

# TÜRK MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA VE EĞİTİMİ DERGİSİ

2024 - Cilt: 3 Sayı: 2

ISSN: 2822-3454  
E-ISSN: 2980-213X

Turkish Journal of Engineering  
Research and Education

2024 - Vol: 3 No: 2

Bu dergi Türk Eğitim-Sen tarafından yayınlanmaktadır.

This journal is published by Türk Eğitim-Sen.



İmtiyaz Sahibi/ Owner	Talip GEYLAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKANI
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü /Director	Cengiz KOCAKAPLAN - TÜRK EĞİTİM-SEN GENEL BAŞKAN YARDIMCISI
Yazışma Adresi / Correspondence Address	Erzurum Mahallesi Talatpaşa Bulvarı No:160 Kat:6 Cebeci/ANKARA
İnternet Adresi / Web Address	<a href="https://www.tmaed.org">https://www.tmaed.org</a>
Yayın Türü /Publication Type	Sürekli / Periodical Yılda iki sayı yayımlanır: Mayıs, Kasım Published two issues per year: May, November
Baş Editör / Editor-in-Chief	Prof. Dr. Murat Erhan BALCI – Balıkesir Üniversitesi
Baş Editör Yardımcısı / Deputy Editor-in-Chief	Doç. Dr. Nuray GEDİK – Balıkesir Üniversitesi
Alan Editörleri / Area Editors	Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Baybars Ali FİL- Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Feray KÖÇKAR - Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. İsmail ŞAHİN - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU - İstanbul Ticaret Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa GÜNAY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Osman KOLA - Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Prof. Dr. Recep BİRGÜL – Carroll College Prof. Dr. Şenol GÜRSOY - Karabük Üniversitesi Prof. Dr. Yasin ALEMDAĞ - Karadeniz Teknik Üniversitesi Doç. Dr. Adem TEKEREK - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. İlker TEKİN - Karabük Üniversitesi Doç. Dr. Mustafa Selman AYDOĞAN - Balıkesir Üniversitesi Doç. Dr. Nihat DÖNGEL- Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Osman ÖZKARACA - Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Doç. Dr. Tuba GÖZEL - Gebze Teknik Üniversitesi
Editör Kurulu / Editorial Board	Prof. Dr. Abid ABU-TAIR - British University in Dubai Prof. Dr. Ahmed F. ZOBAA-Brunel University Prof. Dr. Adil EL-KORDI - Beirut Arab University Prof. Dr. Ali Fuat BOZ – Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Behnam MOHAMMADI-IVATLOO - University of Tabriz Prof. Dr. Can HAŞIMOĞLU– Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Prof. Dr. Çetin ELMAS - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. F. P. Garcia MARQUEZ - University of Castilla-La Mancha Prof. Dr. Gürkan ÖZDEN – İstanbul Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Iqbal BABAYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Jamal KHATIB - Beirut Arab University Prof. Dr. John KINUTHIA - University of South Wales Prof. Dr. Maksud BOBOJANOV - Tashkent State Technical University Prof. Dr. Mürsel ERDAL - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Nurali YUSUFBEYLİ - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Ömer EYERCİOĞLU - Gaziantep Üniversitesi Prof. Dr. Sergey BUSHİYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Seyhan FIRAT - Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Tuncay YİÇİT – Süleyman Demirel Üniversitesi Prof. Dr. Vilayet VELİYEV - Azerbaijan Technical University Prof. Dr. Z. ABDUL-MALEK - Universiti Teknologi Malaysia Assoc. Prof. Dr. S. H. E. Abdel ALEEM- Valley High Institute of Eng. and Tech. Dr. Abbas RABIEE - University of Zanjan Dr. Ali AHMADIAN - University of Bonab Dr. Amin Mohammadpour SHOTORBANI - University of British Columbia Dr. D. R. ALMALYK - The Islam Karimov Tashkent State Technical University Dr. Morteza Zare OSKOU EI - Qatar University Dr. Pouya IFAEİ - Kyung Hee University Dr. Saeed PEYGHAMI - Aalborg University Dr. Vahid VAHIDINASAB - Nottingham Trent University Dr. Zeynep HASIRCI TUĞCU - Karadeniz Teknik Üniversitesi

Mizanpaj Editörleri / Layout Editors	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA – Gazi Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Onur ALTUNTAŞ – Milli Savunma Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Mehmet Serkan YILDIRIM – Gazi Üniversitesi
Dil Editörleri / Language Editors	Türkçe: Doç. Dr. Ünsal Yılmaz YEŞİLDAL-Akdeniz Üniversitesi İngilizce: Prof. Dr. Recep BİRGÜL – Carroll College Doç. Dr. Erkan YÜCE – Aksaray Üniversitesi
Teknik Editörler / Technical Editors	Prof. Dr. Yakup KAYA- Karabük Üniversitesi
Sekretarya / Secretariat	Öğr. Gör. Dr. Şevket CANTÜRK – Balıkesir Üniversitesi Öğr. Gör. Mehmet GÜLSÜN – Gazi Üniversitesi

Bu Sayının Hakemleri/ Reviewers for the Current Issue	Prof. Dr. Bülent ORAL- Marmara Üniversitesi Prof. Dr. Gülgün YILMAZ – Eskişehir Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Hamdi Tolga KAHRAMAN – Karadeniz Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Metin DEMİRTAŞ – Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Seyhan FIRAT – Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ - Düzce Üniversitesi Prof. Dr. Yusuf SÖNMEZ – Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ -Yıldız Teknik Üniversitesi Doç. Dr. Erdiñ ALADAĞ- Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Doç. Dr. Hasan Özgür İMİRZİ - Gazi Üniversitesi Doç. Dr. Oktay Arıkan – Yıldız Teknik Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DAYI – Düzce Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Özlem BATTAL ŞAL – Karabük Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Onur SÖZÜDOĞRU- Atatürk Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Şevki EREN – Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Oktay KARAKAYA – Balıkesir Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Şevket CANTÜRK – Balıkesir Üniversitesi Dr. Ayşe Aybike ŞEKER- Aselsan Akademi Araş. Gör. Yük. Müh. Ramazan Bülbül – Gazi Üniversitesi
--	--

## HAKKINDA

Türk Eğitim-Sen'in bilimsel yayın organı olan Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, mühendislik alanında hazırlanan güncel, özgün ve nitelikli çalışmalarını yayımlayan uluslararası hakemli bilimsel bir dergidir. Bu dergi, ilk sayısı 15 Haziran 2014 tarihinde yayımlanan "21. Yüzyılda Fen ve Teknik" dergisinin bölünmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi, Mayıs ve Kasım aylarında yılda iki sayı olarak yayımlanmaktadır. Açık erişim bir dergidir ve makaleler için herhangi bir değerlendirme ve başvuru ücreti talep etmez.

## ABOUT

Turkish Journal of Engineering Research and Education, the scientific publication of Türk Eğitim-Sen, is an international peer-reviewed scientific journal that publishes current, original and qualified studies in the field of engineering. This journal emerged as a result of the division of the "Science and Technology in 21st Century" journal, the first issue of which was published on June 15, 2014. Turkish Journal of Engineering Research and Education is published twice a year, in May and November. It is an open access journal and does not charge any evaluation and submission fee for manuscripts.

## AMAÇ ve KAPSAM

Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitim Dergisi, mühendislik alanında güncel, özgün ve nitelikli çalışmalarını yayımlayarak, mühendislik öğrencilerinin eğitimlerini ve mühendislerin yaşam boyu mesleki gelişimlerini desteklemeyi, ayrıca mühendislik alan yazınına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Bu dergi, tüm mühendislik disiplinlerinden özgün araştırma makaleleri, derlemeler, kısa makaleler ve editöre mektupları yayımlamak üzere kabul eder.

## AIMS and SCOPE

Turkish Journal of Engineering Research and Education aims to support the education of engineering students and the lifelong professional development of engineers, and also to contribute to the engineering literature, by publishing current, original and qualified studies in the field of engineering. This journal welcomes original research articles, reviews, short articles and letters to editor from all engineering disciplines for publication.

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

### ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

- Demiryolu Projeleri Yarmalarında Şev Stabilitesi Değerlendirmeleri: Örnek Bir Uygulama**  
*Slope Stability Assessments in Railway Projects Cuts: A Case Study* 72  
Buğrahan Açıkgöz, Nihat Sinan Işık
- Çalışma Ortamlarında Tehlike Analizi: Türkiye ve Avrupa'da İş Kazalarına Yol Açan Unsurların Karşılaştırılması**  
*Hazard Analysis in Working Environments: Comparison of Factors Causing Work Accidents in Turkey and Europe* 81  
Dicle Aydemir, Berkay Ay, Efe İlerler, Uğur Çavdar
- Limon, Sibirya Çamı, Amerikan Cevizi, Monteri Çamı ve Manolya Ahşaplarında Organik Hindistan Cevizi Yağı Uygulamasının Yapılması Üzerine Bir Çalışma**  
*A study on the Application of Organic Coconut Oil on Lemon, Siberian pine, American Walnut, Monterrey Pine, and Magnolia Woods* 91  
Ümit Ayata, Elif Hümeýra Bilginer, Osman Çamlıbel
- Bir Nükleer Güç Santralinin Karşılaştırılmalı Maliyet Analizi: Akkuyu Özelinde**  
*A Comparative Cost Analysis of a Nuclear Power Plant: Akkuyu Case* 99  
Gürcan Tiryaki, Ünal Çamdalı
- Yılan Optimizasyon Algoritması ile CEC 2019 Problem Seti ve Mühendislik Problemlerinin Çözümü**  
*Solving of CEC 2019 Problem Set and Engineering Problems with the Snake Optimization Algorithm* 112  
Merve Arslan, Gürcan Yavuz
- Zeolitik Tüf ve Granül EPS Kullanarak Hafif Duvar Bloklarının Üretilirliği**  
*Producibility of Lightweight Wall Blocks Using Zeolitic Tuff and Granular EPS* 123  
İlker Tekin, İbrahim Torlak, Mahfuz Pekgöz
- Effects of Climate Change and Air Pollution on Soil Moisture: The Case of Türkiye**  
*İklim Değişikliği ve Hava Kirliliğinin Toprak Nemi Üzerindeki Etkileri: Türkiye Örneği* 135  
Nehir Uyar
- Bir Uçağa Çarpan Yıldırımın Yolunun, Manyetik Alanının ve Endüklediği Gerilimin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi**  
*Investigation of the Path, Magnetic Field and Induced Voltage of a Lightning Strike on an Aircraft Using the Finite Element Method* 153  
Orçun Sayaner, Özcan Kalenderli

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Demiryolu Projeleri Yarmalarında Şev Stabilitesi Değerlendirmeleri: Örnek Bir Uygulama

## *Slope Stability Assessments in Railway Projects Cuts: A Case Study*

Buğrahan Açıkgöz\*, Nihat Sinan Işık

Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

Geliş / Received: 11.06.2024

Kabul / Accepted: 28.06.2024

\*Sorumlu Yazar: Buğrahan Açıkgöz [bugrahn42@gmail.com](mailto:bugrahn42@gmail.com)

**ÖZ:** Demiryolu projelerinde güzergâhın tabi zemin kotundan farklı seviyede ilerlemesi yarma ve dolgu ihtiyacını doğurur. Her iki durumda da oluşturulan şevlerin stabilitesinin sağlanması çok önemlidir. Şev stabilitesini sağlamak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arazinin karakteristik özellikleri, teknik uygunluk ve maliyet gibi yönlerden farklılık göstermektedir. Bu çalışma kapsamında Ankara, Afyonkarahisar, Uşak, Manisa ve İzmir gibi deprem tehlikesi yüksek bölgelerden geçen Ankara-İzmir Yüksek Hızlı Tren projesi güzergâhında bulunan bir yarma kesiti ele alınmıştır. Bölgeye ait olan eğimli arazinin analizi için statik yükler altında, limit denge yöntemlerinin çözümleri kullanılmış ve güvenlik katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra deprem durumunda yarma şevlerinde oluşması beklenen deformasyonlar Newmark yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Analizlerde limit denge yöntemleri ile çözüm yapan Slide programı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen yarma kesitinde şev açısının düşürülmesi ile yeterli güvenliğin sağlandığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Şev, Stabilité, Demiryolu, Yarma, Vaka Analizi.

**ABSTRACT:** In railway projects, the route progressing at a level different from the natural ground level creates the need for cutting and filling. In both cases, it is very important to ensure the stability of the created slopes. Various methods have been developed to ensure slope stability. These methods differ in terms of characteristics of the land, technical suitability and cost. Within the scope of this study, a cut section on the route of the Ankara-İzmir High Speed Train project, which passes through regions with high earthquake risk such as Ankara, Afyonkarahisar, Uşak, Manisa and İzmir, was discussed. For the analysis of the sloping land of the region, solutions of limit equilibrium methods were used under static loads and safety coefficients were calculated. Then, the deformations expected to occur in the cut slopes in the event of an earthquake were determined using the Newmark method. Slide program, which provides solutions with limit equilibrium methods, was used in the analysis. It was observed that sufficient safety was provided by reducing the slope angle in the cut section examined within the scope of the study.

**Keywords:** Slope, Stability, Railway, Cuts, Case Study.

## 1. GİRİŞ

İnsanlığın var olduğu ilk dönemlerden beri barınma, sığınma, yiyecek bulma ve tehlikelerden korunma gibi ihtiyaçlar bir yerin yaşam alanı olarak seçilmesinde etkili olmuştur. Günümüz dünyasında artan nüfus, gelişen teknoloji ve imkânlar ile barınma ve ulaşım ihtiyacı eski dönemlerdeki gibi sadece elverişli ortamlarda değil

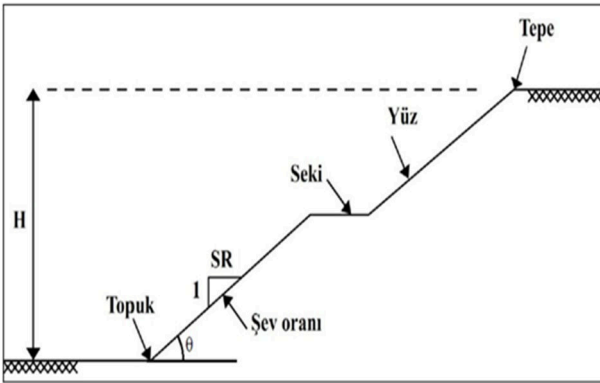
müdahaleye ihtiyaç duyulan elverişsiz ortamlarda da kendine yer bulmuştur. Bu çerçevede çeşitli nedenlerle doğada doğal olarak bulunan ve sonradan insan eli ile yapılan yarma ve dolgular beraberinde çözülmesi gereken mühendislik sorunları ortaya çıkarmıştır. Şev stabilitesi bu sorunların başında gelmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ve laboratuvar imkânlarının artması ile zemin parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelere uygun mühendislik yaklaşımlarının

geliştirilmesiyle bu problemin çözümü daha kolay hale gelmiştir.

## 2. ŞEV VE ŞEV STABİLİTESİ

Doğada kendiliğinden oluşmuş veya doğal zeminin farklı amaçlar için eğimli bir şekle getirilmesiyle meydana gelmiş bölgelere şev adı verilir. Şev tanımlaması aynı zamanda eğimli yüzey olarak da kullanılmaktadır. Şev açısı şevin yüzeyle yaptığı açıyı, şev eğimi ise bu açının tanjantını ifade etmektedir [1].

Şevler tanımlanırken çeşitli terimler kullanılmaktadır. Şevin düz tabii zemini kestiği noktalara şev tepesi ve şev topuğu; şevin tepesi ile topuğu arasındaki yükselti farkına şev yüksekliği; şev tepesi ve topuğu arasındaki yüzeye şev yüzeyi; şev yüzeyi üzerinde oluşturulan düzlük kısımlara palye (seki) ve şevin dikliğine şev oranı adı verilmektedir. Şekil 1'de şevlere ait terminoloji şekil üzerinde gösterilmiştir [2].



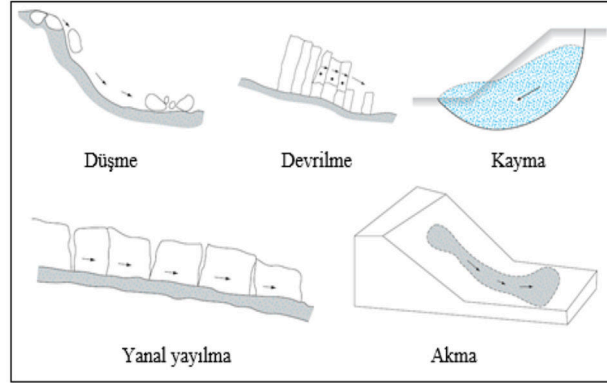
Şekil 1: Şev tanımlamasında kullanılan terminoloji [3].

Şevler, kimi zaman doğal sebeplerden kimi zaman da dışarıdan etkilerle stabilitesini kaybederek hareket edebilmektedir. Bu hareket türleri harekete geçen çeşitli malzeme ve zemin cinsi, kayma mukavemeti parametreleri, zemindeki su içeriği, kayan kütlelerin boyutu ve hızı gibi çeşitli parametreler çerçevesinde sınıflandırılmıştır [4]. 1996 yılında Cruden ve Varnes tarafından yapılan bir çalışmadan bu kayma hareketleri 5 ana kategoriye ayrılmıştır [5]:

- Düşme: Zemin veya kaya parçalarının şev yüzeyinden aşağı düşmesi suretiyle meydana gelen göçmedir.
- Devrilme: Şev üzerinde bulunan bir kütlelerin belirli bir eksen doğrultusunda ileri yönlü yer değiştirmesidir.

- Yana Yayılma: Özellikle sismik etkiler altında meydana gelen sıvılaşmaya bağlı olarak şevlerin yatay yönde yer değiştirmesidir.
- Akma: Zemin kütlelerinin viskoz sıvı gibi aşağı yönde hareketidir.
- Kayma: Bir kayma düzlemi üzerinde zemin kütlelerinin aşağı yönde hareketidir.

Şekil 2'de bu kayma hareketlerinin şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 2: Şevlerde göçme tipleri [4].

Şevlerin stabilitesini etkileyen ve duraysızlığa sebep olan birçok etken bulunmaktadır. Doğada suni veya doğal olarak hâlihazırda bulunan veya inşa edilmesi planlanan şevleri istikrarlı hale getirmek için çeşitli uygulamalar yapılmaktadır. Bu uygulamalar şevlerin zemin dayanımını artırmak amacıyla yapısal olmayan veya yapısal yöntemler yardımıyla gerçekleştirilir. Şevler üzerinde bulunan yükleri azaltmak, şevlerin payandalanması, şev drenajı, bitkilendirme ve yapısal iyileştirme ile şevlerin stabiliteyi artırılmaya çalışılır [1].

Şevlerin yüksekliği ve eğim açısı gibi fiziksel durumları, şevin taşıdığı yükün büyüklüğü ve konumu, zemin birimlerinin özellikleri ve davranışları ile şevin kaymasını önleyici yapıların durumu şevlerin bütünsel stabilitesi üzerinde etkilidir [6].

### 2.1 Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri

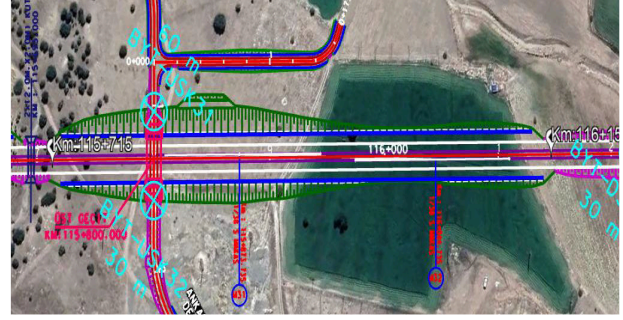
Günümüzde yaşam alanlarının genişlemesi ile birlikte doğal ortamda bulunan şevlerde veya insan eliyle yapılmış şevlerde karşılaşılan stabilite problemleri ile baş etme ihtiyacı artmıştır. Geoteknik mühendisliğinde önemli bir yer eden şev stabilitesi zemin ve kaya mekaniğini iyi anlamak ve bu alandaki gelişmeleri yakından takip etme gereksinimi doğurmaktadır. Şev stabilitesi analizlerinin doğru sonuçlar vermesi için

modellerin doğru oluşturulması önem arz etmektedir. Yer altı koşulları, zeminin karakteristiği ve yapı üzerine gelecek yükler doğru şekilde seçilip modele tanımlanmalıdır. Bunun yanında analiz sonuçlarını doğru değerlendirmek ve uygulanabilirliğini artırmak adına kabul edilebilir güvenlik sayısı ve risk faktörlerini optimum belirlemek önemlidir. Mevcut şevlerin stabilitesi değerlendirilirken de çevre koşullarının ve zemin parametrelerinin mümkün en güncel durumunun belirlenmesi ve bu doğrultuda analizlerin gerçekleştirilmesi azami öneme sahiptir. Şev stabilitesi analizlerinin temel amaçlarının başında farklı doğal koşullarda ve yükleme şartlarında bulunan şevlerin analiz edilmesi, statik ve dinamik yüklerin şevlerdeki etkilerinin saptanması, şevlere ait parametrelerin belirlenmesi ve bu parametre değişikliklerinin şev üzerindeki etkilerinin belirlenmesi, şevlere ait kayma mekanizmalarının araştırılması ve şevlerin iyileştirilmesine dair yöntemlerin geliştirilmesi sayılabilir [5].

Hem gelişen teknolojinin yardımı hem de yeni projeler kapsamında tasarımı gerçekleşen yarma ve dolgu sayılarının artması şev stabilitesi problemlerini çözmek için analitik yöntemler geliştirilmesi ihtiyacı doğurmuştur [7]. Doğal olarak veya suni olarak oluşturulmuş şevlerin analiz yöntemlerinde her ne kadar bazı farklar olsa da temelde şev stabilitesi analizleri şevin kritik kayma yüzeyinde bulunan kayma kütesinin analiz edilmesi olarak tanımlanabilir [8]. Genel çerçevede şev stabilitesi analiz yöntemleri şevin durağan durumunu analiz etmek için kullanılan limit denge analiz yöntemleri ve şevin dinamik yükler altındaki durumunu analiz etmek için kullanılan dinamik analiz yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır [1]. Bununla beraber bir başka ayırım ise şevlerde hesaplanan güvenlik sayılarının kesin olduğunu varsayan limit denge analizleri ve sonlu elemanlar analizleri gibi deterministik yaklaşımlar ile hem zemin özelliklerinin belirsizliği hem de hesaplamalarda karşılaşılabilecek belirsizliklerin güvenlik sayılarına olasılık teorileri çerçevesinde incelendiği Monte Carlo Simülasyonu ve Taylor Serisi Yöntemi gibi olasılıksal yaklaşımlar olarak ayırım yapılmaktadır [9].

### 3. VAKA ANALİZİ

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı bünyesinde yapımı devam eden yüksek hızlı tren projelerinden Ankara-İzmir Yüksek Hızlı Tren Projesi güzergâhu Bayat bölgesi Km:115+715-116+150 arasında bulunan yaklaşık 450 metre uzunluğunda bir yarma kesiti şev stabilitesi açısından incelenmiştir. Şekil 3'de yarma kesitine ait plan gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3: Yarma kesiti plan gösterimi.

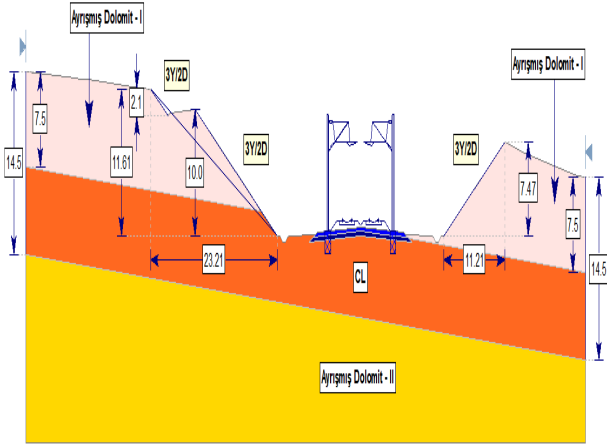
Proje inceleme alanını özetle kuvars şist, mikaşist ve kuvarsit araldanmasından oluşan İhsaniye formasyonu olarak adlandırılan birimlerden, başlıca metaçakıtaşı, şist ve rekritalize kireçtaşı araldanmasından oluşan ve adını Konya-İlgın güneyinde yer alan Eldeş köyünden alan birimlerden, başlıca alacalı renkli şistler, metakumtaşı, metasilttaşı ve metaçakıtaşı birimlerinden oluşan Kıyır formasyonundan, başlıca kristalize kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve metasilttaşlarından oluşan ve Gökçeyayla formasyonu olarak adlandırılan birimlerden, başlıca kirli sarı renkli kireçtaşı, kristalize kireçtaşı, şist, metasilttaşı araldanmasından oluşan Paşadağ üyesi biriminden, başlıca dolomit, kireçtaşı ve kristalize kireçtaşlarından oluşan Karacaçal Tepe üyesi birimlerinden ve akarsu çökelleri şeklinde gözlemlenen pekleşmemiş çakıl, kum ve siltlerden oluşan Alüvyon birimlerinden oluşmaktadır.

Afyonkarahisar ve çevresini kaplayan bölge Ege Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi'nin arasında yer almaktadır. Bu bölgede Ege Bölgesi'nin genişleyen tektoniğinin etkisinde farklı zamanlarda ve büyüklüklerde depremler görülmüştür. Afyon ve çevresine ait fay zonlarının ve aktif fay hatlarının gösterildiği bölgeye ait sismotektonik harita Şekil 3'de verilmiştir.

Afyonkarahisar ve çevresini kapsayan bölge Ege Bölgesi ve İç Anadolu Bölgesi'nin arasında yer almaktadır. Bu bölgede Ege Bölgesi'nin genişleyen



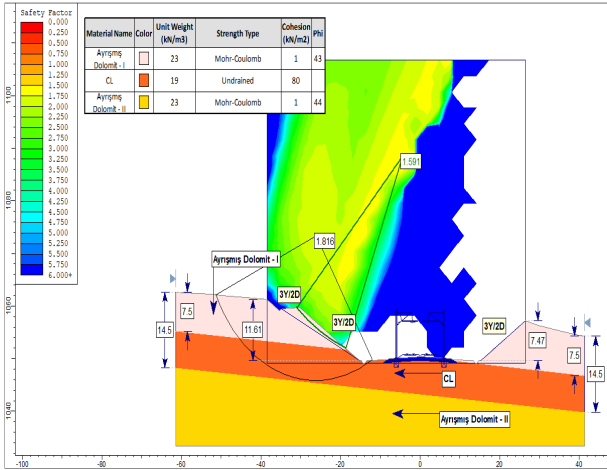




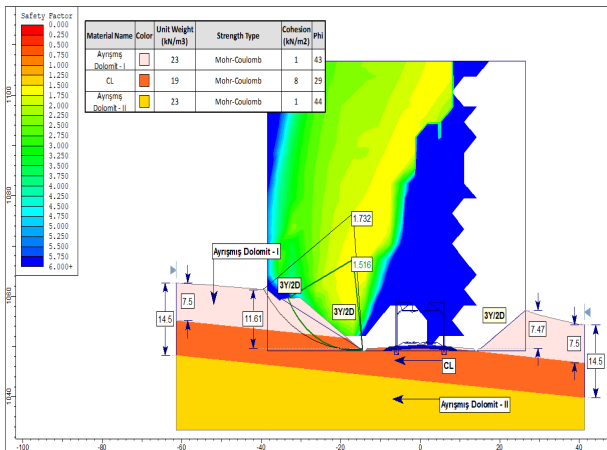
Şekil 5: 3Y/2D Yarma şevi analiz modeli.

Statik yüklerin yanında şevlere etki eden dinamik yüklerin sonucunda meydana gelecek etkiler ve şevlerin stabilitesi yarı-statik analiz yöntemi kullanılarak hesaplanır.

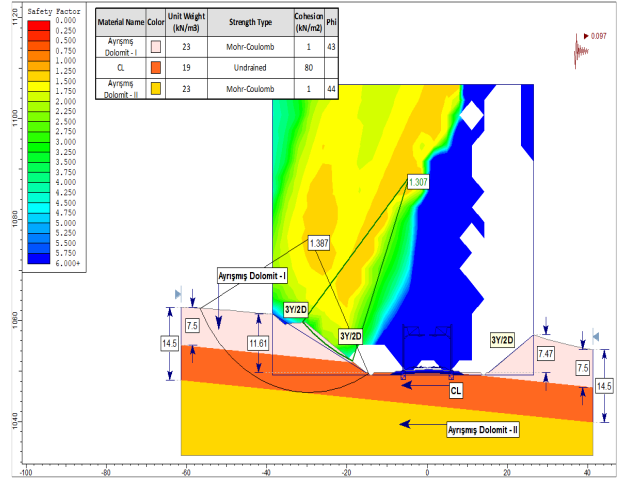
Şekil 6-11 arasında 3Y/2D şev eğimi için yapılmış analiz çıktıları uzun dönem/kısa dönem ve statik/sismik olarak verilmiştir.



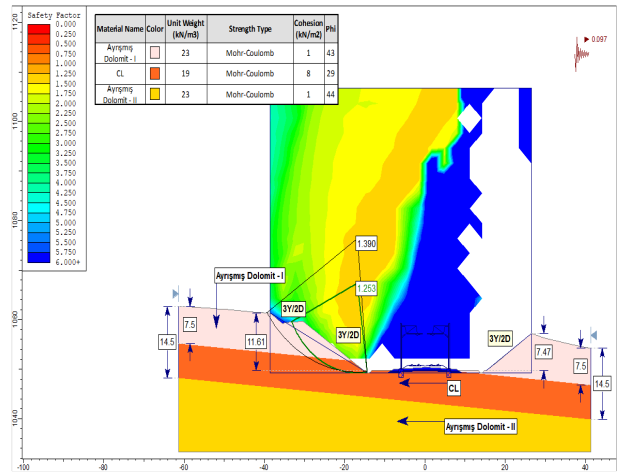
Şekil 6: Sol şev kısa dönem statik analiz sonucu.



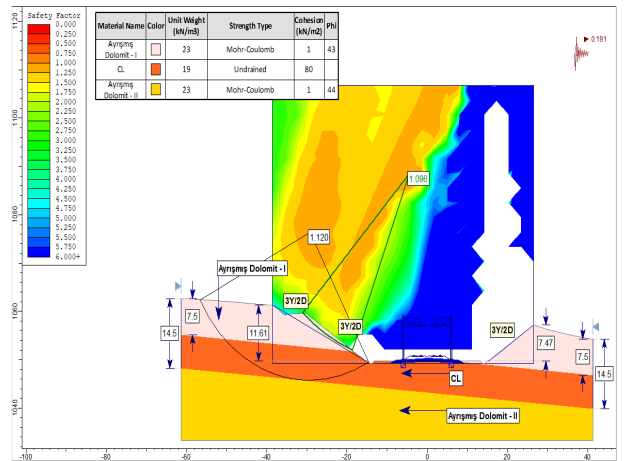
Şekil 7: Sol şev uzun dönem statik analiz sonucu.



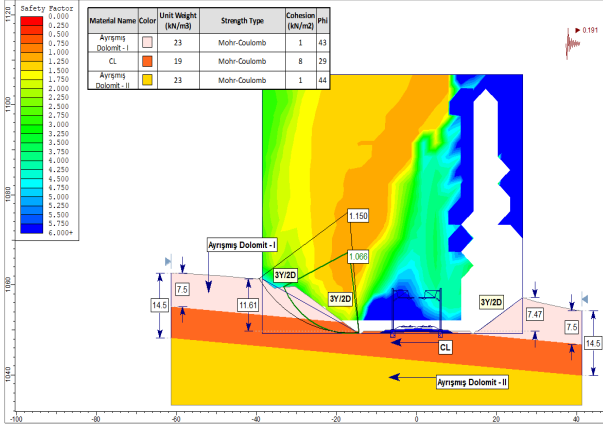
Şekil 8: Sol şev kısa dönem dinamik (DD-2) analiz sonucu.



Şekil 9: Sol şev uzun dönem dinamik (DD-2) analiz sonucu.



Şekil 10: Sol şev kısa dönem dinamik (DD-1) analiz sonucu.



Şekil 11: Sol şev uzun dönem dinamik (DD-1) analiz sonucu.

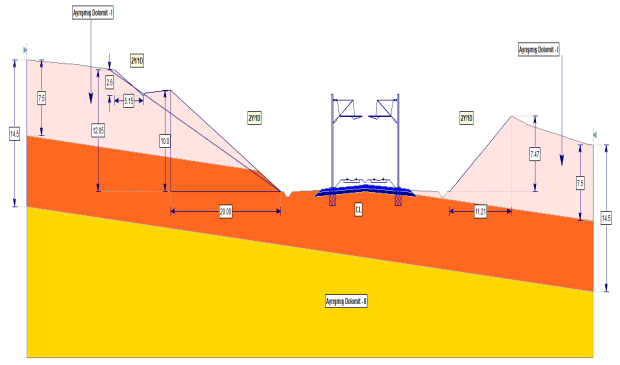
Şekil 6 ve 7’den görülen yarma kesiti sol şev statik kısa dönem ve uzun dönem analizi güvenlik sayısı ( $1,591 > 1,300$  ve  $1,516 > 1,500$ ) ve DD-2 deprem yer hareket düzeyindeki güvenlik sayısı ( $1,307 > 1,100$  ve  $1,253 > 1,100$ ) yeterli olmakla beraber aynı kesit için DD-1 deprem yer hareket düzeyindeki güvenlik sayısı ( $1,096 < 1,100$  ve  $1,066 < 1,100$ ) yeterli değildir. Analizlerin sonuçları Tablo 4’de detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 4: Analizlerin sonuçları.

Şev	Kısa Dönem 3Y/2D		Uzun Dönem 3Y/2D	
	Statik Durum	Dinamik Durum	Statik Durum	Dinamik Durum
Yarma Kesiti	$1,591 > 1,30$	DD-2	$1,516 > 1,50$	DD-2
Sol Şev (3Y/2D)		$1,307 > 1,10$		$1,253 > 1,10$
		DD-1		DD-1
		$1,096 < 1,10$		$1,066 < 1,10$

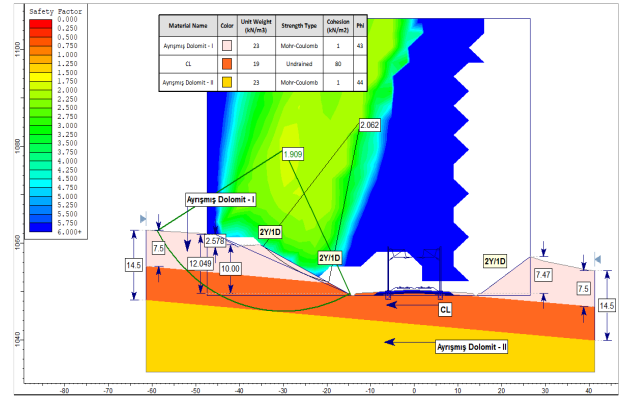
Tablo 4’de görüldüğü üzere “Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Tünelleri ile Diğer Zemin Yapılarının Tasarımı İçin Esaslar (2020)” yönetmeliği esas alınarak 3Y/2D şev eğimi ile yapılan analizler yeterli güvenlik sayısını sağlamadığı için şev eğimi 2Y/1D olarak değiştirilerek analizler tekrarlanmıştır.

Şekil 12’de çalışma kapsamında incelenecek 2Y/1D eğimli yarma kesitinin Slide programında hazırlanan modeli verilmiştir.

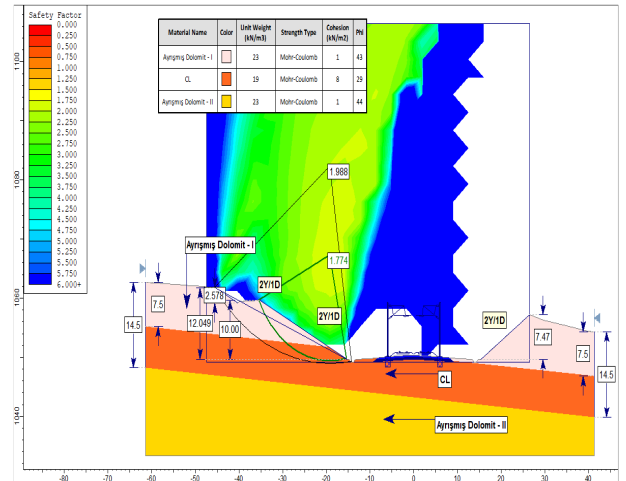


Şekil 12: 2Y/1D yarma şevi analiz modeli.

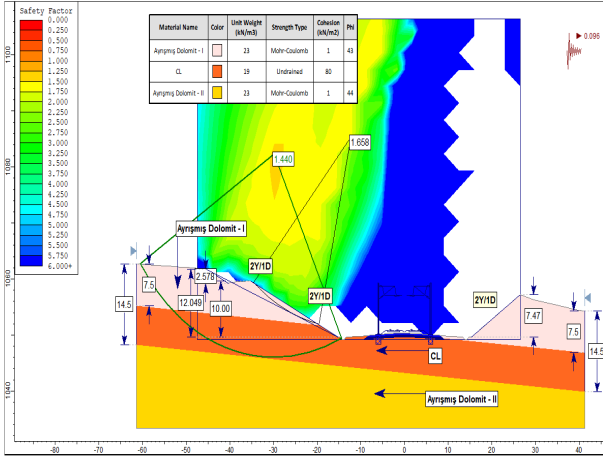
Şekil 13-18 arasında 2Y/1D şev eğimi için yapılmış analiz çıktıları uzun dönem/kısa dönem ve statik/sismik olarak verilmiştir.



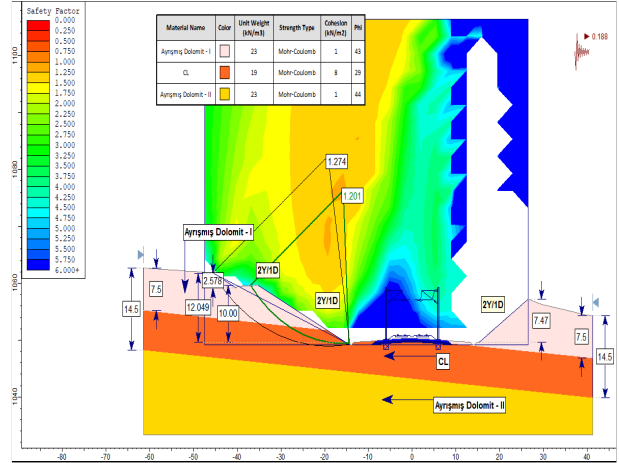
Şekil 13: Sol şev kısa dönem statik analiz sonuç.



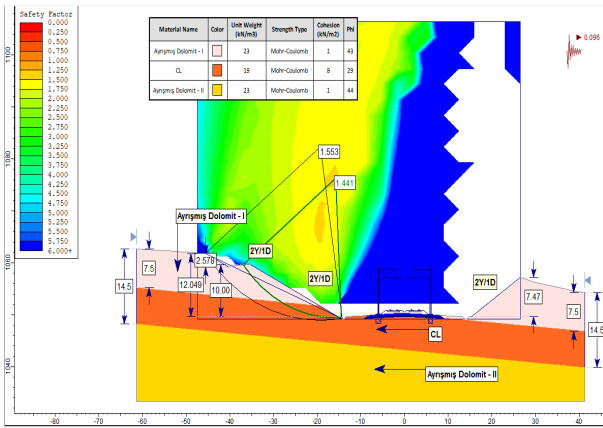
Şekil 14: Sol şev uzun dönem statik analiz sonucu.



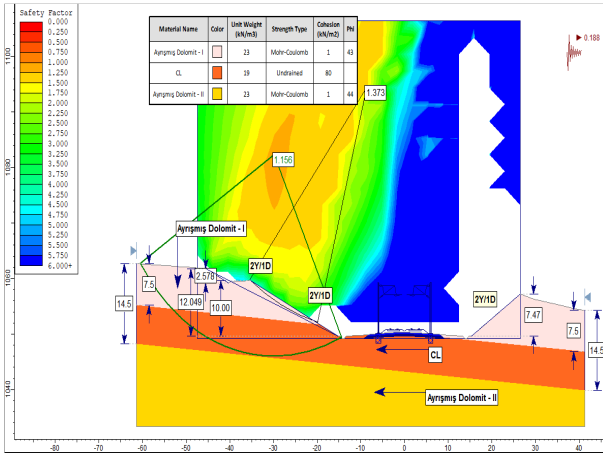
Şekil 15: Sol şev kısa dönem dinamik (DD-2) analiz sonucu.



Şekil 18: Sol şev uzun dönem dinamik (DD-1) analiz sonucu.



Şekil 16: Sol şev uzun dönem dinamik (DD-2) analiz sonucu.



Şekil 17: Sol şev kısa dönem dinamik (DD-1) analiz sonucu.

Elde edilen analiz sonuçları “Deprem Etkisi Altında Karayolu ve Demiryolu Tünelleri ile Diğer Zemin Yapılarının Tasarımı için Esaslar (2020) yönetmeliğine tanımlanan güvenlik sayılarını sağladığı için çalışma kapsamında incelenen yarma kesiti 2Y/1D olarak dizayn edilmiştir. Tablo 5’de analiz sonuçları toplu şekilde verilmiştir.

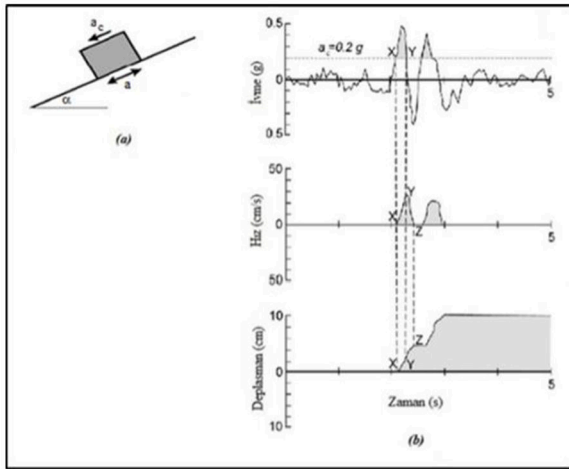
Tablo 5: Analiz sonuçları.

Şev	Kısa Dönem 2Y/1D		Uzun Dönem 2Y/1D	
	Statik Durum	Dinamik Durum	Statik Durum	Dinamik Durum
Yarma Kesiti	1,909>1,30	DD-2	1,774>1,50	DD-2
Sol Şev (2Y/1D)		1,440>1,10		1,441>1,10
		DD-1		DD-1
		1,156>1,10		1,201>1,10

Yarı-statik analiz yönteminde belirli bir güvenlik katsayısı kullanılmakla birlikte bu yöntem şevlerde oluşacak kalıcı deplasmanlar ile bilgi vermemektedir. Zemin deplasmanları hem üstyapı hem de altyapı için çok önemli olduğu için deplasman miktarının belirlenmesi çok önemlidir [12]. Newmark ise dinamik yükler etkisinde kalan şevlerin kalıcı deplasmanları ile alakalı fikir verebilecek bir model geliştirmiştir [13]. Bu yöntem şev deplasmanlarını analiz etmekte en sık kullanılan yöntemlerden biridir.

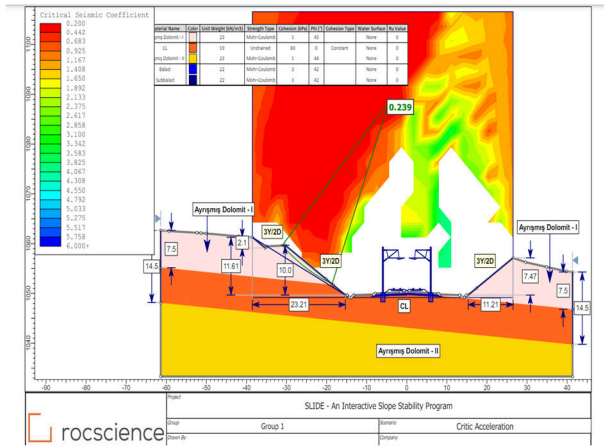
Bu metoda göre analiz edilen zeminin blok halinde kayan bir yapıda olduğu varsayılır ve bu bloğu kayma durumuna geçirecek bir kritik ivme ( $a_c$ ) değeri olduğu kabul edilir. Kritik ivme değeri deprem ivme kaydı ile karşılaştırıldığında kritik ivme değerinin üstünde kalan ivme değerlerine maruz kalması durumunda şevde kayma olacağı, kritik ivme değerinin altında kalan kısımdaki ivme

değerlerinde ise kayma olmayacağı kabul edilmiştir. Bu yaklaşıma ait model Şekil 19'da verilmiştir.



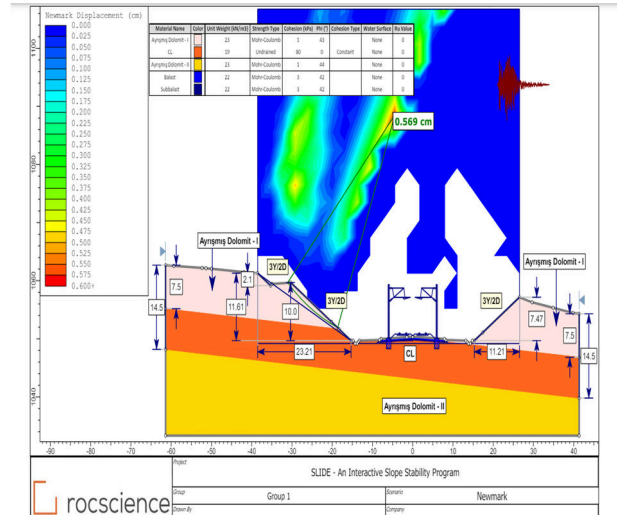
Şekil 19: Newmark kayan blok modeli ve Newmark analiz yaklaşımı [11].

Çalışma kapsamında incelenen yarma şevi Newmark metoduna göre analiz edilmiş olup analiz çıktıları depremsiz durum, depremlı durum, kritik ivme durumu ve deplasmanların elde edilmesi olarak Şekil 20-21 arasında gösterilmiştir.



Şekil 20: Newmark yöntemi kritik ivme analizi.

Rathje ve Antonakos (2011),  $T_s/T_m \geq 0,1$  koşulu için esnek kütle davranışının değerlendirilmesinin uygun olacağını ifade etmişlerdir [14]. Ayrıştırılmış analiz esasına dayalı olarak kütle kalıcı yer değiştirme tahmini için  $K_y$ : 0,239 değeri referansında elde edilen esnek kütle deplasman değeri 0,8 cm'dir. Elde edilen deplasman değerleri oldukça düşük olduğu için önerilen şev açıları depremlı durum için de uygundur.



Şekil 21: Newmark yöntemi kütle deplasman analizi.

#### 4. SONUÇLARIN ANALİZİ

Çalışma kapsamında Ankara-İzmir Yüksek Hızlı Tren Projesi güzergâhında bulunan BYT-09 yarması incelenmiştir. Söz konusu yarma kesitinde açılmış 2 sondaj verisi kullanılarak idealize zemin profili çıkarılmış ve Slide 2D programında model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde zemin birimleri için Mohr-Coulomb yenilme kriteri kullanılırken limit denge analiz yöntemlerinden Morgenstern-Price metodu tercih edilmiştir. Yapılan stabilite analizlerinde statik ve depremlı durum için güvenlik katsayıları sırası ile 1,5 ve 1,1 olarak belirlenmiştir.

İlk olarak bahse konu yarma kesiti 3Y/2D olmak üzere dizayn edilmiş ve yapılan denge analizleri sonucunda DD-1 deprem düzeyinde gerekli güvenlik sayısını sağlamadığı görülmüştür. Kısa dönem ve uzun dönem parametreleri kullanılarak yapılan analizlerde elde edilen 1,096 ve 1,066 değerleri DD-1 deprem hesaplarında limit değer olan 1,1 güvenlik sayısını sağlamamaktadır. Şev stabilite problemlerinde duraysızlığın önüne geçmek için şev açısını değiştirmek, şevi çeşitli yöntemlerle desteklemek gibi alternatifler vardır. Çalışma kapsamında incelenen yarma kesitinde şev açısı değiştirilerek 2Y/1D şevler oluşturulmuş ve tekrarlanan analizler sonucunda kısa dönem ve uzun dönem parametreleri kullanılarak yapılan analizlerde 1,156 ve 1,201 güvenlik sayıları ile yeterli güvenlik sayılarının sağlandığı görülmüştür. Şevlere gelen statik ve dinamik etkiler sonucunda güvenlik katsayısının elde edilmesinin yanında şevlerde kalıcı deformasyonların gözlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Newmark yönteminde dinamik yükler altında şevlerin maruz

kalacağı kalıcı deplasmanlar hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Bahse konu yarma kesiti Newmark modelinde incelendiğinde güvenlik katsayılarının istenilen limitler içerisinde kaldığı ve kütle deplasman analizi sonucunda elde edilen değerlerin sınır değerinin içinde kaldığı görülmüştür. Yapılan çalışma şev açısının azaltmanın güvenlik katsayısına olumlu etkisini göstermiş olup çalışma kapsamında incelenen vaka diğer şev güçlendirme yöntemleri denenerek analiz edilip sonuçlar incelenebilir ve bulunan çözümler maliyet açısından karşılaştırılarak ekonomik çözüm aranabilir.

**Yazar Katkısı:** Buğrahan AÇIKGÖZ çalışmada literatür taraması, modellerin oluşturulması, analizlerin yapılması, yazım ve düzenleme noktasında; Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK çalışmada analiz sonuçlarının yorumlanması noktasında katkı sağlamıştır.

**Teşekkür:** Yazarlar Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'ne çalışmaya olan destekleri için teşekkür ederler.

**Çıkar Çatışması:** Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] A. Polat, "Şev Stabilitesinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulaması ve Karşılaştırmalı Analiz," Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik, 2019.
- [2] O. Natur, "Şev Stabilitesi Analiz Yöntemleri ve Bir Vaka Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2018.
- [3] D. P. Coduto, M. Mollamahmutoğlu, K. Kayabalı, "Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar", Gazi Kitabevi, 2006.
- [4] B. M. Das, "Principle of Geotechnical Engineering," Cengage Learning, Stamford, 2010.
- [5] B. Ün, "Şev Stabilitesi ve Şev Hareketlerine Karşı Alınacak Önlemler," Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2019.
- [6] B. Ün ve A. Yıldız, "Şev stabilitesi ve şev hareketlerine karşı alınacak önlemler,"

Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:38-1, ss.84-93, 2019.

- [7] C. Z. Büyükkağınacı, "Şev Stabilitesi Analizlerinde Kullanılan Farklı Tasarım Standartlarının Kıyaslanması," Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019.
- [8] E. Öz, "Şev Stabilitesi ve Mühendislik Uygulamaları," Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2007.
- [9] A. Rezaei, "Büyükçekmece Gölü Yakınında Gelişen Kütleli Bir Kayma Hareketinin Analizi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [10] A. Yıldız, İ. Dumlupınar, M. Bağcı, Y. Ulutürk, C. Başaran ve E. Erdoğan, "Afyonkarahisar ve çevresinin depremselliği," Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, c. 12, sy. 2, s. 1, 2012.
- [11] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 18 Mart 2018.
- [12] A. Yiğit, "Newmark yöntemine göre zemin deplasmanının tahmin edilmesi", Politeknik Dergisi, c. 24, sy. 3, ss. 943-952, 2021.
- [13] M. Newmark, "Effects of earthquakes on dams and embankments," *Geotechnique*, vol. 15, no. 2, pp. 139-160, Jun. 1965.
- [14] E. M. Rathje and G. Antonakos, "A unified model for predicting earthquake-induced sliding displacements of rigid and flexible slopes," *Eng. Geol.*, vol. 122, no. 1-2, pp. 51-60, 2011.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

## Çalışma Ortamlarında Tehlike Analizi: Türkiye ve Avrupa'da İş Kazalarına Yol Açan Unsurların Karşılaştırılması

### *Hazard Analysis in Working Environments: Comparison of Factors Causing Work Accidents in Turkey and Europe*

Dicle Aydemir, Berkay Ay, Efe İlerler, Uğur Çavdar\*

İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 35580, İzmir, Türkiye.

Geliş / Received: 03.04.2024

Kabul / Accepted: 27.07.2024

\*Sorumlu Yazar: Uğur Çavdar [ugur.cavdar@idu.edu.tr](mailto:ugur.cavdar@idu.edu.tr)

**ÖZ:** İş kazaları, sanayileşme sürecinin bir sonucu olarak ortaya çıkan ve hem Türkiye'de hem de Avrupa ülkelerinde ciddi bir sorun teşkil eden bir olgudur. İş kazalarının yaygınlığı ve etkileri, hem maddi hem de manevi kayıpların yanı sıra işçilerin ve toplumun genel sağlığı açısından ciddi bir tehdit teşkil etmektedir. Bu sebeple, iş kazalarının nedenleri ve sonuçlarına ilişkin detaylı bir inceleme yapılması, hem olayların önlenmesi hem de mevcut durumun iyileştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. 2013 ile 2021 yılları arasında Türkiye ve Avrupa ülkelerinde meydana gelen iş kazalarının incelenmesi, çeşitli meslek gruplarındaki işçilerin maruz kaldığı riskleri ve iş kazalarının olası nedenlerini anlamak için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu dönemde meydana gelen iş kazalarının incelenmesi, hem kaza türlerinin hem de bu kazaların cinsiyete göre dağılımının analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Bu analizler, iş kazalarının genel eğilimleri ve belirli risk gruplarının tespit edilmesi açısından değerli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışmada 2013 – 2021 yılları arasındaki iş kazalarının yol açtığı yaralanma ve ölümlerin nedenleri araştırılmıştır. Bu yıllar arasındaki kazaların nedenleri ve olayların cinsiyete göre dağılımı Türkiye-Avrupa ülkeleri için araştırılmış; veriler ve tablolar yorumlanmıştır. İncelemeler sonucunda kazaya en çok sebebiyet veren olaylar tespit edilmiş, Türkiye – Avrupa kıyaslaması yapılmıştır. Bu çalışmayla birlikte iş kazalarının nedenlerinin açık bir şekilde ortaya konması, getirilen çözüm önerileri sayesinde bu kazaların olabildiğince azaltılması amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Türkiye'deki iş kazaları, Avrupa'daki iş kazaları, iş sağlığı ve güvenliği, iş kazası nedenleri, iş kazası tedbirleri

**ABSTRACT:** Work accidents are a phenomenon that emerges as a result of the industrialization process and constitutes a serious problem both in Turkey and in European countries. The prevalence and effects of occupational accidents pose a serious threat to the general health of workers and society, as well as material and moral losses. Therefore, a detailed examination of the causes and consequences of work accidents is of great importance in terms of both preventing the incidents and improving the current situation. Examining the work accidents that occurred in Turkey and European countries between 2013 and 2021 offers an important opportunity to understand the risks exposed to workers in various occupational groups and the possible causes of work accidents. Examining the work accidents that occurred during this period allows analyzing both the types of accidents and the distribution of these accidents by gender. These analyzes provide valuable information in terms of general trends in occupational accidents and identification of specific risk groups. In this study, the causes of injuries and deaths caused by work accidents between 2013 and 2021 were investigated. The causes of accidents between these years and the distribution of the incidents by gender were investigated for Turkey and European countries; data and tables were interpreted. As a result of the investigations, the events that most caused the accident were determined and a comparison between Turkey and Europe was made. The aim of this study is to clearly reveal the causes of work accidents and to reduce these accidents as much as possible thanks to the proposed solutions.

**Keywords:** Occupational accidents in Turkey, Occupational accidents in Europe, Occupational health and safety, Causes of occupational accidents, Occupational accident precautions

## 1. GİRİŞ

Üretim sektöründe dövmeden, kaynağa [1,2] birçok farklı alanda, demirden polimer kompozitlere [3] kadar farklı malzemelerle çalışmalar yapılmaktadır.

İş kazası ile ilgili birçok tanım bulunmaktadır. İş kazası kavramını anlayabilmek için iş ve kaza kavramları ayrı ayrı incelenmelidir. Genel olarak yararlı ve belirli bir amaca hizmet eden tüm faaliyetlere iş denir. İş; insanların belirli bilgi birikimleri, becerileri ve tecrübeleri ile gerçekleştirilir. İş belirli bir amaca hizmet eder.

Türk Dil Kurumunun (TDK) tanımına göre can ya da mal kaybına yol açan kötü olaylar kaza olarak adlandırılır. Bu tanımlara göre belirli bir amaca hizmet ederken meydana gelen can veya mal kaybına yol açan olaylara iş kazası denir.

İş kazalarının temelinde (4M) olarak isimlendirilen dört ana unsur yatmaktadır. Bunlar şu şekildedir:

- Man: insana bağlı olaylar
- Machine: makineye bağlı olaylar
- Media: çevreye bağlı olaylar
- Management: yönetime bağlı olaylar

### 1) Man (İnsan):

- Psikolojik Nedenler: Unutkanlık, sıkıntı-üzüntü-keder, çevre etkileri, istem dışı hareketler, ihmal, hatalı davranış vb.
- İş yeri Nedenleri: İnsan ilişkileri, takım çalışması, iletişim vb.
- Fiziksel Nedenler: Yorgunluk, uykusuzluk, alkol, hastalık vb.

### 2) Machine (Makine):

- Hatalı makina ve ekipman kullanımı, yerleşimi
- Eksik veya kusurlu koruyucular
- Yetersiz kontrol ve bakım
- Yetersiz mühendislik hizmetleri vb.

### 3) Media (Çevre):

- Yetersiz çalışma bilgisi
- Uygun olmayan çalışma metodu
- Uygun olmayan çalışma yeri-ortamı
- İş Güvenliği Kültürünün olmaması vb.

### 4) Management (Yönetim):

- Yetersiz yönetim organizasyonu
- Tamamlanmamış kurallar ve talimatlar

- Yetersiz güvenlik yönetim planı
- Eğitim ve öğretim eksikliği/yetersizliği
- Uygun olmayan nezaret, yönetim ve rehberlik
- Uygun olmayan personel istihdamı
- Yetersiz sağlık kontrolleri vb.

İş kazalarından kaynaklı yaralanma ve ölümler sadece çalışan ve ailelerinin zarar görmesine neden olmaz. Diğer bir taraftan bakıldığında dolaylı veya doğrudan işletme, toplum ve hatta devletin ekonomik maliyetlere maruz kalmasına neden olur. Bu durumun olumsuz etkilerinden bazıları şunlardır:

- Kalifiye personel kaybı
- İşe devamsızlık
- Çalışanların ruhsal baskıdan dolayı çalışma performanslarında düşüş meydana gelmesi
- Yüksek tıbbi maliyet
- Sigorta primleri
- Pahalıya mal olan erken emeklilik.

İş kazalarının maliyeti oldukça yüksek olması sebebiyle işletmeleri finansal açıdan doğrudan veya dolaylı olarak ciddi şekilde etkiler. Bunun sonuçlarında bazıları aşağıdaki gibidir:

- Üretimin azalması veya durması
- Diğer çalışanların motivasyonunu olumsuz etkileyen durumlar
- Tazminat ödemeleri ve sağlık giderleri
- Hasarlı makinelerin ve ekipmanların onarılması veya yeniden temin edilmesi
- İdari harcamalarda ve sigorta masraflarında artış, örneğin eğitimlerin yenilenmesi
- İşlerin yapılması gereken zamanda yapılmamasından kaynaklanan kayıplar
- İtibar kaybı.

İş kazaları işletmeyi etkilediği gibi aynı zamanda bu kazalara maruz kalan çalışanları ve aileleri ile birlikte sosyal çevreleri de etkiler. Bu durum, iş yerinde etkili bir iş sağlığı ve güvenliği politikasının oluşturulmasına yol açar. Bu politika oluşturulurken; iş sağlığı ve güvenliğinin her çalışanın temel hakkı olduğu ilkesi benimsenmeli, işletme ve toplum düzeyindeki ekonomik amaçlar ile bu ilke beraber düşünülmelidir.

İş kazaları çalışan, işletme ve ülke ekonomisi için önemli maddi sorundur. Sosyal güvenlik hizmeti



ile hastane ve rehabilitasyon merkezi giderleri gibi tüm topluma yüklenen maliyetlere sebep olur. İş kazaları tüm resme bakıldığında ulusal kalkınmaya engel bir etki olarak karşımıza çıkar. İş günü ve iş gücü kaybına, ülke kaynaklarının yok olmasına neden olur.

İş kazaları neticesinde kaybedilen iş günleri, ülkemizdeki katma değeri doğrudan azaltan faktörler arasında yer alır ve ulusal ekonomi için önemli bir kayıp oluşturur. İş kazalarını önlemeye yönelik çalışmalar bu kazaları tazmin etmekten çok daha az maliyetlidir. Bu nedenle iş kazalarının meydana gelmemesi için tedbir almaya yönelik çalışmalar ülkemiz açısından son derece önem arz etmektedir.

İş sağlığı, çalışanların iş hayatını fiziksel, ruhsal ve sosyal açıdan en iyi şekilde idame ettirmelerini ve çalışma anında kullanılan araç gereçlerden kaynaklanabilecek kazaları önlemeyi amaçlayan bilimdir. İş güvenliği, işin yapıldığı esnada çalışanların işin yürütülmesinden kaynaklanan kazaların önlenmesi için yapılan teknik çalışmalardır. İş sağlığı ve güvenliği konusu, Avrupa'da 1980'lerden itibaren önemli bir gündem maddesi olarak ele alınmaya başlanmıştır. Ülkemizde ise Avrupa Birliği uyum sürecinde (2012 yılında) 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği kanunu ile hayatımıza girmiştir [4-10].

İş sağlığı ve güvenliğinin başlıca amaçları şunlardır:

- Çalışanları fiziksel ve ruhsal açıdan korumak
- Üretim ve işletme güvenliğini sağlamak
- Maddi ve manevi zararları ortadan kaldırmak
- Ortaya çıkan sağlık zararlarını tespit etmek
- Gerekli tedavileri sağlamaktır [4-15].

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki nüfusun büyük çoğunluğu çalışan bireylerden oluşmaktadır. Gelişen teknoloji ve artan sanayileşme ile iş sağlığı ve güvenliği konusu hem dünyada hem de ülkemizde hızla yaygın hale gelmiştir [4,16-22].

İş kazalarının yanı sıra meslek hastalıkları da pek çok çalışanın yaralanmasına ve hatta hayatlarını yitirmelerine neden olmaktadır. Başta sanayileşen ülkeler olmak üzere bütün dünyada artış gösteren

iş kazalarını en aza indirmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [4,16-24].

İş kazalarına ilişkin verilere bakıldığında dünyada her yıl 2,3 milyon kişi iş kazası veya meslek hastalığı sonucu yaşamını yitirmektedir. Her yıl ortalama 317 milyon iş kazası yaşanmaktadır [21-27].

Farklı endüstrilerde faaliyet gösteren işletmelerde, işin doğası gereği sağlık ve güvenlik açısından çeşitli riskler bulunmaktadır. Bu risklerin neden olduğu kazaların sadece %2'si kaçınılamazken, %98'i tedbir alınabilir niteliktedir. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında yürütülen çalışmaların amacı da tedbir alınabilir nitelikteki kazaları engellemektir [7,8].

Gelişen veya gelişmekte olan ülkeler için önemli bir diğer husus ise iş verimliliğidir. Belirli bir sürede bir grup işçinin ürettiği mal ve hizmet miktarına iş verimliliği denir. Üretimde temel amaç iş verimliliği oranını olabildiğince yüksek tutmaktır. İş kazalarının en aza indirgenmesi, çalışma ortamının iş sağlığı ve güvenliği kuralları çerçevesinde yapılmasının iş verimliliğini arttırdığı yadsınamaz bir gerçektir [28-31].

Bu çalışmada ülkemizde ve Avrupa'da 2013-2021 yılları arasında meydana gelen iş kazalarının nedenleri ve iş kazalarının cinsiyetlere göre dağılımı incelenmiş, konu hakkında yorumlar yapılmış ve iş kazalarının engellenmesine yönelik tavsiyeler sunulmuştur.

## 2. GEREÇ VE YÖNTEMLER

### 2.1 Araştırmanın Amacı

Bu araştırma 2013-2021 yılları arasında Türkiye'de ve Avrupa'da meydana gelen iş kazalarına sebep olan olayları, olayların cinsiyete göre dağılımını incelemek ve iş kazalarına çözüm önerileri getirmek amacıyla yapılmıştır.

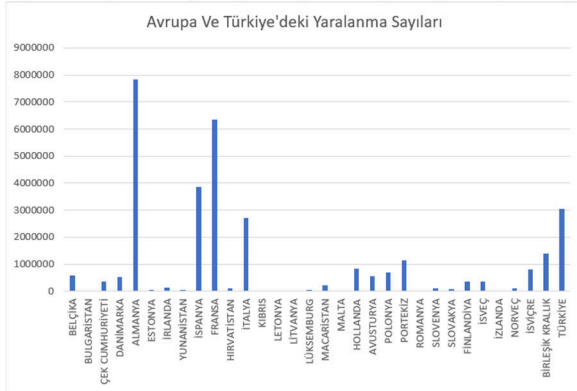
### 2.2 Veri Toplama ve İstatistiksel Açından Değerlendirme

Bu çalışmada öncelikle Sosyal Güvenlik Kurumunun (SGK) ve Avrupa İstatistik Ofisinin (EUROSTAT) 2013-2021 yılları arasındaki verileri incelenmiştir. 2013 yılından başlayacak şekilde alınmasının nedeni SGK'nun bu tarihten itibaren

daha sağlıklı veriler tutmuş olmasıdır. Toplanan veriler incelenmiş, iş kazalarına neden olan olaylar belirli başlıklar altında toplanmış, bu başlıkların tabloları ve grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan tablolar kendi aralarında karşılaştırılmış, iş kazasına en çok sebep olan olaylar ve sektörler belirlenmiştir. İnceleme ve saptama yapılırken olayların cinsiyete göre dağılımı da göz önünde bulundurulmuş ve her bir olay kendi içerisinde kadın-erkek başlıkları altında ayrıca incelenmiştir.

### 3. BULGULAR

2013-2021 yılları arasında Türkiye’de ve bazı Avrupa ülkelerinde meydana gelen yaralanma verileri cinsiyet ayrımı yapılmaksızın Şekil 1’de, Avrupa’da meydana gelen kadın-erkek yaralanma verileri Şekil 2’de, Avrupa’da iş kazalarının neden olduğu kadın-erkek ölüm verileri Şekil 3’de, Türkiye’de belirli başlıklar altında toplanan yaralanma ve ölüm verileri Şekil 4 ve Şekil 5’te , Türkiye’de erkek – kadın çalışan sayılarına göre yüzdece yaralanma ve ölüm oranları ise Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

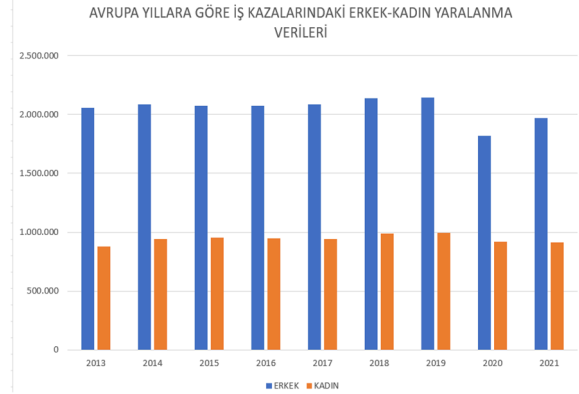


Şekil 1: Avrupa ve Türkiye’deki Yaralanma Sayıları (Eurostat, 2013-2021) [32, 33].

Şekil 1’de Eurostat’tan alınan 2013-2021 yaralanma verileri incelenmiş ve bu veriler grafiğe dönüştürülmüştür. Grafik incelendiğinde en çok yaralanmanın yaşandığı ilk dört ülkenin sırasıyla Almanya, Fransa, İspanya ve Türkiye olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni sanayileşmenin bu dört ülkede diğer ülkelere nazaran daha fazla olmasıyla açıklanabilir.

Tablo 1: Avrupa da yıllara göre iş kazalarındaki erkek – kadın yaralanma verileri.

Yıllar	Erkek Yaralanma	Kadın Yaralanma
2013	2.058.654	877.770
2014	2.088.754	942.660
2015	2.076.942	951.223
2016	2.076.331	950.225
2017	2.087.953	940.737
2018	2.137.935	986.107
2019	2.143.816	996.325
2020	1.818.426	916.474
2021	1.970.298	915.117



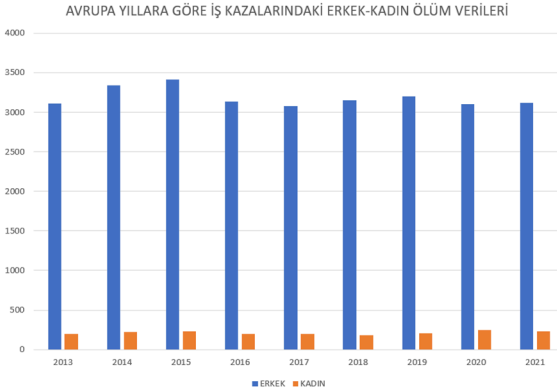
Şekil 2: Avrupa’da Yıllara göre iş kazalarındaki erkek-kadın yaralanma verileri (Eurostat, 2013-2021) [33].

Şekil 2’de 2013-2021 yılları arasında Avrupa’da meydana gelen iş kazalarından kaynaklanan yaralanmalar ve bu yaralanmaların cinsiyete göre dağılımı verilmiştir. Kadın ve erkek yaralanan sayıları kendi içlerinde değerlendirildiğinde her yıl aynı sayılarda olduğu sadece 2020 yılında her ikisi içinde bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Bunun nedeni 2020 yılında dünya genelinde yaşanan pandemi ve bunun getirileri olabilir. Ayrıca grafiğe bakıldığında yaralanan kadın sayısının her yıl için yaralanan erkek sayısından çok daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni risk faktörünün

yüksek olduğu sektörlerde kadın çalışan sayısının az olması olarak açıklanabilir.

**Tablo 2:** Avrupa da yıllara göre iş kazalarındaki erkek – kadın ölüm verileri.

Yıllar	Erkek Ölüm	Kadın Ölüm
2013	3112	196
2014	3340	219
2015	3410	229
2016	3134	197
2017	3075	194
2018	3153	178
2019	3198	207
2020	3104	251
2021	3115	231



**Şekil 3:** Avrupa’da Yıllara Göre İş Kazalarındaki Erkek-Kadın Ölüm Verileri (Eurostat, 2013-2021) [33].

Şekil 3’te 2013-2021 yılları arasında Avrupa’da meydana gelen iş kazalarından kaynaklanan ölümler ve ölümlerin cinsiyete göre dağılımı verilmiştir. Grafik incelendiğinde yıllar içerisinde ölüm sayılarında 2018 yılına kadar artış gözlenmektedir. Yaralanma grafiğinde olduğu gibi bu grafikte de iş kazasından etkilenen kadın işçi sayısı erkek işçi sayısından daha azdır.

**Tablo 3:** Türkiye 2013 – 2021 yılları arasındaki yaralanmaların nedenleri ve verileri.

Yaralanma Nedenleri	Erkek Yaralanma	Kadın Yaralanma
Elektrik akımına maruz kalma, yüksek ısı etkisi, ve tehlikeli maddelerle temas gibi durumlar	54.513	10.418
Boğulma, gömülme, sarılma	3016	601
Kazazede hareket halindeyken sabit bir nesneye düşey veya yatay darbe alması durumu	272.954	49.311
Hareket halindeki bir nesnenin çarpması	248.183	27179
Keskin uçlu, kaba veya sert bir malzeme ile temas	387.061	89.984
Kasılmak, ezilmek vb.	268.920	38.116
Fiziksel veya ruhsal baskının neden olduğu kazalar	36.984	5.850
Isırılma, tekme vb. (insan veya hayvan tarafından)	18.630	2.514
Bu sınıflandırmada yer almayan hareketler veya olaylar	1.139.290	266.475



**Şekil 4:** Türkiye’de Meydana Gelen İş Kazalarının Nedenleri ve Bu Sebeplerden Yaralanma Verileri (SGK, 2013-2021) [32].

Şekil 4’te SGK’dan alınan verilerle oluşturulan, Türkiye’de meydana gelen iş kazalarının nedenleri

ve bu nedenlerden kaynaklanan yaralanma sayılarını gösteren grafik verilmiştir.

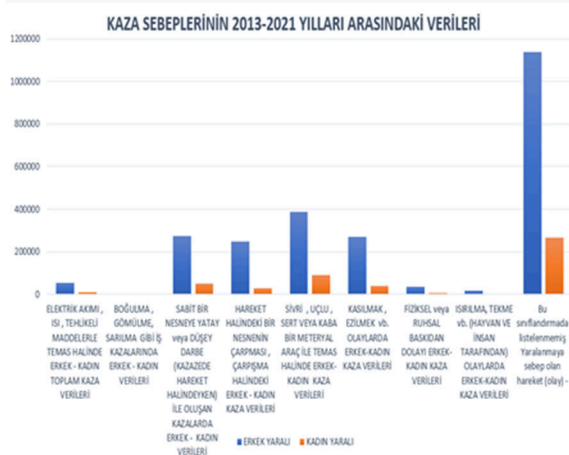
Öncelikle grafik incelendiğinde her başlık için yaralanan kadın işçi sayısının yaralanan erkek işçi sayısından daha az olduğu görülmektedir.

Kadın ve erkek işçilerde yaralanmaya en az sebebiyet veren olayın boğulma, gömülme, sarılma olduğu grafikte açıkça görülmektedir. Bu sayılar kadınlar için 601 iken erkekler için 3016'tür.

Yaralanmaya en çok sebebiyet veren olay ve yaralanma sayıları ise bu sınıflandırmada listelenmemiş yaralanmaya sebep olan hareket başlığı altında toplanmıştır. Bu nedenden yaralanan kadın işçi sayısı 266.475, erkek işçi sayısı ise 1.139.290'dur.

**Tablo 4:** Türkiye 2013 – 2021 yılları arasındaki erkek ve kadın çalışan sayılarını içeren veriler.

Yıllar	Erkek Çalışan	Kadın Çalışan
2013	9.297.209	3.186.904
2014	9.742.995	3.497.127
2015	10.133.702	3.865.696
2016	9.949.970	3.825.218
2017	10.389.595	4.088.222
2018	9.895.701	4.333.469
2019	9.875.479	4.438.834
2020	10.574.303	4.629.120
2021	11.046.133	5.123.546



**Şekil 5:** Türkiye’de meydana gelen iş kazalarının nedenleri ve bu sebeplerden ölüm verileri (SGK, 2013-2021) [32].

Şekil 5’de SGK’dan alınan verilerle oluşturulan, Türkiye’de meydana gelen iş kazalarının nedenleri ve bu nedenlerden kaynaklanan ölüm sayılarını gösteren grafik verilmiştir.

**Tablo 5:** Türkiye 2013 – 2021 yılları arasındaki ölüm nedenleri ve verileri.

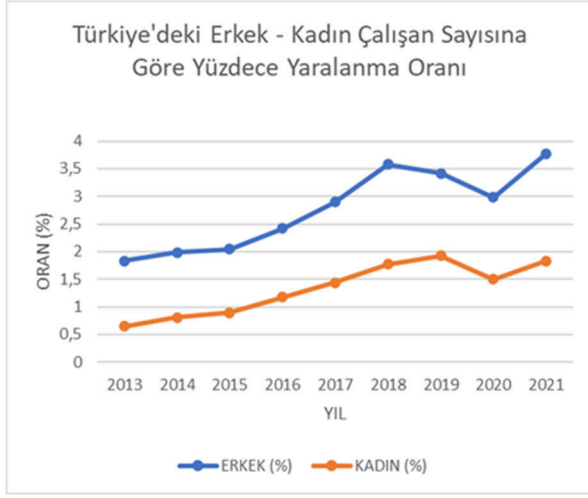
Ölüm Nedenleri	Erkek Ölüm	Kadın Ölüm
Elektrik akımına maruz kalma, yüksek ısı etkisi, ve tehlikeli maddelerle temas gibi durumlar	607	7
Boğulma, gömülme, sarılma	306	6
Kazazede hareket halindeyken sabit bir nesneye düşey veya yatay darbe alması durumu	1239	11
Hareket halindeyken bir nesnenin çarpması	1814	55
Keskin uçlu, kaba veya sert bir malzeme ile temas	198	11
Ezilmek, kasılmak vb.	855	11
Fiziksel veya ruhsal baskının neden olduğu kazalar	78	2
Tekme, ısırılma vb. (insan veya hayvan tarafından)	6	1
Bu sınıflandırmada yer almayan hareketler veya olaylar	5530	142

Grafik cinsiyet bazında incelendiğinde ölen kadın işçi sayısının ölen erkek işçi sayısından daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bu sektörlerde çalışan kadın işçi sayısının erkek işçi sayısından daha az olması, bu sektörlerde çalışan kadın işçilerin ise genellikle işin az riskli kısmında çalışıyor olmasıdır.

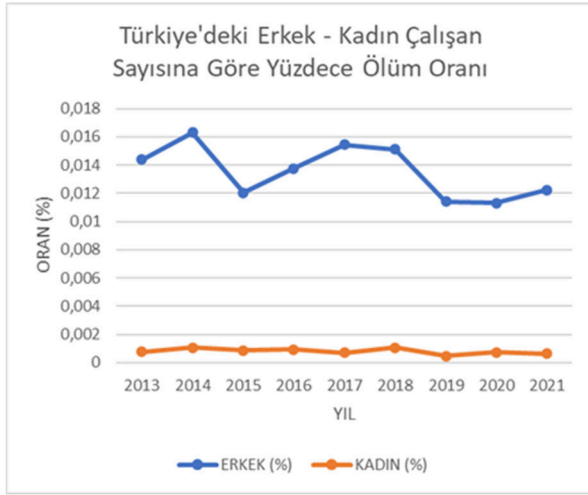
Başlıklar incelendiğinde en az ölümün ısırılma, tekme vb. nedenlerden kaynaklanan ölüm olduğu görülmektedir. Bu nedenden kaynaklanan kadın işçi ölüm sayısı 1 iken erkek işçi sayısı 6’dır.

Bu risklerin olduğu mesleklere veterinerlik ve hayvanat bahçesi görevlisini örnek verebiliriz. Diğerlerine oranla hem daha az çalışan sayısına sahip olması hem de ölüme sebebiyet verecek derecede olmaması bu nedenden kaynaklanan ölüm sayısının az olmasına yol açmıştır.

En çok ölüm ise bu sınıflandırılmada listelenmemiş ölüme sebep olan hareket başlığında olduğu görülmektedir. Kadınlar için bu nedenden ölüm sayısı 142 iken erkekler için 5530'tür.



Şekil 6: Türkiye'de erkek – kadın çalışan sayılarına göre yüzdece yaralanma oranları.



Şekil 7: Türkiye'de erkek – kadın çalışan sayılarına göre yüzdece ölüm oranları.

Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde her iki grafik içinde iş kazasından etkilenen kadın çalışan yüzdesinin erkek çalışan yüzdesinden düşük olduğu, kadın-erkek çalışan yaralanma yüzdesinin 2020 yılında düşüşe 2020 yılından sonra ise geçmiş dönemlerdeki gibi yükselişe geçtiği görülmektedir.

Yüzdece incelenen veriler sonucu kadın çalışanların erkek çalışanlara oranla daha dikkatli çalışması, kadınların erkeklere nazaran daha az riskli

departmanlarda çalışması gibi nedenler, yaralanan kadın yüzdesinin daha az olmasına neden olmuştur. Dünya genelinde yaşanan pandemi nedeniyle iş yerlerinin küçülmeye gitmesi veya kapanması nedeniyle var olan işçilerin işlerini korumak amacıyla daha dikkatli davranmış olması vb. nedenler ise 2020 yılında her iki cinsiyet için yaralanma oranında düşüşe neden olmuş olabilir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

İş kazalarının temelinde (4M) olarak isimlendirilen 4 ana unsur yer almaktadır. Bunlar insana bağlı (Man), makineye bağlı (Machine), çevreye bağlı (Media) ve yönetime bağlı (Management) faktörlerdir. İnsana bağlı iş kazalarının temelinde uykusuzluk, stres, takım arkadaşlarıyla oluşan iletişim sorunları yatmaktadır. Hatalı makine ve ekipman yerleşimi, yetersiz koruyucu ekipman, yetersiz kontrol ve bakım makineye bağlı kazaların nedenlerinden bazılarıdır.

Uygun olmayan çalışma yöntemleri ve yetersiz çalışma bilgisi, çevresel faktörlere bağlı iş kazalarını tetiklerken; eksik kurallar ve talimatlar, yetersiz denetim ve rehberlik, yetersiz sağlık kontrolleri ve uygun olmayan çalışan istihdamı ise yönetim kaynaklı iş kazalarına zemin hazırlayabilir.

Çeşitli kaynaklardan elde edilen veriler ve bu verilerden yararlanarak oluşturulan tablolar incelendiğinde;

- Ölen-yaralanan kadın işçi sayısının erkek işçi sayısından daha az olduğu
- Ölüm ve yaralanma nedenleri belirli başlıklar altında incelendiğinde en çok iş kazasının makineye bağlı iş kazaları olduğu
- Avrupa ve Türkiye verileri yıllar bazında incelendiğinde yaralanma ve ölüm sayılarının 2019 yılına kadar arttığı 2020 yılında ise belirli oranda düştüğü gözlemlenmiştir.

Çalışma ortamında daha rahat iletişim kurabilen çalışanların aynı takıma alınması, çalışanlara belirli dönemlerde fazladan izin verilmesi ve ailesiyle vakit geçirmesinin sağlanması, her iş yerinde iş yeri hekimi dışında bir psikoloğun olması veya 2-3 aylık

zaman dilimi içerisinde çalışanın bir psikologla görüşmesinin sağlanması iş kalitesini artırırken aynı zamanda insana bağlı iş kazalarını da ciddi oranda azaltacaktır.

Ekipmanların gereken zamanda kontrol edilmesi ve bakımlarının yapılması, çalışma ortamının iş sağlığı ve güvenliği kuralları çerçevesinde oluşturulması, kişisel koruyucu ekipmanların kullanılması konusunda çalışanların bilgilendirilmesi ve bu konuda taviz verilmemesi, çalışanın normal çalışma süresinden daha fazla çalıştırılmaması bunun yerine daha fazla çalışan alınarak vardiya sisteminin uygulaması ve işyerlerinin gereken zamanlarda denetlenip gereken değişikliklerin yapılması iş kazalarının önlenmesinde ciddi rol oynayacaktır. Bu önlemler iş kazalarının ve buna bağlı olarak gelişen yaralanma – ölüm sayılarının azalması için tavsiye edilir.

**Yazar Katkısı:** Tüm yazarlar, literatür taraması, model ve yöntemlerin hesaplamalarının yapılması, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] Y. Alemdağ, S. Karabıyık, “Çok yönlü sıcak dövmenin Al-7Si alaşımının mekanik özelliklerine etkisi”, *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, c. 1, sy. 1, ss. 20-28, 2022.
- [2] H. S. Çubuk, G. Kurt, U. Çavdar, “Investigation of the effects of different welding methods applied on aluminum 7075 material on the mechanical and microstructure structure properties of the joint zone”, *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, c. 1, sy. 2, ss. 120-128, 2022.
- [3] A. Öteleş, İ. Köprü, S. H. Yetgin, “Etilen propilen dien monomer (EPDM) ve stiren bütadien (SBR) kauçukların kükürt ve peroksit vulkanizasyon ile fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Türk Mühendislik*

*Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, c. 2, sy. 2, ss. 131-137, 2023.

- [4] M. Karabay, “Teknik bilirkişi gözü ile ülkemizdeki iş kazalarının değerlendirilmesi”, *MATİM*, c. 9, sy. 2, ss. 97-102, 2007.
- [5] M. Koç, N. Akbıyık, “Türkiye’de iş kazalarının maliyetleri ve çözüm önerileri”, *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, c. 2, sy. 2, ss. 129-175, 2011.
- [6] K. Horozoğlu, “İş kazalarının iş sağlığı ve güvenliği açısından analizi”, *JOISS*, c. 8, sy. 2, ss. 265-281, 2019.
- [7] Z. F. Olcay, “Mutfakta iş sağlığı ve güvenliği”, *ABMYO*, c. 14, sy. 53, ss. 21-34, 2019.
- [8] M. Bayram, “İş sağlığı ve güvenliği koordinasyon hizmetlerinin önleyici İSG faaliyetleri üzerinde etkisi: Sakarya üniversitesi örneği”, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, c. 33, sy. 2, ss. 595-612, 2019.
- [9] A. E. Arıtan, M. Ataman, “Kaza oranları hesaplamalarıyla iş kazası analizi”, *AKU-FEMÜBİD*, c. 17, sy. 1, ss. 239-246, 2017.
- [10] E. Kıpçak, A. Çalık, H. Mehri, “İş kazaları ve meslek hastalıklarının oluşumuna etki eden faktörler: ISO ve OHSAS uygulamalarının etkileri”, *PAÜSBED*, sy. 43, ss. 1-26, Mart 2021.
- [11] F. Yılmaz, O. Tan, “Bir inşaat şantiyesinde iş kazalarının neden olduğu iş-günü kayıplarının işverene maliyetinin belirlenmesi”, *UIİD*, sy. 14, ss. 143-156, 2015.
- [12] D. Eser, “Sendikaların iş sağlığı ve güvenliği konusundaki etkinliği”, *ÇASGEM*, c. 11, sy. 2, ss. 1-21, 2020.
- [13] H. Ceylan, “Türkiye’de meydana gelen ölümlü iş kazaları”, *İSG Akademik*, c. 3, sy. 1, ss. 1-13, 2021.
- [14] U. Çavdar, M. Manyaslı, E. Akkaya, D. Severer, Z. Tüfekçi, “Yaşanan iş kazalarının kaza saatlerine ve cinsiyete göre istatistiki olarak değerlendirilmesi ve yorumlanması”, *IJERAD*, c. 14, sy. 1, ss. 360-368, 2022.
- [15] S. Çetin, V. Beğik, “İş sağlığı ve güvenliği’nde sürdürülebilir kişisel koruyucu donanım politikalarının uygulanması”, *IJERAD*, c. 13, sy. 1, ss. 202-211, 2021.
- [16] F. A. Tekin, “İş güvenliği ve önemi”, *AÜİİBFD*, c. 9, sy. 1, ss. 329-360, 1991.

- [17] O. Karadeniz, "Dünya'da ve Türkiye'de iş kazaları ve meslek hastalıkları ve sosyal koruma yetersizliği", *Çalışma ve Toplum*, c. 3, sy. 34, ss. 15-73, 2012.
- [18] K. Koçali, "Sosyal Güvenlik Kurumu'nun 2012-2020 yılları arası iş kazaları göstergelerinin standardizasyonu", *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, c. 12, sy. 2, ss. 302-327, 2021.
- [19] B. Ulutaş, "Türkiye'deki illerin iş kazaları ve meslek hastalıkları açısından veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi", *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, c. 17, sy. 2, ss. 23-46, 2016.
- [20] C. Şahin, "Elektrik dağıtım sektöründe kaza kök nedenleri", *İSG Akademik*, c. 2, sy. 1, ss. 1-14, 2020.
- [21] F. Yılmaz, "İş sağlığı ve güvenliği uygulamalarının çalışma yaşamına etkisi", *OHS ACADEMY*, c. 2, sy. 1, ss. 1-10, 2019.
- [22] M. Sağır, R. Sağır, O. Genç, "İnşaat sektöründe meydana gelen kazalardaki kazazedelerin son durumlarına etki eden faktörlerin YSA ile incelenmesi", *OKÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, c. 5, sy. 1, ss. 154-175, 2022.
- [23] C. Yıldırım, E. Altuntaş, "Tokat ilinde traktör ve tarım makinaları kullanımından kaynaklanan iş kazalarının iş güvenliği açısından değerlendirilmesi", *JAFAG*, c. 32, sy. 1, ss. 77-90, 2015.
- [24] G. F. Can, Ş. Kargı, "Sektörlerin iş sağlığı ve güvenliği yönünden risk seviyelerinin crtic-edas entegrasyonu ile değerlendirilmesi", *Endüstri Mühendisliği*, c. 30, sy. 1, ss. 15-31, 2019.
- [25] T. Ozturk, G. C. Akın, "Türkiye'de tüm sektörlere ait 2018 yılı iş kazalarının ve kaza sonucu yaşam kaybının kazazede yaş bakımından değerlendirilmesi", *EJOSAT*, sy. 22, ss. 410-415, 2021.
- [26] A. Demir, A. Öz, "Teolojik açıdan iş kazalarının incelenmesi", *EJOSAT*, sy. 14, ss. 189-197, 2018.
- [27] H. G. Ünal, A. Gök, K. Gök, "Türkiye'de iş kazalarının sektörler ve meslekler bazında analizi", *JSR A*, sy. 15, ss. 97-108, 2008.
- [28] G. Eroğlu, E. E. Şüküroğlu, M. Günaydın, S. Şüküroğlu, "İş güvenliği kültürünün iş verimliliği üzerine etkisi: pres fabrikası örneği", c. 11, sy. 3, ss. 913-926, 2022.
- [29] B. Özyörük, D. Kütük, "İş ortamını yeniden düzenlemenin iş verimliliğine etkileri", *Ergoterapi ve Rehabilitasyon Dergisi*, c. 2, sy. 2, ss. 73-81, 2014.
- [30] M. D. Kaya, D. Güzel, B. Çubukçu, "Ilıca şeker fabrikası çalışanlarının iş memnuniyeti, ergonomik çalışma koşulları ve iş stresi yönünden incelenmesi", *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, c. 25, sy. 2, ss. 51-60, 2011.
- [31] S. Karamık, U. Seker, "İşletmelerde iş güvenliğinin verimlilik üzerine etkilerinin değerlendirilmesi", *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, c. 3, sy. 4, ss. 575-584, 2016.
- [32] SGK. "Yıllık istatistik bilgisi", 2022. [Online]. Available: <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>
- [33] Eurostat. "Accident at works statistics", 2023. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Limon, Sibiryaya Çamı, Amerikan Cevizi, Monteri Çamı ve Manolya Ahşaplarında Organik Hindistan Cevizi Yağı Uygulamasının Yapılması Üzerine Bir Çalışma

## *A study on the Application of Organic Coconut Oil on Lemon, Siberian pine, American Walnut, Monterrey Pine, and Magnolia Woods*

Ümit Ayata<sup>1\*</sup>, Elif Hümeysra Bilginer<sup>2</sup>, Osman Çamlıbel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, Peyzaj Anabilim Dalı, Bayburt, Türkiye.

<sup>2</sup> KTO Karatay Üniversitesi, Güzel Sanatlar Ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Mimarlık Pr, Konya, Türkiye.

<sup>3</sup> Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Mobilya ve Dekorasyon Programı, Kırıkkale, Türkiye.

Geliş / Received: 28.06.2024

Kabul / Accepted: 29.07.2024

\*Sorumlu Yazar: Ümit Ayata [umitayata@bayburt.edu.tr](mailto:umitayata@bayburt.edu.tr)

**ÖZ:** Bu çalışmada, Monteri çamı (*Pinus radiata* D Don), Sibiryaya çamı (*Pinus sibirica*), limon (*Citrus limon* (L.) Burm.), manolya (*Magnolia grandiflora* L.) ve Amerikan cevizi (*Juglans nigra* L.) ağaç türlerine ait ahşap malzeme yüzeylerine organik Hindistan cevizi yağı uygulaması sonrasında meydana gelen renk parametrelerinde [ $a^*$ : kırmızı renk tonu değeri,  $b^*$ : sarı renk tonu değeri,  $C^*$ : kroma değeri,  $L^*$  ışıklılık değeri ve  $h^\circ$ : ton açısı değeri] değişimler karşılaştırılmıştır. Varyans analizlerinde bütün ahşap türlerinde ve uygulamalar üzerinde renk parametreleri için anlamlı sonuçlar belirlemiştir.  $\Delta E^*$  değerleri uygulama sonrasında Monteri çamı için 7.29, limon için 3.27, Amerikan cevizi için 10.43, manolya için 9.74 ve Sibiryaya çamı için 12.40 olarak elde edilmiştir. Bütün ahşap türlerinde yağ uygulaması ile  $h^\circ$  ve  $L^*$  değerlerinde azalmalar elde edilirken,  $a^*$  parametresinde artışlar bulunmuştur. Buna ek olarak,  $C^*$  ve  $b^*$  parametrelerinde Amerikan cevizi odununda azalma tespit edilirken, diğer bütün ahşap türlerinde artışlar görülmüştür. Çalışmada kullanılan Hindistan cevizi yağı ile renk parametrelerinin değiştiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Limon, Sibiryaya Çamı, Amerikan Cevizi, Monteri Çamı, Manolya

**ABSTRACT:** In this study, changes in color parameters [ $a^*$ : red color tone value,  $b^*$ : yellow color tone value,  $C^*$ : chroma value,  $L^*$ : lightness value, and  $h^\circ$ : hue angle value] occurring on wood surfaces of Monterrey pine (*Pinus radiata* D Don), Siberian pine (*Pinus sibirica*), lemon (*Citrus limon* (L.) Burm.), magnolia (*Magnolia grandiflora* L.), and American walnut (*Juglans nigra* L.) wood species after the application of organic coconut oil were compared. The analysis of variance determined significant results for color parameters in all wood species and applications.  $\Delta E^*$  values after application were obtained as 7.29 for Monteri pine, 3.27 for lemon, 10.43 for American walnut, 9.74 for magnolia, and 12.40 for Siberian pine. Decreases in  $h^\circ$  and  $L^*$  values were obtained with oil application in all wood species, while increases were found in the  $a^*$  parameter. Additionally, a decrease was observed in the  $C^*$  and  $b^*$  parameters in American walnut wood, while increases were observed in all other wood species. The study revealed that the color parameters changed with the use of coconut oil.

**Keywords:** Lemon, Siberian Pine, American Walnut, Monteri Pine, Magnolia

## 1. GİRİŞ

Hindistan cevizi, dünya çapında çeşitli tropik ve subtropik bölgelerde yetiştirilen önemli bir

plantasyon ürünüdür. Yaklaşık 13 milyon hektarlık bir alana yayılan ve 90 ülkeyi kapsayan bu tarımsal ürünün, yaklaşık 62.46 milyon metrik tonluk bir üretime sahip olduğu bildirilmiştir [1,2].



İşlenmemiş Hindistan cevizi yağı, taze ve olgun Hindistan cevizi çekirdeklerinden mekanik veya doğal yollarla, ısı kullanılarak veya kullanılmadan, kimyasal rafinasyona, ağartma veya koku giderme işlemine tabi tutulmadan, yağın özelliklerinde bir değişikliğe neden olmayan, elde edilen taze Hindistan cevizi sütünden üretilir. İşlenmemiş Hindistan cevizi yağı fonksiyonel gıda ve en sağlıklı yağlar kategorisinde yer almaktadır [3-5].

Hindistan cevizi yağı genellikle laurik asit adı verilen bir madde olan orta zincirli bir yağ asidinden oluşur. Araştırmacılar laurik asit tüketiminin birçok sağlık faydasını vurgulamıştır, bunlar arasında antibakteriyel, antifungal, antiviral ve bağışıklık sistemini güçlendirici etkiler bulunmaktadır. Bu faydalı yağ asidi, rafine edilmiş ve rafine edilmemiş Hindistan cevizi yağında aynı miktarda bulunmaktadır. Ancak, rafine edilmemiş Hindistan cevizi yağı, rafine edilmiş türden daha fazla fitonutrient içermektedir. Ayrıca, rafine Hindistan cevizi yağı üretiminde kullanılan ısıtma ve ağartma işlemi tarafından polifenollerin zarar gördüğü bildirilmiştir [6]. Hindistan cevizi yağı yıllardır gıda endüstrisi için önemli bir yenilebilir yağ olmuştur ve genellikle bir laurik yağ, tropikal yağ veya şekerleme yağı olarak adlandırılır [7,8]. Hindistan cevizi yağı, Sri Lanka'da ve Asya'nın birçok ülkesinde yağ tercihinde önemli bir seçenektir. Ayrıca, çeşitli sağlık ve güzellik ürünlerinde sağlık ve besin değerlerinden dolayı kullanılmaktadır [9].

Hindistan cevizi ağacı (*Cocos nucifera*), Arecaceae familyasına aittir ve tropikal ve subtropikal bölgelere özgü uzun bir palmiye ağacıdır. Doğru uygulamalar ve yetiştirme koşullarıyla yılda 75 meyve veren bu ağaç, 30 metreye kadar büyüyebilir. Bu bitkinin kökeni hala tartışma konusudur. Ancak en kabul edilen hipotez, Hindistan cevizinin Hindistan-Endonezya bölgesinde ortaya çıktığı yönündedir [10,11]. Botanik olarak, Hindistan cevizi meyvesi bir çekirdek meyvesi olarak kabul edilir, dış kabuk ve iç kabuk içerisinde iç kısmı barındıran sertleşmiş tek bir çekirdeği çevreler. Mezokarp ve endokarp (sırasıyla kabuk ve iç kabuk) kahverengi, lifli ve kalındır (3-5 mm), testa ise çekirdeği kabuktan ayıran ince kahverengi bir tabakadır [10,11].

Hindistan cevizi yağı, oda sıcaklığında sıvı halde bulunur ve su içinde çözünmez. Erime noktasının

üzerindeki sıcaklıklarda, CO, hafif petrol, benzen ve karbon tetraklorür gibi çoğu hidroksil olmayan çözücüyle tamamen karışabilir. CO, çoğu yaygın yağ ve yağdan daha fazla alkolde çözünür. Hindistan cevizi yağı tokoferoller ve fitosteroller gibi bazı sabunlaşmamış bileşenleri içerir [12]. Hindistan cevizi, neredeyse tüm kısımları insan ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılabilen çok yüksek bir ekonomik değere sahiptir. Bu çeşitten işlenmiş ürünlerden biri, büyük talep gören ve yüksek bir değere sahip olan saf Hindistan cevizi yağıdır. Hindistan cevizi, taze Hindistan cevizi çekirdeğinin soğuk preslenmesi yoluyla elde edilir ve Hindistan cevizi sütünün taze kısmından sıvıyı kaybetmemek için soğuk preslenir. Bu da E vitamini, provitamin A ve polifenollerin kaybını önler [13-15].

Bu çalışmada, limon, Sibiryacı, Amerikan cevizi, Monteri çamı ve manolya ahşaplarında organik Hindistan cevizi yağı uygulaması sonrasında meydana gelen renk değişimleri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1 Materyal

#### 2.1.1 Ahşap Malzeme

Monteri çamı (*Pinus radiata* D Don), Sibiryacı (*Pinus sibirica*), limon (*Citrus limon* (L.) Burm.), manolya (*Magnolia grandiflora* L.) ve Amerikan cevizi (*Juglans nigra* L.) ağaç türlerine ait olan odunları 100 mm x 100 mm x 15 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde iklimlendirme uygulamaları yapılmıştır (20±2°C ile %65 bağıl nem) [16].

#### 2.1.2 Organik Hindistan Cevizi Yağı

Çalışmada, organik Hindistan cevizi yağı (100 ml için: yağ 100 g, doymuş yağ 89 g) kullanılmıştır.

### 2.2 Metot

#### 2.2.1 Organik Hindistan Cevizi Yağının Ahşap Malzeme Yüzeylerine Uygulanması

Çalışmada organik Hindistan cevizi yağı ahşap malzeme yüzeylerine tek kat olarak fırça yardımıyla uygulanmıştır.

## 2.2.2 Renk Özelliklerinin Belirlenmesi

Renk değişimleri, CS-10 (CHN Spec, Çin) [CIE 10° standart gözlemci; CIE D65 ışık kaynağı, aydınlatma sistemi: 8/d (8°/dağıncık aydınlatma)] cihazı kullanılarak ölçülmüştür [17].

**Tablo 1:**  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  ve  $\Delta C^*$  için tanımlamalar [18]

Parametre	Referans göre değişim	
	Pozitif durumda	Negatif durumda
$\Delta L^*$	Daha açık	Daha koyu
$\Delta a^*$	Daha kırmızı	Daha yeşil
$\Delta b^*$	Daha sarı	Daha mavi
$\Delta C^*$	Daha net, daha parlak	Mat, daha bulanık

Literatürde  $\Delta C^*$ : kroma kısmı veya doygunluk farkı ve  $\Delta H^*$ : ton bölümü veya gölge farkı olarak tanımlanmıştır [18]. Aşağıdaki formüller ile toplam renk farklılıklarına ait sonuçlar belirlenmiştir.

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5} \quad (1)$$

$$h^\circ = \arctan (b^*/a^*) \quad (2)$$

$$\Delta C^* = (C^*_{\text{yağ ile işlem görmüş}} - C^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (3)$$

$$\Delta a^* = (a^*_{\text{yağ ile işlem görmüş}} - a^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (4)$$

$$\Delta L^* = (L^*_{\text{yağ ile işlem görmüş}} - L^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (5)$$

$$\Delta b^* = (b^*_{\text{yağ ile işlem görmüş}} - b^*_{\text{işlem görmemiş}}) \quad (6)$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{0.5} \quad (7)$$

$$\Delta H^* = [(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2]^{0.5} \quad (8)$$

**Tablo 3:**  $L^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
Ağaç Türü (A)	16976.858	4	4244.215	5981.065	0.000*
Uygulama (AB)	1106.494	1	1106.494	1559.302	0.000*
Etkileşim (AB)	262.137	4	65.534	92.353	0.000*
Hata	63.865	90	0.710		
Toplam	399866.288	100			
Düzeltilmiş Toplam	18409.354	99			

\*: Anlamli

$L^*$  parametrelerine ait belirlenmiş olan ölçüm sonuçları Tablo 4'de verilmiştir.

**Tablo 4:**  $L^*$  parametreleri için belirlenmiş olan ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Uygulama	Ölçüm Sayısı	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Limon	Yok	10	78.24		A*	0.37	77.49	78.88	0.47
	Var	10	77.41	↓1.06	B	0.72	76.25	78.23	0.93
Sibirya Çamı	Yok	10	68.41		D	0.38	67.93	68.97	0.56
	Var	10	59.95	↓12.37	G	0.15	59.77	60.23	0.25
Amerikan Cevizi	Yok	10	43.76		I	1.79	41.22	45.79	4.09
	Var	10	33.96	↓22.39	J**	0.65	33.39	35.11	1.90
Monteri Çamı	Yok	10	71.77		C	1.09	70.09	73.04	1.52
	Var	10	66.24	↓7.71	E	0.98	65.27	68.00	1.47
Manolya	Yok	10	63.27		F	0.50	62.49	64.13	0.79
	Var	10	54.61	↓13.69	H	0.53	53.81	55.67	0.97

COV: Varyasyon Katsayısı, HG: Homojenlik Grubu, \*: En yüksek değer, \*\*: En düşük değer

$\Delta E^*$  için kıyaslama kriterleri [19] Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2:**  $\Delta E^*$  kıyaslama kriterleri [19]

Toplam renk farkı ( $\Delta E^*$ )	Görsel renk puanı farkı
<0.2	Algılanamaz
0.2 ila 0.5	Çok zayıf
0.5 ila 1.5	Zayıf
1.5 ila 3.0	Belirgin
3.0 ila 6.0	Çok belirgin
6.0 ila 12.0	Güçlü
> 12.0	Çok güçlü

## 2.3 İstatistiksel Analiz

Bir istatistik programı ile standart sapmaları, maksimum ve minimum değerleri, ortalama değerleri, homojenlik grupları, varyans analizleri ve yüzde (%) değişim oranları hesaplanmıştır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

$L^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları Tablo 3'de verilmiştir.  $L^*$  parametreleri üzerinde ağaç türü, uygulama ve etkileşim anlamlı olarak elde edilmiştir (Tablo 3).

$L^*$  değerlerinde yağ uygulaması sonrasında limonda %1.06, Sibirya çamında %12.37, Amerikan cevizinde %22.39, Monteri çamında %7.71 ve manolyada %13.69 oranlarında azalmalar elde edilmiştir (Tablo 4).

$L^*$  değerinde en yüksek sonuç limon ahşabına ait kontrol örneklerinde (78.24) bulunurken, en düşük sonuç ise yağ ile muamele edilmiş Amerikan ceviz odununda (33.96) elde edilmiştir (Tablo 4).

Literatürde yapılan bir çalışmada, ayous, iroko, dişbudak, sarıçam ve lale ağacına ait odunlarında yapılan organik Hindistan cevizi yağı uygulaması sonrasında  $L^*$  değerlerinde azalmaların elde edildiği bildirilmiştir [20].

$a^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları Tablo 5’de gösterilmiştir.  $a^*$  parametreleri üzerinde ağaç türü, uygulama ve etkileşim anlamlı olarak tespit edilmiştir (Tablo 5).

**Tablo 5:**  $a^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
Ağaç Türü (A)	1042.946	4	260.737	1990.971	0.000*
Uygulama (AB)	166.591	1	166.591	1272.078	0.000*
Etkileşim (AB)	58.888	4	14.722	112.416	0.000*
Hata	11.786	90	0.131		
Toplam	7944.157	100			
Düzeltilmiş Toplam	1280.211	99			

\*: Anlamlı

$a^*$  parametrelerine ait belirlenmiş olan ölçüm sonuçları Tablo 6’da sunulmaktadır. Yapılan yağ uygulaması sonrasında  $a^*$  değerlerinde Amerikan cevizde %35.60, Monteri çamında %25.99, limonda %19.58, Sibirya çamında %50.65 ve manolyada %58.31 oranlarında artışlar belirlenmiştir (Tablo 6).

$a^*$  değerinde en yüksek sonuç yağ ile işlem görmüş Sibirya çamı deney örneklerinde (16.33)

görüldürken, en düşük sonuç ise manolya kontrol odununda (2.95) bulunmuştur (Tablo 6).

Literatürde yapılan bir araştırmada, lale, iroko, dişbudak, sarıçam ve ayous lale ağacına ait odunlarında yapılan organik Hindistan cevizi yağı uygulaması ile  $a^*$  değerlerinde artışların tespit edildiği söylenmiştir [20].

**Tablo 6:**  $a^*$  parametrelerine ait belirlenmiş olan ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Uygulama	Ölçüm Sayısı	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Limon	Yok	10	5.77		G	0.28	5.30	6.22	4.86
	Var	10	6.90	↑19.58	F	0.33	6.51	7.36	4.78
Sibirya Çamı	Yok	10	10.84		B	0.14	10.67	11.09	1.25
	Var	10	16.33	↑50.65	A*	0.21	15.89	16.61	1.28
Amerikan Cevizi	Yok	10	7.50		E	0.67	6.73	8.48	8.97
	Var	10	10.17	↑35.60	C	0.51	9.73	11.18	4.98
Monteri Çamı	Yok	10	7.31		E	0.32	6.97	7.86	4.43
	Var	10	9.21	↑25.99	D	0.42	8.74	9.73	4.59
Manolya	Yok	10	2.95		I**	0.18	2.58	3.15	6.13
	Var	10	4.67	↑58.31	H	0.19	4.42	5.02	4.03

COV: Varyasyon Katsayısı, HG: Homojenlik Grubu, \*: En yüksek değer, \*\*: En düşük değer

Tablo 7’de  $b^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları verilmiştir.  $b^*$

parametreleri üzerinde ağaç türü, uygulama ve etkileşim anlamlı olarak belirlenmiştir (Tablo 7).

**Tablo 7:**  $b^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
Ağaç Türü (A)	2692.671	4	673.168	1609.631	0.000*
Uygulama (AB)	263.835	1	263.835	630.864	0.000*
Etkileşim (AB)	248.083	4	62.021	148.300	0.000*
Hata	37.639	90	0.418		
Toplam	54455.276	100			
Düzeltilmiş Toplam	3242.228	99			

\*: Anlamlı

$b^*$  parametrelerine ait belirlenmiş olan ölçüm sonuçları Tablo 8'de sunulmuştur. Bütün ahşap türlerinde yağ uygulaması ile  $b^*$  değerlerinde farklı durumlar elde edilmiştir. Amerikan cevizde %15.37 oranında azalış belirlenirken, limonda %12.95, Monteri çamında %19.05, Sibiry çamında %27.62 ve manolyada %23.24 oranlarında artışlar elde edilmiştir.  $b^*$  değerinde en yüksek sonuç yağ ile işlem görmüş Sibiry çamı deney örnekler üzerinde

(33.31) bulunurken, en düşük sonuç ise yağ işlemi görmüş Amerikan ceviz odununda (13.16) belirlenmiştir (Tablo 8).

Literatürde iroko, dişbudak, sarıçam, ayous ve lale ağaçlarına ait odunlarında yapılan organik Hindistan cevizi yağı uygulaması ile  $b^*$  parametrelerinde artışların olduğu rapor edilmiştir [20].

**Tablo 8:**  $b^*$  parametrelerine ait belirlenmiş olan ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Uygulama	Ölçüm Sayısı	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Limon	Yok	10	22.78	↑12.95	D	0.43	22.19	23.44	1.90
	Var	10	25.73		C	0.82	24.60	27.03	3.19
Sibiry Çamı	Yok	10	26.10	↑27.62	C	0.73	24.17	26.98	2.79
	Var	10	33.31		A*	0.38	32.55	33.95	1.14
Amerikan Cevizi	Yok	10	15.55	↓15.37	G	1.12	14.27	17.01	7.19
	Var	10	13.16		H**	0.93	12.06	14.75	7.04
Monteri Çamı	Yok	10	22.83	↑19.05	D	0.36	22.05	23.37	1.59
	Var	10	27.18		B	0.32	26.51	27.57	1.16
Manolya	Yok	10	17.77	↑23.24	F	0.29	17.50	18.33	1.62
	Var	10	21.90		E	0.47	21.20	22.78	2.15

COV: Varyasyon Katsayısı, HG: Homojenlik Grubu, \*: En yüksek değer, \*\*: En düşük değer

$C^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları Tablo 9'da gösterilmektedir.  $C^*$

parametresi için ağaç türü, uygulama ve etkileşim anlamlı olarak elde edilmiştir (Tablo 9).

**Tablo 9:**  $C^*$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
Ağaç Türü (A)	2935.765	4	733.941	1639.115	0.000*
Uygulama (AB)	413.634	1	413.634	923.771	0.000*
Etkileşim (AB)	226.023	4	56.506	126.195	0.000*
Hata	40.299	90	0.448		
Toplam	62488.921	100			
Düzeltilmiş Toplam	3615.722	99			

\*: Anlamlı

$C^*$  parametrelerine ait belirlenmiş olan ölçüm sonuçları Tablo 10'da verilmiştir. Bütün ahşap türlerinde yağ uygulaması ile  $C^*$  değerlerinde de  $b^*$  parametresi ile benzer durumlar görülmüştür. Amerikan cevizde %3.71 oranında azalış görülürken, manolyada %24.18, Sibiry çamında %30.73, limonda %13.36 ve Monteri çamında %19.90 oranlarında artışlar bulunmuştur.  $C^*$  değerinde en yüksek sonuç yağ ile işlem görmüş

Sibiry çamı deney örneklerinde (37.10) tespit edilirken, en düşük sonuç ise yağ işlemi görmüş Amerikan ceviz odununa ait deney örnekleri üzerinde (16.63) görülmüştür (Tablo 10).

Literatürde dişbudak, sarıçam, iroko, ayous ve lale odunlarında yapılan organik Hindistan cevizi yağı uygulaması sonrasında  $C^*$  değerlerinde artışların görüldüğü rapor edilmiştir [20].

**Tablo 10:** C\* parametreleri için belirlenmiş olan ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Uygulama	Ölçüm Sayısı	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Limon	Yok	10	23.50	↑13.36	D	0.43	22.93	24.17	1.85
	Var	10	26.64		C	0.87	25.46	28.01	3.28
Sibirya Çamı	Yok	10	28.38	↑30.73	B	0.14	28.14	28.55	0.49
	Var	10	37.10		A*	0.39	36.22	37.69	1.06
Amerikan Cevizi	Yok	10	17.27	↓3.71	G	1.29	15.78	19.01	7.44
	Var	10	16.63		H**	1.03	15.50	18.51	6.21
Monteri Çamı	Yok	10	23.97	↑19.90	D	0.43	23.14	24.65	1.78
	Var	10	28.74		B	0.36	28.02	29.15	1.26
Manolya	Yok	10	18.03	↑24.18	F	0.29	17.76	18.59	1.63
	Var	10	22.39		E	0.49	21.65	23.32	2.17

COV: Varyasyon Katsayısı, HG: Homojenlik Grubu, \*: En yüksek değer, \*\*: En düşük değer

$h^o$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları Tablo 11’de verilmiştir.  $h^o$  parametresi için

ağaç türü, uygulama ve etkileşim anlamlı olarak bulunmuştur (Tablo 11).

**Tablo 11:**  $h^o$  parametresi için belirlenmiş olan varyans analizi sonuçları

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F Değeri	$\alpha \leq 0.05$
Ağaç Türü (A)	5468.613	4	1367.153	4294.277	0.000*
Uygulama (AB)	410.022	1	410.022	1287.894	0.000*
Etkileşim (AB)	421.447	4	105.362	330.945	0.000*
Hata	28.653	90	0.318		
Toplam	497181.706	100			
Düzeltilmiş Toplam	6328.735	99			

\*: Anlamlı

$h^o$  parametresi için belirlenmiş olan ölçüm sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.  $h^o$  değerinde yağ uygulaması ile Amerikan ceviz için %18.68, limon için %1.08, Monteri çamı için %1.61, manolya için %3.24 ve Sibirya çamı için %5.42 oranlarında azalışlar görülmüştür.  $h^o$  değerinde en düşük sonuç yağ ile işlem görmüş Amerikan cevizi deney örneklerinde (52.27) belirlenirken, en yüksek sonuç

ise manolya kontrol odununda (80.57) tespit edilmiştir (Tablo 12).

Literatürde yapılan bir çalışmada, dişbudak, iroko, sarıçam, ayous ve lale ağacına ait odunlarında yapılan organik Hindistan cevizi yağı uygulaması sonrasında  $h^o$  değerlerinde azalmaların elde edildiği bildirilmiştir [20].

**Tablo 12:**  $h^o$  parametresi için belirlenmiş olan ölçüm sonuçları

Ağaç Türü	Uygulama	Ölçüm Sayısı	Ortalama	Değişim (%)	HG	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	COV
Limon	Yok	10	75.79	↓1.08	C	0.68	74.35	76.63	0.90
	Var	10	74.97		D	0.36	74.20	75.47	0.48
Sibirya Çamı	Yok	10	67.54	↓5.42	G	0.26	67.06	67.96	0.38
	Var	10	63.88		H	0.28	63.40	64.26	0.44
Amerikan Cevizi	Yok	10	64.28	↓18.68	H	0.76	63.14	65.52	1.18
	Var	10	52.27		I**	0.74	51.10	53.41	1.41
Monteri Çamı	Yok	10	72.25	↓1.61	E	0.57	71.27	73.02	0.78
	Var	10	71.09		F	0.75	70.23	72.37	1.06
Manolya	Yok	10	80.57	↓3.24	A*	0.54	79.81	81.68	0.67
	Var	10	77.96		B	0.37	77.16	78.35	0.47

COV: Varyasyon Katsayısı, HG: Homojenlik Grubu, \*: En yüksek değer, \*\*: En düşük değer

Toplam renk farklılıklarına ait sonuçlar Tablo 13’de sunulmuştur.  $\Delta E^*$  değerleri uygulama sonrasında limon için 3.27, Monteri çamı için 7.29, manolya için 9.74, Amerikan cevizi için 10.43 ve Sibirya çamı için 12.40 olarak hesaplanmıştır. Uygulama sonrasında bütün ağaç türlerinde  $\Delta L^*$  değerleri negatif (referanstan daha koyu) elde edilmiştir (Tablo 13).

$\Delta b^*$  değerleri ise Amerikan cevizi odunu negatif (referanstan daha mavi) bulunurken, diğer bütün ahşap türleri pozitif (referanstan daha sarı) olarak tespit edilmiştir.  $\Delta a^*$  değerleri bütün ahşap türleri üzerinde pozitif (referanstan daha kırmızı) olarak hesaplanmıştır (Tablo 13).

$\Delta C^*$  değerleri ise Amerikan cevizi ağaç türlerinde negatif (mat, referanstan daha bulanık) olarak

bulunurken, diğer bütün ağaç türlerinde pozitif (referanstan daha net, daha parlak) olarak tespit edilmiştir (Tablo 13).

Renk değiştirme kriteri [19] ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, limon için “çok belirgin (3.0 ila 6.0)”, Monteri çamı, manolya ve Amerikan cevizi için “güçlü (6.0 ila 12.0)” ve Sibirya çamı için “çok güçlü (> 12.0)” kriteri şeklinde belirlenmiştir (Tablo 13).

Literatürde yapılan bir çalışmada, organik Hindistan cevizi yağı uygulaması sonrasında  $\Delta E^*$  değerlerinin irokoda 13.41, ayousda 14.19, lale odununda 5.60, sarıçamda 6.09 ve dişbudakta 5.81 olarak belirlendiği bildirilmiştir [20].

**Tablo 13:** Toplam renk farklılıklarına ait sonuçlar

Ağaç Türü	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta C^*$	$\Delta H^*$	$\Delta E^*$	Renk değiştirme kriteri [19]
Limon	-0.82	1.13	2.95	3.14	0.36	3.27	Çok belirgin (3.0 ila 6.0)
Monteri çamı	-5.53	1.90	4.35	4.76	-	7.29	
Manolya	-8.66	1.72	4.13	4.36	0.99	9.74	Güçlü (6.0 ila 12.0)
Amerikan cevizi	-9.79	2.67	-2.40	-0.64	3.53	10.43	
Sibirya çamı	-8.47	5.49	7.21	8.72	2.47	12.40	Çok güçlü (> 12.0)

#### 4. SONUÇ

- $\Delta E^*$  değerleri uygulama sonrasında küçükten büyüğe doğru limon için 3.27, Monteri çamı için 7.29, manolya için 9.74, Amerikan cevizi için 10.43 ve Sibirya çamı için 12.40 olarak elde edilmiştir.
- $C^*$  ve  $b^*$  parametrelerinde Amerikan cevizi odununda azalma elde edilirken, diğer bütün ahşap türlerinde artışlar belirlenmiştir.
- Bütün ahşap türlerinde yağ uygulaması ile  $h^o$  ve  $L^*$  değerlerinde azalmalar elde edilirken,  $a^*$  parametresinde artışlar tespit edilmiştir.
- Kullanılan organik Hindistan cevizi yağı ile ahşap malzemeler üzerinde renk parametrelerinin değiştiği belirlenmiştir.

**Yazar Katkısı:** Yazarlar, çalışmaya ait konunun oluşturulmasına, konu ile alakalı literatür taramasının yapılmasına, çalışmada kullanılan malzemelerin temin edilmesine, malzemeler üzerinde laboratuvar çalışmalarının yapılmasına, ölçümlerin alınmasına, ölçümlerden elde edilen verilere ait istatistiksel analizlerin hesaplanmasına, makalenin yazımına ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] S.V. Ramesh, R. Pandiselvam, P.P.S. Beegum, R.M.S. Kumar, M.R. Manikantan, K.B. Hebbar, “Review of *Cocos nucifera* L. testa-derived phytonutrients with special reference to phenolics and its potential for encapsulation,” Journal of Food Science and Technology, vol. 60, no. 1, pp. 1-10, 2023.
- [2] J.J. Yin, H. Huang, X.M. Jiang, X.Y. Guo, B.H. Pan, P. Gao, P. Zhong, C.R. Hu, D.P. He, “Coconut oil research: past, present, and future directions,” Food Health, vol. 6, no. 1, p. 5, 2024.
- [3] C.O. Ajogun, S.C. Achinewhu, D.B. Kiin-Kabari, O.M. Akusu, “Effect of extraction methods on the physicochemical properties, fatty acid profile and storage stability of virgin coconut oil,” Asian Food Science Journal, vol. 18, no. 4, pp. 27-40, 2020.

- [4] K.M. Ananda, P.N. Ariani, "Virgin coconut oil (VCO) fatty acids and its benefits for health," *Jurnal AGRINIKA*, vol. 4, no. 1, pp. 93-107, 2020.
- [5] S. Sabahannur, S. Alimuddin, "Identification of fatty acids in virgin coconut oil (VCO), cocoa beans, crude palm oil (CPO), and palm kernel beans using gas chromatography," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1083, no. 1, p. 012036, 2022.
- [6] J. Heyd, *Coconut oil, nature's wonder cure: How coconut oil revitalizes the body*, ISBN: 9781631877216, 2014.
- [7] L. Eyres, *Handbook of Australasian Edible Oils*, Auckland: Oils and Fats Specialist Group of the New Zealand Institute of Chemistry, 2007.
- [8] L. Eyres, M.F. Eyres, A. Chisholm, R.C. Brown, "Coconut oil consumption and cardiovascular risk factors in humans," *Nutrition Reviews*, vol. 74, no. 4, pp. 267-280, 2016.
- [9] K.N. Seneviratne, N. Jayathilaka, *Coconut Oil*, Lakva Publishers, p. 130, ISBN: 978-955-1605-36-0, 2016.
- [10] T. Pradeepkumar, B. Sumajyothibhaskar, K.N. Satheesan, *Management of Horticultural Crops (Horticulture Science Series Vol.11, 2nd of 2 Parts)*, New Delhi, India: New India Publishing, pp. 539-587, 2008.
- [11] R.D.S. Lima, J.M. Block, "Coconut oil: what do we really know about it so far?," *Food Quality and Safety*, vol. 3, no. 2, pp. 61-72, 2019.
- [12] R. Prapun, "Study on extraction, quality and application of virgin coconut oil," Prince of Songkla University, Food Science and Technology, Master of Science Degree, 2016.
- [13] C. S. C. Tan-Lim, C. V. Martinez, "Should virgin coconut oil be used in the adjunctive treatment of COVID-19?," *Acta Medica Philippina*, vol. 54, no. 1, pp. 66-68, 2020.
- [14] N. Umate, V. Kuchewar, S. Parwe, "A narrative review on use of virgin coconut oil in dermatology," *Journal of Indian System of Medicine*, vol. 10, no. 2, pp. 86-89, 2022.
- [15] R.K. Arief, M.R. Kasman, A. Armila, I. Hilmy, "Development of virgin coconut oil fermented tank using teak wood powder isolator," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, vol. 11, no. 4, pp. 617-624, 2022.
- [16] ISO 554, "Standard atmospheres for conditioning and/or testing," International Standardization Organization, Geneva, Switzerland, 1976.
- [17] ASTM D 2244-3, "Standard practice for calculation or color tolerances and color differences from instrumentally measured color coordinates," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [18] D.R. Lange, *Fundamentals of Colourimetry - Application Report No. 10e*, DR Lange: New York, NY, USA, 1999.
- [19] DIN 5033, "Deutsche Normen, Farbmessung," Normenausschuß Farbe (FNF) im DIN Deutsches Institut für Normung eV, Beuth, Berlin März, 1979.
- [20] Ü. Ayata, F.T. Efe, F. Tonguç, O. Çamlıbel, Ş. Kaplan, "Isıl işlem görmüş bazı ağaç türlerinde organik Hindistan cevizi yağı uygulaması sonrasında meydana renk değişimlerinin araştırılması", *Tarım, Orman Ve Su Bilimlerinde Popüler Yaklaşımlar*, Duvar Yayınları, Editör: Doç. Dr. Gökhan ŞEN, Haziran 2024, İzmir, 80-96, ISBN: 978-625-6069-28-2.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Bir Nükleer Güç Santralının Karşılaştırılmalı Maliyet Analizi: Akkuyu Özelinde

## *A Comparative Cost Analysis of a Nuclear Power Plant: Akkuyu Case*

Gürcan Tiryaki, Ünal Çamdalı\*

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bil. Fak., Mak. Müh. Bölümü, Etlik Ankara, Türkiye

Geliş / Received: 15.04.2024

Kabul / Accepted: 16.08.2024

\*Sorumlu Yazar: Ünal Çamdalı [unalcamdali@gmail.com](mailto:unalcamdali@gmail.com)

**ÖZ:** Türkiye son yıllarda enerji tüketimini en çok artıran ülkelerden biri olup, enerji tüketimini önümüzdeki yıllarda daha da artırması beklenmektedir. Dolayısıyla ülkemizin gelecekteki ekonomik, sosyal vd. alanlardaki başarısı, büyük oranda enerji sorununa çözüm üretebilme yeteneğine bağlı olacaktır.

Dünyada enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan nükleer enerji, atom çekirdeğinden elde edilen bir enerji türüdür. Radyoaktivite, füzyon ve fisyon olmak üzere üç farklı çeşidi bulunmaktadır. Türkiye Rusya Federasyonu ile 6007 Sayılı Kanun kapsamında yapmış olduğu anlaşmayla önümüzdeki yıllarda nükleer bir santrale sahip ülkeler arasında yer alacaktır. Söz konusu anlaşmaya göre Rusya Federasyonu Hükümeti himayesinde kurulacak olan bir şirket tarafından, Mersin/Akkuyu bölgesinde nükleer santral kurulacaktır. Toplam yatırım maliyeti 22 Milyar \$ olacak olan nükleer santralde, yeni geliştirilen VVER1200 tipi PWR (Basınçlandırılmış Su Reaktörü) reaktörleri kullanılacaktır. Söz konusu reaktörlerin her biri 1200 MW gücünde olup, toplamda dört adet kurulması planlanmaktadır. Dolayısıyla santralin kurulumu gerçekleştiğinde toplam güç: 4800 MW olacaktır. Üretici şirket tarafından 60 yıl ömür biçilen reaktörlerin toplam ömrü boyunca üretecekleri elektrik, Türkiye'nin elektrik ihtiyacının belli bir kısmını karşılamak amacı ile kullanılacaktır.

Bu çalışmada önce nükleer enerji santrallerinin çalışma prensibi ile birlikte Mersin-Akkuyu bölgesinde kurulması planlanan santral hakkında genel bilgi verilmiştir. Sonrasında nükleer enerji santrallerle ilgili yatırım ve işletme maliyet analizleri yapılarak bu tür santrallerin enerji üretim maliyet değerleri, ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışmanın sonunda da ülkemizde farklı iki durum (mevcut ve alternatif) için kurulması varsayılan nükleer santralin maliyet değeri önce birbirleriyle sonrasında kömür, doğalgaz, rüzgâr gibi farklı yakıtları kullanan elektrik santrallerinin maliyetleri ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akkuyu, Nükleer Enerji, Nükleer Santral, Nükleer Reaktör, Maliyet Analizi, Akkuyu Nükleer Güç Santrali, Enerji Maliyeti Analizi

**ABSTRACT:** Türkiye is one of the countries that has increased its energy consumption the most in recent years, and it is expected to increase its consumption even more in the coming years. Therefore, our country's future economic, social, and other successes will largely depend on its ability to provide solutions to energy problems.

Nuclear energy, which has an important place in energy production worldwide, is a type of energy obtained from the nucleus of the atom and has three different types: radioactivity, fusion, and fission. With the agreement made by Türkiye and the Russian Federation within the scope of Law No. 6007, Türkiye will be among the countries that have a nuclear power plant in the coming years. According to the agreement, a nuclear power plant will be established in the Mersin/Akkuyu region by a foreign company under the auspices of the Russian government. The nuclear power plant, whose total installation cost will be 22 billion USD, will use the newly developed VVER-1200 type PWR (Pressurized Water Reactor) reactor. Each of the reactors in question has a power of 1200 MW, and it is planned to install four in total. Therefore, when the power plant is established, the total power will be 4800 MW. The electricity produced by the reactors, which are estimated to have a lifespan of 60 years by the manufacturing company, will be used to meet some of our country's electricity needs.



In this study, the main operational principles of a nuclear power plant are introduced, and general information is given on the nuclear power plant that is planned to be constructed in the Mersin-Akkuyu region. Energy production costs for this kind of power plant are determined by carrying out investment and operational cost analyses. At the end of the study, the cost value of the nuclear power plant, which is assumed to be established under different conditions in our country, was compared first with each other and then with the costs of power plants using different fuels such as coal, natural gas, and wind..

**Keywords:** Akkuyu, Nuclear Power Plant, Nuclear Reactor, Cost Analysis, Energy Cost Analysis of Akkuyu Nuclear Power Plant

## 1. GİRİŞ

Türkiye son yıllarda enerji tüketimini en çok artıran ülkelerden biri olup, tüketimini önümüzdeki yıllarda daha da artırması beklenmektedir. Bu nedenle ülkemizin gelecekteki ekonomik, sosyal vd. alanlardaki başarısı, büyük oranda enerji sorununa çözüm üretebilme yeteneğine bağlı olacaktır [1].

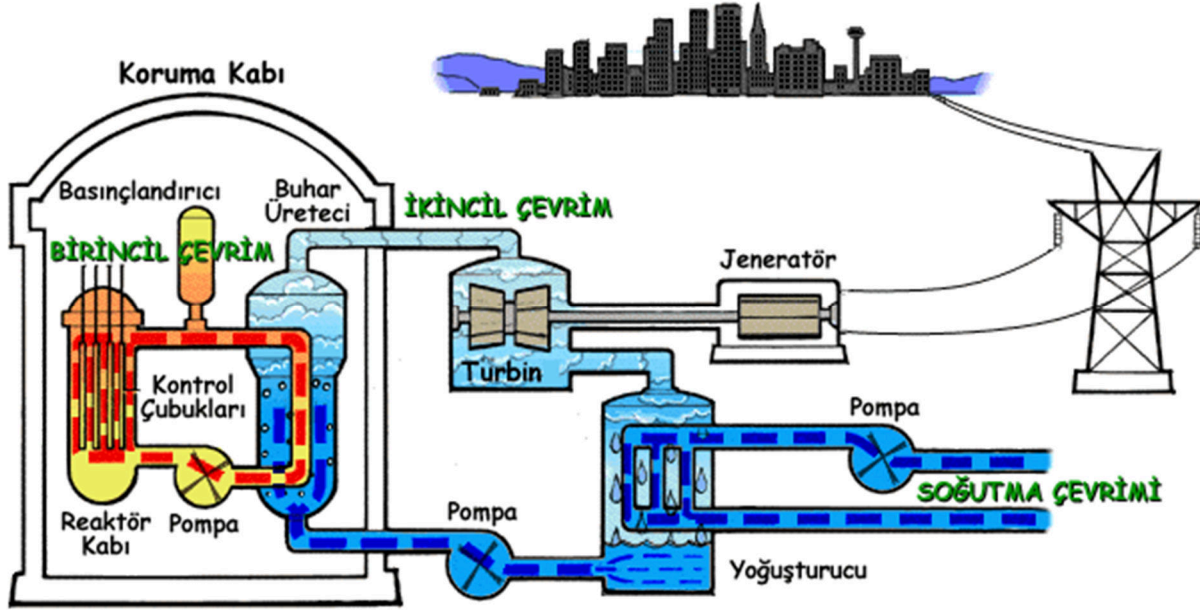
Gelişmekte olan ülkelerdeki hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, enerjiye olan talebin artmasına neden olmaktadır. Enerji, üretim için zorunlu bir faktör olmakla birlikte tüketimi, bir ülkenin ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyelini yansıtan, temel göstergelerden biridir. Ayrıca enerji tüketimi ile sosyal kalkınma arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bununla birlikte ekonomik gelişme ve refah artışı, enerji tüketimini artırmaktadır [2].

Dünyada enerji üretiminde önemli bir yere sahip olan nükleer enerji, atom çekirdeğinden elde edilen bir enerji biçimidir. Radyoaktivite, füzyon ve fisyon olmak üzere üç farklı yapıdadır.

Radyoaktivite atom çekirdeğinin, tanecikler ve elektromanyetik ışınlar yayarak zaman içerisinde kendi kendine parçalanmasıdır. İşlem sırasında ortaya çıkan enerji, radyasyon olarak isimlendirilmektedir. Nükleer enerjinin bu türü daha çok uydularda, uzay sondalarında vb. uzaya gönderilen ve insansız çalışan sistemlerde kullanılmaktadır.

Füzyon, iki hafif elementin atomlarının nükleer reaksiyon sonucunda birleşerek, daha ağır bir element oluşturmasıdır. Füzyon reaksiyonlarının meydana geldiği reaktöre, Güneş örnek verilebilir. Evrendeki yıldızların enerji kaynağı olarak da bilinen füzyonun başlatılabilmesi için elementlerin çekirdekleri arasındaki itme kuvvetini yenebilecek büyüklükteki bir enerji gerekmektedir. Bu enerji ise çekirdek sıcaklığını yaklaşık olarak 100 milyon °C'ye getirmekle mümkündür. Günümüzde Dünyanın çeşitli yerlerinde bulunan araştırma merkezlerinde, füzyondan enerji elde etme yöntemleri henüz araştırma aşamasındadır.

Fisyon ise kütle numarası yüksek bir elementin çekirdeğinin parçalanarak, kütle numarası daha küçük iki elemente dönüşmesi olarak adlandırılır. Bu işlem sırasında açığa çıkan enerji fisyon enerjisi olarak tanımlanır. Şekil 1'de bu prensibe göre çalışarak elektrik ve ısı elde etmek için kullanılan bir nükleer santralin şematik resmi verilmiştir. Bu tip nükleer santrallerde U-235 atomları parçalanmaya zorlanarak yani fisyon reaksiyonuna tabii tutularak, olağanüstü miktarda enerji açığa çıkmasına neden olunmaktadır. Bunun için önce uranyum yakıt hücreleri, çubuklar haline getirilip suya batırılır. Sonra fisyon reaksiyonu başlatılır. Bu reaksiyon suyu ısıtarak buhar haline getirir. Meydana gelen buhar, türbini, türbin de jeneratörü döndürerek elektrik üretilir [3].



Şekil 1: Bir nükleer santralin çalışma şeması [4].

Tablo 1’de farklı enerji kaynaklarının birim miktarları için enerji değerleri verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere nükleer enerji diğer kaynaklara göre oldukça yüksek enerji değerine sahiptir. Bu durum günümüzde nükleer enerjiden yararlanma nedenini net olarak ortaya koymaktadır [5].

Tablo 1: Birim miktar başına enerji miktarı [5].

Yakıt Türü	Enerji Miktarı
Nükleer	$2,3 \times 10^{10}$ kWh/ton
Kömür	6.944 kWh/ton
Doğal Gaz	10,62 kWh/m <sup>3</sup>
Fuel Oil	11.120 kWh/ton
Petrol	1.700 kWh/varil

Nükleer santraller, yenilenebilir enerji kaynaklı santraller gibi iklim koşullarına, kömür santralleri gibi yakıtın kalitesine, petrol ve doğalgaz santralleri gibi rezerv miktarına bağlı olmayan ve elektrik

üretiminde süreklilik gösteren santrallerdir [6]. Bu santrallerin güvenlik kontrolleri, bağımsız lisanslama kuruluşları tarafından son derece katı kurallara göre yapılmaktadır ve işletmede oldukları süre boyunca, sürekli denetim altındadır. Bu nedenle nükleer santrallerin çevre ve insana zarar verebilecek şekilde kaza yapma riski, günümüzde kullanılan diğer teknolojik ürünlere göre daha düşüktür. Kaldı ki nükleer santrallerin projelendirilmesi, tasarlanması, kurulması, işletilmesi ve sökümü esnasında çok ciddi güvenlik önlemlerinin alınması zorunludur [7,8]. Ayrıca sera gazı salınımı konusunda da en temiz seçenek olarak görülmektedirler. Bu bağlamda nükleer enerjinin iklim değişikliğine sebep olan atmosferdeki sera gazı miktarının azaltılmasında, büyük bir rolü vardır. Günümüzde nükleer santrallerin kullanılmasıyla elektrik üretiminin neden olduğu sera gazı salınımının, yaklaşık olarak %17 oranında azaldığı belirtilmektedir [9]. Tablo 2’den görüldüğü üzere dünyada 30 ülkede 435 adet elektrik üretme amaçlı nükleer santral mevcuttur.

**Tablo 2:** Ülkelere göre kurulmuş ve kurulmakta olan reaktör sayıları [10].

Ülke	Faaliyette		Yapım Aşamasında	
	Sayı	Elek. Üretimi (MW)	Sayı	Elek. Üretimi (MW)
Arjantin	3	1.627	2	717
Ermenistan	1	375	0	0
Belarus	0	0	1	1.109
Belçika	7	5.927	0	0
Brezilya	2	1.884	1	1.245
Bulgaristan	2	1.906	0	0
Kanada	19	13.500	0	0
Çin	21	16.890	28	27.756
Çek Cumhuriyeti	6	3.804	0	0
Finlandiya	4	2.752	1	1.600
Fransa	58	63.130	1	1.600
Almanya	9	12.068	0	0
Macaristan	4	1.889	0	0
Hindistan	21	5.308	6	3.907
İran	1	915	0	0
Japonya	48	42.388	2	1.325
Güney Kore	23	20.710	5	6.370
Meksika	2	1.330	0	0
Hollanda	1	482	0	0
Pakistan	3	690	2	630
Romanya	2	1.300	0	0
Rusya	34	24.654	9	7.371
Slovakya	4	1.815	2	880
Slovenya	1	688	0	0
Güney Afrika	2	1.860	0	0
İspanya	7	7.121	0	0
İsveç	10	9.474	0	0
İsviçre	5	3.308	0	0
Ukrayna	15	13.107	2	1.900
Birleşik Arap Emirlikleri	0	0	3	4.035
İngiltere	16	9.231	0	0
Amerika Birleşmiş Devletleri	104	101.465	5	5.633
<b>Toplam</b>	<b>435</b>	<b>371.598</b>	<b>70</b>	<b>66.078</b>

## 2. AKKUYU NÜKLEER GÜÇ SANTRALİ ANTLAŞMASI

Türkiye Rusya Federasyonu ile 6007 Sayılı Kanun kapsamında yapmış olduğu anlaşmayla önümüzdeki yıllarda, nükleer bir santrale sahip olan ülkeler arasında yer alacaktır. Söz konusu anlaşmaya göre Rusya Federasyonu Hükümeti himayesinde kurulacak olan bir şirket tarafından Mersin/Akkuyu bölgesinde nükleer santral kurulacaktır. Toplam yatırım maliyeti 22 Milyar \$ olacak olan nükleer santralde, yeni geliştirilen VVER1200 tipi PWR (Basınçlandırılmış Su Reaktörü) reaktörleri kullanılacaktır. Söz konusu reaktörlerin her biri 1.200 MW gücünde olup toplamda dört adet kurulması planlanmaktadır. Dolayısıyla santral kurulduğunda, toplam güç 4.800 MW olarak gerçekleştirilecektir. Üretici şirket tarafından 60 yıl ömür biçilen reaktörlerin çalışma süresi boyunca üretecekleri elektrik, ülkemizin elektrik ihtiyacının belli bir kısmının karşılamak amacı ile kullanılacaktır. Ayrıca anlaşma kapsamında, ülkemizden Rusya'ya nükleer santraller konusunda eğitim almak amacıyla öğrenci de gönderilmiştir. Eğitim alacak öğrenciler sonrasında yani santral işletilmeye alındığında, teknik ekibin önemli bir kısmını oluşturacaktır. Türkiye ile Rusya Federasyonu arasında nükleer santral yapımı konusunda yapılan anlaşmanın bazı önemli maddeleri aşağıda verilmiştir [11]:

- Proje şirketi Nükleer Güç Santrali (NGS) inşasının başlaması için gerekli tüm evrakların (belgeler, izinler, lisanslar vb.) hazırlanmasından itibaren yedi yıl içinde Ünite 1'i ticari işletmeye alacaktır.
- Proje Şirketi Ünite 1'in ticari işletmeye alınmasından itibaren birer yıllık aralıklarla Ünite 2, Ünite 3 ve Ünite 4'ü ticari işletmeye alacaktır.
- TETAŞ (2018'de Elektrik Üretim Anonim Şirketi'ne devredildi) santraldeki Ünite 1 ve Ünite 2'nin ürettiği elektriğin % 70'ini, Ünite 3 ve Ünite 4'ün ürettiği elektriğin % 30'unu 15 yıl boyunca kWh'i en az 12,35 ABD sentinden, KDV hariç satın almayı garanti eder.

- Proje şirketi, TETAŞ tarafından satın alınan elektrik için *Kullanılmış Yakıt ve Radyoaktif Yakıt Yönetimi Hesabına* kWh başına 0,15 ABD senti ve *İşletmeden Çıkarma Hesabı* için yine kWh başına 0,15 ABD senti tutarında bir ödeme yapar.
- Elektrik fiyatındaki yıllık değişim, proje şirketi tarafından hesaplanır. Bu miktar 15,33 ABD senti/kWh'i geçemez.
- Her bir güç ünitesinin ticari işletmeye alınmasından 15 yıl sonra proje şirketi net karının % 20'sini Türk tarafına verecektir.
- Nükleer yakıt, proje şirketi tarafından tedarikçilerden temin edilecektir.
- Proje Şirketi santralin söküm ve atık yönetiminden sorumludur.

## 3. NÜKLEER SANTRALLERDE ENERJİ MALİYETİ

Nükleer santrallerdeki yakıt maliyet hesabı, fosil yakıtlı santrallere göre daha karmaşıktır. Zira nükleer yakıt, reaktöre girmeden önce ve reaktörlerde kullanıldıktan sonra çeşitli işlemlere tabii tutulmaktadır. Bütün bu işlemlerden kaynaklanan giderlerin yıllık toplam yakıt maliyetlerine yansıtılması gerekmektedir. Bu nedenle bu santrallerde yakıt maliyetinin elde edilmesinde, *değere getirilmiş veya seviyelendirilmiş maliyet* metodu tercih edilmektedir [12].

Şekil 2'de nükleer santrallerde, enerji maliyetine etki eden unsurlar gösterilmiştir. Burada *Sermaye*: santralin kurulma süresince yapılan harcamalar ile santralin ömrünü tükettikten sonra sökümünde yapılan harcamaların toplamını yansıtmaktadır. *Başlangıç Sermayesi* altında bulunan *Esas Maliyetler*: santralin inşaat giderlerini; *Mal Sahibi Maliyetleri*: mal sahibinin idari, müşavirlik vb. dolaylı giderlerini temsil etmektedir. *Ek Maliyetler* ise inşaat süresince faiz, eskalasyon ve beklenmeyen giderleri temsil etmektedir.

Nükleer santrallerin yıllık sermaye giderleri hesaplanırken santralin ömrü dikkate alınmak koşulu ile çeşitli amortisman (yıpranma payı) metodları kullanılmaktadır.

Yatırımdan gelen yıllık sermaye (sabit) giderleri, aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır [9].

$$C_s = \frac{Y_T K}{E} \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{m} \quad (2)$$

$C_s$  (\$/kWh) yıllık sabit sermaye lerini;  $Y_T$  (\$) toplam yatırım tutarını,  $E$  (kWh) yıllık enerji üretimini;  $K$  sabit maliyet oranını,  $m$  (yıl) ise santralin ömrünü göstermektedir.

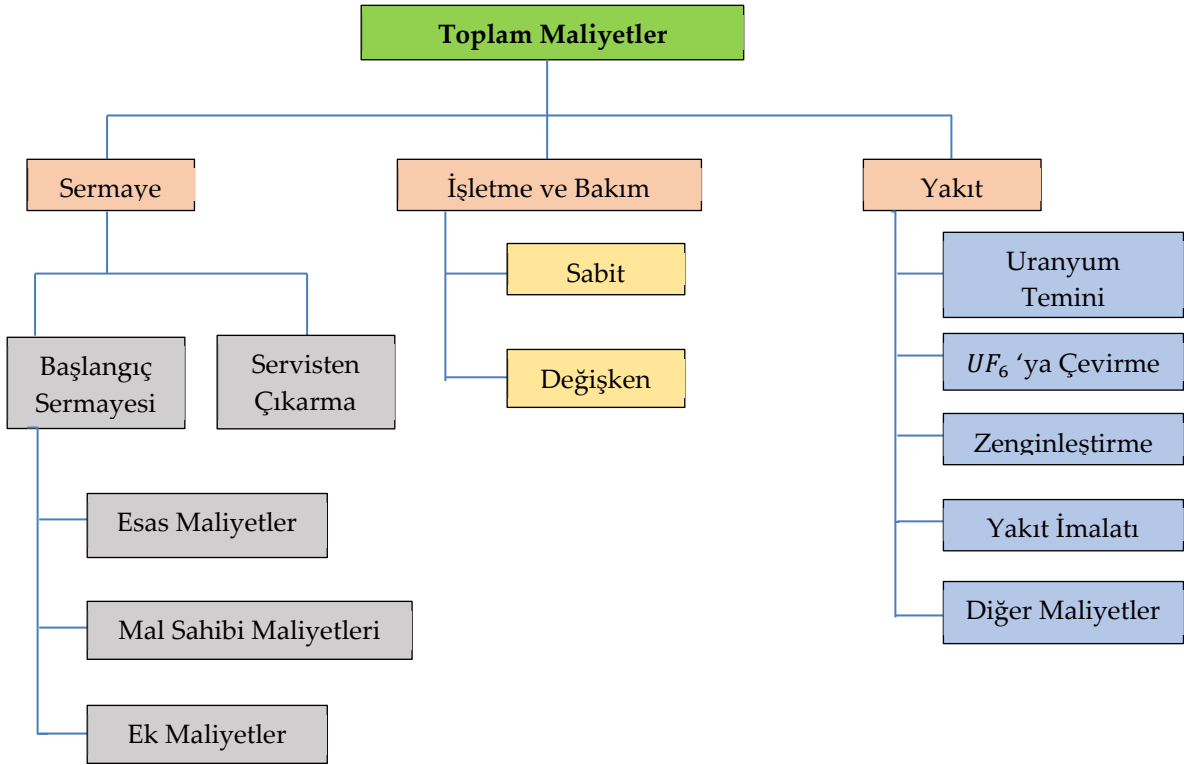
Bir nükleer santralde işletme ve bakım giderleri, toplam üretim giderlerinin küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Ayrıca işletme ve bakım maliyetlerini sermaye ve yakıt giderleri gibi genel formüllerle ifade etmek mümkün değildir. Zira işletme ve bakım giderleri; santral tipine ve gücüne, işletme şartlarına, santrali işleten kuruluşun yapısına ve genel muhasebe sistemine bağlı olarak değişmektedir. Ancak genel olarak nükleer

santrallerde işletme ve bakım giderleri, sabit maliyetler ile değişken maliyetlerin belli bir oranı şeklinde kabul edilmektedir [12, 13].

Yakıt giderleri uranyumun sahadan doğal olarak çıkarılmasından başlayarak bertaraf edilme sürecine kadar yapılan işlemlerin, toplam maliyetlerini kapsamaktadır. Nükleer santrallarda kWh başına yakıt maliyeti aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [13]:

$$Y_K = \frac{C_y + M_y + I_y}{P_e(365)(24)(LF)} \quad (3)$$

$Y_K$ , kWh başına yakıtın maliyetini,  $C_y$  (\$) yıllık yakıt giderini,  $M_y$  (\$) ilk yüklemenden gelen yıllık sabit giderleri,  $I_y$  (\$) faiz miktarını,  $P_e$  (MWe) santralin gücünü, LF de yük faktörünü (%) ifade etmektedir.



Şekil 2: Nükleer santrallerde yıllık maliyetler [12,13].

Nükleer santrallerde yıllık yakıt maliyeti [9]:

$$C_y = \frac{P_e(365)(24)(LF)(N_y - N_i)}{\eta B_u} \quad (4)$$

$N_y$  ve  $N_i$  ise sırası ile kullanılmamış ve kullanılan yakıtların \$/kg olarak değerini,  $\eta$  santralin genel verimini,  $B_u$  ise MWgün/ton cinsinden yakıtın ısıl değerini ifade etmektedir.

Santralin termik gücü [13]:

$$P_t = \frac{P_e}{\eta} \quad (5)$$

$P_t$  (MWth) santralin termik gücünü ifade etmektedir.

İlk yüklemenden gelen yıllık sabit giderler [13]:

$$M_y = (T_i - T_y)N_y C_t \quad (6)$$

$T_i$  (ton U) reaktöre yapılan yakıtın ilk yükleme miktarını,  $T_y$  (ton U) reaktöre yapılan yıllık yakıt yükleme miktarını,  $C_t$  ise sermaye itfa faktörünü ifade etmektedir.

İlk yükleme miktarı [13]:

$$T_i = \frac{P_t}{P_s} \quad (7)$$

$P_s$  (MW/ton U) uranyum yakıtının spesifik gücünü ifade etmektedir.

Yıllık Yakıt yükleme miktarı [13]:

$$T_y = \frac{P_t(365)(24)(LF)}{B_u} \quad (8)$$

Sermaye itfa faktörü [13]:

$$C_t = \frac{d}{1-(1+d)^{-m}} \quad (9)$$

$d$  iskonto (indirim) oranını ifade etmektedir.

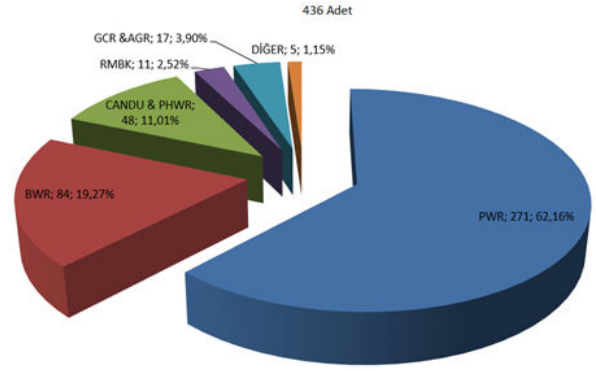
Faiz ( $I_y$ ) [13]:

$$I_y = T_y i [N_y(0.5 + k_1) + N_i(0.5 + k_2)] \quad (10)$$

$i$  faiz oranını,  $k_1$  ve  $k_2$  ise sırasıyla kullanılmış yakıt ile depoda bekleyen kullanılmamış yakıtın bekleme sürelerini göstermektedir.

#### 4. MALİYET ANALİZLERİ

Günümüzde dünyanın pek çok ülkesinde farklı tipte nükleer santraller kullanılmaktadır. Şekil 3'den de görüldüğü üzere dünyada en çok kullanılan nükleer santraller, basınçlı su reaktörü (PWR) kullanan santrallerdir. Bunlardan sonra en çok kullanılan santraller ise kaynar su reaktörleri (BWR) ve basınçlı ağır su reaktörleri kullanan santrallerdir (CANDU&PHWR).



Şekil 3: Dünyada nükleer santrallerdeki reaktör dağılımı [14].

PWR tipi santrallerin en çok tercih edilmesinin nedeni bu tip santrallerde güvenlik ve kontrolün diğer santrallere göre daha yüksek seviyede olmasındandır. BWR tipi santrallerin kurulum ve söküm maliyeti, diğer santrallere göre daha düşüktür. CANDU (Kanada Döteryum Uranyum) tipi santraller ise doğal uranyumu yakıt olarak kullanma özelliğine sahiptir [15, 16].

Bu çalışmada Akkuyu'da kurulması planlanan VVER-1200 tip PWR reaktörü baz alınarak iki farklı durum için ekonomik analiz yapılmıştır. İlk durumda, Türkiye Cumhuriyeti ile Rusya Federasyonu arasında yapılan mevcut anlaşma gereği, santralin kurulumu Rusya Federasyonu Devletine bağlı bir şirket tarafından gerçekleştirilecek ve yine bu şirket tarafından işletilerek üretilen elektriğin, ülkemize satılması esas alınarak maliyet analizi yapılmıştır. İkinci durumda ise aynı tip bir nükleer santralin Türkiye Cumhuriyeti Devletince kurularak işletildiği varsayımına dayalı olarak maliyet analizi yapılmıştır. Söz konusu analizler aşağıda *Mevcut Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul I)* ve *Alternatif Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul II)* başlıkları altında verilmiştir. Analiz sonucu elde edilen maliyet değerleri, önce kendi aralarında, sonra da kömür, doğalgaz, nükleer gibi farklı yakıtları kullanan elektrik santralleri ile karşılaştırılmıştır.

##### 4.1. Mevcut Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul I)

Bu analizde T.C. Devleti ile Rusya Federasyonu Devleti tarafından yapılan mevcut anlaşma koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

Anlaşmaya göre santral Rus firması tarafından gerçekleştirilecektir. Yapılan analizde santralin toplam yatırım bedeli olan 22 Milyar \$ finansmanın, bir banka kredisi ile karşılanacağı, banka kredisinin

geri ödeme süresinin 15 yıl ve faiz oranının da aylık % 0,6 olacağı varsayılmıştır. Kurulacak reaktörlerin ömrü ise anlaşma gereği ve Tablo 3'de görüldüğü üzere 60 yıl alınmıştır.

**Tablo 3:** VVER 1200 Reaktör ve santralinin özellikleri [17].

İsmi	Reaktör Tipi	Nötron Spektrumu	Termodinamik Döngü (çevrim)
VVER-1200 (V-491)	Basınçlı Su Reaktörü (PWR)	Termal Nötron	Rankine
Reaktör Ömrü	Soğutucu	Reaktör Isı Kapasitesi	Santral Brüt Elektrik Kapasitesi
60 Yıl	Su	3.200 MWth	1.170 MWe
Santral Net Elektrik Kapasitesi	Reaktör Net Verimliliği	Santral Kapasite (Kullanım) Faktörü	Tasarım
1.082 MWe	33,9 %	> 90 %	Gidropress

Bu verilerden yararlanarak maliyetler hesaplanmıştır.

**Sermaye Gideri:** Aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır [18]:

$$\text{Sermaye gideri} = \text{Kredi tutarı} \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} n \quad (11)$$

i yüzde olarak faiz oranını, n ise taksit sayısını (180 ay) ifade etmektedir.

Sermaye gideri =

$$(22 \times 10^9) \frac{(6 \times 10^{-3})(1 + (6 \times 10^{-3}))^{180}}{(1 + (6 \times 10^{-3}))^{180} - 1} (180) = 36,04 \text{ milyar ABD \$}.$$

**Söküm Maliyeti:** Nükleer santrallerin giderlerinden biri de ömürleri tamamlandıktan sonra sökülerek radyoaktif parçaların bertaraf edilmesidir. Nükleer santrallerin söküm maliyeti, santralin başlangıç sermayesinin belli bir oranıyla değişmekle birlikte analizde %10 alınmıştır [19]. Bu değer,  $22 \times 0,1 = 2,2$  milyar ABD \$ olarak hesaplanmıştır.

**Yıllık Sermaye (Sabit) Maliyeti:** 1 ve 2 eşitliklerinden yararlanılarak,

$$K = \frac{1}{60}$$

$$C_S = \frac{(36.04 \times 10^{11} + 2.2 \times 10^{11})(1/60)}{(1082 \times 10^3)(4)(24)(365)(0,9)} = 1,87 \text{ ABD cent/kWh}$$

**İşletme ve Bakım Maliyeti:** Bir nükleer santralde işletme ve bakım maliyeti, toplam üretim maliyetinin küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Bununla beraber işletme ve bakım maliyetinin sermaye ve yakıt maliyetleri gibi genel formüllerle ifade edilmesi, zor görünmektedir [20]. Dolayısıyla tesisin açılıp işletilmeye başlanmasından önce bu maliyeti kesin bir değerle ifade etmek, mümkün değildir.

Analizde ABD Enerji Bakanlığının desteklediği openEI'dan alınan ve Tablo 4'de görülen verilerin ortalama değerleri kullanılmıştır.

**Tablo 4:** Enerji türlerine göre maliyet verileri [20].

Santral Tipi	Enerji Maliyeti (ABD \$/MWh)			Ana Sermaye Maliyeti (1000x ABD \$/kW)			Sabit İşletme Maliyeti (ABD \$/kW)			Değişken İşletme Maliyeti (ABD \$/MWh)			Kapasite Kullanım Faktörü (%)		
	Mak	Med	Min	Mak.	Med	Min	Mak	Med	Min	Mak	Med	Min	Mak	Med	Min
Rüzgâr	120	60	20	2,6	1,57	1,13	60	10,95	10,9	23	6,45	5,02	50,4	38	18,4
PV	590	280	150	9,5	5,1	2,5	110	32,03	6,44	0	0	0	28	21	15,5
Jeotermal	140	60	40	5,94	2,82	1,63	229	155,4	68,3	0	0	0	95	85	75
Hidroelek	120	20	20	4	1,32	0,5	75	13,14	12,7	5,94	3,2	2,42	93,2	93,2	35
Doğalgaz	70	50	10	1,68	0,88	0,51	45,6	13,71	5,5	8,09	2,86	1,29	93	84,6	40
Kömür	120	50	10	8,4	1,92	0,56	33,5	27,5	13,1	5,9	3,7	1,62	93	84,6	80
Nükleer	120	60	40	8,2	3,1	2,28	127	85,66	12,8	6	0,49	0,42	90,2	90	85

Sabit işletme ve bakım maliyeti Tablo 3 ve Tablo 4'den yararlanılarak aşağıdaki gibi hesap

edilmiştir. Sabit ve değişken işletme maliyeti hesabında medyan değerleri kullanılmıştır.

#### Sabit İşletme ve Bakım Maliyeti:

$$\frac{(85.66 \times 10^2 \text{ ABD Cent/kW})(1082 \times 10^3 \text{ kW})(4 \text{ adet reaktör})}{(1082 \times 10^3 \text{ kW})(4 \text{ adet reaktör})(24 \text{ saat/gün})(365 \text{ gün/yıl})(0,9 \text{ kko})} = 1,09 \text{ ABD cent/kWh}$$

#### Değişken İşletme ve Bakım Maliyeti:

$$\frac{0.49 \times 10^2 \text{ ABD Cent/MWh}}{10^3 \text{ kWh/MWh}} = 0,05 \text{ ABD cent/kWh}$$

Nükleer yakıt olarak kullanılan uranyumun zenginleştirilme işleminin yüksek maliyetli olması, enerji maliyetini etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Yapılan analizde Tablo 5'de verilmiş olan (2014 yılı) fiyat verileri kullanılmış ve uranyumun %5 zenginleştirilerek reaktör yakıtı olarak kullanılacağı varsayılmıştır [18, 21].

Tablo 5'den elde edilen verilere göre reaktörde kullanılacak olan nükleer yakıtın 1 kg'ı 1.590,68 \$ olarak elde edilmiştir.

kWh başına yakıt maliyeti Eşitlik 3'den :

$$Y_K = \frac{120.23 \times 10^8 + 23.42 \times 10^8 + 6.22 \times 10^8}{(1082)(4)(1000)(24)(365)(0.9)} = 0,44 \text{ ABDcent/kWh}$$

Yıllık yakıt maliyeti Eşitlik 4'den:

$$C_y = \frac{(1170)(4)(365)(24)(0.9)(1590.68)}{(0.339)(60)(24)} = 120,23 \text{ milyon ABD doları}$$

Eşitlik 6 kullanılarak ilk yüklemeye gelen yıllık sabit maliyetler:

$$M_y = (347.83 \times 10^3 - 70.08 \times 10^3)(1590.68)(0.05) = 23,42 \text{ milyon ABD doları}$$

İlk yükleme miktarı eşitlik 7'den yararlanılarak:

$$P_s = 36.8 \text{ MW/ton Uranyum}$$

$$T_i = \frac{12800}{36.8} = 347,83 \text{ ton Uranyum}$$

Isıl güç dört reaktör için toplam 12.800 MWth olarak Tablo 3'den alınır.

Eşitlik 8'den yararlanılarak yıllık yakıt yükleme miktarı:

$$T_y = \frac{(12800)(365)(24)(0.9)}{(60)(24)(1000)} = 70,08 \text{ ton U}$$

Sermaye itfa faktörü Eşitlik 9'dan (ıskonto oranı %5 alınmıştır):

$$C_t = \frac{0.05}{1 - (1 + 0.05)^{-60}} = 0,053$$

Faiz Eşitlik 10'dan yararlanılarak:

$$I_y = (70.08 \times 10^3)(1.006^{12} - 1)[(1590.68)(0.5 + 0.25)] = 6,22 \text{ milyon ABD \$}$$



Enerji Maliyeti:

$$1,87 + 1,09 + 0,05 + 0,44 = 3,45 \text{ cent/kWh}$$

Elde edilmiştir. 3,45 ABD cent/kWh maliyet değerinde üretilecek elektrik, yapılan anlaşma koşullarına göre Rus şirketince Türkiye Cumhuriyeti Devletine 12,35 ABD cent/kWh'den satılacaktır. Anlaşmada belirtilen başka bir önemli

husus da santralin kurulumundan itibaren ilk 15 yıl üretilecek elektriğin yarısının, Türkiye Cumhuriyeti Devletince alınmasının zorunlu olmasıdır. Bu bağlamda Türkiye'nin yıllık, 15 yıllık ve santral ömrü boyunca satın almakla yükümlü olduğu ve istediği takdirde satın alabileceği toplam elektrik miktarı ve değerleri Tablo 6'da detaylı olarak verilmiştir.

**Tablo 5:** Bir ton zenginleştirilmiş uranyumun maliyet analizi [18, 21].

Maliyet Parametreleri		İmalat Parametreleri		Malzeme Parametreleri			Maliyet (Bin ABD \$)	
<i>İşlem</i>	<i>Market Fiyatı</i>	Çevrim Kaybı	%0,5	<i>Giren Doğal Uranyum</i>	11,98 t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (=10,16 t U)	Doğal Uranyum	745,97	
Doğal Uranyum	28,25 ABD\$/lb U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Zenginleştirme (U-235)	%5	<i>İşlem</i>	<i>Ürün</i>	<i>Kayıp</i>	Çevrim	76,18
Çevrim	7,5 ABD\$/kg U			Çevrim	14,95 t UF <sub>6</sub> (=10,11t doğal U)		Zenginleştirme	768,53
Zenginleştirme	95 ABD\$/SWU			Zenginleştirme (8.089,80 SWU)	1,48 t UF <sub>6</sub> (=1t zengin U)	13,47 t UF <sub>6</sub> (=9,11 t U-233)	Toplam	1590,68

**Tablo 6:** Türkiye'nin kurulacak nükleer santralden alması zorunlu olan ve alabileceği elektrik miktar ve fiyatları (12,35 ABD cent/kWh sabit kabul edilmiştir).

	Zorunlu Minimum Elektrik Miktarı (GWh)	Zorunlu Alınacak Elektriğe Ödemesi Gereken Tutar (Milyar ABD \$)	Satın Alınabilecek Maksimum Elektrik Miktarı (GWh)	Maksimum Elektrik Miktarına Ödemesi Gereken Bedel (Milyar ABD \$)
1 Yıl	17.061	2,11	34.122	4,21
15 Yıl	255.915	31,61	511.830	63,21
60 Yıl	255.915	31,61	2.047.320	252,84

#### 4.2. Alternatif Durum İçin Maliyet Analizi (Koşul II)

Bu analizde nükleer santralin hizmet bedeli karşılığında kurulması durumundaki elektrik maliyeti elde edilmeye çalışılmıştır. Santralin yapım maliyeti 22 milyar dolar olarak kabul edilmiş, santrali yapacak olan kuruluşun bu değere genel fizibilite yaklaşımlarına dayalı olarak %30 kâr

$$\text{Sermaye gideri} = (22 \times 10^9)(1,3) \frac{(6 \times 10^{-3})(1 + (6 \times 10^{-3})^{180})}{(1 + (6 \times 10^{-3})^{180}) - 1} (180) = 46,85 \text{ milyar ABD \$}.$$

Söküm maliyeti %30 kâr oranında, hizmet bedeli karşılığı olarak 2,86 milyar \$ elde edilmiştir.

Yıllık sermaye (sabit) maliyeti Eşitlik (1) ve (2)'den yararlanarak,

$$K = \frac{1}{60}$$

$$C_s = \frac{(46,85 \times 10^{11} + 2,86 \times 10^{11})(1/60)}{(1082 \times 10^3)(4)(24)(365)(0,9)} = 2,43 \text{ ABD cent/kWh}$$

Santralin işletme ve bakım maliyetleri ile yakıt maliyeti ilk analiz ile aynı olacaktır. Bu Durumda enerji maliyeti;

2,43 + 1,09 + 0,05 + 0,44 = 4,01 ABD cent/kWh olarak elde edilir.

#### 5. DEĞERLENDİRME

Tablo 7'de analiz sonucu elde edilen değerler ile kömür, doğalgaz ve hidroelektrik santrallerinin Tablo 4'den alınan maliyet değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere hidroelektrik santrallerden elde edilen elektrik enerjisi maliyeti olan 0,93 cent/kWh, diğer santrallere göre en düşüktür. Bu santrallerden sonra en düşük elektrik, nükleer santrallerden elde edilmektedir. Burada iki farklı durum karşımıza çıkmaktadır. Birinci durumda santralin Rusya Federasyonu ile yapılan anlaşmaya göre gerçekleşmesi durumunda, 3,45 ABD cent/kWh'e üretilecek elektrik, Türkiye Cumhuriyeti Devletine 12,35 ABD cent/kWh'e satılacaktır. Santralin Türkiye Cumhuriyeti Devletince yapılması durumunda ise söz konusu bedel, 4,01 ABD

eklediği, kabul edilmiştir. Hizmet bedelinin geri ödeme süresi 15 yıl ve faiz oranı da aylık %0,6 kabul edilmiştir. Kurulacak olan dört reaktörün ömrü ilk analizde olduğu gibi 60 yıl alınmıştır. Bu verilere göre sermaye gideri:

cent/kWh olacaktır. Doğalgaz ve kömür termik santralleri ise sırası ile 5,80 ABD cent/kWh ve 6,46 ABD cent/kWh ile en pahalı elektrik üretimini gerçekleştirmektedir.

Ülkemiz ve Rusya Federasyonu için mevcut ve alternatif durumda ortaya çıkan maliyet, Şekil 4'te yıllara bağlı olarak gösterilmiştir.

#### 6. SONUÇ

Basına yansıyan bilgilere göre Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin (NGS) birinci ünitesinin tüm donanımlarının çalışması ile ilgili testlere başlanması, olumlu bir gelişmedir. Santralin kısa sürede tam kapasitede üretime geçmesi, beklenen ve arzu edilen bir durumdur. Tüm bunlara rağmen ülkemizin öncelikle enerji üretimi noktasında kendi kaynaklarına dayalı bir politika izlemesi ve bir yapı ortaya koyması gerek cari açığın kapanması gerekse de enerji bağımlılığının azaltılması açısından önemlidir.

Bu çalışmada mevcut anlaşma ile (Koşul I) Akkuyu'da Rus şirketi tarafından kurulacak olan santralin ürettiği elektriğin, ülkemizin almakla yükümlü olduğu miktarının (üretimin %50'si) ülkemize maliyeti 15 yıl için 31,61 milyar ABD \$. Üretimin tamamının ülkemize olan maliyeti ise yine 15 yıl için toplam 63,21 milyar ABD \$. Alternatif durumda ise yani santralin hizmet bedeli karşılığında, Türkiye tarafından kurulması halinde (Koşul II), 15 yıllık işletme, bakım ve yakıt maliyetleri ile santralin kurulum ve söküm maliyetleri toplamı, yaklaşık olarak 60,63 milyar ABD \$ olarak hesaplanmıştır. İki değer arasında 2,58 milyar ABD \$ fark vardır. Bu miktar ülkemiz

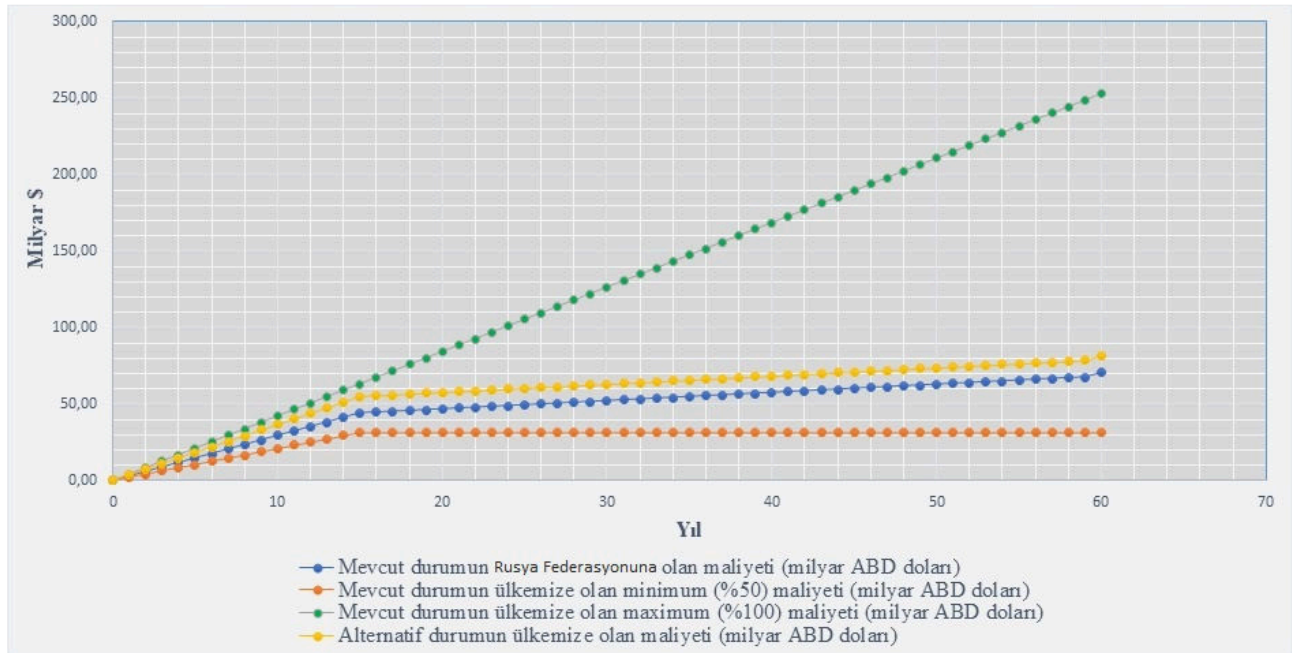
açısından önemlidir. Ayrıca santralin hizmet bedeli karşılığı kurulumu, hem santralin ülkemize ait olması hem de ucuz elektrik üretimi için daha uygun olduğu görülmektedir. Kaldı ki aynı santralin elektrik üretimine ve diğer sektörler

vereceği katkı ile tecrübenin, ülkemiz ekonomisi açısından önemli olacağı da bir gerçektir.

Dış ticaret açığı miktarının yaklaşık olarak enerji ithalatı değerine eşit olduğu ülkemiz için farklı avantajların değerlendirilmesi oldukça önemlidir.

**Tablo 7:** Enerji santrallerinin enerji maliyeti yönünden karşılaştırılması.

	Yatırım Maliyeti (milyar \$)	Geri Ödenmesi Gereken Ana Para (milyar \$)	Santral Söküm Maliyeti (milyar \$)	İşletme ve Bakım (sabit) Maliyeti (milyon \$)		İşletme ve Bakım Maliyeti (değişken) (milyon \$)		Ortalama Çalışma Kapasitesi (%)	Yakıt Maliyeti (milyon \$)		Toplam Maliyet (milyar \$)	ABD cent/kWh
				Yıllık	60 Yıl	Yıllık	60 Yıl		Yıllık	60 Yıl		
Hidroelektrik Santral (4.800MW)	6,33	10,60	0,00	63,07	3.784,20	125,40	7.524,00	93,20	0,00	0,00	21,91	0,93
Nükleer Santral (Rusya Federasyonu ile olan anlaşma) (1.082MWx4)	22,00	36,04	2,20	370,74	22.244,40	16,72	1.003,20	90,00	149,87	8.992,20	70,48	3,45
Nükleer Santral (%30 karla hizmet bedeli karşılığı yapıldığında) (1.082MWx4)	28,60	46,85	2,86	370,74	22.244,40	16,72	1.003,20	90,00	149,87	8.992,20	81,95	4,01
Termik Santral (Doğalgaz) (4.800MW)	4,22	7,07	0,00	65,81	3.948,60	101,74	6.104,40	84,60	1.778,63	106.717,82	123,84	5,80
Termik Santral (kömür) (4.800MW)	9,22	15,44	0,00	132,00	7.920,00	131,62	7.897,20	84,60	1.778,63	106.717,82	137,98	6,46



**Şekil 4:** Türkiye Cumhuriyeti (Ülkemiz) ve Rusya Federasyonu devleti için mevcut ve alternatif durumdaki maliyetin yıllara göre değişimi.

**Yazar Katkıları:** Her iki yazar, kaynak araştırması, hesaplamalarının yapılması, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmanın yazarları, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan eder.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] Ü. Çamdalı, V. Ş. Ediger, "Optimization of fossil fuel sources: An exergy approach", Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, vol. 29, no. 3, pp. 251-259, 2007.
- [2] E. Koç ve M.C. Şenel, "Dünyada ve Türkiye'de enerji durumu-genel değerlendirme", Mühendis ve Makina, c. 54, sy. 639, ss. 32-44, 2013.
- [3] Editors: S. B. Krivit, T.B. Kingery and J.H. Lehr, Nuclear Energy Encyclopedia: Science, Technology, and Applications, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2011.
- [4] [https://www.nukleer.web.tr/nukleer\\_santral\\_t\\_rolleri/pwr\\_ana.html](https://www.nukleer.web.tr/nukleer_santral_t_rolleri/pwr_ana.html) (Erişim: Temmuz 2024).
- [5] <http://www.nukte.org/atomenerjisi> (Erişim: Nisan 2024).
- [6] A. Baghirova, "Enerji kaynaklarında güvenlik sorunu ve nükleer santraller: Metsamor nükleer santrali örneği", Türk Dünyası Araştırmaları, c. 120, sy. 236, ss. 215-232, 2018.
- [7] E. H. Tüylüoğlu ve N. Türkan, "Nükleer güç santrallerinin Türkiye'de ve dünyada çevresel etkileri", OHS ACADEMY İş Sağlığı ve Güvenliği Akademi Dergisi, c. 6, sy.1, ss. 50-58, 2023.
- [8] B. B. Acar, "VVER-1200 tipi nükleer reaktörün kullanılmış yakıtları için depolama tesisi modeli geliştirilmesi ve maliyet analizi", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 20, ss. 362-373, 2020.
- [9] Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, "Günümüzde Nükleer Enerji", 2011, <http://kurumsalarsiv.tenmak.gov.tr/handle/20.500.12878/201>.
- [10] <http://www.iaea.org/newscenter/focus/nuclear-power> (Erişim: Ocak 2024).
- [11] <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2010/10/20101006-6.html> (Erişim: Ocak 2024)
- [12] N. Aybers ve B. Şahin, Enerji Maliyeti, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, 1995.
- [13] N. Döner, "Ticari nükleer santral modellerinin yakıt masraflarına göre elektrik üretim maliyetlerinin değerlendirilmesi", Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, c. 17, sy. 2, ss. 95-104, 2004.
- [14] <http://www.world-nuclear.org/info/nuclear-fuel-cycle/power-reactors/nuclear-power-reactors/> (Erişim: Ocak 2024)
- [15] G.H. Marcus, "Innovative nuclear energy systems and the future of nuclear power", Progress in Nuclear Energy, vol. 50, no. 2-6, pp. 92-96, 2008.
- [16] C. Mari, "The costs of generating electricity and the competitiveness of nuclear power", Progress in Nuclear Energy, vol. 73, pp. 153-161, 2014.
- [17] Status report 108 - VVER-1200 (V-491) (VVER-1200 (V-491)) (Erişim: [https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1200\(V-491\).pdf](https://aris.iaea.org/PDF/VVER-1200(V-491).pdf)).
- [18] W. Stocker, Design of Thermal Systems, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill, 1989.
- [19] A. Bobat, "Akkuyu nükleer santrali üzerine bir anket ve düşündükleri", Türkiye 10. Enerji Kongresi, c.1, ss. 283-299, 2006.
- [20] <http://en.openei.org> (Erişim: Şubat 2024).
- [21] <https://tr.investing.com/commodities/uranium-futures-historical-data> (Erişim Ağustos 2024).

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Yılan Optimizasyon Algoritması ile CEC 2019 Problem Seti ve Mühendislik Problemlerinin Çözümü

## *Solving of CEC 2019 Problem Set and Engineering Problems with the Snake Optimization Algorithm*

Merve Arslan<sup>1,\*</sup>, Gürcan Yavuz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye.

<sup>2</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye.

Geliş / Received: 11.09.2024

Kabul / Accepted: 28.10.2024

\*Sorumlu Yazar: Merve Arslan [merve.arslan@dpu.edu.tr](mailto:merve.arslan@dpu.edu.tr)

**ÖZ:** Optimizasyon problemlerinin çözümünde Meta-sezgisel algoritmaların kullanımı yaygındır. Bu çalışmada, CEC-2019 problem setinin çözümünde Yılan Optimizasyonu (Snake Optimization, SO) Algoritması kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde sık kullanılan, güncel ve başarılı sonuçlar elde edilmiş diğer optimizasyon algoritmalarından Koati Optimizasyon Algoritması (Coati Optimization Algorithm, COA), Bernstein Arama DE Algoritması (Bernstein-Search Differential Evolution, BSDE), Karşıt-Karşılıklı Öğrenme DE (Oppositional-Mutual Learning Differential Evolution, OMLDE), Ağırlıklı Diferansiyel Evrim (Weighted Differential Evolution, WDE), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), Başarı Geçmişi Uyarlaması DE (Success-History Adaptation Differential Evolution, SHADE), İsteğe Bağlı Harici Arşivle Uyarlanabilir DE (Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive, JADE), Kovaryans Matrisi Uyarlama Evrim Stratejisi (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMAES) ve Bernstein Operatörü ve Kırılmış Karşıt Karşılıklı Öğrenme Diferansiyel Evrim (Bernstein Operator and Refracted Oppositional Mutual Learning Differential Evolution, BROMLDE) ile karşılaştırılmaktadır. İlkendirme aşamasında, çözüm uzayını daha iyi keşfetmesi adına ve optimum çözüme yakınsamasının hızlandırılması açısından Latin hiperküp tekniği kullanılmaktadır. Geliştirilen yılan algoritmasının performansı CEC 2019 problem çözümünde değerlendirilmektedir. Sonuçları analiz etmek için Friedman testi kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre Yılan algoritmasının 10 problemde 6'sında rakiplerinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ek olarak Yılan Optimizasyonu ile iki adet mühendislik problemi çözümlenmektedir. Mühendislik problemi çözüm sonuçları literatürde bulunan diğer optimizasyon algoritmaları sonuçları ile kıyaslanmaktadır. Sonuç olarak Yılan Algoritması diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırıldığında rekabetçi sonuçlar vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yılan Optimizasyon Algoritması, Latin Hiperküp Örnekleme, CEC 2019, Dişli Sistemi Tasarımı Problemi, Borulu Kolon Tasarımı

**ABSTRACT:** Meta-heuristic algorithms are commonly used in solving optimization problems. In this study, the Snake Optimization (SO) Algorithm is employed to solve the CEC-2019 problem set. The obtained results are compared with other optimization algorithms that are frequently used in the literature and have achieved recent successful outcomes, including the Coati Optimization Algorithm (COA), Bernstein-Search Differential Evolution (BSDE), Oppositional-Mutual Learning Differential Evolution (OMLDE), Weighted Differential Evolution (WDE), Particle Swarm Optimization (PSO), Success-History Adaptation Differential Evolution (SHADE), Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive (JADE), Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMAES), and Bernstein Operator and Refracted Oppositional Mutual Learning Differential Evolution (BROMLDE). In the initialization phase, the Latin hypercube technique is used to explore the solution space more effectively and accelerate convergence to the optimal solution. The performance of the developed Snake Algorithm is evaluated in solving the CEC 2019 problem set. The Friedman test is used to analyze the results. According to the results, the Snake Algorithm outperforms its competitors in 6 out of 10 problems. Additionally, two engineering problems are solved using the Snake Optimization algorithm.

The results of the engineering problem solutions are compared with the results of other optimization algorithms in the literature. In conclusion, the Snake Algorithm provides competitive results when compared to other optimization algorithms.

**Keywords:** Snake Optimization Algorithm, Latin Hypercube Sampling, CEC 2019, Gear Train Design Problem, Tubular Column Design Problem

## 1. GİRİŞ

Bir problemin en uygun çözümünü bulmak için veya en iyiye yakın çözümü elde edebilmek için optimizasyon algoritmalarına başvurulmaktadır. Tam bu noktada probleme ait uygunluk fonksiyonunu optimize etmek başlıca amaç olmaktadır. Genel gerçek dünya problemlerinin veya mühendislik problemlerinin çözümü için literatürde pek çok optimizasyon algoritması mevcuttur. Bazı temel optimizasyon algoritmalarına Genetik Algoritma (Genetic Algorithms, GA) [1], PSO [2] ve Diferansiyel Evrim Algoritması (Differential Evolution, DE) [3] örnek olarak verilebilmektedir. Genel itibarıyla optimizasyon algoritmaları kullanım şekilleri veya ortaya çıkış sebepleri gibi durumlardan dolayı alt başlıklara ayrılabilir. Bu algoritmalar temelde matematiksel veya sezgisel olarak iki alt başlıkta toplanmaktadır [4].

Bu kapsamda optimizasyon algoritmalarının bir dalını da Meta-sezgisel algoritmalar oluşturmaktadır. Sezgisel algoritmaların yöntemleri bir araya getirilerek verimli bir şekilde kullanımı sonucunda Meta-sezgisel adı verilen algoritmalar geliştirilmiştir. Meta-sezgisel algoritmalar üst seviye yöntemlerdir. Etkili arama işlemleri sayesinde optimum çözüme hızlı bir şekilde varılmaktadır. Eğer çözülmek istenen problemin çözüm uzayı büyükse meta-sezgisel algoritmaların kullanımı daha avantajlıdır. Şöyle ki çözüm uzayı geniş olan bir probleme matematiksel algoritma uygulandığı durumda algoritma tüm çözüm uzayını taraması gerektiğinden maliyet fazla olabilmektedir [4].

Geçmişten günümüze kadar kabul görmüş birçok meta-sezgisel algoritma bulunmaktadır. Bu algoritmalara ilk olarak Genetik algoritma örnek olarak verilebilmektedir. Genetik algoritma 1960' yıllarda John Holland ve ekibi tarafından geliştirilmiştir. John Holland çaprazlama ve birleştirme kavramları üzerine çalışan ilk kişidir [1].

Diğer bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimization, ACO)'dur. Marco Dorigo tarafından 1991 yılında ortaya atılmıştır. Algoritma oluşturulurken temelde doğadaki karınca kolonilerinin yiyecek arama ve izleme durumlarından esinlenilmiştir. Doğal yaşamda karıncalar besin kaynağını bulmak amacıyla feromonlar yani kimyasal izler bırakmaktadırlar. Burada, kolonideki diğer karıncaların bu feromonları takip ederek en fazla feromon bırakılan yolun takip edilmesi amaçlanmaktadır. Karınca Kolonisi Algoritmasında karıncalar kendilerine göre bir yol oluşturmaktadırlar. Bu oluşturulan yollar çözümü temsil etmektedir. Feromon miktarı ve uzaklık parametreleri yol oluşumunda etkili olmaktadır [5].

Bir diğer optimizasyon algoritması olan PSO, grup şeklinde davranan canlıların hareketlerinden yola çıkılarak oluşturulmuş bir optimizasyon algoritmasıdır. Örnek olarak kuş sürüsü verilebilmektedir. Algoritmada her bir parçacık çözüm uzayındaki bir veriyi temsil etmektedir. Parçacıkların konumları problemdeki bir çözümü ifade etmektedir [2]. Farklı bir optimizasyon algoritması da Storn ve Price tarafından geliştirilmiş olan DE' dir. Algoritmada bireyler oluşturulurken mutasyon, çaprazlama, seçim gibi işlemler yapılmaktadır. Popülasyon tabanlı bir algoritmadır [3].

Başka bir optimizasyon algoritması olan Benzetim Tavlama (Simulated Annealing, SA), Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi tarafından geliştirilmiştir. Algoritmada esinlenen fikir fizikte maddenin yavaş bir şekilde soğumasıdır. Şöyle ki metal bir madde yüksek derece bir ısıda eritilmektedir. Akabinde yavaş yavaş soğuması sağlanmaktadır. Tavlama kavramı buradan gelmektedir. Bu düşünceden yola çıkarak algoritma çözüm uzayında dolaşır ve sonuç olarak da global optimumu bulmayı hedeflemektedir. Başlangıç noktası genellikle rastgele olarak belirlenmektedir.

Algoritma bir sıcaklık parametresi kullanmaktadır [6].

Farklı bir optimizasyon stratejisi olan Ateşböceği Algoritması (Firefly Algorithm, FA), doğada bulunan ateşböceklerinin yanma-sönme durumlarından esinlenilerek oluşturulmuş bir optimizasyon algoritmasıdır. Cambridge Üniversitesinde Yang tarafından 2009 yılında geliştirilmiştir. Algoritmada hedeflenen amaç fonksiyonu ateşböceklerinin parlaklıklarına göre oluşturulmuştur. Ateşböceklerinin hepsi tek cinsiyetlidir. Parlaklık arttıkça ateşböceğinin çekiciliği de artmaktadır. Buna karşın mesafe arttıkça çekicilik azalmaktadır [7].

SO, yılanların yiyecek arama ve çiftleşme davranışlarından yola çıkılarak matematiksel formüllerin oluşturulduğu bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. 2022 yılında gerçekleştirilen çalışma, CEC-2017 problem seti kullanılarak test edilmiştir. Ek olarak Hız Düşürücü Tasarımı, Kaynaklı Kiriş Tasarımı, Basıncı Kap Tasarımı ve Germe-Sıkıştırma Yayılma Tasarımı olmak üzere 4 adet mühendislik probleminin çözümü yapılmıştır. Sonuçlar literatürde sık kullanılan optimizasyon algoritmaları ile kıyaslandığında başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir [8].

Literatürde bulunan bu ve benzeri algoritmaları test etmek amacıyla genellikle CEC problem setleri kullanılmaktadır. Bunlardan bir tanesi 2019 yılındaki yarışmaya ait CEC-2019 problem setidir. Örneğin, 2019 yılında DISH Algoritması kullanılarak CEC-2019 problem setinin çözümü yapılmıştır [9]. Başka bir örnek, 2023 yılında yeni bir şempanze sinüs kosinüs algoritması CEC-2019 ölçü seti kullanılarak test edilmiştir [10]. Hibrit Gri Kurt-Sinüs Kosinüs algoritmasının çözümü de CEC-2019 kullanılarak test edilmektedir [11].

Sezgisel algoritmalar, optimizasyon problemlerinin çözümünde sıkça tercih edilerek etkili sonuçlar üretmektedir. Fakat bazı durumlarda algoritma yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple algoritmanın belli adımlarına çeşitli yöntemler entegre edilerek performans artışı sağlanabilmektedir. Örneğin 2019'da yapılan bir çalışmada Ağaç tohum algoritmasını (Tree-Seed Algorithm, TSA) geliştirmek adına rastgele seçim yerine kaotik

haritalardan elde edilen sayılar kullanılmaktadır. Bu sayede performans artışı sağlanmaktadır [12].

Meta sezgisel bir algoritmanın temel bileşenleri, arama alanı, değerlendirme fonksiyonu, konum güncelleme formülü, yeni çözümleri kabul etme koşulları ve sonlandırma kriterleri gibi unsurlar, algoritmanın verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bileşenler, algoritmanın performansını ve çözüm kalitesini doğrudan etkileyen unsurlar olarak işlev görmektedir. Bu yapıların tasarımı, işleyişi ve geliştirilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Örnek olarak bir çalışmada, Aritmetik optimizasyon algoritmasına Levy rastgele adımlarının (Lévy random steps, LRS) entegre edilerek aday çözümlerin, algoritmanın arama alanının henüz keşfedilmemiş bölgelerini zaman zaman keşfetmesi amaçlanmaktadır [13].

Bir diğer örnek çalışma, Güve alevi optimizasyonu (Moth Flame Optimization, MFO) algoritmasının yakınsama hızını ve küresel arama yeteneğini artırmak amacıyla IMFO (Improved Moth Flame Optimization) algoritmasının geliştirilmesi çalışmasıdır. Güvelerin konumlarını güncellemek için uygunluğa bağlı bir ağırlık faktörü kullanarak keşif (exploration) ve sömürü (exploitation) arasında hibrit bir faz oluşturur. Bu hibrit yaklaşım, algoritmanın performansını artırarak daha etkili bir optimizasyon süreci sağlamaktadır [14].

Karga arama algoritmasında (Crow Search Algorithm, CSA), arama yeteneklerini geliştirmek amacıyla uyarlanabilir bir turnuva tabanlı seçim mekanizması kullanılarak yeni bir çalışma gerçekleştirilmektedir [15].

Kril sürüsü (Krill Herd, KH) algoritmasında performansı artırmak amacıyla rastgele sayı başlatma yöntemi yerine düşük tutarsızlık dizileri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Faure, Sobol ve Van der Corput dizileri ile başlatmanın etkisi incelenmektedir [16].

Literatürde sayısız optimizasyon algoritması mevcuttur. Fakat herhangi bir optimizasyon algoritması tüm problemlerde her zaman en iyi sonucu vermez. Nitekim NFL (No Free Lunch) teoremine göre bir optimizasyon algoritması bir problemde diğerlerinden daha iyi performans gösteriyorsa, başka bir problem kümesinde daha

kötü performans göstermektedir [17]. Bu sebeple optimizasyon çalışmalarında odaklanılması gereken asıl nokta problem bazında yeni algoritmaların geliştirilmesi ve var olan algoritmaların performansını artırmaya yönelik teknikler tasarlanmasıdır.

Bu çalışmada, literatürde bulunan ve başarılı sonuçlar veren bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması olan SO kullanılarak CEC-2019 [18] ölçü setinin çözümü gerçekleştirilmiştir. Friedman testi ile analizi yapılmıştır. Friedman testi, iki veya daha fazla yöntemi karşılaştırmak amacıyla kullanılan, parametrik olmayan bir istatistiksel testtir [19]. Literatürde yer alan çeşitli optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Yılan optimizasyon algoritmasını geliştirmek adına ilklendirme adımında rastgele sayı seçimi yerine Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling, LHS) yöntemi kullanılarak popülasyon oluşturulmuştur. Bu, algoritmanın çözüm uzayını daha etkili bir biçimde araştırmasına ve daha iyi çözümler bulmasına yardımcı olmaktadır. Ek olarak iki adet mühendislik problemi Yılan algoritması kullanılarak çözülmüştür.

Makalenin geri kalanı şu şekildedir: Yılan algoritmasının çalışma sistemi, CEC 2019 Problem seti ve Latin hiperküp örnekleme yöntemi 2. başlık altında verilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara 3. başlık altında yer verilmiştir. Son olarak 4. başlık sonuç şeklinde sonlandırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1 Yılan Algoritması

Yılan Optimizasyonu, 2022 yılında Hashim ve Hussien tarafından geliştirilmiş bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır [8]. Yılanların çiftleşme davranışlarından esinlenerek ortaya çıkmıştır. Şöyle ki yılanlarda çiftleşme sıcaklığın düşük olması ve yiyeceğin var olması durumunda gerçekleşmektedir. Yiyecek olmaması halinde yılanlar yiyecek arayacaklardır. Arama işleyişi "Keşif (Exploration)" ve "Kullanım (Exploitation)" olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. Keşif, yerin soğuk olması ve yiyeceğin olmaması durumunda yılanın yiyecek aramasını temsil etmektedir. Kullanım ise yiyecek var fakat sıcaklığın yüksek olması halinde yılanlar sadece var

olan yiyecekleri yemektedirler. Öte yandan eğer yiyecek var ve alan soğuk ise çiftleşme gerçekleşecektir. Böyle bir durumda da iki mod vardır: Birincisi her erkeğin dişiye elde edebilmek için mücadele edeceği Dövüş Modu, ikincisi de çiftleşme modudur.

#### 2.1.1 Başlatma

Yılan optimizasyon algoritmasının başlatılması rastgele bir popülasyon oluşturularak yapılmaktadır. Başlangıç popülasyonu oluşturabilmek için kullanılacak matematiksel model Denklem 1'de verilmiştir.

$$X_i = X_L + r \times (X_U - X_L) \quad (1)$$

Verilen Eşitlik 1 'de  $X_i$   $i$ . bireyin konumunu verirken,  $r$  [0-1] aralığında rastgele bir sayıdır.  $X_L$ , problemin alt sınırını temsil ederken  $X_U$ , üst sınırı göstermektedir.

#### 2.1.2 Sürüyü İki Gruba Ayırma

Bu aşamada, erkek ve dişi sayısının eşit olduğu varsayılmaktadır. Sürüyü erkek ve dişi olarak ikiye bölmek için kullanılacak matematiksel modeller Denklem 2 ve Denklem 3' de verilmiştir.

$$N_m \approx N/2 \quad (2)$$

$$N_f = N - N_m \quad (3)$$

Burada  $N$  ile birey sayısı temsil edilmektedir.  $N_m$  erkek birey sayısını ifade ederken  $N_f$  kadın birey sayısını göstermektedir.

#### 2.1.3 Grubu Değerlendirme ve Sıcaklık-Yiyecek Miktarını Belirleme

Grubu değerlendirme adımında en iyi erkek ( $f_{best,m}$ ) ve en iyi kadın ( $f_{best,f}$ ) bulunmaktadır. Ek olarak yiyecek konumu ( $f_{food}$ ) da bulunmaktadır. Sıcaklık ( $Temp$ ) hesaplama için gereken formül Denklem 4' de verilmiştir.

$$Temp = \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (4)$$

Verilen eşitlikte  $T$  maksimum iterasyonu temsil ederken,  $t$  mevcut iterasyonu belirtmektedir. Yiyecek miktarı ( $Q$ ) hesaplama için gereken matematiksel model ise Denklem 5' de verilmiştir.



$$Q = c_1 * \exp\left(\frac{t-T}{T}\right) \quad (5)$$

Eşitlikte ifade edilen  $c_1$  sabittir. Değeri 0.5'tir.

#### 2.1.4 Keşif ve Sömürü

Keşif aşamasında yiyecek yoktur. Eğer  $Q < \text{eşik}$  (0.5) ise yılanlar yiyecek arayacaklardır. Keşif aşaması için gereken matematiksel hesaplama Denklem 6' da verilmiştir.

$$X_{i,m}(t+1) = X_{rand,m}(t) \pm c_2 \times A_m \times ((X_U - X_L) \times rand + X_L) \quad (6)$$

Verilen eşitlikte  $X_{i,m}$  i.erkek pozisyonunu,  $X_{rand,m}$  rastgele erkek pozisyonunu temsil etmektedir. Ek olarak  $rand$  [0-1] aralığında rastgele bir sayıdır ve  $c_2$  sabittir, 0.05dir.  $A_m$  erkeğin yiyecek bulabilme kabiliyetidir ve Denklem 7' deki gibi hesaplanmaktadır.

$$A_m = \exp\left(\frac{f_{rand,m}}{f_{i,m}}\right) \quad (7)$$

Denklemden verilen  $f_{rand,m}$ ,  $X_{rand,m}$  in uygunluk(fitness) değeridir. Bunun yanında  $f_{i,m}$  ise i. erkek grubundaki bireyin uygunluğudur. Aynı ifadeler dişi yılan için de geçerlidir. Şöyle ki dişi yılan için hesaplama formülü Denklem 8 ve 9' da verilmiştir.

$$X_{i,f}(t+1) = X_{rand,f}(t+1) \pm c_2 \times A_f \times ((X_U - X_L) \times rand + X_L) \quad (8)$$

$$A_f = \exp\left(\frac{f_{rand,f}}{f_{i,f}}\right) \quad (9)$$

Sömürü aşamasına gelindiğinde, eğer  $Q > \text{eşik}$  ve sıcaklık  $> \text{eşik}$  (0.6) ise yılanlar sadece yiyecek için harekete geçecektir ve matematiksel modeli Denklem 10' da verilmiştir.

$$X_{i,j}(t+1) = X_{food} \pm c_3 \times Temp \times rand \times (X_{food} - X_{i,j}(t)) \quad (10)$$

Eşitlikte verilen  $X_{i,j}$  bireyin konumudur.  $X_{food}$  en iyi bireylerin konumunu temsil ederken  $c_3$  sabittir, 2'dir.

Eğer sıcaklık  $< \text{eşik}$  (0.6) olursa yılanlar dövüş veya çiftleşme moduna geçecektir. Dövüş modu için gereken matematiksel model Denklem 11 ve Denklem 12' de verilmiştir.

$$X_{i,m}(t+1) = X_{i,m}(t) + c_3 \times FM \times rand \times (Q \times X_{best,f} - X_{i,m}(t)) \quad (11)$$

$$X_{i,f}(t+1) = X_{i,f}(t+1) + c_3 \times FF \times rand \times (Q \times X_{best,m} - X_{i,f}(t+1)) \quad (12)$$

Eşitliklerde verilen  $X_{i,m}$  i. erkeğin konumunu,  $X_{i,f}$  i. dişinin konumunu,  $X_{best,f}$  en iyi dişinin konumunu,  $X_{best,m}$  en iyi erkeğin konumunu, FM erkeğin dövüş kabiliyetini, FF kadının dövüş kabiliyetini temsil etmektedir. Dövüş yeteneklerini hesaplamak için gereken formüller Denklem 13 ve Denklem 14' de verilmiştir.

$$FM = \exp\left(\frac{-f_{best,f}}{f_i}\right) \quad (13)$$

$$FF = \exp\left(\frac{-f_{best,m}}{f_i}\right) \quad (14)$$

Eşitlikte verilen  $f_i$  ajanın uygunluğudur. Çiftleşme modunun hesaplamaları Denklem 15 ve Denklem 16' da verilmiştir.

$$X_{i,m}(t+1) = X_{i,m}(t) + c_3 \times M_m \times rand \times (Q \times X_{i,f}(t) - X_{i,m}(t)) \quad (15)$$

$$X_{i,f}(t+1) = X_{i,f}(t) + c_3 \times M_f \times rand \times (Q \times X_{i,m}(t) - X_{i,f}(t)) \quad (16)$$

Verilen eşitliklerde  $M_m$ ,  $M_f$  sırasıyla erkek ve dişi çiftleşme yeteneklerini temsil etmektedir ve Denklem 17 ve Denklem 18'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$M_m = \exp\left(\frac{-f_{i,f}}{f_{i,m}}\right) \quad (17)$$

$$M_f = \exp\left(\frac{-f_{i,m}}{f_{i,f}}\right) \quad (18)$$

Son olarak yumurtanın çatlaması halinde en kötü erkek ve dişi seçilip değiştirilmektedir. Hesaplama için gerekli matematiksel model Denklem 19 ve Denklem 20' de verilmiştir.

$$X_{worst,m} = X_L + rand \times (X_U - X_L) \quad (19)$$

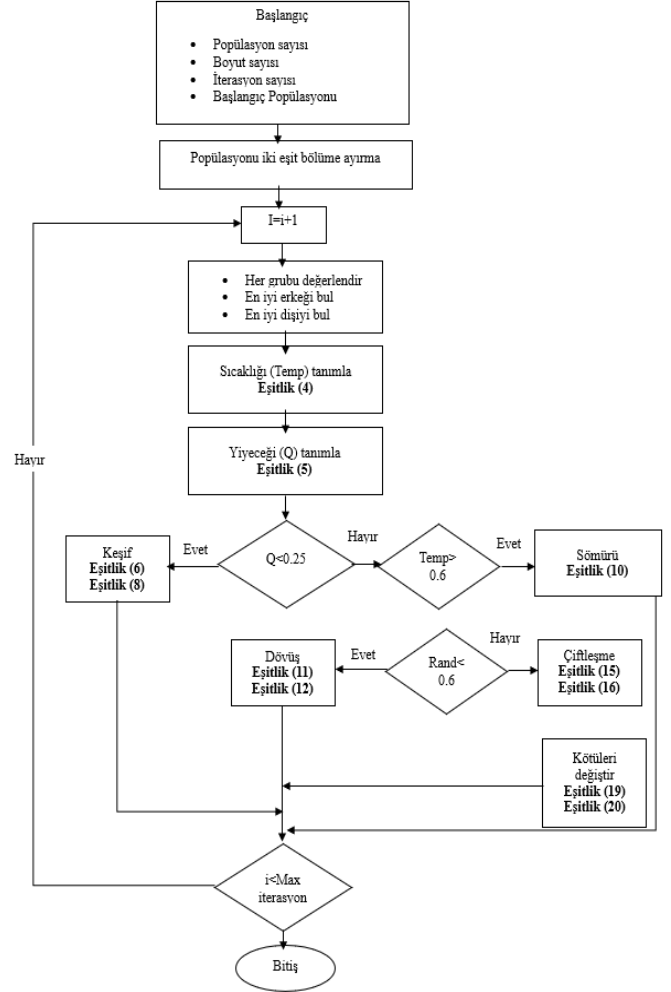
$$X_{worst,f} = X_L + rand \times (X_U - X_L) \quad (20)$$

Verilen eşitliklerde  $X_{worst,m}$ ,  $X_{worst,f}$  sırasıyla erkek grubundaki en kötü bireyi ve dişi grubundaki en

kötü bireyi temsil etmektedir. Algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 1’de verilmiştir.

## 2.2 CEC 2019

CEC, optimizasyon algoritmalarını test etmek amacıyla başvuru bir problem setidir. Bu çalışma kapsamında kullandığımız CEC 2019, 100 basamak problemi olarak da tanımlanmaktadır. Söz konusu set, farklı boyut ve kısıtlara sahip 10 adet problemden oluşmaktadır. Problemler çeşitli matematiksel fonksiyonları içermektedir [18]. Tablo 1’de CEC 2019 fonksiyonları ve özelliklerinin yer aldığı tablo verilmiştir.



Şekil 1: Yılan algoritması akış şeması [8].

Tablo 1: CEC 2019 fonksiyonları.

Fonksiyon No	Fonksiyonlar	Boyut	Aralık
1	Storn's Chebyshev Polynomial Fitting Problem	9	[-8192,8192]
2	Inverse Hilbert Matrix Problem	16	[-16384,16384]
3	Lennard-Jones Minimum Energy Cluster	18	[-4,4]
4	Rastrigin's Function	10	[-100,100]
5	Griewangk's Function	10	[-100,100]
6	Weierstrass Function	10	[-100,100]
7	Modified Schwefel's Function	10	[-100,100]
8	Expanded Schaffer's F6 Function	10	[-100,100]
9	Happy Cat Function	10	[-100,100]
10	Ackley Function	10	[-100,100]

## 2.3 Latin Hiperküp Örnekleme (Latin Hypercube Sampling-LHS)

Latin Hiperküp 1979 yılında önerilmiş bir örnekleme yöntemidir [20]. Söz konusu yöntem örnekleme alanını belli kısımlara bölerek her

parçadan örnek almayı amaçlamaktadır. Bu sayede alınan örnekler ile homojen bir temsil sağlanmaktadır. Seçilen noktalar sonrasında eşleştirilerek kombinasyonlar oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu noktalar optimizasyon algoritmalarının başlangıç popülasyonu olarak

kullanılmaktadır. Bu yöntem optimizasyon algoritmalarında kritik öneme sahip aşamalardan ilki olan başlangıç popülasyon ilklendirme adımında kullanılması algoritmanın performansında etkilidir. Algoritmanın çözüm uzayını daha iyi keşfetmesinde ve optimum çözüme yakınsamasında faydalı olabilmektedir.

### 3. BULGULAR

Deneysel çalışmalar kapsamında orijinal yılan algoritması ve LHS tekniği kullanılarak geliştirilmiş yılan algoritması ile CEC 2019 problem seti çözülmüştür. Akabinde literatürdeki diğer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında iki adet mühendislik probleminin çözümü de gerçekleştirilmektedir. Yapılan bütün testler Windows 11 Home işletim sistemine sahip, 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11300H işlemcili, 16 GB hafızalı bilgisayarda yapılmıştır. Deneylerde adil bir karşılaştırma yapılabilmesi adına parametreler Wu ve diğerlerinin çalışmasına göre ayarlanmaktadır [21]. Kullanılan parametre değerleri Tablo 2’de verilmektedir.

**Tablo 2:** Parametre tablosu.

Parametre	Değeri
Popülasyon boyutu	100
MaxFES	10000
Çalıştırma sayısı	30

Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan algoritma, Tablo 2’de verilen popülasyon boyutu 100, Maksimum fonksiyon değerlendirme sayısı (Max FES) 10000 ve 30 çalıştırma kullanılarak test edilmiştir.

#### 3.1 CEC 2019 Sonuç Karşılaştırması

Yılan algoritması kullanılarak çözülen CEC 2019 setinden elde edilen sonuçlar, Wu ve diğerlerinin çalışmasında yer alan BSDE [22], OMLDE [23], WDE [24], PSO [25], SHADE [26], JADE [27], CMAES [28], BROMLDE [21] yöntemlerinin sonuç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yılan algoritmasının ilklendirme adımında LHS tekniği kullanılarak algoritmanın performansı değerlendirilmiştir. Kullanılan parametre değerleri söz konusu çalışmadakiyle aynıdır. Karşılaştırma tablosu Tablo 3 ve Tablo 4’ de verilmiştir. Tabloya Wu ve diğerlerinin önerdikleri yöntem sonuçları ve karşılaştırdıkları algoritma sonuçları da eklenmiştir. Ek olarak CEC 2019 problem seti COA algoritmasıyla da çözülmüştür ve elde edilen sonuçlar da tabloya eklenmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen değerler Friedman testi kullanılarak analiz edilmiştir. Friedman testi sonuçları Tablo 5’ de verilmiştir.

**Tablo 3:** CEC 2019 test sonuçları (F1-F5)

Metrik	F1		F2		F3		F4		F5	
	Ortalama	Std	Ortalama	Std	Ortalama	Std	Ortalama	Std	Ortalama	Std
SO (LHS)	-9.8921E-03	1.9434E-01	7.3959E-03	6.0533E-02	-3.9488E-01	5.4195E-01	7.6887E+00	3.8638E+01	9.8294E+00	4.3974E+01
SO	1.7082E-04	4.3557E-02	6.4056E-01	1.5515E+01	2.7029E-01	1.9588E+0	6.5932E+0	5.3889E+01	1.0453E+01	4.5216E+01
COA	8.8494E+05	1.3201E+02	5.4097E+02	6.3275E+02	8.2211E+0	3.6464E+0	1.1009E+02	4.1901E+01	1.3993E+02	6.4205E+01
BSDE	2.3365E+10	1.3624E+10	8.6463E+0	3.8929E+0	1.2702E+0	9.0900E-06	2.7441E+02	7.4444E+0	1.7300E+0	1.3887E-01
OMLDE	1.3686E+09	2.1840E+09	1.3452E+02	1.2929E+02	1.2703E+0	2.0974E-04	4.0491E+03	2.1316E+03	2.5679E+0	3.1217E-01
WDE	6.0428E+10	3.4700E+10	1.0931E+03	4.4152E+02	1.2703E+0	1.3621E-04	2.5733E+03	7.7972E+02	2.5137E+0	1.8449E-01
PSO	2.2371E+10	1.7275E+10	2.7232E+0	5.3829E+0	1.2703E+0	7.5574E-04	1.2030E+03	6.6790E+02	1.6473E+0	4.3138E-01
SHADE	8.8385E+09	4.8209E+09	2.6338E+0	4.5771E+0	1.2702E+0	6.5941E-06	8.4969E+0	1.3287E+0	1.6712E+0	1.0437E-01
JADE	3.1163E+10	1.5759E+10	1.9322E+0	2.7313E+0	1.2702E+0	1.9165E-05	8.4365E+0	2.5848E+0	1.5414E+0	1.1315E-01
CMAES	8.6816E+10	1.6158E+11	7.5171E+04	1.2393E+04	1.2705E+0	3.1064E-03	1.9674E+03	1.0480E+04	1.0218E+0	1.1879E-01
BROMLDE	1.1022E+09	1.6019E+09	2.5057E+0	1.0313E+0	1.2702E+0	4.5257E-06	2.1898E+02	1.6873E+02	1.5682E+0	8.3493E-02

**Tablo 4:** CEC 2019 test sonuçları (F6-F10)

Metrik	F6		F7		F8		F9		F10	
	Ortalama	Std	Ortalama	Std	Ortalama	Std	Ortalama	Std	Ortalama	Std
SO (LHS)	-2.5529E-01	3.0807E+01	1.0901E+01	6.0694E+01	1.1699E+01	4.8099E+01	-1.0689E+01	3.2667E+01	-2.0822E+01	6.1447E+01
SO	3.8577E-01	3.3825E+01	8.7866E+0	4.9881E+01	4.4729E+0	5.4267E+01	-1.6148E+01	3.0985E+01	6.4077E+0	7.6726E+01
COA	1.1332E+01	2.7426E+0	2.0345E+03	9.8438E+02	4.3501E+0	2.1119E-01	3.3848E+0	1.3150E+0	2.0981E+01	2.9052E-01
BSDE	8.6195E+0	6.7997E-01	2.9658E+02	1.0557E+02	5.4627E+0	3.6571E-01	5.0168E+0	1.8876E+0	2.0021E+0	7.7741E-01
OMLDE	1.1608E+0	6.7551E-01	9.4097E+02	1.8477E+02	6.5042E+0	2.7377E-01	3.3530E+02	1.8130E+02	2.0499E+0	1.8716E-01
WDE	9.4992E+0	8.8662E-01	5.4830E+02	1.2762E+02	5.9984E+0	2.1249E-01	5.5962E+02	2.1148E+02	2.0311E+0	6.6710E-02
PSO	8.5524E+0	1.1533E+0	3.2512E+02	2.8856E+02	5.4877E+0	6.8809E-01	3.4069E+0	4.0954E+0	2.0041E+0	5.4341E-02
SHADE	1.0043E+0	7.6363E-01	5.8042E+02	1.4751E+02	5.9982E+0	3.0162E-01	3.3978E+0	2.6188E-01	2.0314E+0	1.8459E-01
JADE	9.0537E+0	6.5637E-01	4.1793E+02	9.2663E+0	5.6098E+0	4.7670E-01	3.0946E+0	3.1284E-01	2.0059E+0	5.6194E-01
CMAES	1.3562E+0	6.6821E-01	1.0757E+03	2.1772E+02	6.4208E+0	1.6190E+0	2.5553E+0	9.5374E-02	2.1022E+0	8.8160E-02
BROMLDE	8.5392E+0	4.8619E-01	2.8929E+02	9.4926E+0	5.3501E+0	2.4341E-01	4.5696E+0	6.2230E+0	1.9994E+0	7.1465E-01

**Tablo 5:** Friedman Testi.

No	SO (LHS)	SO	COA	BSDE	OMLDE	WDE	PSO	SHADE	JADE	CMAES	BROMLDE
F1	2	1	3	8	5	10	7	6	9	11	4
F2	1	2	9	7	8	10	6	5	3	11	4
F3	1	2	11	4,5	8	8	8	4,5	4,5	10	4,5
F4	2	1	5	7	11	10	8	4	3	9	6
F5	9	10	11	6	8	7	4	5	2	1	3
F6	1	2	11	8	4	10	7	3	9	5	6
F7	2	1	11	4	9	7	5	8	6	10	3
F8	11	2	1	4	10	8	5	7	6	9	3
F9	2	1	5	9	10	11	7	6	4	3	8
F10	1	10	11	3	8	6	4	7	5	9	2
Ort. sıralama	3,2	3,2	7,8	6,05	8,1	8,7	6,1	5,55	5,15	7,8	4,35

### 3.2 Mühendislik Problemleri

Yılan algoritmasının performansını değerlendirmek adına dişli sistemi tasarımı [29] ve borulu kolon tasarımı [30] olmak üzere iki adet mühendislik problemi çözülmüştür. Güncel optimizasyon algoritmalarından kelebek optimizasyon algoritması (BOA) [31] ve COOT optimizasyon algoritması [32] ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Problemlere ait parametre değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Tabloda gösterilen 'N', 'I', 'D' ifadeleri sırasıyla popülasyon sayısı, iterasyon sayısı ve parametre miktarını belirtmektedir.

**Tablo 6:** Mühendislik problemleri için parametre değerleri.

Problem	N	I	D
Dişli sistem tasarımı	30	100	4
Borulu kolon tasarımı	30	100	2

#### 3.2.1 Dişli Sistem Tasarımı Problemi

Dişli tasarımı problemi, mühendislikte sıklıkla karşılaşılan kısıtsız bir problemdir. Amaç, dişli çarklarının oranını en aza indirmektir. Probleme bulunan dişli sayılarını  $\{n_A, n_B, n_C, n_D\} = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}$  şeklinde ifade ettiğimizde probleme ait amaç fonksiyonu Denklem 21' de verilmiştir.

$$f(X) = \left( \frac{1}{6.931} - \frac{X_3 X_2}{X_1 X_4} \right)^2 \quad (21)$$

Denklemde verilen karar değişkenleri  $12 \leq X_i \leq 60$ ,  $i=1, \dots, 4$  aralığında integer değerler olmalıdır. Dişli tasarım problemi Yılan algoritması (SO), Kelebek optimizasyon algoritması (BOA) ve COOT optimizasyon algoritması olmak üzere üç adet optimizasyon algoritması ile çözülmüştür. Karar değişkenleri, ortalama ve standart sapma sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 7'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde Yılan algoritmasının

sonucunun diğer iki algoritmaya kıyasla daha iyi olduğunu söylemek mümkündür.

### 3.2.2 Borulu Kolon Tasarımı Problemi

Borulu kolon tasarımı problemi, Tablo 6'da görüldüğü üzere iki adet karar değişkenine sahiptir. Problemdaki amaç, toplam maliyeti minimum yapmaktır. Probleme ait matematiksel model Denklem 22' de verilmiştir. Problem kısıtları Denklem 23-Denklem 28 aralığında verilmiştir.

$$f(X) = 9,82X_1X_2 + 2X_1 \quad (22)$$

$$g_1(X) = \frac{P}{\pi X_1 X_2 \sigma_y} - 1 \leq 0 \quad (23)$$

$$g_2(X) = \frac{8PL^3}{\pi^3 E X_1 X_2 (X_1^2 + X_2^2)} - 1 \leq 0 \quad (24)$$

$$g_3(X) = \frac{2}{X_1} - 1 \leq 0 \quad (25)$$

$$g_4(X) = \frac{X_1}{14} - 1 \leq 0 \quad (26)$$

$$g_5(X) = \frac{0.2}{X_2} - 1 \leq 0 \quad (27)$$

$$g_6(X) = \frac{X_1}{0.8} - 1 \leq 0 \quad (28)$$

Verilen denklemlerde  $P=2500$  kgf,  $\sigma_y=500$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $E=0.85 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>, olarak karar değişkenleri  $2 < X_1 < 14$ ,  $0.2 < X_2 < 0.8$  sağlamalıdır. Borulu kolon tasarımı problemine ait sonuç tablosu Tablo 8'de verilmiştir. Tablo incelendiğinde Yılan algoritmasının minimum sonuç verdiği görülmektedir.

**Tablo 7:** Dişli sistemi tasarımı problemi optimum sonuçlar.

Algoritma	X1	X2	X3	X4	Ortalama	Standart Sapma
SO	42	18	18	56	1.3672E-10	4.1858E-10
BOA	40	12	20	42	2.6526E-04	1.2530E-03
COOT	42	26	12	51	4.2771E-03	1.0837E-02

**Tablo 8:** Borulu kolon tasarımı problemi optimum sonuçlar.

Algoritma	X1	X2	Ortalama	Standart Sapma
SO	5.452182	0.2916263	2.649E+01	1.8007E-02
BOA	5.444396	0.293256	2.6747E+01	1.3814E-01
COOT	5.452676	0.291615	2.9468E+01	2.7668E+00

Tablo 3 ve Tablo 4' de sunulan CEC 2019 sonuçlarına dayanarak, geliştirilen Yılan algoritmasının diğer güncel ve etkili optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırıldığında belirgin bir başarı sergilediği ortaya çıkmaktadır. Özellikle Yılan algoritması test edilen 10 fonksiyondan 6'sında üstün performans göstermiştir. Bu durum, algoritmanın belirli problem türlerine yönelik etkinliğini ve esnekliğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında Latin hiperküp tekniğinin kullanılması, çözüm uzayının daha etkili bir şekilde araştırılmasını sağlamıştır. Dolayısıyla, bu yaklaşımın Yılan algoritmasının başarısında önemli bir rol oynadığı söylenebilir. Tablo 7 ve Tablo 8' de Yılan algoritmasıyla çözülmüş iki adet mühendislik problemi çözümü görülmektedir. Bu, algoritmanın uygulama alanlarının çeşitliliğini ve pratikteki etkinliğini göstermektedir. Mühendislik problemlerinin optimizasyonu genellikle karmaşık ve zorlu bir süreçtir. Bu nedenle Yılan algoritmasının bu alanda sağladığı rekabetçi

sonuçlar potansiyel kullanıcılar için önemli bir buluş niteliği taşımaktadır.

## 4. SONUÇ

Bu çalışmada güncel meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarından olan Yılan algoritması kullanılarak CEC 2019 ölçü setinin çözümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, optimizasyon algoritmalarının performansını ve verimliliğini artırmak adına geleneksel başlatma yöntemi dışında kullanılan yöntemlerden biri olan LHS tekniği algoritmaya entegre edilmiştir. LHS ile elde edilen sonuçların algoritmada kullanılması ile performansta artış sağladığı gösterilmektedir. Şöyle ki iyi bir şekilde ilklendirilmiş popülasyon daha hızlı ve verimli bir şekilde yakınsamayı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer başarılı meta-sezgisel algoritmalar ile ortalama ve standart sapma bazında karşılaştırılmıştır. Geliştirilen Yılan algoritması 10 problemde 6'sında

(F1, F2, F3, F6, F9, F10) başarı göstermiştir. Ek olarak Yılan algoritması, BOA ve COOT algoritmaları kullanılarak iki adet mühendislik probleminin çözümü yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında Yılan optimizasyon algoritması BOA ve COOT optimizasyon algoritmasını geride bırakarak başarılı sonuçlar vermiştir. Gelecekteki çalışmalarda Yılan algoritmasının diğer kritik aşamalarına yeni yöntemler eklenerek ve güncellemeler yapılarak başarısı daha da artırabilir. Özellikle, algoritmanın diğer meta-sezgisel yöntemlerle entegrasyonu, daha karmaşık optimizasyon problemlerine yanıt vermesi açısından önemlidir. Çeşitli gerçek zaman problemlerinin çözümünde kullanılabilir.

**Yazar Katkıları:** Her iki yazar, literatür taraması, araştırma fikrini geliştirme, makale yazımı ve düzenlenmesi süreçlerine ortak katkı sağlamıştır.

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmanın yazarları, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmiştir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] J. H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- [2] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948.
- [3] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space," Journal of Global Optimization, vol. 11, pp. 341–359, 1997.
- [4] Y. Çelik, İ. Yıldız, and A. T. Karadeniz, "A brief review of metaheuristic algorithms improved in the last three years," Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, pp. 463–477, 2019.
- [5] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Positive feedback as a search strategy," pp. 91–107, 1991.
- [6] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr, and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," Science, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [7] X.-S. Yang, Nature-inspired metaheuristic algorithms: Second edition, 2nd ed. Frome, England: Luniver Press, 2010.
- [8] F. A. Hashim and A. G. Hussien, "Snake optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm," Knowledge Based System, vol. 242, no. 108320, p. 108320, 2022.
- [9] A. Viktorin, R. Senkerik, M. Pluhacek, T. Kadavy, and A. Zamuda, "DISH algorithm solving the CEC 2019 100-digit challenge," in 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Wellington, New Zealand, 2019, pp. 1–6.
- [10] Vigya, S. Raj, C. K. Shiva, B. Vedik, S. Mahapatra, and V. Mukherjee, "A novel chaotic chimp sine cosine algorithm Part-I: For solving optimization problem," Chaos Solitons Fractals, vol. 173, no. 113672, p. 113672, 2023.
- [11] Y. Duan and X. Yu, "A collaboration-based hybrid GWO-SCA optimizer for engineering optimization problems," Expert System with Application, vol. 213, no. 119017, p. 119017, 2023.
- [12] B. Durmuş, "Kaotik harita temelli ağaç tohum algoritması," Süleyman demirel üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi, c. 23, sy. 2, ss. 601–610, 2019.
- [13] S. Barua and A. Merabet, "Lévy arithmetic algorithm: An enhanced metaheuristic algorithm and its application to engineering optimization," Expert Syst. Appl., vol. 241, no. 122335, p. 122335, 2024.
- [14] D. Pelusi, R. Mascella, L. Tallini, J. Nayak, B. Naik, and Y. Deng, "An Improved Moth-Flame Optimization algorithm with hybrid search phase," Knowl. Based Syst., vol. 191, no. 105277, p. 105277, 2020.
- [15] T. Thaher, A. Sheta, M. Awad, and M. Aldasht, "Enhanced variants of crow search algorithm boosted with cooperative based island model for global optimization," Expert Syst. Appl., vol. 238, no. 121712, p. 121712, 2024.
- [16] O. J. Agushaka and A. E.-S. Ezugwu, "Influence of initializing krill herd algorithm with low-discrepancy sequences," IEEE Access, vol. 8, pp. 210886–210909, 2020.
- [17] D. H. Wolpert and W. G. Macready, "No free lunch theorems for optimization," IEEE Transactions Evolutionary Computation, vol. 1, no. 1, pp. 67–82, 1997.
- [18] K. V. Price, N. H. Awad, M. Z. Ali, and P. N. Suganthan, "Problem definitions and evaluation criteria for the 100-digit challenge

- special session and competition on single objective numerical optimization”, Technical report. Singapore: Nanyang Technological University, 2018.
- [19] M. Friedman, “A comparison of alternative tests of significance for the problem of m rankings,” *Ann. Math. Stat.*, vol. 11, no. 1, pp. 86–92, 1940.
- [20] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, “A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code,” *Technometrics*, vol. 42, no. 1, pp. 55–61, 2000.
- [21] F. Wu, J. Zhang, S. Li, D. Lv, and M. Li, “An enhanced differential evolution algorithm with Bernstein operator and refracted oppositional-mutual learning strategy,” *Entropy (Basel)*, vol. 24, no. 9, p. 1205, 2022.
- [22] P. Civicioglu and E. Besdok, “Bernstein-search differential evolution algorithm for numerical function optimization,” *Expert System with Applications.*, vol. 138, no. 112831, p. 112831, 2019.
- [23] Y. Xu *et al.*, “An enhanced differential evolution algorithm with a new oppositional-mutual learning strategy,” *Neurocomputing*, vol. 435, pp. 162–175, 2021.
- [24] P. Civicioglu, E. Besdok, M. A. Gunen, and U. H. Atasever, “Weighted differential evolution algorithm for numerical function optimization: a comparative study with cuckoo search, artificial bee colony, adaptive differential evolution, and backtracking search optimization algorithms,” *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 8, pp. 3923–3937, 2020.
- [25] R. Eberhart and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory,” in *MHS’95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, 1995, pp. 39-43.
- [26] R. Tanabe and A. Fukunaga, “Success-history based parameter adaptation for Differential Evolution,” in *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Cancun, Mexico, 2013, pp. 71-78.
- [27] J. Q. Zhang and A. C. Sanderson, “JADE: adaptive differential evolution with optional external archive”, *IEEE Transactions Evolutionary Computation*, vol. 13, pp. 945–958, 2009.
- [28] N. Hansen and A. Ostermeier, “Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies,” *Evol. Comput.*, vol. 9, no. 2, pp. 159–195, 2001.
- [29] E. Sandgren, “Nonlinear integer and discrete programming in mechanical design,” in *Proceeding of the ASME design technology conference*, 1998.
- [30] S. S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009.
- [31] S. Arora, S. Singh, “Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization,” *Soft Comput.*, vol. 23, no. 3, pp. 715–734, 2019.
- [32] I. Naruei, F. Keynia, “A new optimization method based on COOT bird natural life model,” *Expert Syst. Appl.* Vol. 183, no. 115352, p. 115352, 2021.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Zeolitik Tüf ve Granül EPS Kullanarak Hafif Duvar Bloklarının Üretilirliği

## *Producibility of Lightweight Wall Blocks Using Zeolitic Tuff and Granular EPS*

İlker Tekin\*, İbrahim Torlak, Mahfuz Pekgöz

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye.

Geliş / Received: 21.10.2024

Kabul / Accepted: 04.11.2024

\*Sorumlu Yazar: İlker Tekin [ilkertekin@karabuk.edu.tr](mailto:ilkertekin@karabuk.edu.tr)

**ÖZ:** Bu çalışmada zeolitik tüf ile granül EPS agregalı hafif beton duvar bloklarının üretilebilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, çalışmanın deneysel aşamasında gerçekleştirilen hafif beton üretimlerinde agrega olarak Dmax: 8 mm olan zeolitik tüf kullanılmıştır. Betonların birim hacim ağırlığını (BHA) ve ısı iletkenliğini azaltmak amacıyla zeolitik tüf yerine karışımlarda hacimce %20, %40 ve %60 oranlarında EPS kullanılmıştır. İlâveten, üretilen hafif betonlarda 250, 300, 350, 400 ve 450 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere 5 farklı çimento dozajı ile 75 °C buhar kürü ve ortam kürü olmak üzere 2 farklı kür yöntemi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen hafif betonlar üzerinde taze halde çökme deneyi ile sertleşmiş numunelerde su emme, BHA ve 3, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre %20 EPS içeren hafif betonun BHA'sı 1,46 kg/dm<sup>3</sup>, erken basınç dayanımı 3,70 MPa ve nihai basınç dayanımı 5,73 MPa elde edilmiştir. Ancak elde edilen en düşük BHA ile en yüksek basınç dayanımı %40 EPS, 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ile üretilen hafif beton karışımlarında elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zeolitik tüf, EPS, hafif beton, duvar bloğu, agrega.

**ABSTRACT:** In this study, the feasibility of producing lightweight concrete wall blocks with zeolitic tuff and granular EPS aggregate was investigated. In this context, zeolitic tuff with Dmax: 8 mm was used as aggregate in the lightweight concrete productions carried out in the experimental phase of the study. In order to reduce the unit volume weight (UVW) and thermal conductivity of the concretes, EPS was used in the mixtures at 20%, 40% and 60% by volume instead of zeolitic tuff. In addition, 5 different cement dosages (250, 300, 350, 400 and 450 kg/m<sup>3</sup>) and 2 different curing methods (75 °C steam curing and ambient curing) were used. The lightweight concretes produced within the scope of the study were subjected to slump tests in fresh state and water absorption, BHA and compressive strength tests at 3, 7 and 28 days of age. According to the test results, the BHA of lightweight concrete containing 20% EPS was 1.46 kg/dm<sup>3</sup>, the early compressive strength was 3.70 MPa and the ultimate compressive strength was 5.73 MPa. However, the lowest BHA and the highest compressive strength were obtained in lightweight concrete mixtures produced with 40% EPS and 400 kg/m<sup>3</sup> cement dosage.

**Keywords:** Zeolitic tuff, EPS, lightweight concrete, wall blocks, aggregate.

## 1. GİRİŞ

Yapılarda duvar elemanı olarak kullanılan malzemeler yaşam alanının konforunu doğrudan etkilemektedir. Günümüzde en fazla tercih edilen duvar elemanlarının başında tuğla, gazbeton ve

bims gelmektedir. Farklı üstün özelliklere sahip olan bu malzemelerin tasarım ilkeleri enerji verimliliği, hafiflik, maliyet ve dayanım gibi parametrelere göre şekillenmektedir. Bu kapsamda hali hazırda diğer duvar elemanlarına kıyasla geniş çapta kullanılan ve en eski yapı malzemelerinden olan tuğlanın üretimi için gerekli olan



hammadelerin dünyanın pek çok yerinde kolay temin edilmesi sürdürülebilir ve ekonomik olmasını sağlamaktadır [1]. Silisli kum (kuvarsit), çimento, kireç, alüminyum tozu ve su karışımından oluşan harcın basınçlı buhar altında sertleşmesi ile elde edilen gaz betonun, fazla miktarda (%84) gözenekli bir yapıya sahip olması, üstün ısı yalıtım performansı göstermesini ve en hafif yapı malzemeleri arasına girmesini sağlamaktadır [2]. Volkanik kökenli ve gözenekli doğal bir taş olan pomzadan imal edilen bims çevre dostu olmasıyla, yüksek ısı yalıtım özelliğiyle birlikte işçilik ve malzeme maliyetinin düşük olmasıyla ön plana çıkmaktadır [3]. Bu ürünlerin yanında EPS (Expanded Polystyrene-Genleştirilmiş Polistiren) esaslı malzemenin hammadde olarak kullanıldığı yeni nesil duvar elemanı olan EPS blok, diğer duvar elemanları gibi düşük ısı iletkenliğe ve işçilik maliyetine sahip olup alternatif duvar elemanları arasında yerini almıştır [4]. Farklı teknik özelliklerine sahip olan bu malzemeler fayda ve maliyet açısından değerlendirildiğinde uygulama noktasında tercih edilme olasılıklarını değiştirmektedir. Duvar elemanlarına ait bazı teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

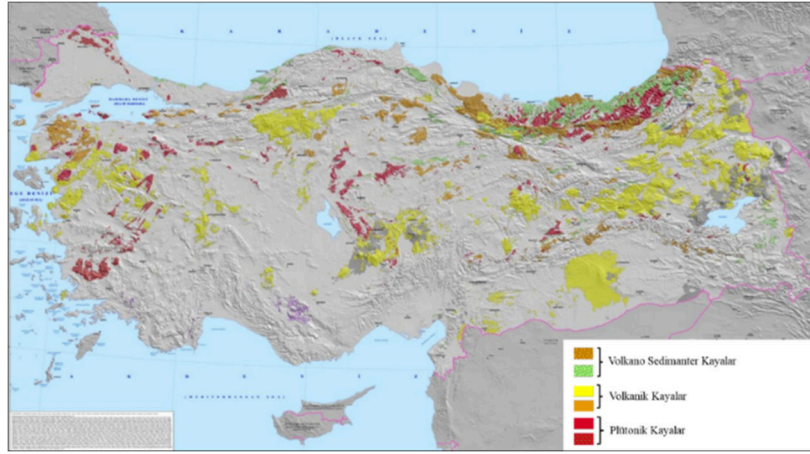
**Tablo 1:** Duvar elemanlarının teknik özellikleri [5]

Özellikler	Gaz Beton	Tuğla	Bims	EPSblok
BHA (kg/m <sup>3</sup> )	400 – 600	600	650	350 – 400
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	2,5 – 5,0	2,5	1,5	1,5
Isı İletkenlik (W/mK)	0,11 – 0,19	0,32	0,127	0,08

Genleştirilmiş polistiren (EPS), 10-30 kg/m<sup>3</sup> aralığında yoğunluğa sahip olan bir tür ısı yalıtım malzemesidir, ancak aynı zamanda yapay hafif agrega olarak kullanılabilir [6]. EPS ile üretilen hafif betonlar genel olarak düşük mukavemet gösterdiği için yapısal betonda kullanılmamaktadır. Ancak pek çok araştırmacı EPS’nin hafif betonda kullanım alanını geliştirmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Xu ve ark. [7] EPS hafif agregalı betonun karışım oran parametrelerini Taguchi yaklaşımını kullanarak analiz etmiştir. EPS betonun yoğunluk değeri, EPS hacmi ve S/Ç oranı arttıkça neredeyse doğrusal bir azalma göstermiş, ancak bununla birlikte basınç dayanımında da

azalmaya neden olmuştur. Babu ve Babu [8], çimento hamuru ile EPS boncukları arasındaki bağı geliştirmek amacıyla hafif betona ultra ince silika dumanı eklemiştir. Üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımlarının %3, %5 ve %9’luk silika dumanı değiştirme seviyelerinde sırasıyla yaklaşık %75, %85 ve %95 artış gözlemlenerek 10 ila 21 MPa arasında değiştiği görülmüştür. Roy ve ark. [9], süper akışkanlaştırıcı kullanarak EPS kürelerinin ayrılmasını önlemeye çalışmıştır. Farklı EPS betonlar üzerinde elde edilen deneysel verilere dayanarak katkı boyutu ne kadar küçük olursa, sertleşmiş betonun basınç dayanımının da o kadar yüksek olduğu gösterilmiştir. Chen ve Liu [10] EPS katkılı betonun mukavemetini arttırmak için stiren-bütadien kauçuğu (SBR lateksini) beton karışımına dahil etmişlerdir. EPS betonlarının mukavemeti, özellikle de eğilme mukavemeti, SBR lateksi ile polimer modifikasyonu ve ıslak-kuru kürelerin yeterli kombinasyonunun uygulanmasıyla büyük ölçüde geliştirilmiştir. Kan ve Demirboğa [11] tarafından atık EPS köpüklerin ısı işlem kullanılarak yeni bir geri dönüşüm prosesi geliştirilmiştir. En iyi modifikasyon sonucu 130oC’de ve 15 dk’da belirlenmiştir. Modifikasyon sonrasında atık EPS’nin yoğunluğu, ısı iletkenliği ve basınç dayanımı sırasıyla 217 kg/m<sup>3</sup>, 0,056 W/mK ve 8,29 MPa’ya yükselmiştir. Isıl işlem sonrası elde edilen bu yeni malzemeye modifiye atık EPS (MEPS) adı verilmiştir. MEPS ile üretilen hafif betonların yoğunluğu yaklaşık 900–1700 kg/m<sup>3</sup> aralığında ve 28 günlük basınç dayanımlarının 12,58 MPa ile 23,34 MPa arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Hafif betonlar doğal agreganın tamamen veya belli oranlarda hafif agrega ile yer değiştirilmesiyle elde edilen, normal betona kıyasla gözenekli yapısından dolayı daha düşük yoğunluğa, daha iyi ısı yalıtımına, daha fazla enerji verimliliğine sahip yapı malzemeleridir [12]. Hafif agregalar doğal (pomza, diyatomit, volkanik cüruf vb.) ve yapay (perlit, kil, sinterlenmiş uçucu kül, genişletilmiş şeyl vb.) olmak üzere iki sınıfa ayrılır [7]. Ülkemiz doğal hafif kayalardan olan volkanik tüf bakımından oldukça zengin bir jeolojik oluşuma sahiptir. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü’nün (MAPEG) güncel verilerine göre ülkemizde yaklaşık 3 milyar ton volkanik tüf rezervi bulunmaktadır [14]. Türkiye’de volkanik kayalara ilişkin rezerv haritası Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1: Türkiye volkanik maden yatakları [15].

Bayburt ili doğal taşlar bakımından zengin bir bölge olup, kolay işlenebilen ve özellikle kaplama taşı olarak kullanılan coğrafi işaretli beyaz, sarı ve yeşil renklerde volkano-sedimanterlerden oluşan ince taneli ve düşük sertlikteki kayalara sahiptir. Bayburt taşı yüksek oranda su emme özelliği (%20<) gösterdiği için ani ısı değişimlerin olduğu ortamlar yerine daha stabil hava koşullara sahip iç mekanlarda kullanılmaya daha müsait bir malzemedir [16].

Bayburt taşının üretimi sırasında yaklaşık %70 atık meydana gelmektedir. Atıkların geri kazanılması için gerçekleştirilen çalışmalarda çimento sanayinde kullanılacak puzolanik malzeme olarak değerlendirilebileceği, tuğla ve kompozit üretimleri de yapılabileceği belirlenmiştir [16]. Bayburt taşı ile üretilen hafif beton yığma blokların basınç dayanımı ve donma çözülme direnci diğer duvar elemanlarına göre daha yüksek olup daha az çimento kullanımı sağlamaktadır. [17]. Pekköz ve Tekin tarafından, Bayburt taşının agrega olarak kullanıldığı yapısal hafif betonlarda S/Ç oranı ve çimento dozajının, basınç dayanımını ve arayüz kalınlığını önemli ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur. Bayburt taşı ile üretilen yapısal hafif betonların SEM analizlerinde yüksek S/Ç oranlarında erken yaşta CH ve etrenjit oluşumu gözlemlenmiştir. 28. günde düşük S/Ç oranlarında ise yoğun miktarda CSH yapılarının oluşmuştur [18].

Literatürdeki çalışmalarda temel problem agrega olarak kullanılan EPS'nin ultra hafif yoğunluğundan dolayı beton üretiminde ayrışma eğilimi göstermesidir. Diğer taraftan çalışmalarda

hafif beton blok elemanlar genellikle çimento hamuru, kum ve EPS bileşiminden üretildiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada hafif beton üretiminde daha önce kullanılmış ve olumlu sonuçlar alınmış olan Bayburt Zeolitik Tüfü agregalı hafif betonlarda agrega belli oranlarda granül EPS ile yer değiştirilmiştir. Böylece üretimi daha hafif, üretimi daha kolay, ekonomik ve çevreci hafif beton bloklar üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla hafif duvar elemanları üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Malzeme

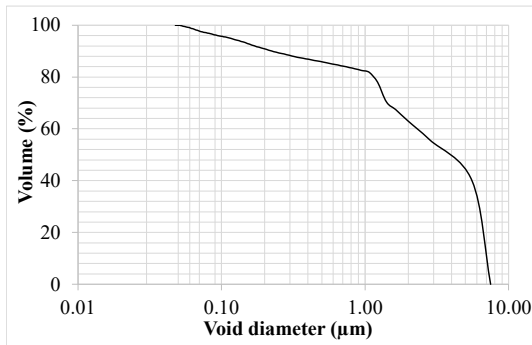
Bu çalışmada bağlayıcı olarak Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5R tipi çimento kullanılmıştır. Tablo 2'de verilen kimyasal analize göre kullanılan çimentonun C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A ve C<sub>4</sub>AF oranları Bouge formüllerine göre sırasıyla %74,53, %9,24, %6,89 ve %9,34'tür. Çimentonun C<sub>3</sub>S içeriğinin yüksek olması yüksek erken dayanım kazanma özelliğine sebep olur. Agregası olarak Bayburt ilinde bulunan Bayburt Beyaz taşı olarak bilinen zeolitik yapıya sahip volkanik tüf (BVT) kullanılmıştır. Şekil 2'de cıva iç püskürtmeli porozimetre deneyinden elde edilen gözenek dağılımı grafiğinde gösterildiği gibi BVT mezo poroz yapıya (D<sub>0.5</sub>: %86) bir kayattır. Maden Tetkik ve Arama laboratuvarlarında gerçekleştirilen mineraloji ve petrografi analizlerine göre BVT'nin matrisi içinde kuvars, plajiyoklaz ve biyotitin yanı sıra Fe<sub>2</sub>O ve alterasyon ürünü mineral oluşumları da gözlemlenmiştir [19]. BZT ince öğütüldüğünde puzolanik özellik göstermektedir [20]. Ancak

yüksek su ihtiyacı ve kohezif yapısı sebebiyle betonun üretimini zorlaştırıcı bir malzemedir [21]. BVT'ye ait termal gravimetrik analizi Bayburt Üniversitesi MERLAB'ta yapılmış olup DTA-TG grafiği Şekil 3'te verilmiştir.

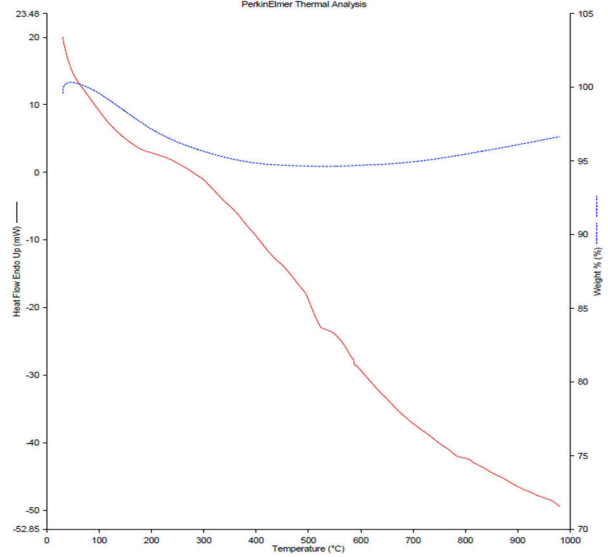
**Tablo 2:** CEM I 42,5R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

Kimyasal Özellikler	CEM I	BVT	Fiziksel Özellikler	CEM I
SiO <sub>2</sub>	18,73	68,92	45µm elek üstü %	8,98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,56	11,96	Özgül Ağ. (g/cm <sup>3</sup> )	3,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,07	0,34	Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)	3807
CaO	63,91	3,85	Priz Başı (dk)	141
MgO	2,08	1,29	Priz Sonu (dk)	175
SO <sub>3</sub>	2,90	0,21	Hacim Genleşmesi (mm)	1
K <sub>2</sub> O	0,62	2,38	Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)	27,7
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,23	Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)	57,2
Kızdırma Kaybı	3,36	10,13	Su İhtiyacı (%)	28,6

Bayburt Üniversitesi MERLAB'ta bulunan Perkin&Elmer Thermal Analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilen DTA-TG termal analiz sonucuna göre 500 °C'a kadar %5'lik bir kütle kaybı meydana gelmiş olup, daha yüksek sıcaklıklarda malzemede kütleli önemli bir değişim gözlenmemiştir. Malzeme ısı depolama özelliğine sahip bir malzeme olup, 1000 °C'lık sıcaklık değişiminde toplam 70mW'lık enerji depolamıştır. Bu analiz BVT'nin yüksek oranda yüksek ısı tutuculuk (ısı yalıtım özelliği) sahip olduğunu göstermiştir. BVT'nin özgül ağırlık değerleri Tablo 3'te, teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.



**Şekil 2:** BVT'ye ait cıva püskürtmeli porozimetre (MIP) deney sonucu.



**Şekil 3:** BVT'nin DTA-TG grafiği.

**Tablo 3:** BVT'nin özgül ağırlık ve su emme değerleri

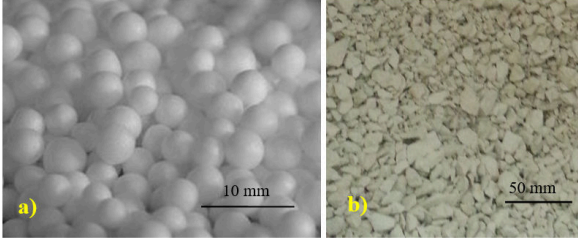
Dane Boyutu	Özgül Ağırlık			Su Emme (%)
	Doygun	Kuru	Görünür	
0,25 – 1 mm	2,05	1,76	2,48	16,26
1 – 4 mm	2,01	1,72	2,41	16,70

**Tablo 4:** BVT'nin teknik özellikleri [16]

Sertlik (Mohs)	4-5
Birim hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1,7
Atmosfer basınçta su emme (ağırlıkça %)	12,2
Görünür porozite (%)	20,6
Basınç dayanımı (MPa)	45
Eğilme dayanımı (MPa)	12,5
Donma-çözülme sonrası basınç dayanımı (MPa) (5 döngü)	44
Donma-çözülme sonrası kütle kaybı (%) (5 döngü)	0,34

Deneysel çalışmada Alman BASF'den temin edilen hava sürükleyici Micro Air-200 ve GRACE firmasından süperakışkanlaştırıcı olarak polikarboksilat esaslı Adva Flow-375N kullanılmıştır. Hava sürükleyici hem işlenebilirliği iyileştirmek hem de malzeme içinde boşlukların dağılımını homojenize ederek ısı iletkenlik gibi özelliklerin duvar bloğunun her noktasında benzer özellik göstermesini sağlamak için kullanılmıştır. Adva Flow üretilecek hafif betonun su ihtiyacını yüksek oranda azaltarak mekanik mukavemetleri iyileştirmek için kullanılmıştır. Tane boyutları 4 – 7 mm arasında olan granül EPS Atermit Sanayi Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Granül EPS'nin

yoğunluğu  $10 \text{ kg/m}^3$ , basınç dayanımı  $0,12 \text{ MPa}$ , ısı iletkenliği  $0,0369 \text{ W/mK}$  ve camsı geçiş sıcaklığı  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. EPS ve BVT'ye ait görseller Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: a) Granül EPS ve b) Öğütülmüş Bayburt Taşı.

## 2.2 Yöntem

Beton karışımları  $56 \text{ dm}^3$  kapasiteli pan tipi karıştırıcıda Tablo 5'te verilen tasarımlara göre yapılmıştır. Tablo 7'de gösterilen A, B, C, D ve E notasyonu sırasıyla  $250, 300, 350, 400$  ve  $450 \text{ kg/m}^3$  çimento dozajlarını; 1, 2 ve 3 kodları %20, %40 ve %60 EPS ikamesini ifade etmektedir. Üretimlerde S/Ç oranı işlenebilirliği artırmak amacıyla sabit  $0,55$  seçilmiştir. Duvar malzemeleri endüstride BHA ve ısı iletkenlik esasları dikkate alınarak üretilir ve kullanılır. Bunun yanı sıra en düşük basınç dayanımı  $1,5 \text{ MPa}$  olması önerilir. Karışım tasarımlarında maliyet ile fiziksel ve mekanik özellikler dikkate alınarak  $250, 300$  ve  $350 \text{ kg/m}^3$  çimento dozajı kullanılmıştır. Ancak çok yüksek işlenebilirliğe sahip karışımlarda S/Ç oranı  $0,45$  ve  $0,35$  oranları ile çimento miktarı artırılarak denenmiştir. Bu serilerde maliyeti dengelemek amacıyla sadece standart kür uygulaması yapılmıştır. Duvar bloklarının endüstriyel üretilebilirliğini iyileştirmek amacıyla süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici de karışım tasarımlarında denenmiştir. Yazarların önceki çalışmasında [17], BVT agregası ile  $150 - 250 \text{ kg/m}^3$  çimento dozajlarında hafif betonlar üretilmiş ve basınç dayanımı, BHA, ısı iletkenlik gibi özellikler incelenmiştir. Önceki çalışmada nihai basınç dayanımı yaklaşık  $10,9 \text{ MPa}$ , BHA değeri  $1300 \text{ kg/m}^3$  değerlerinde sonuç elde edilmiştir. Bu çalışmada ise bir önceki çalışmayı destekleme ve iyileştirme yönünde bir tasarım yapılmıştır. Bu kapsamda ısı iletkenlik ve BHA değerlerini düşürmek amacıyla BVT yerine hacimce %20, %40 ve %60 oranlarında EPS ikame edilerek beton tasarımları oluşturulmuştur. Karışımda kullanılan BVT çeneli kırıcı ile  $D_{\text{max}}: 8 \text{ mm}$  ( $0 - 8 \text{ mm}$ ) olacak

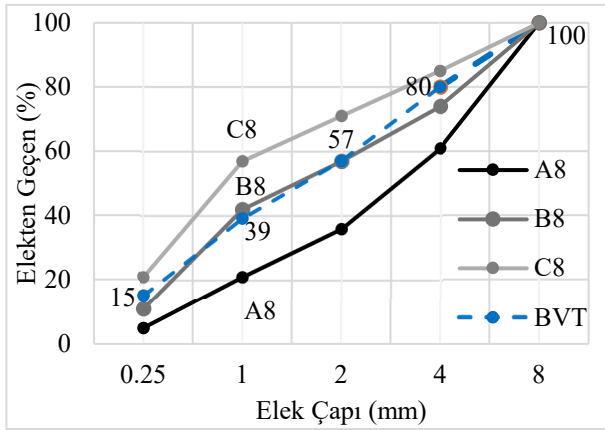
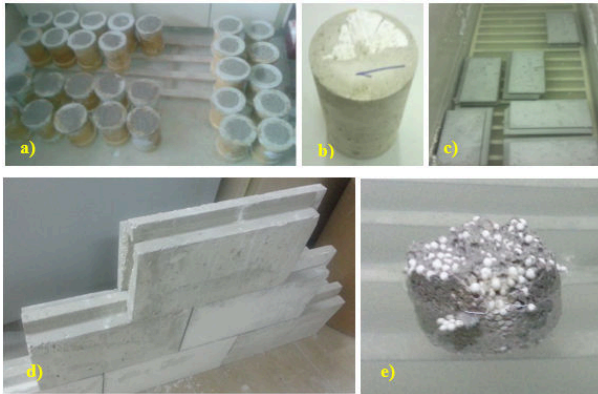
şekilde kırılmıştır. Elde edilen BVT  $0,25 \text{ mm}, 0,5 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$  ve  $8 \text{ mm}$  elek boyutlarında ayrı ayrı elenerek kaplarda depolanmıştır. Deneysel çalışmalarda BVT ve EPS agregaları Şekil 5'te verilen granülometri eğrisi dikkate alınarak karışımlarda kullanılmıştır.

Hafif betonların üretiminde, önce BVT iriden inceye doğru mikserle konularak  $1 \text{ dk}$  karışım süresi içinde agregaları kuru yüzey doymun (KYD) hale getirmek için hesaplanan gerekli su miktarı karışıma ilave edilmiştir.  $15 \text{ dk}$  bekleme süresi ardından KYD hale gelmiş BVT agregaları üzerine çimento eklenerek  $1 \text{ dk}$  daha karıştırılmıştır. Daha sonra mikserdeki karışıma gerekli karışım suyu ve kimyasal katkıları ilave edilerek karıştırma  $3 \text{ dk}$  daha sürdürülmüştür. Son olarak EPS'ler karışıma ilave edilmiş ve  $1 \text{ dk}$  süreyle karışıma devam edilmiştir. Üretilen taze harçların kıvamları çökme deneyiyle belirlenmiştir. Taze beton harçları Şekil 6a'da gösterildiği gibi her bir grupta en az  $10$  adet numune olacak şekilde  $100/200 \text{ mm}$  silindir kalıplara iki aşamada yerleştirilmiş ve her aşamada  $30 \text{ s}$  sarsma tablası ile vibrasyona maruz bırakılmıştır. Üretilen harç numunelerin üstüne ıslatılmış çuval serilmiş ve  $24 \text{ sa.}$  laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Hafif beton numuneler  $24 \text{ sa.}$  sonunda kalıplardan çıkarılmış ve ardından A1, B1, C1, A2, B2, C2, A3, B3 ve C3 grubu numuneler yüksek erken dayanım amacıyla  $75 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $3$  gün süreli atmosferik buhar kürüne tabi tutulmuştur.  $3$  günlük buhar kürü tamamlandıktan sonra numuneler  $7$  gün yaşına kadar kirece doymun suya bırakılmış ve ardından  $28$  gün yaşına kadar laboratuvar ortam koşullarına bırakılmıştır.  $400$  ve  $450 \text{ kg/m}^3$  yüksek çimento dozajlı D2, D2a ve E2 grubu deney numuneleri ise  $7$  günlük standart kür sonrasında ortam kürü etkilerinin belirlenebilmesi için  $28$  gün yaşına kadar laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Sertleşmiş beton numuneler üzerinde en az  $3$  numune ile  $3, 7$  ve  $28$  gün yaşlarında basınç dayanımı deneyleri ile TS 3624'e göre su emme deneyi yapılmıştır. Su emme deneylerinden elde edilen su emme oranı ve kuru birim hacim ağırlık verileri hesaplanarak tartışılmıştır. İlaveten "Hot Plate Yöntemi" ile MTA Teknolojik araştırmalar ve seramik laboratuvarlarında bulunan ısı iletkenlik cihazıyla ısı iletkenlik katsayıları  $\text{W/mK}$  cinsinden belirlenmiştir.

**Tablo 5:** Hafif betonların karışım tasarımları (1 m<sup>3</sup> hacim üretmek için).

Kod	Çimento (kg)	S/Ç	Su (kg)	BVT (kg)	EPS (kg)	Kür	SA (%)	HS (%)	EPS (%)	Bulk BHA (kg/m <sup>3</sup> )
A1	250	0,55	137,5	1203,64	3,07	B+O	0,03	0,02	20	1,59
B1	300	0,55	165,0	1135,47	2,90	B+O	0,03	0,02	20	1,60
C1	350	0,55	192,5	1067,30	2,72	B+O	0,03	0,02	20	1,61
A2	250	0,55	137,5	902,73	6,14	B+O	0,03	0,02	40	1,30
B2	300	0,55	165,0	851,60	5,79	B+O	0,03	0,02	40	1,32
C2	350	0,55	192,5	800,48	5,45	B+O	0,03	0,02	40	1,35
D2	400	0,45	180,0	766,99	5,22	S+O	0,04	0,02	40	1,35
D2a	400	0,35	140,0	813,55	4,43	S+O	0,04	-	40	1,36
E2	450	0,45	202,5	721,75	4,91	S+O	0,04	-	40	1,38
A3	250	0,55	137,5	601,82	9,21	B+O	0,03	0,02	60	1,00
B3	300	0,55	165,0	567,74	8,69	B+O	0,03	0,02	60	1,04
C3	350	0,55	192,5	533,65	8,17	B+O	0,03	0,02	60	1,08

\* B+O: Buhar+Ortam Kürü, B+S: Buhar+Su kürü, SA: Süper Akışkanlaştırıcı, HS: Hava Sürükleyici

**Şekil 5:** BVT elek analizi.

**Şekil 6:** Hafif betonlar a) Kalıplanmış, b) Kalıptan çıkarılmış, c) Su küründe, d) Blok duvar elemanı, e) Suda yüzdürülen duvar numunesi.

Çalışmada tüm veriler elde edildikten sonra mevcutta sektörde kullanılmakta olan duvar

elemanı malzemeleri ile maliyet karşılaştırmalarını gerçekleştirebilmek amacıyla üretilen tüm duvar elemanlarının üretim maliyetleri günümüz fiyatlamaları çerçevesinde hesaplanmıştır. Bu kapsamda günlük 80 m<sup>3</sup> (5000 adet) üretim yapılması planlanarak üretilen duvar elemanlarında kullanılan bileşenlerin temini ve nakliyesi, 2 mühendis, 1 tekniker ve 7 işçi istihdamı, öğütme, taşınma ve karıştırma işlemleri için kullanılacak cihazların elektrik tüketimleri kW cinsinden hesaplanarak ve bunlara tahmini nakliye bedelleri eklenerek fiyatlamaya yapılmıştır. İlgili değerlendirmeler ve karşılaştırmalar bulgular ve değerlendirme bölümünde detaylandırılmıştır.

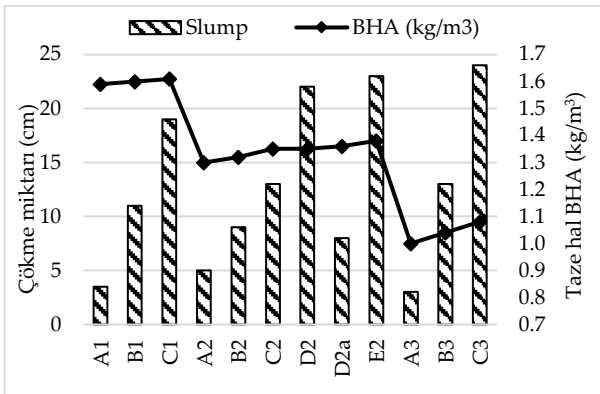
### 3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, hafif blok duvar elemanları üretilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla hafif betonların taze halde birim hacim ağırlığı (BHA) ve kıvam değerleri, sertleşmiş durumda ise basınç dayanımı, BHA su emme, kuru BHA ve ısı iletkenlik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, her seride üretilen hafif beton bloklar için maliyet analizi gerçekleştirilmiş ve diğer hafif yapı malzemeleriyle karşılaştırılmıştır.

#### 3.1 Taze Beton Özellikleri

Hafif betonların üretimleri sırasında, taze beton harçları üzerinde çökme deneyi ile kıvam tayini ve kalıplara yerleştirilen betonların ağırlıkları

tartılarak taze halde birim hacim ağırlıkları  $\text{kg/m}^3$  biriminden belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'ye göre hafif betonların kıvamları (çökme değerleri) aynı EPS ikame oranına sahip serilerde çimento dozajı arttıkça artmıştır. Bunun sebebi karışımlardaki kohezif BVT agregasının azalması ve çimento dozajının artmasından dolayı katkının daha iyi çalışması sebebiyledir [17]. Karışımlarda kullanılan EPS ikame oranı arttıkça çökme değerleri de artmıştır. Ancak S/Ç oranı düşük olmasından dolayı D2a serisinin çökme değeri D2'ye göre azalmıştır.  $250 \text{ kg/m}^3$  doz çimentolu hafif betonların çökme değerleri S1 ve S2 sınıf elde edilmiştir. Bilindiği gibi hafif betonlarda kullanılan agregaların özellikle volkanik esaslı olması durumunda puzolanik özelliklerinden ve yüksek yüzey alanlarından dolayı düşük s/ç içerikli karışımlarda çimento dozajı da düşük olması durumunda süperakışkanlaştırıcı kimyasallar yeterince çalışmamaktadır. Bu sebeple çökme deney sonuçları düşük seviyede kalmaktadır. Bu yaklaşım çimento dozajları düşük olan A ve B serilerinde çok net gözlenmiştir. Ancak %60 EPS ikameli serilerde bu etkinin sadece  $250 \text{ kg/m}^3$  çimento dozajlı hafif betonda gözlenmiştir. Şekil 8'de gösterilen hafif betonların taze hal BHA'larına göre en yüksek BHA %20 EPS içeren betonlarda  $1500 - 1600 \text{ kg/m}^3$ , en düşük BHA %60 EPS içeren betonlarda  $1000 - 1100 \text{ kg/m}^3$  olarak elde edilmiştir.



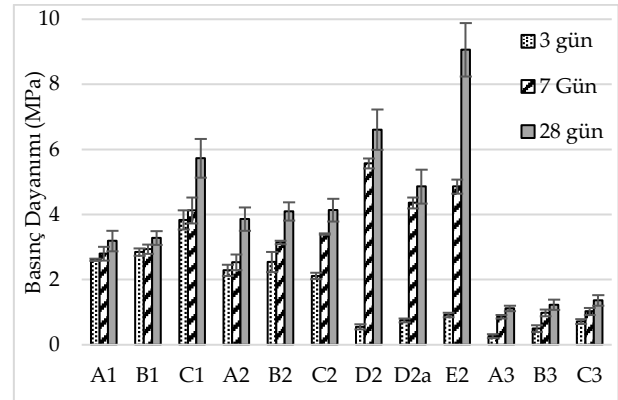
Şekil 7: Hafif betonların taze hal verileri.

### 3.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Çalışmada sertleşmiş hafif betonlar üzerinde 3, 7 ve 28 gün yaşlarında basınç dayanımı, 28 gün yaşında su emme deneyi ve 28 gün yaşında ısı iletkenliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'de hafif betonların basınç dayanımı deney sonuçları gösterilmiştir. Ancak %60 EPS içeren hafif

betonların 28 gün yaşına kadar basınç dayanımları  $1,5 \text{ MPa}$ 'nın altında elde edilmiştir. Deney sırasında sertleşmiş hafif beton numuneler  $1,5 \text{ MPa}$  gerilme altında yüksek oranda  $0,10'$ 'dan fazla düşey şekil değiştirme göstermiş (ezilmiş) ve bu sebeple yük taşıma kabiliyeti  $1,5 \text{ MPa}$ 'nın üstüne çıkmamıştır. Ancak %60 EPS içerikli hafif betonlarda su emme deneyleri gerçekleştirilebilmiştir. Bunun nedeni düşük yoğunluktaki EPS'nin yüksek oranda kullanımı sebebiyle beton yerleşiminde ayrışmaya sebep olmuş ve böylece betonun homojenliğinin bozulmuş olmasından kaynaklanmaktadır.

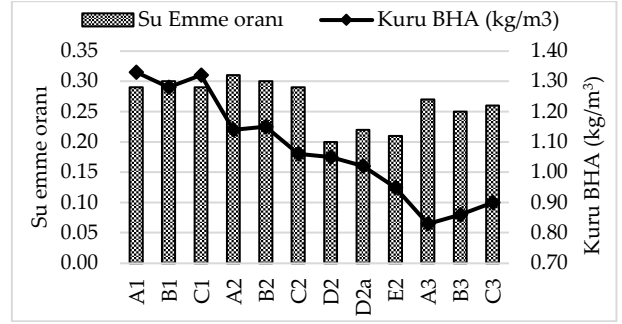
Şekil 8'de verilen basınç dayanımı deney sonuçlarına göre, %20 EPS'li hafif betonlarda en düşük basınç dayanımları 3 ve 28 gün için sırasıyla ortalama  $2,62 \text{ MPa}$  ve  $3,19 \text{ MPa}$  ile  $250 \text{ kg/m}^3$  çimento dozlu seride, en yüksek basınç dayanımları 3 ve 28 gün için sırasıyla ortalama  $3,70 \text{ MPa}$  ve  $5,73 \text{ MPa}$  ile  $350 \text{ kg/m}^3$  çimento dozlu seride elde edilmiştir. %20 EPS ikameli hafif betonların çimento dozajı arttıkça erken basınç dayanımları da artmıştır. Buna göre  $250 \text{ kg/m}^3$  dozaj ile üretilen seriye göre  $300$  ve  $350 \text{ kg/m}^3$  dozaja sahip beton numunelerde 3 günlük basınç dayanımları sırasıyla %6 ile %41 oranında, 7 günlük basınç dayanımları %2 ile %45 oranında, 28 günlük basınç dayanımları %3 ile %80 oranında artmıştır.



Şekil 8: Basınç dayanımı deney sonuçları.

%40 EPS ikame oranına sahip hafif betonlarda en düşük basınç dayanımları 3 ve 28 gün için sırasıyla ortalama  $0,55 \text{ MPa}$  ve  $3,14 \text{ MPa}$  ile  $400 \text{ kg/m}^3$  ve  $350 \text{ kg/m}^3$  çimento dozlu serilerde, en yüksek basınç dayanımları 3 ve 28 gün için sırasıyla ortalama  $2,45 \text{ MPa}$  ve  $9,06 \text{ MPa}$  ile  $300 \text{ kg/m}^3$  ve  $400 \text{ kg/m}^3$  çimento dozlu serilerde elde edilmiştir. Yüksek çimento dozlu serilerde gerçekleşen erken düşük dayanımın sebebi standart kirece doymun su kürünün tercih edilmesidir. Ancak hem çimento miktarının yüksek

olması hem de kirece doymun su kürünün etkisiyle puzolanik reaksiyonların yüksek oranda gerçekleşmesi sebebiyle 28 günlük dayanımlarda ortalama 9 MPa gibi yüksek bir dayanıma ulaşılmıştır. A2, B2 ve C2'nin 3 – 28 günlük dayanım gelişimleri sırasıyla %75, %67 ve %45 oranlarında artmıştır. Burada buhar kürünün erken dayanımlara olan etkileri net bir şekilde görülmektedir. Geleneksel betonlarda geleneksel standart kürlenmenin sonucunda basınç dayanımı gelişimi %60-65 arasında olmaktadır. Geleneksel betonlarda erken dayanım, nihai dayanımın yaklaşık %35-45'i mertebesinde olmaktadır [25]. Ancak bu çalışmanın sonucunda A2, B2 ve C2 serilerinde buhar kürünün etkisinde erken basınç dayanımları nihai dayanımın %56-68'i mertebesinde olmuştur. Böylece hafif betonda buhar kürünün etkinliğinin standart küre göre yaklaşık 2 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Hafif betonların 28 günlük basınç dayanımları, çimento dozajı arttıkça önemli oranda artmıştır. D2, D2a ve E2 beton serilerinde düşük S/Ç oranı ve yüksek çimento dozajı sebebiyle en yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Standart kür uygulanan D2, D2a ve E2 hafif betonlarda erken basınç dayanımları 1,0 MPa'nın altında iken, 450 kg/m<sup>3</sup> dozaja ve 0,45 S/Ç oranına sahip E2 serisi 28 gün sonunda 9,92 MPa değerine ulaşarak en yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur. Özellikle kirece doymun suda kür yapılan ve ardından ortamda bekletilen numunelerin yüksek orandaki puzolanik reaksiyonlardan dolayı dayanım gelişimlerinin çok yüksek olduğu gözlenmiştir. Burada BVT'nin yüksek oranda su emme oranının etkin olduğu da düşünülmektedir. D2a serisinde S/Ç oranı D2 serisine göre düşük olmasına rağmen düşük işlenebilirlikten dolayı erken ve nihai dayanımlar önemli oranda azalmıştır. Burada işlenebilirliğin etkisi önemli derece görülmektedir. Aynı S/Ç oranındaki D2 ve E2 serilerinde çimento dozajı arttıkça basınç dayanımları artmıştır. Literatürde de belirtildiği gibi, çimento içeriği belirli bir seviyeye kadar artırıldığında, hidrasyon ürünleri olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) miktarı artarak betonun dayanımını iyileştirir.



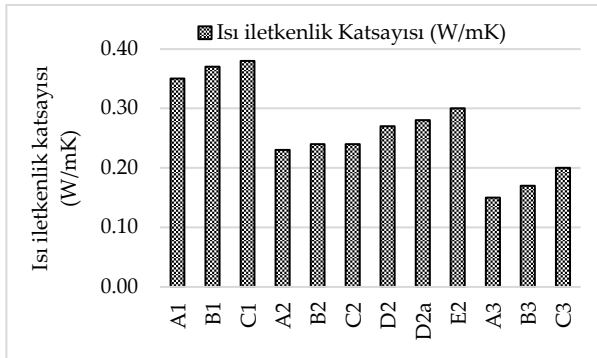
Şekil 9: Su emme deney sonuçları.

Hafif betonların su emme deney sonuçlarından elde edilen su emme oranları ile kuru BHA verileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'a göre, sertleşmiş hafif betonların BHA'ları 0,83 – 1,33 kg/dm<sup>3</sup> aralığında değişmektedir. En yüksek ve en düşük BHA'ları sırasıyla C1 ve A3 serilerinde elde edilmiştir. Çimento dozajındaki artış BHA değerlerini önemli oranda değiştirmemiştir. Ancak EPS oranı arttıkça BHA değerleri önemli oranda azalmıştır. Aynı çimento dozajına sahip seriler incelendiğinde, 250 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajlı serilerde birim hacim ağırlıkları, %20 EPS ikame oranına kıyasla %40 EPS ikamesiyle %21, %60 EPS ikamesiyle %83 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajlı serilerde birim hacim ağırlıkları, %40 EPS ikamesiyle %21, %60 EPS ikamesiyle %71 oranında bir azalma göstermiştir. 350 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajlı serilerde ise bu azalmalar, %40 EPS ikamesiyle %17, %60 EPS ikamesiyle %70 oranında olmuştur. 0,98 kg/dm<sup>3</sup> ile sudan daha düşük birim hacim ağırlığa sahip olan D2a serisiyle üretilen duvar bloğuna ait numune sudan hafif olduğu Şekil 7'de gösterilmiştir. D2a numunesinin (%40 EPS içeren hafif betonların) BHA değeri, 1000 kg/m<sup>3</sup>'ün altında kalarak ultra hafif beton sınıfına girmiştir.

Su emme oranları incelendiğinde, yüksek s/ç oranına sahip hafif betonların yüksek su emme oranlarına sebep olduğu, çimento dozajı ve EPS ikame oranı artmasına rağmen su emme oranlarında önemli değişimler olmadığı gözlenmiştir. Su emme oranları çimento dozajı 250 – 450 kg/m<sup>3</sup> olmasına rağmen %20-30 arasında olmuştur. Yüksek oranda su emmenin sebebi BVT'nin poroz yapısından kaynaklanmaktadır. BVT'nin yaklaşık %16 oranında su emdiği düşünüldüğünde hafif betonlardaki su emme oranı %4 – 14 arasında değişmektedir. %60 EPS'ye sahip hafif betonların su emme oranları BVT'nin hacimce

azalmasından dolayı daha düşük oranlarda elde edilmiştir.

Hafif betonlar genellikle basınç dayanımı ve birim hacim ağırlık bakımından sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır. Yalıtım betonları  $300 \text{ kg/m}^3$ -  $800 \text{ kg/m}^3$ , orta dayanımlı hafif betonlar  $800 \text{ kg/m}^3$ -  $1400 \text{ kg/m}^3$ , taşıyıcı hafif betonlar  $1400 \text{ kg/m}^3$ 'den büyük birim hacim ağırlığına sahiptirler. Dayanım değerleri yalıtım betonlarında  $0,5$ - $3,5 \text{ MPa}$  ve orta dayanımlı hafif betonlarda  $3,5$ - $15 \text{ MPa}$  aralığında kalırken, taşıyıcı hafif betonlarda ise  $15 \text{ MPa}$ 'dan büyük değerlere çıkmaktadır [24]. Bu sınıflandırmalar göz önüne alındığında, çalışma kapsamında EPS ve Bayburt taşı agregası ile üretilen 12 farklı beton serisi,  $0,9$ - $1,4 \text{ kg/m}^3$  aralığında birim hacim ağırlıklarına ve  $3,1$ - $9,0 \text{ MPa}$  aralığında basınç dayanımlarına sahip oldukları için hem yalıtım hem de orta dayanımlı hafif beton sınıfında yerini almaktadır.



Şekil 10: Isı iletkenlik deney sonuçları.

Şekil 10'da üretilen hafif betonların 28 gün yaşında gerçekleştirilen ısı iletkenlik katsayılarına ilişkin veriler gösterilmiştir. Bu verilere göre  $0,15$  -  $0,20 \text{ W/mK}$  arasında en düşük ısı iletkenliğe sahip hafif betonlar %60 EPS içerikli olanlardır. Sırasıyla %20 ve %40 EPS içerikli hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları ise sırasıyla ortalama  $0,37 \text{ W/mK}$  ve  $0,25 \text{ W/mK}$  olarak elde edilmiştir. Burada elde edilen ısı iletkenlik katsayıları çimentonun artışına bağlı olarak artarken, EPS'nin artışıyla önemli derecede azalmıştır.

### 3.3 Maliyet Analizi

Çalışma kapsamında BVT ve EPS agregası ile üretilen hafif duvar elemanının maliyet analizi Tablo 6'da verilmiştir. Hesaplamalar  $40 \times 20 \times 10 \text{ cm}$  ebatlarında günlük 10000 adet ( $80 \text{ m}^3$ ) duvar

bloğunun üretim planlaması üzerine yapılmıştır. Çimento, EPS ve kimyasal katkıların fiyatı 2024 yılı rayiç değerlerine göre hesaplanmıştır. Enerji ve işçilik giderleri günlük maliyet üzerinden hesaplanmıştır. Enerji maliyeti içerisinde mikser, buhar kürü gibi üretim için gerekli makinelerin ortalama elektrik sarfiyatı ve diğer temel elektrik giderleri yer almaktadır. İşçilik gideri üretim bandında 4 kişinin asgari şartlarda istihdam edileceği şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 6'da verilen maliyet analizi dolu gövde blok duvar elemanı için hesaplanmıştır. Buna göre dolu BVT Blok'ların adet fiyatları yaklaşık olarak  $10,0$  -  $19,30 \text{ TL}$  arasında hesaplanmaktadır. Bu maliyetin temel sebeplerinden biri EPS diğeri çimento bedelidir. Granül EPS fiyatlarının yüksek olması doğrudan üretim maliyetlerini etkilemiştir. Buna göre en yüksek fiyatlandırma  $400$  ve  $450 \text{ kg/m}^3$  doz çimentolu A3, B3, C3 beton serilerinde görülürken en düşük fiyatlandırma %20 EPS ikame oranıyla üretilen A1, B1, C1 beton serilerinde görülmüştür. Maliyet analizleri, BHA ve dayanım değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde en iyi sonuç %40 EPS kullanılan hafif betonlarda elde edildiği görülmektedir. Üretilen hafif beton duvar bloklarının diğer duvar elemanlarıyla maliyet karşılaştırması Tablo 7'de verilmiştir. 12 farklı şekilde tasarlanan hafif betonların gövdesinde Bims Blok üretiminde olduğu gibi  $105 \times 60 \times 200 \text{ mm}$  ölçülerinde 3 bölmeli boşluk oluşturulduğunda, her noktadaki hafif beton taşıyıcı kalınlığı  $20 \text{ mm}$  olmaktadır. Duvar bloğunun gövdesindeki boşluklar dikkate alındığında yaklaşık %45 oranında bir hacim kazanımı ve buna bağlı olarak BHA ve maliyet azalması meydana gelecektir.

Tablo 7'ye göre duvar elemanlarının  $1 \text{ m}^2$  için hesaplanan fiyatları düşükten yüksek olana doğru bims, BVT blok, tuğla, gazbeton ve EPS blok şeklinde sıralanmaktadır. Bu sıralamada D2a serisinin endüstriyel üretime girebileceği düşünülerek sıralamaya dahil edilmiştir. Diğer duvar elemanlarına kıyasla BVT blok, yüksek basınç dayanımı ile ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte BHA ve ısı iletkenlik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.



**Tablo 6:** Dolu BVT blok duvar elemanı maliyet analizi

Kod	Bileşenlerin oluşturduğu maliyet (TL/m <sup>3</sup> )					Bileşen Toplam Maliyet (TL/m <sup>3</sup> )	Üretim maliyetleri (TL/80 m <sup>3</sup> )			Toplam Maliyet (TL/m <sup>3</sup> )	Adet Maliyeti (TL/adet)
	Çimento	BVT	EPS	Su	Kimyasal		Günlük Üretim	Enerji Bedeli	İşçilik		
A1	625	98	122,7	0,28	426,6	1174	93967	700	5333	100000	5,66
B1	750	95	115,9	0,33	511,8	1378	110253	700	5333	116286	6,58
C1	875	90	108,7	0,39	597,1	1581	126506	700	5333	132539	7,50
A2	625	87	245,5	0,28	426,5	1297	103787	700	5333	109820	6,21
B2	750	86	231,5	0,33	511,8	1493	119497	700	5333	125530	7,10
C2	875	83	217,9	0,39	597,1	1690	135239	700	5333	141272	7,99
D2	1000	79	208,7	0,36	910,0	2119	169526	2	5333	174861	9,89
D2a	1000	74	177,1	0,28	910,0	2087	166993	2	5333	172328	9,74
E2	1125	71	196,3	0,41	1023,7	2345	187638	2	5333	192973	10,91
A3	625	62	368,2	0,28	426,5	1420	113608	700	5333	119641	6,76
B3	750	59	347,4	0,33	511,8	1609	128774,3	700	5333	134807	7,62
C3	875	55	326,6	0,39	597,1	1799	143940	700	5333	149973	8,48

**Tablo 7:** Duvar elemanlarının maliyet ve teknik özelliklerinin karşılaştırılması

Duvar Elemanı	Boyut	Ort. Sarfiyat	Adet Fiyatı (₺)	M <sup>2</sup> Fiyatı (₺)	BHA (kg/dm <sup>3</sup> )	Basınç Dayanımı (MPa)	Isı iletkenlik Katsayısı (W/mK)
Gaz Beton	60x25x10	7	37,5	262,5	0,4-0,6	2,5-5,0	0,11-0,19
Tuğla	19x19x10	25	6,0	150	0,6	2,5	0,32
Bims	39x18,5x10	13	8,5	110,5	0,6	<1,5	0,127
EPS blok	58x30x10	6	48	288	0,4	<1,5	0,08
BVT blok	40x20x10	13	6,2-10,9	80,6-141,7	0,95-1,14	3,86-9,06	0,23-0,30

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Zeolitik tüf esaslı beyaz Bayburt taşı ile granül EPS agregalı hafif beton duvar bloklarının üretilebilirliği 5 farklı dozaj (250, 300, 350, 400 ve 450 kg/m<sup>3</sup>) ve 3 farklı EPS ikame oranında (%20, %40 ve %60) araştırılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre hafif beton numunelerinin birim hacim ağırlıkları (BHA), çimento dozajı arttıkça artarken, EPS ikame oranı arttıkça azalmaktadır. Aynı çimento dozajına sahip serilerde, EPS ikame oranı arttıkça BHA değerleri %21 ile %83 arasında azalışlar gerçekleşmiştir. Dozaj miktarının artması ve dolayısıyla BVT ve EPS agrega miktarının azalması, taze betonların akışkanlığının artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte, EPS ikame oranı %20'den %40'a çıkarıldığında çökme değerinde azalma, %60'a çıkarıldığında ise ayrışma eğilimleri nedeniyle yeniden bir artış görülmüştür. Tüm beton karışımları arasında %40 EPS içeren serilerde en

yüksek basınç dayanımı 9,92 MPa, aynı seride en düşük BHA 1,02 kg/dm<sup>3</sup>, ısı iletkenlik katsayısı 0,23-0,30 W/mK ve %20-31 su emme oranına sahip duvar elemanı kompozisyonları elde edilmiştir. Aynı dozaja sahip beton serilerinde EPS kullanımı arttıkça basınç dayanımı önemli oranda azalmıştır. Buhar kürü erken dayanımları önemli oranda artırmış, standart kür düşürmüştür. Optimum dayanıma ulaşabilmek amacıyla öncelikle en fazla 3 gün buhar kürü, ardından 7 güne kadar standart kür ve son olarak ortam koşulları tavsiye edilebilir. Maliyet analizi, duvar elemanının hafiflik ve dayanım yeterliliği dikkate alındığında %40 EPS agregalı hafif betonlar endüstriyel üretim için daha uygun olduğu düşünülmektedir. Çalışma kapsamında üretilen BVT Blok, inşaat sektöründe duvar elemanı olarak kullanılan gazbeton, bims ve tuğlaya göre uygun maliyetle daha yüksek basınç dayanımına sahip olmakla birlikte ısı iletkenlik ve BHA verilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

**Yazar Katkısı:** Tüm yazarlar, literatür taraması, metodolojinin oluşturulması, bulguların elde edilmesi, makale yazımı ve düzenleme süreçlerine katkı sağlamıştır.

**Teşekkür:** Çalışma konusu TÜBİTAK 2209 A destek fonu ile Bideb Başkanlığı tarafından 2014 yılında desteklenmiştir.

**Çıkar Çatışması:** Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmekteyiz.

## KAYNAKLAR

- [1] E. Çiçek, "Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
- [2] B. Borhan, "Ytong El Kitabı," 1. Baskı, Türkiye, Türk Ytong Sanayi, 1990.
- [3] L. Gündüz, A. Sarıışık, B. Tozaçan, M. Davraz, İ. Uğur, O. Çankıran, "Pomza Teknolojisi," c. 1, Isbaş, 1998.
- [4] EPS blok, "Block Ürünler web sayfası" <https://www.epsblock.com/block-urunler/> , En son erişim: 29 Mayıs 2024.
- [5] G.Y. Kamacı, "Değişik Isı Yalıtımlı Duvar Elemanlarının Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2021.
- [6] K. Miled, R. L. Roy, K. Sab, "Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode", *Mech Mater*, vol. 36, no. 11, pp. 1031–46, 2004.
- [7] Y. Xu, L. Jiang, J. Xu, Y. Li, "Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick", *Constr. Build. Mat.*, vol. 27, no. 1, pp. 32-38, 2012.
- [8] K. G. Babu,, D. S. Babu, "Behavior of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume", *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 755-762, 2003.
- [9] R. L. Roy, E. Parant, C. Boulay, "Taking into account the inclusions' size in lightweight concrete compressive strength prediction", *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 770-775, 2005.
- [10] B. Chen, J. Liu, "Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads", *Constr. Build. Mat.*, vol. 21, no. 1, pp. 7-11, 2007.
- [11] A. Kan, R. Demirboğa, "A novel material for lightweight concrete production", *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, no. 7, pp. 489-495, 2009.
- [12] A. Bideci, A. H. Gültekin, H. Yıldırım, S. Oymael, Ö. S. Bideci, "Internal structure examination of lightweight concrete produced with polymer-coated pumice aggregate", *Composites Part B: Engineering*, vol. 54, pp. 439-447, 2013.
- [14] DPT, "Sekizinci Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu", 1999, <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/08/Sekizinci-Bes-Yillik-Kalkinma-Plani-Madencilik-OIK-Raporu-EndustriyelHammaddelerAltKomisyonu-YapiMalzemeleri-III-CalismaGrubuRaporu.pdf>.
- [15] MTA, "Türkiye Magmatizma Haritası", <https://www.mta.gov.tr/v3.0/birimler/tuvak-haritalar>, En son erişim: 29 Mayıs 2024.
- [16] Türk Patent, "Bayburt Taşı", <https://ci.turkpatent.gov.tr/cografi-isaretler/detay/38366> , En son erişim: 29 Mayıs 2024.
- [17] İ. Tekin, T. Kotan, A.T. Osmanson, W. Brostow, O. Gencel, G. Martinez-Barrera, "Properties of lightweight concrete blocks with waste zeolitic tuff", *Materials Science (Medžiagotyra)*, vol. 26, no. 4, 2020.
- [18] M. Pekköz, İ. Tekin, "Microstructural investigation and strength properties of structural lightweight concrete produced with Zeolitic tuff aggregate", *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 102863, 2021.
- [19] İ. Tekin, M. Pekköz, "The effects of ZnO powder and different fiber types used in tuff/calcite-based geopolymers on electromagnetic shielding effectiveness", *J. Build. Eng.*, vol. 89, p. 109343, 2024.
- [20] İ. Tekin, D. Tekin, "Polinaftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcıların farklı inceliklere sahip Bayburt Taşı ikame edilmiş kompoze çimentoların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 24, sy. 3, ss. 419-425, 2018.

- [21] İ. Tekin, T. Kotan, M. Yurdakul, E. Oner, "Bayburt bölgesinde bulunan farklı agrega tipleri ile üretilen geleneksel betonların mekanik mukavemetleri üzerine bir çalışma", *Politeknik Dergisi*, c. 20, sy. 3, ss. 513-518, 2017.
- [22] A. Kan, R. Demirboga, "A new technique of processing for waste-expanded polystyrene foams as aggregates", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 6, pp. 2994-3000, 2009.
- [23] M. Dwarampudi, B. Venkateshwari, "Performance of light weight concrete with different aggregates a comprehensive review", *Discover Civil Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1-36, 2024.
- [24] Rilem, "Functional Classification of LW Concretes. Recommendation LC," 2nd Ed., 1975.
- [25] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, "Concrete Microstructure, Properties, and Materials," 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 2006.

RESEARCH ARTICLE

# Effects of Climate Change and Air Pollution on Soil Moisture: The Case of Türkiye

## *İklim Değişikliği ve Hava Kirliliğinin Toprak Nemi Üzerindeki Etkileri: Türkiye Örneği*

Nehir Uyar\*

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Zonguldak, Türkiye.

Received / Geliş: 17.08.2024

Accepted / Kabul: 7.11.2024

\*Corresponding Author: Nehir Uyar [nehiruyar@beun.edu.tr](mailto:nehiruyar@beun.edu.tr)

**ABSTRACT:** The effect of climatic variables on soil moisture is quite high. In this study, the soil moisture status in Turkey has been analyzed by using satellite data between 2016 and 2022 for Land Surface Temperature (LST), surface pressure (PS) and precipitation variables. The effects of temperature changes, surface pressure and precipitation on soil moisture and how these interactions differ in different regions of Turkey are analyzed. Surface soil moisture (SSM) was highly correlated with rainfall (R 0.74). There was a high correlation between SSM and LST (R 0.74). Subsurface soil moisture (SUSM) was highly correlated with precipitation (R 0.73). There was a high correlation between SUSM and LST (R 0.74). Greenhouse gas emission data were taken from the Turk Stat data portal and the relationship between soil moisture was examined. A high level of correlation was observed between SSM and SUSM, f gases (R 0.97, R 0.96). This study can be considered as an important step in understanding the effects of Turkey's climatic variables on soil moisture. The findings emphasize that soil moisture is important for sustainable agriculture and environmental factors and provide an in-depth understanding of how climatic variables affect it. Such analyses can provide strategic information in areas such as agricultural planning, water resources management and environmental sustainability, and contribute to a more robust basis for future decisions.

**Keywords::** Soil moisture, land surface temperature, surface pressure and precipitation.

**ÖZ:** İklimsel değişkenlerin toprak nemi üzerindeki etkisi oldukça yüksektir. Bu çalışmada, Türkiye'deki toprak nem durumu, 2016-2022 yılları arasında uydu verileri kullanılarak Kara Yüzey Sıcaklığı (LST), yüzey basıncı (PS) ve yağış değişkenleri için analiz edilmiştir. Sıcaklık değişimlerinin, yüzey basıncının ve yağışın toprak nemi üzerindeki etkileri ve bu etkileşimlerin Türkiye'nin farklı bölgelerinde nasıl farklılık gösterdiği analiz edilmiştir. Yüzey toprak nemi (SSM), yağışla yüksek oranda ilişkiliydi (R 0,74). SSM ve LST arasında yüksek bir korelasyon vardı (R 0,74). Yeraltı toprak nemi (SUSM) yağışla yüksek oranda ilişkiliydi (R 0,73). SUSM ve LST arasında yüksek bir korelasyon vardı (R 0,74). Sera gazı emisyon verileri TÜİK veri portalından alınmış ve toprak nemi arasındaki ilişki incelenmiştir. SSM ve SUSM, f gazları arasında yüksek düzeyde korelasyon gözlenmiştir (R 0,97, R 0,96). Bu çalışma, Türkiye'nin iklim değişkenlerinin toprak nemi üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Bulgular, toprak neminin sürdürülebilir tarım ve çevresel faktörler için önemli olduğunu vurgular ve iklim değişkenlerinin bunu nasıl etkilediğine dair derinlemesine bir anlayış sağlar. Bu tür analizler, tarımsal planlama, su kaynakları yönetimi ve çevresel sürdürülebilirlik gibi alanlarda stratejik bilgiler sağlayabilir ve gelecekteki kararlar için daha sağlam bir temel oluşturmaya katkıda bulunabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Toprak nemi, arazi yüzey sıcaklığı, yüzey basıncı ve yağış.

## 1. INTRODUCTION

Climate plays a vital role in the complexity of natural systems. The relationship between soil moisture and climatic variables has decisive effects on ecological balance. In this context, the geography of Turkey draws attention with its diverse climatic characteristics.

Soil moisture is crucial for understanding the water, energy, and carbon cycles, impacting weather forecasts and flood or drought monitoring. The SMAP mission uses L-band microwave technology to monitor soil moisture, combining radar (high spatial resolution, low sensitivity) and radiometers (low spatial resolution, high sensitivity) to overcome their individual limitations. SMAP's objectives include measuring soil moisture at 40 km resolution, improving it to 10 km by merging radar and radiometer data, and detecting freeze/thaw states at 3 km resolution. This paper presents a downscaling algorithm to enhance the SMAP 10 km soil moisture product by optimizing both radar and radiometer data [1]-[10].

Understanding surface soil moisture is vital across disciplines. It impacts ecosystems, agriculture, and the environment. In ecosystems, it affects microorganisms and nutrient cycling. In agriculture, it's crucial for crop growth. Soil moisture also influences runoff, erosion, and air quality through dust. Moreover, it's linked to disease transmission. Monitoring it is key for sustainable practices and managing environmental impacts [10]-[14].

Deeper soil moisture can serve as a more nuanced parameter for certain processes, diverging from surface soil moisture (SSM) notably under dry conditions. Yet, SSM often exhibits a strong correlation with moisture in deeper layers, indicating that focusing solely on SSM doesn't result in substantial information loss. The duration of soil moisture retention is pivotal in forecasting extreme weather events like heatwaves, droughts, floods, and storms. This is due to the considerable memory capacity of soil moisture compared to the atmosphere. While atmospheric anomalies dissipate swiftly (within hours), anomalies in soil moisture persist for extended periods (from days to months). These lingering anomalies might influence subsequent atmospheric patterns, hinting

at the potential for valuable insights in seasonal atmospheric predictions [15]-[17].

In this article, Turkey's above and below ground soil moisture, surface temperature, surface pressure and precipitation data were obtained by processing satellite images. It is aimed to contribute to the understanding of these interactions by emphasizing the effects of climate variables on soil moisture. Surface temperature, surface pressure and precipitation data are important data sources for understanding regional climatic variables as well as factors affecting surface and SSM. The analyses presented in this paper provide a comprehensive use of these data to explain the dynamics of soil moisture in different regions of Turkey.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Study Area

Google Earth image of Turkey is given in Figure 1. Turkey is a very diverse country in terms of its home location and topography, as well as soil moisture. While the northern and western regions of the country were wetter, the southern and eastern regions were drier. Soil moisture is important in many aspects such as agriculture, water resources and natural ecosystems. Without adequate soil moisture, plants cannot take in water and nutrients, which can lead to reduced yields. Soil moisture also plays a role in producing water and feeding rivers. Moist soil is essential for the survival of many plants and animals. Ground connections in Turkey have many factors. The most important precipitation, temperature and soil types. Soil moisture that receives adequate rainfall is higher. Soil moisture changes more through evaporation of the hot junction. Sandy soils retain less water than clay soils. It is important to preserve and sustainably use Turkey's soil moisture. This can be done through irrigation values, afforestation efforts, their control and home farming practices. Irrigation resistant, water waste can be prevented, and soil moisture can be preserved. It helps protect trees from their soil and retain moisture. It helps in erosion control and conservation of storage water. There are techniques that will help preserve soil moisture through conscious agricultural practices. Soil moisture is an important resource for Turkey's development and future generations. Protecting and using this resource sustainably, giving critical

importance to sustaining production in Turkey's management and preserving the protection of natural ecosystems.



**Figure 1:** Google Earth image of Turkey.

## 2.2. Materials

The advancements in remote sensing technology in the last thirty years have significantly enhanced our capacity to regularly gather worldwide data on soil moisture levels [18]-[21]. Numerous thoroughly assessed soil moisture datasets have demonstrated their utility across diverse applications. They're instrumental in weather and climate prediction, monitoring droughts and wildfires, tracking floods and landslides, and improving agricultural output [22]-[25].

Soil moisture ( $\theta$ ) availability is critical for refining climate, weather, and hydrological models [26]-[28]. Satellite-based microwave sensors have the potential to globally assess  $\theta$  in the topsoil layer. Yet, existing sensors like the Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) at C-band (7.32 GHz) face accuracy limitations in vegetated areas [29, 30]. This has led to the selection of L-band (1.4 GHz) sensors for missions like Soil Moisture and Ocean Salinity and the upcoming Soil Moisture Active and Passive (SMAP) missions [31, 32]. SMAP data were processed and used in this study.

The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) project is a significant advancement in reanalysis products. It uses data from NASA Earth observing satellites to enhance existing reanalysis products by providing a more accurate depiction of the hydrological cycle, as highlighted in Rienecker et al.'s work from 2011. This improvement aims to offer a more realistic understanding of Earth's hydrological processes compared to previous reanalysis products [33].

Surface pressure data provided by the Merra satellite.

The precipitation data sets used were sourced from the Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station (CHIRPS) database. This database is a result of collaboration between the United States Geological Survey (USGS) and the Earth Resource Observation and Science (EROS) center. CHIRPS combines satellite imagery with on-site observations from various national and regional meteorological departments. These data sets cover a wide temporal range, starting from 1981 to near the present, providing information at pentadal, decadal, and monthly intervals. The spatial resolution of this data is quite high, at  $0.05^\circ$ , and it offers almost global coverage, spanning from  $50^\circ$  S to  $50^\circ$  N and from  $180^\circ$  E to  $180^\circ$  W. This comprehensive coverage and resolution make CHIRPS a valuable resource for studying precipitation patterns and trends across different spatial and temporal scales [34].

The CHIRPS dataset, introduced in early 2014, is a new climate database with a particular focus on land-based precipitation, integrating three different sources of information: global climatology's, satellite forecasts and in situ observations [35]. What distinguishes CHIRPS from others is that it contains a larger amount of station data compared to other similar products. In addition, it utilizes a high-resolution background climatology, which enables more accurate forecasting of rainfall averages and fluctuations. This development leads to a better assessment of the hydrological situation [36]. In conclusion, CHIRPS is characterized by its ability to provide more refined and reliable data on precipitation patterns and contributes significantly to a better understanding of hydrological processes. Precipitation values were extracted from CHIRPS datasets.

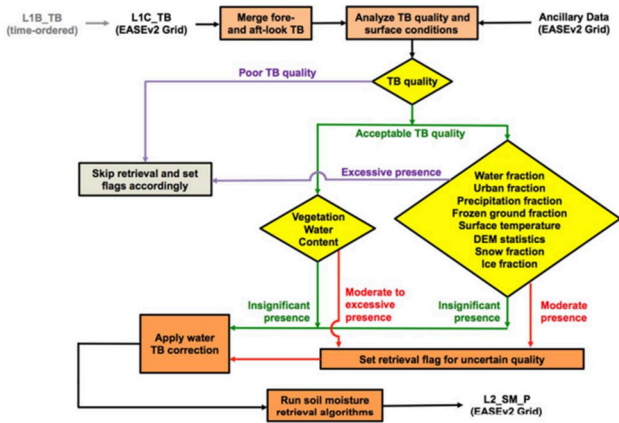
Land Surface Temperature (LST) refers to the temperature of the Earth's land surface, and it can be determined through satellite data or direct field measurements. The impact of increasing greenhouse gases in the atmosphere is significant on LST. This temperature metric offers valuable insights into surface physical properties and climate changes on both global and regional scales. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)-LST is a useful tool that enables the rapid

acquisition of surface temperature data across large areas. Standardized processes for MODIS–LST are implemented to maintain consistency and ensure the accuracy of temperature measurements [37]-[40].

**2.3. Methods**

With the onset of data from ESA's Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) and NASA's Soil Moisture Active and Passive (SMAP) L-band missions, a significant increase in our ability to obtain surface soil moisture using L-band satellite remote sensing is predicted over the next five years [41, 42].

These developments are important in terms of significantly increasing our capacity to monitor and understand soil moisture and enabling space-based L-band observations to be used more effectively in a variety of applications.



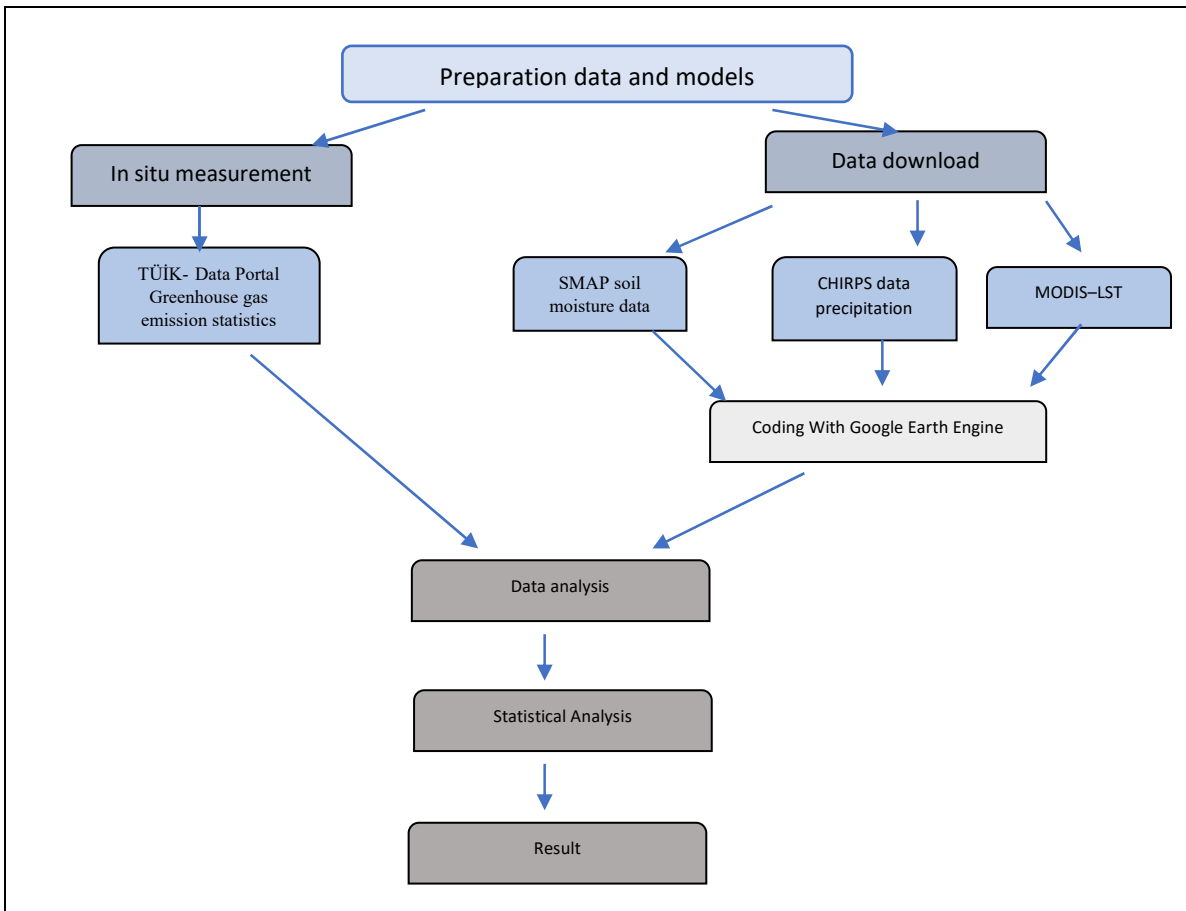
**Figure 2:** L2\_SM\_P SPS process data and soil moisture.

The L2\_SM\_P SPS begins with Level 1B brightness temperature observations (L1B\_TB) and converts them to the Level 1C Grating Radiometer Data Product (L1C\_TB) on the 36 km EASEv2 Grid in a cylindrical equidistant projection. The fore and aft view grating brightness temperature observations are then combined in the L2\_SM\_P SPS. The processing continues with the addition of pre-processed static and dynamic auxiliary data at finer grid resolutions. This data is used to assess the feasibility and expected quality of the retrieval. Once favorable surface conditions for soil moisture retrieval are identified in each grid cell, the retrieval process begins. Corrections for water pollution, surface roughness, effective soil temperature, and vegetation water content are applied using five pre-determined candidate soil moisture algorithms.

These algorithms are then used to generate the final output. The final output contains soil moisture retrieval areas on the same 36 km EASEv2 Grid as the input L1C\_TB product. In this process, corrections are applied for surface roughness, effective soil temperature, vegetation water content, and the radiometric contribution of water bodies. The basic soil moisture retrieval algorithm is then invoked with TB observations and ancillary data as input to produce L2\_SM\_P\_E on the same 9 km EASE Grid 2.0 global projection with input L1C\_TB\_E [43]-[48].

Figure 3 systematically shows the process of obtaining data and preparing models for in situ measurement. In this study, the process of preparing data and models for on-site measurement in Turkey is presented. In the first step, Greenhouse gas emission statistics data were obtained from the Turkish Statistical Institute (TUIK) Data Portal. SMAP, CHIRPS, MODIS images were provided from the Google earth engine platform. (<https://earthengine.google.com/platform/> last accessed January 1, 2024) Downloaded data is analyzed using the Google Earth Engine platform. Relationships and patterns between data sets are determined with data visualization, statistical analysis and machine learning techniques. These analyzes help determine the most important data sets for in situ measurements and the parameters to be used in modelling. Considering the information obtained from data analysis, regression models are developed. These models mathematically express the relationship between the dependent variable (e.g., soil moisture) and the independent variables (e.g., precipitation, temperature). Statistical Analysis linear regression model was used. The resulting measurements can be used for various purposes, such as monitoring environmental conditions in the region, estimating agricultural production and assessing the effects of climate change.

In this exercise, satellite image processing was performed using coding on the Google Earth Engine platform. Data analysis included thematic maps in ArcGIS, graphs in Excel and regression analysis in SPSS.



**Figure 3:** The chart of study design.

#### 2.4. Statistical Analysis

Multiple regression analysis is a statistical method used to explore how a single dependent variable is influenced by multiple independent variables. Unlike simple regression, which looks at the relationship between one independent and one dependent variable, multiple regression allows for several independent variables to be considered at once. The goal is to identify how these variables together impact the dependent variable and to build a model that explains this relationship. In this analysis, the effect of each independent variable is examined while keeping the others constant, enabling a better understanding of how each contributes to changes in the dependent variable [49, 50].

In this study, a multiple regression model was used as a statistical analysis method. This method is used in many scientific and statistical analyses and helps

researchers understand the effects of a set of independent variables on a dependent variable. Multiple linear regression is used to handle complexity in the dataset and model relationships between variables. This is particularly useful for understanding and predicting complex relationships. This method is used in many scientific and statistical analyzes and helps researchers understand the effects of a set of independent variables on a dependent variable. MLR is used to address complexity in the data set and model relationships between variables. This is especially useful for understanding complex relationships and making predictions.

Figure 4 shows the soil moisture maps between 2016 and 2022. It is observed that soil moisture in Turkey is particularly intense in the Eastern Black Sea region. The lowest value of soil moisture was observed in 2019. In 2022, it was observed that soil

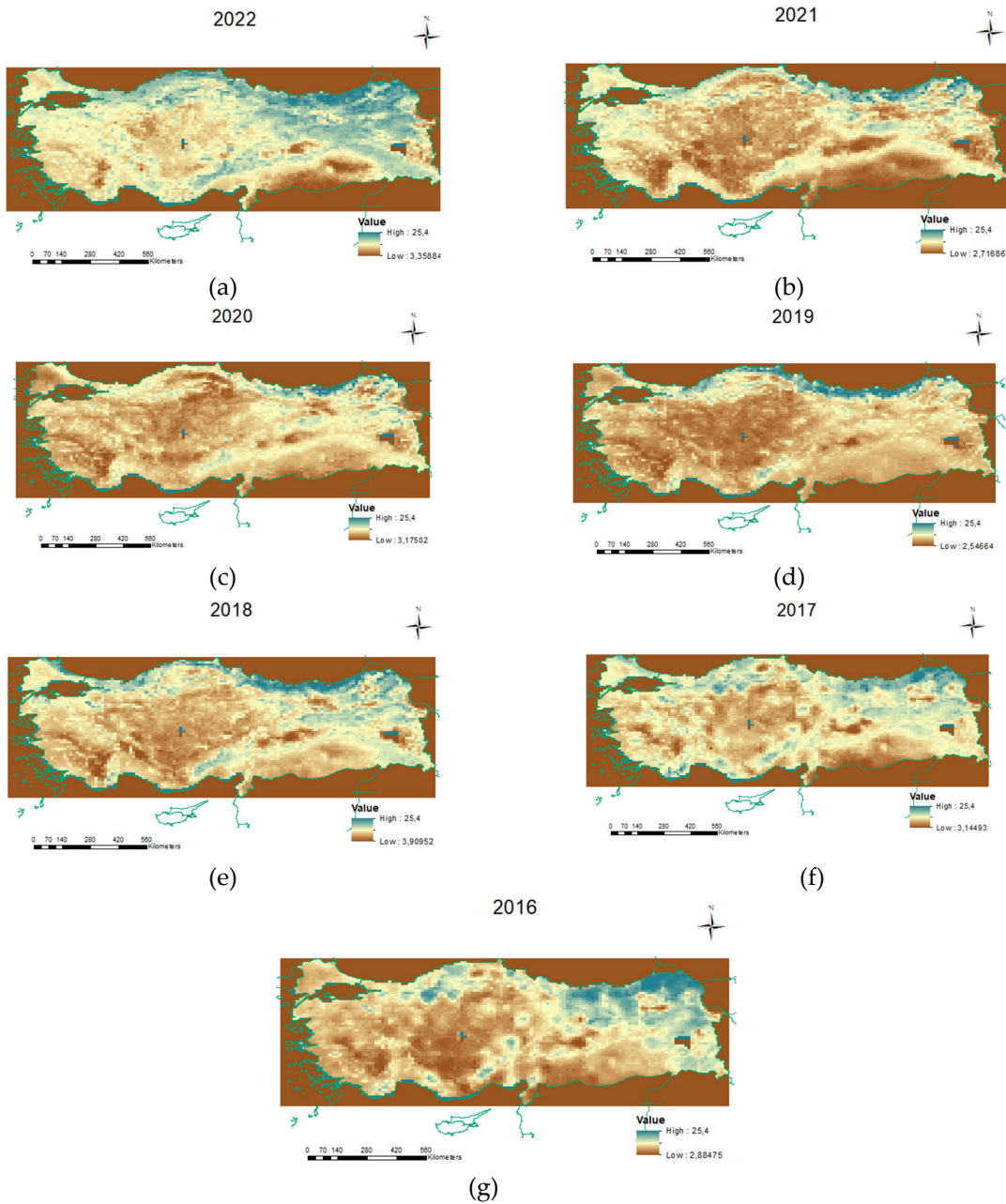


moisture increased in the Eastern Black Sea region and Eastern Anatolia region.

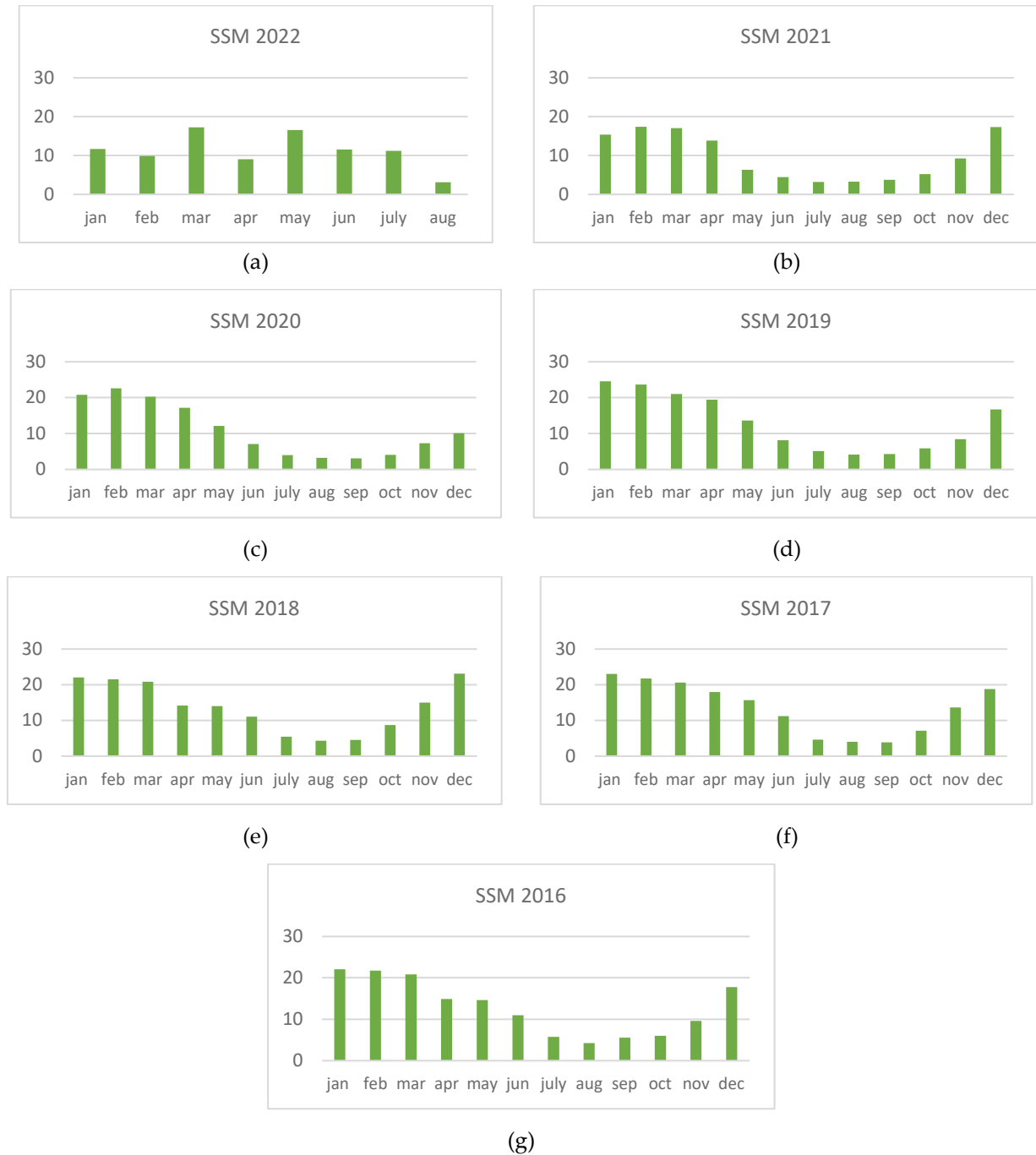
### 3. RESULTS

Figure 4 shows the soil moisture maps between 2016 and 2022. It is observed that soil moisture in

Turkey is particularly intense in the Eastern Black Sea region. The lowest value of soil moisture was observed in 2019. In 2022, it was observed that soil moisture increased in the Eastern Black Sea region and Eastern Anatolia region.



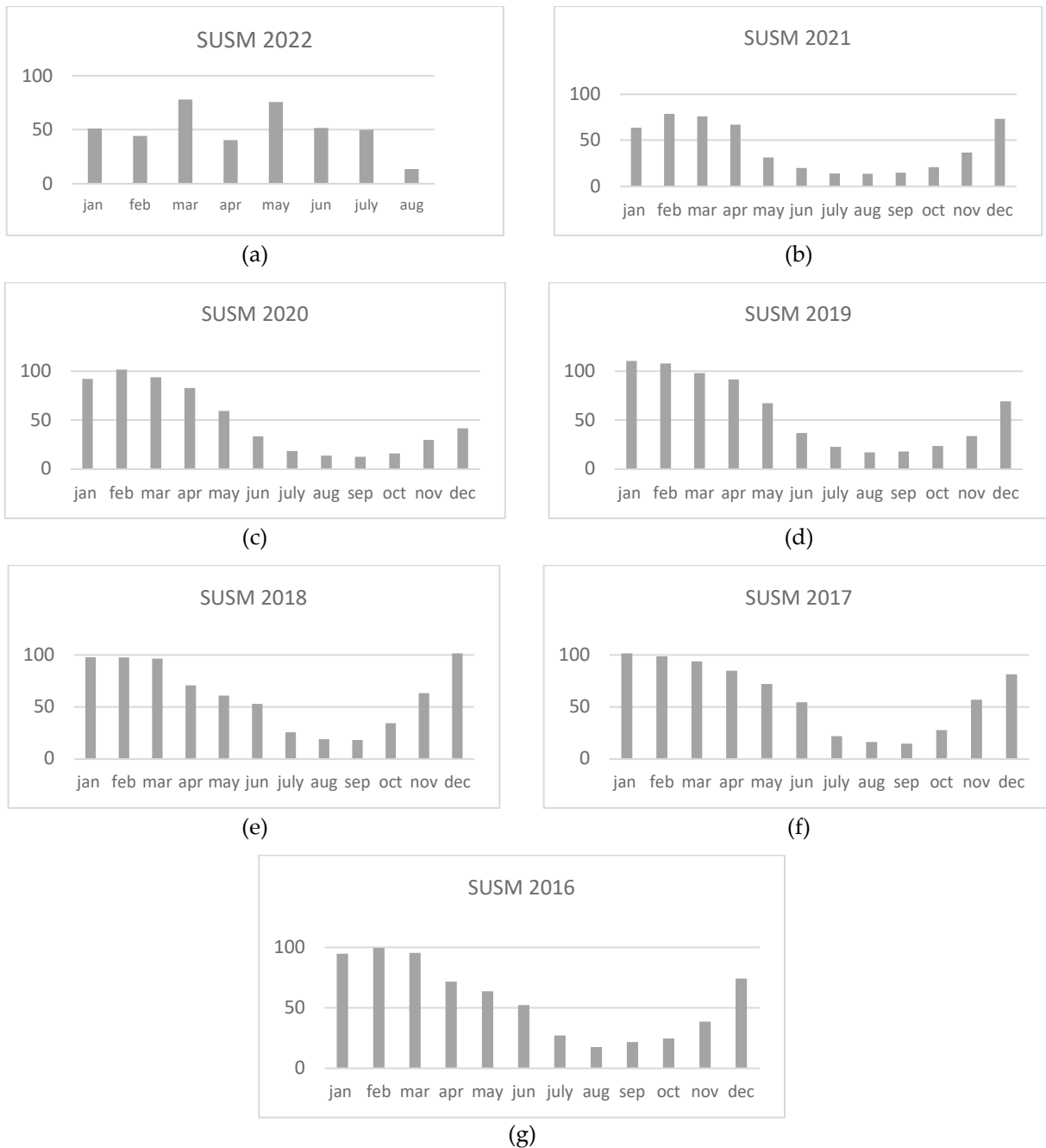
**Figure 4:** (a) 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016 soil moisture maps.



**Figure 5:** (a) 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016 SSM graphs.

Figure 5 displays the surface soil moisture (SSM) graphs from 2016 to 2022. The highest SSM was recorded in January 2019, while the lowest occurred in August 2021. The high value in January 2019 can be attributed to winter precipitation and reduced evaporation, whereas the low value in August 2021

is likely due to increased summer temperatures and higher evaporation rates. These seasonal variations highlight the significant influence of climatic factors such as precipitation and temperature on soil moisture levels.



**Figure 6:** (a) 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016 SUSM graphs.

Figure 6 presents the subsurface soil moisture (SUSM) graphs from 2016 to 2022. Like surface soil moisture, the highest SUSM value was recorded in January 2019, and the lowest in August 2021. The peak in January 2019 likely reflects the accumulation of winter precipitation, while the low in August 2021 can be attributed to increased

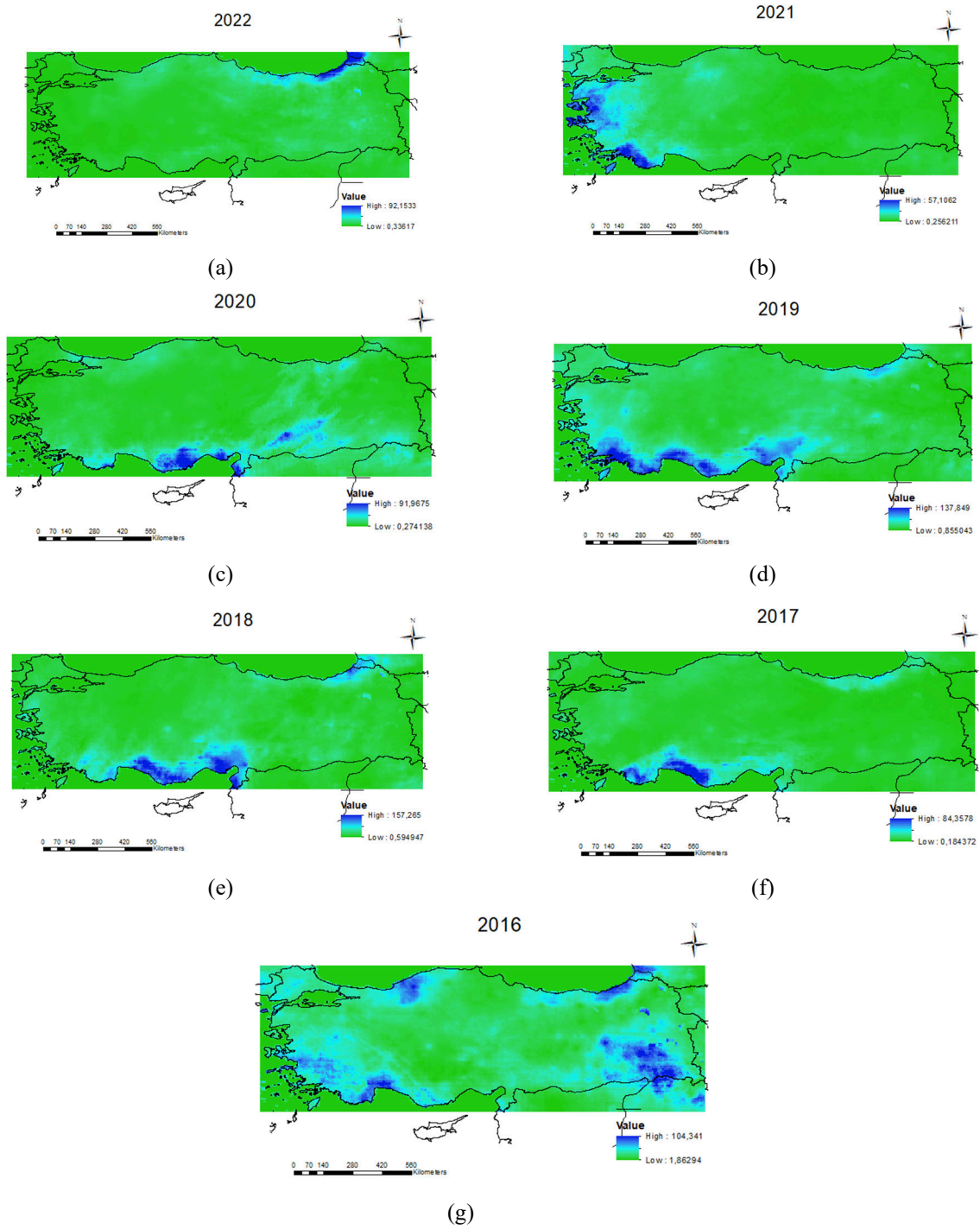
evaporation during the hot summer months. This pattern underscores the strong seasonal dependence of subsurface soil moisture on precipitation and temperature, highlighting how deeper soil layers respond to climatic changes over time.



**Figure 7:** Surface pressure graphs for 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016.

Figure 7 illustrates the surface pressure graphs from 2016 to 2022. The surface pressure values range between 88,000 and 90,000 Pa throughout the years. Notably, the highest-pressure value was recorded in November 2020, indicating stable atmospheric conditions during that period. Conversely, the lowest pressure value was observed in July 2017,

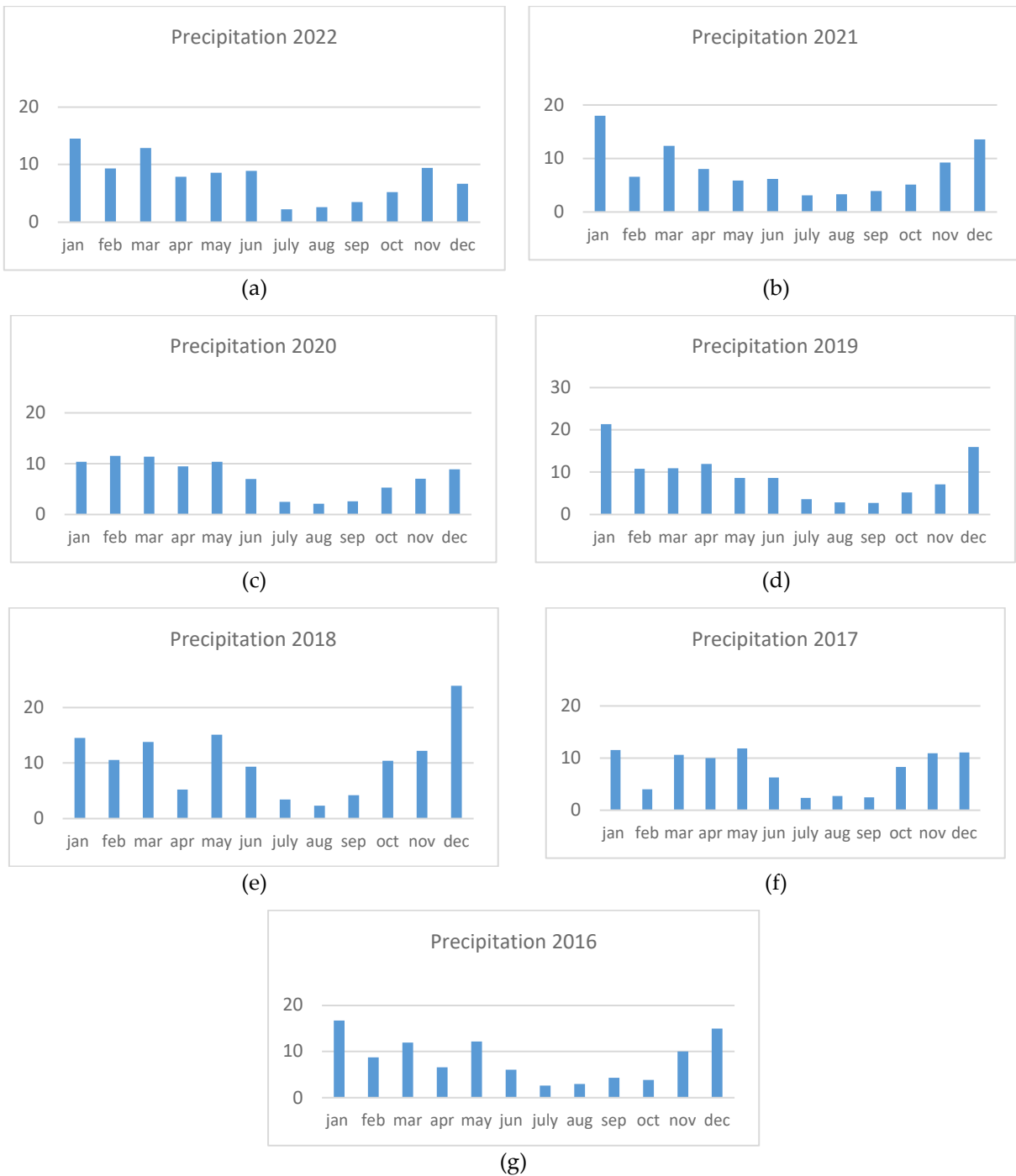
which could be associated with increased weather disturbances or storm activity typical of summer months. This variation in surface pressure underscores the influence of seasonal changes and weather patterns on atmospheric dynamics over the observed years.



**Figure 8:** (a) 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016 precipitation thematic maps.

Figure 8 shows the thematic maps of precipitation between 2016-2022. It is observed that the amount of precipitation in Turkey is

especially intense in coastal regions. The lowest value of precipitation was observed in 2017, and the highest value was observed in 2018.



**Figure 9:** (a) 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016 precipitation graphs.

Figure 9 presents the thematic maps of precipitation across Turkey from 2016 to 2022. The maps indicate that precipitation levels are particularly high in coastal regions, reflecting the influence of maritime weather patterns. Notably, the year 2017 recorded the lowest precipitation levels, which may have implications for water availability and agricultural practices in that year. In contrast, 2018 experienced

the highest precipitation, potentially contributing to increased soil moisture and improved conditions for crops. Figure 10 shows the LST thematic maps between 2016-2022. The highest LST is observed in the Southeastern Anatolia region. The lowest values were observed in the Black Sea and Eastern Anatolia regions. In 2022, it was observed that soil

moisture increased in the Eastern Black Sea region and Eastern Anatolia region.

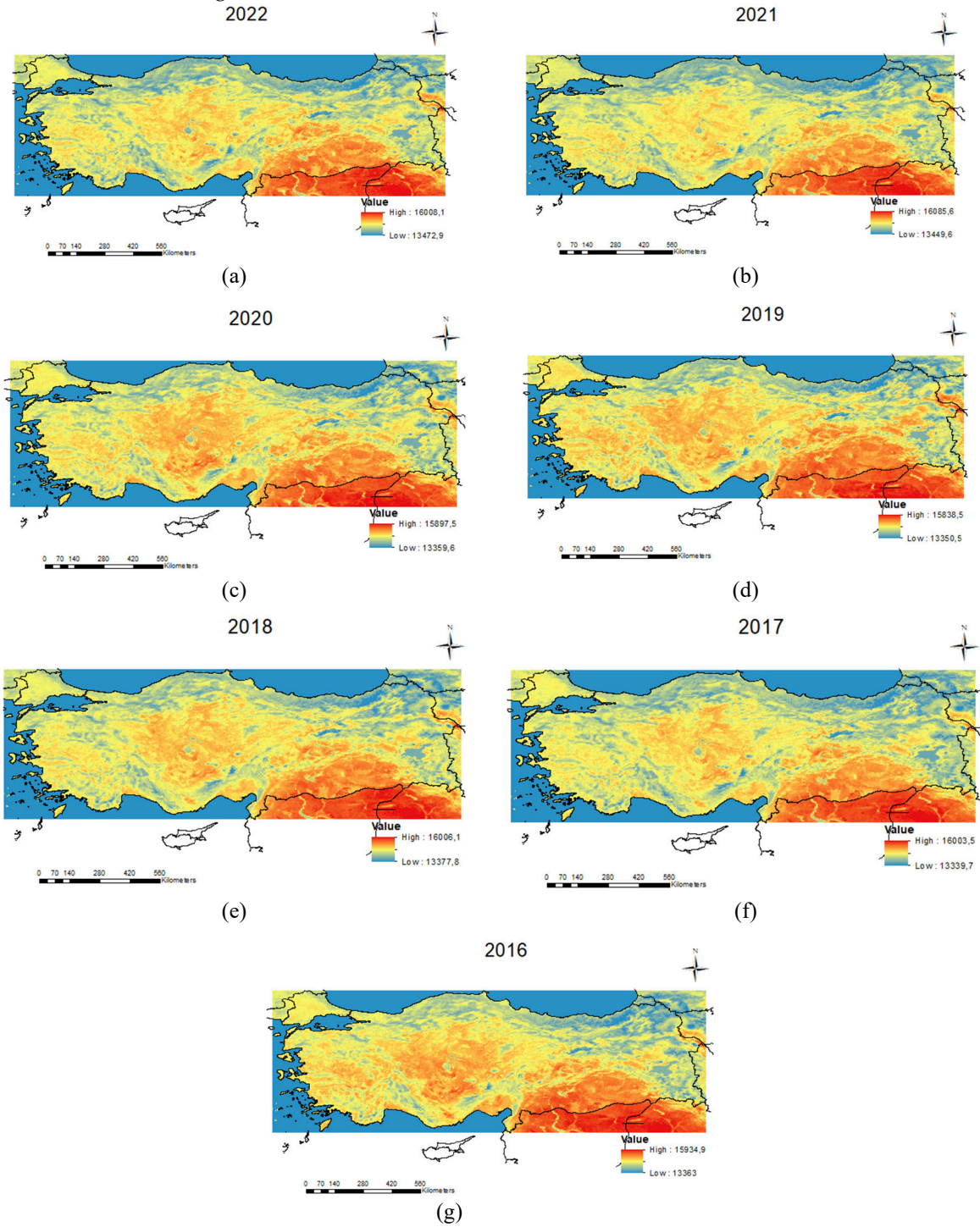
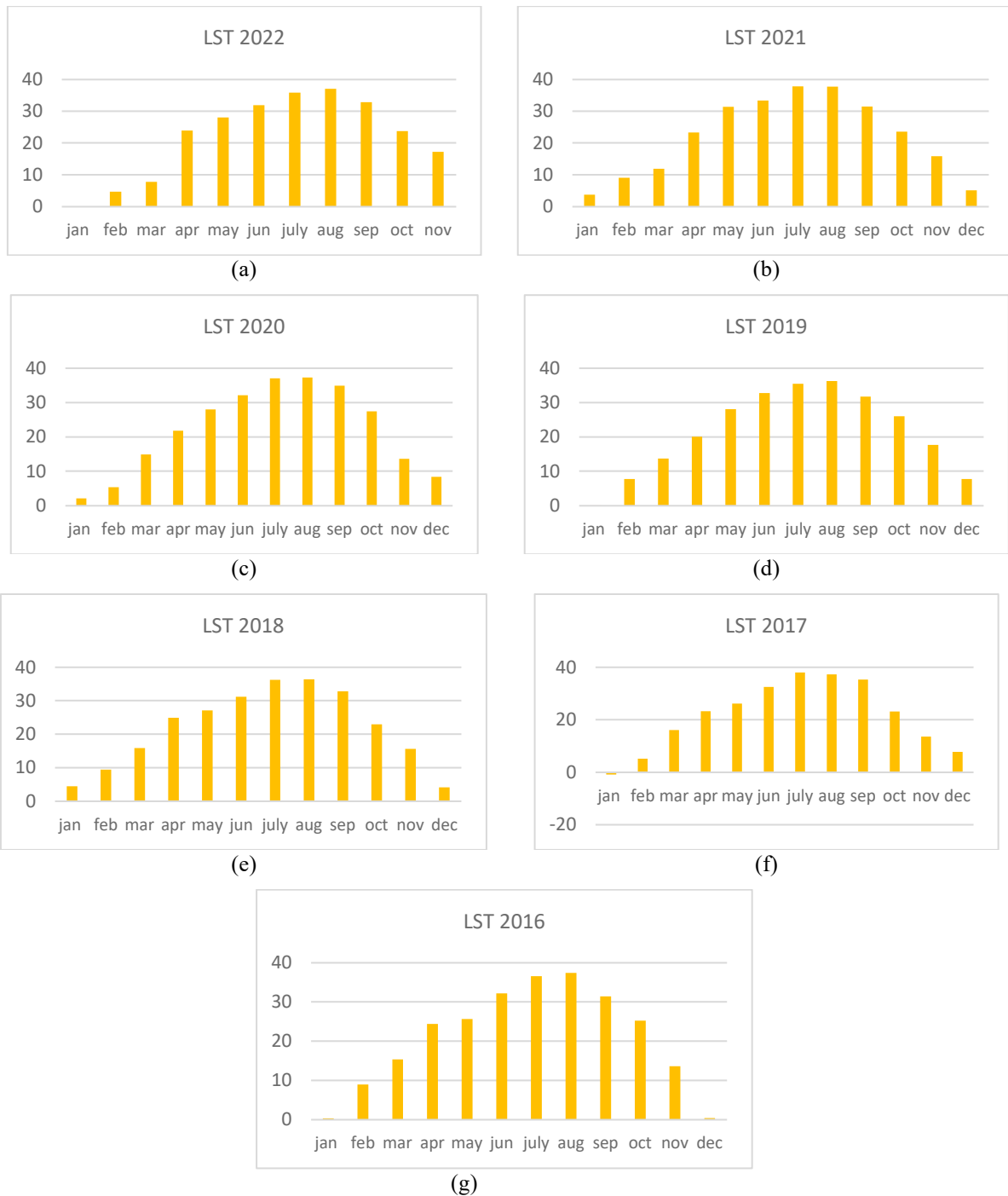


Figure 10: (a) 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016 LST thematic maps.

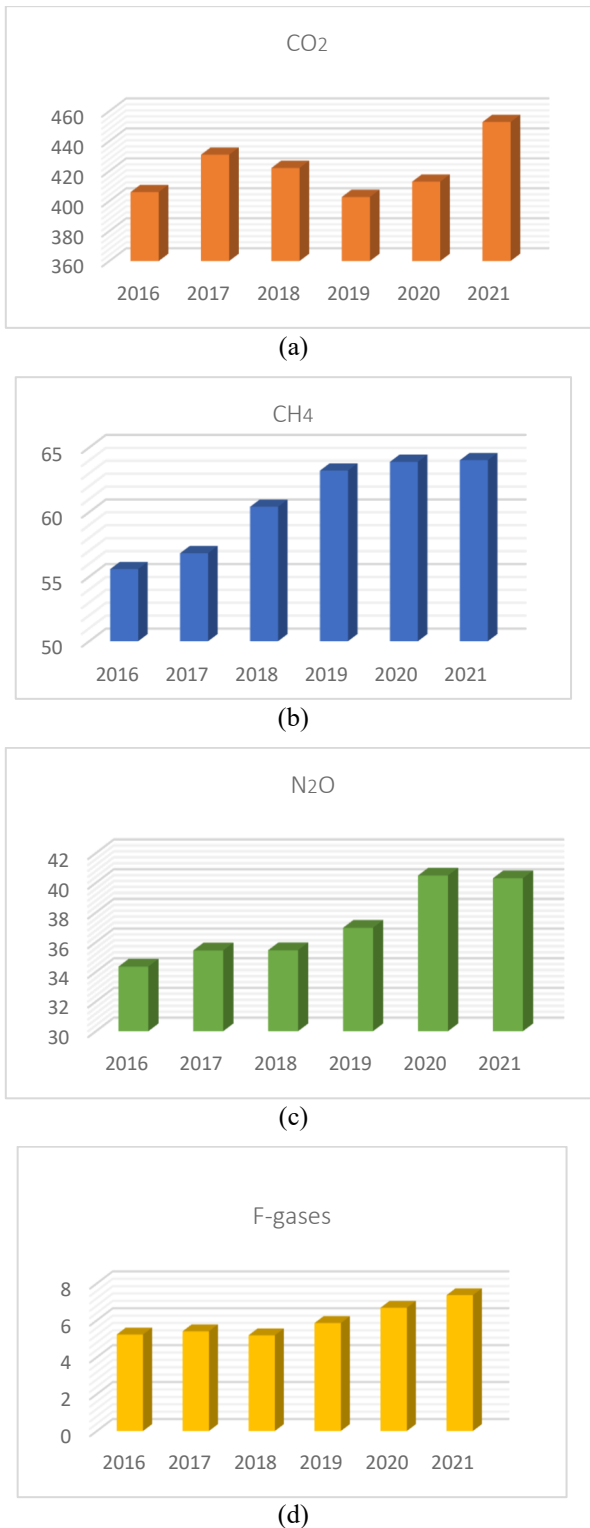


**Figure 11:** (a) 2022, (b) 2021, (c) 2020, (d) 2019, (e) 2018, (f) 2017, (g) 2016 LST graphs.

Figure 11 displays the surface temperature graphs for Turkey from 2016 to 2022. The data indicates that the highest surface temperatures occur predominantly in July and August, aligning with typical seasonal patterns of heat during the summer months. Conversely, the lowest surface

temperatures are recorded in December, January, and February, reflecting the colder winter conditions. These seasonal fluctuations in surface temperature are crucial for understanding the climatic variations throughout the year and their potential impacts on ecological and agricultural practices.





**Figure 12:** Gas Emission Statistics; carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) (a), methane (CH<sub>4</sub>) (b), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) (c), and fluorinated gases (F-gases) (d).

Figure 12 illustrates the gas emission statistics for various greenhouse gases, including carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) (a), methane (CH<sub>4</sub>) (b), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) (c), and fluorinated gases (F-gases) (d). The data, sourced from the Greenhouse Gas Emission

Statistics newsletter, spans the period from 2016 to 2021. It highlights emissions from key sectors such as energy, industrial processes and product use, agriculture, and waste.

#### 4. DISCUSSION

The findings of this study shed light on the intricate relationship between climate variables and soil moisture dynamics in various regions of Turkey. The observed direct relationship between surface and subsurface soil moisture (SSM and SUSM) values with precipitation data underscores the significant influence of precipitation patterns on soil moisture content, aligning with the conventional understanding of how rainfall replenishes soil moisture, as also discussed by [51] in his analysis of large-scale meteorological drought control mechanisms. Increased precipitation contributes to higher soil moisture levels, which is crucial for maintaining ecosystem health and agricultural productivity in regions that experience seasonal fluctuations in rainfall.

Moreover, the inverse relationship between SSM, SUSM, and land surface temperature (LST) highlights the complex interplay between temperature and soil moisture. Higher temperatures result in increased evaporation rates, leading to decreased soil moisture levels. This finding aligns with [52], who emphasized the importance of considering soil moisture in climate change scenarios, especially with rising global temperatures that exacerbate soil dryness and impact vegetation-atmosphere interactions. The strong correlation observed between soil moisture and LST further supports Berg's assertion that soil moisture plays a pivotal role in understanding how climate variability influences hydrological cycles.

The notable increase in SSM, SUSM, and surface pressure (PS) values during the winter months, particularly in December and January, highlights the seasonal variability of soil moisture. Factors such as increased precipitation, reduced evaporation due to lower temperatures, and snowmelt contribute to soil moisture accumulation during this period. These seasonal changes are essential for predicting soil moisture dynamics and their implications for environmental processes such as sustainable agricultural practices and water resource management, as observed in [53]. [53]

work on the role of climate variables in air quality further corroborates the importance of studying seasonal and climatic fluctuations in understanding soil-environment interactions.

In addition to examining the relationship between soil moisture and climatic variables, this study also explored the correlation between soil moisture and greenhouse gases. A moderate relationship between SSM and methane (CH<sub>4</sub>) (R: 0.65,  $p < 0.05$ ) suggests that soil moisture variations can influence methane emissions, a finding that aligns with Schubert's (2016) exploration of how moisture impacts atmospheric processes. Furthermore, the high correlation between SSM and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) (R: 0.89,  $p < 0.05$ ), as well as between SSM and fluorinated gases (F-gases) (R: 0.97,  $p < 0.05$ ), reveals a significant interaction between soil moisture and these greenhouse gases. These results are consistent with the findings of [54], who noted the influence of meteorological factors, including soil moisture, on environmental variables such as air quality and greenhouse gas emissions.

Similarly, the strong correlations between subsurface soil moisture (SUSM) and N<sub>2</sub>O (R: 0.86,  $p < 0.05$ ) and F-gases (R: 0.96,  $p < 0.05$ ) suggest that deeper soil layers may also play a critical role in modulating greenhouse gas emissions. This aligns with research by Berg (2018), who emphasized the need to consider subsurface moisture conditions when examining soil-plant-atmosphere interactions under climate change. These findings underscore the potential feedback mechanisms between soil moisture and greenhouse gas emissions, highlighting the importance of integrating soil moisture data into climate models to predict future environmental changes more accurately.

The results of this study also resonate with broader global research on soil moisture dynamics, particularly in the context of climate change. As indicated by [53] and [51], understanding the relationships between soil moisture, temperature, precipitation, and atmospheric conditions is essential for managing the impacts of climate variability on agricultural systems, water resources, and carbon cycling. The strong correlations between soil moisture and greenhouse gases emphasize the importance of monitoring soil conditions, as changes in moisture levels may

directly influence the release of potent gases like N<sub>2</sub>O and F-gases, contributing to the global greenhouse effect.

In conclusion, the relationship between soil moisture and climate variables, as identified in this study, offers valuable insights for agricultural planning, water resource management, and environmental sustainability. The strong correlations between soil moisture and greenhouse gases suggest that soil conditions should be closely monitored as part of climate mitigation strategies. As noted by [52], [54], and [53], integrating climate, soil, and atmospheric data into predictive models will be critical for understanding the full range of impacts associated with soil moisture dynamics and for developing effective climate adaptation measures. This study's contributions provide a foundation for future research and strategic decision-making in the fields of environmental sustainability and climate change adaptation.

## 5. CONCLUSION

Overall, the findings of this study provide valuable insights into the complex interactions between climate variables and soil moisture dynamics in various regions of Turkey. It was determined that surface temperature and precipitation are the key factors influencing changes in soil moisture, with increased precipitation leading to significant rises in soil moisture levels. The relationship between surface pressure and soil moisture, particularly in different climate zones, underscores the complexity of environmental interactions and highlights the regional and seasonal variability of these dynamics. These results are critical for both agricultural production and the preservation of natural ecosystems.

The study offers an essential resource for understanding the effects of climate change on soil moisture, which plays a crucial role in ecosystem dynamics, agriculture, and water resource management. Given the importance of soil moisture for a wide range of sectors, from agricultural output to natural habitats, such analyses hold significant value for environmental planning and resource management. The findings contribute to a better understanding of the potential impacts of climate change, laying the groundwork for more effective mitigation and adaptation strategies.

In addition, incorporating long-term data and considering future climate change impacts will further enhance our understanding of soil moisture dynamics on a broader scale. Future research could delve into the specific mechanisms driving soil moisture changes in different regions and assess their implications for ecosystems, agriculture, and water resources. This could pave the way for innovative approaches to managing soil moisture and mitigating the effects of climate variability.

In conclusion, this study contributes significantly to the understanding of environmental complexity and the influence of climate variables on soil moisture. Such research will play a critical role in informing long-term planning efforts aimed at achieving environmental sustainability.

**Author Contributions:** In this study, Nehir Uyar has wholly contributed to the manuscript, and analysed the findings as herein reported.

**Acknowledgement:** I would like to thank the anonymous reviewers and editors for their valuable comments and suggestions regarding this article.

**Conflict of Interest:** The author states that there are no conflicts of interest in the work reported.

## 6. REFERENCES

- [1] M. Piles, D. Entekhabi, and A. Camps, "A change detection algorithm for retrieving high-resolution soil moisture from SMAP radar and radiometer observations", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 12, pp. 4125 – 4131, 2009.
- [2] E. G. Njoku and D. Entekhabi, "Passive microwave remote sensing of soil moisture," *J. Hydrol.*, vol. 184, no. 1/2, pp. 101–129, 1996.
- [3] T. J. Schmugge, W. P. Kustas, J. C. Ritchie, T. J. Jackson, and A. Rango, "Remote sensing in hydrology", *Adv. Water Resour.*, vol. 25, no. 812, pp. 1367–1385, 2002.
- [4] P. C. Dubois, J. J. van Zyl, and E. T. Engman, "Measuring soil moisture with imaging radars", *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.*, vol. 33, no. 4, pp. 915–926, 1995.
- [5] J. C. Shi, J. Wang, A. Y. Hsu, P. E. O'Neill, and E. T. Engman, "Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 5, pp. 1254–1266, 1997.
- [6] T. J. Jackson, T. J. Schmugge, and E. T. Engman, "Remote sensing applications to hydrology: Soil moisture", *Hydrol. Sci. J.—J. Des. Sci. Hydrol.*, vol. 41, no. 4, pp. 517–530, 1996.
- [7] *Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Decade and Beyond*, Nat. Res. Council, Washington, DC, 2007.
- [8] D. Entekhabi, et al., "An Earth system pathfinder for global mapping of soil moisture and land freeze/thaw: The Hydrosphere State (HYDROS) Mission Concept", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 10, pp. 2184–2195, 2004.
- [9] X. Wang, S. Jian, L. Gamage, J. L. "Effect of nitrogen fertilization on central tendency and spatial heterogeneity of soil moisture, pH and dissolved organic carbon and nitrogen in two bioenergy croplands ", *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, vol. 185, pp.343, 2022.
- [10] S. Manzoni, J. P. Schimel, & A. Porporato, "Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis", *Ecology* vol. 93, pp. 930–938, 2012.
- [11] P. D'Odorico, F. Laio, A. Porporato, & I. Rodriguez-Iturbe, "Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. II. A case study", *Adv. Water Resour.* vol. 26, pp. 59–70, 2003.
- [12] G. Botter, F. Peratoner, A. Porporato, I. Rodriguez-Iturbe, & A. Rinaldo, "Signatures of large-scale soil moisture dynamics on streamflow statistics across US climate regimes", *Wat. Resour. Res.* 43, W11413, 2007.
- [13] C. Rosenzweig, F. N. Tubiello, R. Goldberg, E. Mills, & J. Bloomfield, "Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change", *Glob. Environ. Change* vol. 12, pp. 197–202, 2002.
- [14] F. Fécan, B. Marticorena, & G. Bergametti, "Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas", *Ann. Geophys.* vol. 17, pp. 149–157, 1999.
- [15] A. Bomblies, & E. A. B. Eltahir, "Assessment of the impact of climate shifts on malaria

- transmission in the Sahel", *EcoHealth* 6, 426–437, 2010.
- [16] M. Hirschi, B. Mueller, W. Dorigo, & S. I. Seneviratne, "Using remotely sensed soil moisture for land-atmosphere coupling diagnostics: the role of surface vs. root-zone soil moisture variability", *Remote Sens. Environ.* vol. 154, pp. 246–252, 2014.
- [17] J. Qiu, W. T. Crow, & G. S. Nearing, "The impact of vertical measurement depth on the information content of soil moisture for latent heat flux estimation", *J. Hydrometeorol.* vol. 19, pp. 2419–2430, 2016.
- [18] D. Entekhabi, I. Rodriguez-Iturbe, & R. L. Bras, "Variability in largescale water balance with land surface-atmosphere interaction", *J. Clim.* vol. 5, pp. 798–813, 1992.
- [19] L. Tsang, T. Jackson, "Satellite remote sensing missions for monitoring water, carbon, and global climate change", *Proc. IEEE*, vol.98, no. 5, pp. 645–648, 2010.
- [20] M.F. McCabe, et al. "The future of Earth observation in hydrology", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 21, pp. 3879–3914, 2017.
- [21] I.E. Mladenova, et al. "Remote monitoring of soil moisture using passive microwave-based techniques—Theoretical basis and overview of selected algorithms for AMSR-E", *Remote Sens. Environ.*, vol. 144, pp. 197–213, 2014.
- [22] Z. Xin, H. N. Niu, Z. Raghavan, V. X. Song, "Soil moisture retrieval in farmland using C-band SAR and optical data", *Spat. Inf. Res.* vol. 25, pp. 431–438, 2017.
- [23] R. Eswar, N.N. Das, C. Poulsen, A. Behrangi, J. Swigart, M. Svoboda, D. Entekhabi, S. Yueh, B. Doorn, J. Entin, "SMAP soil moisture change as an indicator of drought conditions", *Remote Sens.*, vol. 10, p. 788, 2018.
- [24] E. M. Blyth, C. C. Daamen, "The accuracy of simple soil water models in climate forecasting", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 1, pp. 241–248, 1997.
- [25] R. Chakraborty, R. Rahmoune, P. Ferrazzoli, "Use of passive microwave signatures to detect and monitor flooding events in Sundarban Delta", in *Proc. IGARSS*, 2011, pp. 3066–3069.
- [26] L. L. Bourgeau-Chavez, E. S. Kasischke, M. D. Rutherford, "Evaluation of ERS SAR data for prediction of fire danger in a Boreal region", *Int. J. Wildland Fire*, vol. 9, pp. 183–194, 1999.
- [27] W. Ni-Meister, P. R. Houser, and J. P. Walker, "Soil moisture initialization for climate prediction: Assimilation of scanning multifrequency microwave radiometer soil moisture data into a land surface model", *J. Geophys. Res.*, vol. 111, p. D20102, 2006.
- [28] K. Scipal, M. Drusch, and W. Wagner "Assimilation of a ERS scatterometer derived soil moisture index in the ECMWF numerical weather prediction system", *Adv. Water Resour.*, vol. 31, no. 8, pp. 1101–1112, 2008.
- [29] R. Bindlish, W. T. Crow, and T. J. Jackson, "Role of passive microwave remote sensing in improving flood forecasts", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 6, no. 1, pp. 112–116, 2009.
- [30] E. G. Njoku, et al. "Soil moisture retrieval from AMSR-E", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 2, pp. 215–229, 2003.
- [31] T. Schmugge, "Applications of passive microwave observations of surface soil moisture", *J. Hydrol.*, vol. 212–213, pp. 188–197, 1998.
- [32] Y. H. Kerr, et al. "Soil moisture retrieval from space: the soil moisture and ocean salinity mission (SMOS)", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 8, pp. 1729–1735, 2001.
- [33] N. N. Das, D. Entekhabi, and E. G. Njoku, "An algorithm for merging SMAP radiometer and radar data for high resolution soil moisture retrieval", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 5, pp. 1504–1512, 2011.
- [34] M. M. Rienecker, et al., "MERRA- NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications", *J. Climate*, vol. 24, pp. 3624–3648, 2011.
- [35] C. Funk, et al., "The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes", *Sci. Data*, vol. 2, p.150066, 2015.
- [36] D. Katsanos, A. Retalis, S. Michaelides "Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS) over Cyprus for a 30-year period", *Atmos. Res.*, vol. 169, pp. 459–464, 2016.
- [37] S. Shukla A. McNally G. Husak, C. Funk, "A seasonal agricultural drought forecast system for food-insecure regions of East Africa", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 18, pp. 3907–3921, 2014.

- [38] A. Matloob, O. Sarif, Md. J. S. Um, "Evaluating the inter-relationship between OCO-2 XCO<sub>2</sub> and MODIS-LST in an Industrial Belt located at Western Bengaluru City of India Spat", *Inf. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 257–265, 2021.
- [39] Z. L. Li, B.H. Tang, et al., "Satellitederived land surface temperature: Current status and perspectives", *Remote Sensing of Environment*, vol. 131, pp. 14–37, 2013.
- [40] Z. Wan, "New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product", *Remote Sensing of Environment*, vol. 140, pp. 36–45, 2014.
- [41] S. H. Roy, A. Chanda, "Assessment of wet season agricultural droughts using monthly MODIS and SAR data in the red and lateritic zone of West Bengal, India Sabita", *Spatial Information Research*, vol. 31, pp. 195–210, 2023.
- [42] D. Entekhabi, et al. "The soil moisture active and passive (SMAP) mission", *IEEE Proc.*, vol. 98, no. 5, pp. 704–716, 2010.
- [43] Y. H. Kerr, D. Levine "Forward to the special issue on the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 3, pp. 583–585, 2008.
- [44] J. R. Piepmeier et al., "SMAP L1B radiometer half-orbit time-ordered brightness temperatures version 2", *NASA Nat. Snow Ice Data Center Distrib. Active Arch. Center*, Boulder, CO, USA, 2015.
- [45] S. Chan, E. G. Njoku, and A. Colliander, *SMAP algorithm theoretical basis document: Level 1C radiometer data product*, Jet Propulsion Lab., California Inst. Technol., Pasadena, CA, USA, JPL D-53053, 2016.
- [46] S. Chan, E. G. Njoku, and A. Colliander, "SMAP L1C radiometer halforbit 36 km EASE-grid brightness temperatures version 2", *NASA Nat. Snow Ice Data Center Distrib. Active Arch. Center*, Boulder, CO, USA., 2015.
- [47] S. Chan, and R. S. Dunbar, "SMAP level 2 passive soil moisture product specification document", Jet Propulsion Lab., California Inst. Technol., Pasadena, CA, USA., 2015.
- [48] S. Chan et al., "Assessment of the SMAP passive soil moisture product", *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, vol. 54, no. 8., pp. 4994-5007, 2016.
- [49] B. Akış, "İstatistiki Yöntemlerle Değer Belirleme ve Değer Haritası Üretimi-Selçuklu Örneği", *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2013.
- [50] S. Chatterjee, A. S. Hadi, & B. Price, "Regression analysis by example", New York, NY: John Wiley & Sons Inc., 2015.
- [51] S. D. Schubert, et al., "Global meteorological drought: A synthesis of current understanding with a focus on SST drivers of precipitation deficits", *Journal of Climate*, vol. 29, no. 11, pp. 3989-4019, 2016.
- [52] A. Berg and J. Sheffield, "Climate change and drought: The soil moisture perspective", *Current Climate Change Reports*, vol. 4, pp. 180-191, 2018.
- [53] H. Tao, et al., "Machine learning algorithms for high-resolution prediction of spatiotemporal distribution of air pollution from meteorological and soil parameters", *Environment International*, vol. 175, p. 107931, 2023.
- [54] E. Aladağ, "The influence of meteorological factors on air quality in the province of Van, Turkey", *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 234, no. 4, p. 259, 2023.

## ARAŞTIRMA MAKALESİ

# Bir Uçağa Çarpan Yıldırımın Yolunun, Manyetik Alanının ve Endüklediği Gerilimin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

## *Investigation of the Path, Magnetic Field and Induced Voltage of a Lightning Strike on an Aircraft Using the Finite Element Method*

Orçun Sayaner\*, Özcan Kalenderli

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Received/Geliş: 10.11.2024

Accepted/Kabul: 25.11.2024

\*Sorumlu Yazar: Orçun Sayaner [orcunsayaner@gmail.com](mailto:orcunsayaner@gmail.com)

**ÖZ:** Bu makalede uçak – yıldırım etkileşimi üzerine sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş simülasyon çalışması sunulmaktadır. Yıldırımın uçağa farklı noktalardan girmesi ve çıkması senaryoları için uçak üzerinde akım yoğunluğu dağılımları, elektromanyetik akı yoğunluğu dağılımları incelenmektedir. Yıldırımın dolaylı etkilerini anlamak amacıyla uçak içerisinde farklı konumlara yerleştirilen kablolar üzerinde indüklenen gerilim değerleri incelenmiştir. Ek olarak uçak malzemesinin alüminyum ve titanyum olduğu durumlar içinde benzer analizler yapılarak malzemenin etkin bir yıldırıma karşı koruma için önemi değerlendirilmiştir. Yıldırım çarpma senaryoları, Society of Automotive Engineers (SAE) International standardı SAE ARP 5414B-2018- Aircraft Lightning Zoning (Uçak Yıldırım Çarpma Bölgeleri) standardı ile belirtilen yıldırım bölgeleri referans alınarak oluşturulmuştur. Farklı koşullarda yapılan analizler ile akım yoğunluğu dağılımları ve elektromanyetik alan dağılımlarına bağlı olarak yıldırımın dolaylı etkilerin fazla olduğu bölgeler belirlenmiştir. Uçak malzemesinin yıldırımın etkileri üzerindeki önemi incelenmiştir. Bu kapsamda etkin bir yıldırım koruma sistemi için uçuş kritik aviyonikler ve kablolama yerleşimleri üzerine öneri sunulmaktadır. Etkin bir yıldırıma karşı koruma için uçak malzemesinin özellikleri üzerine öneri sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Uçak, yıldırım, manyetik alan, endüklenen gerilim, sonlu elemanlar yöntemi.

**ABSTRACT:** This article presents a simulation study on aircraft - lightning interaction using the finite element method. For scenarios where lightning enters and exits the aircraft from different points, current density distributions and electromagnetic flux density distributions on the aircraft are examined. In order to understand the indirect effects of lightning, induced voltage values on cables placed at different locations within the aircraft are examined. In addition, similar analyses are performed for cases where the aircraft material is aluminum and titanium, and the importance of the material for effective lightning protection is evaluated. Lightning strike scenarios are created by taking the lightning zones specified by the Society of Automotive Engineers (SAE) International standard SAE ARP 5414B-2018- Aircraft Lightning Zoning as reference. With the analyses performed under different conditions, regions where indirect effects of lightning are high are determined depending on current density distributions and electromagnetic field distributions. The importance of the aircraft material on the effects of lightning is examined. In this context, suggestions are presented on flight critical avionics and cabling layouts for an effective lightning protection system. Suggestions are presented on the properties of aircraft materials for effective lightning protection.

**Keywords:** Aircraft, lightning, magnetic field, induced voltage, finite element method.

## 1. GİRİŞ

Uçağa yıldırım çarpma olasılığı; uçak tipi, uçuş rotası ve uçuş sırasında karşılaşılan yıldırım hava koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Yapılan istatistiksel çalışmalara göre, tarifeli sefer gerçekleştiren hava yolu şirketlerine ait uçakların yıldırıma maruz kalma olasılığı ortalama olarak her 10.000 uçuş saatinde bir kez meydana gelmektedir. Ancak, yıldırım oluşumuna elverişli iklim koşullarında uçuş yapan uçaklar için bu olasılık 1.000 uçuş saatinde bir defaya kadar yükselebilmektedir [1]. Uçaklar bulut içerisinde yoğun yüklü bir bölgeden geçerken genellikle yıldırımı tetikleyebilmektedir. Kayıtlar yetersiz olmakla birlikte, küçük ticari ve özel uçakların yıldırıma daha az maruz kaldığı düşünülmektedir. Bunun nedeni, bu uçakların küçük boyutları ve yıldırım oluşumuna elverişli hava koşullarından kaçınabilme yetenekleridir [2]. Yıldırımın uçak üzerindeki etkileri dolaylı ve doğrudan olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir [3-7]. Doğrudan etkiler, uçak yüzeylerinde ısınma, erime ve delinme gibi yapısal hasarlara ve yakıt tankının patlaması/tutuşması, radomun (uçanın ön kısmı), radar ve kontrol yüzeylerinin hasar görmesi, elektrik kayıpları gibi etkilere neden olur. Dolaylı etkiler ise uçak elektronik kontrol sistemlerinin kısmen veya tamamen işlevsiz hale gelmesine yol açarak uçuş güvenliğini tehlikeye atmaktadır [8]. Uçak güvenliği büyük ölçüde aviyonik sistemlere ve çelik, alüminyum ve titanyumun yerini alacak yeni malzemelerin geliştirilmesine bağlı olduğu için, yıldırıma karşı koruma giderek daha önemli hale gelmektedir [9].

Yıldırım, başlangıçta uçağın bir noktasına çarpar ve başka bir noktasından çıkar. Eş potansiyel çizgilerin birbirine en yakın olduğu ve eğrilik yarıçapının küçük olduğu yerlerde, örneğin radom, kanat, kuyruk ve uçaktaki anten gibi bölgelerde yüksek elektrik alan şiddetleri meydana gelir [10]. Yıldırım çarpmasının en olası olduğu bölgelere ek yıldırıma karşı koruma gereklidir. Bu nedenle, bir uçağın yıldırım çarpma bölgelerinin anlaşılması, daha iyi bir yıldırım koruma sistemi tasarlanmasına olanak tanır.

Society of Automotive Engineers (SAE) International standardı SAE ARP 5414B-2018-Aircraft Lightning Zoning (Uçak Yıldırım Çarpma Bölgeleri) standardı [11], uçaktaki yıldırım çarpma bölgelerinin belirlenmesinde kullanılır. Standartta

belirtilen yıldırım bölgelerine göre yıldırımın uçak üzerinde olası giriş ve çıkış noktaları tahmin edilebilmektedir.

Yıldırım akımının oluşturduğu elektromanyetik alan, uçak aviyonik sistemleri ve elektronik kontrol birimleri üzerinde dolaylı etkilere neden olabilmektedir. Bu dolaylı etkiler elektromanyetik girişim, elektriksel aşırı gerilimler, aviyonik sistemlerde arızalar ve sensör ölçümlerinde hatalar olabilmektedir. Bu nedenle elektromanyetik (EM) alan dağılımını inceleyerek buna uygun bir HA tasarımı gerçekleştirilmesi uçuş güvenliği ve güvenilirliği için önemli bir konudur.

Bu çalışmada, uçak üzerindeki yıldırım akımını simüle etmek, elektromanyetik alan dağılımını incelemek ve yıldırımın dolaylı etkilerine bağlı olarak uçak içerisindeki kablolarda indüklenerek gerilim seviyelerini analiz etmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Yıldırım akımının izlediği farklı yollara ve uçağın gövde malzemesine bağlı olarak akım yoğunluğu, elektromanyetik akı yoğunluğu ve kablolar üzerinde indüklenen gerilim seviyeleri üzerindeki değişimler Ansys-Maxwell programı ile incelenmiştir.

## 2. HAVA ARAÇLARI ÜZERİNDE YILDIRIMIN ETKİLERİ

*İstatistiksel veriler:* Uçakta radom, kanat uçları, motor kapakları, düşey ve yatay dengeleyiciler yıldırım çarpma olasılığının yüksek olduğu kısımlardır. Bu kısımlara ait yıldırım çarpma istatistikleri Tablo 1'de verilmiştir [12].

**Tablo 1:** Uçak bölgeleri yıldırım isabet oranları [12].

Uçak Bölgesi	Yıldırımın İsabet Etme Oranı (%)
Kanat Uçları	59
Yatay Dengeleyiciler	15
Radom	12
Düşey Dengeleyiciler	8
Kuyruk	4
Motor	2

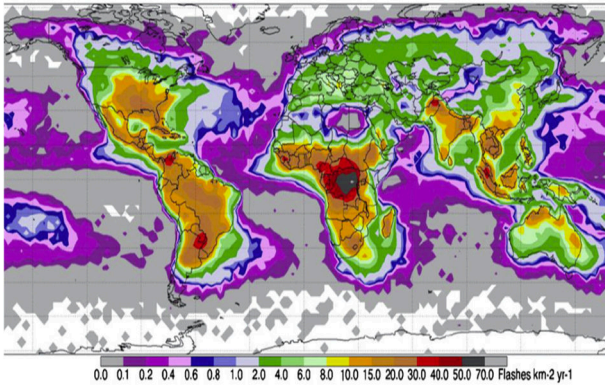
Pistonlu uçaklar, turbo jet ve turbo prop uçaklara göre daha düşük irtifalarda (10000-15000 feet) seyretmektedir. Bu nedenle daha fazla yıldırım çarpmasına maruz kalmaktadır.

Tablo 2’de ABD ticari uçaklarının maruz kaldıkları yıldırım çarpma sayıları ve bölümleri gösterilmektedir [13].

**Tablo 2:** Motor tipine bağlı yıldırım istatistikleri [13].

		Piston	Turboprop	Jet	Tümü
Newman (1950-1961)	Çarpma	808	109	41	958
	Saat	2000000	415000	427000	2842000
Perry (1959-1974)	Çarpma	-	280	480	760
	Saat	-	876000	1314000	2190000
Toplam	Çarpma	808	389	521	1718
	Saat	2000000	1291000	1741000	5032000
	Ortalama	2475	3320	3340	2930

Bir yılda kilometre kare başına düşen yıldırım çarpma sayıları Şekil 1’de gösterilmiştir [14].



**Şekil 1:** Küresel yıldırım çarpma oranları / km<sup>2</sup>.yıl [14].

*Yıldırımın etkileri:* Yıldırımın etkileri doğrudan ve dolaylı olarak ikiye ayrılmaktadır.

*Yıldırımın doğrudan etkileri:* Doğrudan etki, uçağın bir yıldırım kanalıyla temas kurduğu durumlarda meydana gelir. Yıldırım kanalı ile uçak arasındaki bağlantı sonucu aşağıdaki durumlar gerçekleşebilir:

- Bağlanma noktalarında erime ve yanmalar,
- Sıcaklık artışı,
- Manyetik kuvvet etkileri
- Akustik şok dalgası
- Bağlantı ve atlama noktalarında ark oluşumu
- Yakıt tankı içindeki buharın alev alması

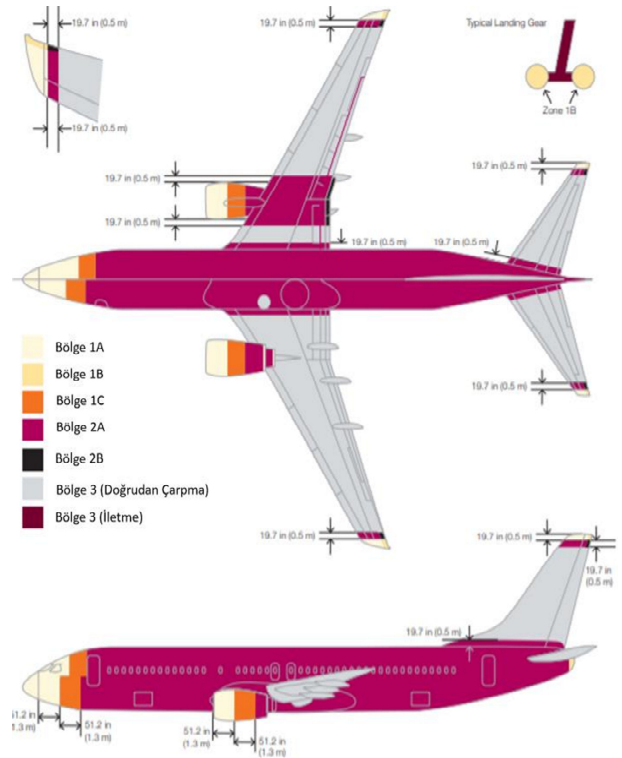
*Yıldırımın dolaylı etkileri:* Yıldırım akımının uçak gövdesi üzerinde akışı, uçak elektronik devre ve sistemlerinde geçici dalgalanmalar oluşturur. Bu durumda aşağıdaki durumlar gerçekleşebilir:

- Hatalı sensör ölçümleri,
- Hatalı ölçümlere bağlı otopilotun doğru çalışmaması,

- Aviyonik sistemlerde güç kesintileri,
- Aşırı gerilim koruma elemanlarında yıpranma,

*Yıldırım ortamı:* Etkin bir yıldırım koruma tasarımı için yıldırım ortamının bilinmesi ve buna göre bir tasarım yapılması gerekmektedir.

*Yıldırım bölgeleri:* Tasarımcıların yıldırımın uçak üzerinde olası çarpma noktalarının, süpürülmüş çarpma etkilerinin farkında olarak tasarım yapmaları etkin bir koruma için önemlidir. Uçak elektrik alan yoğunlukları üzerine yapılan çalışmalar ile yıldırım bölgeleri çıkarılmıştır. SAE ARP5414 ile tipik bir uçak için yıldırım bölgeleri belirtilmektedir. Uçak yıldırım bölgeleri Şekil 2’de gösterilmektedir [15].



**Şekil 2:** Uçak yıldırım bölgeleri [15].

Yıldırım bölgelerinin tanımları Tablo 3’de verilmektedir.



**Tablo 3:** Yıldırım Bölge Tanımları [16].

Yıldırım Bölgesi	Tanım
1A	İlk geri dönüş çarpması bölgesi
1B	Uzun tutunmalı ilk geri dönüş çarpması bölgesi
1C	İlk geri dönüş çarpması için geçiş bölgesi
2A	Süpürülmüş çarpma bölgesi
2B	Uzun flaş tutunmalı süpürülmüş çarpma bölgesi
3	1A, 1B, 1C, 2A, 2B bölgeleri içinde olmayan ve yıldırım kanalı ile buluşması olası olmayan bölgeler

Yıldırımın uçağa ilk tutunma ihtimalinin yüksek olduğu radom, düşey dengeleyici ve kanat ucu kısımları Bölge 1 olarak belirtilir. Tasarım ve analiz çalışmalarında Bölge 1 ile ifade edilen kısımlar için bu çalışmada da olduğu gibi yıldırım akımı A bileşeni dikkate alınır.

Bölge 2 ile ifade edilen bölgeler yıldırım tehdidi açısından daha az risk bulunmaktadır. Uçak Bölge 2 tanımlamasında yer alan kısımların analiz ve tasarım çalışmaları için yıldırım akımı D bileşeni dikkate alınmaktadır. Yıldırım çarpma olasılığının yüksek olduğu bölgeler arasında bulunan kısımlar Bölge 3 olarak ifade edilmektedir. Bu bölgelere yıldırım çarpma olasılığı düşük olmakla birlikte yüksek akımların bu bölgelerden geçme olasılığı yüksektir [16].

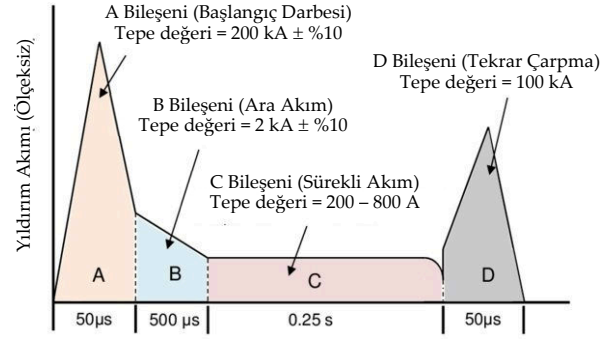
### 3. METODOLOJİ

*Yıldırım akımı uyarması:* Uçak – yıldırım etkileşimini incelemek amacıyla 3 boyutlu elektromanyetik alan analiz modeli oluşturuldu ve analiz edildi. Yıldırım akımı olarak 200 kA tepe değere ve yaklaşık 6,4  $\mu$ s cephe süresine, yaklaşık 50  $\mu$ s sırt yarı değer süresine sahip, çift üstel biçimde, başlangıç akım darbesini temsil eden yıldırım akımı A bileşeni kullanılmıştır (Şekil 3) [17].

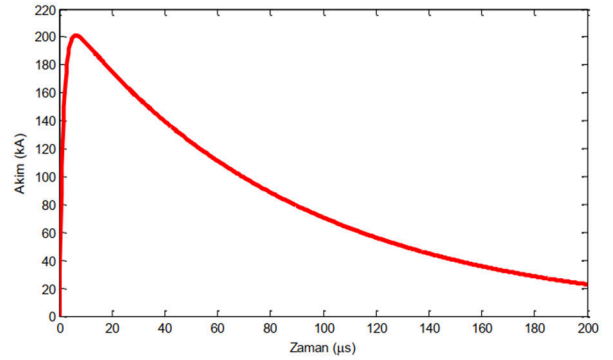
Çalışmada kullanılan yıldırım akımı A bileşeni denklemi (1) ile verilmiştir (SAE ARP5412B-2013) [14].

$$I(t) = I_0(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1)$$

denklemden  $I_0 = 218819$  A,  $a = 11345$  s<sup>-1</sup>,  $b = 647265$  s<sup>-1</sup> alınmıştır. Şekil 4'te bu parametrelere sahip yıldırım akımı A bileşeni gösterilmiştir.

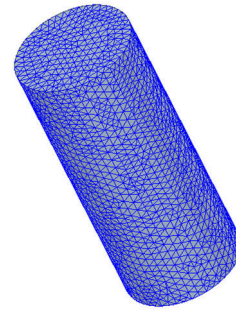


**Şekil 3:** MIL-STD-464'te verilen yıldırım akımı bileşenleri [17].



**Şekil 4:** Yıldırım akımı A bileşeni.

*Uçak modeli:* Yıldırım akımının HA'ya giriş ve çıkış noktaları, radom, kanat ve kuyruk bölgelerine tanımlanan alüminyum silindirler üzerinden tanımlanmıştır. Akım giriş – çıkışı için tanımlanan silindirlerin kesit alanı 8,4 m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Kullanılan alüminyum silindirlerin sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 5'de gösterilmiştir.



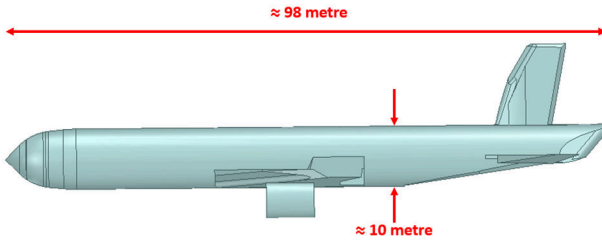
**Şekil 5:** Akım giriş-çıkışında kullanılan alüminyum silindirler için sonlu elemanlar ağ yapısı.

Simülasyon çalışmasında tipik bir ticari uçak modeli kullanılmıştır. Kullanılan uçak modelinin kanat açıklığı 64 metre, uzunluğu 98 metre, kuyruk açıklığı 34 metre ve yüksekliği 10 metredir.

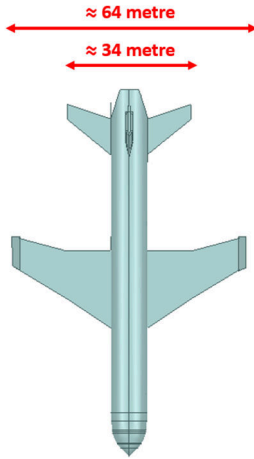
Özellikleri belirtilen uçak modeli hazır olarak temin edilerek Ansys Maxwell programına aktarılmıştır.

Çalışma kapsamında model üzerindeki gerekli düzenlemeler Ansys Maxwell programında yapılmıştır. Çalışmada kullanılan uçak modeli Şekil 6 ve Şekil 7’de gösterilmektedir.

Çalışma kapsamında yapılacak simülasyonda alüminyum ve titanyum gövde tarafından sağlanan koruma değerlendirilecektir. Bu nedenle HA gövde malzemesi alüminyum ve titanyum olarak ayrı ayrı tanımlanmıştır.



Şekil 6: Kullanılan HA modeli ve ölçüleri – yandan görünüş.



Şekil 7: Kullanılan uçak modeli ve ölçüleri – üstten görünüş.

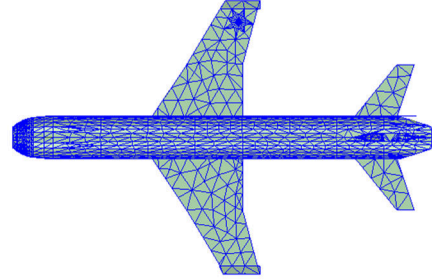
Kullanılan alüminyum ve titanyum malzemelerinin bazı özellikleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4: Alüminyum ve titanyumun elektriksel parametreleri.

Malzeme	Bağıl Manyetik Geçirgenlik	İletkenlik (Siemens/m)
Alüminyum	1.000021	38000000
Titanyum	1.00018	1820000

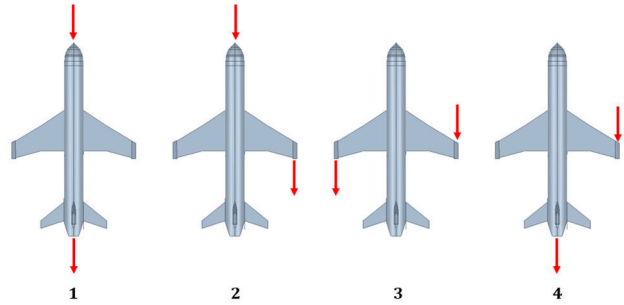
Uçak modelinin sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 8’de gösterilmiştir.

Yıldırımın dolaylı etkilerini incelemek amacıyla uçak içerisinde tanımlanan kablolar, ekransız, tek damarlı, alüminyum iletkenli kablolardır. Tanımlanan kabloların çapı 3,7 mm’dir.



Şekil 8: Uçak modeli için sonlu elemanlar ağı.

Simülasyon senaryoları: Yıldırımın farklı bölgelerden çarpma senaryolarında uçak üzerindeki değişimi incelemek amacıyla Şekil 9’da gösterilen dört farklı ana test senaryosu ile çalışılmıştır.

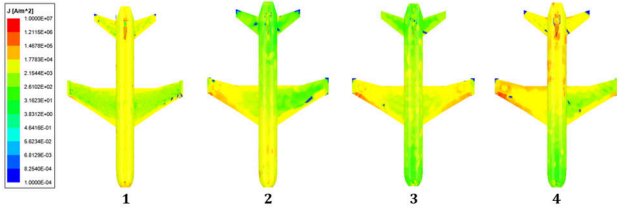


Şekil 9: Simülasyon senaryoları.

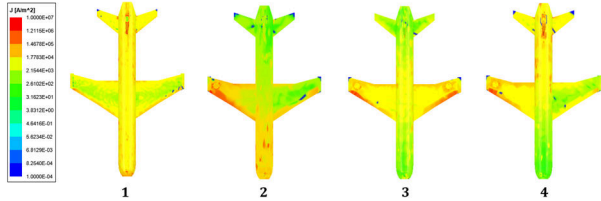
Şekil 9’da gösterilen 1 numaralı test senaryosunda yıldırım darbesinin radom bölgesinden girişi ve kuyruk bölgesinden çıkışı göz önüne alınmaktadır. 2 numaralı senaryoda yıldırımın uçağa radom bölgesinden girişi ve sağ kanat ucundan çıkışı göz önüne alınmaktadır. 3 numaralı senaryoda yıldırımın sağ kanat ucundan girişi ve sol kanat ucundan çıkışı göz önüne alınmaktadır. 4 numaralı senaryoda ise yıldırımın sağ kanat ucundan girişi ve kuyruk bölgesinden çıkışı göz önüne alınmaktadır. Bu çalışmada Şekil 9’da gösterilen dört farklı simülasyon senaryosu alüminyum gövdeli uçak ve titanyum gövdeli uçak için ayrı ayrı incelenmektedir. Modelleme ve Analizler

#### 4. MODELLEME VE ANALİZLER

Farklı test senaryoları için uçak yüzeyindeki akım yoğunluğu dağılımları, Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir.

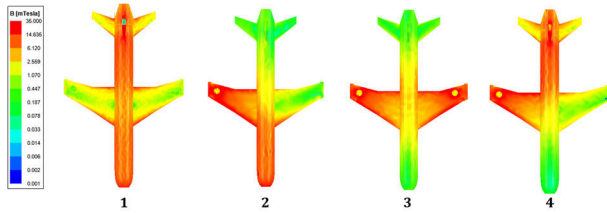


Şekil 10: Alüminyum uçağa akım yoğunluğu dağılımları.

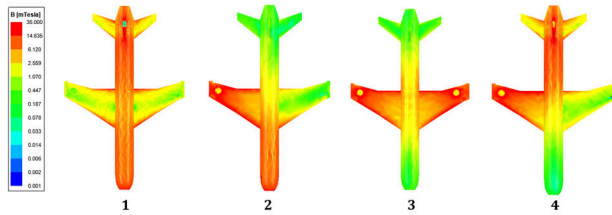


Şekil 11: Titanyum uçağa akım yoğunluğu dağılımları.

Farklı test senaryoları için uçak yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 12 ve Şekil 13'de gösterilmiştir.



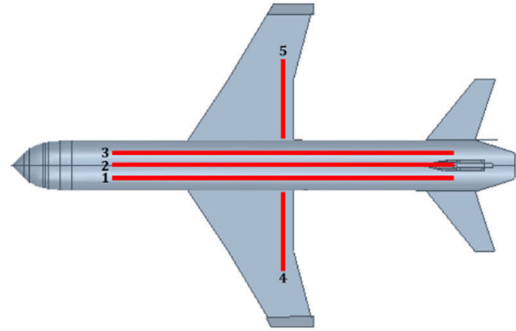
Şekil 12: Alüminyum uçak yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları.



Şekil 13: Titanyum uçak yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımları.

Şekil 12 ve Şekil 13 incelendiğinde yıldırımın giriş ve çıkış noktaları arasında bir akım yolu oluşturduğu gözlenmektedir. Bu yol boyunca akım yoğunluğu ile doğru orantılı olarak manyetik akı yoğunluğunda benzer şekilde değişim olduğu değerlendirilmektedir. Manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak bu bölgelerde dolaylı etkilerin fazla olacağı değerlendirilmektedir. Dolaylı etkileri incelemek amacıyla uçak içerisinde Şekil 14'te

gösterildiği üzere beş farklı 22 awg kesitli, ekransız, alüminyum kablo eklenmiştir.



Şekil 14: Uçak içerisindeki kablo yerleşimleri ve numaralandırmaları.

Uçak içerisinde bulunan kablolar üzerinde indüklenen maksimum gerilim seviyeleri Tablo 5'de verilmiştir. Tüm simülasyon senaryoları için kablolar üzerinde indüklenen gerilim seviyeleri incelendiğinde, yıldırımın dolaylı etkilerinden en az 2 numaralı kablounun etkilendiği değerlendirilmektedir. Bunun sebebi, kablounun uçağın ortasından gitmesi ve yıldırım akım yolu ile arasındaki mesafenin daha fazla olmasıdır. Bu sonuç ile yıldırıma karşı etkin bir koruma tasarımında kablo yerleşimlerinin kritik öneme sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 5: Uçak içindeki kablolarda indüklenen maksimum gerilim seviyeleri.

Test Senaryosu	Radom	Radom	Sancak	Sancak	
	Kuyruk	Sancak	İskele	Kuyruk	
	(1)	(2)	(3)	(4)	
Gerilim (mV)					
Alüminyum Gövde	Kablo-1	52,8	81,2	35	14,7
	Kablo-2	9,6	37,2	10,7	3,6
	Kablo-3	257	14,3	11,8	69
	Kablo-4	8,3	88	1354	224
	Kablo-5	37	391	260	1316
Titanyum Gövde	Kablo-1	85,8	104	31	49,7
	Kablo-2	31,2	50,7	12	26,4
	Kablo-3	218,3	29,8	24,4	140
	Kablo-4	8,3	141	1422	240
	Kablo-5	37	583	267	1147

Alüminyum ve titanyum gövdeli hava araçları için kablolar üzerinde indüklenen gerilim seviyeleri incelendiğinde genellikle titanyum gövdeli uçakta yıldırımın dolaylı etkilerinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni olarak titanyumun, alüminyuma karşı iletkenliğinin daha düşük ve bağl manyetik geçirgenliğinin daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir.

Yıldırım akımının kanat bölgesinden giriş veya çıkış yaptığı senaryolarda kanatlarda bulunan 4 ve 5 numaralı kablolar üzerinde indüklenen gerilim seviyelerinin artmakta olduğu gözlemlenmiştir. Yıldırım akımının radom ve kuyruk bölgesinden giriş-çıkış yaptığı senaryolarda ise uçak gövdesinde bulunan 1, 2 ve 3 numaralı kablolar üzerinde indüklenen gerilim seviyelerinin yükseldiği gözlemlenmiştir. Yıldırımın dolaylı etkilerinin yıldırım akımının yüzeyde kullandığı yola bağlı olarak etki bölgesinin de değişebileceği değerlendirilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, uçakların başlıca yıldırım çarpma noktaları incelenmiş ve farklı yıldırım yolları altında uçağın elektromanyetik alan dağılımı, gerçek uçak boyutlarında, üç boyutlu bir elektromanyetik simülasyon modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Yıldırımın "giriş" ve "çıkış" noktaları genellikle burun bölgesi, kanat bölgesi ve kuyruk kısmında yoğunlaşmaktadır. Bu noktalar, çeşitli yıldırım yollarının oluşmasına olanak tanıyacak şekilde birleşebilir.
- Manyetik alan dağılımı, yıldırım yolu ile güçlü bir ilişkiye sahiptir. Manyetik alan yoğunluğu genellikle yıldırım yoluna yakın bölgelerde yüksek değerlere ulaşır ve "giriş" ile "çıkış" noktalarında maksimum seviyeye çıkar.
- Uçağın iç kısmında elektromanyetik alan dağılımı homojen değildir. Yıldırım yoluna yakın bölgelerde geçici elektromanyetik alan şiddeti en yüksek seviyeye ulaşırken, diğer bölgelerde bu şiddet katlarca azalır ve hatta neredeyse sifira düşer.
- Uçak malzemesine göre uçak içerisinde yıldırımın dolaylı etkilerine karşı dayanım değişebilmektedir. İletkenliği düşük, manyetik geçirgenliği yüksek malzemeler kullandıkça yıldırımın dolaylı etkilerinden daha fazla etkilenilmektedir.

Yıldırım akımının aktığı yüzeye olan mesafenin artması ile yıldırımın dolaylı etkileri azalmaktadır. Bu nedenle yıldırıma karşı etkin bir koruma için aviyonik ve kablolama yerleşim çalışmalarında bu

durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

**Yazarların Katkıları:** Orçun Sayaner, içerik çalışmalarının yapılmasında ve makalenin yazılmasında; Özcan Kalenderli, konunun, içeriğinin belirlenmesi, makalenin kontrolü, yayına hazırlanmasında katkılarda bulunmuştur

**Teşekkür:** Yazarlar, çalışmaların yapılabilmesi için gereken zamanın tanınması nedeniyle BAYKAR firmasına teşekkür ederler.

**Çıkar Çatışmaları:** Yazarlar, sunulan çalışmada herhangi bir kurum veya kişi ile çıkar çatışması olmadığını belirtmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] S. İnce, "Yıldırımın Uçaklara Etkileri ve Korunma Yöntemleri", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
- [2] E. J. Rupke, "What happens when lightning strikes an airplane?", *Scientific American Newsletters*, August 14, 2006.
- [3] S. Memiş, "Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Uçaklara Yıldırım Çarpmasının Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [4] S. Memis, Ö. Kalenderli, Ö. Altay, "Investigation of electromagnetic effect of lightning on aircraft by finite element method", *International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA) 2021*, Bangkok, Thailand, 25–27 November 2021.
- [5] B. M. Yıldız, "Uçak Kablolardaki Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
- [6] B. M. Yıldız, Ö. Kalenderli, Ö. Altay, "Multi-physical analysis of the effect of cable layout, distance between cables and ambient temperature on cable current carrying capacity in air vehicle wiring with finite element method", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 38, no. 4, pp. 2147-2154, 2023.
- [7] F. Akbulut, Ö. Kalenderli, "Analysis of precipitation static condition (P-Static) and static discharger wicks for aircraft", *Turkish Journal of Engineering Research and Education (Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi)*, vol. 2, no. 1, pp. 36-42, 2023.

- [8] M. Apr`a, M. D'Amore, K. Gigliotti, M. S. Sarto, V. Volpi, "Lightning indirect effect certification of a transport aircraft by numerical simulation". IEEE, Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 50, no. 3, pp. 513-523, 2008.
- [9] N. I. Petrov, A. Haddad, G. N. Petrova, H. Griffiths, R. T. Waters, "Study of Effects of Lightning Strikes to an Aircraft", Recent Advances in Aircraft Technology, Intech Open, 2012.
- [10] E. Rupke, "Lightning Direct Effects Handbook", Lightning Technologies Inc., Pittsfield, 2002.
- [11] SAE ARP 5414B: Aircraft Lightning Zoning, 2018.
- [12] P. Lalande, A. Bondiou-Clergerie, & P. Laroche, P., "Computations of the initial discharge initiation zones on aircraft or helicopter"(No. 1999-01-2371). SAE Technical Paper, 1999.
- [13] F. A. Fisher, J. A. Plumer & R. A. Perala, "Aircraft Lightning Protection Handbook (No. DOT/FAA/CT-89/22)", 1989.
- [14] D. J. Cecil, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, "Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description". Atmospheric Research, vol. 135, pp. 404-414, 2014.
- [15] G. Sweers, B. Birch, & J. Gokcen, "Lightning strikes: protection, inspection, and repair", Aero Magazine, vol. 4, pp. 19-28, 2012.
- [16] E. C. Kışeci, E. Salamcı, "Uçak - yıldırım etkileşimi". Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, ss. 177-18, 2020
- [17] MIL-STD-464 Military Standard: Electromagnetic Environmental Effects, Requirements for Systems, 1997.
- [18] SAE ARP5412B Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, 2013.

