çerçeve Sistem	$3,0\alpha_0 / \alpha_1$
Kirişsiz perde sistem	3,0
Burulma rijitliği olmayan sistemler	2,0
Ağırlığının %50' den fazlası yapının 3' de 1' inden yukarıda olan sistemler	1,5

$\alpha_0 / \alpha_1$  değeri kat sayısına ve açıklık miktarına göre değişik değerler almaktadır.

Tek katlı yapılar için  $\alpha_0 / \alpha_1 = 1,1$

Çok katlı tek açıklıklı yapılar için  $\alpha_0 / \alpha_1 = 1,2$

Çok katlı çok açıklıklı yapılar için  $\alpha_0 / \alpha_1 = 1,3$  olarak alınabilir.

### Türk Deprem Yönetmeliği (TBDY – 2018) (Turkish Earthquake Code (TBDY – 2018))

Yapıya etki edecek eşdeğer deprem yükü azaltılmış tasarım spektral ivmesi ile yapının deprem hesabına esas ağırlığının çarpılması ile bulunur (Eşitlik 35).

$$V_{tE}^{(x)} = m_t S_{aR}(T_p^{(x)}) \geq 0,04 m_t I S_{DS} g \quad (35)$$

$V_{tE}^{(x)}$  : Göz önüne alınan deprem doğrultusundaki toplam taban kesme kuvveti

$m_t$  : Deprem hesabına esas yapı ağırlığı

$S_{aR}(T_p^{(x)})$  : Binanın hâkim doğal titreşim periyoduna göre hesaplanan azaltılmış tasarım spektral ivme katsayısı

$S_{DS}$  : Tasarım spektral ivme katsayısı

$I$  : Bina önem katsayısı

$g$  : Yer çekimi ivmesi

Eşdeğer deprem yükü metodunun kullanılabilmesi için doğal titreşim periyodunun bulunması gerekmektedir. Yönetmeliğimiz doğal titreşim periyodunun hesaplanacağı bir formül tanımlamıştır. Bu formül kullanılırken yapıya etki edecek sanal bir deprem yükü belirlenmelidir. Bu fiktif yük katlara dağıtılarak yapının yer değiştirmeleri elde edilir ve Eşitlik 36'daki formülde yerine koyularak doğal titreşim periyodu hesaplanır.

$$T_p^{(x)} = 2\pi \left( \frac{\sum_{i=1}^N m_i d_{fi}^{(x)2}}{\sum_{i=1}^N F_{fi}^{(x)} d_{fi}^{(x)}} \right)^{1/2} \quad (36)$$

$T_p^{(x)}$  : Binanın hâkim doğal titreşim periyodu

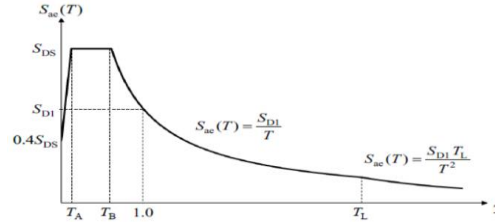
$m_i$ : Herhangi bir i. katın depreme esas ağırlığı

$d_{fi}^x$ : Herhangi bir i. katın verilen deprem kuvveti (fiktif yük) etkisinde yaptığı yer değiştirme

$F_{fi}$ : Herhangi bir i. kata uygulanan deprem kuvveti (fiktif yük)

$N$ : Toplam kat sayısı

Yönetmeliğimizde tanımlanan spektrum eğrisi yardımı ile yapının doğal titreşim periyoduna bağlı olarak spektrum katsayısı belirlenmektedir. Yönetmeliğimizde tanımlanan spektrum eğrisi Şekil 6' da verilmiştir.



Şekil 6. Spektrum eğrisi (TBDY – 2018)

Figure 6. Spectrum graphic (TBDY – 2018)

Eğride bulunan bölgelere göre spektrum katsayıları Eşitlik 37, 38, 39 ve 40 eşitlikleri yardımıyla hesaplanabilmektedir

$$0 \leq T \leq T_A \quad S_{ae}(T) = \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_A}\right) S_{DS} \quad (37)$$

$$T_A \leq T \leq T_B \quad S_{ae}(T) = S_{DS} \quad (38)$$

$$T_B \leq T \leq T_L \quad S_{ae}(T) = \frac{S_{DI}}{T} \quad (39)$$

$$T_L \leq T \quad S_{ae}(T) = \frac{S_{DI}T_L}{T^2} \quad (40)$$

$S_{ae}(T)$ : Elastik tasarım spektral ivmesi

$T$ : Doğal titreşim periyodu

$S_{DS}$ : Tasarım spektral ivme katsayısı

$S_{DI}$ : Tasarım spektral ivme katsayısı

$T_A$ : Yatay tasarım spektrumu köşe periyodu

$T_B$ : Yatay tasarım spektrumu köşe periyodu

$T_L$ : Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu (6 s olarak alınabilir.)

Yatay tasarım spektrumu köşe periyodu olan  $T_A$  ve  $T_B$  Eşitlik 41 ve 42 formülleri ile hesaplanmaktadır.

$$T_A = 0,2 \frac{S_{DI}}{S_{DS}} \quad (41)$$

$$T_B = \frac{S_{DI}}{S_{DS}} \quad (42)$$

Tasarım spektral ivme katsayıları olan  $S_{DS}$  ve  $S_{DI}$  TBDY-2018 de tanımlanan denklemler ile hesaplanmaktadır. Aşağıdaki Eşitlik 43 ve 44 formülleri ile hesaplanabilmektedir.

$$S_{DS} = S_S F_S \quad (43)$$

$$S_{DI} = S_I \gamma_F F_I \quad (44)$$

Burada,  $S_S$  kısa periyod bölgesi için harita spektral ivme katsayısını,  $S_I$  1,0 saniye periyod için harita spektral ivme katsayısını,  $F_S$  ve  $F_I$  yerel zemin etki katsayılarını,  $\gamma_F$  faya yakınlık katsayısını ifade etmektedir.

Faya yakınlık katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$L_F \leq 15 \text{ km} \quad \gamma_F = 1,2 \quad (45)$$

$$15 \text{ km} \leq L_F \leq 25 \text{ km} \quad \gamma_F = 1,2 - 0,02(L_F - 15) \quad (46)$$

$S_S$  ve  $S_I$  katsayıları [www.deprem.gov.tr](http://www.deprem.gov.tr) adresinde verilen Deprem Tehlike Haritalarında harita spektral ivmelerinin yerçekimi ivmesine bölünmesiyle boyutsuz olarak elde edilir.

$F_S$  ve  $F_I$  yerel zemin etki katsayıları Çizelge 25 ve Çizelge 26'da verilmiştir. Ara değerler için doğrusal enterpolasyon yapılabilir.

**Çizelge 25.** Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları (TBDY-2018)*Table 25. Local soil impact factor for short period (TBDY-2018)*

YEREL ZEMİN SINIFI	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı $F_s$					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,50$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,00$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,50$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ZC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
ZD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

**Çizelge 26.** 1,0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayıları (TBDY-2018)*Table 26. Local soil impact factor for 1,0 second period (TBDY-2018)*

YEREL ZEMİN SINIFI	1,0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı $F_l$					
	$S_l \leq 0,10$	$S_l = 0,20$	$S_l = 0,30$	$S_l = 0,40$	$S_l = 0,50$	$S_l \geq 0,60$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
ZD	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2,0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır.					

Eşitlik 35'de tanımlanan Bina Önem Katsayısı (I) Çizelge 27'de Bina Kullanım Sınıfı ile birlikte verilmiştir.

**Çizelge 27.** Bina Kullanım Sınıfları ve Bina Önem Katsayısı (TBDY-2018)*Table 27. Building Using Classes and Building Important Factor (TBDY-2018)*

Bina Kullanım Sınıfı	Binanın Kullanım Amacı	Bina Önem Katsayısı (I)
BKS=1	- Deprem sonrası hemen kullanılması gerekli binalar (Hastane, dispanser, sağlık ocağı, itfaiye binası, PTT ve diğer haberleşme tesisleri gibi) - Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurtlar ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri gibi) - Müzeler - Toksik patlayıcı, parlayıcı vb. özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1,5
BKS=2	İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar (Alışveriş merkezleri, spor tesisleri, sinema, tiyatro, konser salonları, ibadethaneler gibi)	1,2
BKS=3	Yukarıdaki tanımlara dâhil olmayan binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapılar gibi)	1,0

Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısına bağlı olarak yapıların Deprem Tasarım Sınıfları ise Çizelge 28'de verilmiştir.

**Çizelge 28.** Deprem Tasarım Sınıfları (DTS) (TBDY-2018)*Table 28. Seismic Design Classes (TBDY-2018)*

Kısa periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı ( $S_{DS}$ )	Bina Kullanım Sınıfı	
	BKS=1	BKS=2,3
$S_{DS} < 0,333$	DTS=4a	DTS=4
$0,333 \leq S_{DS} < 0,667$	DTS=3a	DTS=3
$0,667 \leq S_{DS} < 1,00$	DTS=2a	DTS=2
$1,00 \leq S_{DS}$	DTS=1a	DTS=1

Eşitlik 35'de tanımlanan  $S_{aR}(T)$  değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$S_{aR}(T) = \frac{S_{ae}(T)}{R_a(T)} \quad (47)$$

Burada  $R_a(T)$  deprem yükü azaltma katsayısını ifade etmektedir. Eşitlik 48 ve 49 ile hesaplanmaktadır.

$$R_a(T) = \frac{R}{I} \quad T > T_B \quad (48)$$

$$R_a(T) = D + \left(\frac{R}{I} - D\right) \frac{T}{T_B} \quad T \leq T_B \quad (49)$$

Burada R, Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısını, D Dayanım Fazlalığı Katsayısını, I Bina Önem Katsayısını ifade etmektedir. R ve D değerleri Çizelge 30'da verilmiştir.

**Çizelge 29. Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayıları ve Dayanım Fazlalığı Katsayıları (TBDY-2018)***Table 29. Load Bearing System Behavior Factor and Overstrength Factor (TBDY-2018)*

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R	Dayanım Fazlalığı Katsayısı D
<b>A. YERİNDE DÖKME BETONARME BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ</b>		
<b>A1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler</b>		
A11. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	8	3
A12. Deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdelerle karşılandığı binalar	7	2,5
A13. Deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi yüksek boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	6	2,5
A14. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	8	2,5
A15. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	7	2,5
A16. Deprem etkilerinin tamamının çatı düzeyindeki bağlantıları mafsallı olan yüksekliği 12 m'yi geçmeyen süneklik düzeyi yüksek betonarme kolonlar tarafından karşılandığı tek katlı binalar	3	2
<b>A2. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler</b>		
A21. Deprem etkilerinin tamamının moment aktaran süneklik düzeyi sınırlı betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar	4	2,5
A22. Deprem etkilerinin tamamının süneklik düzeyi sınırlı boşluksuz betonarme perdelerle karşılandığı binalar	4	2
A23. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi sınırlı betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi sınırlı boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	4	2
<b>A3. Süneklik Düzeyi Karma Taşıyıcı Sistemler</b>		
A31. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi sınırlı betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	6	2,5
A32. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi sınırlı betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	5	2,5
A33. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi sınırlı dolgulu (asmolen) veya dolgusuz tek doğrultulu dişli döşemeli betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek bağ kirişli (boşluklu) betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	6	2,5
A34. Deprem etkilerinin moment aktaran süneklik düzeyi sınırlı dolgulu (asmolen) dişli döşemeli betonarme çerçeveler ile süneklik düzeyi yüksek boşluksuz betonarme perdeler tarafından birlikte karşılandığı binalar	5	2,5

Yerel zemin sınıflarının belirlendiği özellikler Çizelge 30'da verilmiştir.

Çizelge 30. Zemin Sınıfları (TBDY - 2018)

Table 30. Soil classes (TBDY – 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		$(V_s)_{30}$ (m/s)	$(N_{60})_{30}$ (darbe/30 cm)	$(c_u)_{30}$ (kPa)
ZA	Sağlam, sert kayalar	>1500	-	-
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760	>50	>250
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	15-50	70-250
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \%40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ( $c_u < 250$ kPa) içeren profiller	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: - Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler) - Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer - Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ( $PI > 50$ ) killer - Çok kalın (>35 m) yumuşak veya orta katı killer			

#### ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH OUTCOMES and DISCUSSIONS)

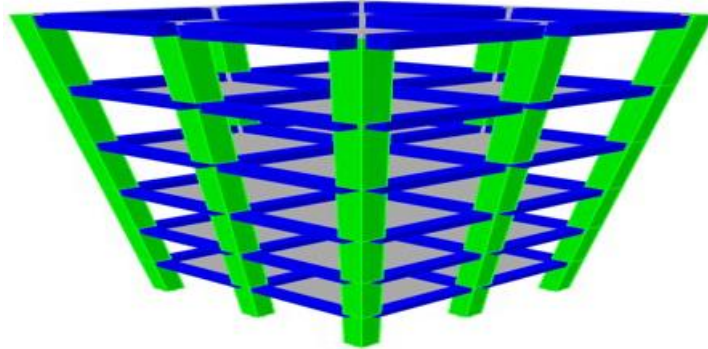
Eşdeğer deprem yükü metotlarının karşılaştırılabilmesi ETABS programı kullanılarak x ve y yönlerinde iki açıklığa sahip açıklıkları 3 m olan, kat yüksekliği 3 m olan ve 6 kattan oluşan bir bina modellenmiştir (Şekil 7). Yapı kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve bir sistem olarak modellenmiştir. Döşemeler shell (kabuk) eleman olarak modellenmiştir. Kolonların tabana ankastre olarak bağlandığı kabul edilmiştir. Yapının kat planı ise şekil 8' de verilmiştir. Yapının modellenmesinde beton birim hacim ağırlığı  $2,40 \text{ kN/m}^3$ , döşemelere etki eden hareketli yük  $5 \text{ kN/m}^2$ , döşemelere etki eden ilave ölü yük  $1,50 \text{ kN/m}^2$ , ve kiriş üzerine ise duvar yükü olarak  $6,25 \text{ kN/m}^2$  olarak tanımlanmıştır. Yapılan analiz sonucu yapının deprem hesabına esas ağırlığının  $4217,61 \text{ kN}$  olduğu bulunmuştur. Analiz sonucunda yapının birinci doğal titreşim periyodunun ise  $0,4384 \text{ s}$  olduğu belirlenmiştir. Yapının radye temeller üzerine oturduğu düşünülmüştür. Kullanım amacı olarak okul kabul edilmiştir. Yapının bulunduğu yer ise hem zemin açısından hem deprem bölgesi açısından hangi yönetmeliğe göre hesap yapılacak ise o yönetmeliğin maksimum koşullarını veren bölge olarak seçilmiştir. Yapının taşıyıcı sistem türü çerçeve, süneklik düzeyi ise normal ya da sınırlandırılmış olarak kabul edilmiştir. Yapı yerinde dökme betonarme bir yapıdır.

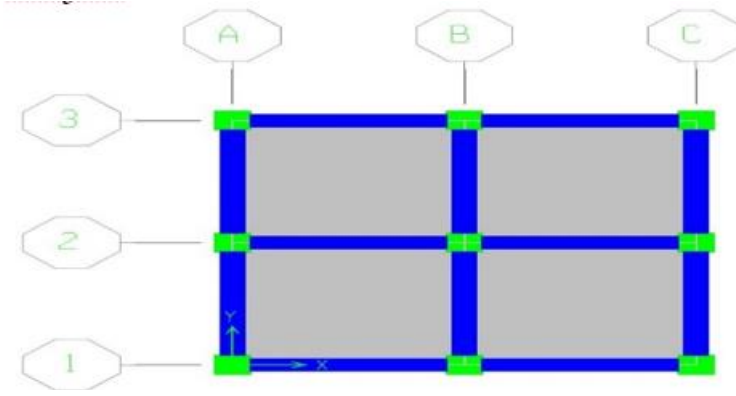
**Çizelge 31.** Eşdeğer deprem yükü hesabında kullanılacak değerler*Table 31. Values used in equivalent lateral load analysis*

	IS 1893	NZS 4203:1192	EAK2000	STANDARD 2800	EUROCODE – 8	TBDY - 2018	
Yapının Ağırlığı (kN)	4217,61	4217,61	4217,61	4217,61	4217,61	4217,61	
Yapı Önem Katsayısı	1,50	1,20	1,15	1,20	1,20	1,50	
Deprem Bölge Katsayısı	0,36	0,8	0,36	0,35	0,48	$S_{DS}$ = 1,564	$S_{DI}$ = 1,145
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı	3,0	3,0	3,50	4,0	$3,0 \cdot (\alpha_0 / \alpha_1)^1$	4,0	
Zemin Sınıfı	Tip 3 ( $0,10 \leq T \leq$ $0,67$ )	Orta zeminler <sup>2</sup>	$\Delta$ ( $0,20 \leq T \leq$ $1,20$ )	IV ( $0,15 \leq T \leq$ $1,00$ )	D ( $0,20 \leq T \leq$ $0,80$ )	ZE	
Deprem İvme Katsayısı	2,50	0,38	-	1,75	1,35	2,72	
Yapı Risk Durumu	-	1,20	-	-	-	-	
Sınır Durum Katsayısı	-	1,0	-	-	-	-	
Temel Katsayısı	-	-	0,90	-	-	-	
Sönüm Oranı	-	-	%5	-	-	-	

<sup>1</sup> $\alpha_0/\alpha_1 = 1,30$  (çok katlı çok açıklıklı yapılar için)

<sup>2</sup>Doğal titreşim periyodu 0,4384 s olduğu için zemin sınıfı orta zemin seçilmiştir. Esnek zeminler seçilememektedir.

**Şekil 7.** Yapının 3D modeli*Figure 7. 3D model of the building*



Şekil 8. Yapı kat planı

Figure 8. Structural layout

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS)

Deprem hareketi anlaşılması ve hesaplanması zor karmaşık bir hareket olduğu için hesaplamaları kolaylaştırıcı farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri olan Eşdeğer Deprem Yüğü Metodu ise farklı ülkelerde farklı katsayılar kullanılarak uygulanmaktadır. Görülmektedir ki her ülkede yapılan analizlerde kullanılan katsayılar birbirinden farklı olmaktadır. Kullanılan katsayılar deprem etkisini deprem etkisinin hesabını kolaylaştırıcı katsayılar olduğu için gerçeklikte tam olarak yansıtlamamaktadır. Her ülkede kullanılan katsayıların birbirinden farklı olması da yine bu katsayıların kabuller doğrultusunda ortaya çıkmış olmasından kaynaklanmaktadır.

Her ülke yönetmeliği için hesaplanmış olan taban kesme kuvvetleri Çizelge 32' de verilmiştir.

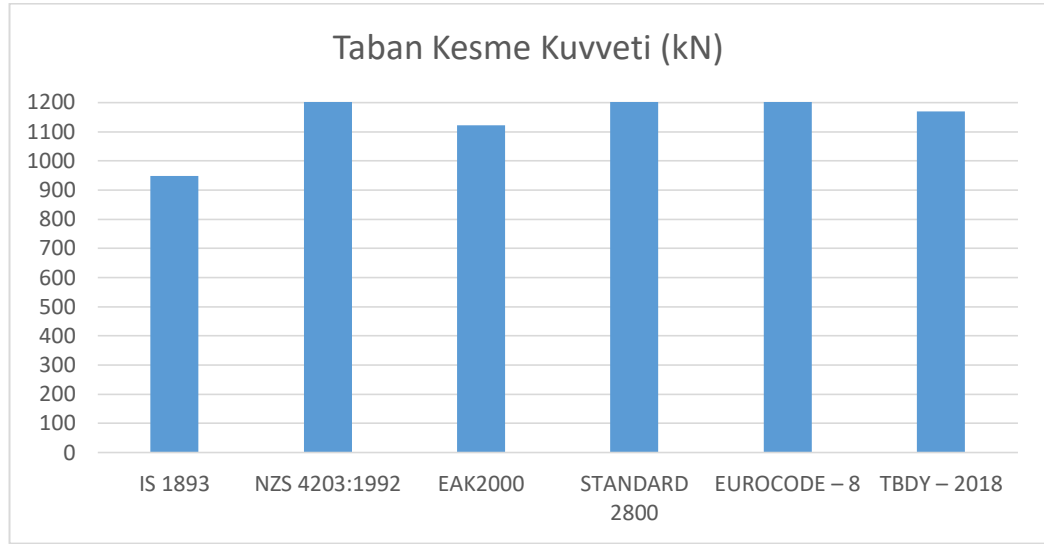
Çizelge 32. Taban kesme kuvvetleri

Table 32. Base shear values

HESAP YAPILAN YÖNETMELİK	AİT OLDUĞU ÜLKE	TABAN KESME KUVVETİ (kN)
IS 1893	HİNDİSTAN	948,96
NZS 4203:1992	YENİ ZELLANDA	1476,23
EAK2000	YUNANİSTAN	1122,49
STANDARD 2800	İRAN	1217,84
EUROCODE – 8	AVRUPA	1751,93
TBDY – 2018	TÜRKİYE	1169,41

Grafik halinde sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir.





Şekil 9. Taban kesme kuvvetleri

Figure 9. Base shear forces

Çizelgede görüldüğü gibi en düşük deprem kuvveti Hindistan yönetmeliğinden elde edilirken en yüksek deprem kuvveti ise Eurocode - 8' de elde edilmiştir. Ülkemizin yönetmelik kriterleri kullanılarak hesaplanan deprem kuvveti ise arada bir değer vermektedir. Ülkemiz sonuçlarına en yakın sonuçlar Yunanistan yönetmeliği kullanılarak elde edilen sonuçlardır.

Yapılan incelemeler neticesinde ülkemizde alınan bina önem katsayıları genel olarak diğer ülkelere göre yüksek değerlerdir. Yeni kriterler sayesinde Yapı davranış katsayısı, yapı sınıfına, yüksekliğine ve bulunduğu bölgeye göre detaylı olarak elde edilmektedir. Bölgelere ve yapı yüksekliğine göre kullanılacak taşıyıcı sistem türleri sınırlandırılmıştır. Yapılara etki edecek deprem ivmesinin hesap edilmesi için geliştirilen program sayesinde yapının koordinatları girilerek faya uzaklık ve buna bağlı olarak deprem ivme katsayıları elde edilebilmektedir. Bu da keskin hatlar ile ayrılmış bir haritadan ziyade faya uzaklık sayesinde yapıya etki edebilecek deprem kuvvetinin daha doğru bir şekilde hesaplanmasına olanak sunmaktadır.

Genel anlamıyla ülkemiz yönetmeliğinde yer alan katsayılar sonucu elde edilen taban kesme kuvvetleri diğer ülkeler ile yaklaşık sonuçlar vermektedir. Ancak yönetmeliğimizde tanımlanan katsayılar diğer yönetmeliklere göre daha hassas ve daha detaylı sonuçlar elde etmeye olanak sağlamaktadır. Bu katsayıların detaylandırılması sayesinde Eşdeğer Deprem Yüğü yöntemi ile elde edilecek sonuçların diğer deprem hesap yöntemlerine yaklaşacağı düşünülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Celep Z. ve Kumbasar N., 2000, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 2007, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- EAK2000: Greek Code For Seismic Resistant Structures, 2000, Environment Planning And Public Works, Athens.
- Eurocode - 8: Design Of Structures For Earthquake Resistance - Part1 :General Rules, Seismic Actions And Rules For Buildings, 2004, European Committee For Standardization, Brussels.
- IS 1893 - 1:Criteria For Earthquake Resistant Design Of Structures, Part 1: General Provisions And Buildings, 2002, Bureau Of Indian Standards, New Delhi.
- Küçük, D., 2006, Deprem zararlarını azaltma çalışmalarında mimarlık eğitiminin yeri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 148.
- Naimi A., 2010, Türkiye ve İran Deprem Yönetmeliklerinin Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi Açısından

- Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, KATÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- NZS 4203:1992: General Structural Design And Design Loadings For Buildings, 1992, *Standards Association Of New Zealand*, Wellington.
- Standard 2800: Iranian Code Of Practice For Seismic Resistant Design Of Buildings, 2007, Ministry Of Housing And Urban Development, Tehran.
- Taşkın T., 2012, Çok Katlı Bir Betonarme Yapının Farklı Ülke Yönetmeliklerine Göre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tekince Ö., 2015, Betonarme Binalarda Doğrusal Analiz Yöntemlerinin TDY – 2007 ve EC – 8' e Göre Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ünal A., 2012, TDY – 2007' ye Göre Tasarlanmamış Betonarme Çerçevelerin Düzlem Dışı Perde Duvarla Güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya



## MEME KANSERİ TANISI İÇİN DERİN ÖZİNİTELİK TABANLI KARAR DESTEK SİSTEMİ

<sup>1</sup>Nuh ALPASLAN

<sup>1</sup>Bingöl Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, BİNGÖL  
<sup>1</sup>[nalpaslan@bingol.edu.tr](mailto:nalpaslan@bingol.edu.tr)

(Geliş/Received: 19.04.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 24.10.2018)

**ÖZET:** Meme kanseri, akciğer kanserinden sonra kadınlarda kanser ölümlerinin ikinci önemli sebebidir. Erken tanı, meme kanseri tedavisinde oldukça önemlidir. Mamografi, meme kanserinin erken teşhisinde en çok kullanılan görüntüleme tekniğidir. Yapılan araştırmalar, 50 yaşın üstünde düzenli mamografi çektirmenin kadınlar için ölüm oranını %30 oranında azaltabileceğini göstermektedir. Ancak, mamogramların yorumlanması genellikle öznelidir. Bu çalışmada, göğüs kitlelerinin otomatik tespiti, sınıflandırılması ve içerik tabanlı erişimi için entegre bir sistem sunulmuştur. Bu kapsamda, hekimlerin kitle hakkındaki kararları, üst düzey derin öznelilikler ve düşük seviye öznelilik seti ile ifade edilmiştir. Önerilen sistemde düşük seviyeli öznelilikleri elde etmek için, kitle tespitinde graf tabanlı görsel çıkıntı yöntemi kullanılmış ve öznelilik çıkarımı için örneklemez contourlet dönüşümü ve eig(Hess)-HOG yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca, yüksek seviyeli evrişimsel sinir ağı öznelilikleri kullanılmıştır. Ardından, test görüntülerinin kategorisini tahmin etmek için yukarıda bahsedilen özneliliklere dayalı iki aşırı öğrenme makinesi (AÖM) sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Farklı özneliliklere dayalı sınıflandırıcıların sonuçları, test görüntülerinin türünü belirlemek için analiz edilmiştir. Görüntü erişimi ve sınıflandırma performansları, hem kesinlik-duyarlılık hem de sınıflandırma doğrulukları kullanarak IRMA mammographic patches veri setinde değerlendirilip ve karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen sistemin etkililiğini ve gerçek zamanlı klinik uygulamalardaki kullanılabilirliğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Meme Kanseri, Mamogram, Sınıflandırma, Bilgisayar Destekli Tanı, İçerik tabanlı görüntü erişimi

### A Deep Feature Based Decision Support System for Breast Cancer Diagnosis

**ABSTRACT:** The breast cancer is the second leading cause of cancer deaths among women after lung cancer. Early diagnosis is quite significant with breast cancer treatment. Mammography is the most commonly used imaging technique for the early detection of breast cancer. Researches have been shown that the mortality rate can decrease by 30% for women who have mammogram regularly over 50 years of age (Jadoon et al. 2017). However, interpreting mammograms is often subjective.

In this study, an integrated system for automated detection, classification, and content based retrieval of breast masses is presented. In this manner, physician's decisions on mass were expressed by high-level deep features and low-level feature set. In proposed framework, to extract low-level features, a graph based visual saliency (GBVS) method is used for mass detection and the nonsubsampling contourlet transform (NSCT) and eig(Hess)-HOG are used for feature extraction. In addition, high-level convolutional neural network features have been used. Then, two extreme learning machine (ELM) classifiers rely on the features mentioned above is employed to predict category of test images. And outputs of classifiers based on each feature were examined together to define the kind of test image. The image retrieval and classification performances are evaluated and compared on IRMA mammographic dataset by using both the precision-recall (PR) and classification accuracies. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed system and the viability of a real-time clinical application.

**Key Words:** Breast cancer, Mammogram, Classification, Computer-aided diagnosis (CAD), Content-based image retrieval

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin üstel büyümesi, hızla azalan depolama maliyeti ve sürekli artan internet erişimi ile son yıllarda sayısal bilgi miktarı katlanarak artmıştır. Dolayısıyla, veriden doğru ve ilgili bilgilere erişmek en önemli problemlerden biridir. İçerik tabanlı görüntü erişimi (İTGE), bilgisayar destekli tıbbi tanı sistemleri, sanat, askeri ve mimari gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır ("American Cancer Society Published Second Edition of Global Cancer Atlas" 2015). Son yıllarda, tatminkâr İTGE sistemleri için talep büyük ölçüde artmıştır.

İTGE, görüntü içeriğinden otomatik olarak elde edilen özniteliklere dayalı olarak bir veri tabanından ilgili imgelere erişme işlemidir. İmge içeriğini ayrıntılı olarak ifade etmek için, hem veritabanı hem de sorgu görüntüleri için renk, doku, şekil öznitelikleri elde edilir. Bu elde edilen öznitelikler sorgu görüntüsüne en benzer görüntüleri belirlemek için kullanılır.

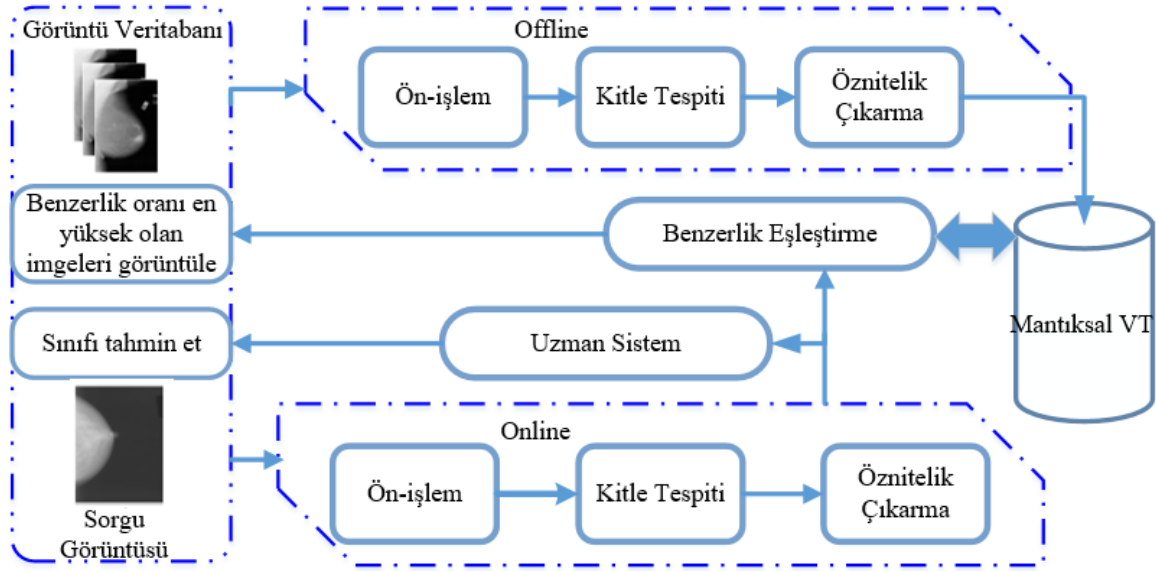
Meme kanseri, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde akciğer kanserinden sonra kadınlarda kanser ölümlerinin önde gelen nedenlerinden biri olduğu için önemli bir sağlık sorunu olarak kabul edilmektedir ("American Cancer Society Published Second Edition of Global Cancer Atlas" 2015; AL Mousa et al. 2014; Tabár et al. 2011). ABD'de tüm kanser teşhislerinin üçte birini oluşturmakta ve kadınlar arasındaki en yaygın kanser türüdür. Araştırmalar, 50 yaşın üstünde mamografi çektiren kadınlar için ölüm oranının %30 oranında azalabileceğini göstermiştir (Siegel, Miller, and Jemal 2015; Nelson 2009; Ganesan et al. 2013). Mamografi, memenin ayrıntılı yapısını izlemek amacıyla günümüzde kullanılan en uygun maliyetli görüntüleme tekniğidir. Genel bir mamografi muayenesinde her göğüsten iki CC (kranio-kaudal) ve iki MLO (mediolateral oblik) olmak üzere 4 farklı görüntü alınmaktadır. Ancak, mamografilerin yorumlanması eğitim ve tecrübeye dayanmakta, genellikle zor, hataya eğilimli ve öznel (Rangayyan, Ayres, and Leo Desautels 2007). Kanser başlangıç safhalarındaki belirtiler görünüş açısından çeşitlidir ve tecrübeli radyologlar için bile tanı koymak oldukça zordur (Moura and Guevara López 2013; Y. Zhang et al. 2011). Radyologlar tarafından biyopsiye gönderilen kanser vakalarının % 60 ila % 85'i daha sonra iyi huylu olarak bulunmuştur (Rangayyan, Ayres, and Leo Desautels 2007). Ayrıca, uzmanların değerlendirmek zorunda oldukları mamografilerin toplam sayısı, halkın bilinçlendirilmesi ile oldukça yüksek rakamlara ulaşmıştır (Nishikawa 2007; Zheng 2009). Her tür göğüs kitleleri, komşu dokulardan farklı niteliklere sahiptir. Böylece, göğüs kitleleri komşu dokulardan ayırt edilebilir. Kitlenin dokusal ve morfolojik öznitelikleri sınıflandırma için kullanılabilir. Kitlenin şekil, kenar özellikleri meme kitlelerinin ayrılması için önemli ipuçları taşımaktadır. Örneğin, kötü huylu kitleler yayılma eğilimindeyken; iyi huylu olanlar tutarlıdır. Ayrıca, kötü huylu kitleler düzensiz şekilli iken ve iyi huylu olanlar düzenli şekillere sahiptir. Uzmanların mamografileri yorumlarken hatalı teşhisi önlemek amacıyla bilgisayar destekli tanı sistemleri önerilmiştir.

Meme kitlelerinin tespiti amacıyla hekime yardımcı olmak için çok sayıda yöntem önerilmiştir (Nishikawa 2007; Zheng 2009). (Jadoon et al. 2017)'de derin öğrenme tabanlı yeni bir sınıflandırma yöntemi önerilmiştir. Önerilen iki yöntem, CNN-DW ve CNN-CT olarak isimlendirilmiştir. Bununla birlikte, İTGE tabanlı bilgisayar destekli tanı sistemleri, test veri kümelerinin eksikliği nedeniyle halen geliştirme aşamasındadır ve İTGE sistemlerinin klinik uygulamalarda kullanılması hala mümkün değildir. Son yıllarda klinik merkezlerde alınan mamografi miktarındaki olağanüstü artışa bağlı olarak, büyük veri tabanlarındaki görüntülere teşhis amaçlı erişim için etkili araçlar ve tekniklere açık bir ihtiyaç vardır. Mamografi için İTGE ile ilgili ilk çalışmalar, Alto ve ark. (Alto 2007) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, meme kitle görüntülerine içerik tabanlı erişim için doku, gradyan ve şekil özniteliklerinin kullanılmasını önerdiler. Kinoshita ve ark. (Kinoshita et al. 2007), São Paulo üniversitesi'nden aldıkları mamografi veri setindeki görüntülere içerik tabanlı erişim için meme yoğunluğunu kullanmışlardır. El-Naqa ve ark. (El-Naqa et al. 2004) algısal benzerlik tahmininde iki basamaklı bir hiyerarşik öğrenme ağında yapay sinir ağları ve destek vektör makinesi kullanmayı önermişlerdir. Bing Zhang'ın (Zheng 2009) çalışmalarında, mamografiler için İTGE tabanlı bilgisayar destekli tanı şemaları karşılaştırılmış ve performansları değerlendirilmiştir. İTGE tabanlı bilgisayar destekli tanı sistemlerinin klinik uygulamada kabul edilmeden önce çok fazla araştırma çalışmalarına ihtiyaç olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, otomatik kitle tespiti, sınıflandırılması ve mamografilere içerik tabanlı erişim için yeni bir karar destek sistemi geliştirmektir. Bu çalışmada İTGE tabanlı bir sistem önerilmiştir. Bu amaçla düşük ve yüksek seviyeli olmak üzere 2 farklı öznitelik seti elde edilmiştir. Düşük seviyeli öznitelikler öznitelik seti I olarak adlandırılmıştır. Öznitelik seti I, eig(Hess)-HOG, örnekleme kontourlet dönüşümü, 9 boyutlu şekil, 7 boyutlu

kitle ve 6 boyutlu doku özniteliklerinden meydana gelmektedir (Liu and Tang 2014). Öznitelik seti II, derin özellik tabanlı özniteliklerden oluşmaktadır. Yüksek seviyeli öznitelikler, tam olarak bağlı (fc7) eğitilmiş model tabakasından elde edilmiştir. Ardından, bu öznitelik kümeleri 2 AÖM sınıflandırıcısını eğitmek için kullanılmıştır. Son olarak, bu iki sınıflandırıcının sonuçları birleştirilmiştir. Bu çalışmanın katkıları aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Öncelikle AÖM tabanlı İTGE sistemi önerilmiştir. Bu sayede, sistem başarısından ödün vermeden görüntü erişim süresi azaltılarak, görüntü erişim hassasiyeti ve sınıflandırma doğruluğu artırılmıştır. Deneysel sonuçlar, yaklaşımlarımızın teşhis doğruluğundaki verimliliğini göstermektedir. Bunun yanında, örnekleme contourlet dönüşümü mamogram görüntüleri için öznitelik çıkarma aşamasında ilk defa uygulanmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen yöntem en yüksek doğruluk, hassasiyet ve özgüllük değerlerine sahiptir. Literatürdeki güncel çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen sistem oldukça yüksek doğruluk, hassaslık ve özgünlüğe sahiptir.

Çalışmanın geri kalan kısmı aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur. İkinci bölümde kullanılan öznitelik setlerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde evrimsel sinir ağlarının genel özellikleri verilmiştir. Önerilen karar mekanizması Bölüm 4'te verilmiştir. Deneysel sonuçlar ve ilgili tüm tartışmalar Bölüm 5'te verilmiştir. Son bölüm sonuçlara ayrılmıştır.



Şekil 1: İTGE sisteminin akış diyagramı (Dataflow diagram of CBIR system)

## YÖNTEM (METHOD)

Şekil 1, İTGE sisteminin genel olarak akış diyagramını göstermektedir. Ön-işleme, gürültüyü azaltma ve görüntünün iyileştirilmesi olmak üzere iki adımdan oluşur. Daha sonra, tüm kitle parçalarına ait öznitelik tanımlayıcıları elde edilir. Son olarak, sorgu (test) görüntüsüne en çok benzeyen iyi huylu, kötü huylu ve normal görüntülere erişmek için benzerlik eşleştirmesi gerçekleştirilir. Bu çalışmada 600 adet  $227 \times 227$  boyutunda kitle görüntüsünden oluşan Mammographic patches (Deserno et al. 2012) veri seti kullanılmıştır. Mammographic patches veri seti Mammographic Image Analysis Society (MIAS) ve Digital Database for Screening Mammography (DDSM) veri kümelerinden oluşan referans bir veri kümesidir. Bu veri kümesi, mamografik görüntü yamalarını içermektedir. Birçok çalışma, bu veri setini kullanarak algoritmalarının etkinliğini göstermiştir. (Roth et al. 2016) nolu çalışmanın başarılı uygulamalarından ötürü, mamografi görüntüleri  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  açılarla döndürülür ve veri kümesinin 28 kez büyütülmesi için kırılır.

Öznitelik çıkarma işleminden sonra, benzerlik hesaplaması yapılır. Sorgu kitle görüntüsünün öznitelik vektörü ile referans görüntülerin özellik vektörleri arasındaki fark, sorgu görüntüsü ve veritabanı arasındaki benzerliği hesaplamak için hesaplanır. Ardından, arama sonuçları ölçülen uzaklık değerlerine göre sıralanır. Çalışmamızda Öklid uzaklığı kullanılmıştır.

Sorgulanan kitlenin özellik vektörü ile referans görüntülerin özellik vektörleri arasındaki daha küçük mesafe değeri, iki görüntü arasındaki yüksek benzerliği ifade eder.

### Öznitelik Seti I'in elde edilmesi (Obtaining of Feature Set I)

Bu çalışmada, meme kitlelerini tespit etmek için çıkıntı haritasına eşikleme uygulanarak bölütleme gerçekleştiren graf tabanlı görsel çıkıntı (Graph Based Visual Saliency) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem görüntüdeki bir piksel değerinin, komşulara göre belirginleşmesine neden olan uygun bölgeleri elde etme özelliğine sahiptir. Ayrıca deneysel olarak, bu yöntemin kitle tespitinde oldukça iyi sonuçlar ortaya koyduğu gösterilmiştir (Agrawal, Vatsa, and Singh 2014).

Öznitelik çıkarma, meme kanseri teşhisi açısından kilit rol oynamaktadır. Özellik çıkarma işlemi ancak şüpheli kitle bölgeleri uygun şekilde tanımlandıktan sonra gerçekleştirilebilir. Elde edilen öznitelikler fark edilebilir, objektif ve bağımsız olmalıdır.

Öznitelik kümesi I'i elde etmek için, ilk olarak, kitleye ait 9 adet şekilsel ve 7 adet kitle öznitelik elde edilir. Kitle öznitelikleri ortalama kontrastı, pürüzsüzlük (smoothness), yönelim (orientation), düzgünlük (uniformity), entropi, çevre ve yuvarlaklıktır (circularity). Şekil öznitelikleri ise normalize yarıçap uzunluğu (Normalized Radius Length - NYU), ortalama NYU, standart sapma NYU, entropi NYU, yuvarlaklık oranı (area ratio), ortalama gradyan, standart sapma gradyan, gradyan basıklık (gradient kurtosis) ve gradyan çarpıklıktır (gradient skewness) (Liu and Tang 2014). Son olarak, enerji, korelasyon, entropi, ters fark momenti, kontrast ve homojenliği temsil eden bir 6 adet dokusal öznitelik, gri seviye eş oluşum matrisinden (GLCM) elde edilir (Xie, Li, and Ma 2016). Bir sonraki bölümden öznitelik çıkarma aşamasında kullanılan örnekleme kontourlet dönüşümü (Non-Subsampled Contourlet transform - NSCT) ve Eig(Hess)-HOG yöntemlerinden bahsedilecektir.

### Örnekleme kontourlet dönüşümü (The Nonsampled Contourlet Transform)

Ayrık dalgacık dönüşümünün medikal görüntü analizindeki farklı uygulamalarına rağmen, pürüzsüz ve yönlü kenarlar gibi görüntülerdeki yönsel bilgiyi yakalamada bazı sınırlamaları bulunmaktadır (Meselhy Eltoukhy, Faye, and Belhaouari Samir 2010). Örneğin, ortogonal dalgacıklar sadece yatay, dikey ve çapraz yöndeki süresizlikleri göz önüne aldığından elde edilen bu öznitelikler, iyi huylu ve kötü huylu kitlelere ait kenar ve dokuları temsil eden pürüzsüz eğrileri etkili bir şekilde ifade edememektedir. Dış hatları pürüzsüz olan kenarları doğrudan ayrık domainde etkin bir şekilde ifade etmek için, contourlet dönüşümü Do ve Vetterli (Do and Vetterli 2005) tarafından önerilmiştir. Contourlet dönüşümü görüntüyü dalgacık dönüşümünden daha etkili bir şekilde ifade etmesine rağmen, aşağı örnekleme ve yukarı örneklemeyle ilgili olarak kayma-değişmez (shift-invariant) değildir. Örnekleme kontourlet dönüşümü, Cunha ve diğerleri (Da Cunha, Zhou, and Do 2006) tarafından bu kısıtlamayı telafi etmek için önerildi ve onun yararlı özellikleri nedeniyle, bu çalışmada meme kitlelerini ifade etmek için kullanılmıştır. Öznitelik çıkarımı için, 4 seviyeli örnekleme kontourlet dönüşümünden elde edilen ortalama, varyans, enerji, entropi, çarpıklık ve basıklık parametreleri kullanılmıştır.

Örnek bir kitle için, örnekleme kontourlet dönüşümü Şekil 2'de gösterilmiştir. Görüntü, dört seviyeye ayrılmış ve sonuçta bir, iki ve sekiz alt bant elde edilmiştir.

### Eig(Hess)-HOG (Eig(Hess) Histogram of Oriented Gradients)

Geleneksel HOG yönteminde görüntünün gradyanı klasik türev işlemi ile yapılmaktadır. Gradyan, yön ve büyüklüğü bilgilerini içeren iki boyutlu bir vektördür. Bir görüntünün gradyanı denklem (1) ve (2)'de görüldüğü gibi ifade edilir:

$$\nabla I(x, y) = \begin{bmatrix} I_x(x, y) \\ I_y(x, y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

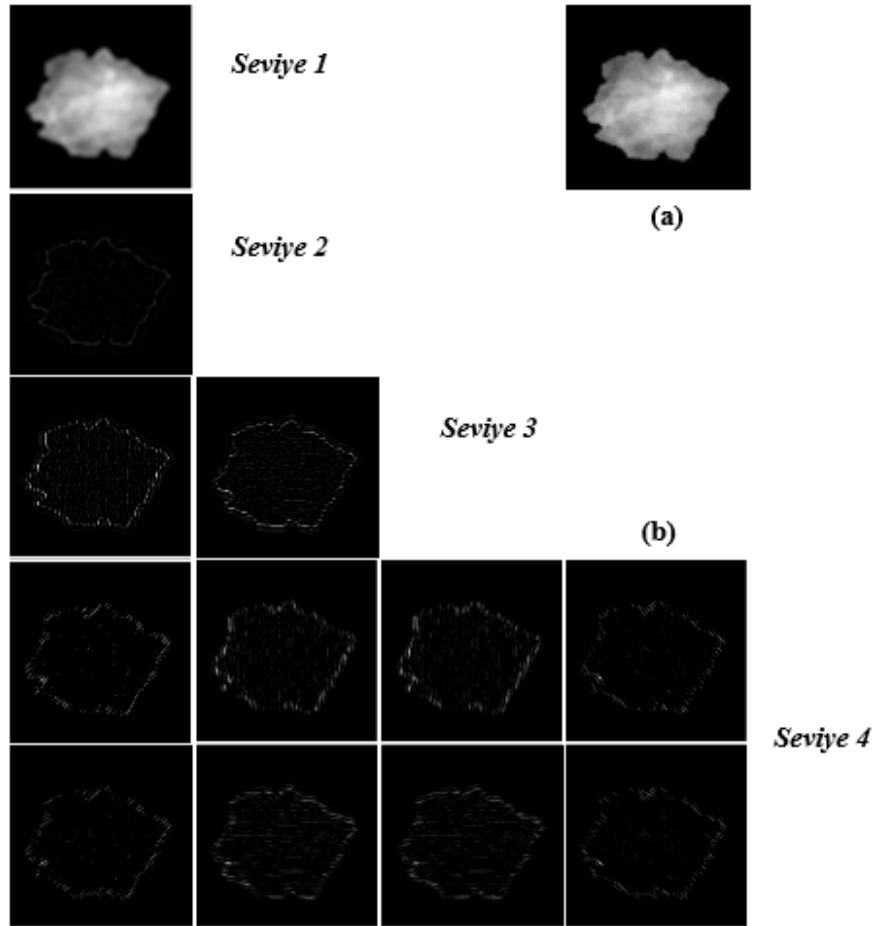
$$I_x \cong I(x+1, y) - I(x, y) \quad (2)$$

$$I_y \cong I(x, y+1) - I(x, y)$$

$I_x$  ve  $I_y$  görüntünün sırasıyla birinci dereceden yatay ve dikey türevlerini ifade etmektedir. Ancak, bir görüntünün lokal davranışlarını incelemek için, imgenin ikinci dereceden kısmi türevlerini ifade eden Hessian matrisi kullanılır (Hanbay et al. 2015). Hessian matrisi denklem (3)'deki gibi ifade edilir:

$$H_{\sigma}(x, y) = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} \\ I_{yx} & I_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$I_{xx}, I_{yy}, I_{xy}$  görüntünün sırasıyla  $x, y, xy$  yönündeki ikinci dereceden türevleridir. Klasik gradyan ile kıyaslandığında, Hessian matrisi imgedeki temel yönlerin belirlenmesinde klasik gradyana göre daha uygundur. Hessian matrisinin temel amacı, imge yüzeyindeki temel yönleri ve temel eğrilikleri belirlemektir. Hessian matrisinin öz değerleri temel eğrilikler olarak ifade edilir ve bu öz değerlerin çarpımı aynı zamanda Hessian matrisinin determinantına eşittir.  $G_{xx}, G_{yy}, G_{xy}$  giriş imgesi  $I$ 'nin sırasıyla  $x, y, xy$  yönündeki ikinci dereceden kısmi türevlerini ifade etmektedir.



Şekil 1: Örnek kitleye ait örneklemezsiz contourlet dönüşümü : (a) Örnek kitle, (b) 4 seviye ayrışma sonucu  
(The Nonsubsampled contourlet transform of breast mass sample: (a) ROI sample, (b) four-level decomposition)

Hessian matrisinin öz değerleri ( $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$ ) denklem (4) gibi hesaplanır [21]:

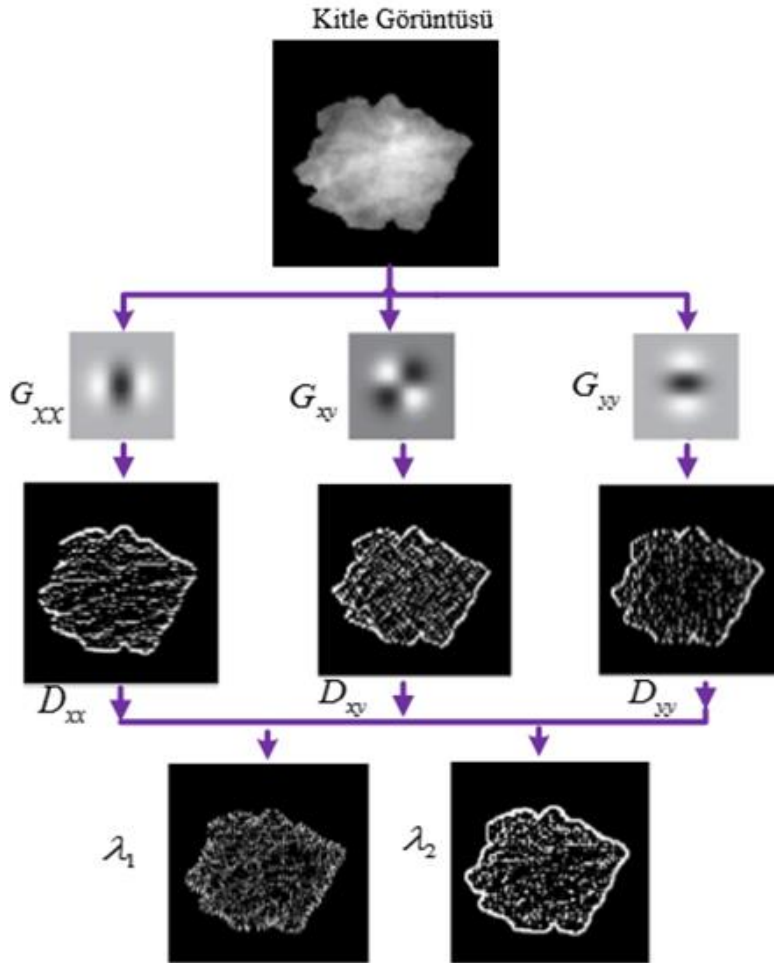
$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{(I^* G_{xx} - I^* G_{yy})^2}{4} + (I^* G_{xy})^2} + \frac{I^* G_{xx} - I^* G_{yy}}{2} \quad (4)$$

Gradyan yönelim ( $\theta$ ) ve büyüklüğü ( $m$ ) değerleri denklem. (5) ve (6) de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$m = \sqrt{(\lambda_1)^2 + (\lambda_2)^2} \quad (5)$$

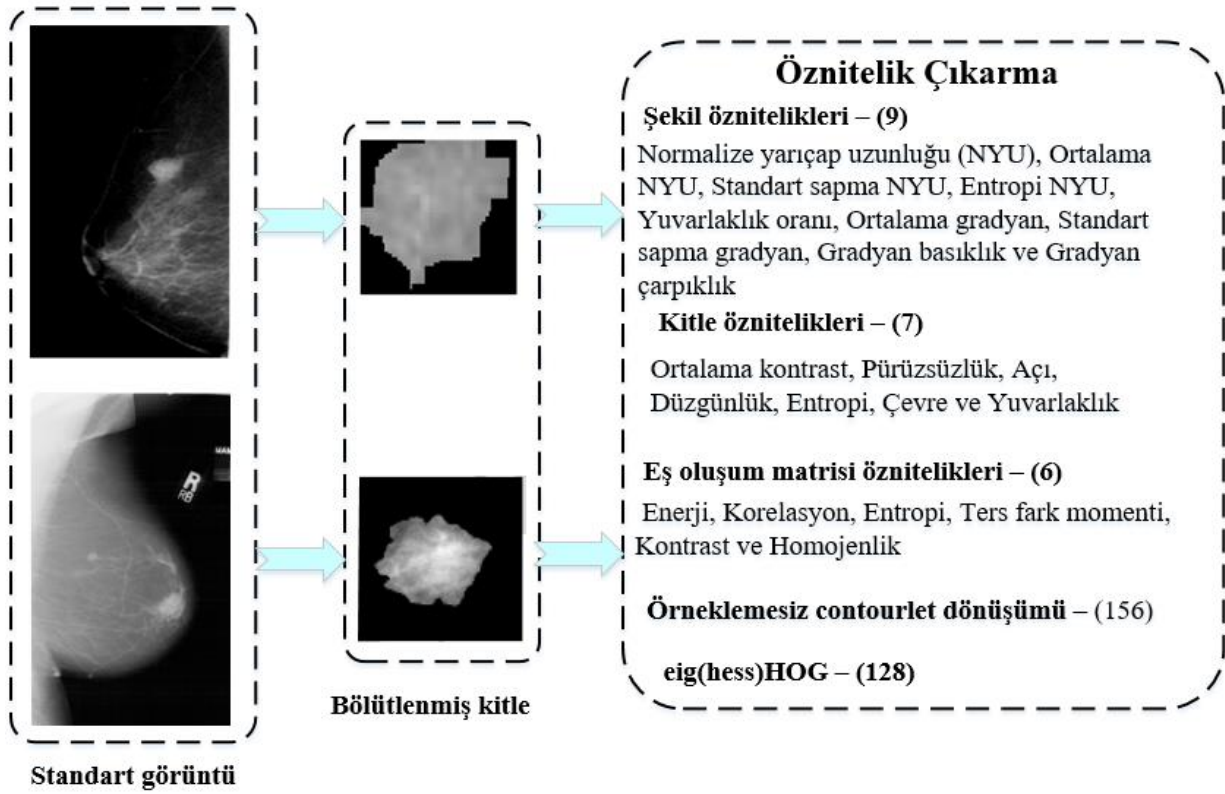
$$\theta = \arctan\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \quad (6)$$

Sonuç olarak bir kitleye ait 128 adet öz nitelik elde edilmiştir. Şekil. 3 örnek kitle için hessian matrisin öz-değerlerinin hesaplanması göstermektedir. Öz nitelik kümesi  $I$ 'in nasıl elde edildiği özet olarak Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 2: Örnek kitle için hessian matrisin öz-değerlerinin hesaplanması  
(Computation of eigenvalues of the hessian matrix for a breast mass sample)





Şekil 3: Örnek bir mamogram ile öznitelik çıkarma aşaması (Feature extraction stage with an example mammogram)

### Öznitelik Seti II'in elde edilmesi (Obtaining of Feature Set II)

Elde edilen ikinci öznitelik seti için derin öğrenme tabanlı öznitelik çıkarma sistemi önerilmiştir. Mammographic patches veri seti kullanılarak, eğitilmiş evrişimsel Sinir Ağı (Convolutional Neural Networks, CNN) üzerinde ince ayar (fine tuning) işlemi uygulanır. Elde edilen yapı, sonraki aşamalarda öznitelik çıkarmak için kullanılır. Ardından, eğitilmiş modelin fc7 katmanından üst düzey öznitelikler çıkarılır. Böylece ikinci öznitelik kümesi elde edilir.

Meme kanseri tespitinde yeterince büyük bir veri seti bulunmamaktadır. Bu sorunu çözmek için, evrişimsel sinir ağıımız ilk önce 1 milyondan fazla etiketli doğal resim içeren bir veri kümesi olan ILSVRC (Krizhevsky, Sutskever, and Hinton 2012) üzerinde eğitilmiştir. Bununla birlikte, veri kümesindeki doğal görüntüler RGB formatındadır ve gri seviyeli mamografi görüntüleriyle alâkalı değildir. Bu nedenle, veri kümesi gri seviyeye dönüştürülür. Ağ yapısı, (Donahue et al. 2013)'den esinlenmiştir. Başarılı sonuçlarından dolayı eğitim stratejisi için (W. Zhang et al. 2015) uygulanmıştır. Denetimli bir öğrenme sürecidir, öğrenme oranı 0.01 olarak başlatılmıştır. Eğitim, doğal imgeler için 100 iterasyon devam etmiştir. Daha sonra mamografi görüntüleri üzerinde öğrenme hızı 0.00001 olarak başlatılmış ve ikinci aşamada 100 iterasyon devam etmiştir. Eğitim sürecinde ağıımızı optimize etmek için çok basit ve verimli olan Stochastic gradient descent (SGD) yöntemi (Bottou 2010) kullanılmıştır. Kullanılan evrişimsel sinir ağının her katmanına ait parametreler (Jiao et al. 2016)'da detaylı olarak verilmiştir. Ardından, önceden öğrenilen modeli kullanarak ince ayar işlemi uygulanır, mimariye göre düzenlenir ve daha önceden öğrenilen model ağırlıkları ile mamografi görüntüleri için eğitime devam edilir. Bu çalışmada kullanılan veri seti 600 (Deserno et al. 2012) kitle görüntüsünden oluşmaktadır. (Roth et al. 2016)'nın başarılı bir şekilde uygulanmasından dolayı veri setini artırmak amacıyla mamografi görüntüleri, 45 °, 90 °, 135 °, 180 °, 225 °, 270 ° açılarla döndürülür ve 2x2 şeklinde bölünür.

### EVRIŞİMSSEL SİNİR AĞLARI (Convolutional Neural Networks)

Son yıllarda, derin öğrenme bilgisayar görmesi ve medikal görüntü analizi (Roth et al. 2016; W. Zhang et al. 2013) uygulamalarında dikkate değer bir performans göstermiştir. Evrişimsel sinir ağları derin öğrenme yöntemlerinden

biridir. Derin öğrenme yöntemleri arasında evrişimsel sinir ağları semantik bölütleme, nesne algılama, yüz tanıma ve sınıflandırma gibi bilgisayar görmesi uygulamalarında oldukça popüler hale gelmiştir. Geleneksel makine öğrenmesinde, belirli bir görevi yerine getirecek bir makine öğrenme sistemi geliştirmek için dikkat değer biçimde alan uzmanlığı, hassas ve tatmin edici bir çalışma gereklidir. Klasik makine öğrenmesi yöntemleri verileri ham formatta işleyemez. Bu sistemlerde, ham veriler doğrudan sistem girişine verilir ve bu veriler basit doğrusal olmayan dönüşümlere tabii tutulur. Böylece, çok sayıda dönüşüme tabii tutulan sistem, çok karmaşık fonksiyonları öğrenme kabiliyeti kazanır. Sonuç olarak, evrişimsel sinir ağları tabanlı yöntemlerin geleneksel yöntemlerden önemli ölçüde daha iyi performans sergilediği görülmektedir.

Evrişimsel sinir ağları katmanların form ve işlevleri açısından klasik sinir ağlarından farklıdır. Klasik ağlarda, katmanlar tek boyutludur ve bu katmanlardaki nöronlar birbirlerine tamamen bağlıdır. Evrişimsel sinir ağları ise tamamen bağlı olan nöronları kullanmak yerine yerel olarak bağlı nöronların kullanılmasını önerir. Evrişimsel sinir ağları, konvolüsyon, toparlama, normalizasyon ve tam bağlı katman olmak üzere 4 katmandan meydana gelmektedir. Ağ kapasitesi, katman sayısı, filtre sayısı ve boyutuyla ilişkilidir.

Konvolüsyon katmanı tipi evrişimsel sinir ağları yapısının çekirdeğidir. Bir konvolüsyon katmanı, nöronların bir araya toplanmasından oluşan çoklu özellik haritalarından oluşur. Konvolüsyon alt katmanı aynı filtreyi farklı konumlara uygular. Verilerin dağılımı farklı konumlarda aynı olduğundan, aynı filtrenin görüntülerin farklı yerlerine uygulanması, özellikle medikal görüntüler için oldukça mantıklıdır. Toparlama (pooling) işlemi, uzaysal olarak yakın öznitelik haritalarını özetlemektedir. Önemli örüntülerin değişmezliğini sağlamak için en ayırdedici özniteliklerin bir sonraki katmana aktarılması için kullanılır. Ortalama, maksimum ve L2-norm işlemleri en yaygın örneklerdir. Böylece, bir sonraki katmandaki verinin boyutunu azalmış olur. Boyutun azaltılması sayesinde, hesaplama zamanı ve parametre sayısı azalır, bu sayede ezberleme önlenir (Chougrad, Zouaki, and Alheyane 2018; Sun et al. 2017). Toparlama işleminin ardından sistemin genelleme kabiliyetini artırmak amacıyla L2-Norm normalizasyon işlemi uygulanır.

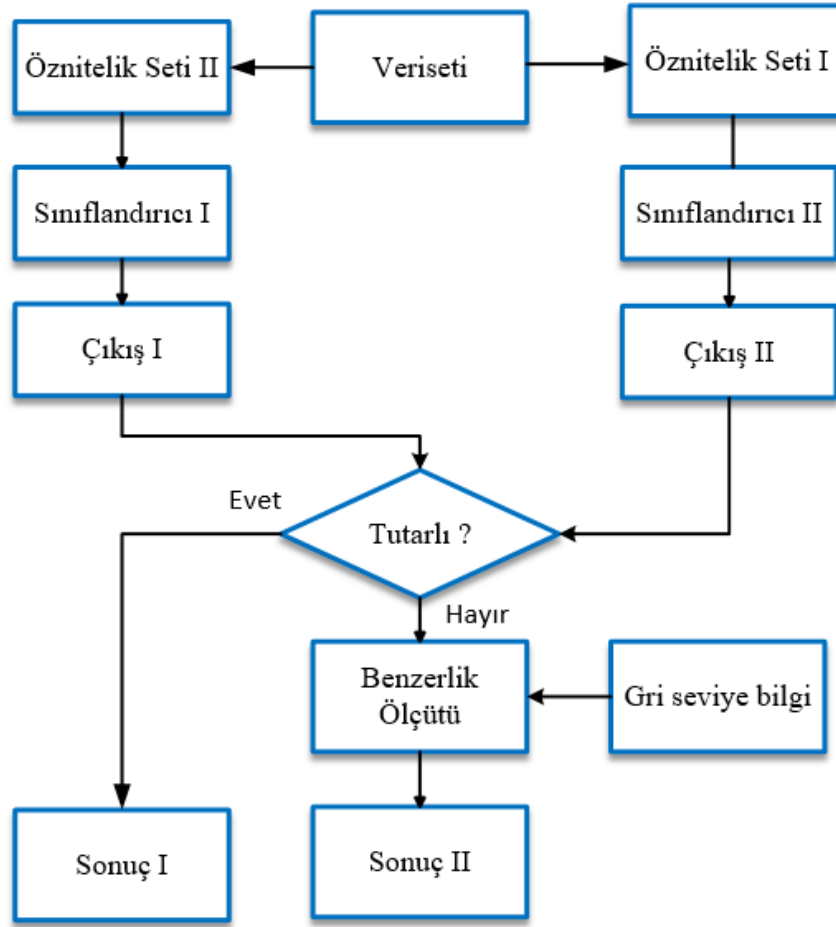
### ÖNERİLEN KARAR MEKANİZMASI (Proposed Decision Mechanism)

Önerilen sistemde, ağın  $fc7$  katmanından üst düzey öznitelikler elde edilmiştir. Ardından, elde eden iki farklı öznitelik setine dayalı olarak kitlenin türünü belirlemek için iki AÖM sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Deneylerde, 10 katlamalı çapraz doğrulama uygulanmıştır. Buna ek olarak, veri kümesindeki her görüntü, performansı arttırmak için evrişimsel sinir ağına verilmeden önce normalize edilmiştir.

Önerilen sistemin temel amacı göğüs kitlelerinin global ve lokal ayrıntılarını elde etmektir. Kitlenin tüm yönleriyle ifade edilmesine yardımcı olmaktadır. Karar destek sistemimiz doktorların teşhis mantığını taklit etmektedir. Genellikle semptom karşılaştırmalarından meydana gelmektedir. Elde edilen derin özellikler tüm sistemde önemli rol oynamıştır. Çünkü insan bilişsel sisteminin bu derin özelliklere uygun olduğu düşünülmektedir. ILSVRC veri seti CNN modelimizi eğitmek için seçilmiştir.

İki sınıflandırıcının çıkışlarını ilişkilendirmek için Şekil 5'deki önerilen yöntem kullanılmıştır. Test görüntülerinden öznitelik seti I ve II önceki bölümlerde bahsedildiği gibi elde edilir. Öznitelik seti I, şekil, kitle, doku, örnekleme, contourlet dönüşümü ve eig(Hess) -HOG öznitelikleri olmak üzere beş farklı öznitelikten oluşmaktadır. Öznitelik seti II, evrişimsel sinir ağı kullanılarak elde edilen yüksek seviye özniteliklerdir. Ardından, elde edilen özniteliklerin sınıflandırılması ve erişimi için iki farklı AÖM sınıflandırıcısı kullanılmıştır.

Test aşamasında ise, iki sınıflandırıcının çıkışları aynı ise, çıkışlar Şekil 5'de gösterildiği gibi doğru olarak kabul edilir. Test görüntülerinin çıkışları farklı ise, bunlar belirsiz küme ile ilişkilendirilir. Belirsiz test kümesindeki her görüntünün hangi türe ait olduğuna karar vermek için, gri seviye yoğunluğu, görüntülerin iyi huylu ve kötü huylu olanlara yakınlığını hesaplamak için kullanılır. Yakınlık parametresini hesaplarken, hiyerarşik k-ortalama kümeleme yöntemi, kullanılmıştır (Vedaldi and Fulkerson 2010). Sonuç olarak, yakınlık parametresi göz önüne alınarak, belirsiz küme ikiye ayrılır.



Şekil 4: Önerilen karar mekanizması (Proposed Decision Mechanism)

## DENEYSEL SONUÇLAR (Experimental Results)

Göğüs kitlelerini normal veya anormal (iki-sınıflı) veya normal, iyi huylu ve kötü huylu olarak sınıflandırmak için genelleme performansı nedeniyle AÖM sınıflandırıcısı kullanılmıştır.

## Deney tasarımı (Experimental Design)

Deneylerimizde 10 katlamalı çapraz doğrulama kullanılmıştır. Böylece sınıflandırıcının genel performansı, garanti edilmiştir. AÖM sınıflandırıcısının gizli katmanlarında ve çıkış katmanında sırasıyla tanjant sigmoid ve doğrusal aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Gizli katman sayısı (Xie, Li, and Ma 2016) çalışmasının başarılı sonuçlarından ötürü 700 olarak belirlenmiştir. Önerilen yaklaşımın farklı alanlarındaki performansını ölçmek için, her karışıklık matrisi (confusion matrix) için duyarlılık (sensitivity) ve özgüllük (specificity) değerleri hesaplanmıştır. Sınıflandırma yaklaşımlarının performansını ölçmek için doğruluk (accuracy), duyarlılık ve özgüllük parametreleri kullanılmıştır. Sınıflandırma sonuçlarının başarımları bilgileri karışıklık matrisi ile ifade edilebilir. Tablo 1’de karışıklık matrisi görülmektedir. GP, doğru şekilde sınıflandırılan kanserli vaka sayısını, YP sağlıklı olduğu halde kanser teşhisi konanların sayısını, GN doğru şekilde sağlıklı teşhisi konanların sayısını, YN kanser olduğu halde sağlıklı teşhisi konanların sayısını ifade etmektedir. Deneyler sonuçları MATLAB geliştirme ortamında elde edilmiştir.

Tablo 1: Karışıklık Matrisi (Confusion Matrix)

		Gerçek Durum	
		Pozitif	Negatif
Tahmin	Pozitif	Gerçek pozitif (GP)	Yanlış negatif (YN)
	Negatif	Yanlış pozitif (YP)	Gerçek negatif (GN)

Doğruluk, Doğru sınıflandırılmış örnek sayısının (GP +GN), toplam örnek sayısına (GP+GN+YP+YN) oranıdır. Duyarlılık, Doğru sınıflandırılmış pozitif örnek sayısının toplam pozitif örnek sayısına oranıdır. Özgüllük gerçek negatif sayısının gerçek negatif ile yanlış pozitif sayılarının toplamına bölümüne eşittir. Doğruluk, Duyarlılık ve Özgüllük değerlerinin nasıl hesaplandığı sırasıyla denklem 7,8,9'da görülmektedir.

$$DOGRULUK = \frac{GP + GN}{GP + YN + GN + YP} \quad (7)$$

$$DUYARLILIK = \frac{GP}{GP + YP} \quad (8)$$

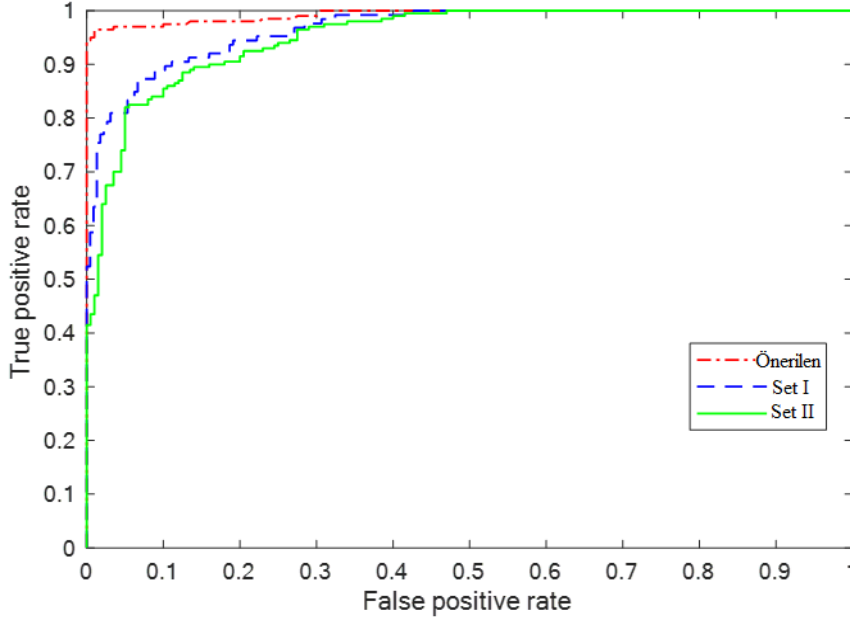
$$ÖZGÜLLÜK = \frac{GN}{GN + YN} \quad (9)$$

Sistemin görüntü erişim performansı kesinlik-duyarlılık (Precision-Recall, PR) eğrileri ile değerlendirilmiştir. Kesinlik-duyarlılık eğrileri bilgi erişiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Deney tasarımıımızda, test veri kümesindeki her imge bir sorgu görüntüsü olarak kullanılmıştır. İki sınıf ve üç sınıf performansları, kesinlik-duyarlılık eğrileri ile kıyaslanmıştır.

Şekil 6, öznitelik seti I,II ve önerilen yöntem için ROC (reciever operator characteristics curve) eğrisi sonuçlarını göstermektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi, öznitelik seti I,II ayrı ayrı kullanıldığında istenilen performansı gösterememektedir. Sonuç olarak, önerilen karar mekanizması ile sistem performansının dikkate değer oranda iyileştirildiği görülmektedir. Ayrıca, kitlelerin yüksek seviyeli derin özellikler ile ifade edilebileceği ortaya konulmuştur. Tablo 2' de önerilen karar mekanizmasının sınıflandırma performansına ait, doğruluk, hassasiyet ve özgüllük değerleri görülmektedir. Şekil 6'da öznitelik seti I'in öznitelik seti II'ye göre daha etkili olduğu görülmektedir. Tablo 3, önerilen sistemin literatürde var olan güncel çalışmalarla performans kıyaslamasını göstermektedir. Tabloda görüldüğü üzere önerilen sistem doğruluk, duyarlılık ve özgüllük bakımından oldukça iyi performans göstermektedir. Ayrıca, en iyi doğruluk, hassaslık ve özgüllük değerlerinin önerilen sistem tarafından elde edildiği görülmektedir.

Tablo 2: Önerilen sistemin sınıflandırma başarıları sonuçları (Classification performance of proposed decision mechanism)

#	Doğruluk(%)	Hassaslık(%)	Özgüllük(%)
1	97.9256	97.0549	93.4207
2	99.0522	97.7084	97.8459
3	94.2580	98.6837	95.0127
4	91.8532	91.0009	96.3730
5	98.2569	95.6649	93.2901
6	97.4948	96.7060	92.8495
7	98.9437	97.4345	94.8181
8	98.6504	93.3903	94.4945
9	99.5822	93.9883	97.3896
10	97.1248	97.5814	96.2121
Ort.	97.3142	95.9213	95.1706

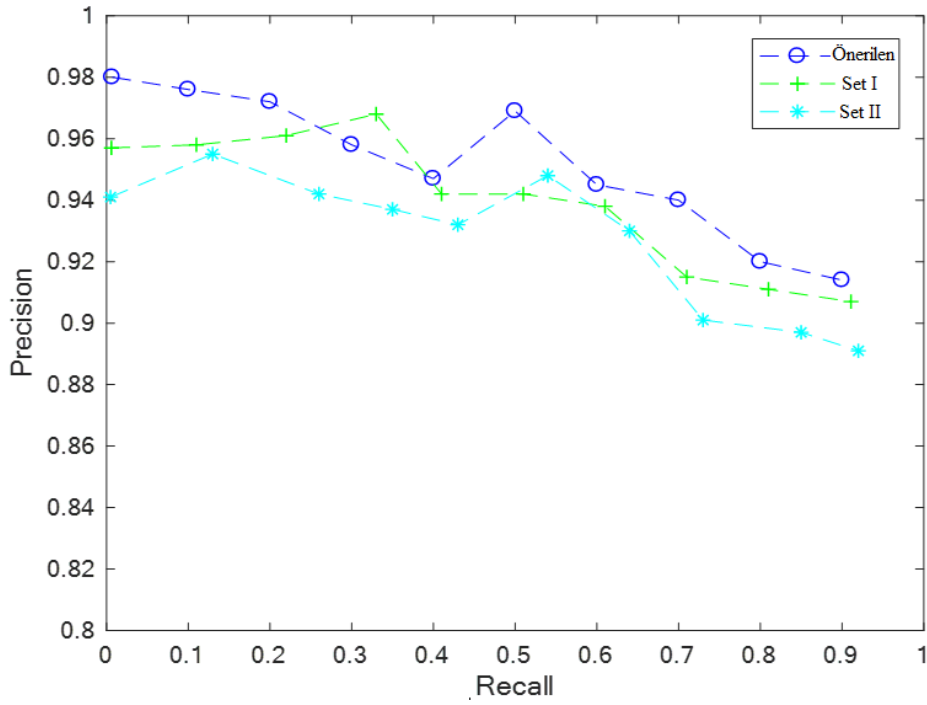


Şekil 5: Farklı öznitelik setleri için ROC eğrileri  
(ROC curves of different feature sets)

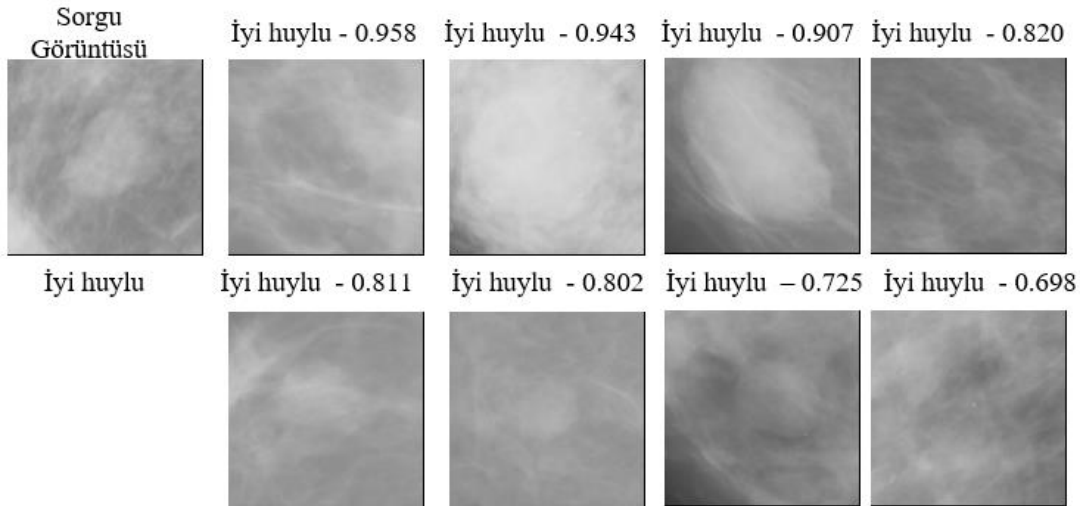
Tablo 3: Önerilen yöntemin literatür ile kıyaslanması  
(Comparison of proposed framework with state of art systems)

Makale	Sınıflandırıcı	Doğruluk(%)	Hassaslık(%)	Özgünlük(%)
Wang et al. (Wang, Li, and Gao 2014)	SVM	92.74	-	-
B. Swiderski et al. (Swiderski et al. 2017)	SVM	90.9	96.7	80.1
M. Jadoon et al, (Jadoon et al. 2017)	SVM	83.74	-	-
Liu and Tang (Liu and Tang 2014)	SVM	93.00	92.00	92.00
Dong et al., (Dong et al. 2015)	GA-SVM	93.24	94.78	91.76
Jen & Yu, (Jen and Yu 2015)	ADC	-	86.0	84.0
N. Gedik et al.(Gedik, Atasoy, and Sevim 2016)	SVM	93.95	87.23	91.39
R. Rouhi et al., (Rouhi et al. 2015)	MLP	95.01	96.25	93.78
Jiao et al. (Jiao et al. 2016)	CNN	96.7	-	-
Önerilen Sistem	ELM	97.31	95.92	95.17

Şekil 7, öznitelik seti I,II ve önerilen yöntem için kesinlik-duyarlılık eğrileri sonuçlarını göstermektedir. Sonuç olarak, önerilen karar mekanizmasının tüm diğer öznitelik setlerinden daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, göğüs kitlelerinin karakteristiklerinin derin özellik tabanlı karar mekanizması ile daha iyi temsil edildiğini doğrulamaktadır. Bu karar mekanizması ile ilgili olarak, % 3'lük duyarlılık ve % 97 hassasiyet değeri ile önerilen İTGE sistemi, 29824 sorgu görüntüsünden 28929'una doğru olarak erişmeyi sağlamıştır. Ayrıca, Şekil 6 ve Şekil 7 AÖM sınıflandırıcılarının tek başlarına kullanıldığında elde edilen sınıflandırma ve görüntü erişim sonuçlarını ifade etmektedir.

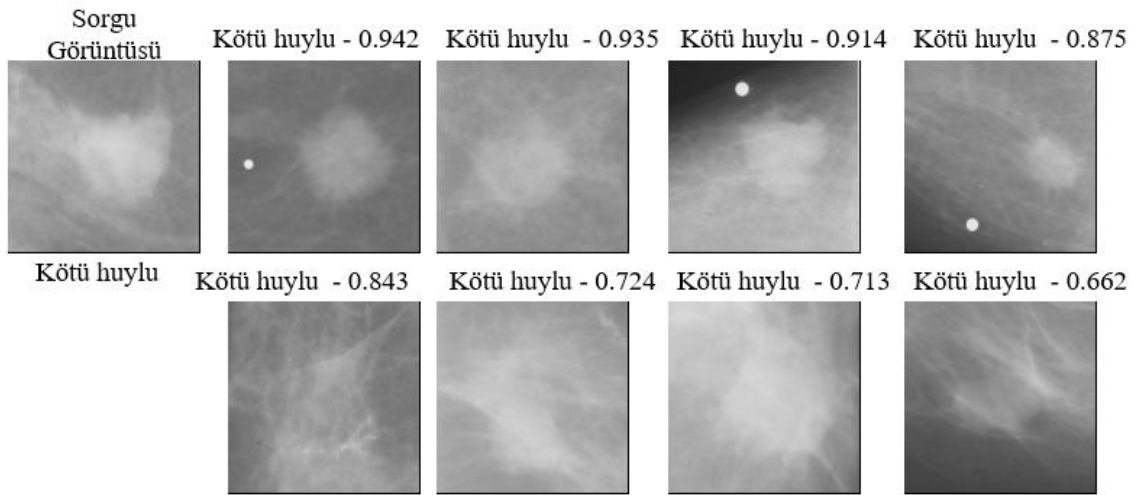


Şekil 6: Farklı öznelik setlerine ait performans sonuçları  
(Performance evaluation of different feature sets)



Şekil 7: İyi huylu örnek sorgu görüntüsüne ait erişim sonuçları  
(Retrieval results for benign query image)

Şekil 8, önerilen sistem için, örnek iyi huylu bir sorgu kitle görüntüsüne ait sorgu sonuçlarını göstermektedir. Getirilen tüm görüntüler iyi huyludur. Şekil 9'da gösterilen diğer örnek kötü huyluya aittir. Elde edilen tüm görüntüler sorgu görüntüsüyle aynı kategoriye aittir.



Şekil 8: Kötü huylu örnek sorgu görüntüsüne ait erişim sonuçları

(Retrieval results for malignant query image)

Yapılan deneyler, geleneksel öznitelik çıkarma yöntemlerinin mamogram sınıflandırma ve erişimi için yeterli olmadığını açıkça göstermektedir. Önerilen sistem, bir evrimsel sinir ağları modelinin derin özniteliklerinden yararlanmaktadır. Önerilen karar mekanizmasının, mamogram sınıflandırma ve erişimi için yeterli performans gösterdiği ortaya konulmuştur. Deneysel sonuçlar, önerilen karar mekanizmasının, literatürdeki yöntemlerden üstünlüğünü ortaya koymaktadır. Ayrıca, geniş veri setlerinin mevcut olmadığı medikal alanlarda önerilen sistemin etkinliği ortaya konulmuştur.

### SONUÇLAR (Conclusions)

Meme kanseri, hücrelerde kötü huylu lezyon gelişimini göstermektedir. Akciğer kanseri sonrasında dünyadaki en yaygın kanser türüdür. Her 8 kadından birinin hayatlarının belirli bir zamanında göğüs kanseri geçirdiği bildirilmektedir. Erkeklerde görülmesine karşın, kadın vakaları erkek vakalardan 100 kat fazladır. Göğüs kanserine karşı en iyi önleyici yöntem erken teşhis yöntemidir. Bu nedenle erken tespiti artırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir. Bilgisayar destekli tanı sistemleri, doktorlara tıbbi görüntüleri yorumlamada yardımcı olmak için kullanılmaktadır. Bilgisayar destekli tanı sistemleri yardımcı bir teşhis sistemidir; nihai karar doktora aittir. Bu çalışmada, mamogramlar için otomatik kitle tespiti, sınıflandırılması ve erişimi için derin öğrenme tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, mamografi görüntülerinin içerik tabanlı erişimi ve sınıflandırılması için değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen sistemin etkililiğini ve gerçek zamanlı klinik uygulamalardaki kullanılabilirliğini göstermektedir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Agrawal, Praful, Mayank Vatsa, and Richa Singh. 2014. "Saliency Based Mass Detection from Screening Mammograms." *Signal Processing* 99. Elsevier BV: 29–47.
- Alto, Hilary. 2007. "Errata: Content-Based Retrieval and Analysis of Mammographic Masses." *Journal of Electronic Imaging* 16 (1): 019801. <https://doi.org/10.1117/1.2713758>.
- "American Cancer Society Published Second Edition of Global Cancer Atlas." 2015. *Oncology Times* 37 (1). Ovid Technologies (Wolters Kluwer Health): 34.
- Bottou, Léon. 2010. "Large-Scale Machine Learning with Stochastic Gradient Descent." In *Proceedings of COMPSTAT'2010*, 177–86. Heidelberg: Physica-Verlag HD.
- Chougrad, Hiba, Hamid Zouaki, and Omar Alheyane. 2018. "Deep Convolutional Neural Networks for

- Breast Cancer Screening." *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 157 (April). Elsevier: 19–30. <https://doi.org/10.1016/J.CMPB.2018.01.011>.
- Cunha, A L Da, J Zhou, and M N Do. 2006. "The Nonsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications." *IEEE Transactions on Image Processing* 15 (10). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 3089–3101. <https://doi.org/10.1109/tip.2006.877507>.
- Deserno, Thomas M, Michael Soiron, Júlia E E de Oliveira, and Arnaldo de A. Araújo. 2012. "Computer-Aided Diagnostics of Screening Mammography Using Content-Based Image Retrieval." *Medical Imaging 2012: Computer-Aided Diagnosis*. SPIE-Intl Soc Optical Eng.
- Do, M N, and M Vetterli. 2005. "The Contourlet Transform: An Efficient Directional Multiresolution Image Representation." *IEEE Transactions on Image Processing* 14 (12). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 2091–2106. <https://doi.org/10.1109/tip.2005.859376>.
- Donahue, Jeff, Yangqing Jia, Oriol Vinyals, Judy Hoffman, Ning Zhang, Eric Tzeng, and Trevor Darrell. 2013. "DeCAF: A Deep Convolutional Activation Feature for Generic Visual Recognition," October. <http://arxiv.org/abs/1310.1531>.
- Dong, Min, Xiangyu Lu, Yide Ma, Yanan Guo, Yurun Ma, and Keju Wang. 2015. "An Efficient Approach for Automated Mass Segmentation and Classification in Mammograms." *Journal of Digital Imaging* 28 (5). Springer Nature: 613–25. <https://doi.org/10.1007/s10278-015-9778-4>.
- El-Naqa, I, Y Yang, N P Galatsanos, R M Nishikawa, and M N Wernick. 2004. "A Similarity Learning Approach to Content-Based Image Retrieval: Application to Digital Mammography." *IEEE Transactions on Medical Imaging* 23 (10). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 1233–44.
- Ganesan, Karthikeyan, U Rajendra Acharya, Chua Kuang Chua, Lim Choo Min, K Thomas Abraham, and Kwan-Hoong Ng. 2013. "Computer-Aided Breast Cancer Detection Using Mammograms: A Review." *IEEE Reviews in Biomedical Engineering* 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 77–98.
- Gedik, Nebi, Ayten Atasoy, and Yusuf Sevim. 2016. "Investigation of Wave Atom Transform by Using the Classification of Mammograms." *Applied Soft Computing* 43: 546–52.
- Hanbay, K., N. Alpaslan, M.F. Talu, D. Hanbay, A. Karci, and A.F. Kocamaz. 2015. "Continuous Rotation Invariant Features for Gradient-Based Texture Classification." *Computer Vision and Image Understanding* 132. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2014.10.004>.
- Jadoon, M. Mohsin, Qianni Zhang, Ihsan Ul Haq, Sharjeel Butt, and Adeel Jadoon. 2017. "Three-Class Mammogram Classification Based on Descriptive CNN Features." *BioMed Research International* 2017. Hindawi Publishing Corporation: 1–11.
- Jen, Chun-Chu, and Shyr-Shen Yu. 2015. "Automatic Detection of Abnormal Mammograms in Mammographic Images." *Expert Systems with Applications* 42 (6). Elsevier BV: 3048–55.
- Jiao, Zhicheng, Xinbo Gao, Ying Wang, and Jie Li. 2016. "A Deep Feature Based Framework for Breast Masses Classification." *Neurocomputing* 197. Elsevier BV: 221–31.
- Kinoshita, Sérgio Koodi, Paulo Mazzoncini de Azevedo-Marques, Roberto Rodrigues Pereira, José Antônio Heisinger Rodrigues, and Rangaraj Mandayam Rangayyan. 2007. "Content-Based Retrieval of Mammograms Using Visual Features Related to Breast Density Patterns." *Journal of Digital Imaging* 20 (2). Springer Nature: 172–90.
- Krizhevsky, Alex, Ilya Sutskever, and Geoffrey E. Hinton. 2012. "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks." <https://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks>.
- Liu, Xiaoming, and Jinshan Tang. 2014. "Mass Classification in Mammograms Using Selected Geometry and Texture Features, and a New SVM-Based Feature Selection Method." *IEEE Systems Journal* 8 (3). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 910–20.
- Meselhy Eltoukhy, Mohamed, Ibrahima Faye, and Brahim Belhaouari Samir. 2010. "A Comparison of Wavelet and Curvelet for Breast Cancer Diagnosis in Digital Mammogram." *Computers in Biology and Medicine* 40 (4). Elsevier BV: 384–91.



- Moura, Daniel C, and Miguel A Guevara López. 2013. "An Evaluation of Image Descriptors Combined with Clinical Data for Breast Cancer Diagnosis." *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 8 (4). Springer Nature: 561–74.
- Mousa, Dana S AL, Claudia Mello-Thoms, Elaine A Ryan, Warwick B Lee, Mariusz W Pietrzyk, Warren M Reed, Robert Heard, et al. 2014. "Mammographic Density and Cancer Detection." *Academic Radiology* 21 (11). Elsevier BV: 1377–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.acra.2014.06.004>.
- Nelson, Heidi D. 2009. "Screening for Breast Cancer: An Update for the U.S. Preventive Services Task Force." *Annals of Internal Medicine* 151 (10). American College of Physicians: 727.
- Nishikawa, Robert M. 2007. "Current Status and Future Directions of Computer-Aided Diagnosis in Mammography." *Computerized Medical Imaging and Graphics* 31 (4–5). Elsevier BV: 224–35.
- Rangayyan, Rangaraj M, Fábio J Ayres, and J E Leo Desautels. 2007. "A Review of Computer-Aided Diagnosis of Breast Cancer: Toward the Detection of Subtle Signs." *Journal of the Franklin Institute* 344 (3–4). Elsevier BV: 312–48. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2006.09.003>.
- Roth, Holger R., Le Lu, Jiamin Liu, Jianhua Yao, Ari Seff, Kevin Cherry, Lauren Kim, and Ronald M. Summers. 2016. "Improving Computer-Aided Detection Using Convolutional Neural Networks and Random View Aggregation." *IEEE Transactions on Medical Imaging* 35 (5): 1170–81. <https://doi.org/10.1109/TMI.2015.2482920>.
- Rouhi, Rahimeh, Mehdi Jafari, Shohreh Kasaei, and Peiman Keshavarzian. 2015. "Benign and Malignant Breast Tumors Classification Based on Region Growing and CNN Segmentation." *Expert Systems with Applications* 42 (3). Elsevier BV: 990–1002.
- Siegel, Rebecca L, Kimberly D Miller, and Ahmedin Jemal. 2015. "Cancer Statistics, 2015." *CA: A Cancer Journal for Clinicians* 65 (1). American Cancer Society: 5–29. <http://dx.doi.org/10.3322/caac.21254>.
- Sun, Wenqing, Tzu-Liang (Bill) Tseng, Jianying Zhang, and Wei Qian. 2017. "Enhancing Deep Convolutional Neural Network Scheme for Breast Cancer Diagnosis with Unlabeled Data." *Computerized Medical Imaging and Graphics* 57 (April). Pergamon: 4–9.
- Swiderski, Bartosz, Stanislaw Osowski, Jaroslaw Kurek, Michal Kruk, Iwona Lugowska, Piotr Rutkowski, and Walid Barhoumi. 2017. "Novel Methods of Image Description and Ensemble of Classifiers in Application to Mammogram Analysis." *Expert Systems with Applications* 81: 67–78.
- Tabár, László, Bedrich Vitak, Tony Hsiu-Hsi Chen, Amy Ming-Fang Yen, Anders Cohen, Tibor Tot, Sherry Yueh-Hsia Chiu, et al. 2011. "Swedish Two-County Trial: Impact of Mammographic Screening on Breast Cancer Mortality during 3 Decades." *Radiology* 260 (3). Radiological Society of North America (RSNA): 658–63. <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.11110469>.
- Vedaldi, Andrea, and Brian Fulkerson. 2010. "Vlfeat: An Open and Portable Library of Computer Vision Algorithms." In *Proceedings of the International Conference on Multimedia - MM '10*, 1469. New York, New York, USA: ACM Press. <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1873951.1874249>.
- Wang, Ying, Jie Li, and Xinbo Gao. 2014. "Latent Feature Mining of Spatial and Marginal Characteristics for Mammographic Mass Classification." *Neurocomputing* 144. Elsevier BV: 107–18.
- Xie, Weiyang, Yunsong Li, and Yide Ma. 2016. "Breast Mass Classification in Digital Mammography Based on Extreme Learning Machine." *Neurocomputing* 173. Elsevier BV: 930–41.
- Zhang, Wenlu, Rongjian Li, Houtao Deng, Li Wang, Weili Lin, Shuiwang Ji, Dinggang Shen, et al. 2013. "Mitosis Detection in Breast Cancer Histology Images with Deep Neural Networks." *Nature* 35 (11). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 529–33.
- — —. 2015. "Deep Convolutional Neural Networks for Multi-Modality Isointense Infant Brain Image Segmentation." *NeuroImage* 108 (March). Academic Press: 214–24.
- Zhang, Yu, Noriko Tomuro, Jacob Furst, and Daniela Stan Raicu. 2011. "Building an Ensemble System for Diagnosing Masses in Mammograms." *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 7 (2). Springer Nature: 323–29.
- Zheng, Bin. 2009. "Computer-Aided Diagnosis in Mammography Using Content-Based Image Retrieval Approaches: Current Status and Future Perspectives." *Algorithms* 2 (2). MDPI AG: 828–49.



## BİLGİSAYARLI GÖRÜ SİSTEMLERİ İÇİN SİSTEM TASARIMI VE KONTROLÜ

<sup>1</sup>Birkan BÜYÜKARIKAN, <sup>2</sup>İsmail Serkan ÜNCÜ

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi, Sarayönü Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, KONYA

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
ISPARTA

<sup>1</sup>birkan@selcuk.edu.tr, <sup>2</sup>serkanuncu@isparta.edu.tr

(Geliş/Received: 21.04.2018 ; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.01.2019)

**ÖZET:** Bilgisayarlı görme uygulamaları için aydınlatma ve sahne önemlidir. Nesnelerin özelliklerini belirlemek ve istenilen kalitede görüntü alabilmek, aydınlatma koşullarının olabildiğince sabit ve kontrollü olması ile sağlanır. Çalışmada bilgisayarlı görme uygulamalarında görüntünün dış koşullardan etkilenmemesi için bir ışık havuzu oluşturulmuştur. Sistemdeki LED aydınlatma armatürlerinin sürülmesi, ışık miktarının ve renk yelpazesinin bilgisayar ile kontrol edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca iki farklı aydınlatma kaynağı kullanılarak mesafelere göre ışık havuzunun orta noktasına düşen aydınlık düzeyinin hem lüksmetre hem de görüntü işleme teknikleri ile belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayarlı görme, LED aydınlatma, LED sürücü, ışık havuzu, görüntü

### System Design and Control for Computer Vision Systems

**ABSTRACT:** Lighting and environment are important for computer vision applications. It is necessary to determine the properties of the objects and to get the desired quality images. So as to be provided with constant and controlled lighting conditions. In the study, a pool of light was created so that the image was not affected by external conditions in computer vision applications. LED lighting fixtures driver, the amount of light and the color spectrum provided to control the computer in the system. In addition, two different lighting sources were used, and according to the distance of the center of the light pool of the light level was determined by both the luxury meter and the image processing techniques.

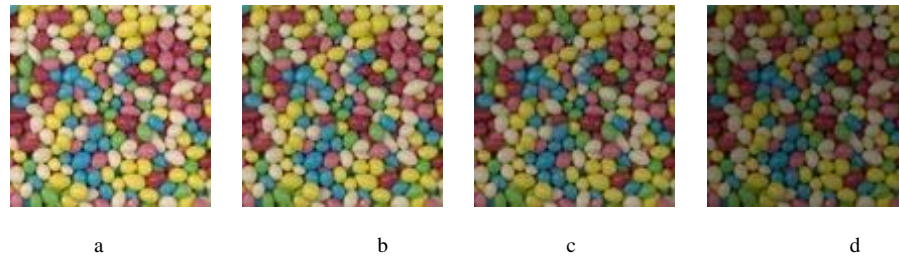
**Key Words:** Computer vision, LED lighting, LED driving, lighting pool, image processing

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilgisayarlı görme uygulamalarında görüntünün alınması için oluşturulan sistem; bilgisayar, kamera, lens ve sisteme uygun olarak belirlenmiş bilgisayar yazılımından ibaret değildir. Bu yüzden görüntüleme sistemine ek olarak uygun mekanik destekler, ışık kaynağı ve optiğinde kullanılması bir gereklilik oluşturmaktadır (Batchelor, 2012). Bu sistemden elde edilen görüntülerin analizi için görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. Görüntü işlemeyi matematiksel olarak ifade etmek için, nesnenin ve arka planın parlaklık değerlerinin farklı olması gerekmektedir. Bunu yapabilecek sistem de ışıktır (Jahr, 2006).

Aydınlatma CIE (Commission Internationale de L'eclairage- Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)'ye göre; çevrenin ve nesnelerin gerektiği gibi görülmesini sağlamak için ışığın uygulanması olarak tanımlanmıştır (IESNA, 2000). Bilgisayarlı görme sistemlerinde aydınlatma kullanılmasının temel amacı, nesnelerin görebileceği kadar basit ve kusursuz analiz imkânı sağlayabilen bir görüntünün elde

edilmesidir (Harding, 2003). Ancak ışık kaynağı ve görüntüleme aygıtları, görüntünün parlaklık ve renk bilgilerinin değişmesine sebep olmaktadır (Yuntao, 2004; Li-Li ve diğ., 2013). Bu bağlamda harici bir ışık kaynağı tarafından eşit olmayan bir şekilde nesnelerin aydınlatılması, yarardan çok zarara neden olacak ve görüntü işleme teknikleri de yetersiz kalacaktır (Linde ve diğ., 1980; Kopparapu, 2006). Bu yüzden ışık kaynağı ve görüntüleme aygıtlarının seçimi ve yerleştirilmesi, başarılı bir görüntüleme sisteminde önemli bir adımı oluşturmaktadır (Cowan ve diğ., 1992; Kopparapu, 2006). Ancak bir kameranın çözünürlüğü ne kadar iyi olursa olsun veya frame yakalama hızı ne kadar hızlı olursa olsun, görüntünün kalitesi kameraya sunulan ışığa bağlıdır (Lecklider, 2007). Yani renkli bir kameradan algılanan görüntüdeki nesnelerin renkleri, aydınlatma koşullarına göre değişir (Martinkauppi, 2002). Bu durumda, aydınlatma koşullarındaki değişimler nesnenin görüntüsünün farklı algılanmasına sebep olmaktadır (Belhumeur ve Kriegman, 1998). Örneğin Cusano ve diğ., (2016) Raw Food verisetindeki nesnelerin görüntüleri farklı aydınlatma kaynaklarında elde etmişlerdir (Şekil 1). Görülmektedir ki nesneler farklı aydınlatma koşullarında farklı olarak algılanabilir.



**Şekil 1.** Raw Food verisetindeki farklı dimleme ile elde edilen görüntüler (Cusano ve diğ., 2016) (Images with different dimming in Raw Food dataset)  
a) D65 (I=%100) b) D65 (I=%75) c) D65 (I=%50) d) D65 (I=%25)

Bu bağlamda aydınlatmayı doğru ve istenilen optik çıktıda tutmak için, akıllı bir kontrol teknolojisine ihtiyaç bulunmaktadır (Huang ve diğ., 2007). Günümüzde Işık Yayan Diyot (LED), bilgisayarlı görme uygulamaları için kullanılan ideal bir ışık kaynağıdır (Li-Li ve diğ., 2013). LED aydınlatma ile ışık yoğunluğu, ışığın rengi ve aydınlatma modeli kolaylıkla kontrol altında tutulabilir (Linnartz ve diğ., 2008).

Bilgisayarlı görünümün önemli öznelikliğini oluşturan aydınlatma, görüntüsü alınacak nesne ve yakın çevre arasındaki parlaklık farkıyla, kolaylıkla görüntülenebilir (Pritchard, 1999). Bunun için bilgisayarlı görü sistemleri genellikle yarı parlak bir zemine sahiptir. Amaç yansıyan parlamayı en aza indirmek ve yüksek görünürlük elde etmektir. Bu yüzden bu sistemlerde geniş bir alan kullanmak gerekmektedir (Kraehenbuehl, 1949). Bu bağlamda aydınlatma sisteminin amacına uygun olarak çalışabilmesi, ışığın yönetilebilmesi ve görüntüleme sisteminin olabildiğince dış etkenlerden uzaklaştırılmasıyla sisteminin işlevselliği arttırılabilir.

Bu çalışmada bilgisayarlı görü sistemi için 1 m<sup>3</sup>lük bir ışık havuzu oluşturulmuş ve böylece elde edilecek görüntünün dış koşullardan etkilenmemesi, sahne kısıtlanması ile ışığın sabit bir şekilde ortamı aydınlatması sağlanmıştır. Aydınlatmanın kontrolü için bilgisayar kontrollü elektronik bir LED sürücüsü yapılmıştır. Bu LED sürücüsü farklı voltaj ve teknolojideki LED armatürlerin sürülmesi sağlanmıştır. Ayrıca sistemin aydınlık düzeyinin belirlenmesi için görüntü işleme teknikleri kullanılarak Dome ve Coaxial LED armatürlerde sonuçlar verilmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde aydınlatma sistemi tasarımı ve LED ışık kaynağının sürülmesi ve kontrolünü sağlamışlardır. Muthu ve Gaines (2003), çalışmalarında RGB-LED ışık kaynağının uygulanması, sensör yerleşimi, LED sürülmesi ve kontrollerine sahip bir aydınlatma tasarlamışlardır. Teikari ve diğ. (2012) LED ve Arduino ile sürücü tasarlamışlardır ve laboratuvar için görme sistemlerinde uygulamışlardır. Sugiyama ve diğ. (2007), aydınlatma kaynağının parlaklığını kablosuz iletişim teknolojisi ile kontrol edebilen bir sistem oluşturmuşlardır. Sürücü 0-100 değerleri arasında

dimlemeye izin vermişlerdir. Miki ve diğ. (2010), çalışma ormanına yerleştirilen sensörler yardımıyla aydınlık verilerini gerçek zamanlı dağılımını görselleştiren akıllı bir aydınlatma sistemi tasarlayarak çalışanların ihtiyaç duyduğu aydınlığın seviyesinin elde edilmesini sağlamışlardır. Moo ve diğ. (2012) ise 45 W'lık LED lambalar için dimlenebilir bir sürücü tasarlamışlardır. Dimlenme sırasında bile yüksek verimlilik elde etmişlerdir. Ismail ve diğ. (2013) farklı lüks değerlerinin görü işleme ile karşılıklarını bulup regresyon analizi ile karşılaştırma yapmıştır. Yusuf ve diğ. (2018) riskli bölgedeki aydınlatmanın izlenmesi için parlaklık seviyesini gerçek lüks değerleri ile ilişkilendiren görüntü işleme temelli bir teknik önermişlerdir. Kullandıkları aydınlatmaların kombinasyonları ile lüks değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Kopparapu (2006) makineli görme uygulamaları için birkaç ışık kaynağı kullanarak görüntü sahnesinde düzgün aydınlatma elde etmek için bir tasarım önermiştir. Çalışmada ışık kaynağının optimum pozisyonu belirlemeye çalışmıştır. Xu ve diğ. (2017) silindir yüzeyin kusurlarını belirlemek için aydınlatma sistemi tasarlamışlardır. Bu sistemde ışık kaynağının pozlama ve konumunun etkisine bakılmıştır.

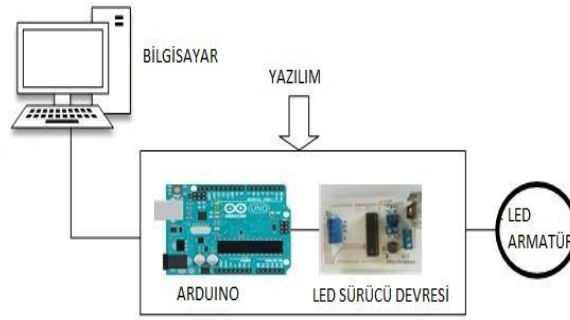
## MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bilgisayarlı görü uygulamalarının verimli olarak kullanılabilmesi için sabit bir sistem tasarlanması ve kullanılan sahnede istenilen çıktıda ışık üretmesi görüntü işlemedeki çalışma performansını etkileyecektir. Çalışmada LED aydınlatma armatürlerin sürüldüğü bir elektronik kart tasarlanmıştır. Sürücü devresi farklı çalışma prensibine sahip teknolojileri kullanan aydınlatma kaynaklarının hem PWM sinyali hem de makinalı görü LED armatürlerinin bir arada çalışması sağlanmıştır. Elektronik sistem Arduino Mega 2560 üzerine oluşturulan elektronik bir kart bilgisayar yardımıyla yönetilmiştir. Ayrıca sürücü LED aydınlatmalarının parlaklıklarını %0 - %100 arasında dimleme ile kullanımına izin vermektedir. Görüntü alma sırasında kamera ve LED armatürün istenilen yüksekliğe ayarlanabilmesi için bir kol tasarlanmıştır ve step motor yardımıyla bilgisayar tarafından yönlendirilme yapılabilmektedir. Sistemin bilgisayar yardımıyla yönlendirilmesi için Visual Studio C# 2012 programlama dili kullanılmıştır. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak aydınlık düzeyi de hesaplanmıştır.

### LED Sürücüsü Tasarımı ve Sürülmesi (LED Driver Design and Driving)

Bilgisayarlı görü uygulamalarındaki nesnelerin özellikleri çeşitli optik ve aydınlatma yöntemleriyle kolaylıkla belirlenebilir (Wilson, 1999). Aydınlatma endüstrisi geliştikçe aydınlatma sistemleri için ihtiyaç duyulan akıllı denetleyici ve sürücüler, artan ihtiyaçların karşılanmasını sağlayacaktır (Louw ve Neethling, 2013). Bu yüzden LED aydınlatma sürücüleri, sistemin ışığını dimleme ve ışık yelpazesini değiştirme gibi gelişmiş kontrol işlevselliğini desteklemesinin yanı sıra, sistemin tutarlı ışık kalitesinin de üretilmesini sağlaması gerekmektedir (Louw ve Neethling, 2013; Led-professional, 2018).

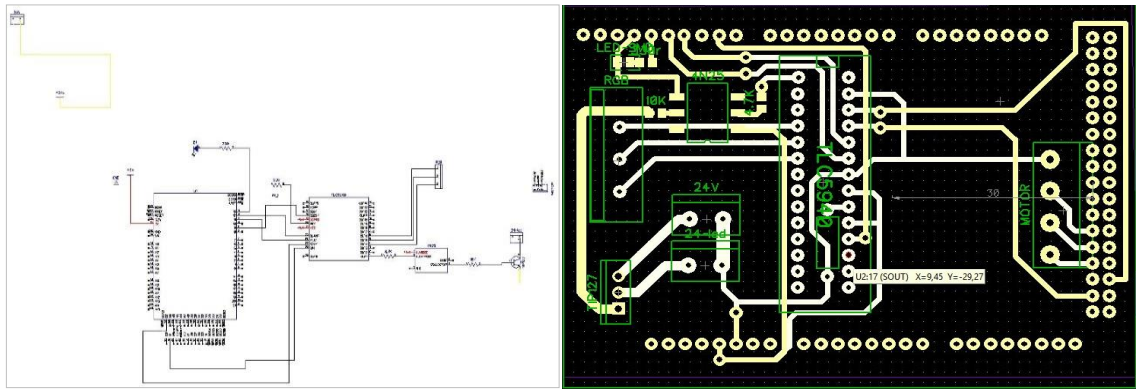
LED armatürlerin istenilen aydınlık düzeyine indirilmesi veya çıkarılabilmesi için dimlemeyi ve farklı renk ışık yelpazesinin istenilen oranlarda ayarlanmasını sağlamak üzere oluşturulan LED sürücüsü devresinin blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Çalışmada sabit koşulların olduğu bir sistemde LED armatürlerin istenilen çıktıda sonuç üretebilmesi için sürücü devresi Arduino Mega 2560 ile kontrol edilmiştir.



Şekil 2. LED sürücüsünün blok diyagram şeması (Block diagram of the LED driver)

Arduino, tasarlanmış sistemde bir veri iletişim cihazına benzer şekilde işleve sahip olup; anahtar, buton, joystick, sensörler gibi dışardan gelen analog/dijital girişleri okuyabilmesiyle beraberinde Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) sinyalleri ile LED sürücüsünü kontrol edebilmektedir (Stankus ve diğ., 2010). ATmega2560 tabanlı bir Arduino kartıdır. Bu kart 54 dijital I/O pine sahip olup, bunların 14 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir (Arduino, 2018). Arduino tarafından kontrol edilebilen PWM sinyali ile LED'lerin ışık çıkışını, PWM sinyalinin çalışma döngüsünün fonksiyonuyla doğrusal olacak bir şekilde yönlendirilmektedir ve iyi kalitede ışık miktarıyla birlikte ışığın rengini de belirlemektedir (Teikari ve diğ., 2012). LED kaynaklarının parlaklıkları, PWM veya akım ayarlanması ile üretilebilir. Parlaklıkları ayarlanabilen LED kaynakları ile farklı renklerin sisteme aktarılması sağlanabilir (Narra ve Zinger, 2004). Bu yüzden farklı RGB renklerinin oluşturulması için PWM Switch kullanılmıştır.

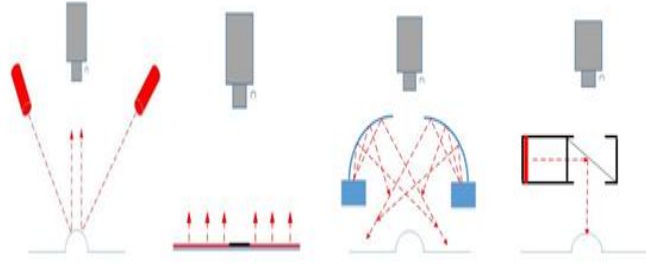
Elektronik sistemde 12 ve 24 Volt ile çalışabilen farklı çalışma prensiplerine sahip armatürlerin aynı devre üzerinden sürülmesi sağlanarak gerekli sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. LED sürücüsünün devresi ISIS ve ARES çıktısı (LED driver circuit ISIS and ARES output)

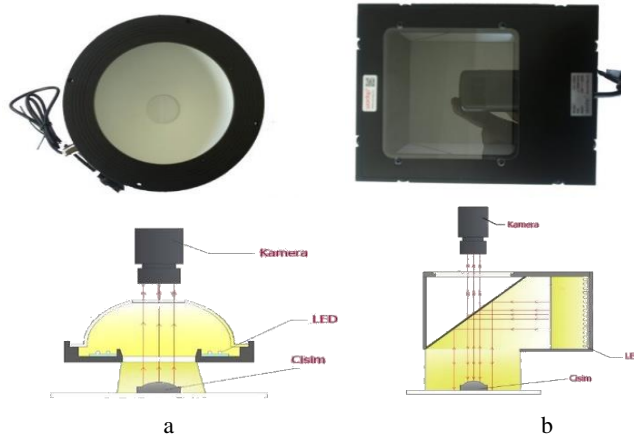
### Işık Havuzu Tasarımı (Light Pool Design)

Bilgisayarlı veya makineli görme sistemlerinde, nesne ve kameranın yanı sıra ışık kaynağının yerleştirilmesi de önemlidir. Örneğin ışık kaynağı, nesne ile aynı tarafa yerleştirilmesi ön aydınlatma olmaktadır. Böylece gelen ışık nesnenin üzerine düşecektir. Işık kaynağı, nesnenin karşı tarafında ise geri aydınlatmayı ifade eder ve bu aydınlatma türü özellikle şeffaf nesne görüntülerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır (Steger ve diğ., 2008). Şekil 4'te aydınlatma şekillerinden; arka aydınlatma, halka aydınlatma, karanlık alan aydınlatması ve ışık difüzyon yöntemleri görülmektedir. Görü sistemlerinde aydınlatma ve optik uygulamalardan başarılı sonuçlar elde edebilmek için bu aydınlatma şekillerinin denenmesi bir gerekliliktir (Wilson, 1999).



Şekil 4. Aydınlatma şekilleri (Lighting types)

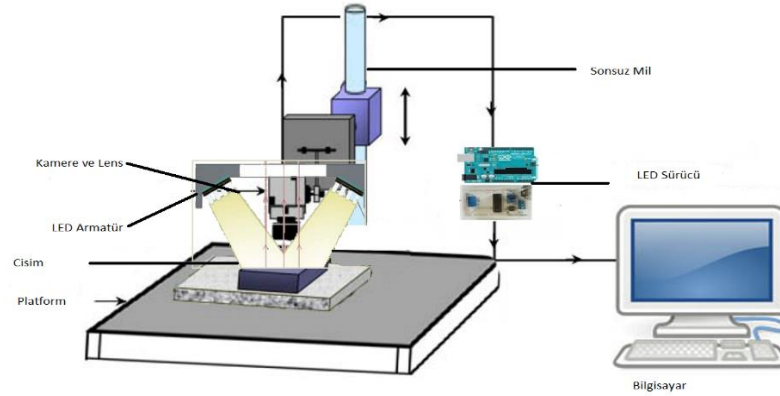
LED armatürler cisimlerin yüzeyine uygun olarak kontrast oluşturarak görüntünün daha net elde edilmesi için uygulanmaktadır (Jun, 2006). Bilgisayarlı görü sistemleri için kullanılan LED aydınlatma armatürleri Şekil 5'te verilmiştir. Dome armatür; yuvarlak bölge, kabartma, desen algılama ve gölge oluşumu olmadan nesnelere aydınlatan ve Coaxial armatür ise metal yüzeylerdeki çukurları, işlenmiş yazıları belirlemektedir.



Şekil 5. Sistemde kullanılan LED armatürler (LED fixtures used in the system)

a) Dome b) Coaxial

Aydınlatma şekillerinin kullanılabilirliğinde sabit bir sistemin kullanılması elde edilen görüntülerin dış koşullardaki çevresel veya kullanıcı bazlı etkilerin azaltılmasını sağlar. Bu yüzden bir ışık havuzu oluşturulmuştur. Kamera, lens, aydınlatma armatürü ve LED sürücünden oluşan ışık havuzunun blok diyagramı Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Aydınlatma havuzunun iç blok diyagramı (Internal block diagram of a lighting pool)

Aydınlatılan nesnenin yüzeyinin parlaması yapılan işin güçleşmesine yol açar. Bu yüzden parlamada aydınlatılmış yüzeyin bir bölümünün diğer bölümlerine oranla daha fazla ışık yansıtmasına sebep olmaktadır (Kocabey, 1999). Nesnenin aydınlatılması sırasında meydana gelebilecek olumsuz etkilerin elimine edilebilmesi için ışık havuzunun içi siyah koton kumaşla kaplanmıştır ve yansıtma katsayısı 0,05'tir

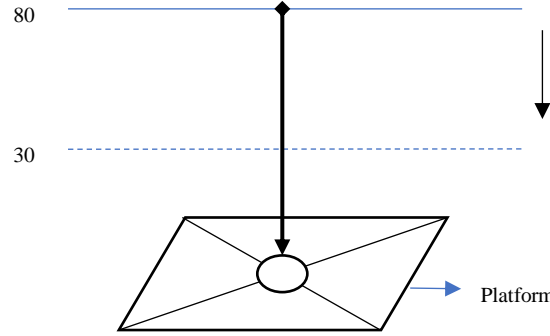
Renklerin yansıtma katsayıları Çizelge 1'de görülmektedir (CIE, 1997).

Çizelge 1. Renklerin yansıtma katsayıları (Reflection coefficients of colors)

Renkler	Yansıtma faktörü
Siyah	0,05
Koyu kırmızı	0,10
Orta gri	0,20
Açık kahverengi	0,30
Açık gri	0,40
Gök mavi	0,40
Pembe, Açık yeşil	0,45
Açık sarı	0,70
Beyaz	0,80

Siyah koton kumaş yansıtma faktörü en düşük olan renktir. Sistem böylece dış koşullardan kaynaklanabilecek parlaklığı en aza indirerek nesnenin görüntüsündeki piksel parlaklığını ve bozulmasının etkilerini ortadan kaldıracaktır.

Işık havuzunda görüntü alınması gereken kısmın boyu standartlara göre 80-85 cm'dir (CIE, 1997). Bu yüzden sistem için 1 m<sup>3</sup>'lük kabin yapılmıştır. Sistemdeki farklı yükseklerdeki aydınlık düzeyinin ölçülmesi için sonsuz mil kullanarak bir asansör kol oluşturulmuştur. Böylece kamera, lens ve aydınlatma armatürünün hareketli sisteme sahip olması ile farklı mesafelerde görüntü alınması sağlanmıştır. Yani aydınlatma şekillerine göre kullanılan LED Armatürlerin yaklaştırılması ve uzaklaştırılması da yapılabilmektedir. Ayrıca bu asansör sistemi bilgisayar kontrollü bir düzeneğe sahiptir. Görüntü işleme ile aydınlık düzeyi ölçülürken görüntüler alınmıştır. Şekil 7'de 30 ile 80 cm arasında 10 cm'lik aralıklarla yarı parlak gri bir zemine sahip olan platformun orta noktasından armatürlerin aydınlık düzeyleri ölçülmüştür.



Şekil 7. Aydınlik düzeyi ölçümü (Light level measurement)

LED armatürlerin maksimum vermiş oldukları aydınlık düzeyi (parlaklık %100) değeri ayarlanarak programın belirlediği lüks ve lüksmetrenin ölçtüğü lüks değeri alınarak excel dosyasına kaydedilmiştir.

### Görüntü İşleme ile Aydınlik Düzeyi (Luminance Level with Image Processing Techniques)

Aydınlik düzeyi, birim yüzeye düşen ışık akısının dik bileşenini ifade eder ve Denklem 1’de gibi hesaplanmaktadır (Özkaya ve Tüfekçi, 2011).

$$E_{ort} = \frac{\Delta\Phi_d}{\Delta S} \quad (1)$$

Aydınlik düzeyi, lüksmetre ile ölçülebilen bir büyüklüktür. Ancak aydınlatma sistemlerinde bazı fotometrik testlerin yapılması sırasında aydınlık düzeyinin değeri lüksmetreye gerek kalmadan ölçülmesi önemlidir. Bu yüzden görüntü işleme teknikleri ile aydınlık düzeyi ölçülebilir. Elde edilen lüks değerleri ile lüks metre lüks değerleri arasında matematiksel olarak bağlantı kurulması ile aydınlık düzeyleri kolaylıkla belirlenebilecektir.

Görüntü işleme teknikleri ile aydınlık düzeyinin bulunması için elde edilen renkli görüntü Denklem 2 kullanılarak gri seviyede görüntüye çevrilmektedir (Gonzalez ve Woods, 2008).

$$I(x, y) = [0.2989 \quad 0.5870 \quad 0.1140] * \begin{bmatrix} R(x, y) \\ G(x, y) \\ B(x, y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Elde edilen gri seviye  $I(x, y)$  görüntüsü değeri, m ve n piksel değerlerinin ortalama fonksiyonu ile Denklem 3 kullanılarak lüks değeri hesaplanır (Ismail ve diğ., 2013).

$$I_{ort} = \frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} I(x, y) \quad (3)$$

Lüks değerleri arasında bağlantı sağlayacak matematiksel yöntemlerden biri de regresyondur. Çalışmada aydınlık düzeyi ile lüks metrenin ölçtüğü aydınlık düzeyi arasındaki ilişkiyi istatistiksel yöntemlerden biri olan regresyon modeli kullanılmıştır. Regresyon analizinden elde edilen belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) 1’e yaklaştıkça modelin uygunluğu artmaktadır.

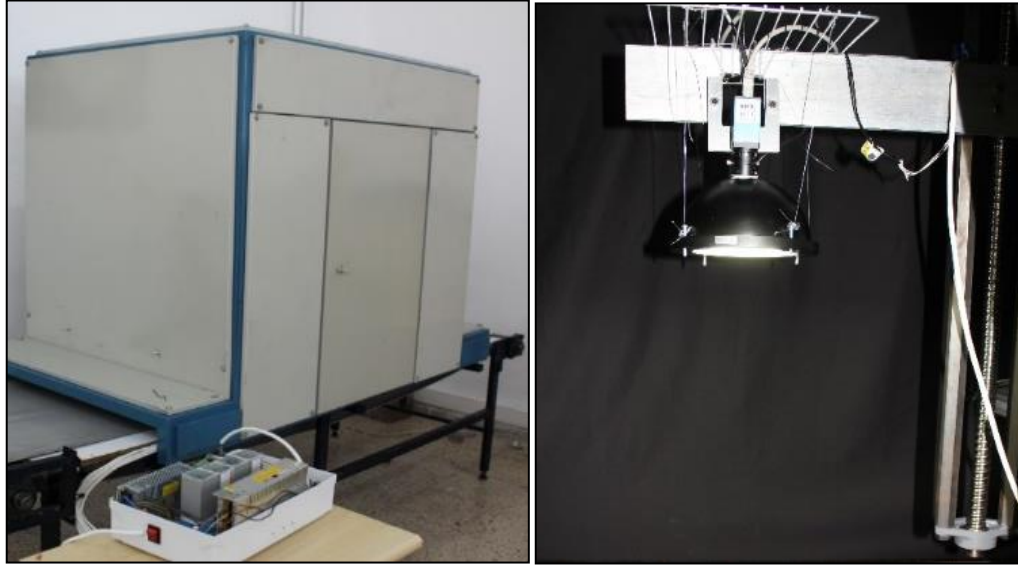
## BULGULAR (RESULTS)

### Işık Havuzu ve LED Sürücü Devresi (Light Pool and LED Driver Circuit)

Aydınlatma görme uygulamaları için büyük önem taşıyan bir özelliktir. Nesnelerin muayenesi, ışık kaynağının yeri ile kontrol edilebilmektedir. Aynı nesne farklı aydınlatma armatürleri ve gerekli ayarlarının değiştirilmesiyle nesnelerin özellikleri daha doğru ve kaliteli bir şekilde incelenebilmesi sağlanabilecektir (Jehle ve diğ., 2010). Bilgisayarlı görü uygulamaları gibi ışık kaynağı, kamera, lens ve incelenecek nesneden oluşan sistemlerde kameranın görüş alanındaki nesneye, mümkün olduğunca düzenli ışık verilmesi oldukça önemlidir. Bu yüzden kapalı bir ortam içerisinde aydınlatma yapılması,

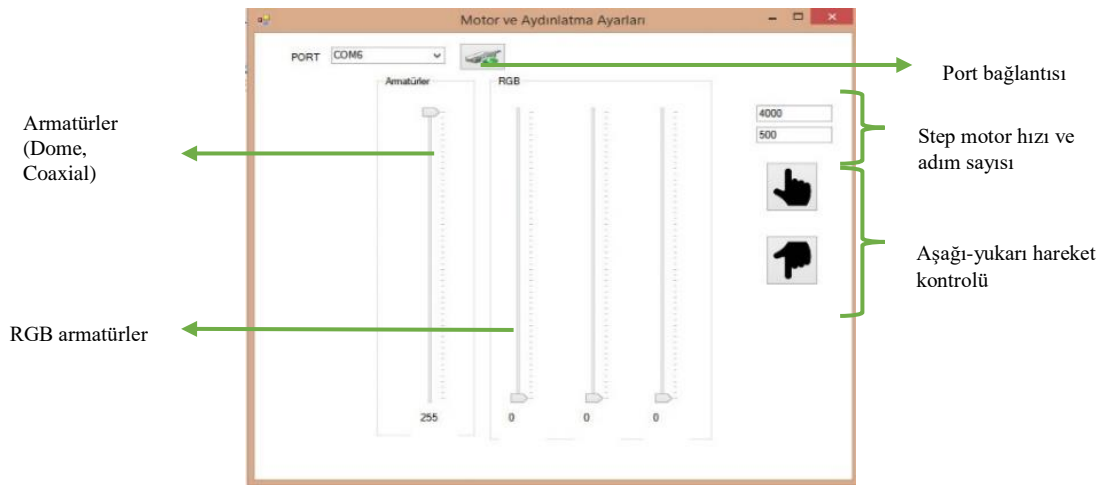


aydınlatmanın sabit koşullarını sağlamak için ilk adımı oluşturur. Bu özelliği sağlayan ışık havuzunun mekanik ve elektronik sistemin görünümü Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Işık havuzunun iç ve dış görünüşü (Light pool and electronic system structure)

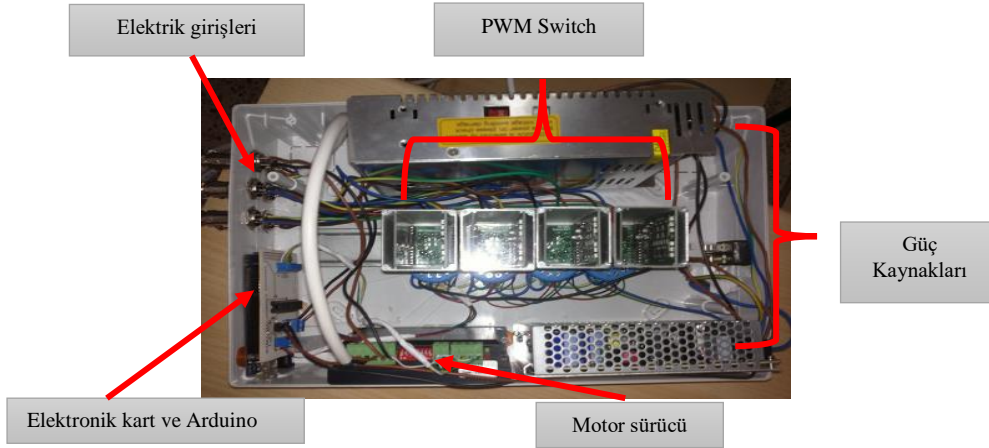
Tasarlanmış görüntüleme sisteminde kullanılan kamera, aydınlatma armatürünün merkezine yerleştirilmiştir. Böylece aydınlatma şekillerine uygun olarak çalışma sağlanmıştır. Işık havuzunun bilgisayarla kontrolünde armatürlerin ışık miktarları ya da parlaklık düzeyleri 0-255 değer aralığındaki (%0-100) dimleme ve renk yelpazelerine göre ayarlanması yazılım yardımıyla yapılabilmektedir. Böylece havuzdaki nesnelere üzerine düşecek ışık miktarı kullanıcı tarafından belirlenmektedir (Şekil 9). Ayrıca asansör kol step motor yardımıyla aşağı-yukarı hareketi ve motorun hareketindeki adım sayısı ile hareketin hız kontrolü de yazılım sisteminden ayarlanabilmektedir.



Şekil 9. Motor ve LED armatür sürme arayüzü (Motor and LED armature driving interface)

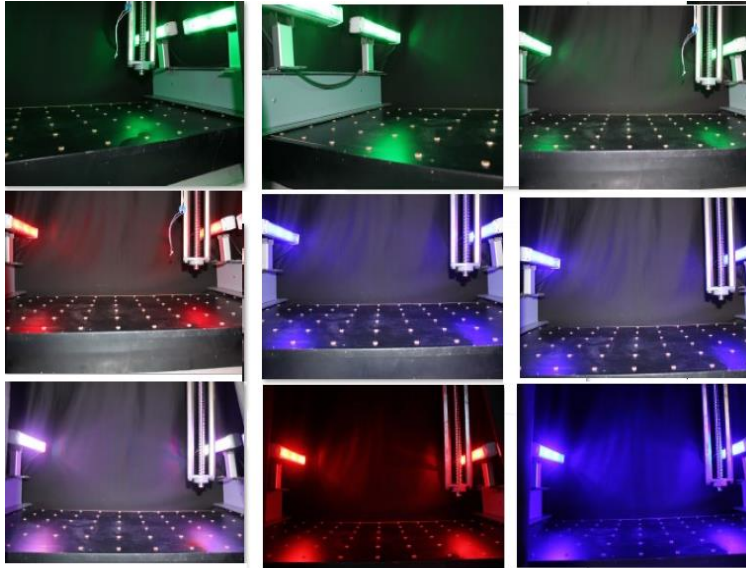
Görüntü işlemede aydınlatma ve görüntü alma sisteminin bir arada ve uyum içinde çalışabilmesi, bilgisayar tarafından kontrol edilen sistemin kumanda edilerek nesnelere ait özneliklerin alınmasında önemli bir role sahiptir. Şekil 10’da görüldüğü üzere tüm elektronik sistem bir kutuda birleştirilmiştir.

Sistemden çıkan elektrik çıkışlarına görüntüleme sisteminde kullanılan LED armatürlerin bağlanması sonucunda, yazılımla ışık miktarı ve renkleri belirlenebilmektedir.



Şekil 10. Elektronik sistem (Electronic system)

Sistemde bulunan LED sürücü devresinde hem 12V hem de 24V ile çalışan armatürler birlikte sürülebilmektedir. Böylece LED armatürlerin daha verimli çalışabilmesi için sinyallerin kontrollü olması gerekmektedir. Işık havuzunun yan tarafına yerleştirilen LED armatürlerin PWM kontrol sistemleri kullanılarak herhangi bir ışık çıkış seviyesinde renginin korunması da gerçekleştirilmiştir. Şekil 11’de PWM Switchlerle renklerin kontrol edilmesi görülmektedir.



Şekil 11. PWM Switch kullanımı (Using PWM Switch)

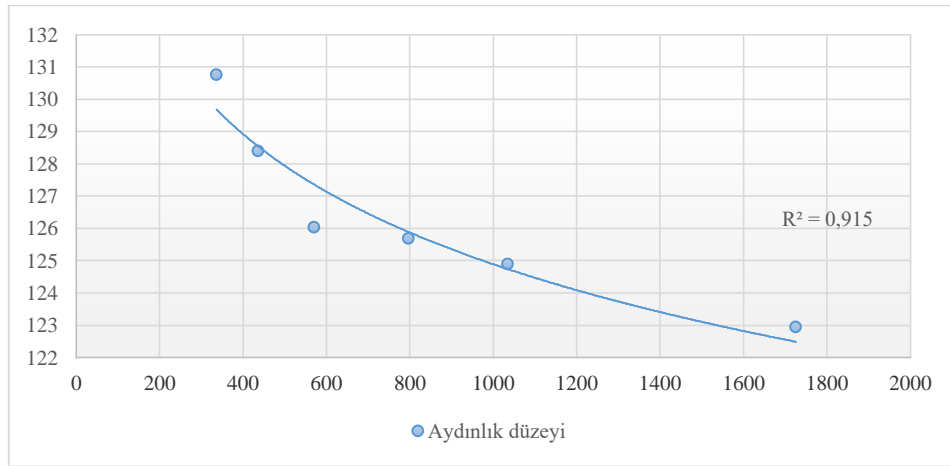
#### Görüntü İşleme Teknikleri ile Aydınlık Düzeyinin Belirlenmesi (Determination of Luminance Level by Image Processing Techniques)

Bilgisayarlı görü uygulamalarında görüntü üzerindeki kontrastın sağlanması için kullanılan aydınlatma şekilleri ile ışığın sahneye olan etkisi değişmektedir. Amaç ışığın belirli düzeyde olmasını sağlayarak görüntünün özelliklerinin kolaylıkla alınmasıdır. Bu yüzden sahnenin belli noktalarının aydınlık düzeylerinin belirlenmesi için lüksmetre ile ölçüm yapılmaktadır. Ancak aydınlık düzeyini

ölçmek için ölçüm aletinin bulunmadığı veya aydınlık düzeyinin matematiksel formül ile hesaplanması mümkün olmadığı zaman en az hata ile sonucun bulunması bir gerekliliktir. Özellikle bilgisayarlı görü uygulamalarında görüntünün alınması için kullanılan aydınlatmadaki fotometrik testlerin gerekli parametrelerden biri olan aydınlık düzeyinin her seferinde ölçüm yapılacak olması uzun bir zaman almaktadır. Bu yüzden aydınlık düzeyinin belirli noktalara göre değerleri elde edilerek diğer noktalardaki ışık şiddeti yapay zeka teknikleri kullanılarak tahmin edilebileceği gibi farklı mesafelere ve belirli noktalara göre aydınlık düzeyi görüntü işleme teknikleri ile lüks değerleri arasındaki ilişki regresyon yöntemiyle belirlenebilir.

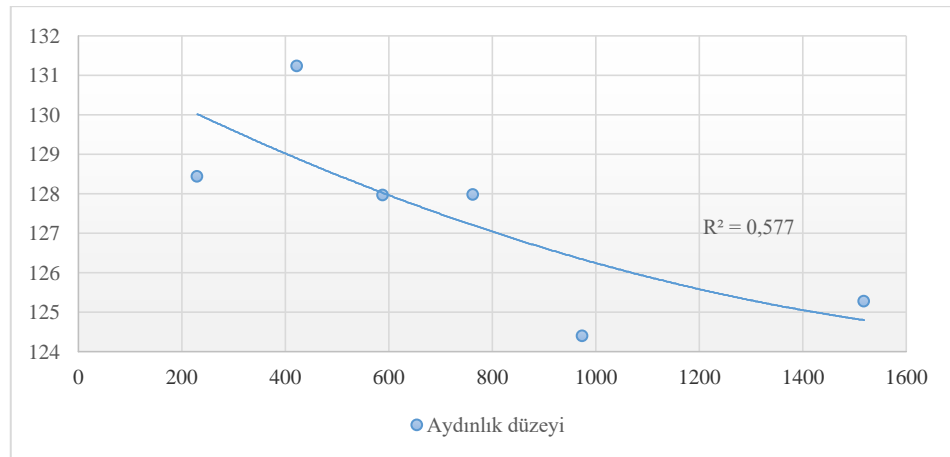
Bilgisayarlı görme uygulamaları için yapılan birçok LED aydınlatma armatürleri vardır. Farklı aydınlatma şekillerini içeren Dome ve Coaxial LED aydınlatma armatürleri kullanılarak aydınlık düzeyinin görüntü işleme teknikleri ve lüksmetrenin ölçtüğü lüks değerleri ile ilişki durumları regresyon analizi ile incelenmiştir. Buna göre bu aydınlatma armatürünün lüksmetre ile ölçülen aydınlık düzeyi (x koordinat) ve görüntü işleme metotları ile oluşturulan aydınlık düzeyi (y koordinat)'dir.

Şekil 12'de Dome LED armatürünün maksimum parlaklık değerine (dimleme ayarı %100) göre belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) 0,915 ve bu ilişkinin denklemi ise  $y = -4,397\ln(x) + 155,26$  olarak bulunmuştur.



Şekil 12. Dome LED aydınlatma lüks değerleri (Dome LED lighting luxury values)

Şekil 13'te Coaxial armatürün maksimum parlaklığına göre belirlilik katsayısı 0,577 ve ilişki denklemi  $y = 2e-06x^2 - 0,0069x + 131,52$  olarak bulunmuştur.



Şekil 13. Coaxial LED aydınlatma lüks değerleri (Coaxial LED lighting luxury values)

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Nesnelerin kontrol edilmesi için oluşturulan bir görüntüleme sistemi tasarlanırken, genellikle kameranın özelliklerine dikkat edilmektedir. Ancak bilgisayarlı görü uygulamalarında nesne üzerine düşen ışık miktarının yeterli olmaması neticesinde nesnenin rengi, doku özellikleri gibi elde edilen veriler ile istenilen sonuçlara ulaşılabilmesi zorlaşacaktır. Bu nedenle kaliteli bir görüntü alabilmek için nesnelerin yeterli ve uygun bir şekilde aydınlatılması gerekmektedir. Aydınlatma, çeşitli gerçek zamanlı bilgisayarlı görme uygulamasında ortak bir gereklilik olan, değişmeyen ve düzgün aydınlatılmış ortamın sürdürülmesi için bir gereklidir. Düzgün bir yüzeyde gerçekleştirilmeyen aydınlatma, herhangi bir bilgisayarlı görme uygulamasının ilk adımı olan, gerekli düşük seviye görüntü işleme algoritmalarının dayanıklılığını etkileyebilmektedir.

Aydınlatma armatürleri, nesne yüzeylerinin homojen olarak aydınlatılmasıyla alınacak görüntünün kontrastını optimize edilerek, nesnelerin özneliklerinin belirlenmesini sağlanabilir. Ayrıca aydınlatma sisteminin dimleme ve farklı renk yelpazelerindeki yönetimi, görüntüleme sistemine potansiyel faydalar sunacaktır. Bu bağlamda LED armatürlerin sürülmesi için oluşturulan elektronik sistem ve bu sistemin bilgisayar kontrollü yönetiminde C# programlama dili kullanılarak aydınlatmanın istenilen düzeyde olması sağlanmıştır. Ayrıca farklı voltaj isteyen LED armatürlerin birlikte kullanılabilir ve sistemin elverişli olması için elektronik sistem oluşturulmuştur. Elektronik sistem ile LED teknolojisinin esnek olarak kullanılması ve aydınlatmanın istenen çığtıda yapılması sağlanarak verimlilik elde edilebilir.

Bilgisayarlı görme sistemlerinde ihtiyaca göre oluşturulan yazılımın önemli olmasının yanı sıra görme sistemi için tasarlanan elektronik düzenek ve aydınlatma ortamı da oldukça önemlidir. Işık frekansı ve aydınlatma alanının düzgün olmaması, görüntü okuma ve görüntü kalitesinin değişmesine neden olmaktadır. Bu yüzden oluşturulan bir ışık havuzu ile dışarıdan belirsiz ortam ışığının kaldırılması, aydınlatma koşullarının her nesne için sabit olmasını ve nesnelerin üzerine düşen ışık miktarlarının aynı oranda olmasını sağlayacaktır. Ayrıca aydınlatma armatürlerinin aydınlatma şekillerine göre yerleştirilebilmesi, nesnelerin farklı aydınlatma şekillerinde görüntülenmesine uygun bir ortam oluşturmaktadır. Bununla birlikte ışık havuzundaki nesnelerin görüntüleme sistemi için kullanılan kamera, lens ve LED armatür, nesne görüntülerinin alınması sırasında yazılımla görüş uzaklığının belirlenebilmesi, görüntü yakalamadaki etkinliği arttıracaktır.

Işık havuzunun orta noktasına düşen aydınlatma miktarının her bir LED aydınlatma armatür için farklı mesafelerde lüksmetre ile ölçmek yerine görüntü işleme teknikleri kullanılması sistemin dinamikliğini artırma yönünde performansını etkileyecektir. Dome ve Coaxial LED armatürlerin aydınlık düzeyi değerleri regresyon modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Oluşturulan sistemde her seferinde aydınlık düzeyinin ölçüm aletiyle ölçülmesi yerine regresyon analizinden elde edilen matematiksel fonksiyona göre değerlerin yerlerine yerleştirilmesiyle yaklaşık gerçek lüks değerleri belirlenebilecektir. Regresyon analizine göre LED aydınlatma armatürlerinin belirlilik katsayısı 1'e yaklaştığı için modelin uygunluğu arttığı söylenebilir.

Çalışmada farklı yüksekliklerde elde edilen aydınlık düzeyi analizi sonucunda belirlilik katsayıları ve ilişki denklemleri farklı olarak bulunmuştur. Dome ve Coaxial LED armatürler farklı aydınlatma şekillerini kullanarak oluşturulan yapay aydınlatma kaynaklarıdır. Ayrıca bu aydınlatma kaynaklarının renk sıcaklıkları ve renksel geriverimleri farklılıklarından dolayı aydınlık düzeylerinin farklı olarak algılanmasına sebep olabilir.

Literatürdeki diğer çalışmalar tek veya birden fazla aydınlatma kaynağı kullanarak aydınlık düzeyini belirlemeye çalışırken, bu çalışmada genel aydınlatma şekillerini kullanarak aydınlık düzeyi ölçülmesi sağlanmıştır.

Ismail ve diğ. (2013) yapmış oldukları çalışmalarında, 20 farklı lüks değeriyle tek aydınlatma kullanarak görüntü alınmış ve belirlilik katsayısını ( $R^2$ ) 0,988 olarak bulmuşlardır. Yusuf ve diğ. (2018), görüntü alınan platformu 4 bölgeye ayırarak ve 4 aydınlatma ve bu aydınlatmaların kombinasyonlarına göre aydınlatma yaparak görüntü işleme tekniklerinden elde edilen sonuçlara göre regresyon analizi yapmışlardır. Sonuçlara göre en yüksek  $R^2$  katsayısını 0,722 olarak bulmuşlardır.

**KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)**

Bu çalışma 2013-2014 yılları arasında 113E291 proje numaralı TÜBİTAK (TÜRKİYE BİLİMSEL ve TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA KURUMU) tarafından finansal olarak desteklenen projenin bir parçasıdır. Maddi desteği için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Arduino, *What Arduino Can Do*, <http://www.arduino.cc/>, ziyaret tarihi: 25.01.2018.
- Batchelor, B.G., 2012, Illumination Sources, *Machine Vision Handbook*, Cilt 1, Ed. B.G. Batchelor, Springer Science ve Business Media, New York, 283-318.
- Belhumeur, P.N., Kriegman, D. J., 1998, "What is the set of images of an object under all possible illumination conditions?", *International Journal of Computer Vision*, Cilt 28, Sayı 3, ss. 245-260.
- CIE (Commission Internationale de L'Eclairage),1997, *Standard Methods for Specifying and Measuring LED Characteristics*, CIE TC 2-34 127, Vienna.
- Cowan, C.K., Modayur, B., DeCurtins, J. L., 1992, "Automatic Light-Source Placement For Detecting Object Features", *In Intelligent Robots and Computer Vision XI: Biological, Neural Net, and 3D Methods*, Cilt 1826, Sayı 1, ss. 397-408.
- Cusano, C., Napoletano, P., Schettini, R., 2016, "Evaluating color texture descriptors under large variations of controlled lighting conditions", *JOSA A*, Cilt 33, Sayı 1, ss. 17-30.
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., 2008, *Digital Image Processing*, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- Harding, K.G., 2003, Machine Vision-Lighting, *Encyclopedia of Optical Engineering*, Cilt 2, Ed. R.G. Driggers, Marcel Dekker Inc, New York, 1227-1239.
- Huang, B. J., Hsu, P. C., Wu, M. S., Tang, C. W., 2007, "Study of System Dynamics Model and Control of a High-Power LED Lighting Luminaire", *Energy, Elsevier*, Cilt 32, Sayı 11, ss. 2187-2198.
- IESNA, 2000, Light and Optics, *The Illuminating Engineering Society of North America Lighting Handbook*, Ed. M.S. Rea, Illuminating Engineering Press, New York, 1-36.
- Ismail, A.H., Muhamad Azmi, M.S., Hashim, M.A., Nasir Ayob, M., Hashim, M.S.M., Hassrizal, H.B., "Development of a Webcam Based Lux Meter", *2013 IEEE Symposium on Computers & Informatics*, Langkawi, Malaysia, 70-74, 7-9 April 2013.
- Jahr, I., 2006, Lighting in Machine Vision, *Handbook of Machine Vision*, Ed. A. Hornberg, Wiley Publication, ABD, 73-205.
- Jehle, M., Sommer, C., Jähne, B., "Learning of Optimal Illumination for Material Classification", *32nd DAGM Symposium*, Darmstadt, Germany, 563-572, 22-24 September 2010.
- Jun, L., 2006, *Key Technology of The Lamp in the Machine Vision Field*, (Yüksek Lisans), University of Technology, Tianjin.
- Kocabey, S., 1999, *Dâhili Ortamlarda Aydınlik Seviyesinin Kontrolü ile Enerji Tasarrufunun Sağlanması*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kopparapu, S. K., 2006, "Lighting Design For Machine Vision Application", *Image and Vision Computing*, Cilt 24, Sayı 7, ss. 720-726.
- Kraehenbuehl, J. O., 1949, *Electrical Illumination*, Jon Wiley & Sons. Inc., New York.
- Lecklider, T., 2007, Shedding Some Light On Machine Vision, <https://www.evaluationengineering.com/shedding-some-light-on-machine-vision> Ziyaret Tarihi: 03 Ağustos 2018.
- Led-professional, *Human-Centric Lighting: Sensor Technology for Full-Spectrum Lighting Solutions by Ams*, <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/human-centric-lighting-sensor-technology-for-full-spectrum-lighting-solutions-by-ams>, ziyaret tarihi: 25.01.2018.

- Li-Li, Z., Yan-Hua, W., Xue-Feng, Z., Hong-Yu, L., "Implementation of a Novel LED Backlight Device Used for Glass Bottle Detection", *2013 Seventh International Conference on Image and Graphics*, Qingdao, China, 766-769, 26-28 July 2013.
- Linde, Y. Buzo, A., Gray, R. M., 1980, "An Algorithm for Vector Quantization Design", *IEEE Transactions on Communications*, Cilt 28, Sayı 1, ss. 84-95.
- Linnartz, J. P. M. G., Feri, L., Yang, H., Colak, S. B., Schenk, T.C.W., "Communications and Sensing of Illumination Contributions in a Power LED Lighting System", *ICC'08 IEEE International Conference*, Beijing, China, 5396-5400, 19-23 May 2008.
- Louw, A.W., Neethling, C., "Digital LED Lighting Solutions", *Domestic Use of Energy Conference (DUE) 2013 Proceedings of the 21st*, Cape Town, South Africa, 1-4, 2-4 April 2013.
- Martinkauppi, B., 2002, *Face colour under varying illumination: analysis and applications*, University of Oulu, Finland.
- Miki, M., Kasahara, Y., Hiroyasu, T., Yoshimi, M., "Construction of illuminance distribution measurement system and evaluation of illuminance convergence in Intelligent Lighting System," in *IEEE Sensors*, Kona, HI, USA, ss. 2431-2434, 2010.
- Moo, C. S., Chen, Y. J., Yang, W. C., 2012, "An Efficient Driver for Dimmable LED Lighting", *IEEE Transactions On Power Electronics*, Cilt 27, Sayı 11, ss. 4613-4618.
- Muthu, S., Gaines, J., "Red, Green and Blue LED-based White Light Source: Implementation Challenges and Control Design", *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*, Salt Lake City, USA. 515-522, 12-16 Oct. 2003.
- Narra, P., Zinger, D.S. "An Effective LED Dimming Approach", *Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting Conference Record of the*, Seattle, WA, USA, 1671-1676, 3-7 Oct. 2004.
- Özkaya, M., Tüfekçi, T., 2011, *Aydınlatma Tekniği*, Birsen Yayın Evi, İstanbul.
- Pritchard, D.C., 1999, *Lighting*, Cilt 6, Longman, England.
- Stankus, M. Penhaker, M. Cerny, "Low Cost Data Acquisition System for Biomedical Usage", *XII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing*, Chalkidiki, Greece, 883-885, 27-30 May 2010.
- Steger, C., Ulrich, M., Wiedemann, C., 2008, *Machine Vision Algorithms and Applications*, Wiley Press, ABD.
- Sugiyama, H., Haruyama, S., Nakagawa, M., "Brightness Control Methods for Illumination and Visible-Light Communication Systems", *Wireless and Mobile Communications, ICWMC '07. Third International Conference on*, Guadeloupe, France, 78, 4-9 March 2007.
- Teikari, P., Najjar, R. P., Malkki, H., Knoblauch, K., Dumortier, D., Gronfier, C., Cooper, H. M., 2012, "An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research", *Journal of Neuroscience Methods*, Cilt 211, Sayı 2, ss. 227-236.
- Wilson, A., 1999, *Machine Vision Moves Toward Plug-And-Play*, <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-4/issue-8/features/feature-article/how-to-select-lighting-and-optics-for-vision-systems.html>, ziyaret tarihi: 25.01.2018.
- Xu, L.M., Yang, Z.Q., Jiang, Z.H., Chen, Y., 2017, "Light source optimization for automatic visual inspection of piston surface defects", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Cilt 91, Sayı 5-8, ss. 2245-2256.
- Yuntao, G., 2004, "Foundation of Machine Vision Optical", *Fontan Photoelectric Technology Information*, ss. 2-6.
- Yusuf, M.A., Azmi, M.M., Ismail, A.H., Ibrahim, I.I., Hashim, M.S.M., Kamarrudin, N.S. "Webcam Based Lux Meter Using Grid-Based Image Processing" In *2018 International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA)*, Kuching, Malaysia, 1-6, 15-17 August 2018.

## ARTVİN ÇORUH ÜNİVERSİTESİ SEYİTLER YERLEŞKESİ ENERJİ TALEBİNİN YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARIYLA KARŞILANMASI

<sup>1</sup>Enes Halit AYDIN, <sup>2</sup>Mehmet ÇUNKAŞ

<sup>1</sup>Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin Meslek Yüksek Okulu, Elektrik ve Enerji Bölümü Artvin, Turkey,  
<sup>2</sup>Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 42075 Konya, Turkey,  
<sup>1</sup>eneshalid@artvin.edu.tr, <sup>2</sup>mcunkas@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 07.10.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.12.2018)

**ÖZ:** Dünya genelinde sera gazı emisyonları, fosil yakıtların kıtlığı, artan elektrik talebi, mevcut enerji sisteminin yeniden düzenlenmesinin gerekli olduğunu göstermiştir. Bu doğrultuda yenilenebilir enerji kaynaklarının ne denli önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Türkiye’de özellikle hidroelektrik santrallerinden elde edilen enerji yatırımları yıllardır devam etmektedir. Yenilebilir enerjili sistemler üzerine yatırımlar ise son yıllarda hızlı bir şekilde yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada, Renewable Energy Tecnology Screen (RETScreen) yazılımı kullanarak Artvin Çoruh Üniversitesi Seyitler Yerleşkesinde Yenilenebilir Enerji Kaynakları Yasası çerçevesinde lisans alma zorunluluğu bulunmayan 400 kWp güneş enerji sistemi ve 100 kWp rüzgâr enerji sistemini kapsayan bir tesisin fizibilite çalışması gerçekleştirilmiştir. Yapımı düşünülen hibrit sistem ile yerleşkenin elektrik talebi de göz önüne alınarak şartlara göre en uygun çözüm bulunmaya çalışılmıştır.

*Anahtar Kelimeler:* Artvin Çoruh Üniversitesi, RetScreen, Sera Gazı Emisyonları, Yenilenebilir Enerji

### Ensuring the Energy Demand of Artvin Çoruh University Seyitler Campus with Renewable Energy Sources

**ABSTRACT:** The greenhouse gas emissions, the scarcity of fossil fuels, and the growing demand for electricity all over the world have shown the need to reorganize the existing energy system. In this respect, the importance of renewable energy sources is understood. The investments in Turkey have continued especially for years to get energy from hydroelectric power plants. The studies on renewable energy systems have started to spread rapidly in recent years. In this study, the feasibility of a 400 kWp solar energy system and 100 kWp wind energy system, which is not obliged to obtain a license within the framework of the Renewable Energy Resources Law of Artvin Coruh University Seyitler Campus, has been carried out by using Renewable Energy Tecnology Screen software. With the hybrid system which is planned to be constructed, it is tried to find the most suitable solution according to the conditions by taking the electricity demand of the Campus into consideration.

*Key Words:* Artvin Coruh University, Greenhouse Gas Emissions, Renewable Energy, RetScreen

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel ekonominin gidişatına yön veren en önemli faktörlerin başında enerji gelmektedir. Şu anda, ülkelerin vazgeçilmezi konumunda olan enerjiye duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Geçmişten günümüze kadar enerji ihtiyacının büyük kısmını karşılayan fosil yakıtların sınırlı oluşu ve bu yakıtların aynı zamanda küresel ısınmayı tetiklemeleri hükümetleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Son zamanlarda Dünya’da, sınırsız kaynak olarak bilinen özellikle güneş ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi oldukça yaygınlaşmıştır. Bu artışta güneş ve rüzgâr enerji santralleri ile elektrik üretiminin en önemli problemlerinden biri olan maliyetlerin düşmesi etkili olmuştur. Ülkemizin de yerli ve milli

üretimde destek vermesi neticesinde enerji sektöründeki ham madde ve parça maliyetleri de oldukça düşmüş ve sektör yatırım yapılabilir bir hale gelmiştir.

Enerji sistemlerini planlamak toplumumuzun gelişim sürecine oldukça katkı sağlayacak bir husustur. Piyasada halen kullanılmakta olan enerji modelleri farklı çözümlerin ve çalışma koşullarının simüle edilmesine ve ekonomik fizibilitelere belli oranlarda destek verebilir. Optimizasyon modelleri ise yatırımcı tarafından belirlenen teknolojik, politik, ekonomik ve talep memnuniyeti gibi verileri değerlendirerek kaliteli bir maliyet uygunluğu sağlamak için kullanılır (Bañosa ve diğ., 2011; Liu ve diğ., 2018). Yakın gelecekte enerji sektörü için yapılan tahminlerde, yalnızca bir sisteme bağlı enerji üretiminden ziyade doğal kaynakların kombinasyonu sağlanıp hibrit sistemlerin daha çok tercih edileceği düşünülmektedir (Bağheri ve diğ., 2018; Verna ve diğ., 2018) Şunu da belirtmek gerekir ki, yenilenebilir enerji kaynaklarının birçok avantajının yanı sıra bir takım sorunları da mevcuttur. Kurulacak tesisin şebekeye uzaklığı ve kaynaklarda meydana gelen ani güç dalgalanmaları bunlardan bazılarıdır.

Elektrik enerji talebinin verimli, ucuz ve planlı bir şekilde karşılanması konusunda birçok çalışma mevcuttur. Ugranlı (2016) Şebekeye entegre edilmiş güç sistemlerinde iki seviyeli iletim hattı planlama metodları geliştirdi. Böylece hat yatırım maliyetlerinin yanı sıra şebekedeki kısıtlardan dolayı oluşan kullanılmayan rüzgâr veya güneş enerjisi yerine devreye alınan konvansiyonel jeneratörlerin toplam üretim maliyetlerini ve beslenemeyen enerjiyi azalttı. Jolly (2009), Cornell üniversitesinde yaptığı çalışmada, NY'daki bir tarım arazisi uygulaması için yenilenebilir enerji kaynaklarının optimizasyonunu hibrit bir sistem üzerinden gerçekleştirdi. Çalışmada Retscreen programının mevcut veri tabanından fotovoltaiik güneş paneli ve rüzgâr türbinlerinin çeşitli kombinasyonları arasındaki farklı durum senaryolarını dikkate alarak modelleme yaptı. Sistemde birkaç fotovoltaiik panel ve rüzgâr türbinlerinin karşılaştırmalı analizlerini yaptı. Projenin ömrü ve projeye ilişkin geri ödeme süresi, hesaplanan uygulanabilir teşvikler gibi tesisin ayrıntılarını kullanarak mali analizler gerçekleştirdi. Yerli ve diğ. (2013) tarafından yapılan bir başka çalışmada bir üniversite yerleşkesinde yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) yasasına istinaden lisans alma zorunluluğu olmayan 500 kWp kurulu güce haiz bir fotovoltaiik tesisin ön fizibilite çalışması gerçekleştirdiler. The Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER) ve RETScreen enerji model yazılımları kullanıp karşılaştırmaya dayalı yorumlar yaptılar. Analizler sonucunda fotovoltaiik (PV) sistem verimliliğinin % 17'lere ulaştığı gördüler. Demirkol ve Çunkaş (2014) Afyonkarahisar için yenilenebilir enerji kaynakları potansiyelini değerlendirdiler. Güncel veriler kullanarak güneşlenme süresi ve güneş enerjisi potansiyelini ele aldılar. Afyonkarahisar merkez, dinar ve Sultandağı istasyonlarının saatlik rüzgâr hızı verilerini kullanarak Weibull ve Rayleigh dağılımlarını hesaplayıp, her istasyon için 2010 ve 2011 yıllarına ait aylık rüzgâr güç yoğunluğu belirlediler. Erdinç (2012) yaptığı çalışmada uygun bir güç biçimlendirme ünitesi üzerinden şebekeden bağımsız bir yük için gerekli güç talebini karşılayan hibrit yenilenebilir enerji sistemini tasarladı. Rüzgâr Türbini/Fotovoltaiik/Yakıt Hücresi/Batarya ünitelerinden oluşan hibrit sistem ile ilgili denemeleri öncelikle benzetim ortamında, daha sonra da test platformunda deneysel olarak gerçekleştirdi. Optimum boyutlandırma aşamasında hibrit sistem bileşenlerinin performansını dikkate alan yeni bir perspektif ortaya koydu.

Bu çalışmada, Artvin Çoruh Üniversitesi (AÇÜ) Seyitler Yerleşkesinin elektrik ihtiyacının karşılanmasına yönelik rüzgâr türbini ve güneş panelinden oluşan hibrit bir sistemin optimizasyonu yapılmıştır. Retscreen yazılımı kullanılarak yapılan analizlerde rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit sistemin optimum koşullarda ne kadar fayda sağlayacağı tartışılmıştır. Yenilenebilir enerji sektörüne yapılacak yatırımların hızlı bir şekilde artması için yatırımcıların güvenini sağlayacak bir bakış açısının sunulması önemlidir. Bu çalışma sayesinde fiziki koşullar ve mali tablo ön plana çıkarılarak yatırımcıya aradığı bilgi sunulmuştur. Saha koşulları uygun bölgelere bu sistem kurulduğunda doğal kaynakların daha verimli kullanımı da sağlanmış olacaktır. Geleneksel tek enerji kaynağından yararlanılan enerji sisteminin aksine yaz kış enerji üretecek hibrit bir sistemin kullanımı dışa bağımlılığı azaltabilecek bir yöntem olarak görülebilir.



**SİSTEMİN YAPISI VE VERİLER (SYSTEM'S STRUCTURE AND DATA)****Uygulama Alanına Ait Meteorolojik Veriler (The Meteorological Data For The Application Area)**

Artvin, Karadeniz'in doğusunda bulunan merkezi itibariyle denize 67 km uzaklıkta 576 m rakım, 41,2° enlem 41,9° boylama sahip bir yerleşim yeridir. Güneş ışınım miktarları göz önünde bulundurulduğunda Karadeniz bölgesi, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerine göre daha geridedir. Fakat ülkeler bazında yapılan araştırmalar ve ölçümler dikkatle incelenirse Karadeniz bölgesinin, Avrupa ülkelerinin bir kısmından çok daha fazla güneş ışınım şiddeti potansiyeline sahip olduğu görülecektir. Bunlardan bir tanesinde Trabzon merkezli yapılan bir akademik çalışmada özellikle güneş enerjisinden elektrik üretimi için en çok yatırım yapan Almanya'nın dahi Karadeniz'den daha az enerji potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir(Çakmak, Altaş, 2016).

Bu çalışma kapsamında Artvin Meteoroloji Bölge Müdürlüğü ölçüm istasyonundan alınan Çizelge 1 deki verilerden yararlanılmıştır. GES kurulumu için Artvin Çoruh Üniversitesi seyitler yerleşkesindeki fakülte ve diğer binaların atıl durumda olan uygun çatı terasları değerlendirme kapsamına alınmıştır. Bu değerlendirmeyi yaparken güneşin konumunun, ışınım yoğunluğunun, yerleşkenin enlem derecesinin, sistemi verimli bir şekilde tasarlamak için oldukça önemli olduğu göz önünde bulundurulmuştur.

**Çizelge 1.** Artvin ili güneş ve sıcaklık parametreleri*Table 1. Solar and temperature parameters for Artvin)*

<i>Ay</i>	<i>Hava Sıcaklığı ( °C)</i>	<i>Bağıl Nem (%)</i>	<i>Yağış (mm)</i>	<i>Günlük Güneş Radyasyonu (Kwh/ m<sup>2</sup>/G)</i>	<i>Atmosferik Basınç (Kpa)</i>
<i>Ocak 2018</i>	6,3	69,7	109,7	1,32	90,1
<i>Şubat 2018</i>	6,2	69,8	64,1	2,49	90
<i>Mart 2018</i>	8,2	73,5	43,8	3,78	90
<i>Nisan 2018</i>	12,5	75,3	14,1	4,88	89,9
<i>Mayıs 2018</i>	15,6	79,2	66,2	5,73	90
<i>Haziran 2017</i>	20	77,7	8,2	6,5	89,9
<i>Temmuz 2017</i>	22,2	79,7	17	6,7	89,8
<i>Ağustos 2017</i>	22,8	79,8	9,8	5,38	89,9
<i>Eylül 2017</i>	19,7	78,5	36,2	4,55	90,1
<i>Ekim 2017</i>	15,7	78,3	107,6	4,48	90,3
<i>Kasım 2017</i>	12	72,6	53,7	3,23	90,3
<i>Aralık 2017</i>	8,1	68,4	87,5	2,38	90,2
<i>Yıllık</i>	<b>14,2</b>	<b>75,2</b>	<b>51,49</b>	<b>4,29</b>	<b>90</b>

Türkiye'de rüzgâr potansiyeli özellikle kıyı kesimlerde ve İç Anadolu'nun belli bölgelerinde fazladır. Çanakkale, Kayseri, Kırşehir gibi iller RES'lerin en çok kurulduğu yerlerdir. Karadeniz'in kıyı kesimlerinde rüzgâr enerji potansiyeli yeteri kadar olmasına rağmen şuan yatırım yapılan büyük bir RES bulunmamaktadır. Artvin ilindeki Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 10 m ölçüm yüksekliğindeki rüzgâr hızları 1.4 katsayısı ile normalize edilerek Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Artvin ili rüzgâr enerji verileri

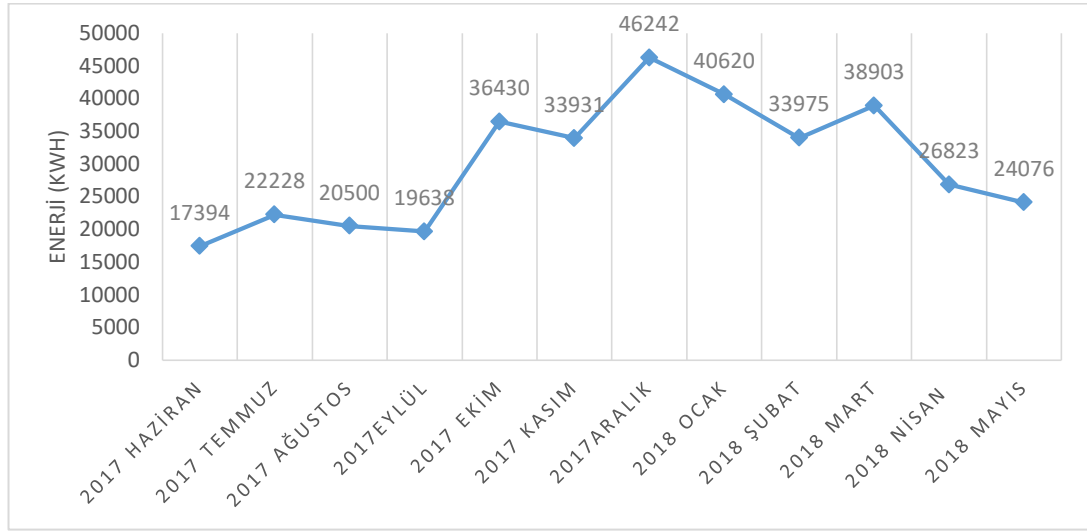
Table 2. Wind energy data for Artvin

Ay	Rüzgâr Hızı (M/S )	Yer Sıcaklığı (°C)	Isıtma Derece Gün 18 °C (°C-G)	Soğutma Derece Gün 10 °C (°C-G)
Ocak 2018	4,3	1,5	363	0
Şubat 2018	4,6	1,2	330	0
Mart 2018	4,8	4,2	304	0
Nisan 2018	5	9,6	165	75
Mayıs 2018	4,7	14,4	74	174
Haziran 2017	5,2	18,2	0	300
Temmuz 2017	5,6	21,4	0	378
Ağustos 2017	5,7	21,5	0	397
Eylül 2017	4,9	18,7	0	291
Ekim 2017	4,6	14,1	71	177
Kasım 2017	4,7	8,2	180	60
Aralık 2017	4,5	3,5	307	0
<b>Yıllık</b>	<b>4,9</b>	<b>11,4</b>	<b>Ort: 149,58</b> <b>Gün: 12,46</b>	<b>Ort: 154,25</b> <b>Gün: 12,85</b>

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretilebilmesi, türbinin kurulacağı yerin rüzgâr potansiyeline, rüzgârın güç yoğunluk karakteristiğine ve rüzgâr türbininin teknik özelliklerine bağlıdır. Bir türbinin elektrik gücü ise kapasite faktörü, jeneratörü ve pervanesi gibi rüzgârı elektrik enerjisine çevrim için kullanılan mekanik bölümlerin verimliliğine bağlıdır. Son olarak, türbini etkileyen diğer önemli parametreler ise düşük kesim (cut-in) , yüksek kesim (cut-off) hızlarıdır. Eğer rüzgâr, türbini döndürecek kadar hızlı esmiyorsa sistem elektrik üretemez, tam tersi eğer rüzgâr türbin kapasitesinin üstünde bir hızla esiyorsa sistem mekanik olarak zarar görmemek için kendini kilitleyecektir. Bu hız aralığı ortalama bir türbinde 2 m/sn ile 25 m/sn arasında değişir. Çizelge 2 incelendiğinde normalize edilmiş rüzgâr hızları, 2 m/s lik sınır değer üzerinde olduğu görülmektedir.

#### Yerleşkenin Elektrik Yükü (Electric Load for Campus)

Çalışma kapsamında yerleşkenin aylık elektrik tüketim miktarları incelenmiştir. Yerleşke Orman Fakültesi, Mühendislik Fakültesi, Meslek Yüksekokulu, Sosyal Tesisler olmak üzere 4 binadan oluşmaktadır. Şekil 1'de yerleşkenin aylara göre yıllık elektrik tüketim miktarları gösterilmektedir.



Şekil 1. Seyitler yerleşkesi bir yıllık elektrik yükü (kWh)

Figure 1. Seyitler campus electric load (kWh)

### Yer Seçimi ve Materyaller (Location Selection and Materials)

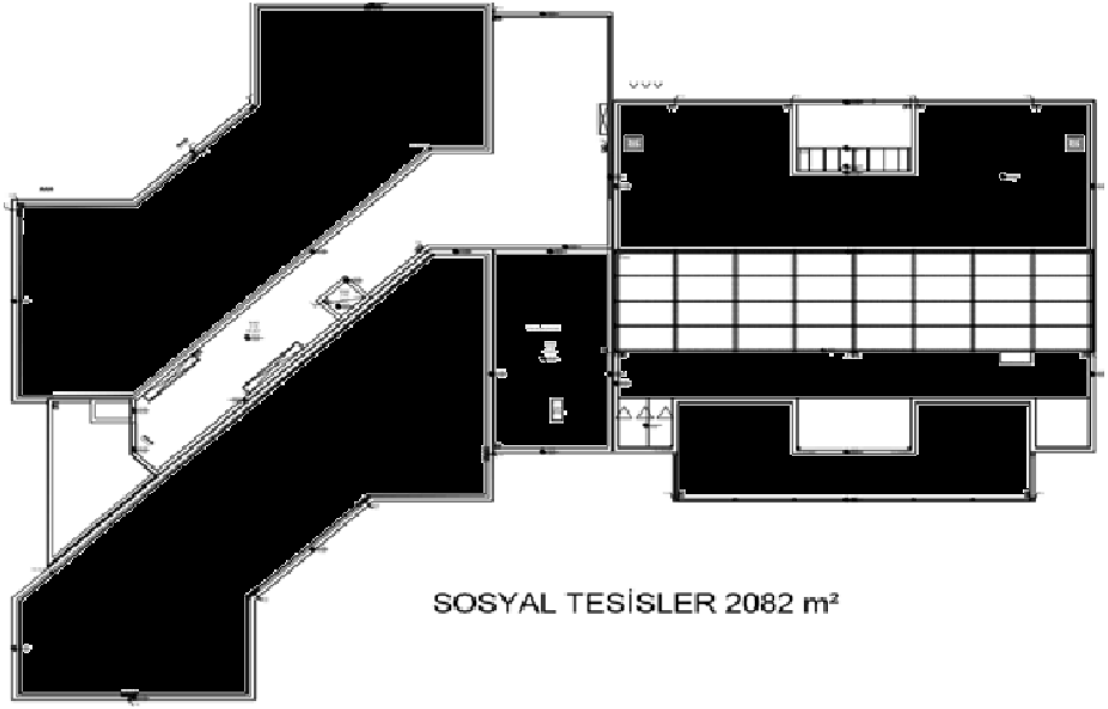
Mühendislik Fakültesi, Orman Fakültesi, Artvin Meslek Yüksekokulu ve Sosyal Tesisler çatılarının mimari planları incelenerek kullanılabilir alan Mühendislik Fakültesi için 936 m<sup>2</sup>, Orman Fakültesi için 3204 m<sup>2</sup>, Artvin Meslek Yüksekokulu için 936 m<sup>2</sup> ve Sosyal Tesisler için 2082 m<sup>2</sup> olduğu tespit edilmiştir. Bu dört adet binanın çatı teraslarına çıkıldığında Orman Fakültesi ve Sosyal Tesisler binalarının çatıları üzerinde kurulu bazı cihazların olduğu tespit edilmiş ve fotovoltaik sistem kurulumuna engel teşkil edebilecek ünitelerin yerleri belirlenmiştir. RES kurulum yeri için yerleşkeye kuşbakışı 300 m uzaklıktaki Kredi Yurtlar Kurumuna ait boş tepe seçilmiştir. Bu tepe dört yanı açık, aynı seviyede herhangi bir dağ bulunmayan rüzgâr potansiyeli özellikle sonbahar ve kış aylarında sistem için yeterli seviyeleri bulan ortalama 4-6 m/sn bir yerdedir (MGM, 2018).

Retscreen ile uygun optimizasyonun yapılabilmesi için piyasada yaygın olarak kullanılan 59 adet fotovoltaik panel markası arasından ISO 9001: 2000 ve ISO 14001: 2004 Sertifikalı, IEC 61215 (Ed.2) ve IEC 61730 (UL 1703) sınıfı, Hyundai Heavy Industries markasının mono-Si - HiS-S245MG modelinden toplam 1633 adet kullanılmıştır. Panellerin birim başına kapasiteleri 245 W'dan toplamda 400,085 kWh dir.

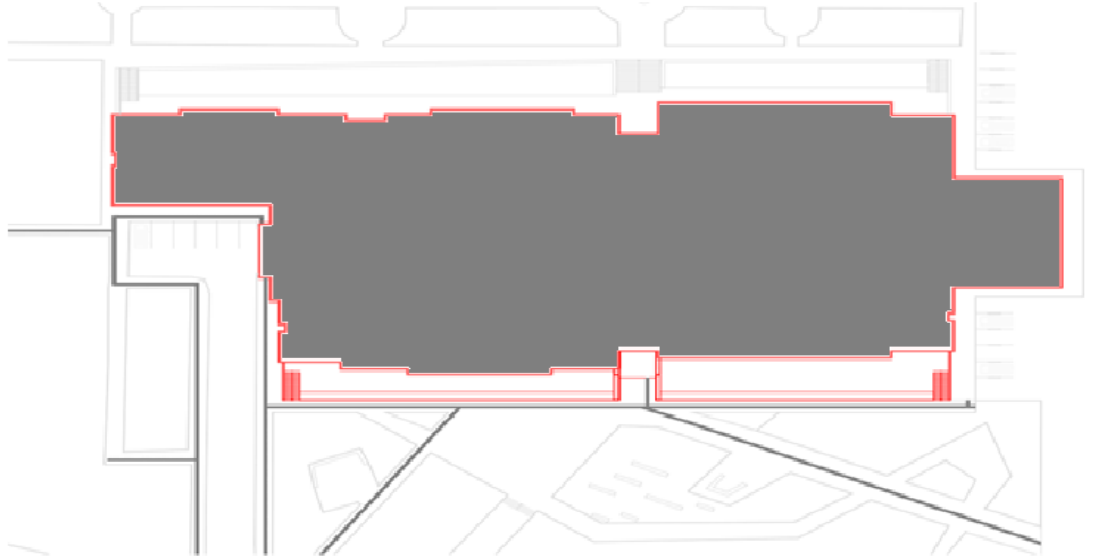
İnverter seçimi için CE standartlarına uyumlu Sma Solar Technology marka Ag Flx Pro 15 modeli seçilmiştir. Model, isminden de anlaşılacağı gibi 15 kWh kapasitelidir. Bu model üründen de toplamda 34 adet seçilip, 510 kWh kapasite sağlanmıştır.

Brüt alanı 2082 m<sup>2</sup> olan Sosyal Tesisler binası çatısına NASA verilerine göre 41° açılı 490 adet 120 kWp kurulu güçte fotovoltaik güneş panelinin bağlanması uygun görülmüştür. Şekil 2'de Sosyal Tesisler binasının çatı terasının resmi görülmektedir. Binanın çatısında panellerin yerleştirildiği yer siyah olarak gösterilmiştir. Çatının diğer kısımları merdiven boşluğu ve aydınlatma amaçlı kullanılması gibi nedenlerden panel yerleşimine uygun değildir.

Şekil 3'te gösterilen brüt alanı 3204 m<sup>2</sup> olan Orman Fakültesi binasının çatısına yine 41° eğime sahip, 735 adet 180,075 kWp kurulu güçte fotovoltaik güneş panelinin bağlanması uygun görülmüştür. Bu binanın bazı bölgelerinde boşluklar ve çatıya çıkış kısmı bulunmaktadır. Ayrıca çatı terasında klima vb. cihazların kapladığı alanlar ve köşe noktaları hesaba dâhil edilmemiştir. Bunlar dikkate alınarak yapılan PV yerleşimi Şekil 3'de gri olarak gösterilmiştir. Bu sistem için de 15 kW'lık 12 adet eviriciyle beraber 1340m<sup>2</sup>'lik bir alan kullanılmıştır. Aynı mimari ve aynı ölçüm değerlerine sahip (brüt 936 m<sup>2</sup>) Artvin Meslek Yüksekokulu ve Mühendislik Fakülteleri için 204'er adet güneş paneli ve 3'er adet inverter ile beraber kullanılan toplam alan 330'ar m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr türbini 585 m rakımlı Kredi Yurtlar Kurumu yanındaki boş araziye kurulacaktır.



Şekil 2. Sosyal tesisler çatı terası ve PV yerleşim alanı  
*Figure 2. Terrace of Social facilities and PV layout*



Şekil 3. Orman Fakültesi çatı planı ve PV yerleşimi  
*Figure 3. Roof plan for forestry faculty and PV layout*



**Şekil 4.** Kredi Yurtlar Kurumu uydu görünümü

*Figure 4. Satellite view for State student dormitory*

Şekil 4’de rüzgâr türbini yerleşim yeri görülmektedir. Bu arazi yakınında yerleşimin olmadığı verimsiz bir arazidir ve rüzgâr türbini kurmak için Artvin’deki en uygun yerlerden biridir. Elektrik şebeke hattına ve Üniversite Yerleşkesine yakınlığı en önemli avantaj olarak görülmektedir. Kurulması düşünülen sistem için Retscreen yazılım programı veri tabanında bulunan 53 adet türbin markası ve yaklaşık 600 model içerisinde Artvin şartlarına uygun güç kapasitesi 100 kWp, bağlantı noktası yüksekliği 40 m, türbin başına rotor çapı 21 m ve türbin başına taranan alan 346.36 m<sup>2</sup> olan Northern Power Systems marka NW100/21 - 40M modelindeki türbin seçilmiştir. Bu model seçilirken Artvin’in rüzgâr potansiyeli çok yüksek olmadığı için ilk kurulum maliyetini en kısa sürede amorti edebilmesi hususları dikkate alınmıştır.

#### **RetScreen Yazılımı (RetScreen Software)**

Retscreen farklı sistem konfigürasyonlarını simüle eden ve bunları kullanım süreleri boyunca, işletim kurulum vb. maliyet girdilerini net bir şekilde ölçeklendiren bir optimizasyon yazılım paketidir. Kullanıcının girdiği verilere göre program öncelikle Rüzgâr Enerji Santrali (RES) ve Güneş Enerji Santrali (GES)’in teknik fizibilitesini yani sistemin elektriksel ve termal yüklerle ve kullanıcı tarafından uygulanan diğer sınırlamalara yeterince uygun olup olmadığı değerlendirir ve daha sonra olası senaryolar çıkarır. Bu senaryolar ayrıca kullanılan malzeme cinslerine göre de farklılık gösterir. Yazılım, giriş parametrelerinin bir veya daha fazlasındaki bir değişikliğin etkisini değerlendirmek için duyarlılık analizini de yapabilir.

#### **Finansal Kabuller (Financial Assumptions)**

EPDK’nın yaptığı son düzenlemeler ile Artvin Çoruh Üniversitesi 01.04.2018 tarihli fatura bilgilerine göre elektrik tüketim fiyatı 0,461 TL/kWh olarak bulunmuştur. Bu aynı zamanda işletmenin 1 kWh’i alım bedelidir. Devletin üreticiden elektriği satın alma bedeli ise 133 Dolar/MWh olarak belirlenmiştir. 01.04.2018 tarihli T.C Merkez Bankası verilerine göre 1 dolar 4,248 TL olarak alınmıştır. Çalışma kapsamında enflasyon oranı Türkiye İstatistik Kurumu Nisan ayı verilerine göre yıllık Üretici Fiyat Endeksi(ÜFE) 16.37 ve Tüketici Fiyat Endeksi (TÜFE) 10.85 dir. Döviz kurundaki dalgalanmalarda göz önünde bulundurularak enflasyonun %20’lik bir artış olabileceği öngörüsüyle hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte elektrik ihracat eskalasyon oranı %2.5 olarak kabul edilmiştir.

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA (Results and Discussion)

### Enerji Analizi (Energy Analysis)

Bu çalışmada Retscreen ile rüzgâr, güneş ve hibrit olmak üzere üç farklı sistemin karşılaştırması yapılarak mali bir tablo sunulmuştur. Proje yapılandırılırken proje ömrü ve yatırım maliyetinin geri dönme (amorti) süresi devletten alınan teşviklerle beraber hesaplanmıştır. Retscreen yazılımı ile analiz edilen bu hibrit sistemde; Çizelge 1’de 4,29 kW/m<sup>2</sup> olarak verilen yıllık ortalama güneş ışınım miktarları ile bu fotovoltaik paneller maksimum verimde 30,3 V, 8,1 A enerji üretebilmektedir. Paneller sabit yüzey ile 41° açı yapacak şekilde, panellerin verimliliği %15,5, nominal çalışma hücresi sıcaklığı 45 °C, çeşitli kayıplar da %15 olarak belirlenmiştir. Paneller için kullanılan inverterin verimliliği %95, kapasitesi 510 kWp, çeşitli kayıplar %1’dir. Bu veriler ve kabuller belirlendikten sonra 400 kWp’lik sistemin kapasite faktörü %16,1 olarak hesaplanmıştır. Sistem için ilk maliyet gideri program tarafından 720.153\$, işletme ve bakım maliyetleri 9.602 \$ olarak bulunmuştur. Şebekeye verilen elektrik ise 564 MWh, elektrik ihraç geliri de 73.948\$ olarak hesaplanmıştır.

Retscreen programının veri tabanından alınan bilgilere göre, 100 kWp’lik 1 adet rüzgâr türbini için dizilim kayıpları sıfır, kanat kayıpları %2, çeşitli kayıplar %6, kullanılabilirlik %98 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte rüzgârın düşük potansiyeli sebebiyle kapasite faktörü sistem tarafından %12,4 olarak hesaplanmıştır. Türbinin basınç katsayısı 0.089, sıcaklık katsayısı 1.003, özgül randımanı 313 kWh/m<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Seçilen bu rüzgâr türbini literatürde 2 m/s hıza kadar herhangi bir üretim yapamamaktadır. 3 m/s rüzgâr hızında 2,2109 kW, 4 m/s rüzgâr hızında 5,2322 kW, 5 m/s rüzgâr hızında 10,105 kW enerji üretim kapasitesine sahiptir. Çizelge 2’deki meteoroloji verileri dikkate alınarak bu bant aralığındaki üretim kıyaslanabilmektedir. Bu veriler ile birlikte ilk yatırım maliyeti 180.000\$, işletme ve bakım maliyeti 5040\$’ olarak hesaplanmıştır. Şebekeye verilen elektrik ise 108474 kWh olarak bulunmuştur. Bu elektrikten elde edilen kazanç da 12.403\$ olarak bulunmuştur. Çizelge 3 de Hibrit sistemin maliyet bilgileri yer almaktadır. Fotovoltaik sistemin geri ödeme süresi 11,3 yıl, rüzgâr türbini için 25,8 yıl olarak bulunan süre, toplamda hibrit sistem için 12,7 yıl olarak görülmektedir.

**Çizelge 3.** Hibrit güç tesisi maliyet tablosu

*Table 3. Cost chart for hybrid power plant*

	Kapasite (kWh)	Üretilen Yıllık (kWh)	İlk Maliyetler (\$)	Elektrik İhraç Geliri (\$)	İşletme ve Bakım Maliyetleri (\$)	Basit Geri Ödeme (yıl)
<b>Fotovoltaik</b>	400	563525	720.153	73948	9602	11,3
<b>Rüzgâr Türbini</b>	100	108474	180000	12403	5040	25,8
<b>Hibrit Sistem</b>	500	672000	900153	85351	14642	12,7

### Finansal Analiz (Financial Analysis)

Mali parametrelere ait bilgiler Çizelge 4 de yer almaktadır. Sistem ömrü bu süre ile kısıtlı olmamak kaydıyla 20 yıl olarak kabul edilmiştir. Enflasyon oranı ülkemizin 2018 yılı ekonomik durumundaki dalgalanmaların geçici olduğu düşünülerek %20 seçilmiştir. İskonto oranı ve yeniden yatırım oranı ortalama bir değer %9 kabul edilmiştir. Proje kurulumu için %20 yatırımcının kendi öz sermayesi, geri kalan %80 borç olarak kabul edilmiştir ve bu borç 720.122\$’dır. Borç alımında bankaya ödenecek faiz oranı ise %3’dir. Bu borç bankaya 15 yıl vadeli olarak ödenecektir.

**Çizelge 4.** Finansal parametreler*Table 4. Financial parameters*

<b>Genel</b>	
Enflasyon Oranı	20%
İskonto Oranı	9%
Yeniden Yatırım Oranı	9%
Proje Ömrü	20 yıl
<b>Finansman</b>	
Borç Oranı	80%
Borç	720.122 \$
Öz Varlık	180.026 \$
Borç Faiz Oranı	3%
Borç Vadesi	15
Borç Ödemeleri	65.888 \$

Çizelge 5’de bu sistemin yıllık cirosu gösterilmiştir. Fiyatların %2,5 oranında artacağı öngörülerek eskalasyon oranı %2,5 seçilmiştir. Sera gazı azaltma maliyeti ve maliyet fayda oranı parametreleri modele eklendiğinde daha önce 12,7 yıllık geri ödeme değeri Çizelge 6’da görüldüğü gibi 10,1 yıla kadar düşürülmüştür.

**Çizelge 5.** Yıllık ciro*Table 5. Yearly endorsement*

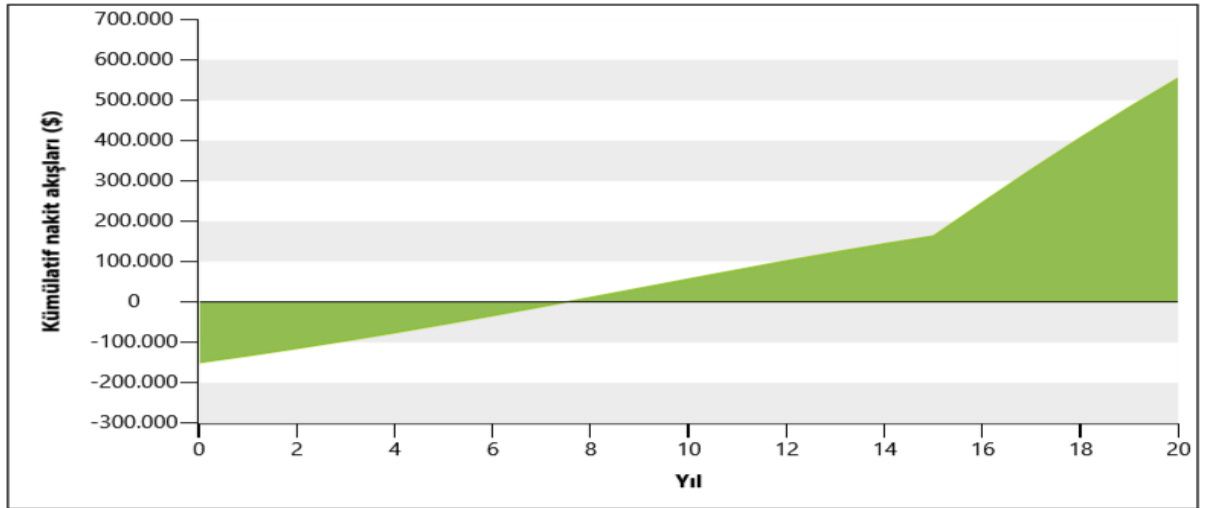
<b>Elektrik İhraç Geliri</b>	<b>Birimi</b>	
Şebekeye Verilen Elektrik	kWh	656.000
Elektrik İhracat Fiyatı	\$/kWh	0,133
Elektrik İhraç Geliri	\$	73.948
Elektrik İhracatı Eskalasyon Oranı	%	2,50%
<b>Temiz Enerji (TE) Üretim Geliri</b>		
TE Üretimi	kWh	656.000
TE Üretim Kredi Oranı	\$/kWh	0,007
TE Üretim Geliri	\$	4592
TE Üretim Kredi Süresi	Yıl	20
TE Üretim Kredi Eskalasyon Oranı	%	2,50%
Yakıt Türü		Şebekeye Verilen Elektrik
Güneş	kWh	564000
Rüzgâr	kWh	108000

Çizelge 6. Finansal sürdürülebilirlik

Table 6. Financial sustainability

Vergi Öncesi İGO- Öz sermaye	%	10,2
Vergi Öncesi DDGO- Öz sermaye	%	9,6
Vergi Öncesi İGO- Varlıklar	%	-3,6
Vergi Öncesi DDGO- Varlıklar	%	1,1
Basit Geri Ödeme	Yıl	11,9
Öz sermaye Geri Ödeme	Yıl	10,1
Net Şimdiki Değer (NPV)	\$	19,763
Yıllık Yaşam Döngüsü Tasarrufları	\$/Yıl	2,165
Maliyet- Fayda Oranı		1,1
Borç Çevrilebilirliği		1,2
Sera gazı Azaltma Maliyeti	\$/Tco2	-41
Enerji Üretim Maliyeti	\$/kWh	0,165

Bu verilere göre kümülatif nakit akışı Şekil 5'da gösterilmiştir. Yapılan analizlerden anlaşılmıştır ki hibrit bir sistemin hem yaz kış elektrik üretimi hem de yatırımın geri dönüş süresini azaltmak gibi pek çok avantajları vardır. Sistemin ömrünü etkileyen en önemli faktörler enflasyon oranı, eskalasyon oranı, kredi faizi ve kullanılan ekipmanların maliyetleridir. Bu parametreler göz önünde bulundurularak yapılan analizler en verimli sonuçları verecektir.



Şekil 5. Kümülatif nakit akışları

Figure 5. Cumulative cash flow

### Sera Gazı Emisyonu (Greenhouse gas emissions)

Sistem, doğaya herhangi bir zarar vermeden ürettiği yılda 672.000 kW enerji ile bu enerjinin üretilmesinde kullanılan fosil yakıtlardan tasarruf ederek 66,6 t/CO<sub>2</sub> salınımının önüne geçmiştir. Ayrıca 154,9 kullanılmayan ham petrol varili veya 12,2 adet trafikte kullanılmayan araç ve kamyonet azlığı sağlanmıştır. Sistemin 20 yılda azaltacağı net sera gazı emisyonu 1.332 tCO<sub>2</sub> dir. Verilerden de anlaşılacağı



üzere küresel ısınmaya negatif etki edecek olan bu sistem ile Türkiye için önemli bir fayda da elde edilmiş olacaktır.

### Genel Değerlendirme (General Evaluations)

Önerilen bu sistem, 245 W birim kapasiteli 1633 adet fotovoltaik panel ve 100 kW kapasiteli bir adet rüzgâr türbini ile yılda toplam 656.000 kWh elektrik üretilip, bu enerjiden yılda 94.054 \$ gelir elde edilmiş olacaktır. Yapılandırılan sistemde elektrik birim fiyatının % 2,5 zamlanacağı kabulü üzerinden sistem ilk maliyetlerini 10,1 yıl gibi bir sürede amorti edecektir. Bu sistem yerleşkenin elektrik ihtiyacının %55,6'unu karşılamaktadır. Bu çalışmada, Nisan 2018 ayına ait ekonomik parametreler ve tahminler kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Yatırım yapılırken beklenmeyen herhangi bir gelişme olması durumunda varsayılan parametre değerleri yeniden güncelleme yapılarak yeni bir maliyet analizi kolaylıkla elde edilebilir.

### SONUÇ(CONCLUSION)

Bu çalışmada Artvin Çoruh Üniversitesi enerji ihtiyacı Retscreen programı yardımıyla analiz edilmiştir. Sistemin tasarımı sırasında farklı vaka senaryoları göz önünde bulundurulmuştur. Bu senaryolar özellikle rüzgâr türbini ve fotovoltaik panel seçimleri de önemli bir etken oluşturmaktadır. Ayrıca bölgeye yakın yerlerdeki potansiyellerde göz önünde bulundurulabilecek mümkün olan en uygun konum seçilmeye çalışılmıştır. Maliyet analizi yapılırken yıllık enflasyon oranları da ölçütler arasına eklenmiştir. Elde edilen veriler ışığında ayrı ayrı rüzgâr ve güneş enerjileri ile hibrit sistemler incelenerek en uygun ve en kısa sürede mali geri dönüş yapabilen 500 kW'lık hibrit sistem önerilmiştir. Bu hibrit sistem maliyet, uygun ortam, verimlilik gibi ölçütler bakımından yeterli olduğu için hızlı bir şekilde yatırıma dönüşebilecektir. Böylece yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş enerjisini birlikte kullanan verimli bir hibrit sistem yatırımcıya alternatif olarak sunulmuştur. Bu çalışmada, enflasyon ve kredi artış oranı gibi kabul edilen parametre değerleri yeniden güncelleme yapılarak yeni şartlara kolaylıkla adapte edilebilir.

### KAYNAKLAR(REFERENCES)

- Aboumahboub, T., Schaber, K., Tzscheuschler, P., Hamacher, T., 2010. Optimization Of The Utilization Of Renewable Energy Source in The Electricity Sector. *Renewable Energy Resources*, 11, 196-2004.
- Amaral, L., Martins, N., Gouveia, j., "Optimization Of A Renewable Energy Supply System On A Remote Area: Berlenga Island Case Study", *World Renewable Energy Congress*, Sweden, 3484-3491, 8-13 May 2011.
- Bagheri M., Shirzadi N., Bazdar E., Kennedy CA., 2018, "Optimal planning of hybrid renewable energy infrastructure for urban sustainability", *Green Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 95, pp. 254-264.
- Bañosa R. F., Manzano-Agugliaro F., Montoya FG., Gila C., Alcaydeb A., Gómez J., 2011, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy" *A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 4, pp. 1753-1766.
- Çakmak R., Altaş İ.A., "Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Güneş Enerjisi Potansiyeli: Trabzon İli Örneği", *Conference: 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa, December 2016.
- Demirkol Z. ve Çunkaş M., 2014 "Afyonkarahisar ili yenilenebilir enerji potansiyeli", *Selçuk Univ. J. Eng. Sci. Tec.*, Vol. 2, No. 1, pp. 46-56.
- Erdinç, O., 2012, *Şebekeden Bağımsız Uygulamalar İçin Hibrit Bir Rüzgâr Türbini/Fotovoltaik/Yakıt Hücreli/Batarya Sisteminin Optimizasyonu, Tasarımı Ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Google Earth, Artvin İli Seyitler Köyü Kredi Yurtlar Kurumu görüntüsü, <https://www.google.com.tr/search?q=artvin+seyitler+k%C3%B6y%C3%BC&oq=artvin+seyitler+&aqs=chrome.5.69i57j0j69i60j69i59l3.13506j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>, ziyaret tarihi: 07 Eylül 2018.
- Jolly ,A., 2009, *Optimization of Renewable Sources of Energy Use For A Farmland Application At Ridgecrest, Ny,Ms Thesis, Cornell Universty, Department of Electronics and Computer Engineering, New york.*
- Liu Y., Yu S., Zhu Y., Wang D., Liu J., 2018, "Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas" , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, No. 1, , pp. 460-470.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü, *Artvin ili Seyitler Köyü güneş ve rüzgâr potansiyeli verileri*,<https://www.mgm.gov.tr/kurumsal/istasyonlarimiz.aspx?sSiral=AL&m=ARTVIN>, ziyaret tarihi: 20 Nisan 2018.
- Ugranlı F., 2016, *Rüzgar Enerji Santralleri Entegre Edilmiş Elektrik Şebekelerinde İletim Hattı Planlaması*", Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Verma A., Chakraborti A., Das B., Kasari P. R., Mishra M. Pal S., 2018, "A new topology for hybrid wind-solar generation system for isolated loads", *International Conference on Power*, Thrissur, 1-7,18-20 Jan. 2018.
- Yerli, B., Özdemir E. T., Kaymak M.K., Sezen İ., Efe B.,Eftimiyadis K., Şahin A. D., "500 Kwç Kurulu Güce Haiz Bir Fotovoltaik Tesisin İtü Maslak Yerleşkesinde Homer Ve Retscreen Enerji Model Yazılımlar", *6th Atmospheric Science Symposium*, İstanbul, 2-10, 24-26 April 2013.

## KÖMÜR FLOTASYONUNDA FARKLI YAĞLARIN PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ercan ŞAHİNOĞLU

*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, TRABZON*  
[ercansahinoglu@ktu.edu.tr](mailto:ercansahinoglu@ktu.edu.tr)

(Geliş/Received: 13.11.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.12.2018)

**ÖZ:** Kömür tanelerinin hidrofobitesini arttırmak için mazot, gazyağı ve fuel oil gibi yağlar kömür flotasyonunda toplayıcı olarak endüstriyel ölçekte kullanılmaktadır. Bu çalışmada, dört farklı tipte yağın (mazot, fuel oil, orijinal ayçiçek yağı, atık ayçiçek yağı) yüksek kül (%35,65) ve kükürt (%7,91) içerikli toz boyutlu (-0,25 mm) kömürde flotasyon performansı araştırılmıştır. En yüksek yanabilir verim toplayıcı olarak mazot kullanılması durumunda %87,48 olarak elde edilmiştir. En fazla kül giderimi ise %58,36 olarak fuel oil kullanıldığında gerçekleşmiştir. Kömürün flotasyon ile zenginleştirilmesinde, petrol kökenli yağlara alternatif olarak kolay bulunabilen, yenilenebilir bitkisel kökenli yağında kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca atık ayçiçek yağının performansının (yanabilir verim %84,19 ve kül giderimi %56,17) diğer yağların performansına yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kömür flotasyonu, Bitkisel yağ, Yanabilir verim, Kül giderimi, Ayırma etkinliği

### Comparison of Performance of Different Oils in Coal Flotation

**ABSTRACT:** Oils such as diesel oil, kerosene and fuel oil are used as collectors in coal flotation in order to increase the hydrophobicity of the coal particles. In the current study, the effect of four different type of oils (diesel oil, fuel oil, original sunflower oil, waste sunflower oil) were investigated on flotation performance of a coal in powder form (-0.25 mm) with high ash (35.65%) and sulphur (7.91%) content. Maximum combustible recovery with 87.48% was achieved using diesel oil as the collector. Maximum ash rejection by 58.36% was obtained using fuel oil. It has been determined that it can be used as an alternative to petroleum based oils and can be used as a renewable vegetable based oil in the enrichment of coal with flotation. Furthermore, it was concluded that the performance of waste sunflower oil (combustible recovery of 84.19%, ash rejection of 56.17%) is close to the performance of other oils.

**Key Words:** Coal flotation, Vegetable oil, Combustible recovery, Ash rejection, Separation efficiency

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kömür, dünya enerji ihtiyacının karşılanmasında önemli bir rol üstlenmiş olan katı fosil bir yakıttır (Xia ve diğ., 2018). Dünya genelinde bir değerlendirme yapıldığında petrol rezervlerinin 40, doğalgaz rezervlerinin 60, kömür rezervlerinin de 200 yıllık bir ömre sahip olduğu tahmin edilmektedir (Alp ve diğ., 2017). Kömürün önümüzdeki onlarca yıl lider enerji kaynağı olmayı sürdüreceği olması ve gelişen teknolojiye paralel olarak üretiminde artan toz boyutlu kömür oranı, toz boyutlu kömürlerin temizlenmesine olan ilginin artmasına neden olmuştur (Gülsuna ve Bayat, 2010).

Türkiye, kömür rezervleri açısından oldukça zengin olmasına karşın bu rezervlerin çoğunluğunun yüksek kül, kükürt ve nem içeriğinden dolayı düşük kaliteli olduğu görülmektedir. Ülkemizde yüksek

kül/kükürt içeriğine sahip olduğu halde temizlenmeden kullanıldığı için değer kaybına uğrayan ve çevresel kirliliğe yol açan kömürlerin temizlenerek çevre dostu enerji yakıtı haline getirilmeleri ve ekonomik değerlerinin artırılması ülkemiz açısından oldukça önemlidir (Şahinoğlu, 2012).

Toz boyutlu kömürlerin temizlenmesinde kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler flotasyon, yağ aglomerasyonu, seçici flokülasyon ve geliştirilmiş gravite ayırıcıları (kelsey jig, multi gravite ayırıcısı, falcon konsantratörü ve knelson konsantratör) dir (Kawatra ve Eisele, 2001; Şahinoğlu, 2016). Bu yöntemler arasında, flotasyon yöntemi 1920'lerden beri toz boyutlu (<0,5 mm) kömürlerin temizlenmesinde başarı ile kullanılmaktadır (Canpolat, 2003; Gülsuna ve Bayat, 2010). Flotasyonda kömür ve gang minerallerinin yüzey hidrofobite farklılığına bağlı olarak ayırma işlemi gerçekleştirilir (Tan ve diğ., 2015). Kömür taneleri beraber bulunduğu gang minerallerine göre daha fazla hidrofobik (su sevmez) özelliğe sahiptir. Hidrofobik kömür taneleri hava kabarcıklarına tutunarak yüzeye taşınıp temiz kömür olarak kazanılırken, gang mineralleri ise genellikle hidrofilik olduğundan hava kabarcıklarına tutunamayıp süspansiyonda kalırlar (Kawatra ve Eisele, 2001).

Kömür tanelerinin yüzebilirliği birçok faktör tarafından belirlenir (Xia ve diğ., 2017). Bu faktörler kömürleşme derecesi, nem içeriği ve yüzey oksidasyonudur (Bilir, 2011). Bununla birlikte kömür tanelerinin yüzebilirliğine etki eden diğer faktörler ise tane boyutu, pülp katı oranı, hava miktarı, karıştırma hızı, besleme hızı, kullanılan reaktiflerin cinsleri ve miktarları, pülp pH'ı ve flotasyon makinesidir (Sahinoglu, 2018).

Kömür flotasyonunda kömür tanelerinin yüzebilirliğini arttırmak ve daha kuvvetli kabarcık-tanecik bağları oluşturmak için genellikle gazyağı, mazot ve fuel oil gibi hidrokarbon kökenli polar olmayan yağlar toplayıcı olarak kullanılmaktadır. Bu yağlar kömür tanelerinin yüzeyini bir film şeklinde kaplamakta ve tane ile hava kabarcığı arasındaki adezyon kuvvetini arttırarak daha güçlü temasların oluşmasını sağlamaktadır. Böylelikle hem flotasyon hızı hem de kömür kazanma verimi artmaktadır (Hacıfazlıoğlu, 2011). Bu tür yağlar polar olmayan hidrokarbon zincirinden oluştukları için kömür tanelerin yüzeylerini kaplarlar ve kömür tanelerinin doğal su sevmez özelliklerini arttırarak flotasyon başarısının artırılmasına neden olurlar (Çilek, 2006). Taşkömürlerinin flotasyonunda yağların kullanım miktarları 0,5-2 kg/t civarında iken, linyit kömürlerinde bu miktar 6-8 kg/t seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Diğer taraftan, polar olan (iyonlaşan) toplayıcılarda kömür flotasyonunda kullanılabilir. Fakat bu toplayıcılar polar olmayan yağlar kadar verimli olmayıp sadece kül giderimi açısından daha avantajlı olabilmektedirler (Hacıfazlıoğlu, 2011).

Literatürde kömür flotasyonunda farklı yağların performansının karşılaştırılması ile ilgili çeşitli çalışmalar olmasına rağmen, çalışmalarda kullanılan kömürlerin kükürt içerikleri (özellikle piritik kükürt içeriği) genellikle düşüktür. Diğer pek çok çalışmada atık ayçiçek yağının, petrol kökenli yağlara göre flotasyon performansı araştırılmamıştır. Bu çalışma kapsamında, kömür flotasyonunda yüksek yağ tüketimini ve düşük verim problemini çözmek için kolay bulunabilen, yenilenebilir yağın flotasyon reaktifi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Müzret bölgesinden alınan yüksek kül (%35,65) ve kükürt (%7,91) içerikli kömür farklı yağlar ile flotasyon işlemine tabi tutulmuş olup, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek farklı yağların flotasyon performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmada ileri karakterizasyon yöntemlerinden olan, taramalı elektron mikroskop (SEM) - enerji saçınım spektroskopisi (EDS), mikroskop altında parlak kesit incelemesi gibi yöntemler kullanılmıştır.

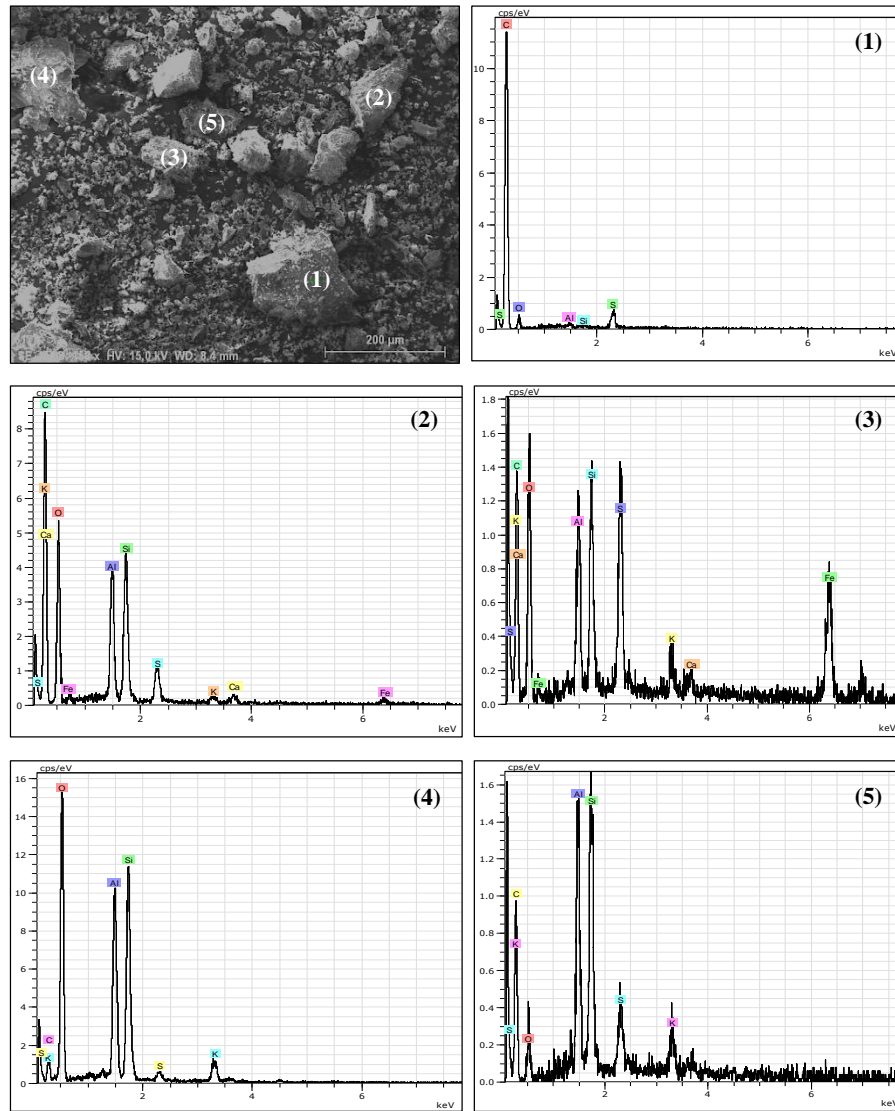
#### **MALZEME ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)**

Bu çalışmada; Artvin ili, Yusufeli ilçesi, Müzret bölgesi kömürü kullanılmıştır. Bölgeden yaklaşık 150 kg kömür numunesi alınarak laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvara getirilen kömür numunesinin miktarı konileme-dörtleme yöntemi ve mekanik numune bölücü kullanılarak azaltılmıştır. Elde edilen temsili örnekler laboratuvar tipi çeneli ve merdaneli kırıcı yardımıyla -1,00 mm boyutuna indirilmiştir. Daha sonra çubuklu ve bilyalı değirmenler kullanılarak -0,25 mm boyutunun altına öğütülmüştür. Kömür tane boyutu analizi Çizelge 1'de verilmiştir. Tane boyutu analizi ASTM E11 laboratuvar deney elekleri kullanılarak yapılmıştır.

**Çizelge 1.** Kömür tane boyutu analizi*Table 1. Analysis of coal particle size*

Tane Boyutu (mm)	Ağırlık (%)	Kümülatif Elek Altı (%)
-0,25+0,212	12,79	100
-0,212+0,15	18,31	87,21
-0,15+0,106	14,38	68,90
-0,106+0,053	21,88	54,52
-0,053	32,64	32,64
Toplam	100	

Kömür numunesinin mineralojik ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Mineralojik analizler, X-ışını difraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskop (SEM) - enerji saçınım spektroskopisi (EDS), mikroskop altında parlak kesit incelemesi gibi yöntemler ve cihazlar kullanılarak belirlenmiştir. Kömür örneğinin XRD analizinde pirit, kaolinit, montmorillonit, illit, kalsit, jips ve kuvars tespit edilmiştir. Kömür örneğinin, SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 1’de, besleme numunesinde farklı noktalardan yapılan SEM-EDS analiz sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir.

**Şekil 1.** Besleme numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizleri*Figure 1. SEM image and EDS analysis of feed sample*

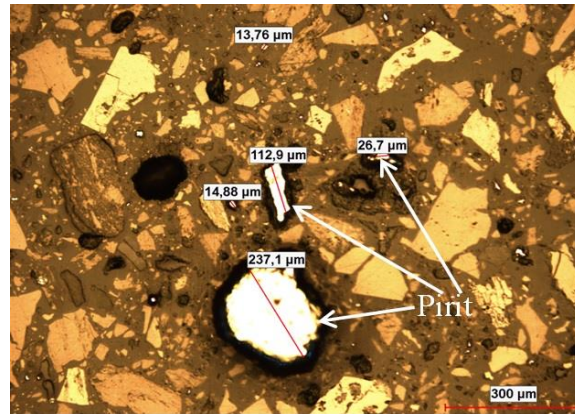
**Çizelge 2.** Besleme numunesinde farklı noktalardan yapılan SEM-EDS analiz sonuçları*Table 2. SEM-EDS analysis results from different dots in feed sample*

Element (%)	Besleme				
	Nokta1	Nokta2	Nokta3	Nokta4	Nokta5
C	75,56	30,46	15,66	2,84	38,32
O	21,37	45,07	28,25	59,49	43,77
Al	0,16	6,29	7,02	13,72	6,96
Si	0,31	9,46	8,29	18,48	7,08
S	2,60	3,10	8,88	1,27	2,18
K	-	1,24	2,84	4,20	1,69
Ca	-	1,25	1,35	-	-
Fe	-	3,13	27,71	-	-

Bu analiz sonuçlarından, Şekil 1.'(1)'in kömür, (2)'nin kömür+kil+pirit, (3)'ün pirit+kil+kömür, (4)'ün kil, (5)'in çoğunluğu kömür olan kömür+kil olduğu belirlenmiştir. Çizelge 3'de Müzret kömürünün analiz sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçlarından kömür numunesinin yüksek kül (%35,65) ve kükürt (%7,91) içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Kömürün piritik kükürt içeriği ise %5,57'dir. -0,25 mm boyutuna indirilen kömür örneğinin parlak kesit incelemesinden de piritlerin farklı boyutta ve şekilde olduğu görülmüştür (Şekil 2).

**Çizelge 3.** Müzret kömürünün analiz sonuçları*Table 3. Analysis results of Müzret coal*

Bileşenler	Havada Kuru	Kuru
Nem (%)	2,25	-
Kül (%)	34,85	35,65
Uçucu Madde (%)	10,73	10,98
Sabit Karbon (%)	52,17	53,37
Sülfat Kükürt (%)	0,99	1,01
Piritik Kükürt (%)	5,44	5,57
Organik Kükürt (%)	1,3	1,33
Toplam Kükürt (%)	7,73	7,91
Kalorifik Değer (kcal/kg)	4970	5084

**Şekil 2.** Beslemedeki farklı şekil ve boyuttaki piritler*Figure 2. Pyrites of different shapes and sizes in feed*

Bu çalışmada, toplayıcı olarak mazot, fuel oil, orijinal ayçiçek yağı ve atık ayçiçek yağı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yağların yoğunluk ve viskozite değerleri Çizelge 4'de verilmiştir. Tüm yağların yoğunluk analizi 23,8 °C'de, viskozite analizi ise 40 °C'de yapılmıştır.

**Çizelge 4.** Yağların yoğunluk ve viskozite değerleri*Table 4. Density and viscosity values of oils*

Yağ Tipi	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Viskozite (mm <sup>2</sup> /s)
Mazot	0,832	2,76
Fuel oil	0,924	94,79
Orijinal Ayçiçek Yağı	0,918	32,24
Atık Ayçiçek Yağı	0,917	35,81

Köpürtücü olarak ise çamyacı kullanılmıştır. Atık ayçiçek yağı bir üniversitenin kantininden temin edilmiştir. Atık yağ, içindeki fiziksel safsızlıkların giderilmesi amacıyla vakum filtre ile süzülmüştür. Yağların yoğunluğu Alla France tipi hidrometre ile, viskozitesi ise Tanaka AKV-202 tipi viskometre ile bulunmuştur.

Flotasyon deneyleri Denver tipi flotasyon makinesi kullanılarak 1 L'lik flotasyon hücresinde yapılmıştır. Tüm deneylerde kömür tane boyutu -0,25 mm olup, deneyler 1200 devir/dakika karıştırma hızında, %10 katı oranında, 100 gr örnek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde ilk olarak kömür+su karışımı (900 ml su, 100 g kömür) 3 dakika karıştırılmış, daha sonra karışıma yağlar ilave edilip (250; 500; 750; 1000 g/t) 5 dakika şartlandırılmıştır ve ortama çamyacı ilavesi yapıp (400 g/t) 2 dakika daha şartlandırılmıştır. Flotasyon makinasının havası açılarak (3 L/dk) 3 dakika köpük alınmıştır. Deneyler doğal pH'da saf su kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Flotasyon deney koşulları Çizelge 5'de verilmiştir. Flotasyon prosesinde kullanılan karıştırma hızı, şartlandırma süreleri ve kullanılan dozaj değerleri, ön optimizasyon çalışmasıyla belirlenmiştir. Elde edilen konsantreler vakum filtre ile susuzlandırılıp, daha sonra etüvde 105 °C'de kurutulup tartılmış ve kül analizine tabi tutulmuştur.

**Çizelge 5.** Flotasyon deney koşulları*Table 5. Flotation test conditions*

Parametre	Değer
Selül Hacmi	1 L
Katı Oranı	%10
Karıştırma Hızı	1200 dev/dk
Toplayıcı	250; 500; 750; 1000 g/t
Köpürtücü	400 g/t
Hava Miktarı	3 L/dk
Köpük Toplama Zamanı	3 dk

Aşağıdaki eşitlikler kullanılarak, yanabilir verim (YV, %), kül giderimi (KG, %) ve ayırma etkinliği (AE, %) hesaplanmıştır (Sahinoglu, 2018).

$$YV (\%) = \left[ \frac{c(100 - c)}{F(100 - f)} \right] \times 100 \quad (1.1)$$

$$KG (\%) = \left[ 1 - \frac{c}{F} \frac{c}{f} \right] \times 100 \quad (1.2)$$

$$AE (\%) = [ YV (\%) + KG (\%) - 100 ] \quad (1.3)$$

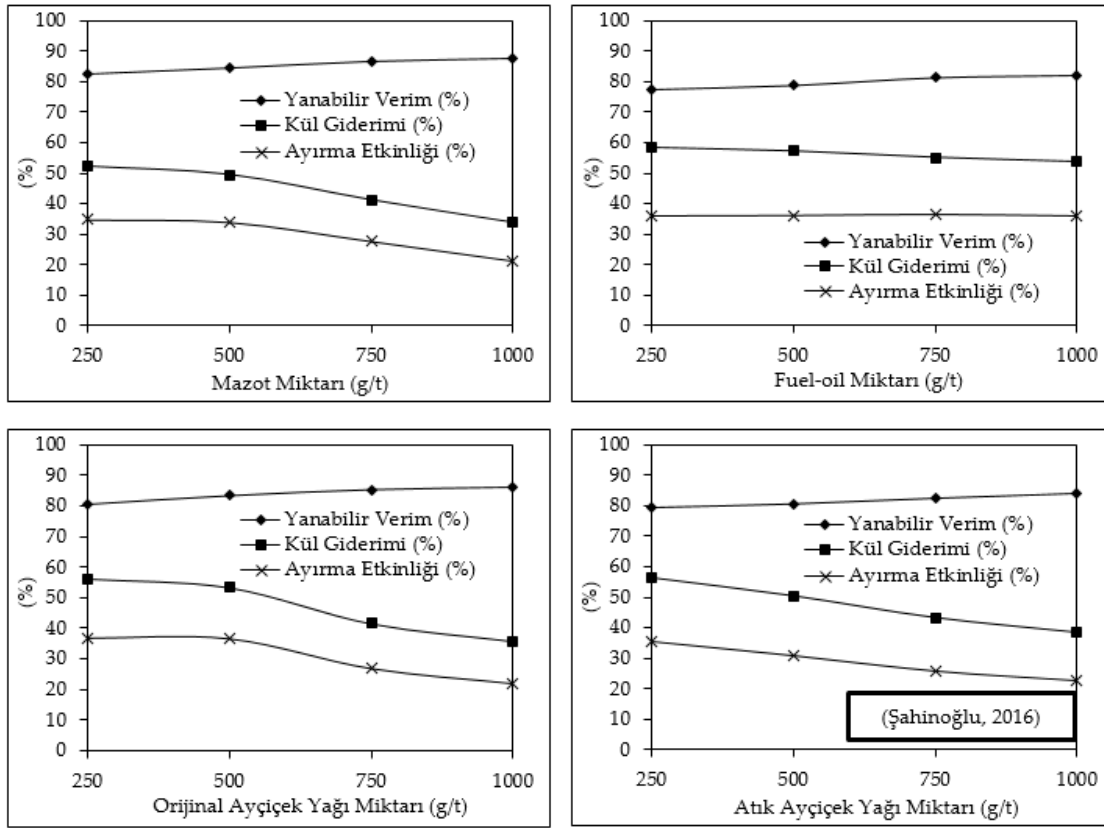
Burada;

C, Konsantrenin ağırlığı (g); c, Konsantrenin külü (%); F, Beslemenin ağırlığı (g); f, Beslemenin külü (%).

### BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Farklı yağların (mazot, fuel oil, orijinal ayçiçek yağı ve atık ayçiçek yağı) ve yağ miktarlarının (250, 500, 750, 1000 g/t) değişken olarak kullanıldığı flotasyon deneylerinde elde edilen yanabilir verim, kül giderimi ve ayırma etkinliği sonuçları Şekil 3’de gösterilmiştir.

Mazot ile yapılan deneylerde yanabilir verim %82,7-87,48 arasında, kül giderimi %33,86-52,08 ve ayırma etkinliği %21,34-34,78 arasında değişmektedir. Fuel oil ile yapılan deneylerde yanabilir verim %77,58-82,23 iken, kül giderimi %53,69-58,36 ve ayırma etkinliği %35,92-36,58’dir. Orijinal ayçiçek yağı ile yapılan deneylerde yanabilir verim %80,69-85,9 olup, kül giderimi %35,81-56,2 ve ayırma etkinliği %21,71-36,89 arasında değişmektedir. Atık ayçiçek yağı ile yapılan deneylerde ise yanabilir verim %79,43-84,19 iken, kül giderimi %38,5-56,17 ve ayırma etkinliği %22,69-35,6’dir.



Şekil 3. Yağ tipinin ve miktarının yanabilir verim, kül giderimi ve ayırma etkinliğine etkisi

Figure 3. The effect of oil type and amount on combustible recovery, ash rejection and separation efficiency

Tüm yağlar için yağ miktarlarının artışına bağlı olarak yanabilir verimlerin arttığı, kül giderimlerinin ise azaldığı görülmüştür. Pülp ortamında daha fazla yağ damlası bulunmasıyla birlikte kömür tanecikleriyle daha fazla temasın olması kömür taneciklerinin hidrofobluğunun artmasına neden olmaktadır. Kömür taneciklerinin hidrofobluğunun artması, tane ile hava kabarcıkları arasındaki tutunmanın daha kuvvetli olmasını sağlamaktadır. Bu durum yanabilir verimlerin artmasını neden olmuştur. Yağ miktarlarının artışına bağlı olarak kül giderimlerinin azalması, ortamdaki yağ damlacıklarının sayısının daha da artması yüksek mineral madde içerikli kömür tanecikleri üzerine daha fazla yağ adsorbe olması sonucu yüzdürülen mineral madde miktarının artmasıyla açıklanabilir. Besleme numunesinin yapılan SEM-EDS analiz sonuçlarından (Şekil 1, Çizelge 2) gang minerallerinin kömür tanecikleriyle birlikte buluna bildiği (kömür+kil+pirit, kömür+kil) belirlenmiş olup, yağ miktarlarının artışına bağlı olarak kömür tanecikleriyle birlikte bulunan gang minerallerinde konsantrasyonun arttığı söylenebilir. Genel olarak bütün yağ tiplerinde yağ miktarlarının artışıyla birlikte ayırma

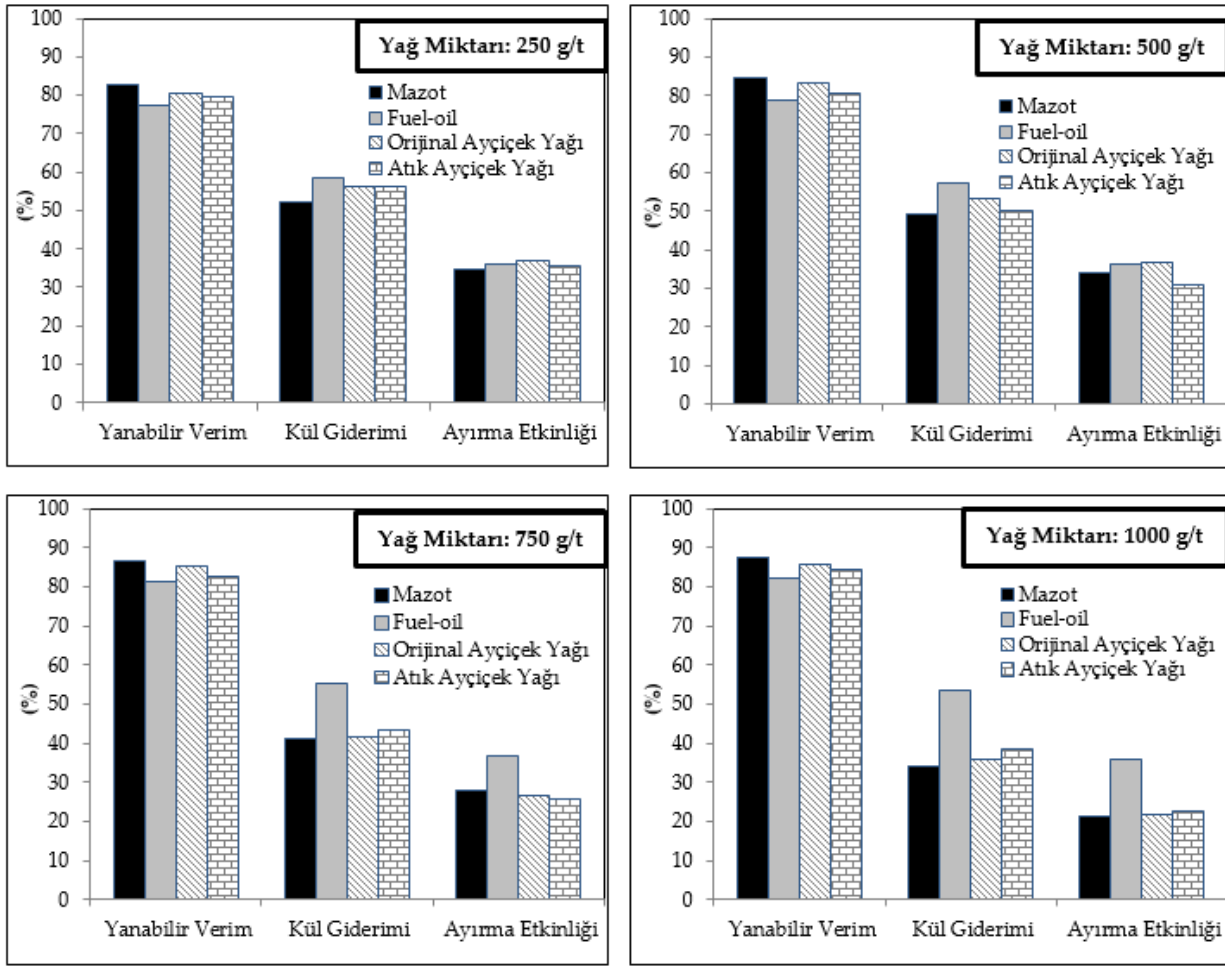


etkinlikleri azalmıştır. Ayırma etkinliği hem yanabilir verimi hem de kül giderimini birlikte değerlendiren bir kriterdir. Bu değer ne kadar yüksek ise temizleme (zenginleştirme) işlemi o kadar başarılıdır. Yağ miktarlarının artışıyla birlikte yanabilir verimlerinin artmasına rağmen, kül giderimlerinin azalması ve de bu azalmaların yanabilir verimdeki artışa oranla daha fazla olması bu sonucu ortaya çıkarmıştır.

Sönmez ve Cebeci (2006) çalışmalarında -500 µm'luk Ukrayna kömürünün flotasyon yöntemi ile temizlenebilirliğini farklı toplayıcılar kullanarak araştırmışlar. Toplayıcı miktarlarının artışına bağlı olarak yanabilir verimlerin arttığını, kül giderimlerinin ise azaldığını rapor etmişlerdir. Ayırma etkinliği değerlerinin toplayıcı miktarlarının artışına bağlı olarak arttığını ancak bazı toplayıcılarda belli yağ miktarlarından sonra ayırma etkinliği değerlerinin azaldığını belirlemişlerdir. Şimşek (2007) çalışmasında farklı kömürlerin flotasyon ile zenginleştirilmesinde toplayıcı olarak gazyağı, fuel oil, pamukyağı, susamyağı, zeytinyağı ve soya yağı kullanmıştır. Yağ miktarı arttıkça yanabilir verimin arttığını, genel olarak kül giderimi değerlerinin ise azaldığını belirlemiştir.

Şekil 4'de görüldüğü gibi bütün yağ miktarları için en yüksek yanabilir verim değerleri sırasıyla mazot, orijinal ayçiçek yağı, atık ayçiçek yağı ve fuel oil ile elde edilmiştir. Tüm deneyler içerisinde maksimum yanabilir verime 1000 g/t yağ miktarında %87,48 olarak mazot ile ulaşılmıştır. En düşük yanabilir verim değerine ise 250 g/t yağ miktarında %77,58 olarak fuel oil kullanıldığında ulaşılmıştır. Mazot kullanıldığında yanabilir verimin maksimum olması mazotun yoğunluğunun ve viskozitesinin diğer yağlara göre daha az olması nedeniyle pülp içerisinde daha iyi dağılarak homojen bir emülsiyon oluşturmasına dayandırılabilir. 5 dakikalık şartlandırma süresi sonunda mazotun kömür taneleri yüzeylerine diğer yağlara göre daha fazla adsorplandığı söylenebilir. Bu durumun yanabilir verimin daha fazla olmasını sağladığı düşünülmüştür. Fuel oil ile diğer yağlara göre daha düşük yanabilir verim değeri elde edilmesinin nedeni ise yoğunluğunun ve viskozitesinin daha yüksek olmasıdır. 5 dakikalık şartlandırma süresi sonunda yüksek yoğunluğu ve viskozitesi sebebiyle pülp içerisinde yeterince homojen olarak dağılamayan fuel oil, kömür taneleri yüzeylerine yeterince adsorplanmadığı söylenebilir. Bundan dolayı daha düşük yanabilir verim değerleri elde edilmiştir. Kül giderimleri bütün yağ miktarları için en fazla fuel oil kullanıldığında, en az ise mazot kullanıldığında elde edilmiştir. Maksimum kül giderimine 250 g/t yağ miktarında %58,36 olarak fuel oil kullanıldığında, minimum kül giderimine ise 1000 g/t yağ miktarında %33,86 olarak mazot kullanıldığında ulaşılmıştır. Ayırma etkinliği genel olarak düşük yağ miktarlarında (250; 500 g/t) bütün yağlar için birbirine yakın olmakla birlikte yüksek yağ miktarlarında fuel oil kullanıldığında daha fazla olmuştur. Bu durum, ayırma etkinliğinin hem yanabilir verimi hem de kül giderimini birlikte değerlendiren bir kıstas olmasından kaynaklanmaktadır. Şöyle ki, yüksek yağ miktarlarında (500; 1000 g/t) fuel oil kullanıldığında elde edilen yanabilir verim değerleri diğer yağlarla elde edilen yanabilir verim değerlerine göre daha az olsa da, kül giderim değerlerinin diğer yağlara göre çok daha fazla olması bu sonucu ortaya çıkarmıştır. Maksimum ayırma etkinliği 250 g/t yağ miktarında %36,89 olarak orijinal ayçiçek yağı kullanıldığında elde edilmiştir.

Atık ayçiçek yağı ile yapılan flotasyon deneylerinde her ne kadar maksimum değerler elde edilmemiş olsa da elde edilen sonuçlar incelendiğinde hemen hemen diğer yağlarla elde edilen sonuçlara yakın değerler olduğu görülmüştür. Atık ayçiçek yağının yoğunluğunun ve viskozitesinin orijinal ayçiçek yağının yoğunluğu ve viskozitesine göre yakın değerde olduğu görülmüştür. Atık ayçiçek yağı ile 250 g/t yağ miktarında yanabilir verim %79,43 iken, kül giderimi %56,17 olarak bulunmuştur. Bu yağ miktarında ayırma etkinliği ise %35,6'dır. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi atık ayçiçek yağının flotasyona ilişkin özelliklerinde önemli bir değişme olmadığı belirlenmiştir. Hacifazlıoğlu ve Gerdan (2016) yaptıkları çalışmada toz boyutlu kömürün flotasyonunda toplayıcı olarak atık ayçiçek yağını kullanmışlar. %55,85 küllü Zonguldak toz kömüründen yanabilir verimi %28,19 ve ürün külünü ise %15,80 olarak bulmuşlardır. Şimşek (2007) çalışmasında dört farklı bitkisel yağın (pamukyağı, susamyağı, zeytinyağı ve soya yağı) 175 °C kızartılmasıyla elde ettiği atık yağları, taşkömürü ve linyit kömürlerinin flotasyonunda etkisini incelemiş, bu yağların da oldukça etkili olduğunu ve sonuçların orijinal yağlara göre hemen hemen aynı olduğunu bulmuştur.



Şekil 4. Farklı yağların, çeşitli yağ miktarlarındaki performanslarının karşılaştırılması

Figure 4. Comparison of performance of various oils in different oil quantities

Şekil 5’de beslemenin, orijinal ayçiçek yağı ile 250 g/t yağ miktarında yapılan flotasyon deneyinin konsantrisinin ve atığının parlak kesitte görünüşleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Parlak kesitler incelendiğinde piritlerin daha çok atığa gittiği belirlenmiştir. Atıktaki piritlerin çoğunlukla iri boyutlu olduğu, bununla birlikte de küçük boyutlu piritlerinde bulunduğu gözlemlenmiştir. Konsantredeki piritlerin ise genellikle küçük boyutlu piritler olduğu görülmüştür. Konsantrenin parlak kesitinde çok fazla miktarda iri, orta ve küçük boyutlu maserallerin olduğu, bununla birlikte az da olsa genellikle orta ve küçük boyutlu maserallerinde atığa gittiği belirlenmiştir.

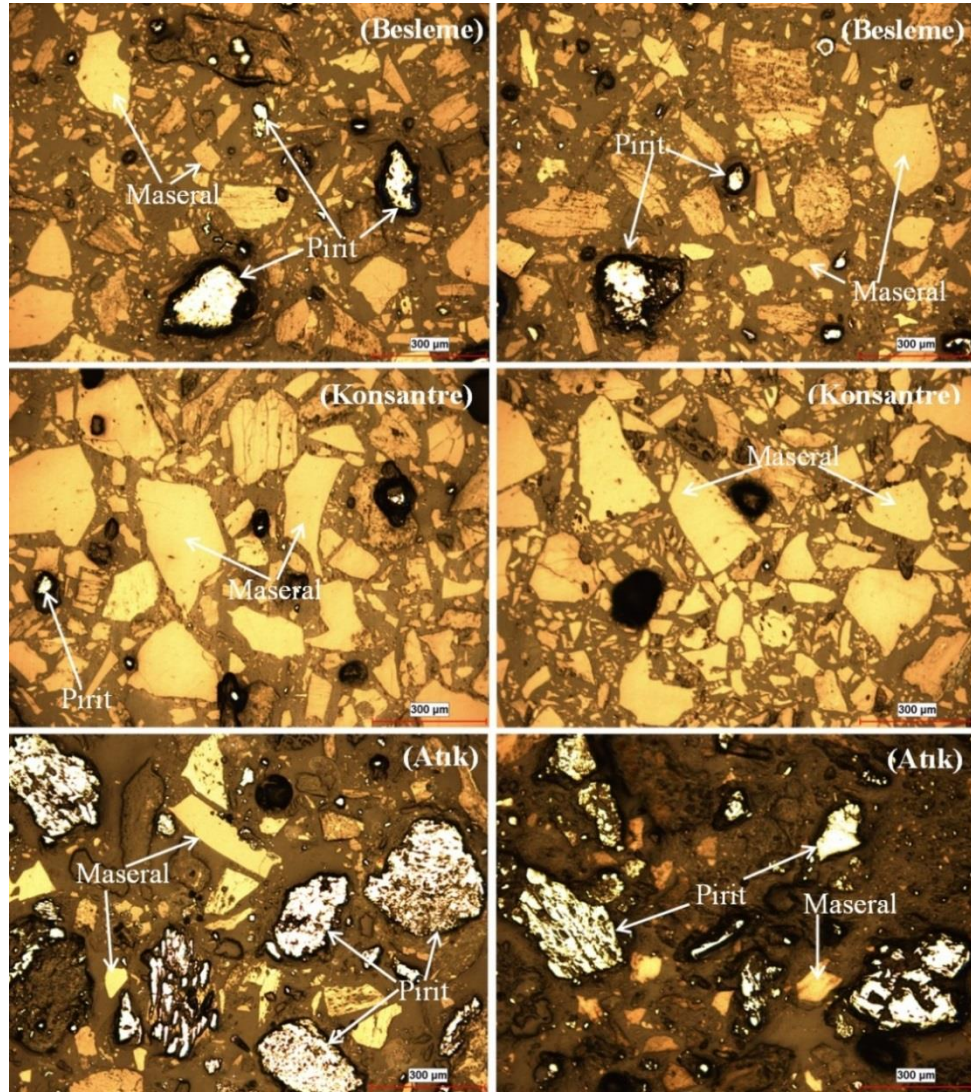
Ayırma etkinliği en fazla olan orijinal ayçiçek yağı ile 250 g/t yağ miktarında yapılan flotasyon deneyinde elde edilen temiz kömürün analiz sonuçları Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 3 ve Çizelge 6 karşılaştırıldığında kül içeriğinin %35,65 ‘den %23,12’ye düştüğü, piritik kükürt içeriğinin %5,57’den %1,93’e azaldığı, kalorifik değer ise 5084 kcal/kg’dan 5863 kcal/kg’a yükseldiği görülmüştür.

Çizelge 6. Temiz kömürün analiz sonuçları

Table 6. Analysis results of clean coal

Bileşenler	Kuru
Kül (%)	23,12
Piritik Kükürt (%)	1,93
Kalorifik Değer (kcal/kg)	5863



Şekil 5. Besleme, konsantre ve atığın parlak kesit görüntüleri

Figure 5. Polished section images of feed, concentrate and tailings

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Farklı yağların yüksek kül-kükürt içerikli Müzret kömürünün flotasyonunda başarılı bir şekilde kullanılabilirdiği, yüksek oranlarda yanabilir verim ve kül giderimleri elde edildiği görülmüştür.

Tüm deneyler arasında maksimum yanabilir verim %87,48 olarak mazot ile 1000 g/t yağ miktarında, en yüksek kül giderimi 250 g/t yağ miktarında %58,36 olarak fuel oil ile, en fazla ayırma etkinliği ise 250 g/t yağ miktarında orijinal ayçiçek yağı kullanıldığında %36,89 olarak bulunmuştur.

Besleme numunesi (kuru bazda) analiz sonuçları, ayırma etkinliği en fazla olan deneyde elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında kül ve piritik kükürt içeriklerinin sırasıyla %35,15 ve %65,35 oranlarında azaldığı, kalorifik değerin ise %15,32 oranında arttığı bulunmuştur.

Kömür flotasyonunda mazot ve fuel oil gibi petrol kökenli yağlara alternatif olarak bitkisel kökenli yağlarında başarılı bir şekilde kullanılabilirdiği görülmüştür.

Atık ayçiçek yağının flotasyon performansının diğer yağların flotasyon performansına yakın olduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alp, İ., Şahinoğlu, E., Kantarcı, S., 2017, "Tersiyer (Pliyosen)Yaşlı Bir Kömür Arama Sahasına Ait Sondaj Karot Örneklerinin Değerlendirilmesi", *Engineering Sciences*, Vol. 12 (4), pp. 224-235.
- Bilir, K., 2011, "Kömür Flotasyonunda Kullanılan Gazyağı Miktarının Oranların Farkı Testi ile Optimizasyonu", *Eskişehir Osmangazi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24, 119-130.
- Canpolat, L., 2003, "Taşkömürünün Yağ Aglomerasyonu, Flotasyon ve Yağ Aglomerasyonu-Flotasyon Yöntemiyle Zenginleştirilebilirliğinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Çilek, E.C., 2006, *Mineral Flotasyonu*, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Yayın No: 59, Isparta.
- Gülsuna, G., Bayat, O., 2010, "Linyit Kömürü Ara Ürününün Flotasyon ile Zenginleştirilmesinin Araştırılması", Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Cilt 22-3, ss. 170-176.
- Hacıfazlıoğlu, H., 2011, "Jameson Hücrelerinde Bitümlü Şlam Kömürün Flotasyonu İçin En Uygun Köpürtücü ve Toplayıcı Tipinin Araştırılması", *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Cilt 2, ss. 33-43.
- Hacıfazlıoğlu, H., Gerdan, G.H., 2016, "Taşkömürü Tozları Flotasyonunda Sıcaklığın Etkisi", *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 5, ss. 1-8.
- Kawatra, S.K., Eisele, T.C., 2001, *Coal Desulfurization High-Efficiency Preparation Methods*, Department of Mining and Materials Processing Engineering Michigan Technological University.
- Sahinoğlu, E., 2018, "Cleaning of High Pyritic Sulfur Fine Coal via Flotation", *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, pp. 1703-1712.
- Sönmez, İ., Cebeci, Y., 2006, "Performance of Classic Oils and Lubricating Oils in Froth Flotation of Ukraine Coal", *Fuel*, Vol. 85, pp. 1866-1870.
- Şahinoğlu, E., 2012, "Kömürün Yağ Aglomerasyonu Yöntemi ile Temizlenmesinde Bitkisel Atık Yağların ve Ses Ötesi Dalgaların Kullanılabilirliği", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Şahinoğlu, E., 2016, "Kömürün Flotasyon ile Temizlenmesinde Atık Ayçiçek Yağının Kullanılabilirliği", International Multidisciplinary Congress of Eurasia, Ukraine, Odessa, 32-39, 11-13 July 2016.
- Şimşek, S., 2007, "Farklı Kömürlerin Flotasyon ile Zenginleştirilmesinde Klasik Flotasyon Yağları ile Bitkisel Kökenli Yağların Performanslarının Karşılaştırılması", Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Tan, J., Liang, L., Peng, Y., Xie, G., 2015, "Grinding Flotation of Bituminous of Different Oxidation Degrees", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 142, pp. 30-34.
- Xia, W., Li, Y., Nguyen, A.V., 2018, "Improving Coal Flotation Using the Mixture of Candle Soot and Hydrocarbon Oil As a Novel Flotation Collector", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 195, pp. 1183-1189.
- Xia, W., Niu, C., Zhang, Z., 2017, "Effects of Attrition on Coarse Coal Flotation in the Absence of Collectors", *Powder Technology*, Vol. 310, pp. 295-299.