

-USMTD-
**Uluslararası Sürdürülebilir
Mühendislik ve Teknoloji Dergisi**



-IJSET-
**International
Journal of Sustainable
Engineering and Technology**



Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi
International Journal of Sustainable Engineering and Technology

ISSN: 2618-6055 / Cilt: 8, Sayı: 2, (2024)



BAŞ EDİTÖR / EDITOR-IN-CHIEF

Prof. Dr. Reşat SELBAŞ

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

YARDIMCI EDİTÖRLER / ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. Cengiz ÖZEL

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Kubilay TAŞDELEN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Prof. Dr. Hilmi Cenk BAYRAKÇI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Koray ÖZSOY

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Nadi KAPLAN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Bekir AKSOY

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Merdan ÖZKAHRAMAN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

YAYIN DANIŞMA KURULU / EDITORIAL ADVISORY BOARD

Prof. Dr. İbrahim ÜÇGÜL

Süleyman Demirel Üniversitesi

Prof. Dr. Victor Hugo C. De ALBUQUERQUE

Federal University of Ceará

Prof. Dr. Jude HEMANTH

Karunya Institute of Technology and Sciences

Prof. Dr. Osman GENÇEL

Bartın Üniversitesi

Prof. Dr. José Antonio Marmolejo SAUCEDO

National Autonomous University of Mexico

Dr. Deepak GUPTA

Maharaja Agrasen Institute of Technology

MİZANPAJ EDİTÖRLERİ / LAYOUT EDITORS

Arş. Gör. Hande VAROL MOROVA

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Ali Ekber SEVER

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Yusuf YAŞIR

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Arş. Gör. Elifnur ŞAKALAK

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Yazıların tüm bilimsel sorumluluğu yazar(lar)a aittir. Editör, yardımcı editör ve yayıncı dergide yayınlanan yazılar için herhangi bir sorumluluk kabul etmez. Bu dergi, aşağıda listelenen veri tabanları tarafından taranmaktadır.

All the scientific responsibilities of the manuscripts belong to the authors (s). The editor, assistant editor and publisher accept no responsibility for the articles published in the journal. The Journal is indexed by the following abstracting and indexing databases.

Index Copernicus, Google Scholar, Sobiad, Sindex, DRJI



Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi
International Journal of Sustainable Engineering and Technology
Cilt: 8, Sayı: 2, Yıl: 2024
Volume: 8, Number: 2, Year: 2024



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

<u>MAKALE / ARTICLES</u>	<u>SAYFA / PAGES</u>
TERMOELEKTRİK MODÜL KULLANILAN SERADAKİ BİR BİTKİNİN TOPRAK ALTI VE ÜSTÜ SICAKLIĞININ SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ Alp BÜYÜKBAYRAKTAR ^{ID} , *Elif ÖĞÜT ^{ID}	87 – 107
MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL FIBRE-REINFORCED SUSTAINABLE EPOXY COMPOSITES Murat KODALOĞLU ^{ID} , *Feyza AKARSLAN KODALOĞLU ^{ID}	108 – 118
ROBOTİK CASUS KUŞUN TASARIMI, İMALATI VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE KONTROLÜ *Seydi TUTAR ^{ID} , Abdülhamit POLAT ^{ID} , Murat ÖZTÜRK ^{ID} , Davut KILINÇ ^{ID} Koray ÖZSOY ^{ID}	119 – 133
DÜŞÜK GWP AKIŞKANLI ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI TERMODİNAMİK ANALİZİ *Erkan DİKMEN ^{ID} , İsmail İÇER ^{ID}	134 – 141
SHEAR STRENGTH PARAMETERS AND DEFORMABILITY PROPERTIES OF SILICATE-BASED RESIN ADDED SAND-TYPE SOIL SPECIMENS *Eren KÖMÜRLÜ ^{ID}	142 – 153
YAPAY ZEKA TABANLI GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE AKILLI ROBOT SÜPÜRGELERDE TEHLİKE VE ENGEL ALGILAMA *Mustafa Melikşah ÖZMEN ^{ID} , Muzaffer EYLENCE ^{ID} , Bekir AKSOY ^{ID}	154 – 163
OTOMASYONLU BİR SERANIN WEKA PROGRAMI İLE ENERJİ TÜKETİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN ANALİZİ *Ali BÜYÜKMERT ^{ID} , Yüksel AYDOĞAN ^{ID}	164 – 171
6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİ SONRASI YAPI DENETİM SİSTEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ *Hüseyin Hakan İNCE ^{ID} , Eda Nur SOYLU ^{ID}	172 - 181
PREDICTING KONYA'S AIR TEMPERATURE: GENETIC PROGRAMMING, GRADIENT BOOSTING AND RANDOM FOREST APPROACHES *Kazım KUMAŞ ^{ID} , Ali AKYÜZ ^{ID}	182 – 191
GEMİ TESPİTİ UYGULAMASINDA YOLOV8 VE YOLOV9 ALGORİTMALARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ *Beyzanur TEKİNDEMİR ^{ID} , Fatih Ahmet ŞENEL ^{ID}	192 – 199
ENDÜSTRİ YAPILARININ YENİDEN İŞLEVLENDİRİLMESİ; NAZİLLİ SÜMERBANK BASMA FABRİKASI LOJMAN BİNASI ÖRNEĞİ *Kamertap CIRIK ^{ID} , Hasan Ş. HAŞTEMOĞLU ^{ID}	200 – 210
A STUDY ON THE UTILIZATION OF WASTEWATER TREATMENT SLUDGE IN THE CONSTRUCTION SECTOR *Yusuf Tahir ALTUNCI ^{ID}	211 – 217



TERMOELEKTRİK MODÜL KULLANILAN SERADAKİ BİR BİTKİNİN TOPRAK ALTI VE ÜSTÜ SICAKLIĞININ SAYISAL VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Alp BÜYÜKBAYRAKTAR¹, *Elif ÖĞÜT¹

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli

(Geliş/Received: 15.05.2024, Kabul/Accepted: 03.09.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Seralarda kış aylarında üretimi artırmadaki en önemli faktör, sera içindeki bitkinin olgunlaşır büyümesini sağlayan, gerekli konfor sıcaklığına ulaşmak için kullanılan yakıt ile ısıtma sistemlerinin işletme ve tasarım maliyetleridir. Toprak ısıtma sistemleri ile bitkilerde önemli ölçüde verim artışı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, Termoelektrik modül ile toprağın ısıtılması amaçlanmaktadır. Termoelektrik modülün ısıtma yükünden yararlanılıp önce kontak malzemeye ısı aktarmasını, sonra da ısınan kontak malzemesinin toprağı ısıtması ve doğal taşınım etkisiyle bitki yapraklarının ısıtılması amaçlanmıştır. Farklı bir yaklaşımla termoelektrik modül kullanarak alüminyum blok tasarlanmış olup bitkinin kök ve tohum çimlenme sıcaklığı arttırması amaçlanmıştır, bitkinin yaprak sıcaklığı ise kübik bir termoelektrik modül hazırlayarak toprağın üstüne yerleştirilerek elde edilmiştir. Tasarım alüminyum blok bitkinin kök sıcaklığının arttırarak don olayından koruma sağlarken kübik termoelektrik modül bitki yapraklarındaki don olayını azaltarak kök ve sera içi ısınmayla daha verimli ve çok daha ekonomik bir üretim amaçlanmaktadır. Çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri Ansys Fluent yazılımı kullanarak elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada toprak tipi, kontak malzemesi, çevre ve ortam koşulları, bitki kök konumu gibi parametreler incelenmiştir. Birbiri ile ilişkili olan bu terimler de değişiklik yapılarak ideal tasarımın elde edilip optimum konfor sıcaklığına ulaşması bu çalışmanın ana amacıdır. Yapılan deneyler ve simülasyonlar sonucunda, termoelektrik modüllerin sera içi sıcaklık kontrolünde etkili olduğu ve bitki verimliliğini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir. Toprağın ısıtılmasıyla kök sıcaklığında 16.3 derece bir artış sağlanmış ve bitki köklerinin don olayından korunması başarılmıştır. Ayrıca, kübik termoelektrik modül kullanımıyla bitki yaprak sıcaklığı da 26 derece artırılarak, yaprak don olayları minimize edilmiştir. Bununla birlikte yapılan test ve analiz sonuçlarında 720 saniyenin sonunda %0.91 bir bağıl hata tespit edilmiş olup analiz ve yapılan deneyin tutarlılığı gösterilmiştir. Bu sonuçlar, termoelektrik modüllerin sera içi ısıtma sistemleri için verimli ve ekonomik bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları, termoelektrik modül tasarımının sera içi sıcaklık kontrolünde geleneksel yöntemlere göre daha etkin olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar kelimeler: Ansys Fluent, Peltier, Sera, Termoelektrik Modül.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ABOVE AND BELOW GROUND TEMPERATURE OF A PLANT IN A GREENHOUSE USING A THERMOELECTRIC MODULE

ABSTRACT

Enhanced production during winter hinges on the choice of fuel for attaining the requisite comfort temperature and the efficient operation of heating systems. Notably, a substantial yield boost is observed in plants utilizing soil heating systems. This study aims to employ Thermoelectric modules for soil heating. The strategy involves transferring heat to the contact material through the thermoelectric module's heating load. The heated contact material then warms the soil, and natural convection is utilized to heat the plant leaves. An innovative approach incorporates an aluminum block designed with a thermoelectric module to elevate root and seed germination temperatures, coupled with a cubic thermoelectric module placed on the soil to influence leaf temperature. The aluminum block shields against frost by raising the plant's root temperature, while the cubic module minimizes frost on the leaves. This dual-pronged approach seeks a more efficient and economical greenhouse production by

heating both the root zone and the interior. The study incorporates Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses using Ansys Fluent software. Experimental parameters encompass soil type, contact material, environmental conditions, and plant root positioning. The aim of this study is to optimize the design, adjusting interrelated factors to achieve the ideal configuration and attain the optimum comfort temperature. Based on experiments and simulations, it has been observed that thermoelectric modules are effective in controlling internal greenhouse temperatures and significantly enhancing plant productivity. Heating the soil resulted in a 16.3-degree increase in root temperature, successfully protecting plant roots from frost events. Additionally, using cubic thermoelectric modules increased leaf temperature by 26 degrees, minimizing leaf frost occurrences. Moreover, test and analysis results indicated a relative error of 0.91% after 720 seconds, demonstrating the consistency of the analysis and experiments. These findings illustrate that thermoelectric modules provide an efficient and economical solution for greenhouse heating systems. Experimental data and simulation results confirm that thermoelectric module designs are more effective in greenhouse temperature control compared to traditional methods.

Keywords: Ansys Fluent, Peltier, Greenhouse, Thermoelectric Module.

1. Giriş (Introduction)

Toprak ısıtma sistemleri, tarım ve sera yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, bitki büyümesini ve verimliliği artırmak amacıyla toprağın kök seviyesindeki sıcaklığı kontrol altında tutmayı sağlar. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak, peltier (termoelektrik) cihazları, doğrudan elektrik enerjisi kullanarak termal enerji üretir ve bu sayede toprak içinde istenen sıcaklık seviyelerini korur. Peltier cihazları, termoelektrik etki sayesinde bir yüzeyde soğutma ve diğer yüzeyde ısıtma sağlayabilen kompakt ve sessiz bir teknolojidir. Peltierler, doğrudan akım (DC) ile çalışan ve bir soğutma etkisi yaratmak için yarı iletken farklı sıcaklıklara sahip iki yüzey arasında termoelektrik etkiyi kullanan cihazlardır. Bu sistemler, istenilen sıcaklık farkını koruyarak toprak içinde homojen bir ısı dağılımı sağlar. Özellikle sera içi koşullarda, bitkilerin kök sistemlerinin don olaylarından korunması ve optimal büyüme şartlarının sürdürülmesi için ideal bir çözüm sunar. Peltierlerin toprak ısıtma sistemlerindeki avantajları arasında enerji verimliliği ve düşük bakım gereksinimi bulunmaktadır. Diğer ısıtma yöntemlerine kıyasla daha az enerji tüketimi sağlayan bu teknoloji, aynı zamanda sessiz çalışmasıyla da dikkat çeker. Modern tarım ve sera yönetimi için giderek daha önemli hale gelen bu sistemler, hem mevsimsel değişimlere hem de çevresel faktörlere karşı bitki sağlığını koruma açısından kritik bir rol oynar.

Ülkemizin içinde bulunduğu ılıman iklim kuşağındaki ülkelerde seracılık ekolojik koşullara bağlı olarak gelişmiştir. Buna göre, 2008 yılı itibarıyla, seralarımızın %84.6'sı ve toplam örtü altı alanlarımızın %86.9'u Akdeniz Bölgesinde yer almaktadır. 1980'li yılların sonuna doğru diğer bölgelerimizde de seracılık faaliyetleri başlamıştır ve günümüzde giderek artan bir eğilim göstermektedir [1]. Seraların ısınması için harcanan maliyet seraların ekonomi dengesini etkileyen önemli bir parametredir. Son dönemde hem ülkemiz hem de diğer ülkeler çevreye duyarlı ısıtma ve soğutma sistemleri için temiz ve sürekli dönüşüme uğramakta olan yenilenebilir enerji kaynaklarının doğru kullanılması için çalışmalar yürütmektedirler. Yenilenebilir enerji kaynakları sera içi ısınma sistemlerinde aktif rol alması gün geçtikçe artmaktadır. Sera içinde bitkinin çimlenmesini ve sağlıklı bir şekilde büyümesini sağlayan, konfor sıcaklığına ulaşabilmek için harcanan yakıtın miktarı cinsi, sistemi seralarda ısıtma sistemlerinin işletme giderlerini oluşturur. Günümüzde aktif kullanılan klasik seracılıkta çoğu kez merkezi ısıtma sistemi kullanılmaktadır. Bu ısıtma sistemleri kalorifer kazanından çıkan sıcak hava ile sera içerisindeki soğuk havayı ısıtmayı amaçlarken enerjinin büyük bir miktarını seranın toprak tabanından atmosfere yollamaktadır. Bu durum doğal olarak sera üreticilerini toprak ısıtma sistemlerine yönlendirmektedir. Seralarda toprağın ısıtılması ile ısı verim ve bitkilerin gelişimi artmakta iken bu yöntemle toprağın ısıtılması aynı zamanda da tüm seranın iç sıcaklığını artırmaya katkı sağlamaktadır [2]. Klasik toprak ısıtma sistemlerine nazaran, Termoelektrik bir modül ile toprağın ısınması gözlenebilir. Termoelektrik modül temiz bir enerji kaynağıdır. Elektrik enerjisini ısıtma yüküne veya soğutma yüküne dönüştürür. Burada Termoelektrik modülün (TEM) ısınma yükünden yararlanıp, önce kontak malzemeye ısıyı aktarmasını, sonra da ısınan kontak malzemesinin (alüminyum) toprağa iletim ile ısı transferini gerçekleştirip, aynı malzemeyi toprağın üst kısmına yerleştirdiğimiz anda da doğal taşınım etkisiyle bitki ve bitki yapraklarına ısı yükü vermek amaçlanmaktadır. TEM'ler yarı iletken malzemelerden yapılmış olup ısıtıcı-soğutucu olmak üzere iki grupta incelenirler. Her iki tipte de n ve p tipi yarı iletken malzemeler kullanılırken n-tip ve p-tip yarıiletkenleri bir araya gelerek yarıiletken çiftini oluşturmaktadırlar. Bu yarıiletken çiftler seri olarak birbirine bağlandığı zaman TEM'i oluştururlar.

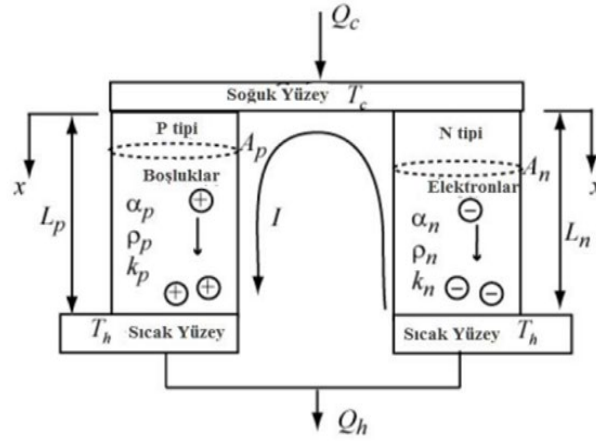
Seraların ısıtma sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, yenilikçi ve çevre dostu çözümler geliştirilmesinde önemli katkılar sağlamaktadır. Çanakçı ve arkadaşları (2013) seralarda ısıtma maliyetlerinin yüksek olduğunu ve bu maliyetlerin azaltılması için termal ekranlar, çift katlı örtü malzemeleri ve pasif güneş enerjisi kullanımı gibi yenilikçi yöntemlerin gerekli olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, iklim verilerine bağlı olarak ısıtma uygulamalarının maliyeti artırdığı ve enerji verimliliğinin sağlanması için termal ekranlar gibi çözümlerin önemine vurgu yapılmıştır [3]. Öztürk ve arkadaşları (2006) seralardaki ısıtma sistemlerinin önemine dikkat çekmiş ve maliyeti düşürmek için ısı performansını yüksek sistemlerin kullanılması gerektiğini ifade etmiştir. Bu çalışmada, seralarda ısı değiştiricilerin bitki sıralarına yakın yerleştirilmesi gerektiği ve bitki yaprak sıcaklığının yüksek olmasının mantar ve bakteriyel hastalık riskini azalttığı belirtilmiştir [4]. Kendirli ve Çakmak (2010) sera üreticiliğinin en büyük sorunlarından birinin ısıtma sistemleri olduğunu ve fosil yakıtların yüksek maliyetinin sera üreticilerini zorladığını belirtmiştir. Bu çalışmada, seralarda düzenli ısınma sağlanamamasının bitkilerde verim düşüklüğüne yol açtığı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sera ısıtma sistemlerinde kullanımının önem kazandığı ifade edilmiştir [5]. Popovski (1990) seralarda bitki ve tohumların uygun bir ısıtma sistemi ile yetiştirilmesi gerektiğini ve ısıtma sisteminin sera içerisindeki hava hareketine bağlı olarak tüm ortamı ısıttığını belirtmiştir. Çalışma, seralarda bitki tipine ve konumuna göre ısıtmanın önemini vurgulamaktadır [6].

Termoelektrik modüllerin ısıtma sistemlerinde kullanımı üzerine yapılan çalışmalar da bu alanda yenilikçi çözümler sunmaktadır. Kobari ve arkadaşları (2015) termoelektrik modül (TEM) kullanarak bir sıcak plaka aparatı geliştirmiş ve TEM'in hassas çalışma sıcaklıklarının önemini vurgulamıştır. Bu çalışmada, TEM'in ısı akışını hassas bir şekilde ölçmek için bir sıcaklık aparatı tasarlanmıştır [7]. Huang ve Duang (2000) hassas elektronik bileşenlerin sabit sıcaklıkta çalışma performanslarının önemine vurgu yapmış ve değişken ortam sıcaklığında sıcaklık denetiminin elzem olduğunu belirtmiştir. Çalışmada, dinamik sürekli ısı transferinin önemi vurgulanmıştır [8]. Bununla birlikte Sato ve arkadaşları (2005) çok yüksek akımların devre içerisinde iletilmesi ve TEM akımlarının uçlarındaki ısı kaçaklarının düşürülmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışma, TEM'in sıcak ve soğuk yüzeyi arasındaki ısı düşüşlerin azaltılmasının önemini vurgulamaktadır [9].

Bu çalışmada, termoelektrik modüllerin sera içi sıcaklık kontrolünde etkinliği ve bitki verimliliği üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal analizlerle incelenmiştir. Temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olan termoelektrik modüllerin, sera içi ısıtma sistemlerinde nasıl kullanılabileceği ve bu sistemlerin verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar, farklı toprak tipleri, kontak malzemeleri ve ortam koşulları altında yapılmış, bu parametrelerin bitki kök sıcaklığı ve yaprak sıcaklığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri Ansys Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Bu sayede, termoelektrik modül tasarımının sera içi sıcaklık kontrolünde geleneksel yöntemlere göre daha etkin ve ekonomik olduğu ortaya konulmuştur

2. Teorik Model (Theoretical Model)

TEM matematiksel modelleri için ideal denklem takımları kullanılmaktadır. Kullanılan ideal takım denklemler TEM' in ısıtma ve soğutma olayını tanımlamak için kullanılır. Aşağıda Şekil 1'de modüle ait P-N tipteki termal elementleri ortaya çıkaran durum parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 1. P ve N tipi termoelementlerin şematik gösterimi [10] (Schematic representation of P and N type thermoelements)

2.1. Yönetici denklemler (Governing equations)

$$q = \alpha T_j - k \vec{\nabla} T \quad (1)$$

Burada α seebeck katsayısı, j akım yoğunluğu, k ısı iletkenliği ve $\vec{\nabla}$ gradyandır. Bu denklem ısı akısı, elektrik akımı ve ısı iletimini Denklem (1) ile ilişkilendirirken, kararlı durum hali olarak Denklem (2)'de gösterilmiştir.

$$\vec{\nabla}(k \vec{\nabla} T) + j 2\rho - T d\alpha/dT j \vec{\nabla} T = 0 \quad (2)$$

Burada ρ elektrik direncidir. Birinci terim ısı iletimini, ikinci terim Joule ısısını, üçüncü terim ise Seebeck katsayısından dolayı ortaya çıkan sıcaklığı ifade etmektedir.

Şekil 1'de termoelektrik modüle ait L_p ve L_n uzunluğunda ve A kesit alanı olan p-n tipi ısıl çiftlerin bir araya gelmesi ile oluşan modül gösterilmiştir. Sıcak yüzey ile soğuk yüzey arasında sıcaklık farkı modüle verilen elektrik akımı ile oluşmaktadır.

Sıcaklığın seebeck katsayısına bağımlı olmadığı, ısı kayıplarının önemsenmediği şartlar altında Denklem (3) ortaya çıkmaktadır.

$$d/dx(kA dT/dx) + I^2 \rho/A = 0 \quad (3)$$

İki sınır şartlı sıcaklık gradyanı için çözüm ($T_{x=0} = T_c$ ve $T_{x=L} = T_h$);

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \frac{I^2 \rho L}{2A^2 k} + \frac{T_h - T_c}{L} \quad (4)$$

(4) Denklemi p ve n tipindeki ısıl çiftlerle birlikte açıklanmak istenirse denklem (5) elde edilir.

$$\dot{Q}_C = \left[(\alpha_p - \alpha_n) T_c I + \left(-kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \right)_p + \left(-kA \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \right)_n \right] \quad (5)$$

$$\dot{Q}_C = n(\alpha_p - \alpha_n) T_c I - \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \right) - \left(\frac{K_p A_p}{L_p} + \frac{K_n A_n}{L_n} \right) (T_h - T_c) \quad (6)$$

Denklem (6)'da peltierde mevcut bulunan n ısıl çiftlerin TEM bulunan miktarıdır. Q_c soğuk yüzeyden

çekilen ısı oranını verir.

Son olarak, T_c sıcaklığındaki soğutma gücü Denklem (7)'de belirtilmiştir.

$$\dot{Q}_c = n[\alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c)] \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (8)$$

$$R = \frac{\rho_p L_p}{A_p} + \frac{\rho_n L_n}{A_n} \quad (9)$$

$$K = \frac{K_p A_p}{L_p} + \frac{K_n A_n}{L_n} \quad (10)$$

p-tipi ve n-tipi ısı çiftlerinin birbirine benzemekte olduğu düşünülürse, $R = \rho L/A$ ve $K = kA/L$ olarak alınabilir. Burada $\rho = \rho_p + \rho_n$ ve $K = K_p + K_n$ şeklinde ifade edilir (9) ve (10) Denklemleri uygulama olarak bilimsel yayınlarda ve sanayide sıklıkla karşımıza çıkan ideal denklem olarak adlandırılır. Termoelektrik modülün ısınan sıcak yüzeyden ortama bırakılan serbest ısı oranı Q_h Denklem (11)'de belirtilmiştir.

$$\dot{Q}_h = n[\alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_h - T_c)] \quad (11)$$

Termodinamiğin birinci yasası dikkate alınırsa Denklem (12) TEM için yazılır.

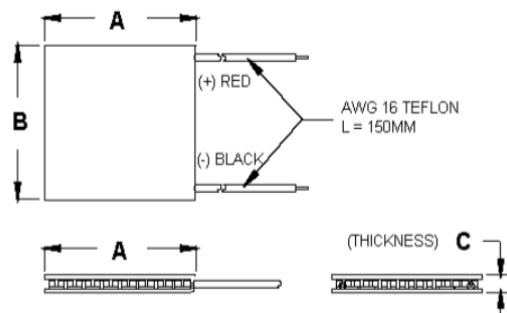
$$\dot{W} = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c \quad (12)$$

Denklem (7) ve Denklem (11), (12) Denkleminde uygulandığında Denklem (13) elde edilir.

$$\dot{W} = n[\alpha T_h - T_c] + I^2 R \quad (13)$$

2.2. Tasarım prensipleri (Design principles)

Sistemde kullanılan Termoelektrik modül TEC1-12706 markalı modüldür. Modül 12V ve 6 amperlik akımla çalışmaktadır. Bu modüle ait başlangıç koşulları ve sınır şartları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Fiziksel sistemin şematik görünümü [11] (Schematic view of the physical system)

Bu çalışmada Seramik Materyal: Alüminyum oksit (Al_2O_3) Lehim Yapımı: 138C, Bizmut Tin (BiSn) kullanılmıştır. Burada $A=40mm$, $B=40mm$, $C=38mm$ olarak tanımlanmıştır.

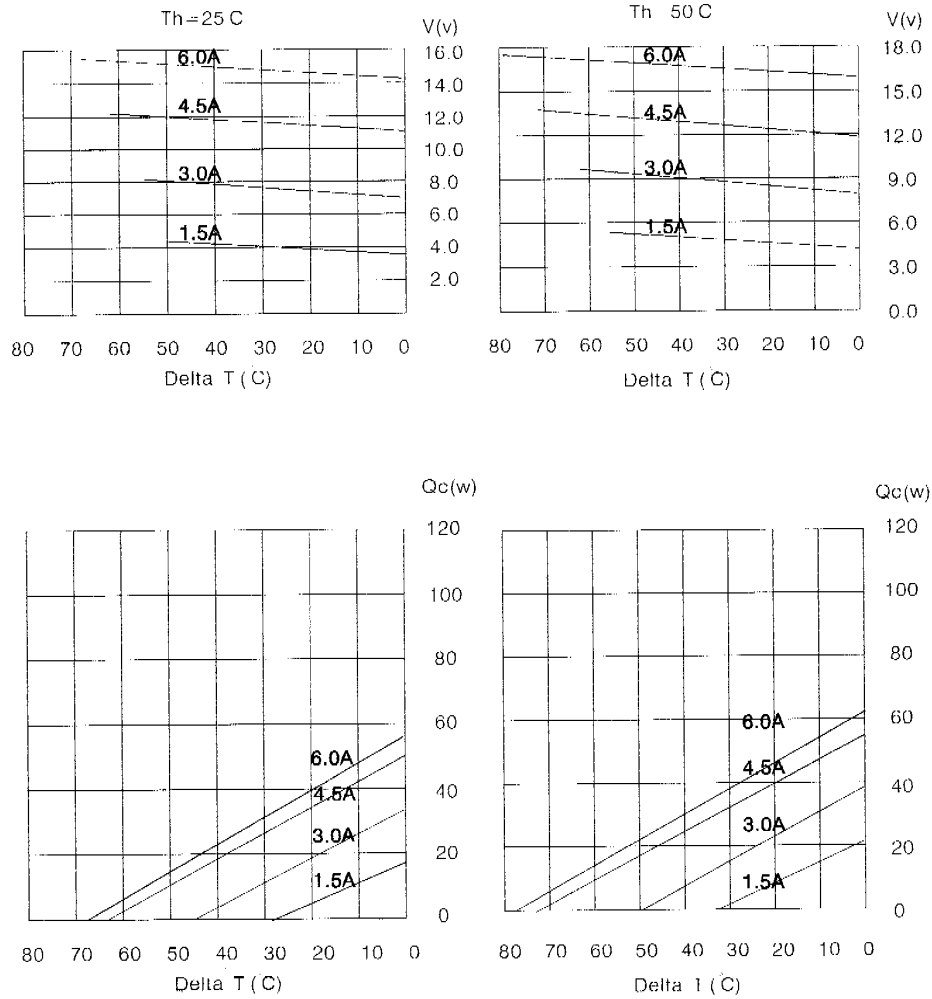
Tablo 1 'de TEC-12706 markalı termoelektrik modülün çalışma esnasındaki maksimum ve minimum değerleri verilmiştir. Yüzey sıcaklığı maksimum $50^\circ C$ iken ve Q_{max} değeri 57 (Watt) değerlerine sahiptir. Bunun anlamı verilen maksimum akım değerine karşılık gelen sıcaklıktır ve modülün gücüdür. Voltaj ve akım değerleri termoelektrik modülün direnci ile değişmektedir. Termoelektrik modülün direnci, modül içindeki p-n çiftleri sayısına, yüzey alanlarına ve kullanılan malzeme tipine bağlıdır.

Tablo 1. Peltier'e ait sınır şartları ve özellik tablosu [12] (Peltier boundary conditions and property table)

TEC-12706 Markalı Modülün Maksimum ve Minimum Değerleri	Minimum Değerler	Maksimum Değerler
Sıcak Yüzey Sıcaklığı °C	25°C	50°C
Q_{max} (Watt)	50 (Watt)	57 (Watt)
ΔT_{max} °C	60°C	75°C
I_{max} (Amper)	1.5 (Amper)	6.4 (Amper)
V_{max} (Volt)	14.4 (Volt)	16.4 (Volt)
TE Modül Direnci (Ohm)	1.98 (Ohm)	2.30 (Ohm)

Şekil 1'de gösterildiği gibi y eksenini Termoelektrik modülün kullanacağı Voltaj miktarını göstermektedir. X eksenindeki ΔT °C ifadesi ise Termoelektrik modülün iki yüzeyi arasındaki maksimum sıcaklık farkını göstermektedir. Soğuk yüzey 0°C olduğu anda gerekli olan yüzey 75°C dereceye kadar çıkmaktadır. Böylelikle alüminyuma iletilen sabit bir ısı oluşmaktadır. Burada gönderilen akımla sıcaklık ayarı kolaylıkla yapılır. Bir regülatör akü çıkıcı amper devresiyle amper ayarı kolaylıkla yapılır. Aşağıda TEC1-12706 markalı termoelektrik modüle ait voltaj sıcaklık değerlerine ait uygun amper miktarları aşağıda Şekil 3'te gösterilmiştir.

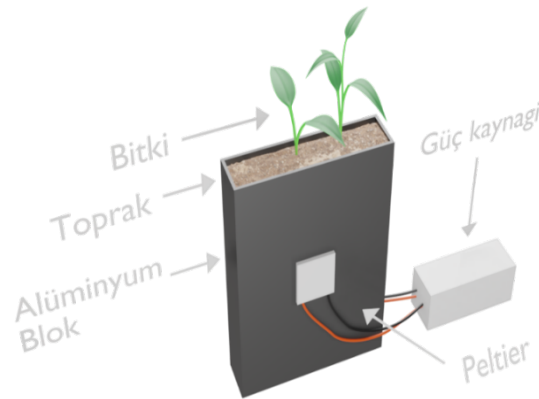
TEC1-12706



Şekil 3. TEC1-12706 markalı TEM'in çalışma aralığı [12] (Operating range of TEM branded TEC1-12706) (Daha Ayrıntılı resim ölçeklendirildi.)

2.3. Peltier kullanılarak doğrudan ısı katı temaslı alüminyum bloğun modellenmesi (Modelling of aluminium block with direct heat solid contact using Peltier)

Tasarımda kullanılan sistem ergonomik ve geleneksel ısıtma sistemlerine göre ebatça küçüktür. İki ayrı şekilde ısıtma yapılacak olan sistemde ilk ısıtma bitkinin toprak sıcaklığını arttırmaya yöneliktir. Burada asıl amaç bitkinin toprak sıcaklığını arttırırken aynı zamanda bitkinin toprak içinde kalan köklerini ısıtarak bitkinin anlık gelen don olayından koruyarak bitki çimlenme sürecinin devamlılığını sağlamaktır. Don olayında bitkinin toprak sıcaklığı çok ciddi bir düşüş yaşarken toprağın içinde bulunan köklerdeki sıvı donmasıyla bitkinin kök yapısını patlatarak bitkinin hayati faaliyetine son vermektedir. Tasarlanan ilk sistemde 8cmx4cmx8cm uzunluğa sahip ve bir 4mm bir et kalınlığına sahip alüminyum blok ve alüminyum bloğun karşılıklı iki yüzeyine gerekli miktarda termal macun ile yapıştırılan 4cmx4cmx3.8cm uzunluk ölçülerine sahip klasik termoelektrik modüller kullanılarak 8cmx4cmx8cm uzunluktaki küpün içerisine toprak koyularak ısıtılması hedeflenmiştir. Temel düşünce elektrik enerjisi verilen termoelektrik modülün joule yasaları gereği ısınması ve bu ısıyı yüksek iletim katsayısına sahip alüminyuma iletmesi ve alüminyum da gerek ve yeter seviyede toprağı ısıtması amaçlanmıştır. Topraktaki su miktarı da don olayında ve ısıtılma sürecinde elzem şekilde önemli bir parametredir. Toprağın içindeki su miktarı toprağın termofiziksel özelliklerin değiştirdiği için analizler de bu önemli parametreyi kullanarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te alüminyum blok ile Termoelektrik Modülün tasarımı, Ansys Fluent paket programı ile tasarlanmıştır. Yapılan her iki ısıtma eyleminde çimlenme için gerekli bitki sıcaklığını anlık don olayından koruyarak bitki kök sıcaklığını ve yaprak sıcaklığını optimum seviyede tutarak bitkinin gelişmesinde rol oynayacağı belirlenmiştir. Seralarda kullanılan geleneksel sera ısıtma sistemi yerine daha ergonomik olan bu sistem tüm sera alanını ısıtmak yerine sadece bitkinin gerekli bölgelerini ısıtarak bitkinin çimlenme dönemi için daha ekonomik ve daha çevreci bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir. Tasarımdaki modelde, peltier kablolarının artı (+) ve eksi (-) uçları güç kaynağına bağlanarak peltiere elektrik akımı verilmektedir. Verilen elektrik akımı peltieri Termoelektrik etkilere göre bir yüzeyini ısıtıp diğer yüzeyini soğutma eylemine girmektedir. Sıcak yüzey alüminyum bloğun 4cm x 4cm yani 16cm² bir yüzey alanına verdiği yüzey ısısı ile bir sıcaklık farkı oluşturmakta ve alüminyum bloğun ısınması ile de ısı iletim yasaları gereği toprağı ısıtması amaçlanmaktadır.

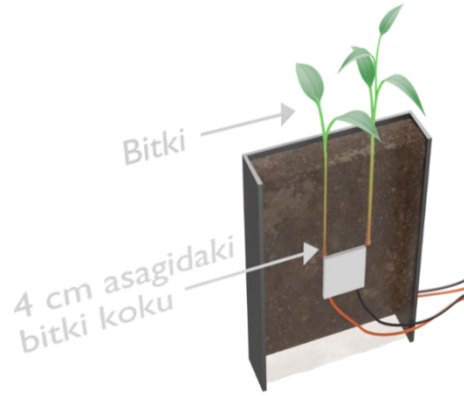


Şekil 4. Doğrudan ısı temaslı katı ısıtmalı peltier küpün modellenmesi (Modeling of a solid heated peltier cube with direct heat contact)

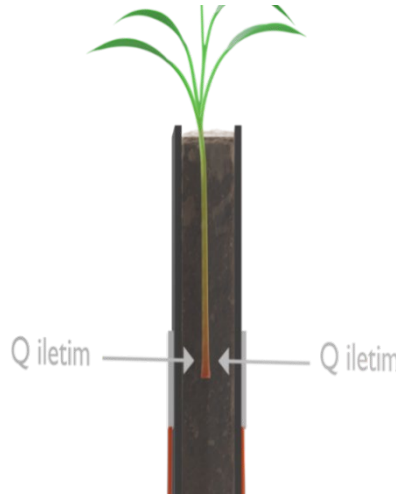
Bitkinin kök ve tohumu klasik seracılıkta çimlenme potlarında potun tam orta noktasına konularak, tohumun altına ve üzerine eşit miktarda ve yükseklikte toprağın koyulması ile ayarlanmaktadır. Bu çimlenme için önemli bir yapıdır. Bitki böylelikle aşağıya doğru gelişecek hem de yukarıya doğru su taşıma kapasitesini arttıracaktır. Bitkinin kök ve tohum konumu alüminyum bloğun tam orta noktasıdır. 8 cm yüksekliğe sahip olan alüminyum blok modelde toprak yüzeyinden 4 cm aşağıda bulunan bitki kökü peltierden gelecek sıcaklık ekseninde yerleştirilmiştir. Analizler bu kritik konumda gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5'te bitkinin tohum ve kök konumu modellenmiştir.

Isınan peltier, alüminyumun 16 cm²'lik alana, yüzey ısı akısını oluşturur. Termal macun ile alüminyum bloğa yapıştırılan peltier maksimum sıcaklık farkını belli bir süre sonra açığa çıkarmaktadır. Tabii ki bu durum peltiere verilen akımla doğru orantıdadır.

Peltiere verilecek akım ne kadar yüksek olursa peltierin dışarıya verdiği ısı güçte bir o kadar fazla olacaktır. Dolayısıyla potansiyel sıcaklık farkı fazla olacak ve bu durumda bir yüzey çok ısınırken diğer yüzey daha fazla soğuyacaktır.



Şekil 5. Doğrudan ısı temaslı katı ısıtmalı peltier küpün tohum ve kök konumunun modellenmesi (.
Modeling the seed and root position of a solid heated Peltier cube with direct heat contact)

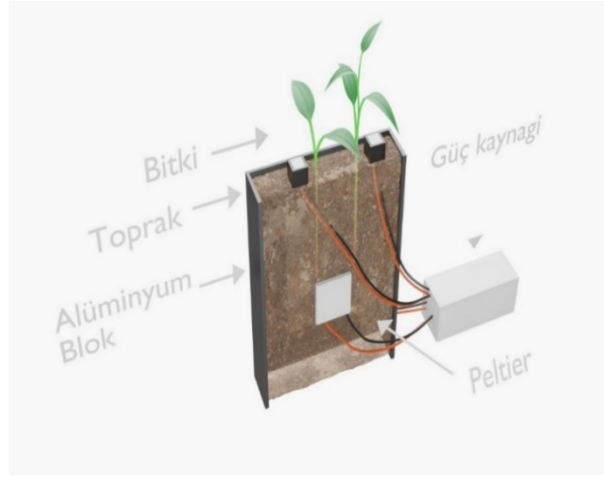


Şekil 6. Peltierin bitki kök ve tohumuna verdiği ısının gösterilmesi (Demonstration of the heat given
by Peltier to plant roots and seeds)

Fakat yapılan çalışmada akım ayarı ile bir düzenek kurmaya gerek yoktur. Sera içerisinde, don olayında dış hava ve toprak sıcaklığı -1°C ve -2°C arasında olduğu gözlemlendiği durumlarda peltiere verilecek en yüksek akımla çalışması gerekmektedir. Bunun sebebi bitkinin optimal kök sıcaklığının derece aralıkları 3 ile 4°C arasında değişmesinden kaynaklanmaktadır. Bu minimal değişim aralığı sisteme verilen akım miktarı değişiminde önemli bir sıcaklık farkı geçişi yaratmayacaktır. Yukarıdaki Şekil 6'da peltierin bitki kök ve tohumuna iletim yoluyla gerçekleştirdiği ısı transferi gösterilmiştir.

2.4. Kübik peltier modülün doğal taşınım ile bitki yapraklarının ısıtılmasının modellenmesi (Modelling of natural convection heating of plant leaves by cubic peltier module)

Kübik peltier modül toprak üstüne konularak bitkinin yapraklarının don olayından korumasının mümkün olacağı amaçlanmaktadır. 4 cm x 4 cm x 4 cm kübik bir yapının toprak yüzeyine kontak olan bölgesi haricinde tüm yüzeylerine peltier modül termal macun yapıştirılarak peltier tasarımı hazır hale getirilmektedir. Güç kaynağından gelen elektrik akımı peltieri ısıtarak çevre hava hacmini doğal taşınım ilkeleri ile havayı ısıtarak bitki yaprak sıcaklığını arttırmak hedeflenmektedir. Aşağıdaki Şekil 7'de amaçlanan sistemin tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 7. Kübik Peltier modülün toprağa yerleştirilmesi (Placing the cubic Peltier module in the soil)

Deney düzeneğinin oluşturulması;

Peltier modülün tasarımı, Atatürk Toprak ve Su Kaynakları Araştırma Enstitüsü İstanbul Yolu 2. km, Kırklareli Merkez, Kırklareli adresinde 2. Toprak araştırma ve Geliştirme Laboratuvarında hazırlanmıştır. Laboratuvar 4°C sıcaklıkta sabit bir çalışma ortamı sağlamaktadır. Yaş toprağın nem miktarını ölçmek için Gravimetrik fırın yönteminden yararlanılmıştır. Bu yöntemde alınan yaş toprağın ağırlığı bilinmekte ve daha sonrasında 105 santigrat derece sıcaklıkta 1 gün kalarak fırında bekletilmektedir.

Tamamen sıvıdan arındırılan toprağın yaş ağırlığından kuru ağırlığını çıkarttıktan sonra kuru ağırlığına oranlayarak kuru toprak nem yüzdesi elde edilmektedir. Deneylerde kullanılan toprağın yapılan laboratuvar deneylerinde elde edilen nem miktarı %11 olarak tespit edilmiştir. Bu değer kışın toprak nem miktarının optimal değeridir. Deneylerde kullanılan toprak, 2 mm elekten geçen bir topraktır. PH seviyesi 8.120, su ile doyum oranı %44, organik madde miktarı 1.350, EC (ds/m) 0.152, kireç miktarı %11 olan ve nem miktarı %11 olan hacimsel nem ağırlık miktarı %16 olan %47.18' i kum, %30.52 'si silt, %22.30'u kil olan kumlu killi tın bünyesinde bir toprak tipidir. Tablo 2 'de toprağın karakteristik özellikler gösterilmektedir.

Tablo 2. Toprağın karakteristik özelliği (Characteristic feature of soil)

	Nem	pH	EC (ds/m)	Organik madde (%)	Organik karbon (%)	Su ile doyumluk (%)	Kireç (%)
Toprak	11.146	8.120	0.152	1.350	0.784	44	11.02

PH seviyesi topraktaki asit seviyesidir. Toprağın pH seviyesi 1-14'lük bir ölçekle ölçülmektedir. 7 nötr işaretidir. 7'nin altındaki herhangi bir şey asitli veya ekşi toprak olarak düşünülür ve 7'nin üstünde herhangi bir şey, alkali veya tatlı, toprak olarak kabul edilir. EC miktarı ise elektriksel kondüktivite olarak adlandırılmaktadır. Başka bir deyişle toprağın elektrik iletme kapasitesidir. Toprağın EC derecesi tuzluluk oranını ile paraleldir. EC ölçüm işlemleri yaş toprağın elektrik iletme niteliğine göre yapılmaktadır. Organik madde ve organik karbon miktarı toprak mikroorganizmaları için temel enerji kaynağıdır. Silt, kumdan küçük kilden büyük taneli malzemeye verilen isimdir. Genelde 0.002 milimetre ile 0.1 milimetre arasındaki alüminyum silikatlardan oluşur. Tınlı topraklar tarımsal açıdan orta düzeyde verimli ancak fiziksel özellikler bakımından bitki yetiştiriciliğine en uygun topraklardır. Su ve hava geçirgenlikleri oldukça düşüktür. Deneylerde kullanılan malzemeler sırasıyla TEC1-12706 markalı Peltier, Doğru akım güç adaptörü, 8cm x 4cm x 8 cm uzunluğundaki alüminyum blok, FLUKE 568 IR Dijital Termometre, HUTIXI termal macun, TP 101 Dijital termometreden oluşmaktadır. Bunlar Şekil 8-13'te gösterilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ortam sıcaklığından etkilenmeyen ve deney esnasında bir bozulmaya maruz kalmayan malzemelerden oluşmaktadır. Güç adaptörüne peltierden gelen elektrik kabloları civata vasıtasıyla sıkıştırılmıştır. Doğru akımla gelen elektrik enerjisi sisteme güç adaptöründen geçerek peltiere gelmektedir. Peltierin her iki yüzeyine yerleştirilen termal macun, peltieri alüminyum bloğa yapıştırırken aynı zamandan ısınan peltier yüzeyindeki ısıyı aktarmıştır.

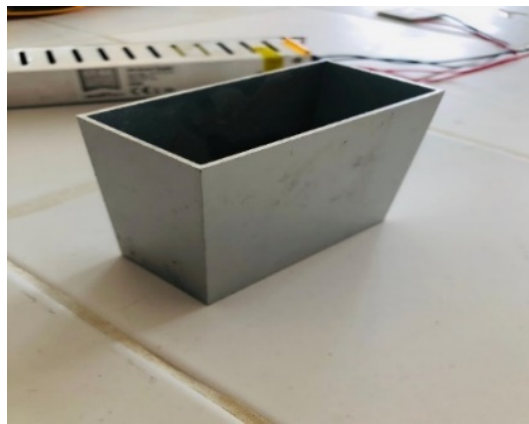


Şekil 8. Deneylerde kullanılan TEC modül (TEC module used in experiments)



Şekil 9. Deneylerde kullanılan güç adaptörü (Power adapter used in experiments)

Deneylerde kullanılan TEC modülü 12 Volt 6 amper ile çalışmaktadır. Toplamda 72 Watt güç harcayan peltier kolay bir şekilde akım ayarı yapılmaktadır. Akım şiddetleri değişkenlik gösterdiği sürece peltierin harcayacağı güçte değişmektedir. Bu da verilen ısı yük miktarının değişken olabileceği anlamına gelirken farklı toprak ve bitki kökleri için farklı sıcaklık ayarlarında mümkün olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 10. Deneylerde kullanılan alüminyum blok (Aluminum block used in experiments)



Şekil 11. Deneylerde kullanılan termometreler (Thermometers used in experiments)

Alüminyum blok ve toprak, deneyler başlamadan hemen önce 12 saat boyunca soğuk buz odasında bekletilmiştir ve -1.6°C toprak sıcaklığı ve yaklaşık olarak -1°C alüminyum blok sıcaklığı ile deneye başlanmış olup deney düzeneği kurulduğu gibi sisteme güç verilmiştir.



Şekil 12. Toprağın başlangıç sıcaklığı (Initial temperature of the soil)



Şekil 13. Deneylerde kullanılan termal macun (Thermal paste used in experiments)

Deneyimiz, peltier cihazı kullanarak toprağın iç sıcaklık dağılımını incelemeye yönelik olarak tasarlanmıştır. Peltier cihazı, alüminyum bloğun tam ortasına termal macun yardımıyla sabitlenmiş ve sabit bir akım ile beslenmiştir. Bu düzenleme, peltier cihazının alüminyum blok üzerinde belirli bir noktayı sabit bir şekilde ısıtmasını ve bu noktadan toprağa doğru sürekli ve sabit bir ısı transferi sağlamasını amaçlamıştır. Deney sırasında, toprak odası olarak adlandırılan ortamın iç sıcaklığı sabit tutulmuş ve bu durum, deney koşullarının sabitliğini sağlamıştır.

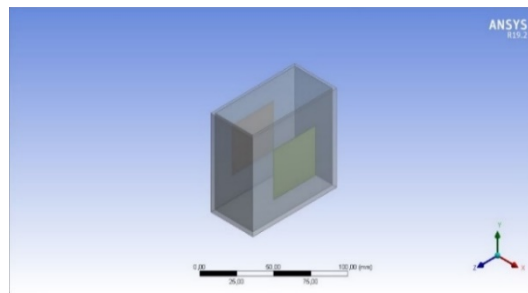
Deneyde kullanılan dijital termometre, toprağın kök seviyesine kadar uzanan mesafeye yerleştirilerek her 120 saniyede bir sıcaklık ölçümü alınmıştır. Isınan toprağın sıcaklığının sabitlenmesi, 720 saniyenin

sonunda toprak kök ve üstü sıcaklıklarının eşitlendiği anlamına gelmiştir. Bu durum, toprak içinde homojen bir sıcaklık dağılımının sağlandığını göstermektedir.

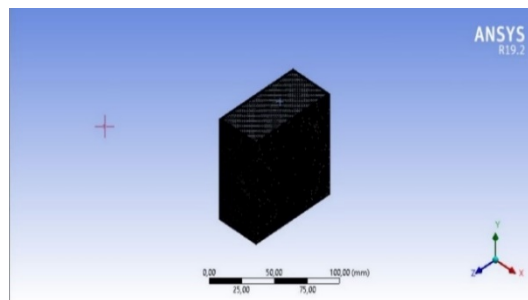
Deney sırasında, herhangi bir akım veya voltaj değişimi yapılmadan peltier cihazı sabit akım ile çalıştırılmıştır. Bu düzenleme, deneyin tekrarlanabilirliğini ve sonuçların tutarlılığını sağlamıştır.

3. Sayısal Analiz (Numerical Analysis)

Tasarım Peltier Ansys Fluent Programına tanımlanırken kullanılacak geometri deneylerde kullanılan alüminyum blok ile bire bir aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Face Split fonksiyonu ile yüzeyde 2 ayrı farklı yüzey oluşturulmuştur. Peltier yüzeyi peltierin yüzey alanı ile aynı büyüklüktedir. Toprak ise Boolean Fonksiyonu kullanılarak katı model şeklinde Ansys Fluent'e tanımlanarak iki farklı katı domaini oluşturularak geometri hazırlanmıştır. Çalışmada beş farklı ağ göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 14'te tasarlanan modelin üç boyutu gösterilmiştir.



Şekil 14. Tasarlanan modelin üç boyutlu gösterilmesi (Three-dimensional representation of the designed model)



Şekil 15. Tasarım modelin ağ yapısının gösterilmesi (Demonstration of the network structure of the design model)

Çarpıklık (Skewness) değeri 2.7088×10^{-2} , Element Quality değeri 0.93981 ve Orthogonal Quality değeri 0.99714 olarak tanımlanarak Şekil 15'te gösterilmiştir. Tablo 3'te verilen sonuçlar M3 ağ yapısının ve sayısından bağımsızlığının elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Tablo 3. Toprağın tam orta noktasına ait sıcaklığın ağdan bağımsızlık çalışması (Network independence study of the temperature at the exact midpoint of the soil)

Ağ yapısı	Çıkış Sıcaklıkları (K)
M1-584917	297.46 K
M2-588454	297.48 K
M3-592784	297.50 K
M4-597091	297.50 K
M5-602781	297.50 K

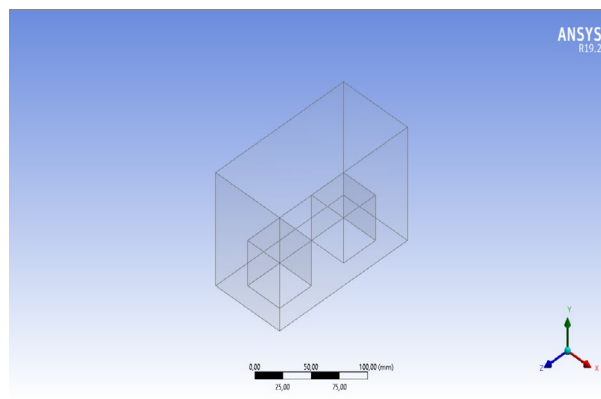
Isıtıcı peltier aşağıdaki görselde gösterilen yüzey sıcaklığı 40°C olan peltier yüzey sıcaklığı değerleri, Boundary Conditions kısmında Wall olarak tanımlanırken toprak maddesi yüzeyi de don olayındaki sıcaklığa paralel olarak deneylerde elde edilen toprak sıcaklığı değeri olan -1°C olarak tüm toprak domaininde tanımlanmıştır. 3 Boyutlu yapılan çalışmada Alüminyum toprak kontak yüzeyi "coupled"

olarak tanımlanmıştır. Yapılan Ansys Fluent çalışmasındaki kontak yüzeyleri, birbirine bağlanan nodüllerin birebir eşleşmesiyle ortaya çıkmıştır. Tam yüzey eşleşmesine sahip geometrideki iletimin yapıldığı yüzeyler çözücüde ikinci dereceden enerji denklemleri ile çözülmüştür. Momentum ve enerji denklemleri ikinci mertebeden Upwind yaklaşımı, basınç hız denklemi ise SIMPLE algoritması ile çözülmüş olup laminer akış modeli kullanılmıştır. Her bir veri için zaman adımı 0,1 saniye zaman adımı sayısı da 1200 olarak seçilerek her bir zaman adımı 20 iterasyon yapılarak çözülmüş ve analizin 120 saniyelik sonuçları ekran görüntüsü olarak alınmıştır. 720 saniye sonunda analiz yakınsamış olup kararlı duruma gelmiştir. Sonuçlarda artık bu zaman diliminden sonra bir değişkenlik gözlemlenmemiştir. Deneylerden elde edilen toprak nem miktarı %11 olarak tespit edilmiştir. Topraktaki nem miktarına göre toprağın termofiziksel özellikleri değişmektedir. Aşağıda Ansys Fluent Programına Tanımlanmak üzere toprağın ve alüminyum Bloğun termofiziksel özellikleri verilmiştir. Toprağın termofiziksel özellikleri olarak (%30>Su) kısmındaki termofiziksel özellikler seçilmiştir. Aşağıdaki Tablo 4'te toprak ve alüminyumun özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. Alüminyum toprağın termofiziksel özellikleri [13] (Thermophysical properties of aluminum soil).

Alüminyum	Termal İletkenlik	Özgül Isı	Yoğunluk
	202 (W/m K)	871 (j/kg K)	2719 (kg/m ³)
Toprak (%30 >Su)	1.89(W/m K)	1800 (j/kg K)	2125 (kg/m ³)
Toprak (%40 >Su>%30)	2.44(W/m K)	2120 (j/kg K)	1975 (kg/m ³)
Toprak (Su>40)	3.02(W/m K)	2430 (j/kg K)	1825(kg/m ³)

Tasarım kübik peltier modül Ansys Fluent Programına tanımlanırken kullanılacak geometri deneylerde kullanılan peltierin uzunluk ölçülerinin bir küpün tüm yüzeyini saracak şekilde tasarlanmıştır. 2 adet peltier küpü Boolean fonksiyonu ile hava yüzeyinde 2 aynı hava hacimden çıkartılarak geometri oluşturmuştur. Boşalan bölgelere peltier sıcaklık şartı tanımlanarak havayı ısıtmak amaçlanmaktadır. Isıtılması amaçlanan hava kendi içerisinde herhangi bir zorlanmış dış kuvvetin etkisinde değildir. Sadece ısınan termoelektrik modülden çıkan sıcak hava akımları ile hava ısıtılması ön görülmüş olup zorlanmış taşınım ile sağlanacak olan enerji ihtiyacında doğal taşınım etkileri gereğince ortadan kaldırılmıştır. Böylece daha ekonomik ve daha çevreci bir yaklaşım izlenmiştir.



Şekil 16. Kübik peltierin üç boyutlu görünümü (Three-dimensional view of the cubic peltier)

Model geometri olarak düzgün ve eşit mesafededir. Tasarım kübik peltier modeli Şekil 16'da görüldüğü üzere en alt yüzeyi toprak yüzeyidir. 8 cm x 4 cm x 10 cm hava hacmine sahip modeli 4cmx4 cm x 4cm uzunluk ölçülerine sahip küpün üstüne konulan toplam 5 adet peltier yüzeyi ısıtmaktadır. Ansys Fluente girdi olarak sıcak yüzeyler tanımlanmış olup hava hacminden katı hacmi çıkartılmıştır. Çalışmada modelin akış alanına uygun ağ yapısı için beş farklı ağ göz önünde bulundurulmuştur. Ağ çalışmasındaki yüzey ağlarına geçilmiş ve eleman boyutu sayısı seçilerek ısınan bölgedeki yüzeylere katman yüzey ağları atılarak sisteme dahil edilmiştir. Çarpıklık (Skewness) değeri 1.8945×10^{-4} , Element Quality değeri 0.9898 ve Orthogonal Quality değeri 0.998 olarak tanımlanırken Şekil 16'da gösterilmiştir. Isıtıcı peltierin 57W Q_{max} 1s1 sınır şartı tek bir peltier için bu ısıl gücün altında olan her durumda hava hacminin sıcaklık orta konum değerlerine karşılık gelen çıkış sıcaklıkları yukarıdaki ağdan bağımsızlık

çalışmasına benzer şekilde birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Tablo 5’te verilen sonuçlar M4 ağı için, ağ yapısının ve sayısından bağımsızlığının elde edildiği sonucuna varılmıştır [14].

Tablo 5. Toprağın tam orta noktasına ait sıcaklığın ağdan bağımsızlık çalışması (Network independence study of the temperature at the exact midpoint of the soil)

Ağ yapısı	Çıkış Sıcaklıkları (K)
M1- 481775	298.27 K
M2-483795	298.29 K
M3-486201	298.31 K
M4-488741	298.33 K
M5-490364	297.33 K

Isıtıcı kübik peltier aşağıdaki görselde gösterilen yüzey sıcaklığı 40°C olan peltier yüzey sıcaklığı değerleri, Boundary Conditions kısmında Wall olarak tanımlanırken hava hacmi yüzeyi de don olayındaki sıcaklığa paralel olarak hava dış ortam sıcaklığı -10°C olacak şekilde tüm hava hacmi boyunca tanımlanarak sisteme dahil edilirken hava yoğunluğu Boussinesq yaklaşımı kullanılarak sisteme tanımlanmıştır. 3 Boyutlu yapılan çalışmada hava hacmi kübik peltier kontak yüzeyi ‘‘coupled’’ olarak tanımlanmakta ve modelin en altındaki yüzey toprak yüzeyi olarak -1°C Wall olarak tanımlanmıştır. Model sınır başlangıç koşulu olarak Ansys Fluent’e tanımlı ‘‘standart initialization’’ kısmı kullanılarak denklem sistemlerinin sıcaklık değişkenlerini ve basınç-ısı alanı için daha bölgesel bir yakınsama yapmasından dolayı analizlerde tercih edilmiştir. Üç boyutlu geometri Design Modeler ara yüzünde, sayısal analizler ise Fluent ara yüzünde yapılmıştır. Momentum ve enerji denklemleri ikinci mertebeden Upwind yaklaşımı, basınç hız denklemleri ise SIMPLE algoritması ile çözülmüş olup k-epsilon RNG standart duvar akış modeli kullanılmıştır. Tüm değişkenler için yakınsama aralığı 10⁻⁶ sayısına ulaştığında çözümlerin yakınsadığı kabul edilmiş ve zamana bağlı bir analizi yürütülmüştür. Her bir data için zaman adımı 0.1 saniye zaman adımı sayısı da 2400 olarak seçilerek her bir zaman adımı 20 iterasyon yapılarak çözülmüş ve analizin 240 saniyelik sonuçları ekran görüntüsü olarak alınmıştır. 1200 saniye sonunda analiz yakınsamış olup kararlı duruma gelmiştir. Sonuçlarda artık bu zaman diliminden sonra bir değişkenlik gözlemlenmemiştir.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Result and Discussions)

Deneylerde kullanılan TP 101 Dijital termometre deney düzeneğinin ve toprağın tam orta noktasına yerleştirilmiştir. 240 saniyelik süreler ile gözlemler yapılmış en son toprak üstü sıcaklık FLUKE 568 IR Dijital Termometre ile ölçülmüş olup sistemde 720 saniyenin sonunda bir sıcaklık artışı gözlemlenmemiştir.

$x = 0.02$ m, $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m konumundaki deney sıcaklık görselleri;



Şekil 17. $x = 0.02$ m, $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m, $t = 240$ saniyedeki deney sıcaklığı (Experimental temperature at $x = 0.02$ m, $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m, $t = 240$ seconds)



Şekil 18. $x = 0.02$ m $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m, $t = 480$ saniyedeki deney sıcaklığı (Experimental temperature at $x = 0.02$ m $y = 0.4$ m, $z = 0.04$ m, $t = 480$ seconds)

Yukarıda Şekil 17’de görüldüğü gibi üzere 240 saniye sonundaki sıcaklık -1.6°C çok hızlı bir şekilde 11.7°C çıkmıştır. İlk ısınma esnasındaki sisteme verilen ısı enerjisi soğuk toprak ve alüminyum hızla bir şekilde ısıtmıştır.

Şekil 18 ‘de görüldüğü gibi 480 saniye sonunda toprak ısınmaya devam etmiştir fakat bu sıcaklık artışı ilk 240 saniyelik ısınma işlemine göre daha azdır. Bunun sebebi toprağın artık yavaşta olsa denge sıcaklığına gelmesidir. 480 saniyenin bitiminde toprak sıcaklığı önceki sıcaklık değerinden 3.5°C bir sıcaklık artışı gözlemlenmiştir.

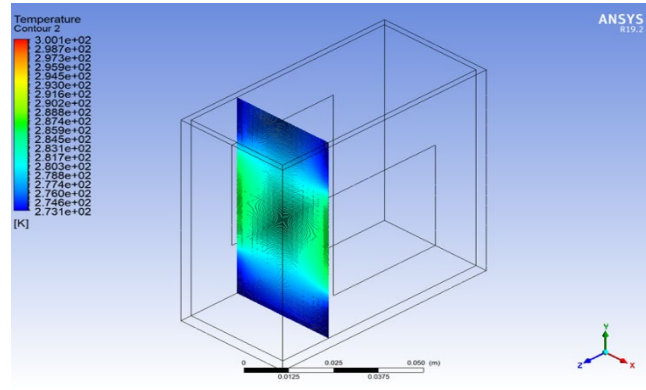


Şekil 19. $x = 0.02$ m, $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m, $t = 720$ saniyedeki deney sıcaklığı (Experimental temperature at $x = 0.02$ m, $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m, $t = 720$ seconds)

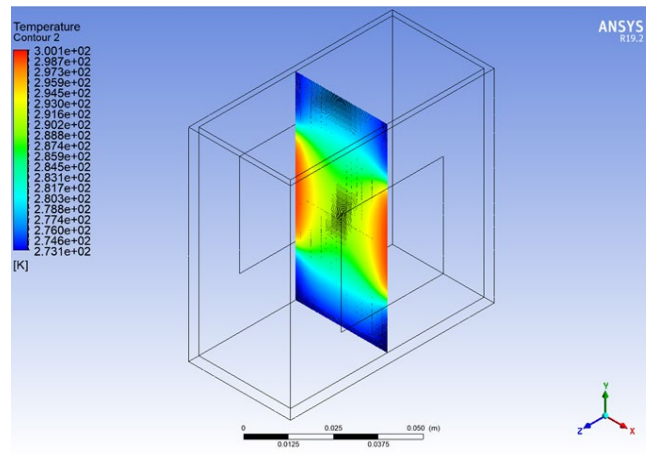


Şekil 20. $x = 0.02$ m $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m, $t = 720$ saniyedeki toprak deney sıcaklığı (. Soil experimental temperature at $x = 0.02$ m, $y = 0.04$ m, $z = 0.04$ m, $t = 720$ seconds)

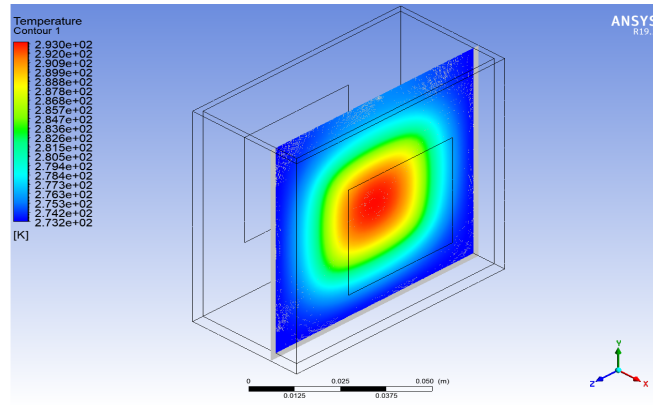
720 saniye sonunda toprak kök sıcaklığı 16.3°C gelmiştir. Bu sıcaklık değerinden sonra artık sisteme verilen ısı toprağı ısıtmamış toprak denge sıcaklığına ulaşmıştır. Şekil 19’da toprağın kök sıcaklığı gösterilmiştir. FLUKE 568 IR Dijital marka termometre ile tam nokta sıcaklığın ölçümleri Şekil 20’ de gösterilmiştir. Ayrıca, Analizlerin 240 saniyelik zaman adımlarında ekran görüntüleri alınmış olup toprağın konumuna göre sıcaklık konturları da elde edilmiştir. Aşağıda Termoelektrik modülle yapılan toprak ısıtma işlem prosesinin toprak sıcaklık konturları konuma ve zamana göre ekran görüntüleri gösterilmektedir (Şekil 21-26).



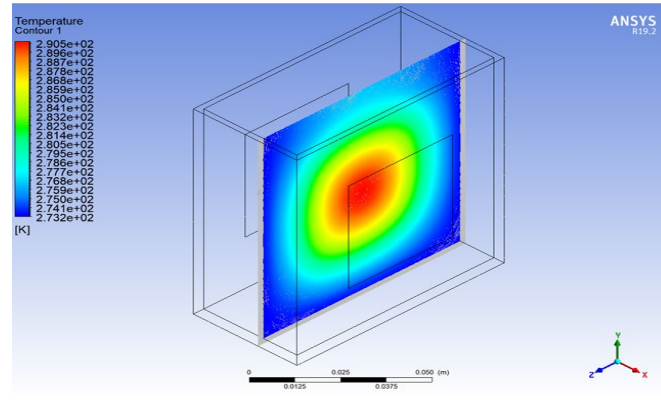
Şekil 21. XY kesitinden $z=0.02$ m konumunda $t=720$ saniyedeki sıcaklık dağılım görüntüleri
(Temperature distribution views from the XY section at $z=0.02$ m at $t=720$ seconds)



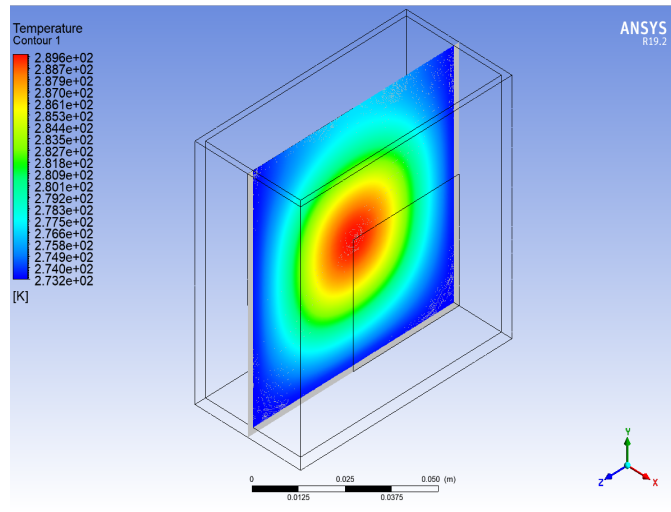
Şekil 22. XY kesitinden $z=0.04$ m konumunda $t=720$ saniyedeki sıcaklık dağılım görüntüleri
(Temperature distribution views from the XY section at $z=0.04$ m at $t=720$ seconds)



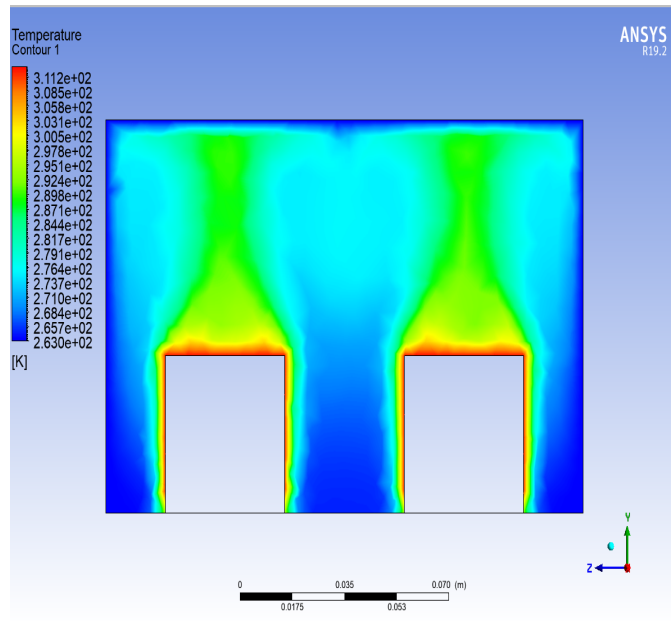
Şekil 23. YZ kesitinden $x=0.01$ m konumunda $t=720$ saniyedeki sıcaklık dağılım görüntüleri
(Temperature distribution views from the XY section at $z=0.01$ m at $t=720$ seconds)



Şekil 24. YZ kesitinden $x = 0.015$ m konumunda $t = 720$ saniyedeki sıcaklık dağılım görüntüleri
(Temperature distribution views from the XY section at $z = 0.015$ m at $t = 720$ seconds)



Şekil 25. YZ kesitinden $x = 0.02$ m konumunda $t = 720$ saniyedeki sıcaklık dağılım görüntüleri
(Temperature distribution views from the XY section at $z = 0.02$ m at $t = 720$ seconds)



Şekil 26. YZ kesitinden kübik peltiere ait $x = 0.02$ m konumunda $t = 720$ saniyedeki sıcaklık dağılım görüntüleri
(Temperature distribution views of the cubic peltier from the YZ section at $x = 0.02$ m at $t = 720$ seconds)

Aşağıdaki Tablo 6’da deneylerde ve analizlerde elde edilen toprağın kritik konumundaki verilerin zamana bağlı sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerlerine bağlı sonuçların yüzdece hata oranları verilmiştir.

Tablo 6. Deneylerde ve analizlerde elde edilen toprağın kritik konumundaki verilerin zamana bağlı sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerlerine bağlı sonuçların yüzdece hata oranları (Time-dependent temperature values of the data in the critical position of the soil obtained in the experiments and analyzes and the percentage error rates of the results based on these temperature values)

Deneylerde, analizlerde Geçen süre	t=240 saniye	t=480 saniye	t=720 saniye
Deneylerde elde edilen sıcaklık değeri	11.7°C	15.2°C	16.3°C
Analizlerde elde edilen sıcaklık değeri	12.95°C	15.95°C	16.45°C
Sonuçlar arasındaki yüzdece hata oranı	%9.65	%4.70	%0.91

5. Sera maliyet analizi ve diğer ısıtma sistemleri ile karşılaştırılması (Greenhouse cost analysis and comparison with other heating systems)

Isıtma maliyetini sera ısı yükü ve ısı enerjisi fiyatı belirlemektedir. Genel kabul ve araştırmalar neticesinde ısıtma maliyetinin toplam maliyetler içerisinde %83’le en büyük paya sahip olduğu yapılan çalışmalarla görülmüştür. Sera ısı yükünü bölgenin iklim değerleri ve sera içi sıcaklığı belirlemektedir. Sera ısıtma sistemlerinde genellikle yapılan ısıtma sistemleri toprak ısınmasını ele almamaktadır. Temel düşünce serayı ısıtmak ve bitki yapraklarını koruyarak sadece sera içi sıcaklığı sabit tutmaktır. Modern seralarda genellikle bir kalorifer kazanı ve buna bağlı polietilen ya da demir boru ağlarıyla oluşturulan merkezi ısıtma sistemi kullanılmaktadır.

Kazanda yakılan enerji kaynaklarının çıkardığı ısı enerjisi ile sera ısıtılması amaçlanmaktadır. Sera ısıtma işlemi yapılırken yenilenemez enerji kaynaklarının kullanılmasıyla ısıtma işlemi yapılmaktadır. Seralarda kullanılan yenilemez enerji kaynakları sırasıyla; odun, yerli linyit kömür, fuel oil, doğal gaz enerjisidir.

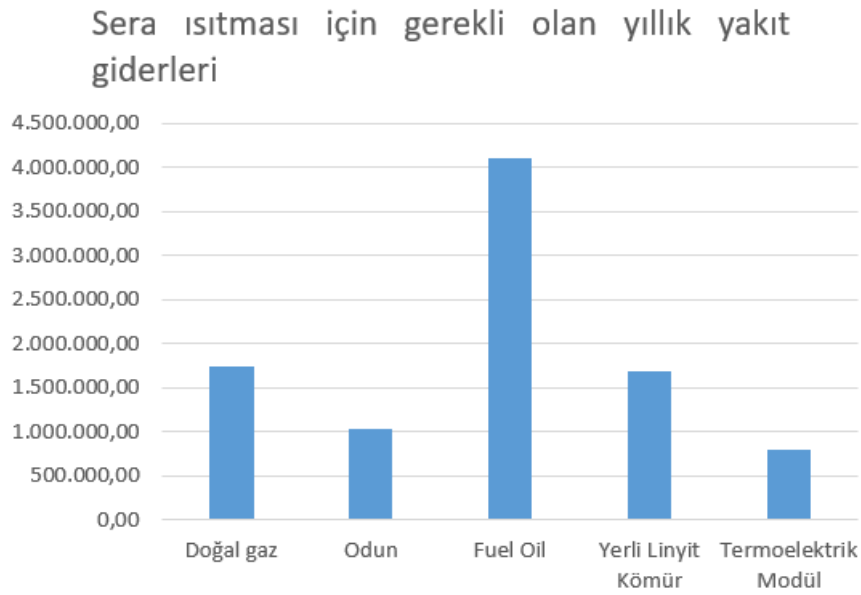
Yıllık yakıt miktarının bulunmasında seraların ısı gereksinimi değerlerine göre 10°C sera sıcaklığı için Aralık, Ocak, Şubat, Mart aylarında ısıtmanın yapılacağı, 20°C sera sıcaklığı için ise Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart, Nisan ve Mayıs aylarında ısıtmanın yapılacağı varsayılmıştır. Bu aylarda sera ısıtma sisteminin ortalama günde 14 saat çalıştırılacağı, yıllık çalışma süresinin ise 10°C sera sıcaklığı için 120 gün ve 20°C sera sıcaklığı için 210 gün olacağı kabul edilmiştir. Sera ısıtmasında katı, sıvı ve gaz halde değişik yakıtlar kullanılmaktadır. 840 m2 cam sera için sıcak hava ile ısıtma sisteminin kullanıldığı kabul edilmiş olup, 840 m2 sera alanında 2 metre aralıklarla ekilen fidelerden toplam 420 adet olduğu kabul edilmiştir. Belirlenen sera taban alanına göre her bir sera örtü malzemesi ve sera içi sıcaklığı için yıllık yakıt miktarları tespit edilmiştir [14].

Odun ve yerli linyit kömür fiyatları Türkiye Kömür İşletmelerinden güncel Haziran 2022 yılına ait fiyatlar olarak alınmıştır. Doğal gaz ve Fuel oil fiyatları ise Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından Haziran 2022 yılına ait verilerden alınmıştır. Yenilemez enerji kaynaklarının sera ısıtmasında kullanılmasındaki süreçte kazan, pompa, ısı iletici borular, vana, valf, sirkülasyon pompası, santrifüj pompası ve finli borular gibi birçok dış yapı parametreleri de sera ısıtma maliyetinin bir kısmını oluşturmaktadır.

Tasarım TEM sadece elektrik enerjisi ile çalışmaktadır. Deneylerde ve analizlerde kullanılan peltier 12 volt 6 amper ile çalışmaktadır. Bu da 72 Watt değerinde bir elektrik enerjisi harcadığı anlamına gelmektedir. Tasarlanan modeldeki peltier sayısı 2 adettir. Toplamda 420 adet fide olduğundan 840 adet peltiere ihtiyaç vardır. Peltier bütün bir yıl çalıştığı varsayılırsa, 72 Watt gücündeki peltier 14 saat çalışırsa 1008 Wh saat çalışmış olur. Buda 1,008 kWh yapmaktadır. Haziran 2022 döneminde işletmeler için vergiler dahil elektrik enerjisi birim fiyatı kiloWattsaat başına 2,64 TL/kWh'dir.

1,008 kWh x 2,64 TL/ kWh = 2,66112 TL yapacaktır. Bu değer peltierin 14 saat boyunca çalışırken harcayacağı enerji miktarıdır. 360 gün boyunca çalışan peltierin elektrik maliyeti ise; 2,66112 TL (günde) x 360 gün = 958,0032 TL olacaktır. Bu bir peltierin tüketeceği elektrik enerjisi miktarıdır.

Tasarlanan sistemde toplam peltier sayısı 840 adet olduğuna göre, 958,0032 TL (1 adet) x 840 (adet) = 804.722,688 TL. 840 adet peltierin günde 14 saat çalışarak 360 gün boyunca çalışması sonunda ortaya çıkan elektrik enerjisinin maliyetidir.



Şekil 27. Sera ısıtması için gerekli olan yıllık yakıt giderleri

Termoelektrik modül ile yapılan ısıtma işlemi tüm serayı ısıtmak yerine sadece toprağı ve bitki yaprakları ile birlikte dalları ısıtmayı amaçlar dolayısıyla harcanan işletme giderleri yıllık olarak diğer ısıtma işlemlerine göre daha ucuzdur. Haziran 2022 verilerine göre yapılan maliyet analizlerinde TEM ile yapılan ısıtma işlemi diğer ısıtma işlemlerine göre daha az maliyetli olduğu gözlemlenmiş olup, Şekil 27’de sera ısıtması için harcanan yıllık yakıt giderleri gösterilmiştir.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, seralarda oluşan don olayının bitkiler üzerindeki etkisini azaltmak için Termoelektrik modül kullanarak tüm serayı ısıtmak yerine sadece bitki için önemli olan tohum, kök, çimlenme bölgesi, deneysel ve sayısal analiz olarak, hava hacminin içinde bulunan yapraklar ve dallar ise sadece sayısal analiz çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler ve sayısal çalışmalar sonucunda peltierden gelen ısı güç alüminyum bloğu ısıtması sonucunda ısınan toprağın birçok farklı konumundaki sıcaklıkların değişimleri irdelenmiştir. Analiz sonuçları ile deneysel veriler iyi bir uyum içindedir. Yapılan sayısal analizler ve deneylerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Isıl analizlerden görüldüğü üzere -1°C ’de olan toprak, tasarlanan sistemle başlangıç sıcaklığından kısa süre sonra peltierden gelen ısı güç sayesinde ısınarak optimum çimlenme sıcaklığına ulaştığı gözlemlenmiştir.
2. Termoelektrik modülden gelen ısı yük, ilk olarak alüminyum bloğu ısıtmıştır. Alüminyum blok ise aldığı ısıyı toprağa aktararak toprak ısısını gerekli miktarda arttırmış ve kritik toprak konumundaki sıcaklığı 16.2°C ’ye kadar çıkarmıştır. Buda kış koşulları için gayet ideal ve yeterli bir toprak sıcaklığı olup, üretici için olumlu bir etkiye sahip olabilmektedir. Bunun sonucu olarak ülkemizde soğuk iklim koşullarının olduğu ve üretimin az olduğu yerlerde, ısınma için harcanacak ekonomik giderlerin azalacağı ve verimin artırılmasına olanak sağlanacaktır.
3. Topraktaki nem miktarı arttıkça toprağın iletim ile ısı transfer miktarı artmaktadır. Bu durumda üretici için sistemdeki toprağın nemin artması istenen bir durumdur. Bu da üreticinin kışın sulama yaparken don olayından etkilenmemesini sağlayarak kış ayı boyunca hava şartlarından etkilenmeden sulamanın yapılması, sera endüstrisi için farklı bir yaklaşım olacağı gözlemlenmiştir.
4. Termoelektrik modüle güç veren adaptör, Arduino kartları ile yazılım olarak kontrol edilebilir.

Toprağa sıcaklık ve nem sensörleri yerleştirilerek herhangi ani bir sıcaklık düşüşünde güç adaptörü yazılımla devreye girerek termoelektrik modülün çalışmasına olanak sağlayarak ani gelen don olayında üretici ürünlerin yanında olmaması durumunda bile toprak sıcaklığı artarak sistemin veriminde bir artış olmasına olanak sağlayabilmektedir.

5. Doğal taşınım etkisi de gayet yeterli düzeydedir. Maksimum 6 amperde bitki üstü sıcaklığı -10°C 'den yaklaşık 16°C 'ye çıkmıştır. Bu da bitki yaprak don sıcaklığının çok üstünde bir değer olup, konfor sıcaklığı şartlarına ulaşmıştır. Bu durumda uygun meyve ve sebzeleri zorlu kış şartlarında yetiştirebilmenin önü açabilmektedir.
6. Sistem, akü veya güneş enerjisinden elde edilen elektrik ile, çok rahat bir şekilde çalışmaktadır. Bunun nedeni sistemin gerekli elektrik enerji ihtiyacı, diğer elektrik araçlarına göre çok azdır. Sistem 12 V ve 6 Amper maksimum güç ile çalışmaktadır. Ayrıca sistemin amper ve voltaj değerleri boost devreleriyle ayarlanabilir oluşu, sisteme verilecek olan ısı enerjisini doğrudan ve hızlı bir şekilde değiştireceğinden, üretici için farklı sıcaklık koşullarında istenilen ısı enerjisini sağlamış olacaktır.

Bu çalışma, seralarda oluşan don olayının bitkiler üzerindeki etkisini azaltmak için termoelektrik modül kullanarak hedeflenmiş bir ısıtma yaklaşımını araştırmaktadır. Literatürde benzer bir çalışma bulunmamakla birlikte, bu araştırmanın yenilikçi ve öncü bir nitelik taşımasını sağlamaktadır. Literatürde benzer çalışmalara rastlanmamış olması, bu çalışmanın özgünlüğünü ve yenilikçi yaklaşımını ortaya koymaktadır. Termoelektrik modül kullanılarak toprak ısıtma sistemi, klasik yöntemlere göre daha çevre dostu ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Çalışma, tüm serayı ısıtmak yerine yalnızca bitki için kritik olan tohum, kök ve çimlenme bölgelerini ısıtarak enerji verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Elde edilen sonuçlar, termoelektrik modülün bu bölgeleri etkin bir şekilde ısıtarak optimum çimlenme sıcaklığına ulaşabileceğini göstermektedir.

Araştırmanın avantajları arasında, termoelektrik modülün düşük enerji tüketimi ve çevre dostu bir çözüm sunması bulunmaktadır. Sistem, 12V ve 6 Amper maksimum güç ile çalışmakta olup, bu değerlerin boost devreleriyle ayarlanabilir olması sayesinde farklı sıcaklık koşullarına hızlı uyum sağlayabilmektedir. Ayrıca, sistemin akü veya güneş enerjisi ile çalışabilmesi, seralarda enerji maliyetlerini düşürmekte ve sürdürülebilir bir tarım uygulaması için önemli bir katkı sağlamaktadır. Bu durum, özellikle kış koşullarında üretimin az olduğu bölgelerde ekonomik açıdan büyük bir avantaj sunmaktadır. Çalışmanın dezavantajları arasında, termoelektrik modüllerin ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması ve sistemin uzun vadeli performansının daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyması bulunmaktadır. Ayrıca, termoelektrik modülün sıcaklık kontrolü ve toprak nem seviyesinin sürekli izlenmesi gerekmektedir. Ancak, bu dezavantajlar, sistemin enerji verimliliği ve sürdürülebilirliği göz önüne alındığında tolere edilebilir niteliktedir. Yapılan deneyler ve sayısal analizler, termoelektrik modülün etkinliğini ve toprak sıcaklığını istenen seviyelere getirme kapasitesini doğrulamaktadır.



Sonuç olarak, bu çalışma, termoelektrik modül kullanarak seralarda hedeflenmiş bir ısıtma yaklaşımının potansiyelini ve etkinliğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, bitki kök ve tohumlarının doğrudan ısıtılmasıyla enerji verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, sera endüstrisi için önemli bir katkı sunmakta ve kış koşullarında üretimin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, sistemin uzun vadeli performansını ve ekonomik etkilerini daha ayrıntılı olarak incelemeli ve bu yenilikçi çözümün tarım endüstrisindeki uygulamalarını genişletmelidir.

7. Kaynaklar (References)

- [1] Y. Tüzel, G.B. Öztekin, A. Gül, Antalya'nın Kepez ilçesinde geleneksel sera üretiminin özellikleri, Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi 1 (1) (2014) 68–77.
- [2] L. Tan, J.A. Love, Literature review on heating of ventilation air with large diameter earth tubes in cold climates, Energies 6 (1) (2013) 3734–3743.
- [3] C. Çanakçı, S. Acarer, Jeotermal enerji ile sera ısıtma sistemleri tasarım esasları, IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi (TESKON 2009), İzmir, Türkiye, 2009.
- [4] H.H. Öztürk, M.M. Hocagil, C. Türkay, Sera ısıtma sistemlerinin teknik tasarımı, Alatarım 5 (1) (2006) 44–50.
- [5] B. Kendirli, B. Çakmak, Yenilenebilir enerji kaynaklarının sera ısıtmasında kullanımı, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi 2 (1) (2010) 95–103.
- [6] K. Popovski, Low-temperature installations for greenhouse heating, Direct Application of Geothermal Energy 18 (1) (1990) 18–28.
- [7] T. Kobari, J. Okijima, A. Komiya, S. Maruyama, Development of guarded hot plate apparatus utilizing Peltier module for precise thermal conductivity measurement of insulation materials, Int. J. Heat Mass Transfer 91 (1) (2015) 1157–1166.
- [8] B.J. Huang, C.L. Duang, System dynamic model and temperature control of a thermoelectric cooler, Int. J. Refrigeration 23 (3) (2000) 197–207.
- [9] K. Sato, H. Okumura, Y. Satarou, Numerical calculations for Peltier current lead designing, Cryogenics 41 (2001) 497–503.
- [10] A. Gündüz, Termoelektrik soğutma dolaplı buharlaşmalı soğutucunun ısıl ve hidrolik performansının incelenmesi, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2019.
- [11] <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/227422/ETC2/TEC1-12706/309/3/TEC1-12706.html> (erişim tarihi: 02.07.2024).
- [12] alldatasheet.com, “Electronic Components Datasheet Search.” <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/313841/HB/TEC1-12706.html> (erişim tarihi: 02.07.2024).
- [13] J. Du, P. Bansal, B. Huang, Simulation model of a greenhouse with heat-pipe heating system, Appl. Energy 93 (1) (2012) 268–276.
- [14] Ö. Genç, Balıkesir ili iklim koşullarına uygun sera modellerinin oluşturulması ve ısıtma-soğutma yükünün belirlenmesi, Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 2008.
- [15] A. Büyükbayraktar, Termoelektrik modül kullanılan seradaki bir bitkinin toprak altı ve üstü sıcaklığının sayısal ve deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2022.



MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL FIBRE-REINFORCED SUSTAINABLE EPOXY COMPOSITES

Murat KODALOĞLU¹, *Feyza AKARSLAN KODALOĞLU²

¹Isparta University of Applied Sciences, Vocational School of Technical Sciences, Occupational Health and Safety Program, Isparta

²Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Textile Engineering, Isparta

(Geliş/Received: 28.06.2024, Kabul/Accepted: 12.08.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ABSTRACT

The use of composites in various fields has increased rapidly due to their advantages such as convenience, stability, tensile, flexural and impact resistance. Mechanical properties in textile composites are closely linked to fiber reinforcement. Flax fibers are used with various polymer materials. The most common matrix material used in flax fibers is epoxy polypropylene, as it is easy to process and has good mechanical properties. Flax fiber reinforced composites have high tensile, flexural and impact strength. Compared to other natural fibers, composites made with flax fibers are costly. In this study, a composite surface was obtained by applying epoxy polymer to the surface of flax fiber reinforced fabric of different lengths and the mechanical properties of the resulting composite samples were examined. As a result of the testing of composites made of flax fibers, tensile strength measured between 17.76 and 26.62 MPa, flexural strength between 28.82 and 46.92 MPa and impact strength of 2.39-5.25 J were measured. The results obtained show that improvements were achieved in the mechanical properties of epoxy resin and flax fiber reinforced polymeric composite materials.

Keywords: Composite, Epoxy resin, Mechanical properties, Flax.

DOĞAL ELYAF TAKVİYELİ SÜRDÜRÜLEBİLİR EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

ÖZ

Kompozitlerin çeşitli alanlarda kullanımı, vermiş olduğu kolaylık, stabilite, çekme, eğilme ve darbe direnci gibi üstünlüklerde dolayı hızla artmıştır. Tekstil kompozitlerindeki mekanik özellikler lif takviyesi ile yakından bağlantılıdır. Keten lifleri çeşitli polimerler malzemeler ile birlikte kullanılmaktadır. Keten liflerinde kullanılan en yaygın matris malzemesi işlenmesi kolay olduğundan ve iyi mekanik özelliklere sahip olduğundan, epoksi polipropilendir. Keten elyaf takviyeli kompozitler yüksek çekme eğilme ve darbe mukavemetine sahiptir. Diğer doğal liflerle karşılaştırıldığında, keten liflerle yapılan kompozitler maliyetlidir. Bu çalışmada farklı uzunluklarda keten elyaf takviyeli kumaş yüzeyine epoksi polimer uygulanarak kompozit yüzey elde edilmiş ve elde edilen kompozit numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Keten liflerinden yapılan kompozitlerin test sonucunda 17,76 ile 26,62 MPa arasında ölçülen çekme mukavemeti, 28,82 ile 46,92 MPa arasında eğilme dayanımı ve 2,39-5,25 J darbe dayanımı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar epoksi reçine ile keten elyaf takviyeli polimerik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlandığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Kompozit, Epoksi reçine, Mekanik özellikler, Keten.

1. Introduction

Composite materials, which combine more than one material with different techniques and have suitable properties, have replaced traditional materials in many industrial areas [1-3]. Especially in recent years, thanks to the developments in the field of engineering, research and development activities on the production of higher quality composite materials and their performance properties continue to increase, resulting in high strength and elastic modulus [4, 5]. However, developing the properties of a composite material in itself is one of the options that can prevent loss of material and time by avoiding various difficulties that the production of a new composite material may bring. With the developing fiber technology in recent years, the use of technical fibers with superior properties such as flax fiber as reinforcement material in various forms in composite materials has become widespread in order to improve the weak aspects of brittle materials, eliminate brittleness and increase their strength.

In recent years, studies on fiber-reinforced polymer composite materials have used epoxy resin as a polymer matrix material due to its advantages such as chemical resistance, hardness, toughness and wear resistance. In addition to these properties, epoxy resin has a brittle structure.

Although flax fiber stood out with its superior quality compared to most plant fibers, it has constantly declined since it cannot compete economically with other fibers, especially cotton, and its share among natural fibers has constantly narrowed [6]. Flax stalk provides around 16 to 24% fiber, and in some varieties 34 to 37%, and this rate varies depending on the variety. Flax fiber has been widely used in products such as canvas fabric, rope, sails, rope, sacks, tent cloth, fire hose, rugs, floor mats such as mats, which have been widely used in both clothing and various home textile products for many years. The use of flax fiber in weaving and making clothes from these textiles arose out of necessity, depending on geographical conditions. As a matter of fact, linen fabrics provide great comfort, especially for people in hot regions, as they absorb sweat and at the same time allow the body to breathe. When linen fibers get wet, they swell and gain a tighter structure, increasing their durability [7].

Most of the notable studies on fiber/epoxy composites in the literature are related to the mechanical properties of composite materials. Muniandy et al. [8] they found that sugar palm fiber-reinforced polymer composite provided good mechanical properties. Ng et al. [9] found that composites from pineapple leaf fibers provided good mechanical properties. Yan et al. [10] investigated the impact resistance. The mechanism of multilayer aramid/epoxy composites increased the low impact resistance. Atas et al. [11] they tested woven fabric composite plates made of glass fiber using epoxy resin as reinforcement material. The impact energies ranged between approximately 4–45 J. Mariatti et al. [12] banana plain weave reinforced polyester fabrics exhibited high performance in flexural and impact properties. Barkoula et al. [13] led to improvements in tensile strength of flax fiber-reinforced polypropylene composites through dimensional changes in fiber length. Li et al. [14] due to the different structural properties of flax fibers, relationships between the voids and mechanical properties of the composites have been established. Sawi et al. [15] a similar behavior was observed in the flexural properties of flax fiber reinforced epoxy composites produced under pressure and curing cycle temperatures. Gning et al. [16] showed the strong influence of the fiber volume fraction and ply thickness parameter of flax/epoxy composites on the mechanical properties of the material and the fracture of the samples, followed by the compression pressure and ply number parameters. Yukseloglu et al. [17] showed that hand-laid composite materials with flax fibers are an alternative source of natural fibers in the development of reinforced composites for industries. George et al. [18] flax fiber reinforced epoxy composites Lignin content, pectin content and degree of polymerization were found to have a significant impact on the mechanical properties of the composites. Charlet et al. [19] Since the properties of flax fibers unidirectional composites are linearly related to the fiber volume fraction, these properties are used for the properties of flax bundles.

As a result of the literature research, it is noteworthy that fibers with different properties were used in the modification of fiber reinforced epoxy composite materials produced by different methods and improvements were achieved in the performance properties of the composite material after application. When the literature is examined, the lack of effect on the mechanical properties of flax-reinforced composite materials draws attention. Therefore, in this study, unlike the literature, the effect of flax/epoxy added composite material on the mechanical performance properties of the epoxy matrix element was examined. In this article, naturally obtained flax fiber was combined with high-performance

epoxy and resin compression machine to the fabric surface to produce composite plates with different fiber percentages.

2. Material and Method

Within the scope of the study, flax fiber reinforced composite material with plain fabric construction was used as a sample. A composite surface was obtained by applying epoxy polymer to the flax fiber reinforced fabric surface of different lengths. Flax fiber reinforced epoxy composite test samples are given in Figure 1.



Figure 1. Flax fiber reinforced epoxy composite.

Test samples were obtained in accordance with ASTM D3039 standards for flax fiber composite tensile test, ASTM D790 standards for flexural test, and ASTM D6110 standards for impact resistance test. The results obtained from the analysis and tests carried out to determine the properties of the produced composite materials and the parameters affecting the results were evaluated by taking into account the findings available in the literature. Firstly, fiber/epoxy percentage ratio values, which determine the performance properties of the composite plates produced in the study, were calculated [20].

Within the scope of the study, a composite material sample was produced from a combination of woven fabric with plain fabric construction and pure epoxy resin matrix using the hand lay-up method. Pure liquid epoxy resin was used in the production of composite materials [21]. The prepared mixture was directly absorbed into the fabric by hand-laying method [22].

Mechanical characterization of composite materials produced with pure liquid epoxy resin flax fiber reinforcement material was carried out [23]. Tensile, flexural and impact tests were performed during the mechanical characterization phase of the produced composite plates [24-26].

2.1. Tensile test

Static tests are performed by entering information such as sample dimensions, pulling speed of the moving jaw, and extensometer measurement range. At the end of the test, the tensile strength is calculated by the program and a stress-strain change graph is drawn. Tensile tests; According to the ASTM D 3039 standard, it was carried out using a Charpy brand tensile test device, at room temperature and at a tensile speed of 1 mm/min, in a tensile device with a capacity of 50 kN [20].

2.2. Flexural test

The flexural properties of composite plates were determined by the three-point flexural test based on the principle of applying a load at a certain speed to the sample from three points, according to the ASTM D790 standard. A flexural test was carried out to determine the changes in flexural strength values due to structural changes in the samples produced with different fiber percentages and the damages that would occur in the samples as a result of this test [20].

2.3. Impact test

Impact resistance test was performed in accordance with ASTM D6110 standard. The samples were cut in three pieces in the 0°, 90° and 45° directions, with dimensions of 12.7 mm x 127 mm, and notches of 2.25 radius and 45° were cut on each sample. Charpy impact tester and a hammer with a capacity of 6 joules were used for the test [20].

3. Research Findings

3.1. Tensile test result

Relationship between length and fiber percentage and tensile strength is given in Figure 2.

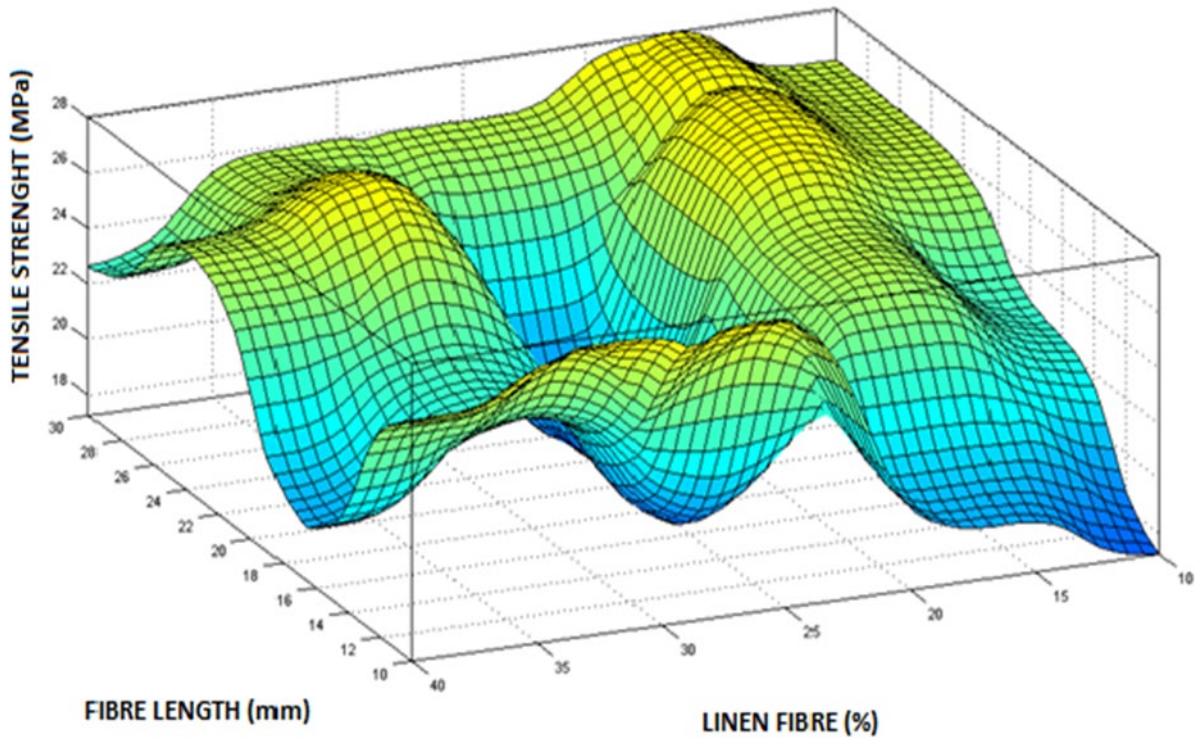


Figure 2. Relationship between length and fiber percentage and tensile strength.

When the fiber percentage was 15% and the fiber length was 30 mm, the tensile strength reached 27.89 MPa. The mechanical stability of flax fiber reinforced epoxy composite plates was determined using tensile test data. Three samples were used for each force application direction in the test, and as a result of the analysis, tensile stress values of the composite material samples were obtained. When the tensile test results performed in the direction of flax fiber reinforced epoxy fiber were examined, it was observed that the average maximum tensile stress properties for this sample were high.

Each tensile test was repeated at least 3 times depending on the sample type, and the average value was taken as the tensile strength. We tested the tensile strength of flax fiber reinforced composite samples at different lengths and percentages. Relationship between fiber percentage and tensile strength is given in Figure 3.

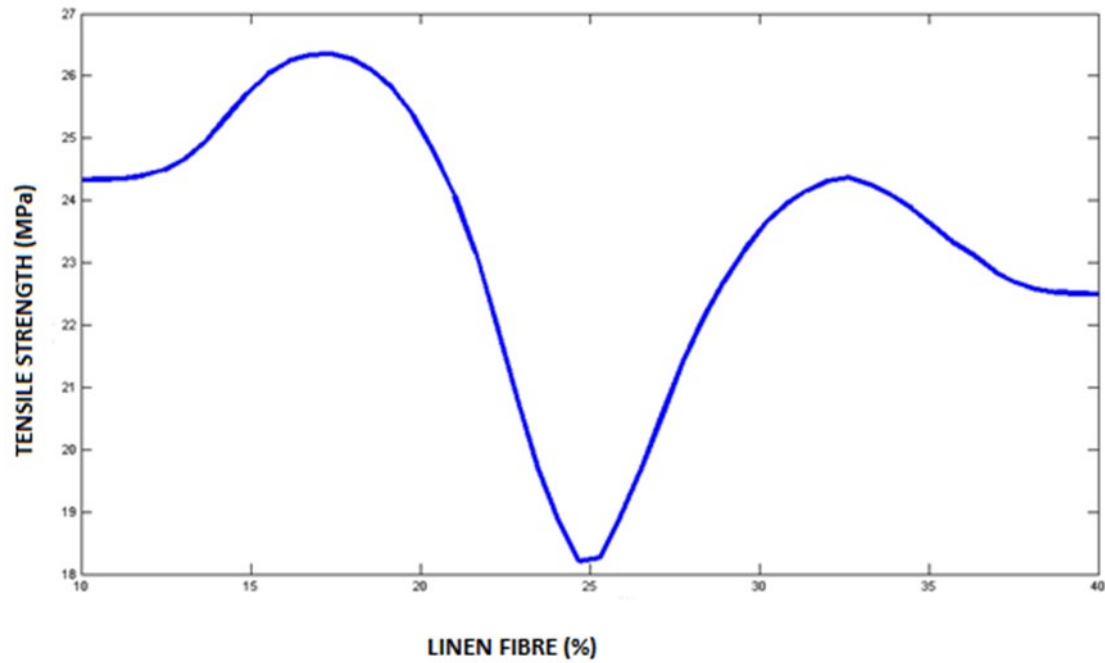


Figure 3. Relationship between fiber percentage and tensile strength.

Among samples with different percentages, tensile strength reached the highest values with 17% compared to others. It is seen that it reaches the lowest value at 25%. Composite reached 26.70 MPa at 15% fiber content, composite reached 25.86 MPa at 20%, composite reached 18.34 MPa at 25%, composite reached 22.86 MPa at 30% and 35% In the tensile strength of the composite reached 23.57 MPa. When the tensile strength values of samples with 17% and 33% fiber length are compared, it is seen that the tensile strength values increase depending on the fiber length. Relationship between fiber length and tensile strength is given in Figure 4.

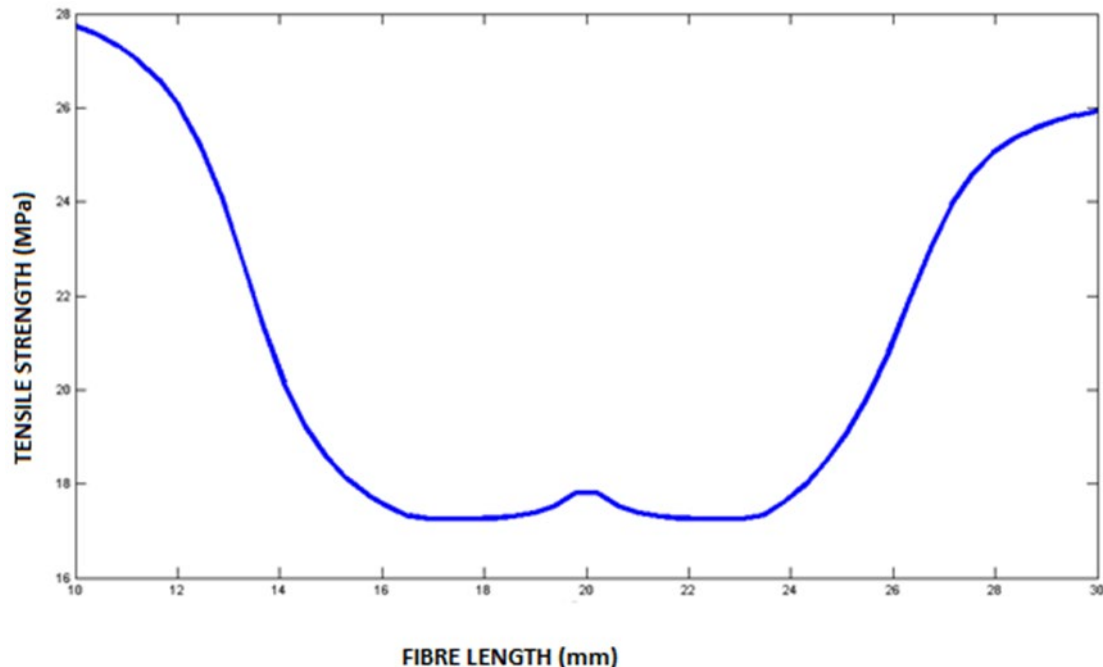


Figure 4. Relationship between fiber length and tensile strength.

In our research, we tested fibers of different lengths. When comparing composite samples in the 16-24 mm length range, depending on the length, it is seen that lower results are obtained compared to other length levels. The 10 mm flax fiber reinforced composite reached a tensile strength of 27.72 MPa, the 20 mm composite samples reached a tensile strength of 17.76 MPa, the 25 mm composite sample reached a tensile strength of 22.54 MPa and the 30 mm length reached a tensile strength of 25.92 MPa.

3.2. Flexural test result

Relationship between length and fiber percentage and flexural strength is given in Figure 5.

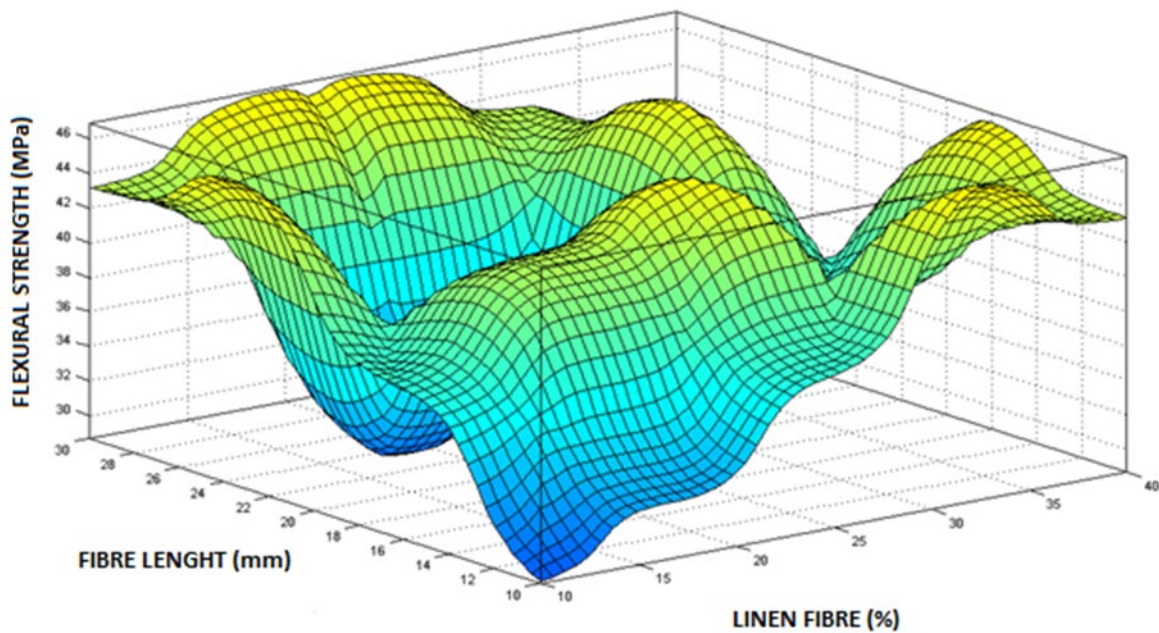


Figure 5. Relationship between length and fiber percentage and flexural strength.

Within the scope of the study, the flexural properties of flax fiber reinforced epoxy composite plates were determined by a three-point flexural test based on the principle of applying a load at a certain speed to the sample from three points, according to the ASTM D790 standard. As a result of the test, flexural stress (strength) and flexural modulus values of the composite plate samples produced within the scope of the study were determined.

Flexural tests of the prepared samples were carried out on the Charpy test device, with the inter-support spacing at the value specified in the ASTM D790 standard and the machine pressing speed of 1 mm/minute. In Figure 6, Relationship between fiber percentage and flexural strength.

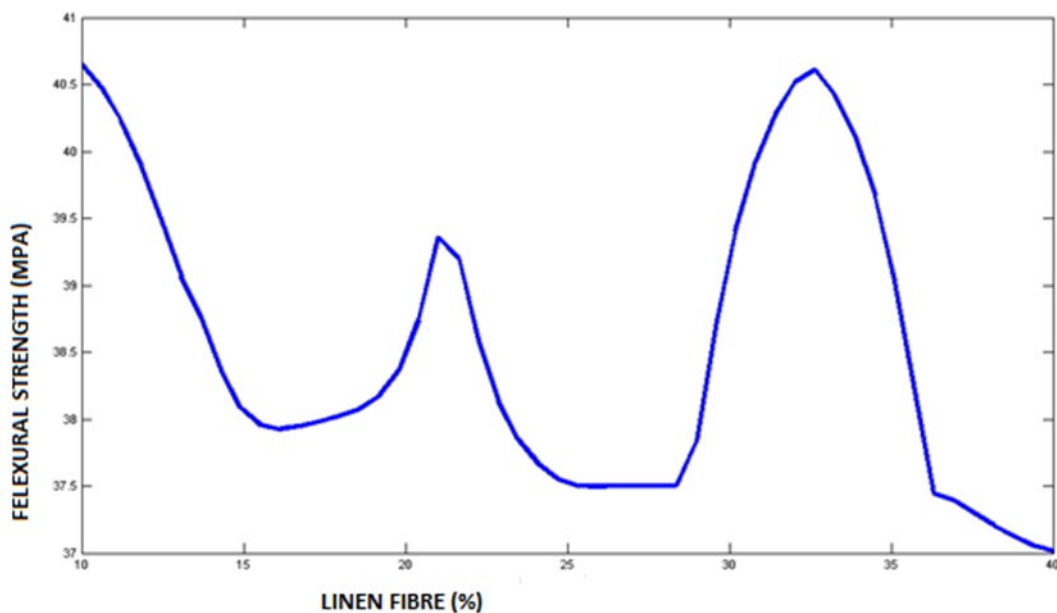


Figure 6. Relationship between fiber percentage and flexural strength.

Among the samples with different percentages, the flexural strength reached the highest values with 34% compared to the others. It is seen that it reaches the lowest value at 25%. At 15% fiber content, the

composite reached 38.20 MPa, at 20% the composite reached 38.46 MPa, at 30% the composite reached 38.86 MPa and at 35% the flexural strength of the composite reached 38.97 MPa reached. When the tensile strength values of samples with 21% and 32.5% fiber length are compared, it is seen that the tensile strength values increase depending on the fiber length. Relationship between fiber length and flexural strength in Figure 7.

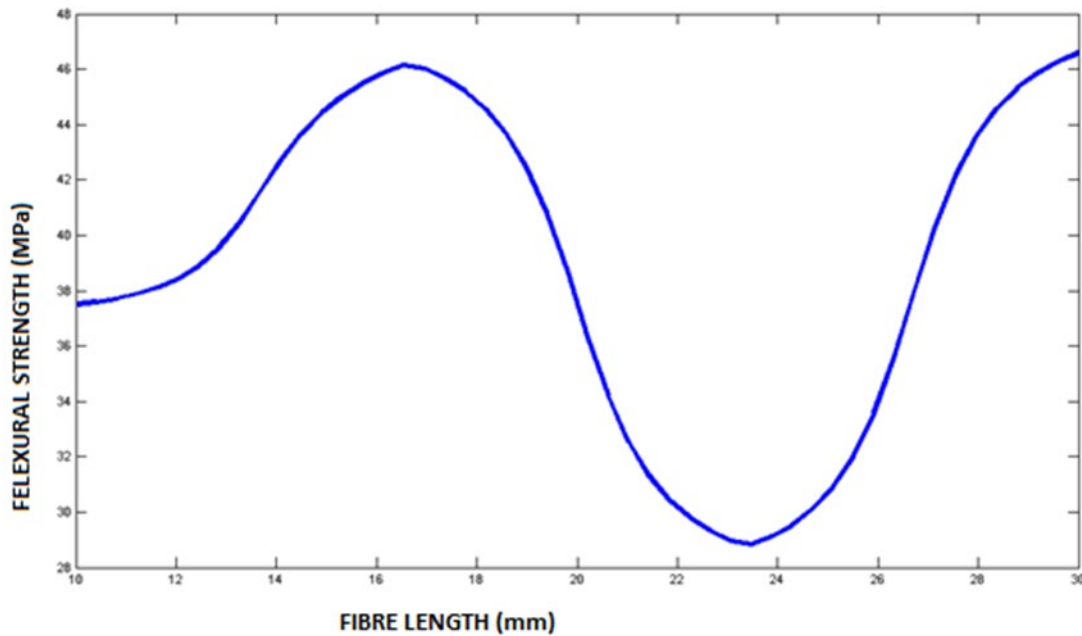


Figure 7. Relationship between fiber length and flexural strength.

For the flexural experiment, we tested fibers of different lengths. When comparing composite samples in the 22-26 mm length range, depending on the length, it is seen that lower results are obtained compared to other length levels. The 10 mm flax fiber reinforced composite reached a flexural strength of 37.72 MPa, the 18 mm composite samples reached 45.76 MPa, the 25 mm composite sample reached 30.54 MPa, and the 30 mm length reached 46.92 MPa.

3.3. Impact test result

Relationship between length and fiber percentage and impact strength is given in Figure 8.

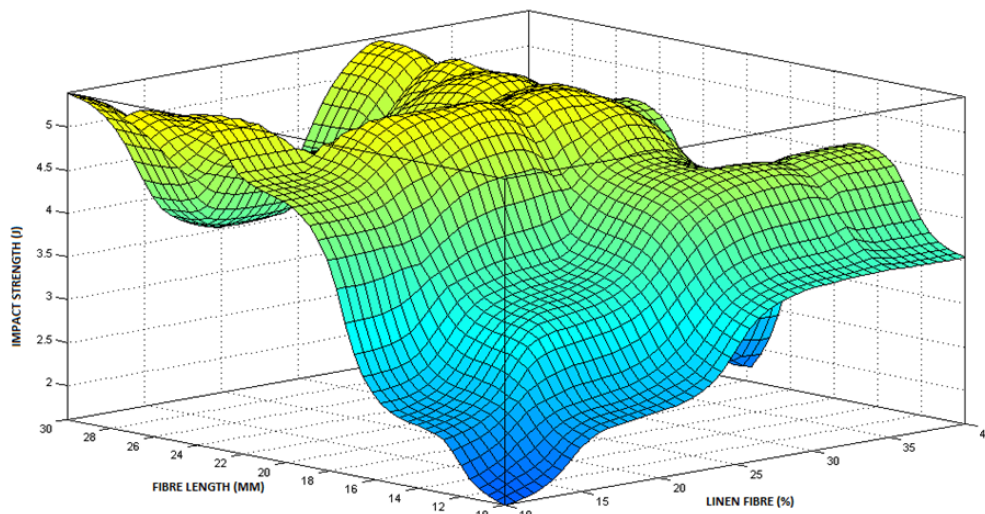


Figure 8. Relationship between length and fiber percentage and impact strength.

The effects of flax fiber reinforced fabric on impact properties were examined. Charts have ascending and descending sections. The graph shows that increasing fiber length increases impact resistance. In Figure 9, relationship between fiber percentage and impact strength.

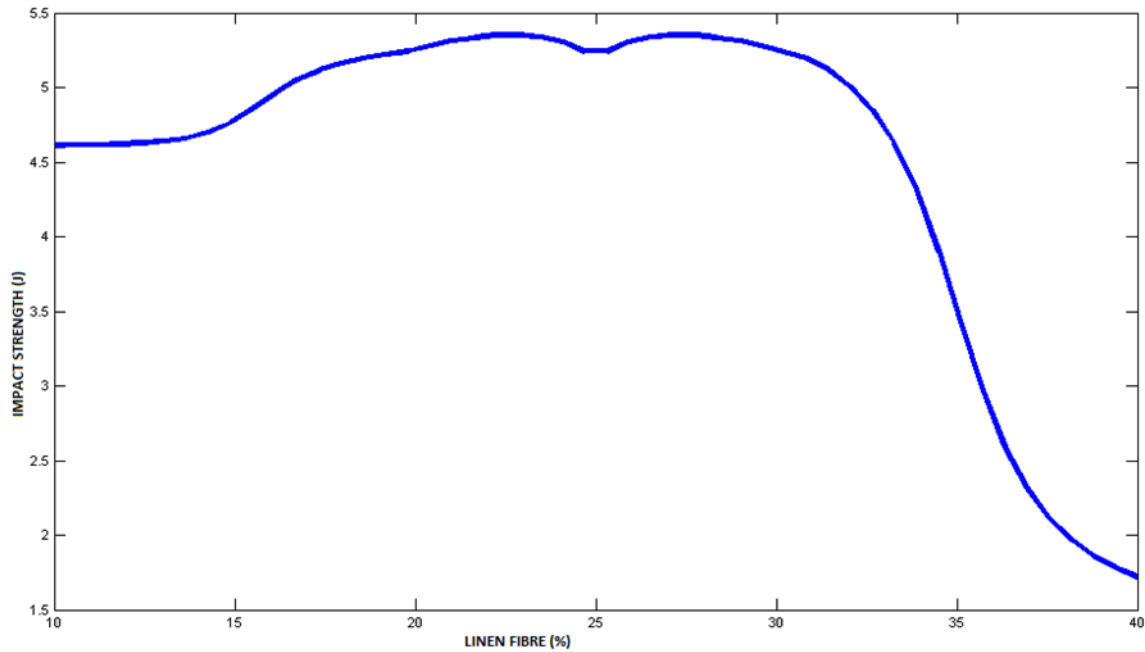


Figure 9. Relationship between fiber percentage and impact strength.

Among the samples with different percentages, the impact strength reached the highest values at 25% compared to the others. It is seen that it reaches the lowest value at 40%. At 15% fiber ratio, the composite reached 4.78 J, at 20% the composite reached 5.25 J, at 30% the composite reached 5.25 J, and at 35% the flexural strength of the composite reached 3.51 J. Relationship between fiber length and impact strength in Figure 10.

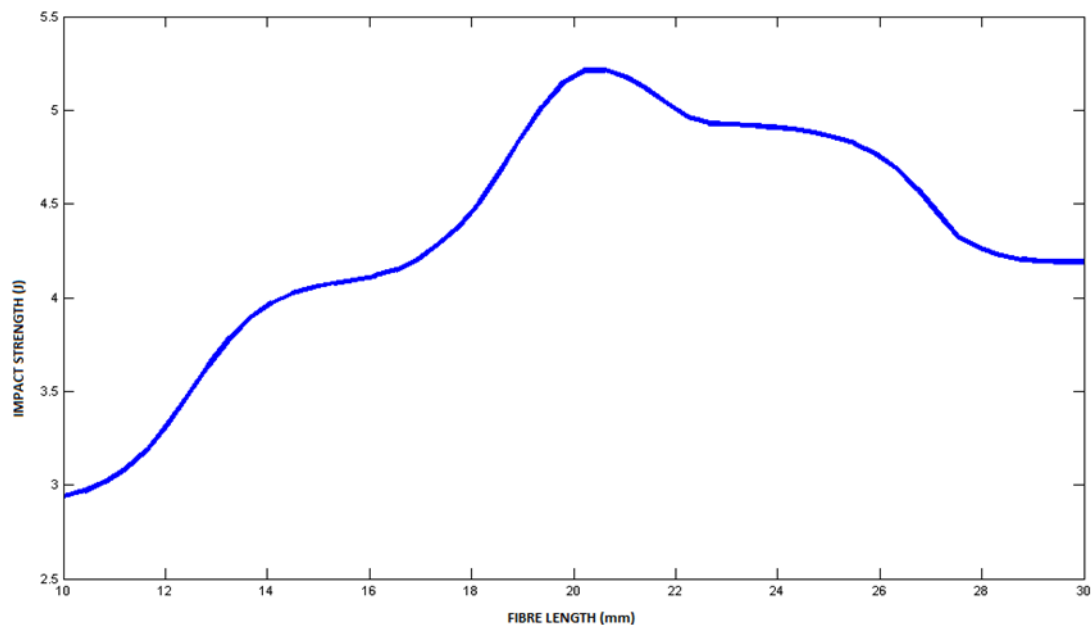


Figure 10. Relationship between fiber length and impact strength.

For the impact experiment, we tested fibers of different lengths. When comparing composite samples in the 10-15 mm length range, depending on the length, it is seen that lower results are obtained compared to other length levels. The 10 mm flax fiber reinforced composite reached an impact strength of 2.39 J,

the 20 mm composite samples reached an impact strength of 5.25 J, the 25 mm composite sample reached an impact strength of 4.68 J and the 30 mm length reached an impact strength of 3.54 J.

4. Results And Discussion

The strength of natural fibers may vary depending on the type. The mechanical strength of flax fiber reinforced composite samples is higher than other natural fiber reinforced samples. Flax has low tensile strength, but high flexural and impact strength. This is due to the mechanical compatibility of the bond between fibers and epoxy resin.

Composite samples with different lengths and different percentages of flax fibers were produced. When evaluated according to fiber percentage, tensile strength reaches the highest values of 26.62 MPa at 17% and when evaluated according to fiber length, 10 mm long flax fiber reinforced composite reaches the highest values of 27.72 MPa. When evaluated according to the fiber percentage, the flexural strength reached the highest values at 34% with 40.67 MPa. When evaluated according to the fiber length, the 30 mm long flax fiber reinforced composite reached the highest values with a flexural strength of 46.92 MPa. When impact resistance is evaluated according to fiber percentage, it reaches the highest values of 5.25 J at 30% and when evaluated according to fiber length, 20 mm long flax fiber reinforced composite reaches the highest values of 5.25 J.

5. Conclusions

Within the scope of this study, the production of flax fiber reinforced epoxy composite materials was aimed by the hand lay-up method. Mechanical characterization was carried out to determine its effect on composite material performance properties. It shows that it improves the composite performance properties during the mechanical characterization stage. Unlike the literature, in various mechanical properties evaluation methods, epoxy polymer was applied to the surface of flax fiber reinforced fabric of different lengths to obtain a composite surface and the mechanical properties of the obtained composite samples were examined.

The usage areas of flax and other trunk fibers are increasing day by day in technical textiles and composites. Especially in recent years, many countries have lost their ability to compete in conventional textile production, and studies on the production of technical textiles and more special products have intensified. Flax and other trunk fibers are important in these areas. In this study, the mechanical properties of flax/epoxy applied composite material were examined.

In addition to the development of techniques such as different production methods in the production of composite materials, different mixing methods in the preparation of flax/epoxy, functionalization with different chemical groups through chemical processes can contribute to the improvement of the properties of the produced materials. Research in this field will enable the production of new generation composite materials.

As a result, the improvements obtained in the mechanical properties of epoxy resin, which is frequently used as a matrix material in fiber-reinforced polymeric composite materials, will contribute to the expansion of the usage area of fiber-reinforced polymeric composite materials. The composite structures produced within the scope of the study can be recommended for use in industrial applications requiring flexibility and as technical textiles.

6. References






- [1] N. Korkmaz, E. Çakmak, M. Dayık, Dokuma karbon elyaf takviyeli karbon nano tüp-epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve termal karakterizasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 20 (2) (2016) 338-353.
- [2] H. Özdemir, E. Mert, The effects of fabric structural parameters on the breaking, bursting and impact strengths of diced woven fabrics, Journal of Textile & Apparel 23 (2) (2013) 113–123.
- [3] H. Özdemir, E. Mert, The effects of fabric structural parameters on the tensile, bursting, and impact strengths of cellular woven fabrics, Journal of the Textile Institute 104 (3) (2013) 330-338.

- [4] H. Özdemir, B. M. İçten, A. Doğan, Experimental investigation of the tensile and impact properties of twill and twill derivative woven fabric reinforced composites, *Journal of the Textile and Apparel* 28 (4) (2018) 258-272.
- [5] H. Özdemir, B. M. İçten, The mechanical performance of plain and plain derivative woven fabrics reinforced composites: tensile and impact properties, *The Journal of The Textile Institute* 109 (1) (2018) 133-145.
- [6] M. Ramesh, Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibre reinforced polymer composite materials: A review on preparation, properties and prospects, *Progress in Materials Science* 102 (2019) 109-166.
- [7] C. Baley, M. Gomina, J. Breard, A. Bourmaud, P. Davies, Variability of mechanical properties of flax fibres for composite reinforcement, *Industrial crops and products*, 145 (2020) 111984.
- [8] S. K. Muniandy, S. M. Sapuan, R. A. Ilyas, A. Azmi, Sugar palm lignocellulosic fiber reinforced polymer composite: a review, *Journal of Fibers and Polymer Composites*, 1 (1) (2022) 1-19.
- [9] L. F. Ng, S. Dhar Malingam, M. Z. Selamat, Z. Mustafa, O. Bapokutty, A comparison study on the mechanical properties of composites based on kenaf and pineapple leaf fibres, *Polymer Bulletin* 77 (2020) 1449-1463.
- [10] R. Yan, X. Chen, Aramid/epoxy composites with angle-laid reinforcement constructions for ballistic protection, *Journal of industrial textiles* 45 (5) (2016) 765-779.
- [11] C. Atas, O. Sayman, An overall view on impact response of woven fabric composite plates, *Composite Structures* 82 (3) (2008) 336-345.
- [12] M. Mariatti, M. Jannah, A. Abu Bakar, H. A. Khalil, Properties of banana and pandanus woven fabric reinforced unsaturated polyester composites, *Journal of composite materials* 42 (9) (2008) 931-941.
- [13] N. M. Barkoula, S. K. Garkhail, T. Peijs, Effect of compounding and injection molding on the mechanical properties of flax fiber polypropylene composites, *Journal of reinforced plastics and composites* 29 (9) (2010) 1366-1385.
- [14] Y. Li, Q. Li, H. Ma, The voids formation mechanisms and their effects on the mechanical properties of flax fiber reinforced epoxy composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 72 (2015) 40-48.
- [15] I. E. Sawi, H. Bougherara, R. Zitoune, Z. Fawaz, Influence of the manufacturing process on the mechanical properties of flax/epoxy composites, *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 8 (1) (2014) 69-76.
- [16] P. B. Gning, S. Liang, L. Guillaumat, W. J. Pui, Influence of process and test parameters on the mechanical properties of flax/epoxy composites using response surface methodology, *Journal of materials science* 46 (2011) 6801-6811.
- [17] S. M. Yukseloglu, H. Yoney, The mechanical properties of flax fibre reinforced composites. In *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications: From Science to Market* (2016) 255-266.
- [18] J. George, J. Ivens, I. Verpoest, Mechanical properties of flax fibre reinforced epoxy composites. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, 272 (1), (1999) 41-45.
- [19] K. Charlet, J. P. Jernot, M. Gomina, L. Bizet, J. Bréard, Mechanical properties of flax fibers and of the derived unidirectional composites, *Journal of composite materials* 44 (24) (2010) 2887-2896.
- [20] ASTM International. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, (2014).
- [21] E. K. Çeven, G. K. Günaydin, Investigation of moisture management and air permeability properties of fabrics with linen and linen-polyester blend yarns. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 4 (130), (2018) 39-47.
- [22] E. K. Çeven, G. K. Günaydin, Investigation of some mechanical and air permeability properties of shirting fabrics produced from compact yarns made of natural and synthetic fibres. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 24.2 (2019) 445-460.
- [23] E. K. Çeven, G. K. Günaydin, Investigation of selected physical properties of knitted fabrics produced from macaroni yarns. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 26.4 (130) (2018) 59-66.

- [24] E. K. Çeven, G. K. Günaydin, Effect of washing cycle on tenacity and stretching properties of denim fabrics containing elastane. *J Fashion Technol Textile Eng* 2 (5) (2018) 1-5.
- [25] M. Kodaloğlu and F. Akarslan Kodaloğlu, Environmentally friendly recycled leather reinforced composite: thermal and acoustic properties. *Teknik Bilimler Dergisi*, 14 (2), (2024), 32-37.
- [26] M. Kodaloğlu and F. Akarslan Kodaloğlu, Investigation of thermal insulation and water absorption properties of cortaderia selloana short fibers reinforced sustainability composite material. *Türk Bilim ve Mühendislik Dergisi*, 6(2), (2024), 14-20.



ROBOTİK CASUS KUŞUN TASARIMI, İMALATI VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE KONTROLÜ

*Seydi TUTAR¹, Abdülhamit POLAT¹, Murat ÖZTÜRK¹ Davut KILINÇ¹ Koray ÖZSOY²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü,
Isparta

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta OSB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü,
Isparta

(Geliş/Received: 06.07.2024, Kabul/Accepted: 10.09.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Bu çalışmada, askeri ve sınır ötesi operasyonlarda kullanılmak üzere geliştirilen bir robotik casus kuşun tasarımı ve üretimi ele alınmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan insansız hava araçlarının yerine, kuşlardan ilham alınarak geliştirilen robotik kuşların kullanımı, daha iyi kamufle olma, sessiz ve verimli uçuş sağlama avantajları sunulmuştur. Türkiye'nin sınır güvenliğini artırmak amacıyla gözetim ve izleme sistemleriyle entegre edilebilecek bir robotik kuş tasarımı yapılmıştır. Robotik casus kuşun prototipi mekanik sistem tasarımı ve imalatı, elektrik-elektronik sistem tasarımı ve kontrol yazılımı olmak üzere üç ana aşamada gerçekleştirilmiştir. Mekanik sistem tasarımı ve imalatında, Solidworks programı kullanılarak ana gövde, kanatlar ve diğer parçalar tasarlanmış ve FDM yazıcı ile üretilmiştir. Elektrik-elektronik sistem tasarımında, Raspberry Pi 4, WiFi Model B kamera, Lipo batarya ve A2212 1400KV drone motoru gibi bileşenler kullanılmıştır. Kontrol yazılımı olarak Python dili kullanılarak, yüz tarama ve hedef tespiti gibi işlevler gerçekleştirilmiştir. Robotik casus kuş, uzaktan kumanda ile kontrol edilip ses ve görüntü kaydı yapabilmekte, etrafındaki nesnelerin görüntü işlemlerini gerçekleştirerek kontrol paneline verileri aktarılmıştır. Robotik Casus Kuşun yapılan on adet uçuş testlerinden stabil uçuş, gözetim görüntü kalitesi ve skor değerleri ve pil tüketim performans değerleri istenilen aralıkta elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robotik, Tasarım, FDM İmalat, Yüz Tarama, Hedef Tespiti.

DESIGN, MANUFACTURING AND CONTROL OF ROBOTIC SPY BIRD

ABSTRACT

In this study, the design and production of a robotic spy bird for use in military and cross-border operations is discussed. The advantages of using robotic birds inspired by birds, better camouflage, silent and efficient flight instead of the widely used unmanned aerial vehicles are presented. A robotic bird that can be integrated with surveillance and monitoring systems to enhance Turkey's border security is designed. The prototype of the robotic spy bird was realized in three main stages: mechanical system design and manufacturing, electrical-electronic system design and control software. In mechanical system design and manufacturing, the main body, wings and other parts were designed using Solidworks program and manufactured with FDM printer. In the electrical-electronic system design, components such as Raspberry Pi 4, WiFi Model B camera, Lipo battery and A2212 1400KV drone motor were used. Functions such as face scanning and target detection were realized using Python language as the control software. The robotic spy bird can be controlled by remote control, can record audio and video, perform image processing of the objects around it and transfer the data to the control panel.

Keywords: Robotic, Design, FDM manufacturing, Face Scanning, Target Detection.

1. Giriş (Introduction)

Kanat çırparak uçan hava aracı (Ornithopter), doğadaki kuşların uçuş mekanizmalarından ilham alınarak tasarlanan ve uzun bir geçmişe dayanan hava araçlarıdır. Autar ve Walker (2007), ornithopterlerin tasarımı ve optimizasyonu konusundaki zorlukları ve ilerlemeleri detaylı bir şekilde ele almıştır. Çalışmada, ornithopter araçların aerodinamik özelliklerini, uçuş stabilitesini ve kontrol sistemlerini optimize etmiştir [1]. Akan ve Murphy (2010) çalışmasında, mikro kanat çırpma hava aracının geliştirilmesinde pratik uygulamalar yapmıştır. Çalışmada özellikle, kanatların çırpma hareketi esnasında aerodinamik kuvvetlerin nasıl yönetildiği ve bu sürecin tasarım sürecine etkileri üzerine odaklanılmıştır [2]. Shyy ve diğerleri (2008), biyolojiden ilham alarak tasarlanan ornithopterlerin ilerlemelerini ve karşılaşılan zorlukları incelemiştir. Doğadaki kuşların uçuş tekniklerini taklit eden bu araçların aerodinamik verimliliklerini artırmak ve stabilite sorunlarını çözmek için öneriler sunmuştur [3].

Wang (2005), kanat çırpma uçuşunun aerodinamiğini ve mikro hava araçlarına nasıl uygulandığını ve ornithopter teknolojinin gelecekteki potansiyelini göstermiştir. Çalışmada, ornithopterlerin manevra kabiliyetini ve hava koşullarına karşı direncini artırmak için yapılan aerodinamik optimizasyon sağlamıştır [4]. Perez ve diğerleri (2015), ornithopterlerin tasarım ve inşası üzerine bir çalışma sunmuştur. Ornithopter hava araçlarının malzeme seçimlerinden, kanat yapılarına kadar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Doğada bulunan kuşların uçuş tekniklerinden esinlenerek yapılan bu tasarımların pratik uygulamaları literatür ile tartışmıştır [5].

3B baskı teknolojisi günümüzde sanayi sektöründe özellikle prototip üretiminde kullanılması ile büyük inovasyonlardan birisi olmuştur. 3 Boyutlu baskı teknolojisi, plastik veya metalik malzemelerin birbirleri üzerine eklenerek tasarımın ihtiyacı doğrultusunda katmanlar oluşturulması yolu ile 3B modellerin üretilmesini sağlayan bir teknolojidir [6]. 3B yazıcı teknolojileri, ürünü katman katman oluşturan eklemeli imalat yöntemidir [7]. Tasarımı hazırlanan parçalar, bilgisayar destekli tasarım (BDT) yazılımları ile oluşturulan 3B katı modellerden üretilirler [8]. Bu süreçte malzemenin katman katman eklenmesi ve dolayısıyla israf olan malzeme miktarının düşürülmesi, diğer yöntemlerle kıyaslandığında bu teknolojiyi daha verimli kılar [9]. Bu teknoloji, polimerleri kullanarak fiziksel modellerin prototiplerini olabildiğince hızlı bir şekilde üretmek için geliştirilmiştir [10]. Yeni ürün geliştirmedeki hataları ve devir sürelerini büyük oranda azaltarak ürünlerin piyasaya sürülmesini hızlandırır. Robotik çırpınan kanatlı mikro hava aracı eklemeli imalat teknolojileri ile imalatı enjeksiyon kalıplama ve tel erazyon kesme imalat yöntemlerine alternatif olarak mikro mekanizma bileşenleri üretmek için kullanılabilirliğini göstermiştir [11,12].

Günümüzde askeri amaçlarla insansız hava araçları (İHA) kullanımı, özellikle sınır güvenliği ve istihbarat toplama operasyonlarında kritik bir öneme sahiptir. Bu tür teknolojik araçlar, yüksek hassasiyetli gözetim, keşif ve hedef tespit görevlerini etkin bir şekilde yerine getirebilmektedir [13]. Ancak, geleneksel İHA'lar bazı durumlarda yeterli kamuflaj sağlayamayarak görev alanında dikkat çekmektedirler. Ayrıca, bu tür hava araçlarının operasyon sırasında yaydıkları gürültü, görevin gizliliğini tehlikeye atmaktadır. Bu bağlamda, doğadan ilham alarak geliştirilen robotik casus kuşlar, yeni nesil gözetim ve izleme sistemleri olarak öne çıkmaktadır. Gerçek kuşların uçuş mekanizmalarını ve görünümünü taklit eden bu robotlar, doğal çevre içinde fark edilmeden daha sessiz çalışma özellikleriyle operasyonların gizliliğini artırma yeteneğine sahiptir [14].

İHA, SİHA ve Ornithopterlerin uçuşunda kontrolü sağlayan ana beyin Raspberry pi'dir. Raspberry pi uzaktan kontrol esnasında yüksek seviyeli grafik işlemleri, düşük güç tüketimi, yüksek doğruluk ve hız ihtiyaçlarına en iyi karşılık veren bir bilgisayardır [15]. Raspberry pi'ye bağlanan modül kamera ise hem RGB bandında hem de NIR bandında veri aktarımı sağlar. Modül kamera sisteminin avantajları düşük maliyet, hafiflik, geniş veri aktarımı ve montaj kolaylığıdır. Sistem gerçek zamanlı konum, veri toplamak ve veri işlemek için Raspberry pi üzerinden kurulup bağlanmıştır [16].

Raspberry pi, Raspbian adı verilen Linux tabanlı bir işletim sistemi kullanmaktadır. Raspberry pi Pardus ARM, Arch Linux ve Windows 10 IoT Core sistemlerini de desteklemektedir. Python, BBC Basic, C ve Perl programlama dilleri ile programlanmaktadır [17]. Raspberry'e yazılan yazılımın aktarılması; TTL seri kabloyla bağlantı, SSH ile bağlantı ve VNC ile uzaktan bağlantı kurularak aktarılabilir [18,19]. Raspberry'nin programlanmasında en çok kullanılan dil Python'dır. Python, Raspberry Pi üzerinde programlama için ideal bir seçenek sunar [20]. Python'un etkin kaynak kullanımı, performans

optimizasyonu sağlarken, gelişmiş veri işleme yetenekleri Raspberry Pi projelerinde güçlü analiz ve kontrol imkanı sunar. Ayrıca, aktif topluluk desteği ve modüler yapısıyla harici bileşenlerin entegrasyonu kolaylaştırır, projelerin hızlı bir şekilde geliştirilmesini sağlar [21]. Fotoğraf makineleri ve kameralar gibi cihazlardan elde edilen dijital görüntülerin, bilgisayar yazılımları ile işlenmesi veya analiz edilmesi, görüntü işleme olarak tanımlanır[22]. Srigrarom vd. (2015), çalışmasında dijital kamera kullanarak robotik kuş uçuşunun çarpınma hareketini taklit eden bir ornitopter prototipi geliştirilmiş ve farklı kanat tasarımlarının kaldırma ve itme gücü oluşturma özellikleri değerlendirmiştir [23]. Bermudez (2009) çalışmasında, optik akış fizibilitesini değerlendirmek için ornitopter gövdesi kamera, CPU modülü, pil ve görüntü işleme kartı ile kablosuz arayüzü ile 10 gr bir robot casus kuşu donatılmıştır [24].

Bir iç mekan kanat çırpan uçağı kontrol etmek için optik akışın fizibilitesini değerlendirmek amacıyla, ticari olarak temin edilebilen 7 gram ağırlığındaki bir ornitopter gövdesi, yerleşik bir kamera, 2.5 gram ağırlığında bir CPU modülü ve 2.6 gramlık bir pil ile donatılmıştır

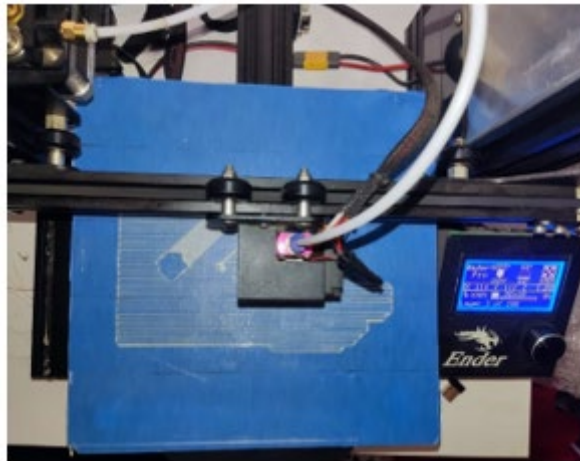
Çalışma, mekanik sistem tasarımı, elektrik-elektronik sistem tasarımı ve kontrol yazılımı gibi temel bileşenleri kapsar. Robotik kuşun mekanik tasarımı ve robotik kuşun aerodinamik özelliklerini maksimize ederek optimal uçuş performansı sağlamak amacıyla Solidworks yazılımları ile modellenmiş ve 3D yazıcı (FDM) ile üretilmiştir. Elektrik-elektronik sistem tasarımı ise, kuşun gözetleme ve kontrol yeteneklerini artırmak üzere Raspberry Pi 4 gibi güçlü bir bilgisayar, WiFi Model B kamera, fırçasız motorlar ve servo motorlar gibi yüksek teknoloji bileşenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol yazılımı ise, kuşun otonom ya da uzaktan kumanda ile yönetilmesini sağlayacak şekilde Python programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular literatür ile kıyaslanmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

2.1.1. FDM 3D yazıcı (FDM 3D printer)

Çalışmada, Şekil 1’de görüldüğü gibi Polilaktik Asit (PLA) malzemeden açık kaynaklı FDM tipi yazıcı kullanılarak üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Tablo 1’de 3 boyutlu yazıcının teknik özellikleri ve sabit parametreleri sunulmaktadır. Ayrıca Tablo 2’de PLA filamentin teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 1: Açık kaynak kodlu Creality Ender 3 Pro FDM Yazıcı (Open source Creality Ender 3 Pro FDM Printer)

Tablo 1. 3B Baskı Yazıcı Özellikleri (3D Printer Features)

İsim	Birim	Boyutlar
İnşa Alanı	Mm	220x220x250
Katman kalınlığı	Mikron	18
Malzeme		PLA
Baskı Teknolojisi		Fused filament fabrication (FFF)
Filament çapı	Mm	1.75
Nozul Çapı	Mm	0,40
İmalat Boyutları	Mm	220x220x250 mm
İnşa Tabla Sıcaklığı	°C	80°C heated glass build plate (max)
Nozzle Sıcaklığı	°C	225°C
Cihaz Boyutları	mm	440x440x465 mm

Tablo 2. PLA Filamentin Özellikleri (Properties of PLA Filament)

Printing temperature (°C)	Density (g/cm ³)	Distortion temperature (°C, 0.45 MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at break (%)	Bending Strength (MPa)	Impact resistance (kJ/m ²)
205-225	1.24	52	60	29	87	7

2.1.2. Fırçasız DC motor ve sürücüleri (Brushless DC motors and drivers)

Elektrikli hız kontrol cihazı (ESC), fırçasız DC motorun hızını kontrol eden ve akımı düzenleyen elektronik kontrol cihazıdır. Çalışmada Skywalker 30A ESC (Elektronik Hız Kontrol Cihazı), elektrik motorlarının hızını kontrol etmek ve yönetmek için kullanılmıştır. Skywalker 30A ESC, 30 amperlik bir akım kapasitesine sahip olan bir modeldir. Çalışmada fırçasız DC motorun akım grafikleri incelendiğinde 30A ESC kullanımı uygun görülmüştür. ESC'ler, motorlara güç sağlayan LiPo (Lityum Polimer) veya diğer batarya türlerinden gelen elektrik sinyallerini alır ve bu sinyalleri motorun hızını kontrol etmek için düzenlenmiş bir şekilde motorun üzerine aktarır.

LiPo (Lityum Polimer) pil, elektronik cihazlar için güç kaynağı sağlayan bir tür bataryadır. LiPo piller, hafif, yüksek enerji yoğunluğuna sahip ve yüksek deşarj oranlarına ulaşabilen batarya teknolojisidir. Bu özellikler, drone'lar, uzaktan kumandalı araçlar, RC uçaklar ve diğer taşınabilir elektronik cihazlar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmalarını sağlamaktadır. Çalışmada, Leopard Power 1000 mAh 7.4V 2S 25C marka modelli 7.4 volt nominal gerilimde çalışan ve 2 hücreden oluşan (2S), 25C deşarj oranına sahip ve 1000 mAh akım şarj kapasiteye sahip LiPo pil kullanılmıştır. Fırçasız DA motorlar çok yüksek rpm ile ulaştıklarından dolayı doğru enerji LiPo pil ile çalışmalarını gerekmektedir.

A2212 model 1400KV teknik özelliklere sahip fırçasız DC Motoru, drone, ornithopter ve uzaktan kumandalı hava araçları için özel olarak tasarlanmış bir fırçasız elektrik motorudur. Model numarası A2212 ve 1400KV değerine sahiptir. "KV" değeri, her volt başına motorun dönüş hızını RPM cinsinden ifade eder. Bu motor, yüksek manevra kabiliyeti ve hız için tercih edilmiştir. Özellikle, Leopard Power 1000 mAh 7.4V 2S 25C LiPo pil ve Skywalker 30A ESC gibi komponentlerle kullanılarak, senkron bir birliktelik sunarak güç ihtiyacını karşılar ve hızını kontrol eder. A2212 1400KV Drone Motoru gibi fırçasız DC motorlar, genellikle Lipo piller ve uygun ESC'lerle güçlendirilir, bu da hava araçlarının performansını artırır. Bununla birlikte, mini servolar da kanatçıkların veya kuyrukların hareketini sağlamak için kullanılır.

Mini servo motorlar, genellikle küçük boyutlarda ve hassas kontrol gerektiren uygulamalar için tasarlanmış motorlardır. Bu motorlar; RC araçlar, robotlar, dronelar, model uçaklar gibi uzaktan kontrollü projelerde yaygın olarak kullanılır. Mini servo motorlar kuyruk, kanat, atış hareketlerini hassas bir şekilde kontrol etmek için idealdir. Genellikle 4.8V ile 6V arasında çalışırlar, bu da Leopard Power LiPo pillerinin sağladığı uygun güç seviyesine uygundur. Mini servo motorlar, PWM (Pulse Width Modulation - Darbe Genişliği Modülasyonu) sinyalleriyle kontrol edilir. Bu sayede mikrodenetleyiciler

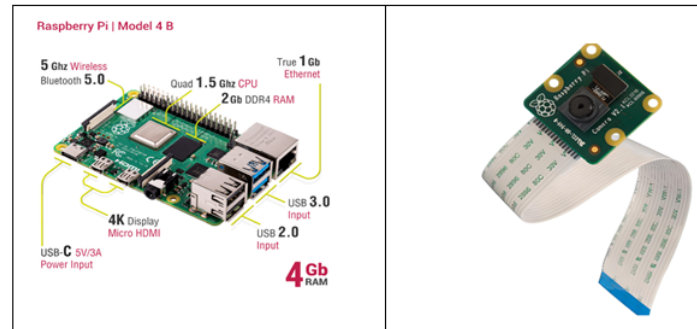
veya Raspberry Pi gibi cihazlar tarafından sağlanan darbe genişliği, motorun belirli bir açı veya konuma hassas bir şekilde hareket etmesini sağlar. Şekil 2’de fırçasız DA motorları ve bileşenlerin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2. Fırçasız DA Motor ve Sürücülerini a) ESC, b) LiPo pil, c) Fırçasız DA motoru, d) Mini servo motor görüntüleri (Brushless DC Motor and Drivers a) ESC, b) LiPo battery, c) Brushless DC motor, d) Mini servo motor images)

2.1.3. Raspberry Pi ve Cihaz Kontrol Yazılımı (Raspberry Pi and Device Control Software)

Şekil 3’te gösterildiği gibi Raspberry Pi 4 Model B, geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından desteklenen ve birçok projeye uygun olan popüler bir mikro bilgisayardır. Bu cihaz, dört çekirdekli ARM Cortex-A72 CPU’ya sahiptir ve 2GB, 4GB veya 8GB RAM seçenekleri sunar. Ayrıca çift ekran desteği için iki adet mikro HDMI portu, Gigabit Ethernet, USB portları ve dahili Wi-Fi ve Bluetooth desteği gibi özellikler sunar. Raspberry Pi 4 Model B’ye düşük maliyetle yüksek çözünürlüklü görüntü ve video kaydı yapabilmeyi sağlayan bir modül kamera entegre edilmiştir. Raspberry Pi 4 Model B’nin Wi-Fi özelliği ve bir kamera modülü kullanılarak görüntüleme ve hedef tespit sistemi oluşturulmuştur. Kamera modülü, Raspberry Pi tarafından kontrol edilerek alınan görüntüleri işlemek ve bir kontrol merkezine iletmek için Wi-Fi bağlantısını kullanmıştır. Bu sistem, Raspberry Pi’nin sağladığı işlem gücü ve bağlantı özellikleri sayesinde esnek ve özelleştirilebilir bir yapıya sahiptir. Görüntüler, Raspberry Pi tarafından işlenerek belirli bir hedef tespit algoritması kullanılarak analiz edilmiştir. Kontrol merkezi, hedef tespiti sonuçlarını alarak gerekli aksiyonları veya bildirimleri gerçekleştirerek ilgili yerlere veri akışı sağlamıştır.

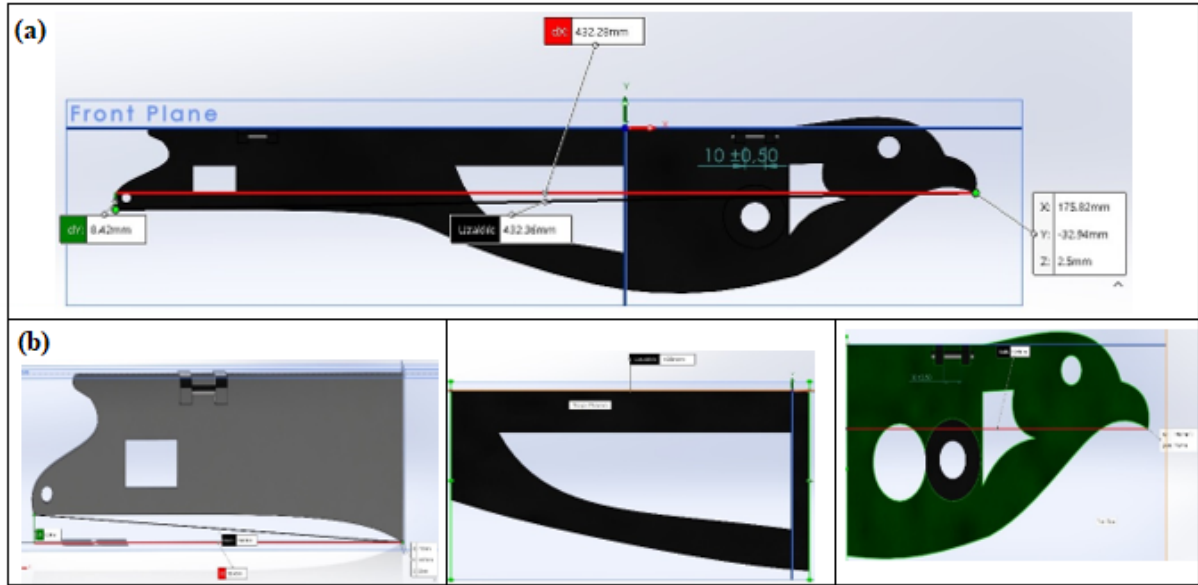


Şekil 3. Raspberry Pi ve Cihaz Kontrol Yazılımı (a) Raspberry Pi 4 Model B (b) Wifi Modül Kamera (Raspberry Pi and Device Control Software (a) Raspberry Pi 4 Model B (b) Wifi Module Camera)

2.2. Metot (Method)

2.2.1. Mekanik sistem tasarımı ve imalatı (Mechanical system design and manufacturing)

Çalışmada tüm materyalleri üzerinde barındıracak ve robotik casus kuşun yükünü taşıyacak şekilde tasarlanan ana gövdenin mekanik tasarımı Solidworks programı kullanılarak Şekil 4.a’da gösterildiği gibi 3 boyutlu modelleme yapılarak çizilmiştir. Şekil 4.b’de teknik çizimde gösterildiği gibi robotik casus kuş prototipinin ana gövdesi yazıcı tablasının sınırlarından ötürü üçe bölünerek imal edilmiştir. Robotik casus kuşun kafa kısmı 170.48 mm, orta kısmı 105 mm, kuyruk kısmı ise 156.46 mm olacak şekilde imal edilmiştir.



Şekil 4. a) Kuşun ana gövde görüntüsü (main body of the bird) b) Kuyruk kısmı, Orta kısmı, Baş kısmı (Tail part, Middle part, Head part)

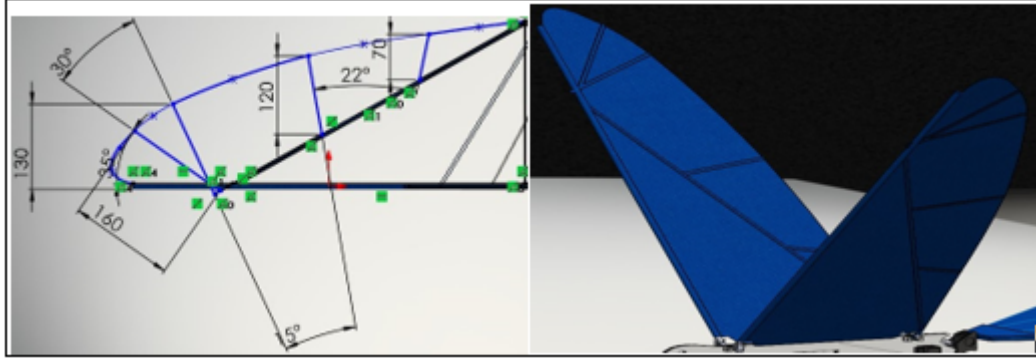
Ana gövde mekanik ve elektronik parçaların yükünü taşıyacak kalınlıkta imal edilmiştir. Kuşun baş kısmında bulunan büyük çembere A2212 1400 KV fırçasız DA motoru yerleştirilmiştir. Motorun çapı 27.5 mm olduğu için gövdede açılan çemberin çapı da bu ölçüde açılmıştır. Motorun içine yerleştirileceği bu çember gövdenin diğer tarafına doğru çıkıntı yapmaktadır. Motorun tüm boyu 38 mm, mil uzunluğu ise 3.17 mm'dir. Motordan çıkan mile çark bağlanacağı için dışarı verilen çıkıntı tarafına motor sabitlenecektir ve diğer kısımdan mil görünecektir. Buna uygun olacak şekilde gövdenin et kalınlığı da hesaba katılıp dışarı çıkma payı verilmiştir. Yan taraftaki çembere ise rulman konularak kanata hareket verilmiştir. Böylece motorun miline bağlanan çark büyük çarkı çevirmiş olacaktır. Büyük çarka bağlı olan kanat bağlantı elemanları ve kranklar dişliden alınan hareketle kanatlara çırpma hareketi yapmış olacaktır. Bu hareketin her iki kanatta senkronize olarak yapılabilmesi için rulmanın içinden geçen krank kolu bağlantı elemanını hareket ettirmiş olması ve eş zamanlı olarak kanat çırpması sağlanmıştır. Göz tarafındaki boşluğa ise görüntü işleme yapılabilmesi için Wifi Model B kamera takılmıştır.

Orta gövde kısmına ise Raspberry pi 4 ve güç kaynağı olan Lipo pil bağlanmıştır. Bağlanan parçalar ağırlık denge merkezini bozmaması için karşılıklı olarak montaj edilmiştir. Kuşun kuyruk kısmı gövdesinde uç kısmında ise motor bağlantısı yapılmıştır. Kuyruğun gövdeye bağlanabilmesi ve aerodinamik olarak uçuşa olanak sağlaması adına servo motor ve aparatı takılmıştır. Bu aparat alttan gövdedeki deliğe, üstten ise diğer servo motora sabitlenmiştir. Servo motor kuyruğa sağ sol ve yukarı aşağı hareket vererek havadayken manevra kabiliyeti sağlamış olacaktır. Servo motor aparatı ise gövdeyle kuyruğu birbirine bağlayacak ve içinde servo motoru bulunduracaktır. Aparata bağlanan servo motor yukarı aşağı hareket, aparatlı servo motor ise sağa sola hareket verecektir. Şekil 5'te robotik casus kuşun ana gövdenin FDM 3B yazıcı imalat sonrası montaj edilmiş görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5. Ana gövdenin imalat sonrası görüntüsü (Post-manufacturing image of the main body)

Ana gövdenin tasarımı ve imalatı tamamlandıktan sonra Şekil 6’da gösterildiği gibi robotik casusu kuşu uçuracak olan kanatların tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Robotik kuşun tüm mekanik ve elektronik parçalarının montajı yapıldıktan sonraki ağırlığı 535 gramdır. Bu ağırlığı kaldırabilecek kapasitede motor ve dişliler hesaplandıktan sonra kanat açıklığının ne kadar olacağına hesabı yapılmıştır. Kanatların kaldırması alanlarıyla orantılıdır, bu nedenle ağırlık ne kadar fazla olursa kanat alanı o kadar büyük olmalıdır.



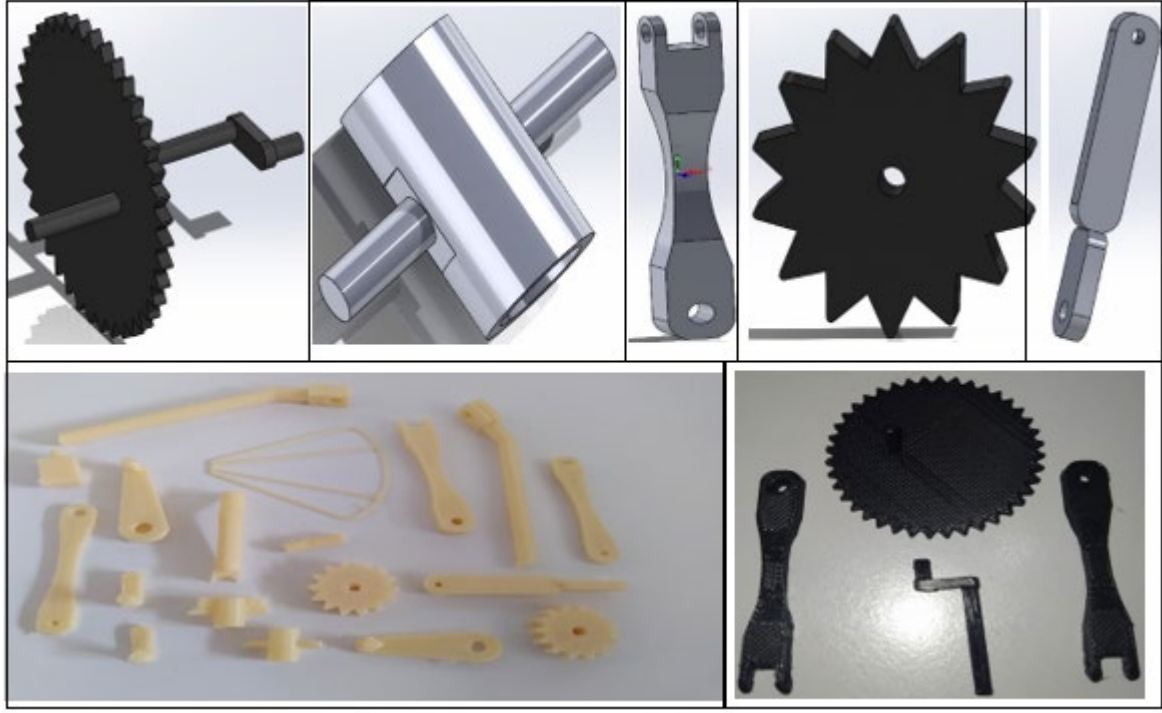
Şekil 6. Kanat parçası (Wing part)

Robotik kuşun ağırlık ve fırçasız DA motorun RPM’i ve buna uygun dişlilerin hepsi hesaba katılınca robotik kuşu uçuracak kanat açıklığının her kanat için 646.74 mm olması gerektiği hesaplanmıştır. Kanatın uzunluğunun 248.5 mm olması gerektiği saptanmıştır. Robotik kuşun kanatlarının gövdeye sabitlenmesi için ise çıkarılıp takılabilen pim mekanizması tasarlanmıştır. Baş ve kuyruk kısmının merkezlerinin arası buna göre hesaplanarak 248.5 mm olacak şekilde imal edilmiştir. Şekil 7’de kanatın açıklığını sağlayan ve çarktan gelen bağlantı elemanı gösterilmiştir. Kanatın orta kısımlarının hava akışına dayanabilecek kadar sağlam olması için destek parçaları atılmıştır.



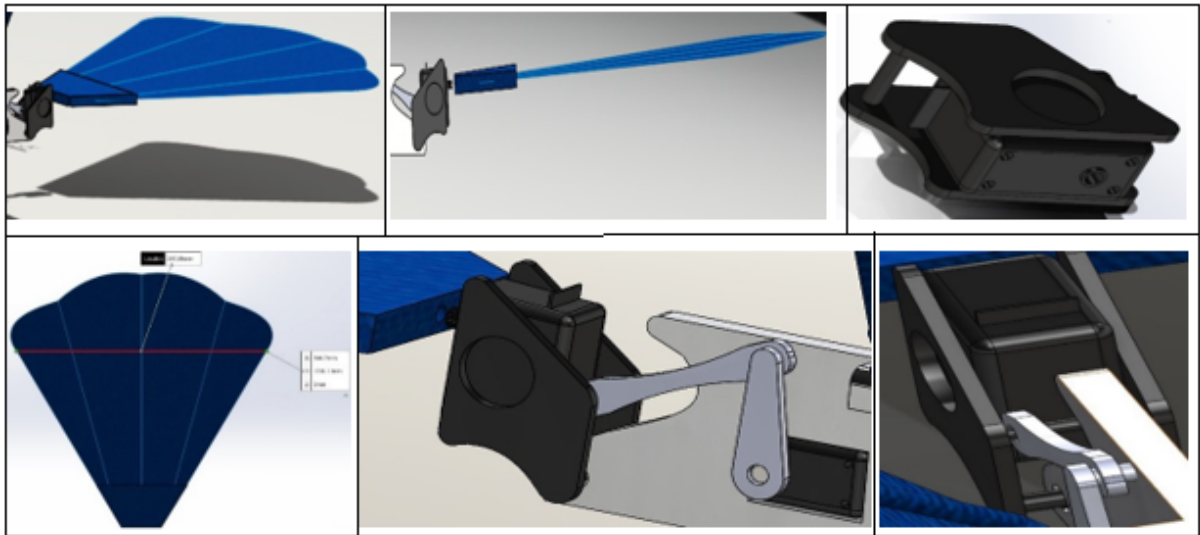
Şekil 7. Kanat parçasının imalat sonrası görüntüsü (Image of the wing part after manufacturing)

Ana gövde ve kanatların tasarımı ve imalatı gerçekleştirildikten sonra diğer mekanik bileşenlerine geçilmiştir. Şekil 8’de gösterildiği gibi kanadı çevirecek olan motorun miline bağlı olan dişli, bu dişliden alınan hareketi kanatlara aktaracak olan büyük dişli, kanatın kanat açıklığı iskeletine bağlı olan parçaya hareketin iletilmesini sağlayan krank ve bağlantı parçalarının tasarımı Solidworks programından yapılarak FDM 3B yazıcı ile imal edilmiştir.



Şekil 8. Dişli ve bağlantı elemanları tasarım ve imalat sonrası görüntüleri (Design and post-manufacturing images of gears and fasteners)

Robotik kuşun gövdesi, kanadı ve diğer mekanik aksamları tasarlanıp imal edildikten sonra Şekil 9’da gösterildiği gibi havada aerodinamik akışa karşı sağa sola ve yukarı aşağı hareketi sağlayacak olan kuyruğun imal edilmiştir. Kuyruk parçası gövdeye servo motorun bağlantı elemanı ile bağlanarak servo motor ile hareket ettirilmiştir. Alt kısımdan ise kuyruk gövdesindeki deliğe montajı yapılmıştır. Kuyruğun iç kısmının daha sağlam olması ve hava akışına dayanabilmesi için arasına destek parçaları atılmıştır. Uzaktan kontrol ile sağa istenirse kuyruk sağa, sola istenirse kuyruk sola hareket ettirilerek robotik kuşun kontrolü yapılacaktır.



Şekil 9. Kuyruk, servo motor bağlantı parçaları ve aparatı tasarım (Tail, servo motor fittings and apparatus design)

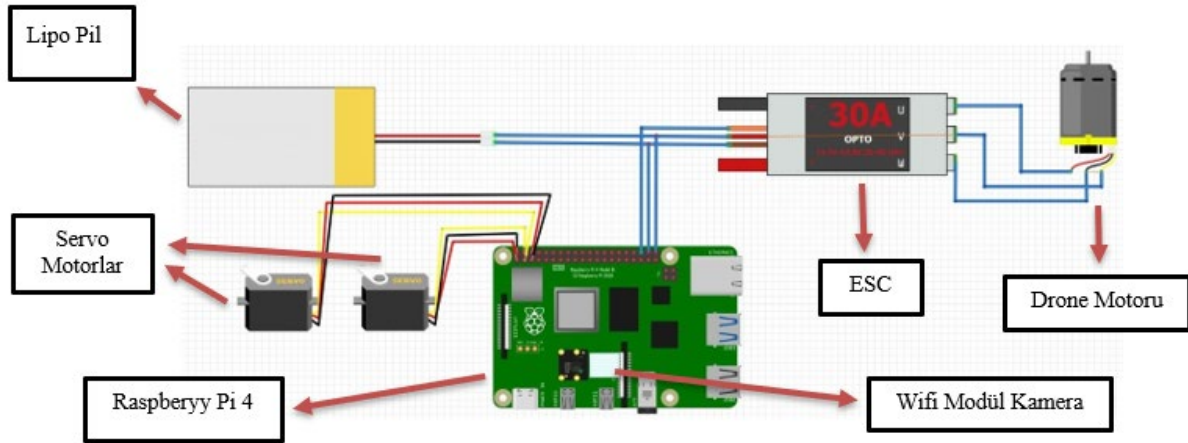
Robotik kuşun FDM 3B yazıcı ile imal edilmiş görüntüsü Şekil 10’da verilmiştir. Böylece robotik kuşun gövdesi, kanatları, bağlantı elemanları, kuyruk kısmı ve kanadı döndüren dişliler vb. birçok parçanın birleştirilerek robotik casus kuşun mekanik anlamda imalatı tamamlanmıştır.



Şekil 10. Mekanik kısmın bitmiş hali (Finished version of the mechanical part)

2.2.2. Elektrik-elektronik sistem tasarımı (Electrical-electronic system design)

Çalışmada LiPo pil, servo motor, Raspberry Pi 4, ESC, fırçasız DA motor ve Wifi modül kameradan oluşan elektrik elektronik bağlantıları devre şema çizimi Şekil 11’de gösterilmiştir.



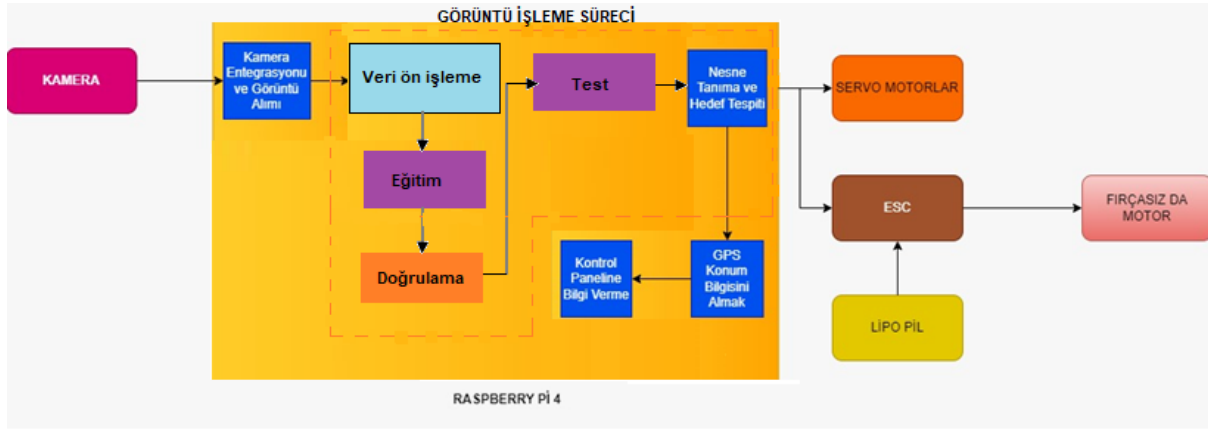
Şekil 11. Elektrik-elektronik devre şeması (Electrical-electronic circuit diagram)

Robotik casus kuşun baş kısmında bulunan göz deliğine Raspberry’ye uyumlu olan Wifi Model B kamera montajı gerçekleştirilmiştir. Kamera sayesinde havada uçan robotik kuş görüntü verisi olarak kontrol ekranına yüz taraması yapıp hedefi belirtmesini sağlamıştır. Raspberry’den bilgisayar üzerinden sinyal gönderilerek kanat çırpma hareketi gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Cihaz kontrol yazılımı (Device control software)

Çalışmada robotik casus kuşun kontrolü için Python yazılım programı kullanılmıştır. Python programında yazılan kod Raspberry ile uyumlu bir şekilde çalıştırılmıştır. Python yazılım programı aracılığıyla yazılan program robotik casus kuşun yüz taraması yaparak hedefi gördüğünde kontrol ekranında uyarı vermesidir. Böylelikle dikkat çekmeden kullanılacak robotik casus kuş hedefleri tespit etmiş olacaktır. Çalışmada geliştirilen özgün yazılım ile robotik casus kuşun tehlikeli nesnelere ve tanımlanamayan yüzleri tespit etmesini sağlayan bir görüntü işleme sistemi ve otomatik navigasyon mekanizmasıdır.

Robotik casus kuşun kuyruğuna uçuş sırasında hareket verecek mini servo motorlara Raspberry üzerindeki pinlerden sinyal gönderilmiştir. Giden sinyal üzerine servo motora 45 derecelik açıyla hareket yapmıştır. 45 derecelik hareketi yaptıktan sonra sinyal verilerek tekrar eski konumuna gelmekte ve bir daha sinyal verildiğinde ters yönde 45 derecelik hareket yapmış olacaktır. Böylece periyodik olarak robotik casus kuş kuyruk manevra hareketi gerçekleştirilmiştir. Şekil 12’de çalışmanın iş akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 12. İş akış diyagramı (Workflow diagram)

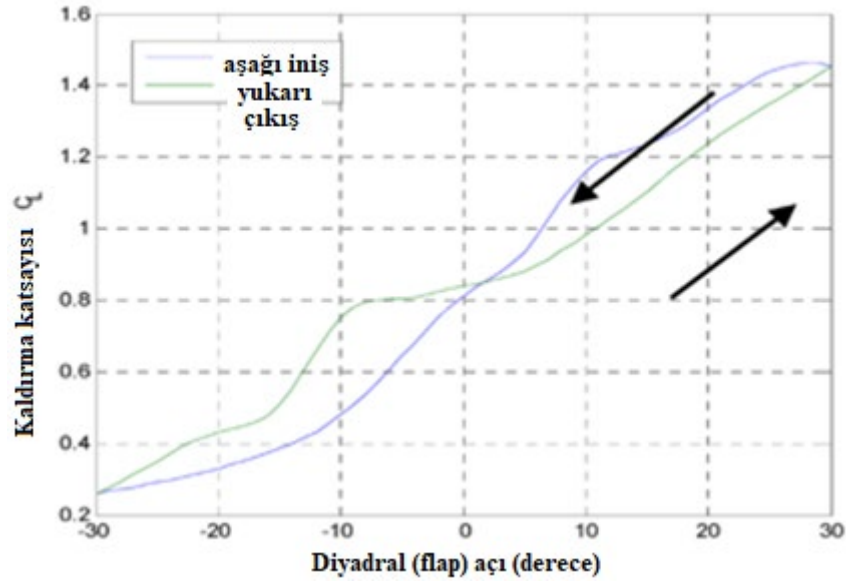
Şekil 13'te gösterildiği gibi robotik casus kuşun tanımlanmayan yüzleri tespit eden görüntü işleme yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Burada daha önceki veri seti fotoğrafların sayısal formata çevirip veri seti oluşturulmuştur. Daha önce eğitilmiş veri seti ile robotik casus kuş ile çekilen görüntüde tehlikeli nesnelere ve yüzleri tespit edilmiştir. Model test sonucunda eğitim veri setinden fotoğrafları çekerek tespit ettiği hedefin doğru olup olmadığını test eder. Eğer görüntüde herhangi bir tehlike algılanırsa, sistem kullanıcıya uyarı vererek robotik casus kuş olay yerinden hızlıca uzaklaşacaktır.



Şekil 13. Görüntü işleme teknikleri ile yüz tespiti (Face detection with image processing techniques)

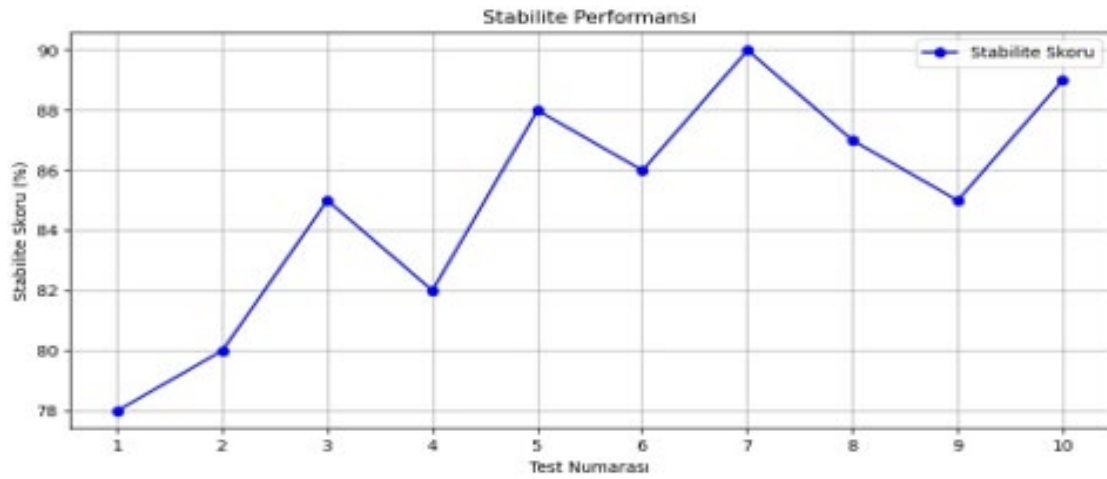
3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Çalışmada Robotik Casus Kuş Tasarımı ve İmalatı gerçekleştirilmiştir. Robotik kuş havalandığında Wifi Modül Kamerasından görüntü alarak kontrol ekranına hedef tespiti yapmıştır. Mekanik, Elektrik-Elektronik ve Cihaz Kontrolü aşamalarının bitirilmesinin ardından Robotik Casus Kuşun yapılan uçuş testlerinden stabil uçuşları gerçekleştirme, gözetim görüntü kalitesi ve skor değerleri, doğal ortamlara uyum sağlama, pil tüketim performans testlerinden elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir. Robotik casus kuşun kanadın aşağı yukarı hareketi sırasında elde edilen kaldırma katsayısı değerleri Şekil 13'te verilmiştir.



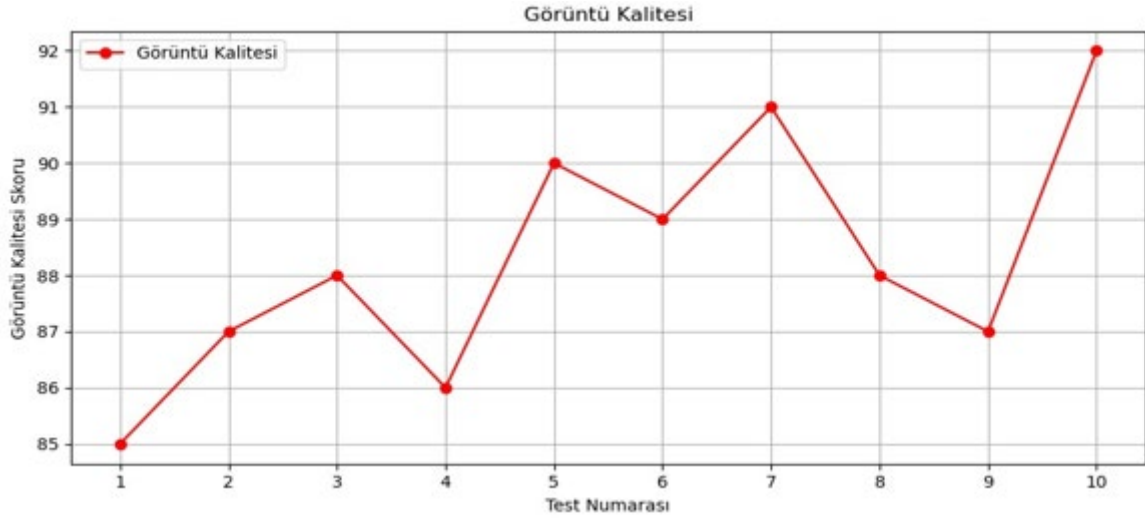
Şekil 13. Kanadın aşağı ve yukarı vuruş hareketi anında kaldırma katsayısı (Lift coefficient at the moment of up and down stroke movement of the wing)

Robotik casus kuşun kanadın 10 adet performans test aşamasında havada kalma yüzdelik değer olarak stabilite performansı Şekil 14’te verilmiştir.



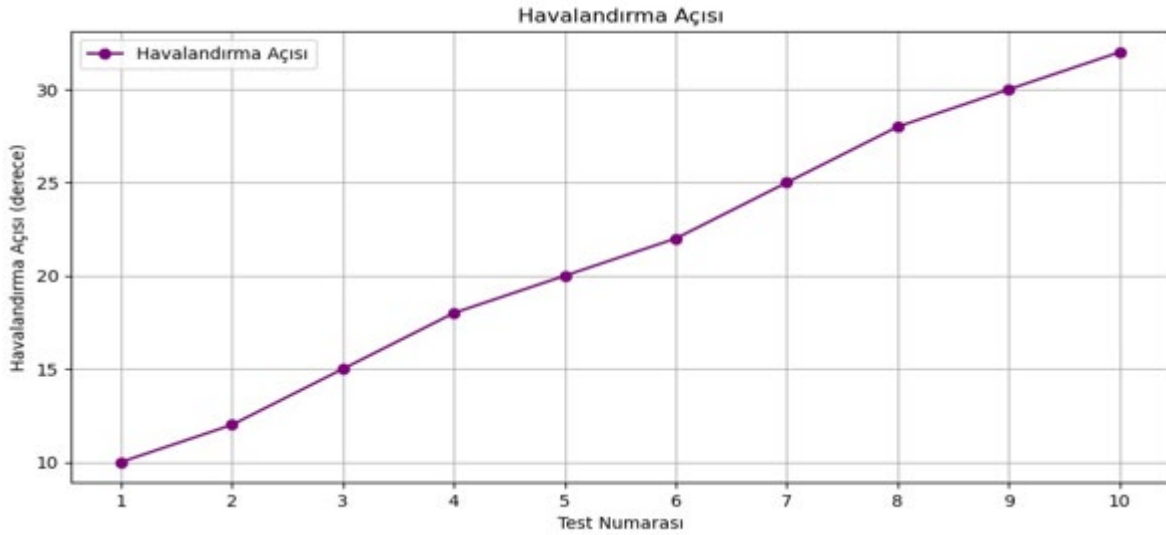
Şekil 14. 10 adet test sonucunda kuşun havadaki stabilite performansı (Stability performance of the bird in the air as a result of 10 tests)

Robotik casus kuşun uçuş esnasında 10 adet performans test aşamasında kameradan alınan görüntülerin kalitesi ve skor değerleri Şekil 15’te verilmiştir.



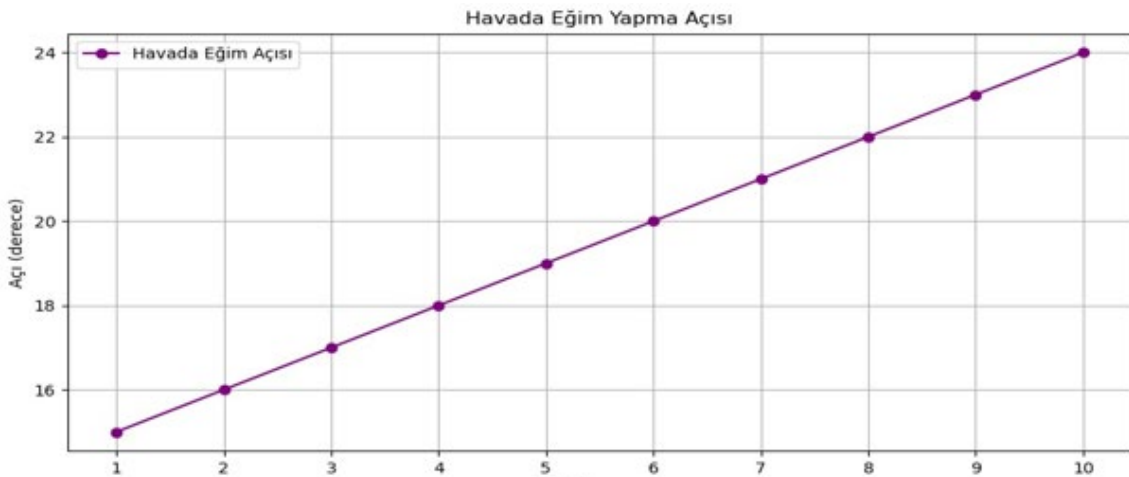
Şekil 15. Kameranın uçuş sırasında aldığı görüntü konsantrasyonu (Image concentration taken by the camera during flight)

Robotik casus kuşun uçuş esnasında 10 adet performans test aşamasında kanatların havalandırma açısı değerleri Şekil 16’da verilmiştir.



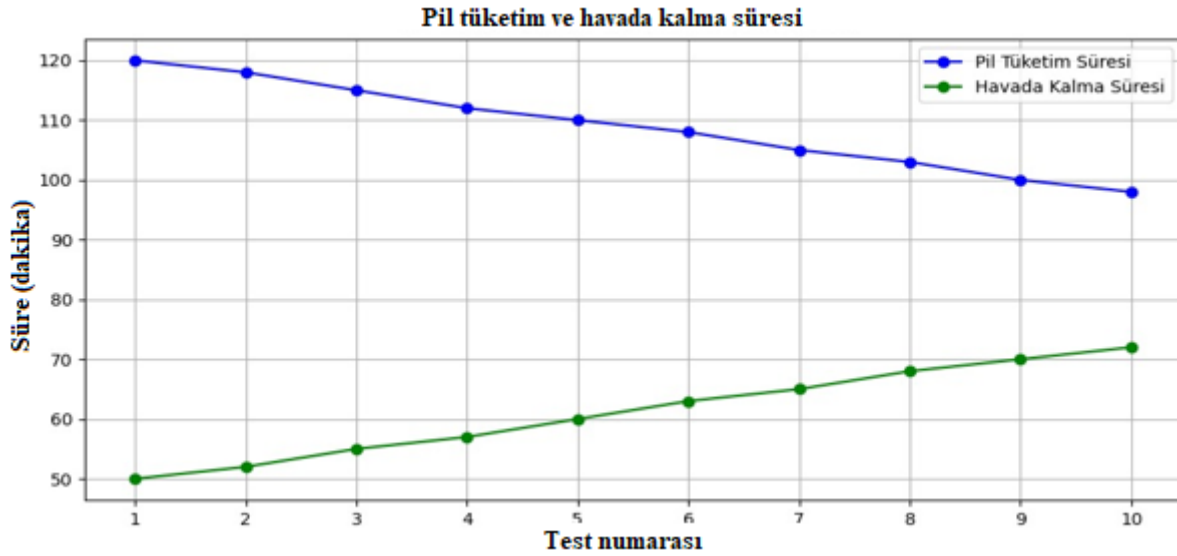
Şekil 16. Uçarken kanatın havalandırma açısı (Ventilation angle of the wing while flying)

Robotik casus kuşun uçuş esnasında manevra sırasında 10 adet performans test aşamasında sağa sola dönerken kanadın havada eğim yapma açısı değerleri Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Manevra sırasında sağa sola dönerken kanadın havada eğim yapma açısı

Robotik casus kuşun uçuş esnasında 10 adet performans test aşamasında pil tüketim miktarı değerleri Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Uçuş esnasında pil tüketim miktarı (Battery consumption during flight)

4. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Robotik Casus Kuş Tasarımı ve İmalatı yapılan Robotik Kuş prototipinin gövde, kuyruk, çark ve bağlantı elemanları imalatı 3B Yazıcı ile Raspberry Pi 4 ile de cihaz kontrol yazılımı yapılan çalışma ile sınır ötesi operasyonlarda kullanılabilir bir hedef tespit sistemi yapılabilmektedir. Bu hedef tespit sistemi Raspberry Pi 4 ile yapılmaktadır. Böylece ortaöğretim ve yükseköğretim öğrencilerine yönelik eğitim amaçlı kullanılabilirliği gösterilmiştir. Uçuş aşamasında kameranın aldığı görüntüler kontrol ekranına verilerek başarılı bir şekilde takip yapılabilmektedir. Böylece askeri personel çıkarmadan istenilen şekilde hedef tespit ve takibi yapılabilmektedir. Gerçekleştirilen Robotik Casus Kuş prototipinde 3B baskı teknolojisinin kullanımı ile öğrencilerde 3B düşünebilme kabiliyeti, analitik düşünme becerilerin geliştirilmesi ve proje tabanlı öğrenim kazanımları elde edilmiştir.

Bundan sonraki yapılacak olan İHA, Drone ve Ornihopter projelerinde yapılan çalışmamız diğerlerine bir yol açacaktır. Robotik Casus Kuşun kamufle olup gerçek bir kuşu andırması sınırlarımızı korumak için bir gözetim ve izleme sistemi yapılabileceğini göstermiştir. Robotik Casus Kuş İHA/SİHA ve dronlara göre daha sessiz çalışarak daha iyi kamufle olabilmektedir. Buda diğer benzeri projelerden farklı ve operasyonlarda kullanılabilirliğini göstermiştir. Robotik casus kuşun uçuş kontrol algoritmalarının optimizasyonu, stabil uçuşlar için kritik önem taşımaktadır. Yapılacak ilerleyen çalışmalarda, farklı hava koşullarında ve değişken rüzgâr şartlarında daha güvenilir performans için algoritmaların daha fazla geliştirilmesi gerekmektedir. Robotik casus kuşun operasyonel menzilini genişletmek, gözetim ve keşif operasyonlarında etkinliği artırabilir. Kuşun doğal ortamlara uyum sağlaması olumlu bir özellik olsa da farklı iklim ve çevresel koşullar göz önünde bulundurulmalıdır. İleriye yönelik olarak, küçük boyutlu kameraların ve enerji depolama çözümlerinin daha fazla geliştirilmesi, kuşun performansını ve görev süresini artırabilir.

5. Teşekkür (Acknowledgements)

Çalışma 1919B012304230 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar (References)

- [1] R. Autar, J. Walker, Design and optimization of flapping wing mechanisms, Journal of Aircraft 44 (4) (2007) 1155–1165.
- [2] C. Akan, P.C. Murphy, Development of a flapping wing micro air vehicle: From concept to demonstration, Journal of Field Robotics 27 (3) (2010) 335–347.

- [3] W. Shyy, H. Aono, C.K. Kang, Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity, *Progress in Aerospace Sciences* 44 (3) (2008) 214–232.
- [4] Z.J. Wang, Aerodynamics of flapping flight with application to insects and micro air vehicles, *Journal of Fluids and Structures* 20 (4) (2005) 491–509.
- [5] J.M. Perez, L.G. Torres, P.H. Oosthuizen, Design and construction of an ornithopter, *IEEE Transactions on Robotics* 31 (2) (2015) 432–445.
- [6] P. Mahouti, 3 boyutlu yazıcı teknolojisi ile bir mikroşerit yama antenin maliyet etkin üretimi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 7 (3) (2019) 473–479.
- [7] N. Hopkinson, R. Hague, P. Dickens, Introduction to rapid manufacturing, in: *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*, first ed., John Wiley & Sons, Hoboken, 2006, pp. 1–2.
- [8] G.N. Levy, R. Schindel, J.P. Kruth, Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (im) technologies: State of the art and future perspectives, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (2) (2003) 589–609.
- [9] J.P. Kruth, M.C. Leu, T. Nakagawa, Progress in additive manufacturing and rapid prototyping, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47 (2) (1998) 525–540.
- [10] E.C. Santos, M. Shiomi, K. Osakada, T. Laoui, Rapid manufacturing of metal components by laser forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (12) (2006) 1459–1468.
- [11] E. Balasubramanian, G. Surendar, L.J. Yang, W.C. Wang, C.Y. Jen, S. Salunkhe, Fabrication of flapping wing mechanism using various polymer-based 3D printing techniques and aerodynamic performance evaluation, *Journal of Materials Engineering and Performance* 32 (4) (2023) 1856–1873.
- [12] S. Ganesan, B. Esakki, L.J. Yang, D. Rajamani, M. Silambarasan, K. Raghunath, Fabrication of flapping-wing micromechanism assembly using selective laser melting and aerodynamic performance measures, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 14644207211035422 (2021).
- [13] A. Özlek, İnsansız hava araçlarında elektro-optik sistem seçimi için bütünlük kaba küme tabanlı BWM-COPRAS yaklaşımı, Master's thesis, Necmettin Erbakan University, Turkey, 2023.
- [14] G.B.A. Ronconi, T.J. Batista, V. Merola, The utilization of unmanned aerial vehicles (UAV) for military action in foreign airspace, *UFRGS Model United Nations Journal* 2 (2014) 137–180.
- [15] M. Peker, B. İnci, E. Musaoğlu, H. Çobanoğlu, N. Kocakır, Ö. Karademir, İnsan sayma sistemi için gömülü cihazlarda derin öğrenme mimarilerinin performans analizi.
- [16] M. Piras, N. Grasso, A. Abdul Jabbar, UAV photogrammetric solution using a Raspberry Pi camera module and smart devices: Test and results, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42 (2017) 289–296.
- [17] T. Kara, A. Yönetken, Robot arm design and control with Raspberry Pi.
- [18] D. Molloy, *Exploring Raspberry Pi: Interfacing to the Real World with Embedded Linux*, John Wiley & Sons, 2016.
- [19] N. Djema, Security and home automation based on Raspberry Pi, Arduino Uno and Node MCU.
- [20] R. Krauss, Real-time Python: Recent advances in the Raspberry Pi plus Arduino real-time control approach, in: *2020 American Control Conference (ACC), IEEE, 2020*, pp. 2088–2093.
- [21] J.Á. Ariza, S.G. Gil, RaspyLab: A low-cost remote laboratory to learn programming and physical computing through Python and Raspberry Pi, *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje* 17 (2) (2022) 140–149.
- [22] B. Aksoy, M. Yücel, H. Sayın, N. Aydın, Ö. Ekrem, Hurma meyvesindeki kalite kontrol işlemlerinin yapay zeka ile tahminlenmesi, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9 (4) (2023) 70–81.

- [23] S. Srigrarom, W.L. Chan, Ornithopter type flapping wings for autonomous micro air vehicles, *Aerospace* 2 (2) (2015) 235–278.
- [24] F.G. Bermudez, R. Fearing, Optical flow on a flapping wing robot, in: 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2009, pp. 5027–5032.



DÜŞÜK GWP AKIŞKANLI ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI TERMODİNAMİK ANALİZİ

*Erkan DİKMEN¹, İsmail İÇER²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri
Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta

(Geliş/Received: 23.08.2024, Kabul/Accepted: 15.11.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Bu çalışmada, düşük sıcaklıklardaki ısı enerjisi (yenilebilir enerji ve endüstriyel atık ısı) kaynaklarından elektrik üretebilecek organik Rankine çevrimi (ORC) sistemi için enerji analizi gerçekleştirilmiştir. ORC sistemlerinin performansını en önemli faktör iş akışkanıdır. R134a alternatif daha çevreci R512A ve R513A akışkanların ORC sistemi için teorik analiz yapılmıştır. Sistemin performans analizinde sabit buharlaştırıcının kapasitesinde farklı sıcaklıklar için her üç akışkan için karşılaştırma performans analizi gerçekleştirilmiştir. ORC sisteminde en yüksek verim sağlayacak akışkan R512A olduğu tespit edilmiştir. R512A akışkan, 65 °C buharlaştırıcı, 32 °C yoğunlaştırıcı sıcaklığında sistemin verimi %6.03 tespit edilmiştir. Ayrıca, R513A akışkanından %7.9 diğer R134a akışkanından %10.1 daha fazla verime sahip olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Organik Rankine Çevrimi, Yeni Nesil Akışkanlar, Termodinamik Analiz.

COMPARATIVE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ORGANIC RANKINE CYCLES WITH LOW GWP FLUID

ABSTRACT

In this study, an energy analysis for an organic Rankine cycle (ORC) system that can generate electricity from low temperature heat energy sources (renewable energy and industrial waste heat) was performed. The most important factor in the performance of ORC systems is the working fluid. Theoretical analysis was made for the ORC system of R134a alternative more environmentally friendly R512A and R513A fluids. In the performance analysis of the system, a comparison performance analysis was performed for all three fluids for different temperatures at constant evaporator capacity. It was determined that R512A is the fluid that will provide the highest efficiency in the ORC system. The efficiency of the system was determined as 6.03% at R512A fluid, 65 °C evaporator and 32 °C condenser temperature. In addition, it was found to have 7.9% more efficiency than R513A fluid and 10.1% more efficiency than R134a fluid.

Keywords: Organic Rankine Cycle, New Generation Fluids, Thermodynamic Analysis.

1. Giriş (Introduction)

Bilim ve teknolojinin gelişmesi ile artan nüfus ve nüfusun daha iyi bir yaşam kalitesine yönelik eğilimi, gün geçtikçe enerji gereksinimleri artırmaktadır. Buna bağlı olarak Konvansiyonel birincil enerjinin (kömür, petrol, doğal gaz) artan tüketimi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yeterli seviyede olmaması sebepleriyle çevresel sorunlar artmaktadır. Düşük ısı kaynağından elektrik enerjine dönüştürmek için en etkili yöntemlerden biri organik Rankine çevrimidir. Organik Rankine çevriminin (ORC) ısı kaynağı, atık ısı, biokütle, jeotermal enerji ve güneş enerjisi gibi düşük ve orta dereceli ısı kaynaklarıdır. ORC çevrimlerinde, iş akışkanı su kullanılan Rankine çevrimlerinin aksine sudan daha düşük kaynama sıcaklığına sahip organik soğutucu akışkanlar kullanılmaktadır. Bu akışkanların kimyasal bileşimine bağlı olarak, kloroflorokarbonlar (CFC), hidrokloroflorokarbonlar (HCFC), hidroflorekarbonlar (HFC), hidrofloroeterler (HFE), hidrofloroolefinler (HFO), hidrokarbonlar (HC) ve doğal soğutucular (NH₃, CO₂, vb.) sınıflandırılır. ORC iş akışkanlarından CFC ve HCFC grubu akışkanlar çevreye zararlı olduğu için Kyoto ve Montreal protokollerin de alınan kararlarla 2010 yılında yasaklanmıştır. Kısmen zararlı HFC grubu akışkanlar 2018 Kigali Değişikliği yönetmeliğine göre kullanımı %80 den fazla azaltılması planlanmıştır [1].

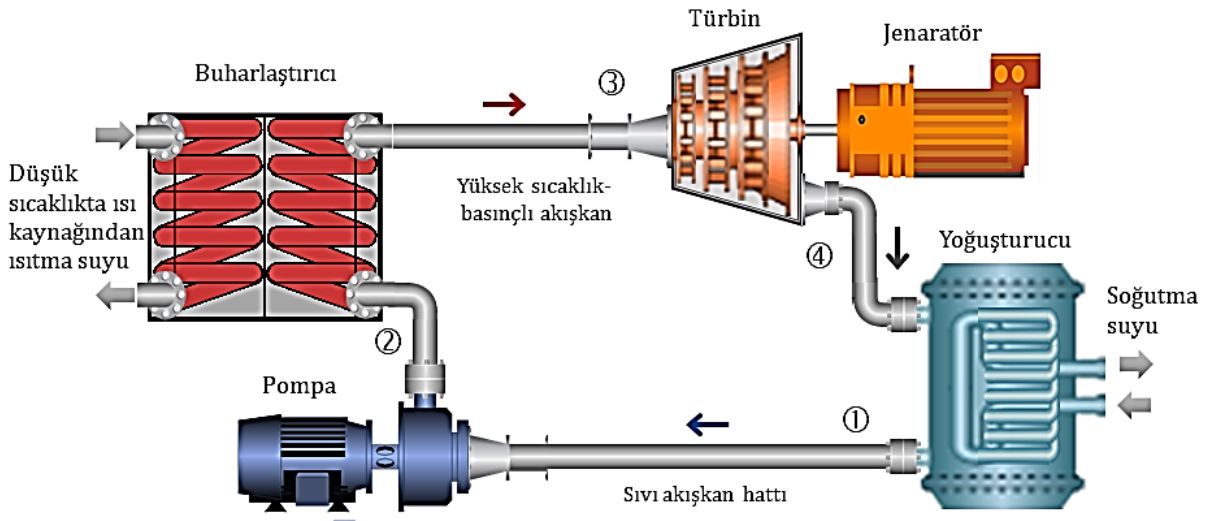
Çevre dostu, yeni nesil soğutucu akışkanların geliştirilmesiyle beraber ORC konusunda çok sayıda araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Invernizzi (2016) ve ark. yaptıkları çalışmada, ara kızdırmalı ORC sisteminde R134a yerine R1234yf ve R1234ze(E) kullanılmasında performans değişimini araştırmışlardır. Aspen Plus yazılımıyla yaptıkları analiz sonucunda türbin gücünün HFO-1234yf ve HFO-1234ze(E) kullanan çevrimler için sırasıyla yaklaşık %20 ve %28 daha düşük sonuçlar verdiğini ve 200-250 °C sıcaklıklarda R1234yf akışkanın çevrimde kullanılmasının uygun olduğunu tespit etmişlerdir [2]. Ancona (2022) ve ark., bir ailenin enerji ihtiyaçlarını karşılayabilecek güçte güneş enerjisi destekli mikro ORC sistemini R134a, R1234yf, R1234ze(E), R1243zf, R513A ve R515A akışkanlarıyla performans analizi yapmışlardır. Yıllık talep edilen enerjinin % 39 unu R134A akışkanlı ORC sistemi karşılarken R1234yf akışkanı %16 ve R513A karışım akışkanı %17.5 karşıladığını analiz sonucunda tespit etmişlerdir [3]. Kajurek ve ark., (2019), Düşük sıcaklıkta (80~100 °C) atık ısıyı kullanan ORC sistemine uygun 10 farklı çalışma akışkanı (R134a, R152a, R227ea, R236fa, R245fa, R290, R600a, R717, R1234yf, R1234ze) belirlemişlerdir. Teorik analiz sonucunda en iyisi %5.68 verim ile R717 (amonyak) olduğunu tespit etmişlerdir. R245fa akışkanla 1 kW'lık ORC sisteminin deneysel veriler ile yaptıkları analizde sistemin %2.51 ısı verimle çalıştığını tespit etmişlerdir [4]. Saleh (2016) çalışmasında, düşük sıcaklıktaki ısı enerjisine uygun organik Rankine çevrimi ve buhar sıkıştırma soğutma çevrimli (ORC-VCR) birleşik sistemin, 10 adet çalışma akışkanıyla (R1270, R290, RC318, R236fa, R600a, R236ea, R600, R245fa, R1234yf ve R1234ze(E)) performansını araştırmıştır. Analizler sonucunda en performanslı akışkanların R245fa ve R600 olduğunu tespit etmiştir. Akışkanlardan, R245fa'nın yanıcı olmadığını, R600'ün daha çevreci olduğu çalışmada vurgulanmıştır [5]. Saleh (2018) çalışmasında, düşük sıcaklıktaki ısı enerjisine uygun organik Rankine çevrimi ve buhar sıkıştırma soğutma çevrimli (ORC-VCR) birleşik sistemde, 14 adet çalışma akışkanıyla (R600, R600a, R601, R601a, R602, RC318, C5F12, R152a, R236ea, R236fa, R245ca, R245fa, RE245cb2 ve R1234ze(E)) farklı çalışma parametrelerinde sistemin performansını araştırmıştır. 70 °C ila 110 °C sıcaklık aralığında düşük sıcaklıklar için en uygun iş akışkanı R602 olduğunu ve sistem veriminin en yüksek %53.8 olduğunu tespit etmiştir [6]. Karadağ (2022) tez çalışmasında, 90 °C düşük sıcaklıkta çalışan ORC sisteminin tüm ekipmanların çalışma performansını analiz edilebileceği MATLAB tabanlı "ORC Designer" programı geliştirmiştir. ORC sisteminde 9 farklı akışkan (R218, n-pentan, izo-pentan, R245fa, R123, n-bütan, R236fa, izo-bütan, R134a) için sistem üzerinde ayrı ayrı performans analizleri gerçekleştirmiştir. En yüksek net verim %4.32 sahip n-pentan akışkanı tespit etmiştir [7].

Son yıllarda çevresel zararları daha az olduğu için Hidrofloroolefin (HFO) grubu soğutucu akışkanlı ORC sistemleriyle ilgili literatür çalışmaları özetlenmiştir. Bu çalışmada, çevreye verdiği zararlardan dolayı gelecekte tamamen yasaklanacak R134a akışkanına alternatif olarak geliştirilmiş R512A ve R513A akışkanlarıyla karşılaştırmalı performans araştırılmıştır [8].

2. ORC Sistemi Termodinamik Analiz (ORC System Thermodynamic Analysis)

Organik Rankine Döngüsü (ORC), geleneksel Rankine çevriminin verimli olmadığı orta-düşük sıcaklıktaki ısıyı mekanik işe dönüştürmek için kullanılan bir termodinamik çevrimidir. Çevrimde organik bir iş akışkanı kullanılır. ORC dört temel bileşenden oluşur (Şekil 1): pompa, buharlaştırıcı (kazan, ısı eşanjörü), türbin ve yoğunlaştırıcı. Çevrim, sıvı haldeki iş akışkanının pompa tarafından

basıncının artırılmasıyla başlar, daha sonra buharlaştırıcıda harici bir enerji kaynağı tarafından ısıtılır. Basıncı ve sıcaklığı artmış olan iş akışkanını, mekanik iş üretmek için türbinde genişleyerek buharlaşır. Ardından akışkan, kondansatörde sıvı haline geri yoğunlaştırılır ve çevrim tamamlanır [9].



Şekil 1. Organik Rankine Çevrimi (Organic Rankine Cycle) [9].

ORC sisteminde iş akışkanı, çevrimin enerji üretme kapasitesini ve verimliliğini belirleyen en önemli husustur. İş akışkanı, ilk başta ısı kaynağından aldığı ısı enerjisini absorbe ederek buharlaşır, türbinde genişleyerek iş üretir ve yoğusturucuya geldiğinde sahip olduğu ısı enerjini atarak sıvılaşır. Bu süreçte pompa akışkanın basıncını artırır. ORC sisteminde iş akışkanının belirlenmesi, sistemin verimliliği ve çevresel etkiler en önemli faktörlerdir. Bununla beraber, akışkanın güvenlik sınıfı, kimyasal sahip olduğu özellikler ve kolay-ekonomik elde edilebilir olması, başarılı ve sürdürülebilir bir ORC sistemi tasarımı için kritik öneme sahiptir. Çalışmada performans analizi için kullanılan iş akışkanlarının özellikleri Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. İş akışkanlarının özellikleri (Features of work fluids) [10,11]

İş Akışkanları	Moleküler Ağırlık (kg/kmol)	Kaynama Noktası (°C)	Kritik Sıcaklık (°C)	Güvenlik Sınıfı	ODP	GWP (100yıl)
R134a	102.0	-26.0	101.1	A1	0	1300
R513A	108.4	-29.2	97.70	A1	0	573
R512A	67.20	-24.0	113.51	A2	0	185

A1: Alevlenme özelliği yok olduğunu ifade eder.

A2: Düşük yanıcı olduğunu ifade eder.

ODP: Ozon delme/tüketme potansiyeli (Ozone Depletion Potential)

GWP: Küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potential)

ORC sisteminin termodinamik analizinde tüm sistem elemanları sürekli-akışlı açık sistem olarak analizi yapılır. Genel olarak enerjini denkleği [9];

$$(\dot{Q}_{giren} - \dot{Q}_{çıkan}) + (\dot{W}_{pompa} - \dot{W}_{türbin}) = \dot{m}_r(h_{çıkan} - h_{giren}) \quad (1)$$

ORC’nin, pompa, buharlaştırıcı, türbin ve kondenserden dört temel sistem elemanları için enerji dengesi ve verimi ile ilgili denklemler Çizelge 2’deki gibidir. ORC’nin termodinamik analizinde

- Kazan ve yoğusturucu da iş etkileşimi yoktur
- Türbin ve pompa meydana gelebilecek hal değişimleri izentropik kabul edilmiştir.

Çizelge 2. ORC sisteminin termodinamik eşitlikleri (Thermodynamic equations of the ORC system) [9].

Bileşen	Denklem
Buharlaştırıcı (kW)	$\dot{Q}_{buharlaştirıcı} = \dot{m}_r(h_3 - h_2)$ (2)
Türbin (kW)	$\dot{W}_{Türbin} = \dot{m}_r(h_3 - h_4)$ (3)
Yoğuşturucu (kW)	$\dot{Q}_{yoğuşturucu} = \dot{m}_r(h_4 - h_1)$ (4)
Pompa (kW)	$\dot{W}_{pompa} = \dot{m}_r(h_2 - h_1) = \dot{v}_r(P_2 - P_1)$ (5)
Verim	$\frac{\dot{W}_{Türbin} - \dot{W}_{pompa}}{\dot{Q}_{buharlaştirıcı}} = \frac{\dot{W}_{Net}}{\dot{Q}_{buharlaştirıcı}}$ (6)

P : Basınç (kPa)
h : Entalpi (kJ/kg)
m_r: İş akışkanı debisi (kg/s)
v_r : İş akışkanı hacimsel debi (m³/s)

Küçük ölçekli enerji santrallerinde kullanılan ORC sisteminin çalışma aralığına göre belirlenmiş parametreler ve varsayımlar Çizelge 3’te sunulmuştur. ORC’nin R-134a, R152A ve R153A için her bir akışkanının kullanıldığı kabulü ile teorik olarak analizi yapılmıştır. Hesaplamalarda Engineering Equation Solver (EES) programı kullanılmıştır [8].

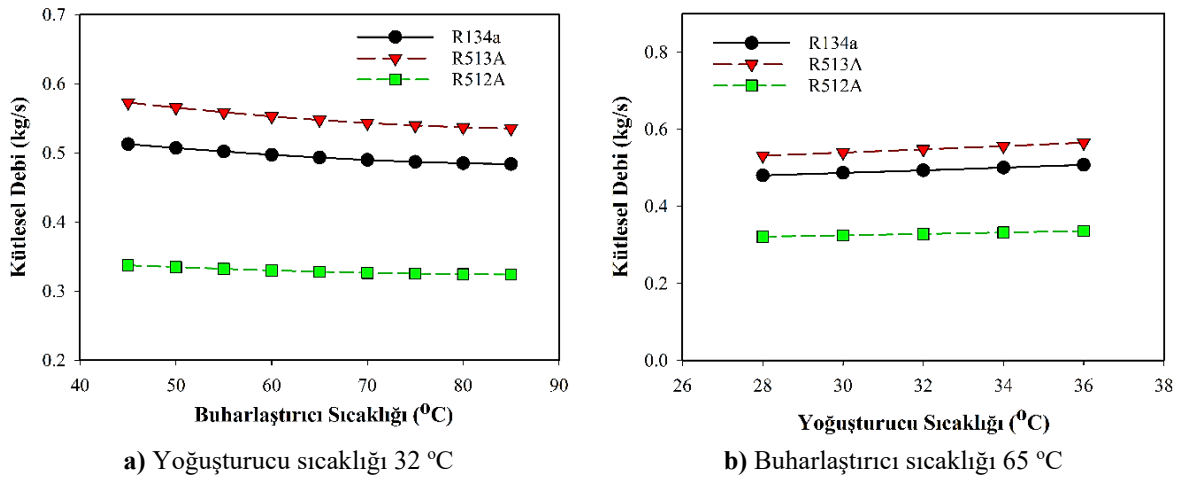
Çizelge 3. Termodinamik analiz için kabuller (Assumptions for thermodynamic analysis)

Açıklama	Değerler
Buharlaştırıcı kapasitesi (kW)	100
Buharlaşma sıcaklığı (°C)	45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85
Yoğuşturucu sıcaklıkları (°C)	28, 30, 32, 34, 36

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

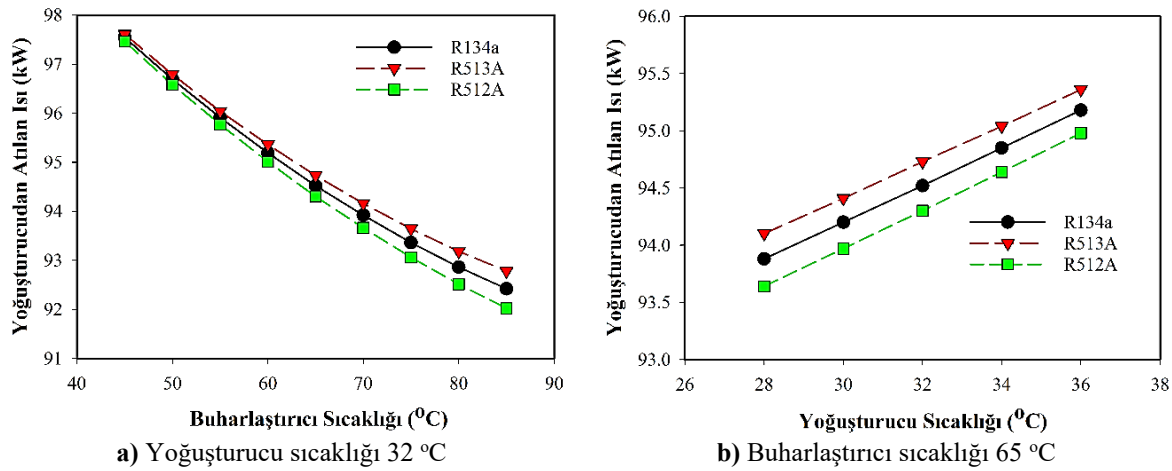
R134a, R513A ve R512A akışkanlarının analiz sonuçları, ortalama yoğuşma sıcaklığı 32 °C göre 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 ve 85 °C buharlaşma sıcaklığında değişimler ile ortalama buharlaşma sıcaklığı 32 °C göre 28, 30, 32, 34 ve 36 °C yoğuşturucu sıcaklığında değişimlere ait grafikler sunulmuştur.

ORC sistemin verimliliği, ekonomikliği ve tasarımı üzerinde debi önemli bir faktördür. Akışkan debisinin yüksek olması türbinde güç üretimi artması üzerine olumlu etkisi varken pompadan tükettiği enerjiyi artırmaktadır. Ayrıca sistemde kullanılacak organik iş akışkanının miktarı fazla olması durumunda akışkan maliyeti olarak karşımıza çıkar. Şekil 2 de Buharlaştırıcıda başka bir değişle ısı kaynağının sıcaklığı artıkça ve yoğuşturucunun sıcaklığı düştükçe iş akışkanlarının debisi azaldığı görülmektedir. Sıcaklığa bağlı soğutucu akışkanlarının debilerin değişimi R513A için 0.573 – 0.535 kg/s, R134a için 0.513 – 0.484 kg/s ve R512A için 0.337 – 0.324 kg/s arasında değişmektedir.



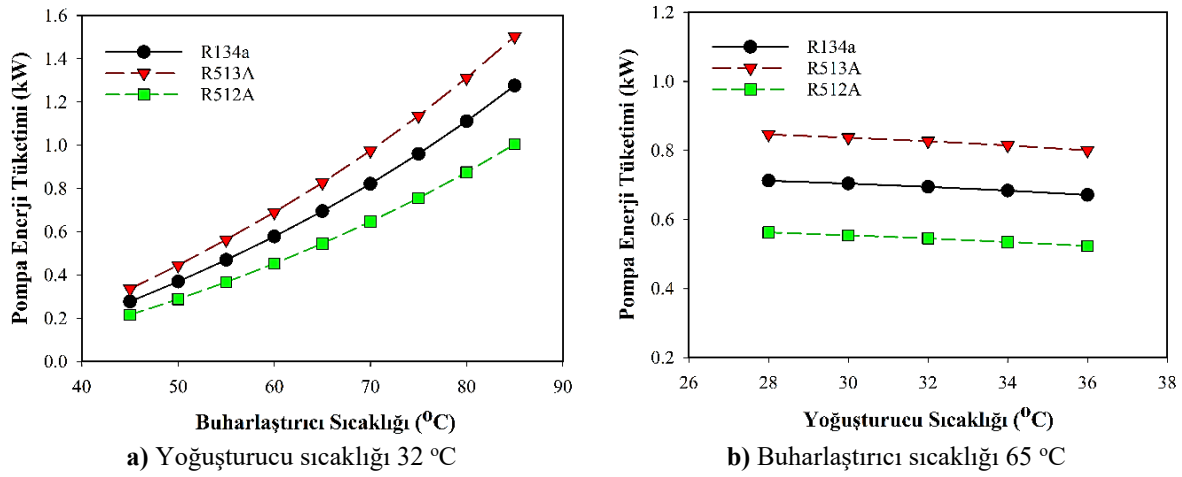
Şekil 2. Yoğuşturucu/buharlaştırıcı sıcaklığına bağlı akışkanın debi değişimi (Condenser/evaporator temperature dependent fluid flow rate variation)

Yoğuşturucudan atılan ısı, ORC sistemindeki iş akışkanın soğutularak sıvılaştırılması için gerekli enerjiyi ifade eder. Akışkan debisi azaldıkça yoğuşturucudan atılan ısı miktarı da azalır. Başka bir deyişle, yoğuşturucuya ulaşan buharın enerji içeriğini düşürür, bu da verimliliği yükseltir. Sabit buharlaştırıcı kapasitesi, 32 °C yoğuşturucu sıcaklığında, buharlaştırıcı (ısı kaynağı) sıcaklığının artmasıyla yoğuşturucudan atılan ısı azaldığı Şekil 3 görülmektedir. 32 °C yoğuşturucu sıcaklığında 85 °C buharlaştırıcı sıcaklığında R134a için 92.42 kW, R513A için 92.78 kW ve R512A için 92.02 kW en düşük değerlere sahiptir. 65 °C buharlaştırıcı sıcaklığında, yoğuşturma sıcaklığı arttıkça yoğuşturucudan atılan ısı miktarı artmaktadır. Buna göre en düşük yoğuşturucudan atılan ısı, 28 °C yoğuşturma sıcaklığında R513A için 95.36 kW, R134a için 95.18 kW ve R512A için 94.98 kW olduğu tespit edilmiştir.



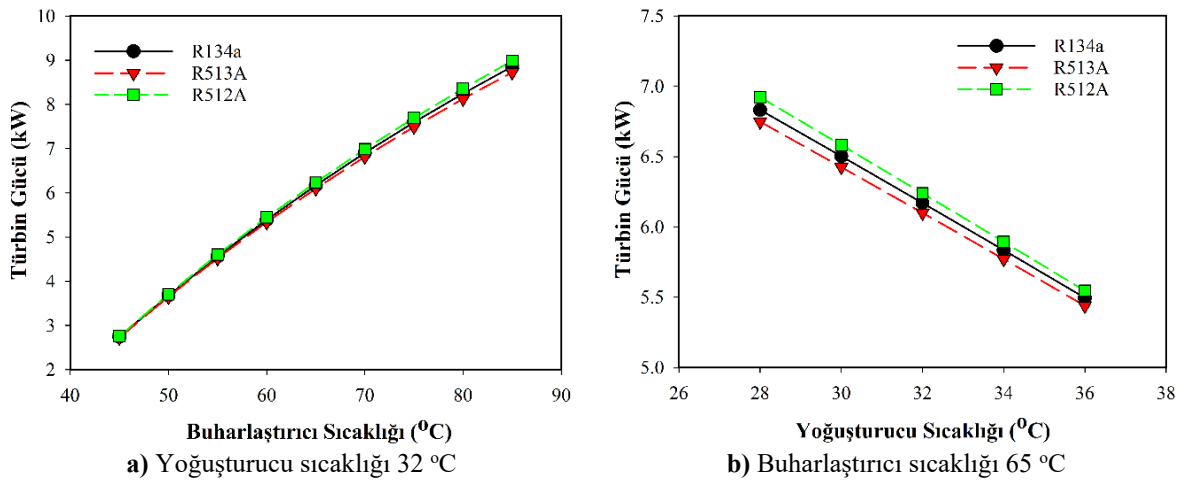
Şekil 3. Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkan sıcaklığına bağlı yoğuşturucudan atılan ısı miktarının değişimi (Variation amount of heat removed from condenser depending on condenser/evaporator flow temperature)

OCR sisteminde pompanın tükettiği enerji debiye ve basınca bağlıdır. Şekil 4 de buharlaştırıcıya ve yoğuşturucu sıcaklığına bağlı pompanın enerji tüketim grafikleri görülmektedir. 32 °C yoğuşturucu sıcaklığında pompanın tükettiği enerji, buharlaştırıcı sıcaklığı arttıkça arttığı görülmekte ve en düşük enerji tüketiminin 45 °C buharlaştırıcı sıcaklığında R513A için 0.335 kW, R134a için 0.277 kW ve R512A için 0.215 kW tespit edilmiştir. 65 °C buharlaştırıcı sıcaklığında pompanın tükettiği enerji, yoğuşturma sıcaklığı arttıkça azaldığı görülmekte ve en düşük enerji tüketiminin 36 °C yoğuşturma sıcaklığında R513A için 0.801 kW, R134a için 0.671 kW ve R512A için 0.523 kW tespit edilmiştir.



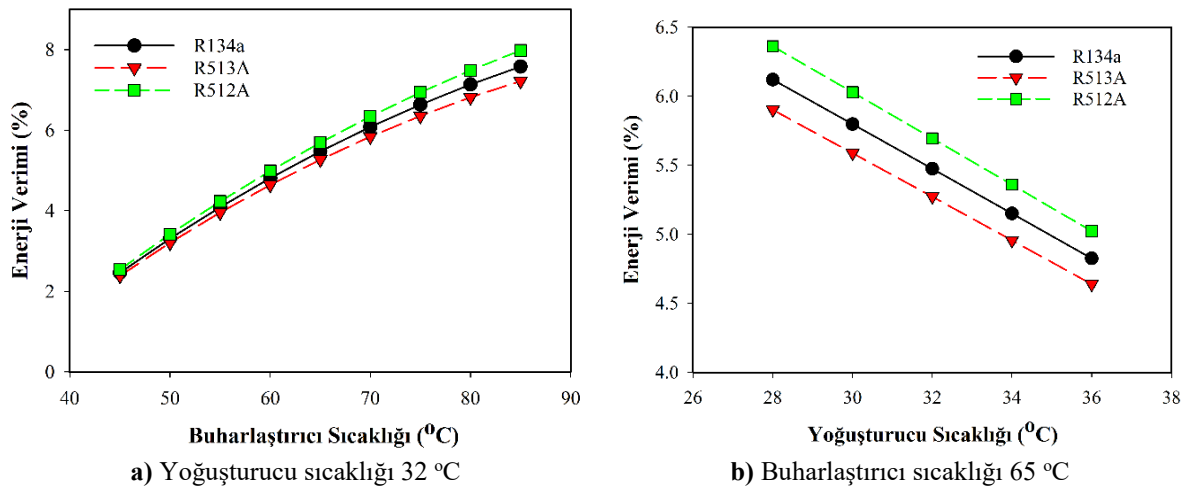
Şekil 4. Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkanın sıcaklığına bağlı pompanın enerji tüketimi (Pump energy consumption depending on condenser/evaporator flow temperature)

ORC sisteminde enerji üretimi türbinde gerçekleşir. Türbine giren akışkanın entalpisi ne kadar yüksek olursa ve türbinden çıkan akışkanın entalpisi düşük olursa türbinin çıkışında daha yüksek bir enerji üretimi sağlanır. Buharlaştırıcının ve yoğuşturucunun sıcaklığa bağlı türbin gücü değişimleri Şekil 5 de görülmektedir. 32 °C yoğuşma sıcaklığı buharlaştırıcı sıcaklığının artmasıyla türbin gücü artmakta ve üç akışkanda üretilen güç birbirine yakındır. Buna göre akışkanların türbin gücünün en yüksek olduğu 85 °C buharlaşma sıcaklığında 8.7 – 9 kW arasında türbin gücü üretildiği tespit edilmiştir. 65 °C buharlaştırıcı sıcaklığında, yoğuşma sıcaklığı artıkça türbin gücü azalmaktadır. Türbin güçleri tüm akışkanlar için birbirine yakın ve en fazla türbin gücünün elde edildiği 28 °C yoğuşma sıcaklığında 6.7 – 6.9 kW türbin gücü üretildiği tespit edilmiştir.



Şekil 5. Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkanın sıcaklığına bağlı türbin gücü (Condenser/evaporator flow temperature dependent turbine power)

ORC sistemindeki enerji (ısı) verim analizi, çevrimin enerji performansının göstergesidir. Sistemin buharlaşma ve yoğuşma sıcaklarına bağlı enerji verim değişim şekil 6 görülmektedir. 32°C yoğuşma sıcaklığında buharlaştırıcı sıcaklığı artıkça verim artmıştır. En yüksek verimin elde edildiği 85°C buharlaşma sıcaklığında verim, R512A için 0.0079, R134a için 0.0076 ve R513A için 0.0072 tespit edilmiştir. 65°C buharlaşma sıcaklığında, yoğuşturucu sıcaklığı artıkça verim azalmaktadır. En yüksek verimin elde edileceği 28°C yoğuşturucu sıcaklığında verim, R512A için 0.0064, R134a için 0.0061 ve 0.0059 bulunmuştur.



Şekil 6. Yoğuşturucuda/buharlaştırıcıda akışkanların sıcaklığına bağlı ORC enerji verimi (ORC energy efficiency depending on fluid temperature in the condenser/evaporator)

4. Sonuç (Results)

Çalışmada, R134a alternatif olarak geliştirilmiş R512A ve R513A iş akışkanlarının ORC sistemi için her üç akışkan için karşılaştırmalı performansları incelenmiştir. Her üç akışkanın sıcaklığa göre türbin gücü birbirlerine yakın olmasına rağmen sistemin verimi incelendiğinde en iyi performans R512A olduğu tespit edilmiştir. R513 A akışkanın performansı R134a dan düşük olduğu görülmüştür. OCR sisteminin ortalama buharlaştırıcı (65°C) ve yoğuşturucu (32°C) sıcaklığında;

- Kütleli debisi en az olan R512A akışkanı 0.3279 kg/s dir. R512A akışkanı R134a akışkanından %33.5, R 513A akışkanından % 40.1 daha az debiye sahiptir.
- Yoğuşturucudan atılan ısı en az olan R512A akışkanı 94.3 kW'dır. Diğer akışkanlarında yoğuşturucudan atıkları ısı miktarı çok yakın değerde olduğu tespit edilmiştir.
- Pompanın enerji tüketimi en az olan R512A akışkanı 0.545 kW'dır. R512A akışkanı R134a akışkanından %21.5, R 513A akışkanından % 34.1 daha az pompa enerjisine ihtiyaç duyuyor.
- Türbin gücü en yüksek R512A akışkanı 6.24 kW'dır. Diğer akışkanlar içinde türbin gücü birbirine çok yakın tespit edildi.
- Enerji verimliliği en yüksek R512A akışkanı % 6.03'dür. R512A akışkanı R134a akışkanından %10.1, R 513A akışkanından % 7.9 daha fazla verime sahiptir.

OCR sistemleri, düşük sıcaklıklarda yenilenebilir ve atık ısı enerjilerinden en verimli elektrik üretilen sistemlerin başında gelir. ORC sistemin güç üretiminde en önemli ekipman iş akışkanıdır. İş akışkanların hem verimli hem de çevreye zarar vermeyenler geliştirildikçe performans analizler devam edecektir.

5. Teşekkür (Acknowledgements)

Bu çalışma, “Düşük GWP’li akışkanlarla çalışan organik rankine çevriminin termodinamik ve çevresel analizi” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiş olup ISUBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’ne sağladığı imkânlardan dolayı teşekkür ederiz.

6. Kaynaklar (References)

- [1] E.A. Heath, Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Kigali Amendment), *Int. Leg. Mater.* 56 (2017) 193–205. doi:10.1017/ilm.2016.2.
- [2] C.M. Invernizzi, P. Iora, M. Preißinger, G. Manzolini, HFOs as substitute for R-134a as working fluids in ORC power plants: A thermodynamic assessment and thermal stability analysis, *Appl. Therm. Eng.* 103 (2016) 790–797. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.04.101.
- [3] M.A. Ancona, M. Bianchi, L. Branchini, A. De Pascale, F. Melino, A. Peretto, C. Poletto, N. Torricelli, Solar driven micro-ORC system assessment for residential application, *Renew. Energy* 195 (2022) 167–181. doi:10.1016/j.renene.2022.06.007.
- [4] J. Kajurek, A. Rusowicz, A. Grzebielec, W. Bujalski, K. Futyma, Z. Rudowicz, Selection of refrigerants for a modified organic Rankine cycle, *Energy* 168 (2019) 1–8. doi:10.1016/j.energy.2018.11.024.
- [5] B. Saleh, Parametric and working fluid analysis of a combined organic Rankine-vapor compression refrigeration system activated by low-grade thermal energy, *J. Adv. Res.* 7 (2016) 651–660. doi:10.1016/j.jare.2016.06.006.
- [6] B. Saleh, Energy and exergy analysis of an integrated organic Rankine cycle-vapor compression refrigeration system, *Appl. Therm. Eng.* 141 (2018) 697–710. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.06.018.
- [7] M. Karadaş, Düşük entalpili jeotermal kaynakları kullanarak organik rankine çevrimi elektrik santrali tasarımı, Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, 2022.
- [8] İ. İçer, Düşük GWP'li akışkanlarla çalışan organik rankine çevriminin termodinamik ve çevresel analizi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, 2024.
- [9] Y. Cengel, M. Boles, M. Kanoğlu, *Thermodynamics: an engineering approach*, (2011). https://www.academia.edu/download/55284132/Solution_Manual_8th_Ed.pdf (erişim 26 Nisan 2024).
- [10] A. Mota-Babiloni, P. Makhnatch, R. Khodabandeh, J. Navarro-Esbrí, Experimental assessment of R134a and its lower GWP alternative R513A, *Int. J. Refrig.* 74 (2017) 680–686. doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.11.021.
- [11] EcoGas, R512A Physical Properties, (y.y.). <https://ecogas.ie/product/r512a-ashrae-listed-high-purity-alternative-refrigerant-refill/>.



SHEAR STRENGTH PARAMETERS AND DEFORMABILITY PROPERTIES OF SILICATE-BASED RESIN ADDED SAND-TYPE SOIL SPECIMENS

*Eren KÖMÜRLÜ¹ 

¹Giresun University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Giresun

(Geliş/Received: 06.09.2024, Kabul/Accepted: 17.12.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ABSTRACT

In this study, the shear strength, uniaxial compressive strength (UCS) values and deformability properties of silicate-based polymer resin added silty sand type soil specimens were examined through a series of experimental studies. Although the UCS and shear strength values increased, minor decreases in the internal friction angle values were measured as the resin ratio increased. It was determined that the main reason for the improvement in strength values due to the increase in resin content is the increase in cohesion values. It was found that the UCS values calculated according to the cohesion and internal friction angle parameters of the Mohr & Coulomb failure criterion (UCSc) were 2.6-3.0 times lower than the values obtained from the direct UCS experiment. According to this finding, it was concluded that the Mohr & Coulomb failure criterion is not properly usable to represent the mechanical behaviors of resin added sands. As another outcome, the ratio between UCS/UCSc slightly decreased with an increase in the resin amount. In other words, it has been determined that the Mohr&Coulomb failure criterion gives a bit more inaccurate results for the specimens with low binder contents. With the increase in the resin content ratio, significant increases were obtained in both elastic modulus and ductility properties of the samples. It has been evaluated that the silicate-based polymer resin binder is advantageous to provide significant increases in the toughness and energy absorption capacity of soils.

Keywords: Resin stabilized sands, Soil improvement, Silicate based resins, Shear box test, Compressive strengths of binder added sands.

SİLİKAT ESASLI REÇİNE KATKILI KUM TİPİ ZEMİN ÖRNEKLERİNİN KESME MUKAVEMETİ PARAMETRELERİ VE DEFORMABİLİTE ÖZELLİKLERİ

ÖZ

Bu çalışmada farklı oranlarda silikat bazlı polimer reçine eklenmiş siltli kum türü bir zeminin makaslama dayanımı, tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) değerleri ve deformabilite özellikleri bir dizi deneysel çalışma ile incelenmiştir. Reçine oranı arttıkça UCS ve makaslama dayanımı değerleri artmasına rağmen içsel sürtünme açısının azaldığı belirlenmiştir. Reçine içeriği artışına bağlı dayanım değerini iyileştiren ana etkenin kohezyon artışı olduğu tespit edilmiştir. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri ile Mohr&Coulomb yenilme ölçütüne göre hesaplanan UCS (UCSc) değerlerinin direk UCS deneyinden elde edilen değerlerden 2.6-3.0 kat düşük olduğu belirlenmiştir. Bu bulguya göre, Mohr&Coulomb yenilme ölçütünün reçineli kumları iyi temsil edemediği sonucuna varılmıştır. UCS/UCSc arasındaki oranın reçine oranı artışı ile biraz azaldığı bulunmuştur. Bir diğer ifade ile bağlayıcı içeriği düşük olan numunelerde Mohr&Coulomb yenilme ölçütünün daha hatalı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Reçine oranının artışı ile numunelerin hem elastisite modülü hem de süneklik özelliklerinde anlamlı artışlar görülmüştür. Silikat bazlı polimer reçine bağlayıcının önemli bir avantajı olarak zeminlerin tokluk ve enerji emme kapasitesi özelliklerinde önemli artışlar sağlayabildiği değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Reçine katkılı kumlar, Zemin iyileştirme, Silikat esaslı reçine, Zemin makaslama kutusu deneyi, Bağlayıcı zeminlerin sıkışma dayanımları.

1. Introduction

Polymer materials can be divided into two main groups as thermosets and thermoplastics. Thermosets are generally purchased before their polymerization in the liquid form. One or more components of thermoset polymers in the liquid form are mixed, chemically react with each other and solidify as a consequence of the polymerization reactions. Thermoset polymers are used in various geotechnical applications of spraying membranes, grouting in anchorage holes, ground improvement injections, soil mixing and etc. [1-4].

Resin additives used for ground improvement works are thermoset type chemical products used in geotechnical engineering. There are different commercial soil injection polymer material types such as silicate, polyurethane, acrylic, epoxy based ones. It is possible to find resin products with a wide range of viscosity and curing time properties depending on the purpose. It is important to choose a resin with an appropriate liquid phase time and viscosity properties depending on the details of the application. The liquid phase time, which is a few seconds in spray membrane applications, can be several minutes for resins used in ground injection applications [5-7].

Thermoset polymer resins can be injected into the soil in place or can be mixed with soils to prepare a filling material mix. Polymer materials are preferred considering their mechanical properties and their high chemical resistances which make them advantageous in terms of their service lifetimes. Another important reason for using polymer materials is their high energy absorption capacities. Engineering polymers that provide good mechanical properties are preferred because of their strength values as well as their high energy absorption capacities [8-10].

High energy absorption capacity polymers supply an advantage of improvement under both static and dynamic load conditions by providing soil reinforcement. As some polymer resins can polymerize in contact with water, novel resin types can supply another important advantage in the watery regions against conventional materials [11,12]. Resins are also usable to improve the liquefaction resistance of soils [13-15]. Due to their different advantages, the use of soil improvement resin chemicals in geotechnical engineering is becoming more widespread every day.

In this study, the shear strength properties of silicate-based resin added sand samples were investigated. The influences of using different ratios of resin additives were investigated. In addition to the strength values, the effect of using different ratios of resin additives on the deformability properties of the improved soil mixes was also investigated. In addition to the shear strength tests, uniaxial compressive strength values were also performed. Using the cohesion (c) and internal friction angle (ϕ) values obtained from the shear box test, UCS values were calculated in accordance with the famous Mohr & Coulomb (MC) failure criterion relation given in Equation 1. The UCS values calculated using the MC failure criterion (UCS_c) were compared with the uniaxial compressive strength test results. In this way, the usability of the famous MC failure criterion was aimed to be examined for resin-added soil mixes.

2. Materials and Methods

Soil specimens of this study were taken from Giresun city of the Black Sea Region of Türkiye. To use in the experimental study, soil specimens were firstly sieved before tests to prepare all the particles for passing the 8 mm sieve. To classify the soil specimens with particles under 8 mm, size distribution analyses were carried out using 4.00 mm, 2.00 mm, 1.00 mm, 0.50 mm, 0.25 mm, 0.125 mm and 0.074 mm sieves (Figure 1). The particle size distribution of soil specimens is given in Table 1. The soil specimen was evaluated to respectively have the coefficient of uniformity (C_u) and the coefficient of curvature (C_c) values of 8.8 and 0.4. As the soil has no a C_c value between 1 and 3, it was assessed to be a poorly-graded soil [16].

To classify the soil with 7% content of particles passing the No. 200 sieve (0.074 mm), liquid and plastic limits (Atterberg limits) were determined. The Casagrande test was carried out for determination of the liquid limit value (Figure 2). The methodology stated in the ASTM D4318-10 coded standard was followed in the Casagrande test [17]. The liquid limit was determined as the water content of soil specimens for closing the groove due to the impact of 25 blows of the Casagrande cup. The soil specimen passing under the No. 40 (0.425 mm) sieve was used in the Casagrande test. The water content was

calculated as the ratio of mass of water to mass of dry soil. To make dry soil, specimens were heated in the 105 °C stove for a day. The plastic limit test is performed by rolling soil rods on the standard glass plate. As stated in the ASTM D4318-10 coded test standard, the plastic limit was determined as the water content of soil rods which just crumbles when they are carefully and gently rolled to a diameter of 3 mm. Liquid and plastic limits of the soil were determined as 39% and 27%, respectively. According to the unified soil classification system (USCS), the soil sample can be classified as SP-SM (Poorly-graded sand with silt).

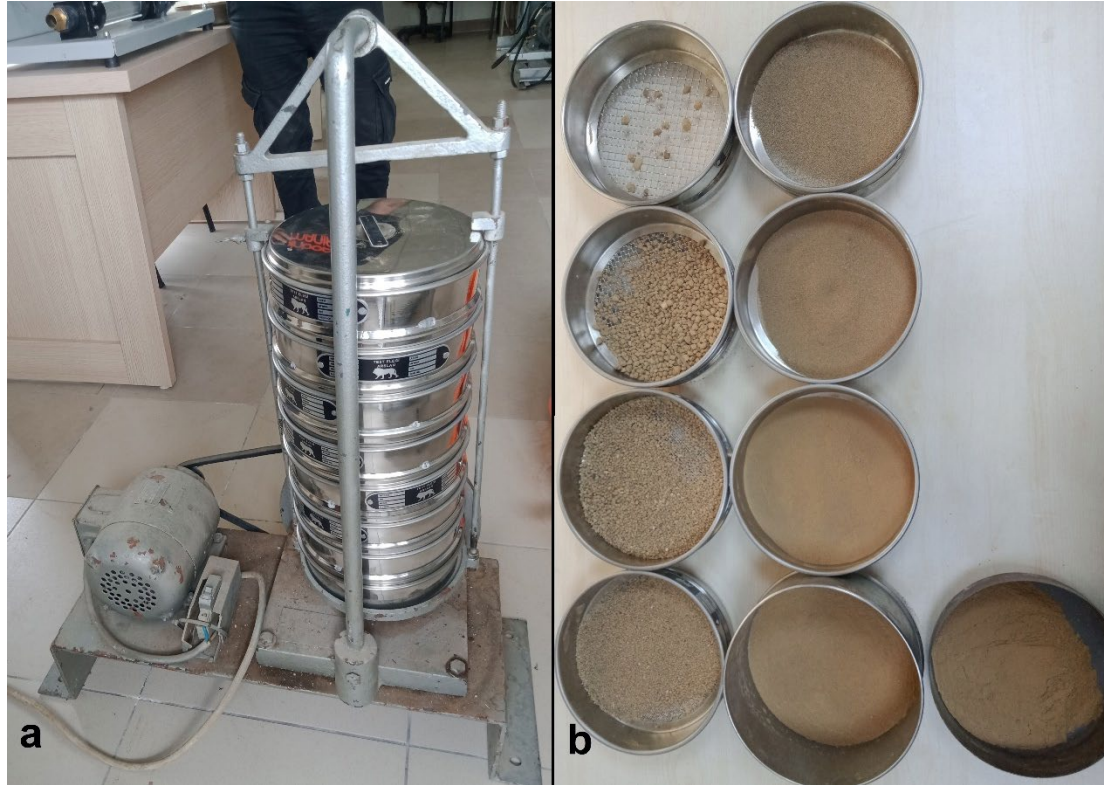


Figure 1. Some photos from the sieve analyses (a and b)

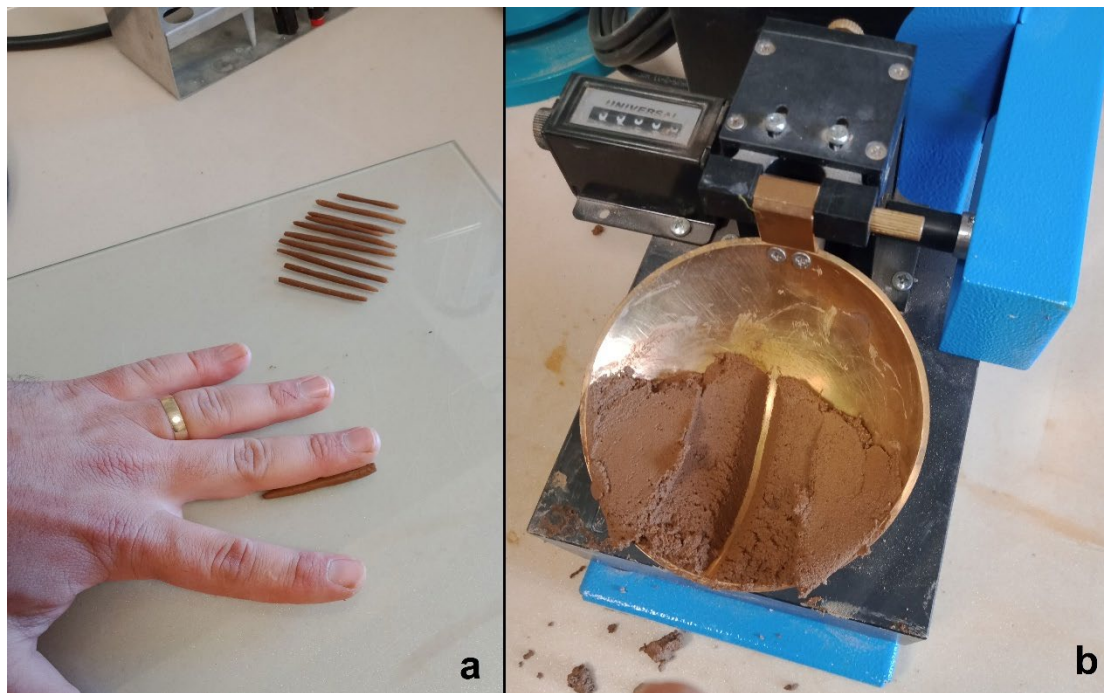


Figure 2. The plastic limit (a) and liquid limit (b) tests

In this study, INSILEX TS brand non-expandable two-component silicate-based resin was used. This product is a Turkish product used in ground improvement processes and is a product of the FMY Kimya company. Some technical specifications of the product are given in Tables 2 and 3 [18]. Curing is supplied by mixing the liquid phase components of the product in the ratio of 1:1 by mass. In other words, the ratio of both components to the total resin amount is 50%.

Table 1. Particle size distribution of soil the specimen

Sieve aperture (mm)	Passing percentage (%)
8	100
4	92
2	78
1	66
0.5	56
0.25	42
0.125	25
0.075	7

Table 2. Some technical properties of Insilex brand resin components

Component properties	Insilex A component	Insilex B component
Density at 25 °C (kg/m ³)	1.470 ± 40	1.130 ± 40
Viscosity at 25 °C (MPa·sn)	260 ± 40	140 ± 40
Flash point (°C)	-	>200
Mix ratio	1	1
Color	Colorless	Brown

Table 3. Reaction and mechanical properties of the Insilex brand resin (-: no data)

Parameters	25 °C	40 °C
Liquid phase time (sec)	135-150	110-120
Swelling factor	1	1
Maximum temperature due to the reaction (°C)	87	-
Uniaxial compressive strength (MPa)	35	-
Typical adhesive strength (MPa)	4-5	-
Time to fully complete polymerization reactions (day)	1	-

After the sand samples were taken from the field, they were kept in air in the laboratory for a month. It should be noted herein that the particle surfaces were not wet or moist. The contents of the mixes were sensitively weighed using an electronic scale. After the soil and resin components were added into a basin, specimens were mixed by hand for 150 seconds. It should be noted herein that specimens were mixed within the liquid phase time before the gelation. When the gelation starts, the viscosity slowly increases because of the initiation of polymerization reactions. Specimens were soft, easily shapable and not solidified as the gelation stage starts. Therefore, the molding process was properly carried out in the early gelation. Because of the liquid phase time limitations of the resin additive, UCS and shear box test specimens were separately mixed and molded (Figures 3 and 4). The specimens tested within this study are shown in Figure 5. Four UCS specimens were molded for the each specimen type. In total, 16 UCS test specimens were prepared. UCS test specimens were filled into the molds in three layers and compacted with 20 mallet strokes after each layers. The up-side surfaces were flattened by mallet drops when the specimens were in the plastic molds. Additionally, roughness of the surfaces of the specimens was gently removed by using a snap blade knife to make a smooth contact with the loading platen. Mixing, casting, molding and remolding procedures are totally the same for all the specimens tested within this study. The diameter of the cylindrical specimen molds was 50 mm and the ratio of length to diameter of the specimens was 2 in this study. According to the ASTM D 2166 coded standard for the unconfined compressive strength (UCS) tests of soil specimens, length to diameter ratio can vary from 2 to 2.5. According to the relevant standard, specimens must have a minimum diameter of 30 mm. Additionally, the biggest soil particle size must be smaller than one sixth of the specimen diameter [19]. The statements of the relevant standard were met since all particles of the soil used in this study passed under the sieve opening of 8 mm.

Specimens were remolded after a day of curing time. Before the UCS test, specimens were cured in air at the room temperature for a total of one week. A sensitive electric motor press with the loading capacity of 50 kN was used to measure the UCS values. In the UCS test, a loading rate was chosen to be 0.5 mm/min according to the ASTM D 2166 coded standard which states to use a strain rate from 0.5% to 2%/min [19]. Secant modulus is one of several methods used to calculate the modulus of elasticity. Calculating the secant modulus involves using two points on a stress-strain curve to calculate the slope of the stress/strain. When using this method, the first point is always zero and the second is a non-zero value. Secant elastic modulus values for 25%, 50% and 75% of the UCS level were calculated to investigate deformability properties under various stress levels. In addition, strain behaviours of the specimens cracked after reaching the UCS level were investigated. Loading was stopped automatically as the maximum load level decreased by 35%. To investigate the ductility properties of the specimens, plastic strain values after the maximum stress level were taken into account.

In addition to the UCS values, shear strength values of specimens were also determined carrying out the shear box test under the unconsolidated and undrained case. The shear box test was performed in accordance with the procedure stated in the ASTM D3080-04 coded American standard [20]. Square shaped specimens with 60 mm x 60 mm x 25 mm sizes were used in the shear box test. For each of the resin contents, the shear strength values were determined under 5 different normal stresses. In total, 20 shear strength test specimens were used for four different resin amounts of 8%, 12%, 16% and 20%. Specimens used in this study are shown in Figure 5. The shear strength test specimens were filled into the molds and compacted by using the standard tamper equipment. The same tamper was used and the same procedure was applied in the compaction process of all shear test specimens. After the resin started to cure and harden, specimens were removed from the mold by pushing them with the standard test tamper on the same day they were molded (Figure 3). The specimens removed from the mold were cured for a week before the test, as in the UCS test. Since the resin completed the polymerization reactions within one day and reached the maximum strength, it was not necessary to test the samples for a cure period longer than one week [18].

Shear force and stress values were read instantly with the horizontal load cell on the electric motor shear box test equipment and recorded by its software. Peak internal friction angle and cohesion values were calculated depending on the maximum stress values at the failure. Uniaxial compressive strength values were calculated depending on the cohesion (c) and internal friction angle (ϕ) values according to the Mohr&Coulomb failure criterion as seen in the well-known Equation 1 [21]. The UCS values calculated according to Equation 1 (UCS_c) and the strength values obtained from the direct uniaxial compressive strength test (UCS) were compared to investigate whether the Mohr & Coulomb failure criterion is usable and representable for the mechanical properties of the specimens. Some photos from the shear box test and the UCS test are given in Figures 6 and 7.

$$UCS_c = 2c(\cos\phi)/(1-\sin\phi) = 2c \tan(45 + \phi/2) \quad (1)$$

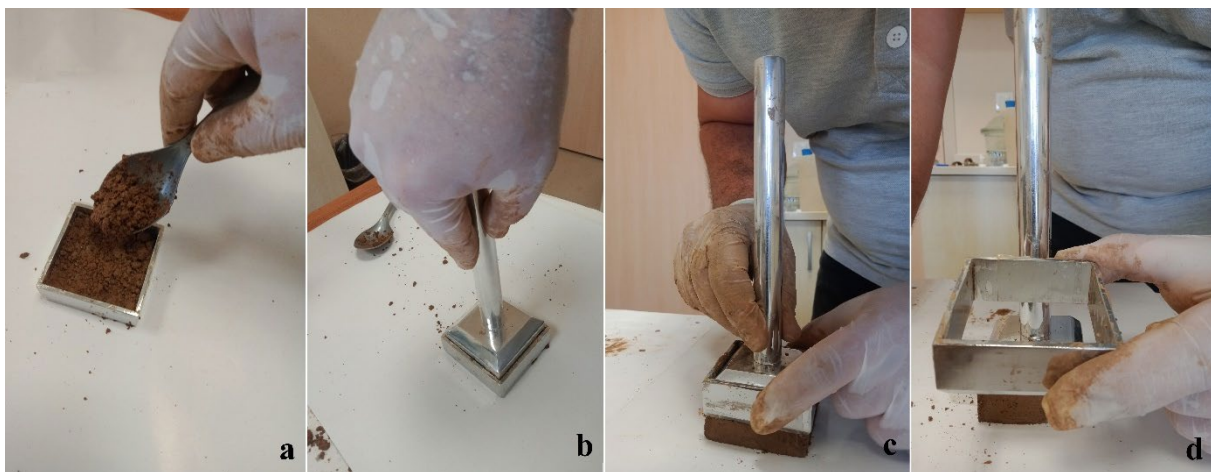


Figure 3. Shear strength specimen molding: a) soil filling into the mold, b) compaction, c and d) removing the mold

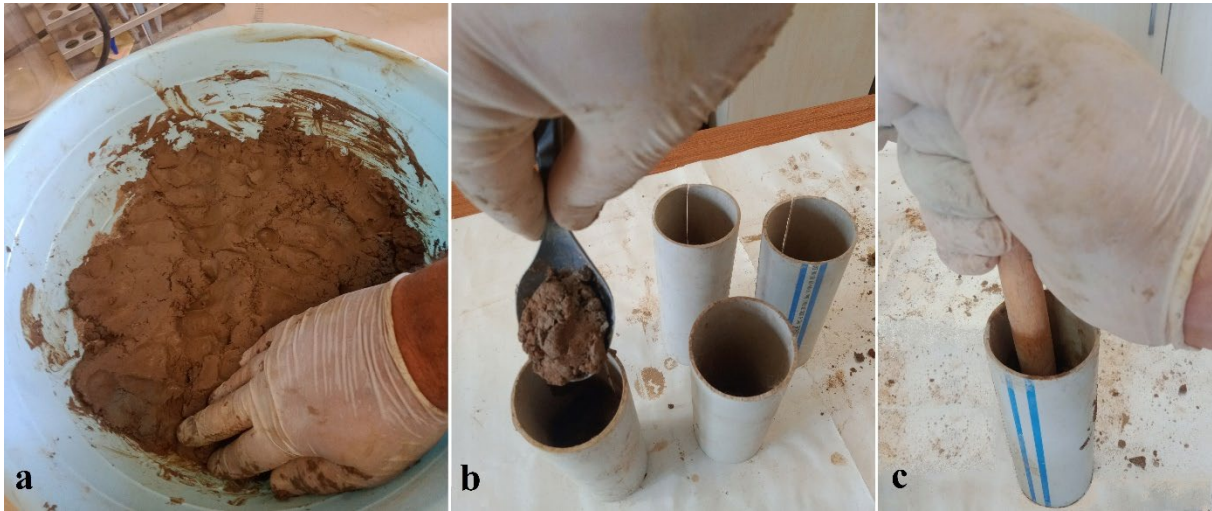


Figure 4. a) specimen mixing, b and c) UCS test specimen molding



Figure 5. UCS and shear strength test specimens used in this study

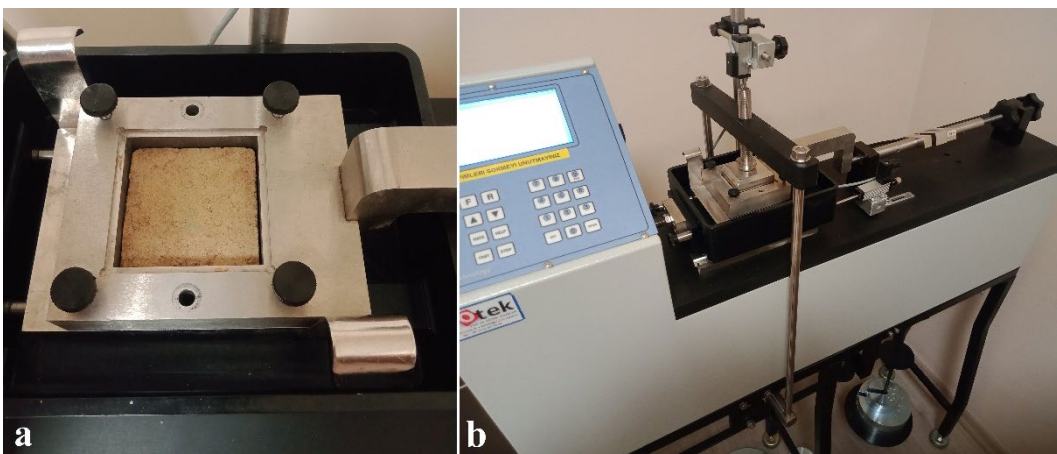


Figure 6. Photos from the shear box test (a and b)



Figure 7. The UCS test

3. Research Findings

The UCS values and modulus of elasticity values are given in Table 4. According to the results, both UCS and modulus of elasticity values significantly increase with increasing in the resin amount. In Table 4, modulus of elasticity values for various stress levels of 0.25 UCS, 0.50 UCS and 0.75 UCS are respectively given as $E_{sec0.25}$, $E_{sec0.50}$ and $E_{sec0.75}$. As seen from Figure 8 showing the stress strain graphs obtained from the UCS test, the ductility property which can be briefly defined as the plastic deformability of cracked specimens was also found to increase with an increase in the resin amount. The plastic strains from the peak stress to the 35% decrease in the stress level are given in Table 5. The improvement in the ductility property can be seen from the increase in the plastic strain limits.

Shear strength test results are given in Figure 9 and Table 6. The cohesion and internal friction angle parameters were determined for the peak stress case in the shear box test. As seen from the shear box test results, cohesion values increased with an increase in the resin amount, whereas the internal friction angle values decreased due to increases in the resin amount. Therefore, it was assessed that the shear strength values increased as a result of significant increases in the cohesion parameter with increasing resin amount. The relation between UCS_c values calculated in accordance with the c , ϕ from the shear box test and the direct UCS test results is given in Table 6. The UCS/UCS_c ratio was found to decrease with an increase in the resin content. It was assessed that the Mohr&Coulomb failure criterion is not accurately usable for the resin added sand specimens.

Table 4. Mean UCS and modulus of elasticity values of specimens

Specimen type	UCS (kPa)	$E_{sec0.25}$ (MPa)	$E_{sec0.50}$ (MPa)	$E_{sec0.75}$ (MPa)
8% Resin	1047	142	173	189
12% Resin	1530	201	234	246
16% Resin	2154	255	297	305
20% Resin	2693	328	362	349

Table 5. Mean plastic strain values after the peak stress level

Specimen type	Plastic strain
8% Resin	0.0052
12% Resin	0.0091
16% Resin	0.0149
20% Resin	0.0188

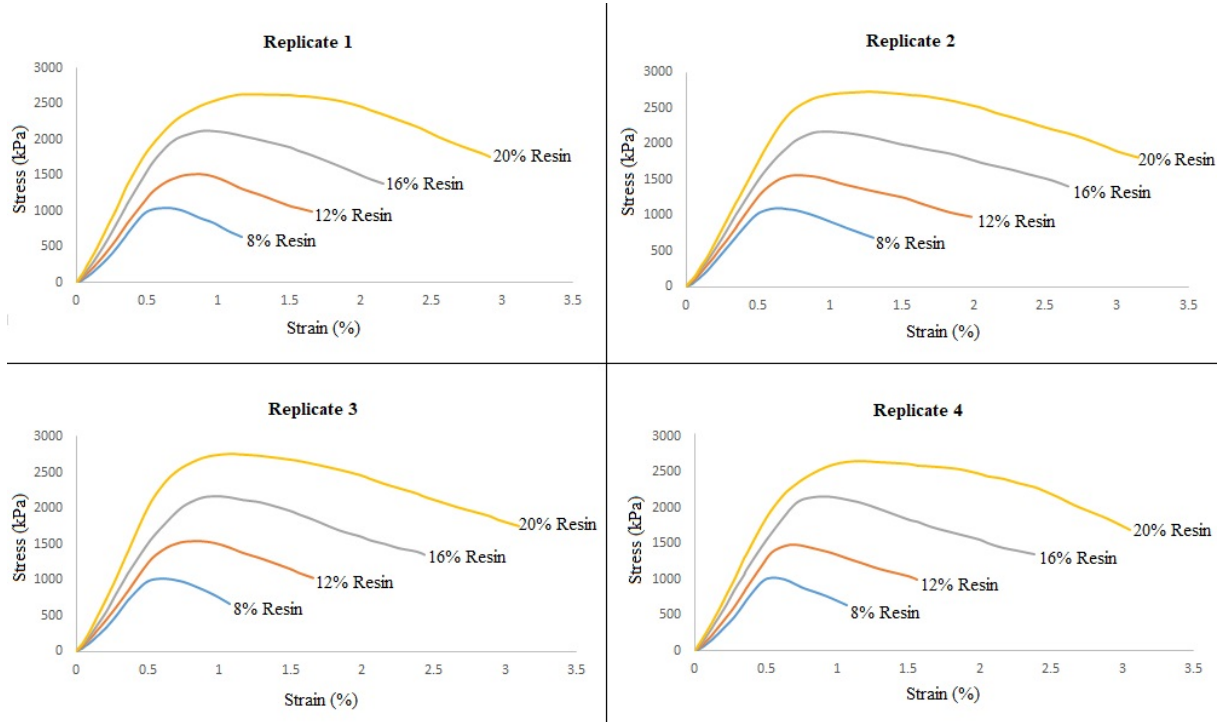


Figure 8. Stress and strain graphs of UCS test specimens

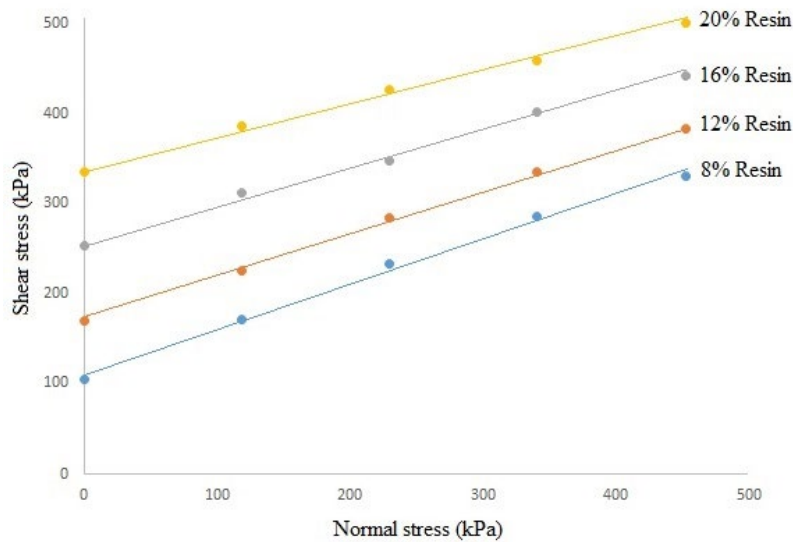


Figure 9. The shear box test results

Table 6. Cohesion, internal friction angle values and relation between UCS and UCS_c values

Specimen type	c (kPa)	ϕ (°)	UCS _c (kPa)	UCS/UCS _c
8% Resin	106	28	353	2.97
12% Resin	171	26	547	2.80
16% Resin	254	25	798	2.70
20% Resin	337	23	1019	2.64

4. Discussions and Conclusion

According to the findings, shear strength values increased as the resin amount increased. In parallel, strength values are estimated to increase with an increase in binder content [22-25]. The main reason for the increase in strength values as a result of the increase in resin content was determined to be the increase in cohesion value. Significant increases were observed in cohesion values with the increase in resin ratio. As parallel to the outcomes of this study, different researchers reported that the strength improvement of the resin added soil materials is resulted from the significant increases in cohesion values with the increase in resin ratio [26-28]. On the other hand, the increase in resin amount caused a minor decrease in internal friction angle values. As it is known, shear strength values depend on the mechanical parameters of c and ϕ . The uniaxial compressive strength calculated according to the Mohr and Coulomb failure criterion (UCS_c) using the c and ϕ values was lower than the values measured in the direct uniaxial compressive strength (UCS) test. According to the findings, the UCS/UCS_c ratio varied between 2.6 and 3. When other studies in the literature are examined, it is seen that the UCS_c calculated using c and ϕ parameters obtained from the shear box test is lower than the values obtained from the uniaxial compressive strength test [29]. Different studies have been conducted on the subject of the Mohr & Coulomb failure criterion usability for soil mixes by various researchers. According to the outcomes of different researches, the Mohr & Coulomb criterion was found to have some shortcomings to consider its use for soils [30-33].

It is thought that this study will contribute to new researches on the usability of Mohr & Coulomb for resin-reinforced soils. According to the numerical analysis carried out by Komurlu (2019), the standard shear box test gives lower shear strength values of soils than their real strength levels, as there are also tensile stresses at the critical location where crack formation begins in the sample [34]. For this reason, the Mohr&Coulomb criterion should not be seen as the only reason for the incompatibility between UCS_c and UCS.

The price per a tonne of silicate-based resins is approximately 3000 US dollars. Although the strength values notably increase with the increase in the amount of resin, the use of resin with high content may not be economical. According to the study conducted by Komurlu et al. (2024), it was stated that desired strength values can be achieved more economically by using resin and fiber additive together instead of using excessive resin amounts [35]. Polymer-based resins are advantageous compared to traditional binder use because of various reasons like containing no grain particles, selective viscosity and liquid phase time depending on soil properties, high chemical resistance, fast curing and strengthening. Additionally, some soil improvement injection products can polymerize effectively in contact with water. Higher ductility and crack propagation resistance properties than those of conventional binders make the polymer-based resins advantageous in terms of having a higher energy absorption capacity and a better resistance against external forces and factors [36-38].

The ductile material property indicates continuing to bear a load level even if specimens are cracked. Crack propagation resistance improves ductility properties as a result of the increased toughness [39-41]. As the area under the stress strain graph increases, a higher energy absorption capacity is also achieved [42-45]. Therefore, the increase in ductility provides an increase in the energy absorption capacity of the materials. According to the findings, it was found that the resin additive provides a significant advantage in terms of ductility, toughness and energy absorption capacity.

In conclusion, it was observed in this study that resin added soil samples were not well represented by the Mohr & Coulomb failure criterion because of up to three times differences between UCS_c and UCS values. The silicate-based polymer resin binder additive provided significant improvements in both UCS test and shear strength test results of the sand type soil specimens. It was determined that the resin additive increased the elastic modulus values significantly in addition to the strength values. The main reason for the mechanical improvement obtained with the increase in the resin amount was determined as the increase in cohesion. It was observed that the internal friction angle slightly decreased depending on the resin content, while the cohesion values increased significantly with the increase in resin content. As the resin binder content increased from 8% to 20%, the internal friction angle values decreased by 18% and the cohesion value increased by 317%. As a result of increasing in resin additive ratio from 8% to 20%, UCS values increased by 2.6 times and elastic modulus values increased by up to 2.3 times. It was observed that the silicate-based resin provided significant improvements in the ductility properties

of soil samples. Considering the areas under stress and strain graphs, it was also evaluated that energy absorption capacities of the resin added sand specimens were notably bettered as a result of the increase in the resin amount. In short, it was concluded that silicate-based resin additives are advantageous binder materials that improve strength, deformation modulus, ductility and energy absorption capacity properties. It is thought that it is important for geotechnical engineers to follow the developments in the field of polymer-based synthetic resins, which are contemporary additives used in ground improvement applications.

5. References




- [1] D. Guner, H. Ozturk, Experimental and Numerical Analysis of the Effects of Curing Time on Tensile Mechanical Properties of Thin Spray-on Liners, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (2016) 3205–3222.
- [2] K.G. Holter, Performance of EVA-Based Membranes for SCL in Hard Rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (2016) 1329–1358.
- [3] E. Komurlu, A resin type additive use to improve load bearing capacities of grouted rock bolts exposed to thermal cycles, *Journal of Engineering Sciences and Designs*, 11(2) (2023) 743-754.
- [4] M.M.S. Sabri, N.I. Vatin, K.A.M. Alsaffar, Soil Injection Technology Using an Expandable Polyurethane Resin: A Review, *Polymers*, 13 (2021) 3666.
- [5] P. Kolapo, M. Onifade, K.O. Said, M. Amwaama, A.E. Aladejare, A.I. Lawal, P.O. Akinseye, On the Application of the Novel Thin Spray-on Liner (TSL): A Progress Report in Mining Operations. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39 (2021) 5445–5477.
- [6] E. Komurlu, High-density polyurethane rigid foam usability as liner support material in rock engineering. *Arabian Journal of Geosciences*, 13 (2020) 422.
- [7] E. Komurlu, A. Kesimal, U. Colak, Polyurea type Thin Spray-on Liner Coating to Prevent Rock Bolt Corrosion. 8th Asian Rock Mechanics Symposium, 2014, pp. 1389-1397, Sapporo, Japan.
- [8] P.K. Kolay, B. Dhakal, Geotechnical Properties and Microstructure of Liquid Polymer Amended Fine-Grained Soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38 (2020) 2479–2491.
- [9] E. Komurlu, Use of Polymeric Energy Absorption Liners to Improve the Concrete Rock Fall Barriers, *Geoscience Engineering*, 67(4) (2021) 168-175.
- [10] E. Komurlu, A. Kesimal, C.O. Aksoy, Use of Polyamide-6 type Engineering Polymer as Grouted Rock Bolt Material. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 3 (2017) 37.
- [11] A. Luciani, D. Peila, Tunnel Waterproofing: Available Technologies and Evaluation through Risk Analysis, *International Journal of Civil Engineering*, 17 (2019) 45–59.
- [12] E. Komurlu, Investigation of Uniaxial Compressive Strength values of a Polyvinyl resin reinforced Silt: An Experimental Study on resin amount and curing temperature, *International Journal of Engineering, Design and Technology*, 2(2) (2020) 82-87.
- [13] B. Lakkimsetti, M.L. Gali, Grain Shape Effects on the Liquefaction Response of Geotextile-Reinforced Sands, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9 (2023) 15.
- [14] B. Lakkimsetti, G.M. Latha, Effectiveness of Different Reinforcement Alternatives for Mitigating Liquefaction in Sands, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9 (2023) 37.
- [15] G.M. Latha, B. Lakkimsetti, Morphological Perspectives to Quantify and Mitigate Liquefaction in Sands, *Indian Geotechnical Journal*, 52 (2022) 1244–1252.
- [16] ASTM International, ASTM D2487-17 coded Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), West Conshohocken, PA, USA (2017)
- [17] ASTM International, ASTM D4318-10: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In: 2010 Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA (2010)

- [18] FMY Kimya, Silikat Enjeksiyon Kimyasalı İnsilex TS – Teknik Veri Broşürü (2024) İstanbul
- [19] ASTM International, ASTM D2166-06 coded Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength Of Cohesive Soil, West Conshohocken, PA, USA (2006)
- [20] ASTM International, ASTM D3080-04 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils West Conshohocken, PA, USA (2012)
- [21] B.A. Uzuner, Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitabevi, Trabzon (2007)
- [22] A. Anburuvel, The Engineering Behind Soil Stabilization with Additives: A State-of-the-Art Review, Geotechnical and Geological Engineering, 42 (2024) 1–42.
- [23] M.S. Eisa, M.E. Basiouny, A. Mohamady, M. Mira, Improving Weak Subgrade Soil Using Different Additives, Materials, 15 (2022) 4462.
- [24] C.A. Anagnostopoulos, V. Aggelidis, Factors Affecting Properties of Polymer Grouted Sands, CivilEng, 5 (2024) 65-88.
- [25] E. Komurlu, A. Kesimal, Sulfide-rich mine tailings usage for short-term support purposes: An experimental study on paste backfill barricades, Geomechanics and Engineering, 9 (2) (2015) 195-205.
- [26] G. Spagnoli, A review of soil improvement with non-conventional grouts. International Journal of Geotechnical Engineering, 15(3) (2018) 273–287.
- [27] P. Pratter, C. Boley, Y. Forouzandeh, Innovative Ground Improvement with Chemical Grouts: Potential and Limits of Partial Saturation with Polymers, Geotechnical and Geological Engineering, 41 (2023) 477–489.
- [28] C.A. Anagnostopoulos, M. Dimitriadi, D. Konstantinidis, Static and cyclic behaviour of epoxy resin and bentonite-grouted sands, Transportation Geotechnics, 33 (2022) 100725.
- [29] E. Komurlu, F. Cihangir, A. Turan, A. Kesimal, B. Erçikdi, An Experimental Study on Shear Strength of Cemented Paste Backfill Materials, Suleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences, 22 (2018) 45-52.
- [30] Z.Y. Yin, P.Y. Hicher, Y.F. Jin, Elastoplastic Modeling of Soils: From Mohr-Coulomb to SIMSAND. In: Practice of Constitutive Modelling for Saturated Soils. Springer, Singapore (2020)
- [31] X. Xiang, D. Zi-Hang, Numerical implementation of a modified Mohr–Coulomb model and its application in slope stability analysis, Journal of Modern Transport, 25 (2017) 40–51.
- [32] R. Lepakshi, B.V. Venkatarama Reddy, Shear strength parameters and Mohr-Coulomb failure envelopes for cement stabilised rammed earth, Construction and Building Materials, 249 (2020) 118708.
- [33] Y.X. Li, X.L. Yang, Soil-Slope Stability considering Effect of Soil-Strength Nonlinearity, International Journal of Geomechanics, 19(3) (2019) 04018201.
- [34] E. Komurlu, Investigation of Failure of Soils in the Shear Box Test, National Symposium on Engineering Geology and Geotechnics, 2019 (MühJeo 2019), Denizli, Turkey, pp. 97-104.
- [35] E. Komurlu, A.G. Celik, V. Karakaya, An experimental study on uniaxial compressive strength values of silicate based resin added sand samples with different types of fiber reinforcements, Yerbilimleri, 45(1) (2024) 79-92.
- [36] M. Mariri, R.Z. Moayed, A. Kordnaeij, Stress–Strain Behavior of Loess Soil Stabilized with Cement, Zeolite, and Recycled Polyester Fiber, Journal of Materials in Civil Engineering, 31(12) (2019) 04019291.
- [37] M. Wu, F. Liu, J. Yang, Stress–strain–strength behavior of geosynthetic reinforced rubber–sand mixtures, Acta Geotechnica, 18 (2023) 4835–4846.
- [38] H. Jin, L. Guo, H. Sun, T. Wu, L. Shi, Y. Cai, Energy-based evaluation of undrained cyclic behavior of marine soft clay under multidirectional simple shear stress paths, Acta Geotechnica, 18 (2023) 2883–2898.

- [39] E. Komurlu, An Experimental Study on Determination of Crack Propagation Energy of Rock Materials under Dynamic (Impact) and Static Loading Conditions, *Hittite Journal of Science and Engineering*, 6 (2019) 1-6.
- [40] E. Botero, A. Ossa, G. Sherwell, E. Ovando-Shelley, Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET), *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4) (2015) 363-369.
- [41] L. Li, C.S. Tang, J.J. Xu, Y. Wei, Z.H. Dong, B. Liu, X.Y. Zhang, B. Shi, Exploring an eco-friendly approach to improve soil tensile behavior and cracking resistance, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16 (10) (2024) 4272-4284.
- [42] E. Komurlu, A. Kesimal, Rock Bolting from Past to Present in 20 Inventions, *MT Bilimsel*, 9 (2016) 69-85.
- [43] M. Omidvar, M. Iskander, S. Bless, Stress-strain behavior of sand at high strain rates, *International Journal of Impact Engineering*, 49 (2012) 192-213.
- [44] E. Komurlu, S. Demir, Length Effect on Load Bearing Capacities of Friction Rock Bolts, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(3) (2019) 718-725.
- [45] G.O.M. Pedroso, R.D. dos Santos Junior, J. Lins da Silva, M.F.B. Motta, E.F. Félix, Flexural Strength Characteristics of Fiber-Reinforced Cemented Soil, *Materials* 16 (2023) 4185.



YAPAY ZEKA TABANLI GÖRÜNTÜ İŞLEME İLE AKILLI ROBOT SÜPÜRGELEDE TEHLİKE VE ENGEL ALGILAMA

*Mustafa Melikşah ÖZMEN¹, Muzaffer EYLENCE¹, Bekir AKSOY¹

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü,
Isparta

(Geliş/Received: 16.10.2024, Kabul/Accepted: 05.12.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte yapay zekâ teknolojileri birçok alanda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Yapay zekâ teknolojileri sağlık, eğitim, mühendislik gibi birçok disiplinler arası alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Yapay zekâ teknolojisinin önemli kullanım alanlarından birisi de mühendislik alanıdır. Özellikle makina, elektrik-elektronik ve bilgisayar sistemlerinin bir arada kullanıldığı disiplinler arası bir mühendislik alanı olan mekatronik mühendisliğinde de yapay zekâ teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Mekatronik mühendisliğinde özellikle robotik yapay zekâ algoritmaları sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, yapay zekâ tabanlı görüntü işleme tekniklerinin robot süpürgelerde engel ve tehlike algılama işlevine uygulanması gerçekleştirilmiştir. Geleneksel sensör tabanlı sistemlerin yüksek maliyetleri ve algılama doğruluğu sınırlamaları nedeniyle, kamera ve yapay zekâ destekli bir alternatif olarak yapay zekâ tabanlı sistemler robot süpürgelerin ev ortamındaki cansız nesnelere ve tehlikeli bölgeleri algılayarak güvenli bir şekilde temizlik yapması hedeflenmiştir. Bu amaçla, sandalye, koltuk, oyuncak ve terlik nesnelere oluşan bir veri seti oluşturularak elde edilen veri seti VGG-19, AlexNet, MobileNet V2 derin öğrenme mimarileri ile eğitilmiştir. Çalışmada kullanılan üç derin öğrenme mimarisi içerisinde MobileNet V2 modeli %97.87 doğruluk oranı ile en başarılı model olarak tespit edilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen derin öğrenme yaklaşımı, sensör tabanlı sistemlere kıyasla maliyet etkinliği ve çevresel farkındalık açısından daha avantajlı bir çözüm sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Anahtar derin öğrenme, Görüntü işleme, Robotik.

HAZARD AND OBSTACLE DETECTION IN SMART ROBOT SWEEPERS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE-BASED IMAGE PROCESSING

ABSTRACT

Nowadays, with the rapid development of technology, artificial intelligence technologies have begun to be used frequently in many areas. Artificial intelligence technologies are frequently used in many interdisciplinary fields such as health, education, and engineering. One of the important areas of use of artificial intelligence technology is the field of engineering. Artificial intelligence technologies are also used in mechatronics engineering, which is an interdisciplinary engineering field where machinery, electrical-electronics, and computer systems are used together. Robotic artificial intelligence algorithms are frequently used in mechatronics engineering. In the study, the application of artificial intelligence-based image processing techniques to the obstacle and danger detection function in robot vacuum cleaners was carried out. Due to the high costs and detection accuracy limitations of traditional sensor-based systems, camera and artificial intelligence-supported alternative artificial intelligence-based systems are aimed to detect inanimate objects and dangerous areas in the home environment and clean robot vacuum cleaners safely. For this purpose, a data set consisting of chair, armchair, toy, and slipper objects was created and the obtained data set was trained with VGG-19, AlexNet, MobileNet V2 deep learning architectures.

Among the three deep learning architectures used in the study, the MobileNet V2 model was determined to be the most successful model with an accuracy rate of 97.87%. The deep learning approach implemented in the study offers a more advantageous solution in terms of cost effectiveness and environmental awareness compared to sensor-based systems.

Keywords: Deep learning, Image processing, Robotics.

1. Giriş (Introduction)

Yapay zekâ teknolojisi, günümüzde otonom sistemler üzerinde kritik bir rol oynamaktadır [1]. Özellikle ev otomasyonu alanında kullanılan akıllı robot süpürgeler, çevrelerini LIDAR ve ultrasonik sensörler gibi sistemler aracılığıyla engelleri algılayarak otonom hareket kabiliyeti kazanmaktadır. [2]. Ancak bu sensörlerin yüksek maliyetleri ve bazı durumlarda algılama doğruluklarının sınırlı olması, alternatif çözümler geliştirilmesini gerekli hale getirmektedir [3]. Özellikle merdiven gibi hassas nesnelere algılanmaması veya tehlikeli bölgeleri algılayamama gibi problemler, robot süpürgelerin mevcut teknolojileriyle tam olarak çözülememektedir [4].

Robot süpürgelerin bu problemlerine çözüm olarak, kamera tabanlı görüntü işleme teknikleri hem maliyet etkinliği hem de çevresel farkındalığın artırılması açısından önemli bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca bu çözümlere yapay zeka tabanlı modeller kullanılarak robot süpürgelerin engellerden kaçınma ve tehlikeleri algılama gibi işlevlerini iyileştirildiği görülmektedir [5,6]. Son yıllarda, robot süpürgelerde yapay zekâ destekli görüntü işleme tekniklerinin etkinliği üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Konu ile ilgili akademik çalışmalar incelendiğinde, Gao ve ark. (2022), robot süpürgelerde derin öğrenme tabanlı bir sistem önererek, engel tespiti ve sınıflandırmada %98'in üzerinde doğruluk oranı elde etmişlerdir [7]. Diğer bir çalışmada ise, Zhu ve ark. (2023), robot süpürgelerin yalnızca görüntü verilerini kullanarak gerçek zamanlı olarak hareketli nesnelere algılayabilen bir sistem geliştirmiştir. Çalışma, özellikle insanlarla etkileşimli ortamlarda robotların güvenliğini artırmaya yönelik önemli katkılar sunmaktadır [8].

Çalışmada, yapay zekâ destekli görüntü işleme teknikleri kullanılarak robot süpürgelerin ev ortamındaki cansız nesnelere zarar vermeden otonom şekilde hareket ederek sensörlerin algılayamadığı merdiven gibi tehlikeleri algılayarak güvenli bir temizlik işlemi gerçekleştirmesi amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında, evdeki farklı nesnelere algılamak için özgün bir veri seti kullanılmıştır. Hazırlanan veri seti, robotun hem engellerden kaçınmasını hem de potansiyel tehlikelerden korunmasını sağlamak için evrimsel sinir ağı tabanlı VGG-19, AlexNet, MobileNet V2 olmak üzere üç farklı model ile eğitilerek en başarılı model çalışmada kullanılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. Materyal (Material)

2.1.1. Veri seti (data set)

Çalışmada, robot süpürgelerin ev ortamındaki canlı veya cansız nesnelere zarar vermeden otonom olarak hareket etmesi ve temizlik görevlerini yerine getirmesi amacıyla özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Veri setinde yer alan görüntüler, ev ortamında bulunan sandalye, koltuk, vazo, oyuncak ve terlik gibi nesnelere görsellerinden oluşmaktadır. Veri setindeki görüntüler 240x240 boyutlarında renkli olarak kaydedilmiştir. Toplanan görüntüler üzerlerindeki gürültü ve paraziti azaltmak amacıyla Gauss filtreleme ve normalizasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Toplam 1500 görüntüden oluşan veri seti, 438 adet sandalye, 321 adet koltuk, 320 adet vazo, 214 adet oyuncak ve 207 adet terlikten oluşmaktadır. Çalışmaya özel olarak hazırlanan veri setinden alınmış örnek bir görüntü Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Veri setinden örnek görüntü (Sample image from dataset)

2.1.2. VGG-19 Derin öğrenme mimarisi (VGG-19 Deep learning architecture)

VGG-19, derin öğrenme ve bilgisayarlı görü alanında önemli bir yere sahip olan 19 katmanlı bir konvolüsyonel sinir ağı mimarisidir. İlk olarak 2014 yılında Oxford Üniversitesi'ndeki Görsel Geometri Grubu tarafından geliştirilen VGG-19, daha derin ağların performansı artırabileceği fikriyle VGG-16'nın bir genişletmesi olarak ortaya çıkmıştır [9]. VGG-19'un geliştirilmesinin temel nedeni, ağ derinliğinin görüntü tanıma ve sınıflandırma görevlerindeki etkisini incelemektir. Fakat daha sonrasında modele fazla katman eklenerek, modelin daha karmaşık ve soyut özellikleri öğrenmesi hedeflenmiştir [10]. Bu yaklaşım, daha derin mimarilerin performansı artırabileceğini göstermiş ve derin öğrenme alanında yeni araştırmalara öncülük etmiştir [11]. Gelişim sürecinde, VGG-19 farklı optimizasyonlar ve modifikasyonlarla daha verimli hale getirilmiştir. Özellikle hesaplama maliyetini azaltmak ve hızlandırmak için model sıkıştırma ve ağırlık paylaşımı gibi teknikler uygulanmıştır [12]. Ayrıca, VGG-19'un transfer öğrenme için uygun bir mimari olması, farklı alanlardaki uygulamalarda geniş çapta kullanılmasını sağlamıştır [13]. Son yıllarda, VGG-19 üzerine yapılan çalışmalar, modelin tıbbi görüntü analizi, nesne tespiti ve doğal dil işleme gibi farklı alanlarda başarılı bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir [14]. Yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı, VGG-19 modeli, esnek ve güçlü bir derin öğrenme modeli olarak önemini koruduğunu ortaya koymaktadır [15].

2.1.3. AlexNet derin öğrenme mimarisi (AlexNet deep learning architecture)

AlexNet, derin öğrenme ve bilgisayarlı görü alanında önemli bir konvolüsyonel sinir ağı mimarisidir. 2012 yılında Krizhevsky, Sutskever ve Hinton tarafından geliştirilen AlexNet, ImageNet Büyük Ölçekli Görüntü Tanıma Yarışması'nda birinci olan bir derin öğrenme mimarisidir [16]. AlexNet'in büyük veri setleri üzerinde derin sinir ağlarının performansını artırmak ve o dönemde yaygın olan "aşırı öğrenme" ve hesaplama maliyeti sorunlarını gidermek için tasarlanmış bir modeldir [17]. AlexNet, daha derin ve geniş bir mimari kullanarak karmaşık özelliklerin öğrenilmesini sağlamıştır [18]. Model, sekiz öğrenilebilir katmandan oluşmakta ve ReLU (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonu sayesinde eğitim süresi hızlandırılmaktadır [19]. Ayrıca, dropout ve veri artırma gibi teknikler kullanılarak modelin genelleme kabiliyeti artırılmıştır [20]. Bu mimarinin geliştirilmesi, GPU'ların paralel işlem yeteneklerinden faydalanarak büyük ölçekli ağların eğitilmesini mümkün kılmıştır [21]. AlexNet'in başarısı, derin öğrenme alanında yeni araştırmalara ve daha derin ağların geliştirilmesine öncülük etmiştir [22]. Özellikle nesne tanıma, sınıflandırma ve segmentasyon gibi görevlerde konvolüsyonel sinir ağlarının etkinliği kanıtlanmıştır [23]. Son yıllarda, AlexNet'in transfer öğrenme ve ince ayar yöntemleriyle farklı alanlara uyarlanması, modelin esnekliğini ve kullanım alanlarını genişletmiştir [24]. Bu gelişmeler, AlexNet'in derin öğrenme tarihinde önemli bir dönüm noktası olduğunu ve sonraki ağ mimarilerinin tasarımını etkilediğini göstermektedir [25].

2.1.4. MobileNet V2 derin öğrenme mimarisi (MobileNet V2 deep learning architecture)

MobileNet V2, mobil ve gömülü cihazlar gibi sınırlı hesaplama kaynaklarına sahip platformlarda derin öğrenme modellerinin etkin bir şekilde çalıştırılması için tasarlanmış bir konvolüsyonel sinir ağı mimarisidir. 2018 yılında Sandler ve arkadaşları tarafından geliştirilen MobileNet V2, "tersine çevrilmiş artıklar" ve "lineer dar boğazlar" konseptlerini tanıtarak önceki modellere göre önemli iyileştirmeler sunmuştur [26]. MobileNet V2'nin temel amacı, hesaplama maliyetini ve model boyutunu azaltırken performanstan ödün vermemesidir. Bu mimari, derinlik yönlü ayrılabilir konvolüsyonlar kullanarak parametre sayısını ve hesaplama yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır [27]. Modelde yer alan "Tersine çevrilmiş artıklar" ise gradyanların verimli bir şekilde geri yayılmasını sağlayarak daha derin ağların eğitilmesine olanak tanımaktadır [28]. Son yıllarda yapılan araştırmalar, MobileNet v2'nin nesne tespiti, yüz tanıma ve görüntü segmentasyonu gibi farklı bilgisayarlı görü görevlerinde başarılı bir şekilde uygulandığını göstermiştir [29]. Ayrıca, transfer öğrenme teknikleriyle birleştirildiğinde, MobileNet V2 sınırlı veri setleri üzerinde bile yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır [30]. Bu özellikleri sayesinde, mobil uygulamalar ve gerçek zamanlı sistemler için tercih edilen bir mimari haline gelmiştir [31]. MobileNet V2'nin geliştirilmesi, derin öğrenme modellerinin daha geniş bir cihaz yelpazesinde kullanılabilmesini sağlamış ve yapay zeka uygulamalarının yaygınlaşmasına katkıda bulunmuştur [32].

2.1.5. Performans değerlendirme metrikleri (Performance evaluation metrics)

Yapay zekâ sınıflandırma problemlerinin çözümü için oluşturulan modellerin performansını değerlendirmek için farklı metrikler kullanılmaktadır. Bu metrikler arasında doğruluk, hassasiyet, geri çağırma ve F1 skoru önemli bir yere sahiptir. Bu metrikler, özellikle sınıflandırma problemlerinde modelin başarımını nicel olarak ifade etmek için kullanılır.

Doğruluk, modelin tüm örnekler üzerinde ne kadar doğru tahmin yaptığını gösteren bir metriktir. Genel performansı ölçmek için kullanılır ve denklem 1'de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır [33,34].

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

Denklemden TP doğru pozitif, TN doğru negatif, FP yanlış pozitif ve FN ise yanlış negatif değerleri ifade etmektedir. Doğruluk performans değerlendirme metriği, modelin genel doğruluğunu ölçmek için temel bir gösterge sağlamaktadır.

Hassasiyet, modelin pozitif olarak tahmin ettiği örneklerin ne kadarının gerçekten pozitif olduğunu göstermek için kullanılan performans değerlendirme metriğidir. Yanlış pozitiflerin önemli olduğu durumlarda kullanılır ve denklem 2'de verilen matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır [35,36].

$$\text{Hassasiyet} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

Geri çağırma, gerçek pozitif örneklerin ne kadarının model tarafından doğru bir şekilde tespit edildiğini belirlemede kullanılan performans değerlendirme metriğidir. Yanlış negatiflerin önemli olduğu durumlarda tercih edilir ve denklem 3'te verilen matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır [37,38].

$$\text{Geri Çağırma} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

F1 skoru, hassasiyet ve geri çağırmanın harmonik ortalamasıdır ve bu iki metriğin dengelenmesi gerektiği durumlarda kullanılan bir performans değerlendirme metriğidir. Denklem 4'te verilen matematiksel eşitlik ile hesaplanmaktadır [39,40].

$$\text{F1 Skor} = 2 \times \frac{\text{Hassasiyet} \times \text{Geri Çağırma}}{\text{Hassasiyet} + \text{Geri Çağırma}} \quad (4)$$

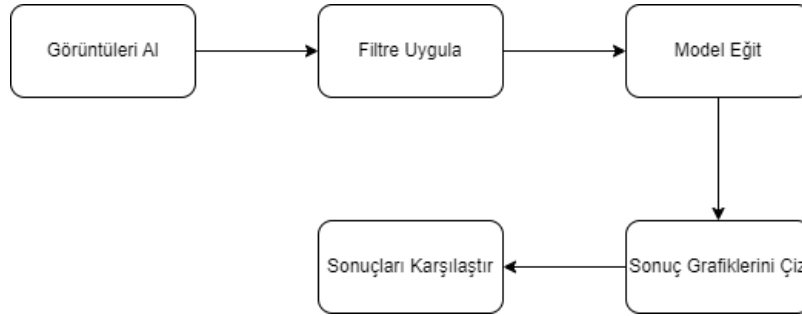
F1 skoru, dengesiz veri setlerinde modelin performansını değerlendirmesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Doğruluk, hassasiyet, geri çağırma ve F1 Skor performans değerlendirme metrikleri sınıflandırma modellerinin performansını daha derinlemesine anlamak ve karşılaştırmak için kullanılmaktadır.

Özellikle dengesiz veri setlerinde, doğruluk tek başına yanıltıcı olabileceğinden dolayı hassasiyet, geri çağırma ve F1 skoru daha anlamlı sonuçlar sunmaktadır [41,42].

2.2. Metot (Method)

Çalışmanın iş akışı diyagramı Şekil 2'de verilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında derin öğrenme modellerinin eğitimi için gerekli olan özgün görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler, model eğitimi öncesinde veri ön işleme adımlarına tabi tutulmuş ve eğitim süreci için uygun hale getirilmiştir. Daha sonra eğitim süreci VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2 derin öğrenme modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu modellerle elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntem aşağıda daha detaylı olarak ele alınmıştır.



Şekil 2: İş Akış Diyagramı (Workflow Diagram)

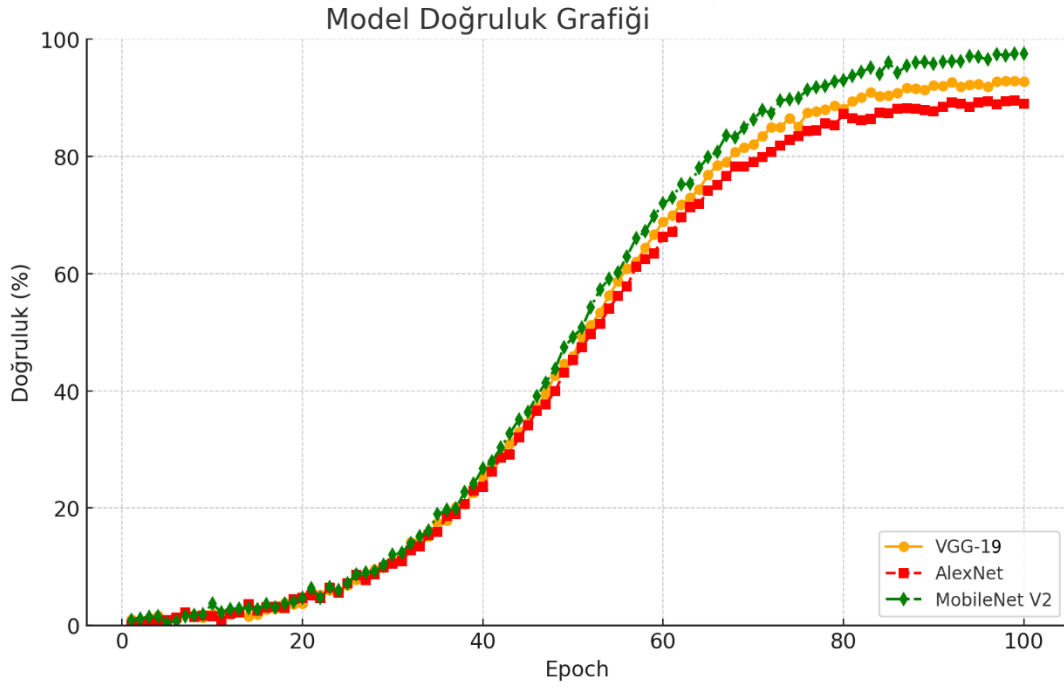
Çalışmada, robot süpürgelerin ev ortamındaki canlı veya cansız nesnelere zarar vermeden otonom olarak hareket etmesini ve temizlik görevlerini yerine getirmesini amaçlayan bir sistem geliştirilmiştir. Bu bağlamda, elde edilen özgün veri setindeki görüntüler VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2 derin öğrenme mimarileri ile eğitilmiştir. Çalışmada kullanılan görüntüler, ev ortamında toplanan sandalye, koltuk, vazo, oyuncak ve terlik nesnelere ait görüntülerinden oluşmaktadır. Görüntüler eğitim öncesinde ilk olarak bir dizi veri ön işleme aşamasına tabi tutulmuştur.

İlk olarak, görüntülerden gürültü ve paraziti gidermek için Gauss filtresi uygulanmıştır. Bu işlem, görüntüleri daha net ve temiz hale getirerek modelin daha güvenilir sonuçlar üretmesine katkıda bulunmuştur. Gürültüyü gidermek, modelin yanlış pozitif veya yanlış negatif sonuçlar verme olasılığını azaltmak için önemli bir veri ön işleme aşamasıdır. Gauss filtresinden sonra, normalizasyon işlemi veri kümesindeki görüntülere uygulanmıştır. Normalizasyon, her görüntüdeki piksel değerlerini belirli bir aralığa ölçekleyerek modelin eğitim süresini kısaltmış ve ayrıca modelin öğrenme yeteneğini artırmıştır. Bu işlem ayrıca modelin farklı ışık ve kontrast koşulları altında daha genel performans göstermesine yardımcı olmuştur.

Görüntü ön işleme aşamasından geçirilen görüntüler VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2 derin öğrenme modelleri ile 100 tekrar (epoch) boyunca eğitilmiş ve öğrenme oranı 0,0001 olarak belirlenmiştir. Bu süreçte, modelin aşırı öğrenme yapmasını önlemek için uygun eğitim stratejileri benimsenmiştir. Eğitim sırasında, VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2 derin modelleri aynı veri kümesi ve parametrelerle eğitilmiştir, böylece üç modelin performansları karşılaştırılmıştır. Eğitim sürecinde, doğruluk, kayıp değerleri ve model performansını izlemek için farklı metrikler kullanılmıştır.

3. Bulgular (Results)

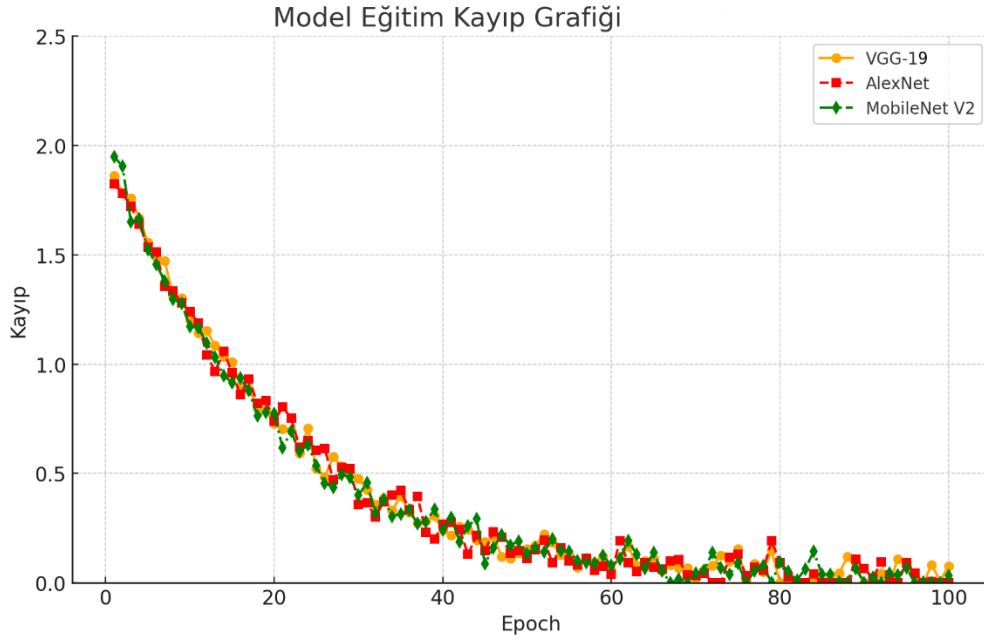
VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2 derin öğrenme modellerinin eğitimleri sonucu elde edilen model doğruluk grafiği Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Model Doğruluk Grafiği (Model Accuracy Graph)

Şekil 3'te, VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2'nin üç farklı derin öğrenme modeli olan doğruluk performansı gösterilmektedir. Yatay eksen tekrar (epoch) olarak adlandırılan eğitim sürecindeki adımları ifade ederken, dikey eksen modellerin doğruluk yüzdesini göstermektedir. Şekil 3, her üç modelin de eğitim süreci boyunca doğruluklarının arttığını ve belli bir noktada doygunluğa ulaştığını göstermektedir. VGG-19, ilk dönemlerde diğer iki modelle benzer bir performans sergilerken, 20. epoch'tan itibaren daha istikrarlı bir doğruluk artışı göstermekte ve 60. epoch civarında en yüksek doğruluk oranına ulaşmaktadır. MobileNet V2, başlangıçta belirgin bir üstünlük sağlamamakla birlikte, genel olarak eğitim süresince en yüksek doğruluk değerlerine ulaşarak VGG-19 derin öğrenme mimarisi doğruluk anlamında biraz daha üstünlük sağladığı tespit edilmiştir. AlexNet derin öğrenme mimarisi ise diğer iki modelin gerisinde kalarak daha düşük doğruluk oranlarına ulaşmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, MobileNet V2'nin genel anlamda en yüksek performansı sergilediğini, VGG-19'nın da benzer bir başarıya ulaştığını, ancak AlexNet'in performans açısından diğer iki modelin gerisinde kaldığı tespit edilmiştir. Oluşan bu farklılıklar, modellerin mimarilerine ve hesaplama kapasitelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. MobileNet V2, düşük hesaplama gereksinimlerine sahip olmasına karşın yüksek performans sunarak verimlilik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şekil 4'te çalışmada kullanılan derin öğrenme modellerinin eğitim kayıp grafikleri verilmiştir.



Şekil 4: Model Kayıp Grafiği (Model Loss Chart)

Şekil 4 incelendiğinde VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2 modellerinin eğitim sırasında kayıp hataların zaman içinde nasıl azaldığı görülmektedir. Çalışmada kullanılan her üç model de başlangıçta yüksek bir kayıp değeriyle (yaklaşık 2.0) başlamakta ve ilk 20 tekrar (epoch) süresince modellerin kayıplarının hızlı bir şekilde azaldığı, ardından daha yavaş bir düşüşle 60. tekrar (epoch) civarında hemen hemen en düşük kayıp değerlerine ulaştıkları gözlemlenmektedir. Eğitim sürecinin sonlarına doğru ise kayıpların neredeyse sıfıra yaklaştığı gözlemlenmektedir. VGG-19, MobileNet V2 ve AlexNet arasındaki kayıp eğrileri genel olarak birbirine oldukça yakındır. Başlangıç aşamasında MobileNet V2 ve VGG-19 hafif bir üstünlük gösterirken, AlexNet özellikle 20. tekrar (epoch) sonrası benzer bir performans sergilemektedir. 60. tekrardan (epoch) sonra ise her üç modelde de kayıpların neredeyse sabitlendiği ve 0.2'nin altına düştüğü gözlemlenmektedir.

Şekil 4'teki grafik sonuçları, modellerin doğruluğunun arttığını ve hatalarının azaldığını göstermektedir. Genel anlamda, her üç modelin de eğitim sırasında hatalarını başarıyla azaltarak etkili bir öğrenme gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. MobileNet V2 ve VGG-19 küçük bir farkla daha düşük kayıplara sahip olsa da genel performansları arasında büyük farklar bulunmamaktadır. VGG-19, AlexNet ve MobileNet V2 derin öğrenme modellerinin eğitimi sonucu elde edilen sonuçların doğruluk, hassasiyet, geri çağırma ve F1 skor performans değerlendirme metrikleri ile değerlendirilmesi sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: Performans Değerlendirme Sonuçları (Performance Evaluation Results)

Model	Doğruluk	Hassasiyet	Geri Çağırma	F1 Skor	Eğitim Süresi
VGG-19	%93.51	%93.59	%93.51	%93.51	12dk45sn
AlexNet	%90.11	%90.11	%91.12	%90.21	15dk25sn
Mobilenet V2	%97.87	%97.87	%97.00	%97.82	11dk21sn

Tablo 1 incelendiğinde, MobileNet V2 modeli, %97.87 doğruluk oranı ile en iyi performansı sergilemektedir. Bu modelin hassasiyet oranı %97.87, geri çağırma oranı ise %97.00'dür. Bu yüksek değerler, MobileNet V2'nin sınıflandırma işlemlerinde doğru tahminler yaptığını göstermektedir. Ayrıca, %97.82 F1 skoru, modelin genel denge performansını yansıtmaktadır. MobileNet V2, diğer modellere göre daha kısa bir eğitim süresine (11 dakika 21 saniye) sahip olup, bu da performansının yanı sıra zaman açısından da avantaj sağladığını göstermektedir. VGG-19 modeli, %93.51 doğruluk oranı ile ikinci en iyi performansı sunmaktadır. Hassasiyet değeri %93.59, geri çağırma değeri %93.51 ve F1 skoru yine %93.51 ile oldukça başarılı bir sonuç göstermiştir. Eğitim süresi ise 12 dakika 45 saniye olup, bu modelin dengeli bir performans sergilediğini, ancak MobileNet V2'ye kıyasla biraz geride kaldığını tespit edilmiştir. AlexNet modeli, %90.11 doğruluk oranı ile diğer modellere kıyasla

daha düşük bir performans sergilemektedir. Hassasiyet değeri %90.11, geri çağırma oranı %91.12 ve F1 skoru %90.21 ile diğer iki modele göre daha az başarılı bir sonuç göstermektedir. Eğitim süresi ise 15 dakika 25 saniye olup, bu modelin sınıflandırma görevlerinde hem performans hem de zaman açısından diğer iki modele başarısının daha az olduğu gözlemlenmiştir.

4. Sonuç (Conclusion)

Çalışmada, derin öğrenme tabanlı görüntü işleme ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak robot süpürgelerin engel ve tehlikeleri algılaması sağlanmıştır. Çalışmada robot süpürgelerin kamera verileri kullanarak çevrelerindeki cansız nesnelere ve merdiven gibi tehlikeli bölgeleri algılaması hedeflenmiştir.

Çalışmanın bulguları doğrultusunda, MobileNet V2 modeli %97.87 doğruluk oranı ile en başarılı performansı göstermiştir. Ek olarak, MobileNet V2'nin düşük hesaplama maliyetleri ve yüksek performansı, bu modelin özellikle gömülü sistemlerdeki uygulamalar için uygunluğunu göstermektedir. Eğitim süresi ve işlem maliyetlerine dair analizler, MobileNet V2'nin çalışmada kullanılan diğer derin öğrenme modellere kıyasla zaman ve kaynak verimliliği açısından daha başarılı olduğu görülmüştür. Bu durum, özellikle sınırlı donanımsal kaynaklara sahip sistemlerde bu modelin tercih edilme olasılığını artırmaktadır.

Çalışma kapsamında geliştirilen derin öğrenme tabanlı bu yaklaşım, LIDAR ve ultrasonik sensörlerin yüksek maliyetleri göz önüne alındığında, daha uygun maliyetli bir çözüm sunarken, robot süpürgeci çevresel farkındalığını ve güvenliğini artırmayı hedeflemektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen MobileNet V2 derin öğrenme tabanlı sistemin, robotun çevresindeki nesnelere ve tehlikeli bölgeleri algılamasını sağlayarak daha güvenli bir kullanım sunmaktadır. Ayrıca gerçekleştirilen çalışma ile, evde kullanılan akıllı robotların hem cansız nesnelere zarar vermesi engellenecek hem de akıllı robot süpürgecinin kendisini tehlikelerden koruması sağlanacaktır.

İlerleyen çalışmalarda yüksek doğruluk oranlarının önemli olduğu göz önüne alındığında, bu oranı artırmaya yönelik optimizasyon çalışmaları önerilmektedir.

5. Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma 6. Uluslararası Mühendislikte Yapay Zeka ve Uygulamalı Matematik Konferansı'nda (ICAIAME 2024) özet metin olarak sunulmuştur.

6. Kaynaklar (References)

- [1] H. He, J. Gray, A. Cangelosi, Q. Meng, T.M. McGinnity, J. Mehnen, The challenges and opportunities of artificial intelligence for trustworthy robots and autonomous systems, in: Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Intelligent Robotic and Control Engineering (IRCE), IEEE, August 2020, pp. 68–74.
- [2] A. Pandey, A. Kaushik, A.K. Jha, G. Kapse, A technological survey on autonomous home cleaning robots, Int. J. Sci. Res. Publ. 4 (4) (2014) 1–7.
- [3] N. Lopac, I. Jurdana, A. Brnelić, T. Krljan, Application of laser systems for detection and ranging in the modern road transportation and maritime sector, Sensors 22 (16) (2022) 5946.
- [4] Y.H. Lee, T.S. Leung, G. Medioni, Real-time staircase detection from a wearable stereo system, in: Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), IEEE, November 2012, pp. 3770–3773.
- [5] G.A. Affonso, A.L. De Menezes, R.B. Nunes, D. Almonfrey, Using artificial intelligence for anomaly detection using security cameras, in: Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), IEEE, October 2021, pp. 1–5.
- [6] J. Vélez, W. McShea, H. Shamon, P.J. Castiblanco-Camacho, M.A. Tabak, C. Chalmers, et al., An evaluation of platforms for processing camera-trap data using artificial intelligence, Methods Ecol. Evol. 14 (2) (2023) 459–477.

- [7] X. Gao, J. Liu, W. Chen, Deep learning-based obstacle detection and classification for autonomous vacuum robots, *J. Artif. Intell. Res.* 75 (2022) 45–58, <https://doi.org/10.1016/j.jair.2022.06.001>.
- [8] Y. Zhu, T. Wang, X. Li, Real-time object recognition for robotic vacuum cleaners using convolutional neural networks, *Robot. Auton. Syst.* 125 (2023) 102420, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.102420>.
- [9] K. Simonyan, A. Zisserman, Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, in: *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*, 2015.
- [10] K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun, Deep residual learning for image recognition, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, pp. 770–778.
- [11] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, et al., Going deeper with convolutions, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, pp. 1–9.
- [12] S. Han, J. Pool, J. Tran, W. Dally, Learning both weights and connections for efficient neural networks, *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 28 (2015) 1135–1143.
- [13] J. Yosinski, J. Clune, Y. Bengio, H. Lipson, How transferable are features in deep neural networks? *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 27 (2014) 3320–3328.
- [14] G. Litjens, T. Kooi, B.E. Bejnordi, et al., A survey on deep learning in medical image analysis, *Med. Image Anal.* 42 (2017) 60–88.
- [15] M. Tan, Q.V. Le, EfficientNet: rethinking model scaling for convolutional neural networks, in: *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, 2019, pp. 6105–6114.
- [16] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton, ImageNet classification with deep convolutional neural networks, *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 25 (2012) 1097–1105.
- [17] Y. Bengio, Learning deep architectures for AI, *Found. Trends Mach. Learn.* 2 (1) (2009) 1–127.
- [18] M.D. Zeiler, R. Fergus, Visualizing and understanding convolutional networks, in: *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, 2014, pp. 818–833.
- [19] V. Nair, G.E. Hinton, Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines, in: *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning*, 2010, pp. 807–814.
- [20] N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, et al., Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting, *J. Mach. Learn. Res.* 15 (1) (2014) 1929–1958.
- [21] R. Raina, A. Madhavan, A.Y. Ng, Large-scale deep unsupervised learning using graphics processors, in: *Proceedings of the International Conference on Machine Learning*, 2009, pp. 873–881.
- [22] Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton, Deep learning, *Nature* 521 (7553) (2015) 436–444.
- [23] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik, Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 580–587.
- [24] M. Oquab, L. Bottou, I. Laptev, J. Sivic, Learning and transferring mid-level image representations using convolutional neural networks, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 1717–1724.
- [25] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, et al., Going deeper with convolutions, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, pp. 1–9.
- [26] M. Sandler, A. Howard, M. Zhu, A. Zhmoginov, L.-C. Chen, MobileNetV2: inverted residuals and linear bottlenecks, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, pp. 4510–4520.
- [27] A.G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, et al., MobileNets: efficient convolutional neural networks for mobile vision applications, *arXiv preprint arXiv:1704.04861*, 2017.

- [28] F.N. Iandola, S. Han, M.W. Moskewicz, et al., SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5MB model size, arXiv preprint arXiv:1602.07360, 2016.
- [29] Z. Huang, X. Wang, L. Wu, Lightweight MobileNetV2 based on depthwise separable convolution for mobile device, *Int. J. Comput. Intell. Syst.* 11 (1) (2018) 1100–1108.
- [30] M. Tan, Q.V. Le, EfficientNet: rethinking model scaling for convolutional neural networks, in: *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning*, 2019, pp. 6105–6114.
- [31] Y. Chen, T. Yang, X. Zhang, et al., DetNAS: backbone search for object detection, *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 31 (2018) 6638–6648.
- [32] Z.-Q. Zhao, P. Zheng, S.-T. Xu, X. Wu, Object detection with deep learning: a review, *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.* 30 (11) (2019) 3212–3232.
- [33] D.M.W. Powers, Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness & correlation, *J. Mach. Learn. Technol.* 2 (1) (2011) 37–63.
- [34] R. Kohavi, A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection, in: *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1995, pp. 1137–1143.
- [35] M. Sokolova, G. Lapalme, A systematic analysis of performance measures for classification tasks, *Inf. Process. Manag.* 45 (4) (2009) 427–435.
- [36] J. Davis, M. Goadrich, The relationship between precision-recall and ROC curves, in: *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*, 2006, pp. 233–240.
- [37] C.J. Van Rijsbergen, *Information Retrieval*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 1979.
- [38] C.D. Manning, P. Raghavan, H. Schütze, *Introduction to Information Retrieval*, Cambridge University Press, 2008.
- [39] N. Chinchor, MUC-4 evaluation metrics, in: *Proceedings of the 4th Message Understanding Conference*, 1992, pp. 22–29.
- [40] J. Opitz, S. Burst, Macro F1 and macro F1, arXiv preprint arXiv:1911.03347, 2019.
- [41] H. He, E.A. Garcia, Learning from imbalanced data, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 21 (9) (2009) 1263–1284.
- [42] N. Japkowicz, S. Stephen, The class imbalance problem: a systematic study, *Intell. Data Anal.* 6 (5) (2002) 429–442.



OTOMASYONLU BİR SERANIN WEKA PROGRAMI İLE ENERJİ TÜKETİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN ANALİZİ

*Ali BÜYÜKMERT¹, Yüksel AYDOĞAN²

¹Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aydın

²Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Biyosistem Mühendisliği, Aydın

(Geliş/Received: 18.10.2024, Kabul/Accepted: 04.11.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Günümüzde enerji, ülkelerin gelişmişlik düzeyini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Her geçen gün enerjiye olan bağımlılığımız daha da artmaktadır. Enerji kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle son zamanlarda yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmış ve buna bağlı olarak mevcut enerjiyi etkin kullanmayla ilgili de çok fazla çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda her geçen gün önemi daha da artan tarımsal üretimde kullanılan enerjinin de etkin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmayla topraksız tarım yapan seranın enerji tüketimini etkileyen faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma yapılan sera Aydın-Denizli il sınırında bulunmakta olup ve yaklaşık 50000 m² kapalı alana sahiptir. Serada domates yetiştirilmektedir. Seranın iklim şartlarının sağlanması, besleme solüsyonunun hazırlanması ve solüsyonun besleme tesislerine aktarım işlemleri otomatik sistemler aracılığıyla yapılmaktadır. Analiz için 2021-2023 yılları arasında seranın faal olduğu zamandaki veriler kullanılmıştır. Bu veriler dış ortam sıcaklığı, nem oranı, radyasyon değeri, yayılı radyasyon değeri, rüzgar hızı, rüzgar yönü, bulutluluk süresi, güneşlenme süresi, hava basıncı, domatesin gelişim periyotları ve elektrik tüketimidir. Elektrik tüketimindeki artışı etkileyen faktörler Weka programı rastgele karar ağacı (random tree) algoritması ile analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda enerji tüketiminin artmasını etkileyen en önemli faktörün domatesin gelişim periyotları olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Enerji Tüketimi, Sera, Weka, Sınıflandırma.

ANALYSIS OF THE FACTORS AFFECTING ENERGY CONSUMPTION OF A FULLY AUTOMATED GREENHOUSE WITH THE WEKA PROGRAM

ABSTRACT

Today, energy is one of the important factors affecting the development level of countries. Every day our dependence on energy increases. Due to the limited availability of energy sources, interest in renewable energy sources has increased recently, and there has been a lot of work done on using existing energy effectively. In this context, the energy used in agricultural studies, which is increasing in importance every day, should be used effectively. With this study, it is aimed to determine the factors that affect the energy consumption of the greenhouse that makes soilless agriculture. The working greenhouse is located on the province border of Aydın-Denizli and has a closed area of about 50000 m². Providing the climatic conditions of the greenhouse, preparing the feed solution and transferring it to the feeding facilities of the solution are carried out through automated systems. Between 2021 and 2023, data from the greenhouse's active period was utilized for the analysis. These data include outdoor temperature, humidity, radiation value, diffuse radiation value, wind speed, wind direction, cloudiness time, sunbathing time, air pressure, tomato development periods and electricity consumption. The factors affecting the increase in electricity consumption were analyzed by the Weka program random tree algorithm. As a result of the study, it was concluded that the most important factor affecting the increase in energy consumption was the development periods of the tomato.

Keywords: Energy Consumption, Greenhouse, Weka, Classification.

1. Giriş (Introduction)

Dünyada enerji tüketimi her geçen yıl artmaktadır. Son 40 yılda birincil enerji tüketimindeki küresel bazdaki artışla birlikte fosil yakıtların kullanımı da oldukça fazla olmuştur. Dünya enerji senaryolarına göre önümüzdeki günlerde enerji tüketimi ile ekonomik büyümenin hızla ayrışacağı vurgulanmıştır. Bu durum, teknolojiyle ilgili gelişimin daha hızlı olmasıyla daha da belirginleşecektir [1]. Ülkelerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi kısıtlı fosil yakıtlardan sağlaması, çevre kirliliğinin başlıca nedenidir [2]. Bu nedenle yenilenebilir enerji kullanımı, çevre ve sürdürülebilir kalkınma için çok önemlidir. Dünya genelinde yenilenebilir enerji tüketimindeki artış, 2012 – 2021 yılları arasında yaklaşık 4 kat artmıştır [3]. Ülkemizde de yenilenebilir enerji üretimi her geçen gün artmaktadır [4]. Küresel ekonomik büyümenin aynı oranlarda artacağı düşünüldüğünde, 2050 yılında dünyanın 1000 EJ birincil enerjiye ihtiyaç duyacağı tahmin edilmektedir. 2030 yılından sonra fosil yakıt ve nükleer yakıt kullanımındaki problemlerden dolayı, söz konusu enerjinin büyük oranı yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması gerekecektir [5-7].

Ülkemizde enerji tüketim yerlerinden bir diğeri de tarımsal üretim tesisleridir. Soğuk mevsimlerde istenilen iklim şartlarının sağlanabilmesi için seraların ısıtılması gerekmektedir. Seralarda yetiştirilen bitkinin sağlıklı gelişimi için ısıtmanın düzenli bir şekilde yapılması gerekir. Ülkemizin ılıman bölgelerinde yapılan seracılıkta da ısıtma yapılmak zorundadır ve buralarda bile ısıtma masrafı üretim giderleri içinde ciddi bir paya sahiptir [8]. Topraksız tarım yapan tam otomasyon seralarda ısıtmanın yanı sıra bitki gelişiminin istenilen düzeyde olması için gerekli olan besleme suyunun hazırlanması ve bitkilere iletimi için fazladan enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada özellikle tam otomasyon seralarda enerjinin etkin kullanımı üretim maliyetlerini ciddi oranda düşürecektir. İhtiyaç duyulan bu enerji yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlandığı takdirde daha çevreci bir çözüm bulunmuş olacaktır.

Bu süreçte yenilenebilir enerji kullanımına yönelirken enerji tüketim yerlerinin de mevcut enerjiyi verimli bir şekilde kullanması büyük önem arz etmektedir [9]. Endüstriyel büyüme ile enerji tüketimi doğru orantılıdır. Ancak yapılan çalışmalarda enerji verimliliğinin, bu büyümenin sonucu olarak ortaya çıkacak olan sera gazı emisyonunu telafi edecek düzeyde olduğu gösterilmektedir [10].

Enerjiyi verimli kullanabilmek için tesisin enerji tüketimini etkileyen faktörlerin belirlenmesi de son derece önemlidir. Bu çerçevede, veri madenciliği, yapay sinir ağları ve makine öğrenmesi gibi sezgisel algoritmalarla daha sağlıklı analizlerin yapılması mümkün olacaktır.

2. Seralarda Enerji Tüketimi (Energy Consumption in Greenhouses)

Seralar, dış ortamdan bağımsız, bitki yetiştirilmesine uygun iklim koşullarının sağlandığı tarımsal üretim yapan tesislerdir. Enerjinin pahalı olduğu günümüzde seralarda bitki yetiştirerek ürün elde etmek oldukça masraflıdır[8]. Tam otomasyon seralarda ısıtma ve bitki besin solüsyonu sistemi için gerekli olan enerji tüketim giderleri, seranın üretim giderleri üzerinde çok büyük bir paya sahiptir. Isıtma giderleri toplam işletme giderlerinin %20-80'i arasında olmaktadır [11].

Ülkemizde artan nüfus hızı ve tarım alanlarının sınırlı olmasından dolayı her geçen gün artan gıda talebini karşılayabilmek için seralara yönelik özel önlemler alınmaktadır. Bu önlemler arasında meyve ve sebzelerin düşük üretim maliyetleri çerçevesinde yetiştirilmesi de bulunmaktadır. Sektörel sürdürülebilirliğin sağlanması adına seraların yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması ve topraksız tarımın yaygınlaştırılması gibi gelişmeler teşvik edilmektedir [12].

Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde enerjinin etkin kullanımına yönelik alınması gereken tedbirlerin seranın ısıtma sistemine yönelik olduğu görülmektedir. Ancak günümüzde topraksız tarımın enerji ve iş gücü tasarrufu, toprak kirlenmesinin engellenmesi, topraklı tarıma göre birim alandan daha çok ürün elde edilmesi, bitki yetiştirmek için verimli toprak ihtiyacının ortadan kalkması ve benzeri birçok avantajı nedeniyle topraksız üretim yapan sera sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle seralarda ısınmanın yanı sıra bitki için gerekli olan besin solüsyonu sistemi için de ciddi bir enerji gerekmektedir. Dolayısıyla enerji tüketimiyle ilgili tedbirler almadan önce, enerji tüketimini etkileyen faktörlerin bilinmesi daha etkili tedbirler almamıza imkan sağlayacaktır.

3. Weka Programının (Weka Program)

Weka, java dilinde yazılmış, Yeni Zelanda'daki Waikato Üniversitesi'nde geliştirilen sezgisel arayüze sahip popüler bir makine öğrenme yazılımı paket programıdır [12]. Weka, sezgisel arayüzü sayesinde araştırmacılar arasında oldukça popülerdir. Öğrenme algoritmalarının en optimal sonuçlara ulaşabilmesi için bayes optimizasyon yöntemini kullanarak performansını en üst düzeye çıkarmıştır.

Weka, karar ağacı algoritmaları ile büyük veri kümelerini analiz ederek çok daha anlamlı analizler ve tahminler yapılabilmesini sağlar. En yaygın kullanılan karar ağacı algoritmaları J48 ve Rastgele Karar Ağacı (Random Tree) algoritmalarıdır. Burada Shannon teorisi ile veri sınıflarının en az entropi ve olasılık değerleri hesaplanarak yapılan “böl ve yönet” yöntemine göre yukarıdan aşağıya doğru bir karar ağacı yapısı oluşturulur [13].

Shannon teorisi;

$$P_1 \cdot \log_2 P_1 + P_2 \cdot \log_2 P_2 + P_3 \cdot \log_2 P_3 + \dots P_n \cdot \log_2 P_n \quad (1)$$

$$H = -k \sum_{i=1}^n (p_i \log_2 p_i) \quad (2)$$

P, değişkenlerin olasılığı; H, Shannon aksiyonu (Olayın seçimindeki frekans değerini ifade eder).

Shannon, üretilen bir bilgi için doğruluk derecesini ölçen bir tanım yapmıştır. Shannon teorisine göre entropi, veriler içerisindeki belirsizlikler sayısallaştırılarak rastgele değişkenlerin tahmini yapılır. Bu şekilde Shannon teorisi, makine öğrenmesi karar ağacı oluşturulmasında entropi hesabıyla ağaç oluşumundaki kök düğümlerin tespit edilmesine imkan tanır [14].

4. Materyal ve Metot (Material and Method)

Bu çalışma 37°56'44.6"N 28°50'39.7"E koordinatlarında Denizli ili Sarayköy ilçesinde A&S Tarım bünyesinde bulunan serada yapılmıştır. Sera blok ve mesnetli tip olup plastik örtülü 50000 m² kapalı alana sahip, topraksız tarım yapan tam otomasyon bir seradır. Serada domates yetiştirilmekte ve yılda bir ürün alınmaktadır. Sera, Eylül ayından başlayarak Mayıs ayına kadar olan 9 aylık sürede faaldir. İhtiyaç duyulan ısı, jeotermal tesislerinden gelen sıcak sudan sağlanmaktadır. Jeotermal tesislerden gelen sıcak suyun ısı, sera bölgesinde bulunan bir boyler vasıtasıyla ısıtma suyuna aktarılmakta ve sirkülasyon pompaları aracılığıyla ısıtılması istenilen bölgelere gönderilmektedir. Sera iç sıcaklığı, otomatik sistemler aracılığıyla kontrol altında tutulmaktadır.



Şekil 1. A&S Tarım Kuş bakışı görünüş (A&S Tarım Bird's eye view)

Seranın bulunduğu bölgedeki hava verileri Arduino kart aracılığıyla alınmıştır. Hava sıcaklığı, hava basıncı, rüzgar hızı, rüzgar yönü, radyasyon değerleri, bağıl nem, güneşlenme süresi, bulutluluk ve güneş ışınım değerleri Arduino kart aracılığıyla 5 dakika aralıklarla ölçülerek saatlik ortalamaları alınıp kart üzerinde bulunan micro SD karta Excel formatında kaydedilmiştir. Ayrıca Arduino kart üzerinde bulunan gerçek zamanlı saat sayesinde veriler tarih ve saatleriyle birlikte kaydedilmiştir.

Wi-Fi kamera aracılığıyla seranın elektrik sayacı üzerinden 2 yıl boyunca saatlik olarak tüketim değerleri alınmıştır. Tüketim değerleri, kamera kayıtlarının her hafta incelenmesiyle saatlik olarak Excel

dosyasına kaydedilmiştir. Modem aracılığıyla da mobil cihazlar üzerinden kamera kayıtları anlık olarak kontrol edilmiştir. Kamera, hava istasyonu ve Wi-Fi modem için gerekli olan enerji 130 W'lık 12V polikristal yapılı güneş paneli ve 5 adet 12V – 7 amperlik bataryalar kullanılarak kesintisiz ve temiz enerji ile sağlanmıştır.

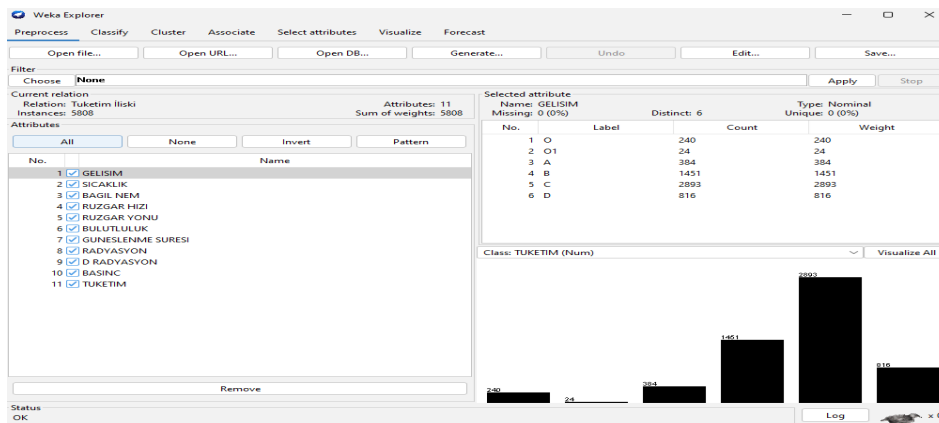


Şekil 2. 12V, 130 W, 32 hücreli polikristal yapılı güneş paneli (12V, 130 W, 32-cell polycrystalline solar panel)

Sera, Eylül ayı ile bir sonraki yılın Mayıs ayına kadar olan 9 aylık periyotta faal durumdadır. Analiz için 2021-2023 yılları arasındaki seranın faal olduğu iki periyottaki veriler kullanılmıştır. Domatesin gelişim periyodu, fidenin köklenme süreci, çiçeklenme süreci, meyve oluşum süreci ve hasat süreci olarak dört farklı şekilde kategorize edilerek incelenmiştir.

Weka, sezgisel arayüze sahip popüler bir makine öğrenme yazılımı ve paket programı olması sebebiyle bu çalışma için tercih edilmiştir. Weka programına veri girişi şu şekilde yapılmıştır: Explorer menüsü içerisinde Excel'de hazırlanmış olan veriler csv (Comma Separated Values) formatında girişleri yapılmıştır. Open File seçeneği ile Weka'ya girilen verilerin veri sütunları, nümerik ya da nominal şeklinde kategorize edildikten sonra Weka dosyası (arff) olarak kaydedilmiştir.

Weka programı ile enerji tüketimindeki artış sebeplerinin belirlenmesinde daha anlamlı sonuçlar veren karar ağacı algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar içerisinde daha önce yapılan araştırmalarda yaygın olarak tercih edildiği gözlemlenen rastgele karar ağacı (Random Tree) algoritması kullanılmıştır.



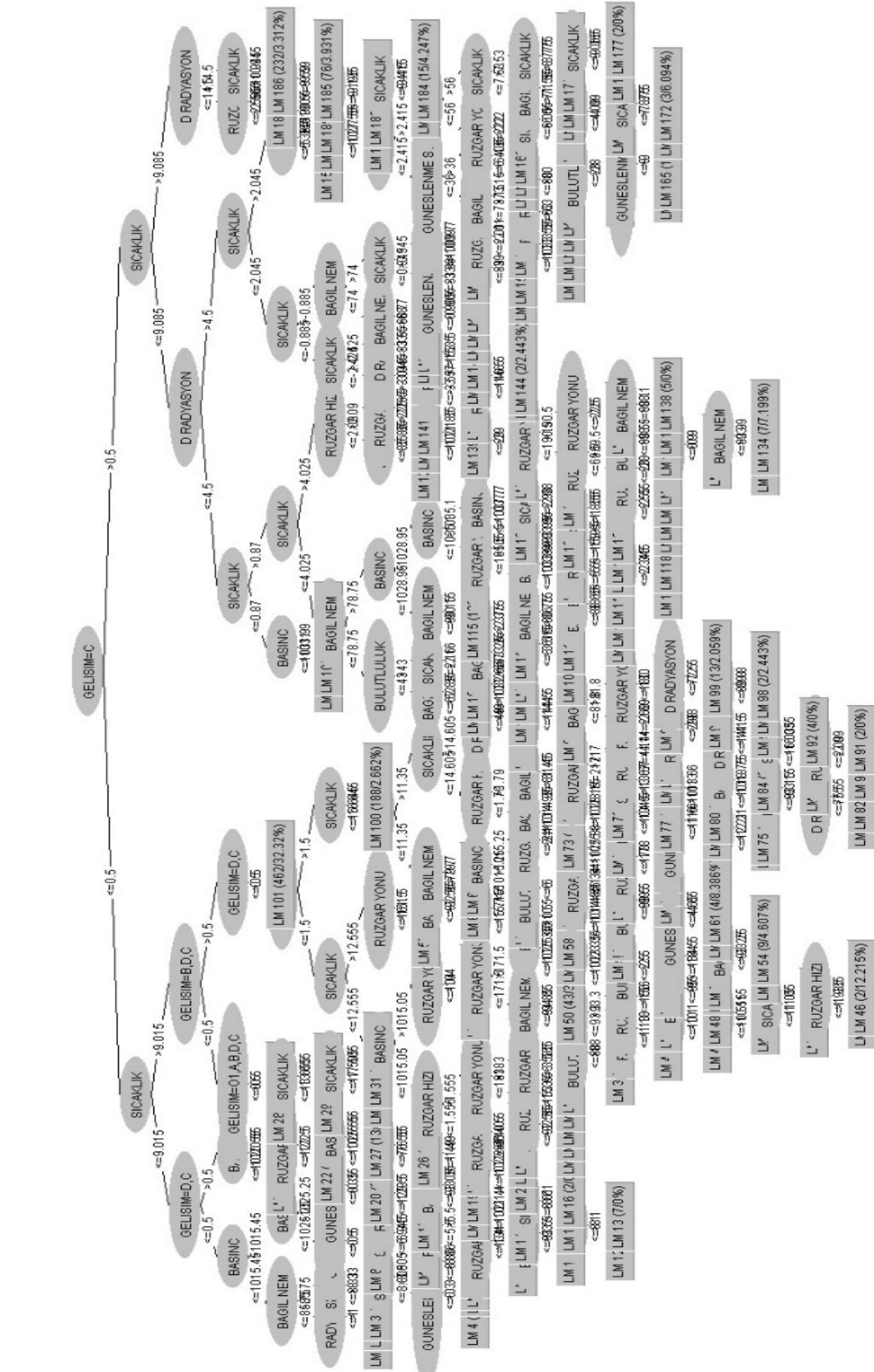
Şekil 3. Weka veri girişi ekranı (Weka data entry screen)

No.	1: GELİŞİM (Nominal)	2: SICAKLIK (Numeric)	3: BAĞIL NEM (Numeric)	4: RUZGAR HIZI (Numeric)	5: RUZGAR YONU (Numeric)	6: BULUTLULUK (Numeric)	7: GÜNEŞLENME SÜRESİ (Numeric)	8: RADYASYON (Numeric)	9: D RADYASYON (Numeric)	10: BASINÇ (Numeric)	11: TÜKETİM (Numeric)
1	B	18.53	72.3	4.3	210.0	97.0	0.0	0.0	0.0	1013.7	0.22
2	B	18.46	74.6	3.8	181.0	97.0	0.0	0.0	0.0	1013.8	0.27
3	B	17.76	78.4	1.62	222.0	29.0	0.0	0.0	0.0	1019.5	0.51
4	O	14.88	84.3	1.93	111.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1016.1	0.56
5	O	16.23	78.8	2.3	85.0	3.0	0.0	0.0	0.0	1015.8	0.61
6	O	16.19	94.2	1.96	156.0	96.0	5.9	0.0	0.0	1012.9	0.66
7	O	16.35	93.9	2.01	153.0	97.0	16.3	31.0	24.0	1012.9	0.67
8	O	15.9	94.8	2.12	171.0	93.0	0.0	0.0	0.0	1013.2	0.69
9	O	18.82	68.4	2.5	94.0	0.0	11.6	0.0	0.0	1015.9	0.7
10	O	15.57	94.2	1.74	166.0	91.0	0.0	0.0	0.0	1012.8	0.7
11	O	16.56	93.4	1.81	173.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1016.4	0.7
12	O	15.95	94.9	1.96	165.0	77.0	0.0	0.0	0.0	1013.2	0.71
13	O	15.21	95.4	1.92	128.0	90.0	0.0	0.0	0.0	1012.9	0.72
14	O	16.58	92.8	1.66	147.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1015.7	0.72
15	O	16.1	92.5	1.61	150.0	95.0	0.0	0.0	0.0	1011.9	0.73
16	O	15.95	94.6	1.04	163.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1016.5	0.73
17	O	15.48	86.7	1.0	126.0	84.0	0.0	0.0	0.0	1020.6	0.73
18	O	17.88	71.9	2.4	89.0	3.0	0.0	0.0	0.0	1016.1	0.74
19	O	14.03	87.0	1.64	104.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1016.0	0.74
20	O	15.84	94.3	0.8	172.0	85.0	0.0	0.0	0.0	1013.5	0.74
21	O	24.5	47.7	2.45	78.0	13.0	35.1	389.0	124.0	1015.8	0.75
22	O	21.05	60.1	2.1	95.0	0.0	55.1	45.0	23.0	1015.5	0.75
23	O	13.41	89.1	1.92	98.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1015.6	0.75
24	O	15.74	95.1	1.3	157.0	79.0	0.0	0.0	0.0	1013.3	0.76

Şekil 4. Weka programına girilen örnek veri seti (The sample data set that was entered in the Weka program)

5. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Bu çalışmada domates gelişimi, 2021-2023 yılları arasındaki hava sıcaklığı, bağıl nem, rüzgar hızı, rüzgar yönü, bulutluluk değeri, güneşlenme süresi, radyasyon değeri, yayılı radyasyon değeri, hava basıncı ve enerji tüketimi ile ilgili veriler kullanılmıştır. Her bir veri setinden yaklaşık 5808 adet veri elde edilmiştir. Toplamda Weka ile yaklaşık 63888 adet veri analizi gerçekleştirilmiştir. Weka yapılan sınıflandırma analizlerinde verilerin yaklaşık %80'ini anlamlı bulmuştur. Rastgele ağaç sınıflandırmasında %4.7 kök hatası, karar ağacı ise Şekil 5' teki gibi çıkmıştır.



Şekil 5. Karar ağacı (Decision tree)

Karar ağacının sonuçları incelendiğinde, yukarıda belirtilen veri setlerinin tüketimi etkileyen en önemli faktörün domates fidesinin gelişim periyodu olduğu açıkça görülmektedir. Gelişim periyodunda en fazla

domatesin meyve oluşumu ve hasat sürecinin etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tüketimi etkileyen ikinci faktör ise dış ortam sıcaklığıdır. Üçüncü faktör, domatesin köklenmesi ve çiçeklenme süreci ile yayılı radyasyon değeridir. Etki eden diğer faktörler sırasıyla rüzgar hızı, hava basıncı ve bağıl nem olmuştur.

6. Tartışma ve Sonuç (Results and Discussion)

Bu sonuçlara göre meyve oluşumu ve hasat süreci enerji tüketimini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bitki, meyve oluşumu ve olgunlaşma sürecinde daha fazla besine ihtiyaç duyduğu için besin solüsyon sistemi diğer zamanlara nazaran daha fazla çalışmaktadır. Bu nedenle enerji tüketimi artmaktadır.

Enerji tüketimini etkileyen ikinci faktör ise dış ortam sıcaklığıdır. Dış ortam sıcaklığı düştüğünde otomasyon ısıtma sistemini devreye alarak iç sıcaklığı arzu edilen düzeyde tutar. Sıcaklığın yükselmesi durumunda ise fideler suya ihtiyaç duyar ve solüsyon sistemi devreye girer. Bu sebeplerden dolayı dış ortam sıcaklığı enerji tüketiminde önemli bir faktördür.

Bitki, köklenme ve çiçeklenme sürecinde ekstra besine ihtiyaç duyduğu için üçüncü etkileyen faktör olarak domatesin köklenme ve çiçeklenme süreci ile yayılı radyasyonun etkili olduğu gözlemlenmektedir. Yayılı radyasyonun da sıcaklığın 9.085°C üzerinde olduğunda ve radyasyon değerinin 4.5 W/m² değerinin üzerinde olduğu durumda enerji tüketimini artırdığı gözlemlenmiştir.

İnceleme yapılan seranın tam otomasyon olması ve seranın ısıtılması için gerekli olan enerjiyi jeotermal kaynaktan sağlamasından dolayı üretim sürecinde toplam enerji tüketiminin çoğunluğunun domates fidesinin gelişim sürecinde harcandığı görülmüştür. Bu da domates fidesinin köklenme, çiçeklenme, meyve oluşumu ve olgunlaşma süreçlerinde besleme solüsyonuna daha fazla ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır.

Seranın enerji tüketimiyle ilgili daha önceki yıllarda yapılan çalışmalarda enerji tüketiminin ana sebebi olarak ısıtma sistemi gösterilmekte ve söz konusu çalışmalarda enerji tüketimini azaltmak için ısıtma sistemine yönelik tedbirler alınması önerilmektedir. Bu çalışmayla topraksız tarım yapan bir seranın enerji tüketimini etkileyen en önemli faktörün ısıtma sistemi değil, bunun yerine besin solüsyon sistemi olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle bu çalışma, enerji tüketimini azaltmak için ısıtma sistemlerinin yanı sıra besin solüsyon sistemine yönelik tedbirlerin de alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Günümüzde her geçen gün topraksız tarım yapan sera sayısının hızla arttığı görülmektedir. Verilerin alındığı seranın bulunduğu bölge Denizli/Sarayköy organize sera bölgesi olarak ilan edilmiştir. Bu bölgede ve ülke genelinde yaygınlaşmakta olan bu sektörün enerjiyi daha etkin kullanması adına bu çalışmanın yol gösterici ve özgün olduğunu söylemek mümkündür.

Topraksız tarım yapan seralarda enerji tüketimini azaltmaya yönelik ısıtma ve besin solüsyonu sisteminde kullanılan pompaların elektrik faz frekans değerleri değiştirilerek optimum verim elde edilebilir. Büyük alanlara sahip seralarda solüsyon dağıtım sistemi daha çok zonlara ayrılarak daha etkin ve verimli hale getirilebilir. Otomasyon sisteminde belirli periyotlarla bakım ve kalibrasyonların yapılması da enerji tüketimini azaltacaktır.

Bundan sonraki süreçte seraların toplam elektrik tüketiminin yanı sıra ısıtma ve besleme solüsyon sistemlerinin de enerji tüketim verileri alınarak Weka ile daha hassas karar ağaçları ve yapay sinir ağı analizleri yapılabilir.

Bundan sonraki çalışmalarda en az üç ya da dört sezon verileri kullanılarak oluşturulan karar ağacında daha az dallanma olacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu veriler bitkinin gelişim periyotlarına göre sınıflandırılırsa, örneğin; bitkinin köklenme süreci verileri ayrı bir veri kümesi, olgunlaşma süreci ayrı bir veri kümesi gibi ayrı ayrı analiz edildiğinde daha hassas sonuçlar elde edilir ve süreçlerin mevsimsel etkileri de gözlemlenebilir. Bunun sonucunda da en az enerji harcayarak üretim yapılabilecek aylar belirlenebilir.

Bu şekildeki verilerle başka bir çalışmada yapay sinir ağı ve makine öğrenmesi kullanılarak seranın gelecek enerji tüketim tahminleri yapılabilir ve bu tahminlere göre ihtiyaç duyulacak enerjiyi yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılayacak bir hibrit sistem tasarlanabilir.

7. Teşekkür (Acknowledgements)

A&S Tarım'a desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

8. Kaynaklar (References)

- [1] Kober, T., et al., Global energy perspectives to 2060–WEC's World Energy Scenarios 2019, *Energy Strategy Reviews*, 31 (2020): 100523.
- [2] Erdin, Ceren, and Gokhan Ozkaya, Turkey's 2023 energy strategies and investment opportunities for renewable energy sources: Site selection based on ELECTRE, *Sustainability*, 11.7 (2019): 2136.
- [3] Melikoglu, Mehmet, Vision 2023: Feasibility analysis of Turkey's renewable energy projection, *Renewable Energy*, 50 (2013): 570-575.
- [4] Tester, Jefferson W., et al., *Sustainable energy: choosing among options*, MIT press, 2012.
- [5] Spreng, Daniel, Distribution of energy consumption and the 2000 W/capita target, *Energy Policy*, 33.15 (2005): 1905-1911.
- [6] Moriarty, Patrick, and Damon Honnery, *Rise and fall of the carbon civilisation: resolving global environmental and resource problems*, London: Springer, 2011.
- [7] Kendirli, Berna, and Belgin Çakmak, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sera Isıtmasında Kullanımı, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2.1 (2010): 95-103.
- [8] Wang, Lianghu, and Jun Shao, Digital economy, entrepreneurship and energy efficiency, *Energy* 269 (2023): 126801.
- [9] Jahanger, Atif, et al., Do technology and renewable energy contribute to energy efficiency and carbon neutrality? Evidence from top ten manufacturing countries, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56 (2023): 103084.
- [10] Zaimoğlu, Zeynep, Farklı İklim Bölgelerindeki Seralar için Isı Gereksinimlerinin Modellenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32.4 (2017): 79-86.
- [11] Baytorun, A, Nafi, and Özkan Gügercin, Seralarda enerji verimliliğinin artırılması, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 30.2 (2015): 125-136.
- [12] Arora, Rohit, Comparative analysis of classification algorithms on different datasets using WEKA, *International Journal of Computer Applications*, 54.13 (2012).
- [13] Nalçakan, Yağız, Şan Sitki Bayramoğlu, and Samed Tuna, Sosyal Medya Verileri Üzerinde Yapay Öğrenme ile Duygu Analizi Çalışması, *Technical Report*, 2015.
- [14] Bahadır, Oğuzhan, and Hande Türkmençalıkoğlu, Bilgi Kuramında Shannon Entropisi ve Uygulamaları, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32 (2021): 491-497.



6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİ SONRASI YAPI DENETİM SİSTEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

*Hüseyin Hakan İNCE¹, Eda Nur SOYLU²

¹Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Burdur

²Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Deprem ve Yapı Mühendisliği Programı, Burdur

(Geliş/Received: 24.10.2024, Kabul/Accepted: 27.11.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Yapı denetimi, proje aşamasından başlayarak yapıların projelerine ve ilgili yönetmeliklere uygun olarak inşa edilip edilmediğinin kontrol edilmesi ve bu uygunluğa onay verilmesi sürecidir. Bu sürecin, yapıların kalitesini ve güvenliğini arttırdığı bir gerçektir. Ancak 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde yapı denetimli bazı binalarda olan yıkımlar yapı denetim sistemimizin sorgulanmasına yol açmıştır. Bu çalışmada öncelikle, ülkemizdeki yapı denetim sistemi ve tarihçesi hakkında bilgi verilmiş, yapı denetim kavramı, yapı denetimin amacı ve kapsamı incelenmiştir. Devamında, 6 Şubat depremleri sonrasında yapı denetim sistemimizin olumlu taraflarının yanında sistemdeki olumsuzlukların ve eksikliklerin ortaya koyulması için yapı denetim şirketleri çalışanlarıyla görüşmeler yapılmış, bulgular ortaya koyulmuş, bu depremler sonrasında yapı denetimli binaların durumları değerlendirilmiştir. Tüm bu veriler ışığında yapı denetim sistemimizin olumlu taraflarının olmasının yanında halen sistemde ve uygulamada sorunlar ve eksiklikler olduğu yapılan çalışmanın sonucunda görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yapı denetimi, yapı denetim kanunu, yapı denetimdeki eksiklikler, deprem.

EVALUATION OF THE BUILDING INSPECTION SYSTEM AFTER THE FEBRUARY 6, 2023 KAHRAMANMARAŞ EARTHQUAKES

ABSTRACT

Building inspection is the process of checking whether the buildings are constructed in accordance with the projects and relevant regulations starting from the project stage and approving this compliance. It is a fact that this process increases the quality and safety of buildings. However, in the Kahramanmaraş earthquakes on February 6, 2023, the destruction of some buildings with building inspections led to the questioning of our building inspection system. In this study, firstly, information about the building inspection system and its history in our country is given, the concept of building inspection, the purpose and scope of building inspection are investigated. Then, after the February 6 earthquakes, interviews were conducted with the employees of building inspection organizations in order to reveal the positive aspects of our building inspection system, the negativities and deficiencies in the system, the findings were revealed, and the status of the building inspected buildings after these earthquakes were evaluated. In the light of all these data, it was seen as a result of the study that there are still problems and deficiencies in the system and practice, as well as the positive aspects of our building inspection system.

Keywords: Building inspection, building inspection law, deficiencies of building inspection, earthquake.

1. Giriş (Introduction)

Dünyada yaşayan insanların en büyük ve en önemli hakkı yaşama ve barınma hakkıdır. Barınma hakkı insanların sağlam, ayakta kalabilen, afetler karşısında yıkılmayan yapılara sahip olmaları gerektiği anlamına gelir. Bu hakkı korumak ise devletlerin en başta gelen görevlerinden biridir. Bu görev için geçmişten günümüze devletler birçok kurallar ve yaptırımlar uygulamıştır [1,2]. Türkiye topraklarının %90'ından fazlası deprem açısından risk arz etmektedir [3]. Depreme dayanıklı yapılar üretmek istiyorsak yapılarımızı tasarlarken ve inşa ederken deprem riskini muhakkak dikkate almalıyız. Ülkemizde son 25 yılda yaşadığımız büyük depremler ve kayıplarımız Tablo 1'de verilmiştir. Buradaki acı sonuçlar bize hem mevcut yapı stoğumuzun hem de denetim sistemimizin problemleri olduğunu göstermektedir. Çok açıktır ki bu kayıplarımızın sebebi depremler değil depreme dayanıksız ve denetimsiz ya da denetimi uygun yapılmayan binalardır.

Tablo 1. Ülkemizde son 25 yılda yaşanan büyük depremler ve kayıplarımız (Major earthquakes and losses in our country in the last 25 years) [4,5]

Tarih	Yer	Büyüklik (Mw)	Can kaybı sayısı	Hasarlı bina sayısı
17.08.1999	Gölcük/Kocaeli	7,8	17.480	73.342
12.11.1999	Düzce	7,5	763	35.519
03.02.2002	Çay - Sultandağı	6,4	44	622
01.05.2003	Bingöl	6,4	176	6.000
23.03.2004	Aşkale / Erzurum	5,3	9	1.280
23.10.2011	Van	7,2	644	17.005
30.10.2020	Ege Denizi (Buca / İzmir)	6,9	119	633
06.02.2023	Pazarcık (Kahramanmaraş) Elbistan (Kahramanmaraş)	7,7 7,6	59.259	232.639

Ülkemizin çok büyük bölümünün deprem riski taşıması, birçok şehrimizde kaçak yapıların olması, sürekli gündeme gelen imar afları, denetim prensiplerine uyulmaması, projelerde ve uygulamalarda eksikliklerin olması gibi problemler, yaşadığımız büyük felaketlerde çok büyük can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Tüm bu sebepler bize yapı denetiminin ne kadar gerekli olduğunu, alanında eğitim almış ve uzmanlaşmış personeller ile yapılaşma sürecini yakından takip ederek, gözetimde ve denetimde yapılaşmanın yakından takip edilmesi gerektiğini göstermiştir [1].

1999 Marmara Depremi öncesinde, Türkiye'de yapı denetimi, yürürlükteki mevzuatta bağımsız bir konu olarak ele alınmamış, çoğunlukla imar hukuku kapsamında değerlendirilmiştir. Yapı denetimine ilişkin düzenlemeler, o dönemde de yürürlükte olan 3194 sayılı İmar Kanunu'nda yer almakta olup, bu süreçte yapı denetiminin temel unsurları imar mevzuatına dayandırılmıştır. Buna göre inşaatların denetim ve kontrolü ise "fenni mesul" olarak adlandırılan inşaat mühendisleri veya mimarlar tarafından yürütülmekteydi [6]. Dolayısıyla, yapı denetimi uygulamaları, modern ve sistematik bir yapı denetim mekanizmasından ziyade, fenni mesuliyet kavramı üzerinden yürütülen daha çok sınırlı bir denetim anlayışına dayanmaktaydı. Ancak bu dönemde yapı denetiminin bağımsız bir disiplin olarak ele alınmaması, denetim süreçlerinin etkinliğini sınırlamış ve yapı güvenliği açısından önemli zafiyetlere yol açmıştır.

1999 yılındaki Marmara Depremi, Türkiye'nin gerek insan kaybı gerekse yapı ve iş gücü açısından ciddi zararlar yaşamasına yol açmıştır. Bu deprem, nitelikli ve güvenli yapılaşma konusunda önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmiştir [7]. Deprem sonrasında, yapıların sağlıklı ve güvenli yaşam alanları oluşturma konusundaki yetersizlikler gözler önüne serilmiş ve yapı üretim süreçlerinde denetim sisteminin yeniden ele alınması zorunluluğu doğmuştur. Bu bağlamda, yapıların yönetmeliklere uygun ve sıkı denetim altında inşa edilmesi hedeflenmiş, böylece gelecekteki felaketlerde kayıpların en aza indirilmesi amaçlanmıştır. 1999 depreminin hemen ardından, 2000 yılında çıkarılan 595 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun Hükmünde Kararname (KHK) ile denetim sistemi pilot olarak 27 ilde uygulamaya geçirilmiştir. Ancak, bu KHK'nin iptal edilmesinden sonra, 2001 yılında çıkarılan 4708 sayılı Yapı Denetimi Hakkında Kanun (YDHK) [8] ile yapı denetimi sisteminin yasal çerçevesi oluşturulmuştur. Bu yasa, öncelikle 19 pilot ilde uygulamaya konulmuş, 2011 yılından itibaren ise ülke genelinde uygulanmaya başlanmıştır. Bu yasal düzenlemeler, Türkiye'de yapı güvenliğinin artırılması ve yapı denetim sisteminin kurumsallaşması adına önemli adımlar olmuştur.

Yapılan tüm düzenlemelere ve iyileştirme çalışmalarına rağmen, yapı denetim sisteminde görülen sorunların çözümü amacıyla dönemin Bayındırlık ve İskan Bakanlığı tarafından hazırlanan Yapı Denetim Uygulama Yönetmeliği 5 Şubat 2008 tarihinde Resmi Gazete’de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Ancak bu yönetmelik de yapı denetim sistemindeki mevcut sorunları tam anlamıyla çözmemiştir. Sorunların giderilmesine yönelik devam eden çalışmalar çerçevesinde, Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik (YDUYDYDY) [9], 29 Aralık 2018 tarihinde Resmi Gazete’de yayımlanmış ve 1 Ocak 2019 itibarıyla yürürlüğe girmiştir. Bu düzenlemeyle birlikte yapı denetim sisteminde "e-dağıtım" modeline geçilmiştir. Bu model, yapı denetim kuruluşlarının görev alacakları projelerin elektronik ortamda bakanlık tarafından belirlenmesini öngörmektedir. Böylece, yapı denetim kuruluşları ile müteahhitler arasındaki olası çıkar çatışmalarının ve ilişkilerin tamamen kesilmesi hedeflenmiştir. Bu yenilik, denetim sürecinde tarafsızlığın ve bağımsızlığın sağlanması adına önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Yapı denetiminin temel amacı, yapıların inşaa sürecini başlangıç aşamasından tamamlanmasına kadar titizlikle denetlemektir. Etkin bir yapı denetimi sayesinde, yapısal kusurların oluşmasının büyük ölçüde önüne geçilebilir ve güvenli bina inşaa sağlanabilir [10]. Özellikle deprem gibi doğal olayların yıkıcı afetlere dönüşmesini engellemek için, sağlam ve etkili bir yapı denetim sisteminin kurulması ve bu sistemin etkin bir şekilde işletilmesi hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yapı üretim sürecinin her aşamasının bağımsız bir şekilde denetlenmesi zorunludur.

Yapı denetimini gerçekleştiren kişi ya da kuruluşun bağımsız olması, sürecin güvenilirliği açısından kritik bir unsur olmanın yanı sıra, denetim faaliyetinin başarılı olabilmesi için mesleki yeterliliğin, etik kuralların ve ahlaki sorumluluk anlayışının da sağlanması gerekmektedir. Bu unsurlar, yapı denetiminin sadece teknik bir kontrol süreci olmanın ötesine geçerek, aynı zamanda toplumsal ve mesleki sorumluluk bilinciyle yürütülmesini sağlar. Dolayısıyla, yapı güvenliğinin temininde bağımsızlık, uzmanlık ve etik ilkelerin bir arada işletildiği bir denetim mekanizması esastır.

Bu çalışma kapsamında ilk olarak ülkemizdeki yapı denetim sistemi, bunun işleyişi, amacı ve kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir. Devamında, özellikle 6 Şubat 2023 depremleri sebebiyle oluşan büyük yıkımlar, can ve mal kayıpları sonrasında yapı denetim sisteminin olumlu ve olumsuz yönlerini ortaya koymak amacıyla yapı denetim kuruluşlarıyla görüşmeler ve konuyla ilgili araştırmalar yapılmış, bunlardan yararlanılarak sonuç ve öneriler ortaya konulmuştur.

2. Yapı Denetimi (Building Inspection)

2.1. Yapı denetimi kavramı (The term of building inspection)

Denetlemek, “bir işin doğru ve usulüne uygun olarak yapılıp yapılmadığını incelemek; teftiş etmek, kontrol etmek” anlamına gelmektedir [11]. Yapı denetimi ise bir yapının inşaat sürecinde, proje aşamasından yapım süreci sonuna kadar (başlangıcından bitimine kadar), projenin tüm aşamalarının imar planına, sağlık, sanat ve fen kurallarına, belirlenen standartlara, teknik şartnamelere ve tüm yasal düzenlemelere uygun olarak gerçekleştirildiğini denetleyen bir süreçtir.

Yapı denetimi açısından denetim kavramı incelendiğinde, yapıdaki denetimin bir sonuç denetimi olmadığı, aksine süreç ve önleyici denetim odaklı olduğu anlaşılmaktadır. Yapı denetim sisteminin temel unsuru karşılaştırmadır; planlanan yapı ile gerçekleşen yapı arasındaki farklar değerlendirilir. Denetim kapsamında ele alınması gereken esas, yapının plan, sağlık, sanat ve fen kurallarına uygunluğunun sağlanmasıdır. Etkili bir yapı denetiminin gerçekleştirilebilmesi için, planlama araçlarına sahip olunması zorunludur. Bu bağlamda, gerçekleşen durum ile istenilen sonuçların karşılaştırılması denetim mekanizması aracılığıyla yapılmaktadır [12].

2.2. Yapı denetimin amacı ve kapsamı (Purpose and scope of building inspection)

Yapı denetiminin temel amacı, inşa edilen yapıların güvenli, sağlam, kullanım amacına uygun ve kaliteli olmasını sağlamaktır. Denetim süreci, proje başlangıcından tamamlanmasına kadar olan her aşamayı kapsar ve yapının yaşam döngüsü boyunca kalite kontrolünü temin eder. Ülkemizde yapı denetimi, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığından izin belgeli ve yalnızca yapı denetimi ile uğraşan, ortaklarının tamamı mimar ve mühendisler olan yapı denetim kuruluşları tarafından yapılmaktadır.

Yapı denetim kuruluşlarının denetimine tabi olmayan yapılar [8]:

- Kamu mülkiyetindeki yapılar ve ruhsata tabi olmayan yapılar,
- En fazla 2 katlı (Bodrum katı hariç) ve toplam inşaat alanı 200 m²'yi geçmeyen müstakil yapılar,
- Entegre tesis niteliğinde olmayan hayvancılık ve tarım için yapılan basit yapı ve tesisler,
- İskan dışı alanlarda, köy yerleşik alanlarında ve nüfusu 5000'in altındaki belediyelerin sınırları içerisinde ve en çok iki katlı (bodrum katı ve çatı arası dışında), toplam inşaat alanı 500 m²'yi geçmeyen yapılar.

YDHK [8]'ye göre bu yapıların haricindeki, belediye sınırları ve mücavir alan içindeki ve bunların dışında kalan yerlerde yapılacak her türlü yapı, yapı denetim kuruluşları tarafından denetlenerek inşa edilmelidir.

Yapı denetim hizmeti, yapı sahibi ile yapı denetim kuruluşu arasında imzalanan hizmet sözleşmesinin hükümleri doğrultusunda yürütülmektedir. Bu kapsamda, yapı denetim kuruluşu, proje müelliflerince hazırlanan, yapının inşa edileceği yerin zemin ve temel raporlarını ve uygulama projelerini ilgili mevzuat çerçevesinde detaylı bir şekilde inceler. Aynı zamanda, yapı denetim kuruluşu tarafından proje müelliflerinin hazırladığı uygulama projesi ve hesaplar da denetlenir ve ilgili idareler dışında başka bir kurum veya kuruluşun onayı olmaksızın uygunluk görüşü ilgili idareye bildirilir. Yapı denetim kuruluşunun görevleri arasında, yapının ruhsat ve eklerine uygun olarak inşa edilip edilmediğinin denetimi de yer almakta olup, yapım sürecinde kullanılan malzemelerin ve gerçekleştirilen imalatın proje, teknik şartname ve standartlara uygunluğu sürekli olarak kontrol edilir ve bu süreçler belgelendirilir. Ayrıca, malzeme ve imalatın kalitesini güvence altına almak için gerekli deneylerin yapılması sağlanır. Eğer yapının inşasında ruhsat ve eklerine aykırı bir uygulama tespit edilirse, yapı denetim kuruluşu bu durumu vakit kaybetmeden ilgili idareye bildirir. Yapı, ruhsat eki projelere uygun şekilde kısmen ya da tamamen tamamlandığında uygunluğunu ilgili idareye rapor eder [13,14].

Yapı denetim kuruluşlarının görevleri arasında iş sağlığı ve güvenliği (İSG) konusunda da önemli sorumluluklar bulunmaktadır. Şantiyede yapılan çalışmaların, İSG mevzuatına göre düzenlenmiş sağlık ve güvenlik planına uygun olarak yürütüldüğünü denetlemek, yapı denetim kuruluşunun temel sorumlulukları arasındadır. Bu bağlamda, yapı denetim kuruluşu, gerekli İSG tedbirlerinin alındığından emin olmalı ve bu konuda gerektiğinde yapı müteahhidini yazılı olarak uyarmalıdır. Eğer yapılan uyarılara rağmen müteahhit gerekli önlemleri almazsa, yapı denetim kuruluşu durumu ilgili Çalışma ve İş Kurumu İl Müdürlüğü'ne bildirmekle yükümlüdür. Bu düzenleme, İSG açısından denetim mekanizmasının etkili işlenmesini, iş kazalarının önlenmesini ve sahada güvenli çalışma koşullarının sağlanmasını garanti altına almayı amaçlamaktadır. Yapı denetim kuruluşlarının İSG konusundaki sorumlulukları ikincil nitelikte olup, bu kuruluşlar İSG'yi doğrudan sağlamak veya riskleri önlemek gibi birincil sorumluluğa sahip değildirler. Yapı denetim kuruluşlarının bu alandaki görevi, yapı müteahhidinin İSG yükümlülüklerini yerine getirmesini sağlama yönünde bir katkı sunmaktır. Dolayısıyla, yapı denetim kuruluşları İSG mevzuatına uygunluğun denetimi ve kontrolü konusunda müteahhit üzerinde bir denetim mekanizması olarak işlev görürler.

Yapı denetiminin kapsamı, geniş bir yelpazede teknik, hukuki ve idari konuları içerir. Denetim süreci, yapının tasarımından, projelerin incelenmesine, malzeme seçimine, yapılan imalatların ve işçiliklerin kontrolüne, inşaat yönetiminden, iş güvenliğine kadar bir dizi unsuru kapsar. Aynı zamanda denetçilerin rolü, denetim kuralları ve standartlarının evrenselliği gibi konular da yapı denetimi kapsamında önemli bir yer tutar.

3. Materyal ve Metot (Material and Method)

Yapı denetimi, inşaat sektöründe önemli bir rol oynamakta olup, yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve çevresel uyumu gibi unsurları değerlendirir. Bu sürecin olumlu ve olumsuz yönleri, inşaat projelerinin başarıyla tamamlanması ve toplum güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında ülkemizdeki yapı denetim sisteminin olumlu yanlarının ve sistemdeki olumsuzlukların ve eksikliklerin ortaya koyulabilmesi için Antalya ve Burdur illerinde faaliyet gösteren 4 farklı yapı denetim kuruluşunun çalışanları ile yüz yüze görüşmeler yapılmıştır.

4. Araştırma Bulguları ve Tartışma (Research Findings and Discussion)

4.1.Yapı denetim sisteminin olumlu yanlarının ve sistemdeki olumsuzlukların araştırılması (Investigation of the positive aspects of the building inspection system and the negative aspects of the system)

Yapı denetim kuruluşları çalışanlarıyla yapılan görüşmeler ve araştırmalar ışığında yapı denetim sisteminin yapılar ve inşaat sektörü için olumlu tarafları, yapı denetim sistemindeki olumsuzluklar ve eksiklikler ile ilgili tespit edilen bulgulara bu bölümde yer verilmiştir.

Araştırma sonucunda yapı denetiminin olumlu yönlerinin, yapılar ve inşaat projeleri için kalite ve güvenlik sağlamaktan, yönetmeliklere, hukuka uygunluk ve proje verimliliği gibi önemli unsurlara kadar geniş bir yelpazede değerlendirilebileceği ortaya koyulmuştur. Bu olumlu yönler ve bunların getirdikleri şunlardır:

Yapılarda kalite güvencesi ve güvenli yapılar:

Yapı denetimi, binaların inşa sürecinde kalite güvencesini sağlayarak yapısal dayanıklılığın ve güvenliğin artırılmasına olanak tanır. Denetim mekanizması, inşaat projelerinin her aşamasında yönetmeliklere ve standartlara uygunluğunu denetleyerek, olası ihmallerin ve yapısal hataların önüne geçer. Bu denetimler, deprem gibi doğal afetlerde can kaybını ve maddi zararları minimize etmeye yönelik önemli bir güvence sağlar ve yapıların güvenliğini artırır.

Projelerin her aşamasının yönetmeliklere, standartlara ve hukuka uygunluğu:

Yapı denetim sistemi, projelerin her aşamasının yönetmeliklere, standartlara uyumunu sağlayarak hukuki sorunların oluşmasını engellemekte ve yapıların yasal olarak güvence altına alınmasına önemli bir katkı sağlamaktadır. Türkiye'deki yapı denetim sistemi, projelerin yönetmeliklere ve standartlara uyumunu denetleyerek, yapılarla ilgili hukuki anlaşmazlıkların önlenmesinde kilit bir rol oynamaktadır. Bu uyumun olması uzun vadede hem yasal süreçlerin hızlandırılmasına hem de risklerin minimize edilmesine yardımcı olur.

Projelerde verimliliğin artması:

Yapı denetimi, projelerde maliyet etkinliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin temelinde, denetim süreçleri sayesinde inşaat projelerindeki hataların erken tespit edilmesi ve düzeltilmesi yer alır. Yapı denetim kuruluşları, projelerin planlama aşamasından uygulama süreci dahil her adımda, kullanılan malzemelerin uygunluğunu, işçiliğin kalitesini ve yönetmeliklere uyumunu denetler. Denetim sayesinde, inşaat hatalarının erken tespit edilmesi ve düzeltilmesi, proje sürecinde maliyetlerin kontrol altında tutulmasına katkı sağlar. Hataların erken aşamada giderilmesi, sonradan ortaya çıkabilecek daha büyük ve maliyetli sorunların önlenmesine olanak tanır, böylece projelerde genel verimlilik artar.

Araştırma sonucunda ülkemizdeki yapı denetim sisteminde ve sürecinde karşılaşılan bazı olumsuzlukların ve eksikliklerin çeşitli boyutlarda negatif etkiler yarattığı ve inşaat sektöründe birtakım zorluklara yol açtığı tespit edilmiştir. Bu olumsuzluklar ve eksiklikler şu şekilde özetlenebilir:

Maliyet artışı:

Yapı denetim süreci, yapıların standartlara ve yönetmeliklere uygunluğunu sağlamak amacıyla ek maliyetler gerektirir. Bu ek maliyetler, yapı denetim kuruluşlarının yürüttüğü denetim hizmetlerinin maliyeti, malzeme kontrolleri ve uygunluk testleri, gerekli yasal prosedürlerin yerine getirilmesi gibi unsurlardır. Dolayısıyla, bu maliyetler projelerin genel bütçesini artırmakta ve özellikle küçük ölçekli projelerde yatırımcılar ve müteahhitler açısından finansal baskı oluşturmaktadır. Küçük ölçekli projelerde, zaten sınırlı olan bütçeler üzerindeki bu ek maliyetler, projenin mali sürdürülebilirliğini zorlaştırabilir. Bu tip projelerde yatırımcılar ve müteahhitler, denetim süreciyle ilgili harcamalar

nedeniyle proje kapsamını daraltmak, düşük kaliteli malzemelere yönelmek veya işçilik maliyetlerini azaltmak gibi yollarla maliyetleri düşürmeye çalışabilmektedir.

Bürokratik işlemlerin fazlalığı:

Yapı denetimi, yoğun resmi prosedürlere dayanan bürokratik bir süreçtir. Aşırı bürokrasi ve onay süreci, yapı denetim sürecinin yavaş ilerlemesine, proje onaylarının gecikmesine veya inşaat süreçlerinin aksamasına yol açabilmektedir. Bu durum, planlanan iş akışını ve maliyet kontrolünü zorlaştırarak inşaat projelerinin yönetiminde problemlere yol açabilmektedir.

Denetim sürecinden kaynaklı gecikmeler:

Denetim sürecinden kaynaklı gecikmeler projelerin planlanan sürede tamamlanmasını zorlaştırabilmektedir. Denetim aşamalarında oluşabilecek aksaklıkların, eksikliklerin düzeltilmesi için verilen süre, inşaat süresinin uzamasına neden olabilmektedir. Bu durum, projelerin bitiş tarihlerini öteleyerek yatırımcılar ve müteahhitler açısından maliyet ve planlama sorunlarına yol açabilmektedir. Bu sorunların çözümü için, iyi bir iş planı yapılması, bu plana ve projelere uygun imalatlar yapılması ve tüm paydaşların iş birliği içinde çalışması gerekmektedir.

Taraflar arasındaki iletişim eksikliğinin yol açtığı sorunlar:

Yapı denetim kuruluşları ile müteahhitler, yapı sahipleri, proje sahipleri ve diğer paydaşlar arasındaki yetersiz iletişim, denetim sürecinde anlaşmazlıkları artırabilmektedir. İletişim eksiklikleri, yanlış anlaşılmalara veya projelerin verimli bir şekilde ilerlememesine yol açarak sürecin sağlıklı bir şekilde tamamlanmasını engellemektedir.

Uygulama sorunları:

Yapı denetim kuruluşlarının hepsi yapı denetim ile ilgili yönetmelikleri ve standartları tutarlı bir şekilde uygulamadığından, denetimlerin yeterince titiz yapılmaması, eksik denetim yapılması veya denetim kuruluşlarının bazılarının farklı projelere yönelik uygulamalarında tutarsızlık olması, yapıların güvenliği ve kalitesi açısından risk oluşturmaktadır. Bazı yapı denetim kuruluşlarının tüm projeler için yeterince titiz denetim yapmaması, bazı projelerde yeterli denetim yapmaması veya denetim sonuçlarını gerektiği gibi raporlamayarak bazı eksiklikleri gizlemesi vb. sebepler denetimin amacını zayıflatmakta ve yapı güvenliğini tehlikeye sokmaktadır.

Müteahhitlerle ilişkilerde sorunlar:

Bazı durumlarda yapı denetim kuruluşları, müteahhitlerle bağımsız çalışmakta zorluk yaşamaktadır. Müteahhitlerin yapı denetim kuruluşlarıyla yakın ilişkiler kurması, denetim süreçlerinde çıkar çatışmalarına ve şeffaflık sorunlarına yol açabilmektedir. 2019'da yürürlüğe giren YDUYDYDY [9] ile gelen "e-dağıtım" sistemi ile bu sorunlar azaltılmaya çalışılsa da, uygulamada bazı sıkıntılar devam etmektedir.

İSG eğitimi eksikliği:

Sahadaki yapı denetim çalışanlarının İSG konusunda yeterli eğitime sahip olmadıkları görülmektedir. Yetersiz eğitim, sahada etkili denetim yapılamamasına ve güvenlik risklerinin artmasına yol açabilmektedir. Her ne kadar İSG açısından birincil sorumluluk yapı denetim kuruluşlarında olmasa da bu durum sahada çalışanların güvenliğini sağlamada gerekli tedbirlerin alınmasında yetersiz kalınmasına neden olabilmekte, iş kazası risklerini artırmaktadır. İstenmeyen iş kazalarının meydana gelmesi durumunda yapı denetim çalışanları da kanunen sorumlu tutulabilmektedir. Denetim personelinin bu konuda daha fazla eğitim alması, sahadaki tedbirlerin daha etkili bir şekilde uygulanmasını sağlayabilir.

Bu olumsuzluklar, yapı denetim sürecinin etkili ve verimli bir şekilde yürütülmesi önünde engeller oluşturarak, projelerin zamanında ve bütçeye uygun şekilde tamamlanmasını zorlaştırmaktadır. Yapı denetim sisteminin bu sorunları aşabilmesi için daha güçlü denetim mekanizmaları, iyileştirilmiş bürokratik süreçler ve iletişim kanallarının geliştirilmesi gerekmektedir.

4.2.6 Şubat 2023 depremleri ışığında yapı denetim sisteminin değerlendirilmesi (Evaluation of the building inspection system in the light of the February 6, 2023 earthquakes)

1999 Marmara depremiyle birlikte hayatımıza yapı denetim kavramı girmiş, her yıl farklı kararnamele, farklı yönetmelikler ile olsa bile günümüzdeki halini yaşanan felaketler şekillendirmiştir. Ülkemizde Yapı Denetim Kanununun yürürlüğe girmesi ile yapılarda kalitenin ve güvenliğin artması sağlanmıştır. 6 Şubat 2023 tarihinde yaşadığımız Kahramanmaraş merkezli depremler yıkılan bina sayısı ve can ve mal kaybı açısından tarihimizdeki en büyük felaketlerden birisi olmuştur. Bu depremler, yapılarımızın yapı denetimi öncesi dönemle kıyaslandığında daha iyi durumda olduğunu, ancak halen yapı denetim sistemimizde eksiklikler ve sorunlar olduğunu, yeni yapılarda da gördüğümüz yıkımlar ve can kayıpları neticesinde bize acı bir şekilde göstermiştir. Bu durumla ilgili T.C. Cumhurbaşkanlığı İletişim Başkanlığı Dezenformasyonla Mücadele Merkezi tarafından 15-16 Şubat 2023 tarihlerinde yayımlanan Dezenformasyon Bülteninde [15] T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı verilerine göre (hemen deprem sonrasında 14 Şubat tarihli yapılan tespitlere göre), depremde yıkılan binaların yüzde 98'inin 1999 yılı öncesinde inşa edildiği belirtilmiştir. İlgili veriler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de eski bina olarak ifade edilen binalar 1999 yılı öncesi, yeni bina olarak ifade edilen binalar ise 1999 yılı sonrası inşa edilen binaları ifade etmektedir.

Tablo 2. Kahramanmaraş depremleri sonrasında 14 Şubat 2023 tarihli yıkık bina tespit çalışması (Following the Kahramanmaraş earthquakes, a collapsed building was detected on February 14, 2023) [15]

İl adı	Yıkılan bina sayısı	Eski bina sayısı	Yeni bina sayısı	Eski bina (%)	Yeni bina (%)
Adana	13	12	1	92,31	7,69
Adıyaman	1348	1315	33	97,55	2,45
Diyarbakır	52	52	0	100,00	0,00
Gaziantep	2648	2622	26	99,02	0,98
Hatay	1821	1780	41	97,75	2,25
Malatya	1124	1119	5	99,56	0,44
Kahramanmaraş	1816	1790	26	98,57	1,43
Şanlıurfa	30	30	0	100,00	0,00
Kilis	146	146	0	100,00	0,00
Osmaniye	148	148	0	100,00	0,00
TOPLAM	9146	9014	132	98,56	1,44

Tabiki bu tespit hemen deprem sonrasında yapılan çok erken bir tespit olduğundan sonrasında yapılan tespitlerde bu sayılar ve yeni bina oranı artmıştır. Nitekim 15 – 17 Eylül 2023 tarihleri arasında İstanbul'da düzenlenen Deprem Gerçeği ve Kentsel Dönüşüm Şurasında 6 Şubat depremlerinde yıkılan yapıların yüzde 90'dan fazlasının 1999 öncesi inşa edilen yapılar olduğu belirtilmiştir [16]. Buradan yıkılan yapıların yaklaşık yüzde 10'unun 2000 yılı ve sonrası inşa edilen daha yeni yapılar olduğu anlaşılmaktadır ve bu oran hiç de azımsanacak bir oran değildir.

Tüm bu verilere bakıldığında 6 Şubat depremlerinde yapı denetimi öncesindeki 1999 yılı ve öncesinde inşa edilen yapılarda büyük yıkım olduğu, 2000 yılı ve sonrasında yapılan yapılarda ise yıkımların daha az olduğu görülmektedir. Ancak depremler sonrasında yapı denetimli binalarda hasar olsa da yıkım olması beklenmezken bu oranda bile bu binalarda yıkımların olması halen yapı denetim sistemimizde düzeltilmesi gereken eksiklikler ve kusurlar olduğunu acı bir şekilde ortaya koymuştur. Şekil 1'de Hatay'da 2011'de yapımına başlanan ve 2013'te tamamlanan 4 blok, 249 bağımsız bölümden oluşan 15 katlı yapı denetimli bir yapının deprem sonrası durumu görülmektedir. Depremde yıkılan bu yapının enkazında 200'den fazla insanımız hayatını kaybetmiştir.



Şekil 1. 6 Şubat depremleri sonrası Hatay’da yıkılan yapı denetimli bir yapı (The building that collapsed in Hatay after the February 6 earthquakes was a controlled structure) [17]

Elbette bu yapının ve benzer yapıların yıkılmasının veya ağır hasar görmesinin sebebinin sadece yapı denetim sistemindeki eksiklikler, kusurlar veya denetim eksiklikleri olduğu söylenemez, ancak yapı denetim sistemindeki kusurlar ve denetim eksiklikleri buradaki sebeplerden bazılarıdır.

Kahramanmaraş depremlerinde meydana gelen yapısal hasarlar, geçmişte gözlenen tasarım, imalat ve denetim kusurlarının bir yansımasıdır [18]. Hasarlı betonarme binaların değerlendirilmesinin, inşa edildikleri dönemler, kullanılan malzemeler ve teknikler göz önünde bulundurularak yapılmasında fayda vardır. Bu binalar, hazır betonun yaygınlaşmadığı, betonarme çeliğinin yalnızca düz donatı olarak kullanıldığı ve yapı denetiminin zorunlu olmadığı "eski" yapılar ile günümüzde hazır beton, nervürlü donatı kullanılarak ve zorunlu denetim süreçleri altında inşa edilen "yeni" yapılar olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca, 2018'de yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) [19] esaslarına göre tasarlanmış ve inşa edilmiş "çok yeni" binalar da bu sınıflandırmada ayrı bir kategori oluşturabilir [20].

Bu sınıflandırmalar, deprem sonrasında yapılarındaki hasarların, yıkımların sebeplerini anlamak ve bunlara müdahale yöntemlerini belirlemek açısından önemlidir. Eski yapılar, düşük kaliteli malzeme kullanımı, yetersiz mühendislik tasarımı ve denetimsizlik gibi faktörler nedeniyle daha yüksek risk taşıırken, TBDY esaslarına uygun olarak inşa edilen çok yeni binalar, daha iyi mühendislik çözümleri, kaliteli malzeme kullanımı ve denetim süreçleri ile nispeten daha güvenli kabul edilmektedir. Ancak, her yapı dönemi kendi özgün yapısal özelliklerini ve potansiyel zayıflıklarını taşımaktadır, bu nedenle hasarlı binaların değerlendirilmesinde bu dönemsel farklılıkların dikkate alınması gereklidir.

5. Sonuç ve Öneriler (Results and Suggestions)

Bu çalışmada, Türkiye'deki yapı denetim sistemi, asrın felaketi olarak anılan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri ışığında değerlendirilmiştir. Yapı denetimi, inşaat sektöründe kalite güvencesi, yönetmeliklere ve hukuka uyum ve projelerde verimlilik gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Bu sistem, yeni yapıların belirli standartlara uygun inşa edilmesini sağlayarak deprem gibi doğal afetler karşısında daha güvenli olmasını sağlar. Ancak, Kahramanmaraş depremleri, yapı denetim sisteminin eksikliklerini acı bir şekilde ortaya koymuştur. Depremde yıkılan veya ağır hasar gören binaların çoğunluğu eski yönetmeliklere göre inşa edilmiş olsa da, yeni yönetmeliklere uygun inşa edilmiş bazı binaların da hasar görmesi, mevcut yapı denetim süreçlerinin yeterliliği konusunda ciddi soru işaretleri doğurmuştur. Bu durum, yapı denetiminin sadece kağıt üzerinde kalmaması gerektiğini, gerçek uygulamalarda da etkin bir şekilde yürütülmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Yapı denetiminin yapıların deprem dayanıklılığı açısından değerlendirilmesi, Türkiye gibi deprem riski yüksek bir ülkede hayati önem taşımaktadır. Deprem sırasında ortaya çıkan hasarların analizi, yapı denetim sisteminin daha da güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, yapı denetim süreçlerinin iyileştirilmesi, yapıların daha dayanıklı ve güvenli hale gelmesi için kritik bir adım olacaktır. Yapı denetiminin bir diğer önemli yönü ise İSG açısından dır. Yapı denetim süreçlerinin İSG ile entegrasyonu, sahadaki çalışanların güvenliğini sağlamak ve olası iş kazalarını minimize etmek açısından önemlidir. Denetim çalışanlarının yeterli eğitim ve bilgiye sahip olmaları hem yapıların güvenliği hem de İSG açısından büyük önem taşımaktadır. Sonuç olarak, yapı denetim sisteminin hem avantajları hem de dezavantajları bulunduğu açıktır. Yapı denetiminin olumlu katkılarının artırılması ve süreçteki olumsuzlukların minimize edilmesi için gerekli önlemler alınmalı ve düzenlemeler yapılmalıdır.

6. Kaynaklar (References)

- [1] F. Sakallı, Yapı denetim sisteminde yaşanan sorunlar, 4708 sayılı Yapı Denetim Hakkında Kanun'daki eksiklikler ve çözüm önerileri., Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2008.
- [2] L.O. Uğur, M. Aslan, Düzce İlinde Yapı Denetimi Kuruluşlarının Karşılaştıkları Sorunların Belirlenmesi, in: Kongre Tam Metin Kitabı, İksad Global Yayıncılık, VI. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi, 2021.
- [3] C. Öcal, H.H. İnce, Türkiye'de Mevcut Yapı Stoğu ve Kentsel Dönüşüm, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi 4 (2012) 89–95.
- [4] URL1, Türkiye'deki depremler listesi, Vikipedi (2024). https://tr.wikipedia.org/w/index.php?title=T%C3%BCrkiye%27deki_depremler_listesi&oldid=33983419 (accessed August 1, 2024).
- [5] URL2, Büyük Depremler - B.Ü. KRDAE Bölgesel Deprem-Tsunami İzleme ve Değerlendirme Merkezi, (2024). <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/deprem-bilgileri/buyuk-depremler/> (accessed August 1, 2024).
- [6] E. Yavuz, Yapı Denetim Sözleşmeleri, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, 2015.
- [7] İ.H. Göver, Türkiye'nin Deprem Gerçeğine Sosyolojik Bir Bakış, İksad Yayınevi, Ankara, 2023.
- [8] YDHK, Yapı Denetimi Hakkında Kanun, 2001. <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=4708&MevzuatTur=1&MevzuatTertip=5> (accessed August 8, 2024).
- [9] YDUYDYDY, Yapı Denetimi Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, (2018). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/12/20221223-5.htm> (accessed August 1, 2024).
- [10] V.B. Boysal, Ş.T. Güvel, Yapı Denetim Mevzuatında Tespit Edilen Problemlerin Osmaniye İli Özelinde Değerlendirilmesi, OKÜ Fen Bil. Ens. Dergisi (OKU Journal of Nat. & App. Sci) 6 (2023) 2296–2315. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1170963>.
- [11] TDK, Denetlemek, Türk Dil Kurumu Sözlükleri (2024). <https://sozluk.gov.tr/> (accessed August 2, 2024).
- [12] H. Yılmaz, Yapı Denetimi ve Yapı Denetim Kuruluşları, Yetkin Yayınları, Ankara, 2007.
- [13] İ.H. Duman, 100 Soruda Yapı Denetimi, 3rd ed., Seçkin Yayınevi, Ankara, 2022.
- [14] V. Engin, B. Özbil, Türkiye'de Uygulanan Yapı Denetim Sisteminin Sorunları İle İlgili Yaklaşımlar, Kent Akademisi 15 (2022) 1575–1590. <https://doi.org/10.35674/kent.1115470>.
- [15] 15-16 Şubat 2023 Dezenformasyon Bülteni, (2023). <https://www.iletisim.gov.tr/images/uploads/dosyalar/15-16-subat-bulten.pdf> (accessed September 2, 2024).
- [16] URL3, Cumhurbaşkanı Erdoğan, Deprem Gerçeği ve Kentsel Dönüşüm Şurası'nda konuştu, (2023). <https://www.iletisim.gov.tr/turkce/haberler/detay/cumhurbaskani-erdogan-deprem-gercegi-ve-kentsel-donusum-surasinda-konustu/> (accessed September 2, 2024).

- [17] URL4, Rönesans Rezidans'ta kaybolan 55 kişiden 4,5 aydır haber yok - Son Dakika Türkiye Haberleri | NTV Haber, (2023). <https://www.ntv.com.tr/galeri/turkiye/ronesans-rezidansta-kaybolan-55-kisiden-4-5-aydir-haber-yok.kqA2bfrWeECDzpPzae5pzg/HZ2LfagoEUiXkmcxkObLbw> (accessed September 1, 2024).
- [18] A.F. Şenol, Kahramanmaraş Depremleri (6 Şubat 2023) Sonrası Hatay İlindeki Yapıların Hasar Durumlarının Değerlendirilmesi, in: International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences, 2023: pp. 75–80.
- [19] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, (2018). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm> (accessed October 23, 2024).
- [20] B. Taşkın, M. Yaza, Kahramanmaraş Depremlerinde Gözlemlenen Yapısal Hasarlar ve Geçmiş Depremlerle Karşılaştırma, İTÜ Vakfı (2023). <https://www.ituvakif.org.tr/kahramanmaras-deprem-lerinde-gozlemlenen-yapisal-hasarlar-ve-gecmis-depremlerle-karsilastirma> (accessed October 23, 2024).



PREDICTING KONYA'S AIR TEMPERATURE: GENETIC PROGRAMMING, GRADIENT BOOSTING AND RANDOM FOREST APPROACHES

*Kazım KUMAŞ¹, Ali AKYÜZ^{1,2}

¹Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Emin Gülmez Teknik Bilimler MYO, Burdur

²Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Bilgisayar ve Bilişim Fakültesi, Burdur

(Geliş/Received: 01.11.2024, Kabul/Accepted: 02.12.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ABSTRACT

Average temperature prediction is important in many areas, such as climate change, agriculture, and energy management. It is also necessary for estimating energy demand, managing energy, and developing sustainable energy policies. In this study, using monthly average air temperature data between 1960-2017, temperature predictions were performed for Konya province using genetic programming, gradient boosting, and random forest techniques. The predicted average monthly temperature values between 2018-2021 were compared with the real values. Then, future predictions for the years 2022-2025 were also performed. Metrics such as R^2 , RMSE, and MAE were used in model evaluations. $R^2=0.9477$, RMSE=1.950 and MAE=1.500 for the genetic programming model, $R^2=0.9663$, RMSE=1.564 and MAE=1.203 for the gradient boosting model, and $R^2=0.9905$, RMSE=0.833 and MAE=0.625 for the random forest model. The same algorithms gave good results for future prediction of the average air temperature between 2022 and 2025. In conclusion, the applied machine learning methods gave successful results in monthly average air temperature predictions for Konya province, and these findings show that machine learning techniques can be used effectively in air temperature prediction.

Keywords: Air temperature, Genetic programming, Gradient boosting, Random forest.

KONYA'NIN HAVA SICAKLIĞININ TAHMİN EDİLMESİ: GENETİK PROGRAMLAMA, GRADIENT BOOSTING VE RASTGELE ORMAN YAKLAŞIMLARI

ÖZ

Ortalama sıcaklık tahmini iklim değişikliği, tarımsal ve enerji yönetimi gibi birçok alanda önemlidir. Ayrıca, enerji talep tahminleri, enerji yönetimi ve sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesi için de gereklidir. Bu çalışmada, 1960-2017 yılları arasındaki aylık ortalama hava sıcaklığı verileri kullanılarak Konya ili için genetik programlama, gradient boosting ve random forest teknikleri ile sıcaklık tahminleri gerçekleştirilmiştir. 2018-2021 yılları arasındaki her ay için tahmin edilen ortalama sıcaklık değerleri gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Ardından, 2022-2025 yılları için gelecek tahminleri de yapılmıştır. Model değerlendirmelerinde R^2 , RMSE ve MAE gibi metrikler kullanılmıştır. Genetik programlama modeli için $R^2=0.9477$, RMSE=1.950 ve MAE=1.5000, gradient boosting modeli için $R^2=0.9663$, RMSE=1.564 ve MAE=1.203, random forest modeli için ise $R^2=0.9905$, RMSE=0.833 ve MAE=0.625 değerleri elde edilmiştir. 2022-2025 yılları arasındaki ortalama hava sıcaklığı içinde aynı algoritmalar gelecek tahmini iyi sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, uygulanan makine öğrenimi yöntemleri, Konya ili için aylık ortalama hava sıcaklığı tahminlerinde başarılı sonuçlar vermiştir ve bu bulgular, hava sıcaklığı tahmininde makine öğrenimi tekniklerinin etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Hava sıcaklığı, Genetik programlama, Gradient boosting, Random forest.

1. Introduction

Climate change is among the most important environmental problems of the 21st century [1]. This problem causes an increase in precipitation regime, temperature, and CO₂ concentration on the earth. It is known that global temperature is increasing due to the rise in greenhouse gases [2]. The increase in global temperature in recent years has also accelerated the hydrological cycle [3]. Temperature, one of the climate parameters, directly affects evaporation, snowmelt, and frost and indirectly affects atmospheric stability and precipitation conditions. Temperature is also one of the main atmospheric variables used in hydrological modeling [4]. Ground-level air temperatures are expected to warm land faster than oceans [5]. The global increase in near-surface air temperature since the late nineteenth century has increased the frequency, intensity, and duration of extra heat and warm weather events [6,7]. Temperature affects climate systems and the hydrological cycle directly or indirectly. It is extremely important to make possible temperature predictions to predict these effects of temperature and take precautions against disasters caused by temperature. This raises awareness and provides warnings and guidance for governments to implement appropriate policies in climate, economy, health, etc. Forecasting weather phenomena uses numerical simulations to describe climate behavior, focusing on temperature, pressure, and humidity changes. Data from current atmospheric conditions are input into a computer to program mathematical equations. Different weather models mimic the Earth's atmosphere, offering a unique interpretation of atmospheric energy [8,9]. Forecasters are familiar with the characteristics of each model and prioritize those with the highest ability to predict their specific conditions. Accurate temperature prediction is crucial for governments' climate policies, energy companies' plans to meet energy demand, agriculture, food management, forest conservation, and health. Understanding temperature change and predicting future temperature values prevent disasters such as heat waves, droughts, floods, forest fires, etc. [10]. Air temperature forecasts for Konya province are critical for many sectors, such as agriculture, animal husbandry, energy management, and urban planning. As Konya is one of Türkiye's most important agricultural regions, temperature changes directly affect crop growth, yield, and quality. Temperature forecasts provide farmers with information to plan planting and harvesting periods better and optimize irrigation and fertilization strategies, thus minimizing crop loss and increasing yields. Thus, knowing the weather forecasts in Konya enables effective use of resources by increasing efficiency and safety.

As a result, knowing the weather forecasts in Konya is critical to increasing agricultural productivity, protecting animal health, using water resources efficiently, and managing energy demand. It also ensures public safety by taking precautions against floods and heat waves and contributes to the efficient use of resources [11-13]. This study used regression-based machine learning algorithms to predict the monthly average air temperatures, which consist of real number values for Konya province. To test the prediction success of machine learning algorithms, the data set consisting of monthly average air temperatures for the years 1960-2021 was divided into a time series. Accordingly, predictions for 2019-2021 and 2022-2025 were evaluated.

2. Literature Review

Kınacı et al. analyzed one-year temperature series with bilinear models using daily average temperature data for Konya province between 1997 and 2004. The study compared the forecasting performances of linear and nonlinear models. The results show that the dual linear model is more successful than linear models in certain situations [14]. Terzi and Ersoy conducted drought analysis using precipitation data from 1971-2014 at meteorological stations in Konya. Drought categories of 3, 6, 9, and 12 months were determined by the Standardized Precipitation Index (SPI) method, and drought prediction models were developed using the artificial neural networks (ANN) method. The results showed that ANN could predict drought accurately, especially in the 12 months [15].

Various machine learning algorithms have been used to predict annual and average seasonal temperatures in Shafin, Bangladesh. Linear Regression, Polynomial Regression, Isotonic Regression, and Support Vector Regression methods were applied in the simulation experiments. While isotonic regression gave the most successful results on training data, polynomial regression, and support vector regression provided the most accurate results for future temperature predictions [16]. Süzülmüş used different artificial neural network models and multiple linear regression methods to predict the monthly average temperatures of Gaziantep based on geographical and meteorological data. Among the artificial

neural networks, the Multilayer Perceptron (MLP) model was found to have the highest accuracy rate with an R^2 value of 99.90%, while the MLR model showed a lower performance. As a result, the predictions made with MLP were found to be closer to the actual data than the other models [17]. Turgut et al. recorded weather parameters such as temperature, humidity, wind direction, and intensity through sensors connected to the microcontroller and transferred them to the database in real time via an ethernet module. ANN processed the database to predict the air temperature. This method provides a faster and more practical prediction model than meteorological formulas [18]. Cifuentes et al. examined different machine-learning strategies in the literature for temperature prediction. They reported that deep learning methods are more successful in temperature prediction with lower error rates than traditional neural network architectures.

Moreover, the accuracy of the prediction methods varies depending on the data combinations, architectures, and learning algorithms used [19]. Sevinç and Kaya applied LSTM and ARIMA models for air temperature prediction using meteorological data from the Solhan district of Bingöl. In the analyses performed on the real dataset, both models provided highly accurate temperature forecasts, with an R-squared score of 0.95 for LSTM and 0.97 for ARIMA [20]. Adnan et al. evaluated the performance of LSSVM, GMDHNN, and CART in temperature prediction using monthly temperature data from Astore and Gilgit stations in Pakistan. LSSVM model provided more accurate temperature than the other models and gives lower errors, especially in RMSE values [21]. Sevinç and Kaya used LSTM and ARIMA models to forecast temperature for Diyarbakır province using air temperature data for 2014-2020. The R-square score of the LSTM model was obtained as 0.96, which indicates that the model predicts close to the actual temperature values. As a result, both models were successfully applicable in temperature forecasting [22]. Azari et al. tested various machine learning methods for temperature time series forecasting. Linear regression, k-nearest neighbor, support vector machines, ANN, Random Forest, and Adaptive Boosting methods were used to predict the temperature in Memphis, TN. As a result of the analysis, Artificial Neural Network was more successful than other methods and showed the best performance in temperature prediction [23]. Fister et al. proposed three artificial intelligence frameworks for long-term summer temperature forecasting. Using historical data for the regions of Paris (France) and Córdoba (Spain), average temperatures in August's first and second half are predicted. The proposed methods include CNN, various machine learning approaches, and Recurrence Plot-based CNN that translates temporal series into images, and successful prediction results were obtained in both regions [24]. Yılmaz et al. estimated Turkey's long-term average temperatures using three different interpolation methods: Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW), Kriging, and Radial Basis Function (RBF). In the study, forecasts were made using monthly temperature data of 81 provinces between 1981-2020, and these methods' accuracy was tested. According to the results obtained, the Kriging method gave the best prediction at Ardahan station (COC: 30.22°C, OMH: 5.29°C, R^2 : 0.988), while the IDW method gave the worst result at Aksaray station (COC: 121.94°C, OMH: 3.48°C, R^2 : 0.375). The best prediction results of each method were observed at Şanlıurfa, Ardahan, and Şırnak stations, but the Kriging and RBF methods showed the lowest performance in Tunceli [25]. Coşkun analyzed the climate trends in the Salt Lake-Konya basin in the Central Anatolia Region of Turkey between 1970-2018 with data obtained from meteorological and flow stations. The analysis based on Mann-Kendall and Spearman's Rho tests showed that while there was an increase in temperatures, there was no significant trend in precipitation and runoff data. The results show that temperature increases do not significantly affect evaporation, precipitation, and runoff [26].

3. Materials and Methods

This study uses regression-based machine learning algorithms to predict monthly average air temperatures with real number values. Genetic Programming (GP), Gradient Boosting (GB), and Random Forest (RF) were preferred as machine learning algorithms.

GP is an innovative artificial intelligence method that enables the automatic generation of computer programs inspired by biological evolution. This approach iteratively evolves randomly initialized sets of programs using the basic mechanisms of biological evolution: natural selection, crossover, and mutation. The main goal of GP is to generate programs capable of achieving a specific goal or solving a problem. In this process, the generated programs are evaluated according to their performance; the most successful solutions are selected as the parents of the next generations. The crossover process combines the characteristics of these parent programs to produce new and potentially more successful child programs, while the mutation process adds diversity to the population, avoiding possible local

optima. The iterative nature of GP allows for the development of more effective and efficient programs over generations. While traditional programming involves writing code manually, GP creates self-optimizing and dynamically adaptive programs through a fully automated process. This is a great advantage when flexibility and creativity are required, especially in complex and changing problems. GP is used in many fields, such as data analytics, optimization, control systems, robotics, finance, etc. For example, while GP can be used to discover hidden patterns in complex data sets, it can also provide solutions for multiple objectives in optimization processes. It can also create a competitive advantage by delivering creative and innovative approaches to strategy development and decision-making problems. GP's capacity to generate automated solutions saves both time and resources while enabling customized and optimized results that are impossible with manual programming. For this reason, GP is increasingly preferred in many disciplines as an artificial intelligence approach that transcends the limits of traditional methods [27-29].

GB is a powerful method that combines weak predictive models to compensate for each other's shortcomings. It has been effectively used in machine learning to solve problems such as classification and regression. The technique follows a process whereby each model is trained by focusing on the mistakes made by previous models, producing more accurate predictions at each step. The main goal is to build a strong model by combining a set of weak learners. These weak learners are usually decision trees, but GB is a flexible method that can be applied to different learners. The basic mechanism of GB is based on reducing errors from previous predictions. Using the gradient descent algorithm, each new model minimizes these errors. The process focuses on reducing the overall error of the model, which allows for highly accurate predictions, especially for complex data sets. GB is an ideal method for large data sets and complex analysis problems. One of the advantages of GB is its capacity to improve model performance systematically.

First, a simple model is built, and its prediction errors become the learning target for the next model. This iterative process ensures that mistakes are progressively reduced and that the resulting model becomes much more powerful and competent than the initial individual models. However, the GB method requires a careful approach to hyperparameter settings. It is important to choose the right parameter choices so that the model does not tend to overlearn (overfitting). Besides classification and regression, GB has been successfully used in many other application areas, such as anomaly detection, ranking systems, and time series analysis. For example, it draws attention to its high performance in financial data analysis, health prediction models, and analysis of user behavior.

Moreover, the flexibility and accuracy of this method allow users to create a suitable solution for different data sets and problems. This wide range of applications and strong performance of Gradient Boosting explains why it is often preferred in modern machine learning projects [30-32].

RF is a powerful and flexible method widely used in machine learning to solve classification and regression problems. This approach is based on an ensemble model that is built by combining a large number of decision trees. The model trains each decision tree on a different subset of the dataset and randomly selected features. This process increases the diversity of the model, resulting in generalizable results and allowing it to make predictions with high accuracy. Each decision tree produces independent predictions depending on the subset it is trained on. In classification problems, these predictions are combined by majority voting, while in regression problems, the final result is obtained by taking the arithmetic mean of the projections. With this approach, the errors of individual decision trees are balanced within the ensemble model, and the overall performance is improved.

Moreover, the RF method significantly reduces the risk of overfitting a single decision tree. The dependency of each tree on the data subset and features increases the model's ability to adapt to different data samples and makes the results more balanced. RF performs impressively, especially for large data sets and high-dimensional problems. It provides successful results even when there are complex relationships between features in the data set or when there is missing data. Moreover, the ability to determine the importance of features makes RF more advantageous in terms of interpretability than other machine learning methods. This makes it possible to decide which features impact the target variable more. Besides classification and regression, RF has many applications such as anomaly detection, data mining, bioinformatics, financial analysis and image processing. Thanks to its robust structure, flexibility, and accuracy, this method is preferred in many fields and is notable for its user-

friendliness. The fact that it is less sensitive than other machine learning methods in optimizing the parameters makes RF a more easily applicable solution.

In conclusion, Random Forest is a method in which independent decision trees form a strong ensemble model, offering superior performance in terms of accuracy and generalizability. Its flexibility and robustness when working with large and complex datasets make RF an indispensable tool in modern machine-learning applications. [33-35].

The dataset is a comprehensive data set that includes monthly average temperature values and covers 696 months of data [36]. These data include long-term temperature records from 1960 to 2017 and constitute a fundamental source for temperature forecasting studies for Konya province. In Figure 1, the average temperature values between these years are visualized. In the figure, the temperature sets for each year, grouped by month, are visible and indicated by a red box as an example. This grouping allows us to understand better the temperature trends over many years and the monthly variations. The dataset recorded maximum temperature was 27.7 °C in August 2010, while the minimum temperature was -8 °C in January 1989. This wide temperature range provides an important reference for assessing the region's climate changes and extreme weather events. The data presented in Figure 1 provide important information, especially for analyzing temperature variations in different periods and preparing data for forecast models.

In this study, temperature data from 1960-2017 were used in the training process of machine learning algorithms. To test the accuracy of the obtained models and to evaluate future temperature forecasts, a total of 48 months of temperature data between 2018 and 2021 were tried to be predicted. These forecasts are critical to assess the performance of the models by comparing them with actual values and to test the effectiveness of different algorithms. This large data set and temperature records spanning different years constitute a rich source of information in modeling processes and provide a reliable basis for long-term forecasts.

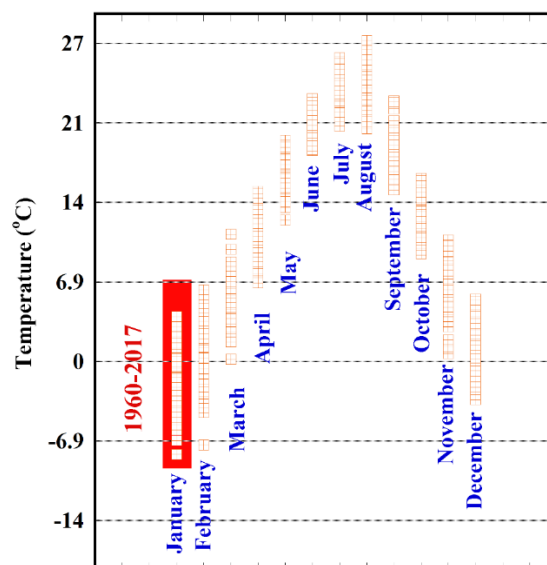


Figure 1. The data set of average air temperatures of Konya province between 1960-2017

4. Results and Discussion

The dataset for training and testing machine learning models has been treated as a time series. The training set includes data between 1960-2017, while the test set covers 2019-2021. The expected values between 2022 and 2025 are estimated based on the model's performance. To analyze the performance of machine learning models, evaluation metrics such as MAE, RMSE, and R^2 , frequently preferred in regression problems, were utilized. In the literature, various metrics are used to analyze the performance of machine learning-trained models. In this study, mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and coefficient of determination (R^2) metrics were used to determine the best model [31].

Figure 2a compares the actual average temperature data and the data obtained with GP prediction. It can be considered that the GP predictions are consistent with the original temperature values. Figure 2b shows the residual values between GP predicted and real temperature values (2019-2021). The residual is the difference between the model-predicted and real measured values. In general, residual values for 48 months of data fluctuate between approximately 4 and -2. When the residual values are analyzed, it can be seen that the model is generally successful. In the training of the model for GP, $R^2= 0.9477$, $RMSE= 1.950$, and $MAE= 1.500$. In the testing phase of the model, $R^2= 0.9560$, $RMSE= 1.7070$, and $MAE= 1.3790$. Based on these values, it can be concluded that the model is successful. Figure 2c shows the box plot. When the box plot in Figure 2c is analyzed for GP, the first quartile (Q1) is 6.92 °C, the median (Q2) is 13.49 °C, and the third quartile (Q3) is 19.69 °C. The original temperature values are 7.70, 13.90, and 20.10 °C, respectively.

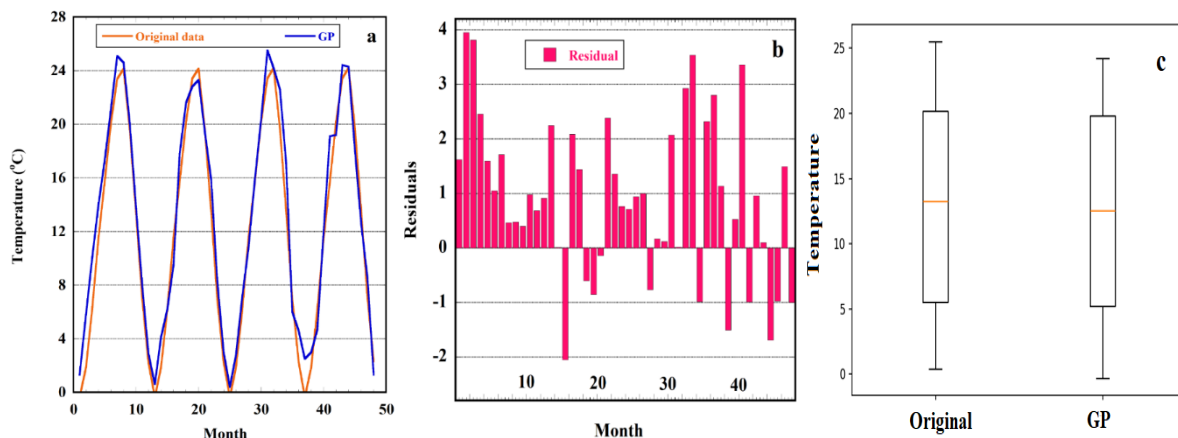


Figure 2. (a) Comparison of GP prediction results with original data for (2018-2021) **(b)** Residuals from GP prediction for (2018-2021) **(c)** Box plots of GP's predictions with original data for (2018-2021)

Figure 3a compares the GP forecast and the average temperature data. GB forecasts can be consistent. Figure 3b shows the residual values between the predicted and actual average temperature values obtained from GB (2019-2021). In general, the residual values vary between approximately 5 and -3. In the training of the model for GB, $R^2= 0.9663$, $RMSE= 1.564$, and $MAE= 1.203$. In the testing phase of the GB algorithm, $R^2= 0.9211$, $RMSE= 2.285$, and $MAE= 1.777$. It can be concluded that the model is successful. Figure 3c shows the box plot. The results are 6.50 °C for Q1, 13.45 °C for Q2 and 21.03 °C for Q3. The original temperature values are 7.70, 13.90 and 20.10 °C respectively

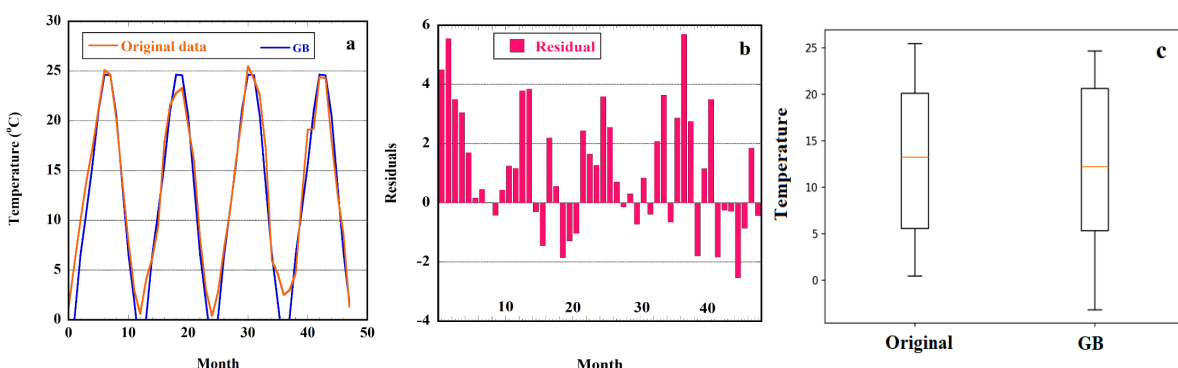


Figure 3. (a) Comparison of GB prediction results with original data for (2018-2021) **(b)** Residuals from GB prediction for (2018-2021) **(c)** Box plots of GB's predictions with original data for (2018-2021)

Figure 4a compares the original average temperature data with the data obtained with the RF prediction. RF predictions are consistent with the original temperature values. Figure 4b shows the residual values for the RF prediction, which fluctuate between about 5 and -3. It can be seen that the RF model is generally successful. In the training for RF, $R^2= 0.9905$, $RMSE= 0.833$ and $MAE= 0.625$. In the testing,

$R^2= 0.9205$, $RMSE= 2.294$ and $MAE= 1.812$. The box plot shows Q1 is $6.39\text{ }^\circ\text{C}$, Q2 is $13.05\text{ }^\circ\text{C}$ and Q3 is $21.35\text{ }^\circ\text{C}$. The original temperature values are 7.70 , 13.90 and $20.10\text{ }^\circ\text{C}$ respectively.

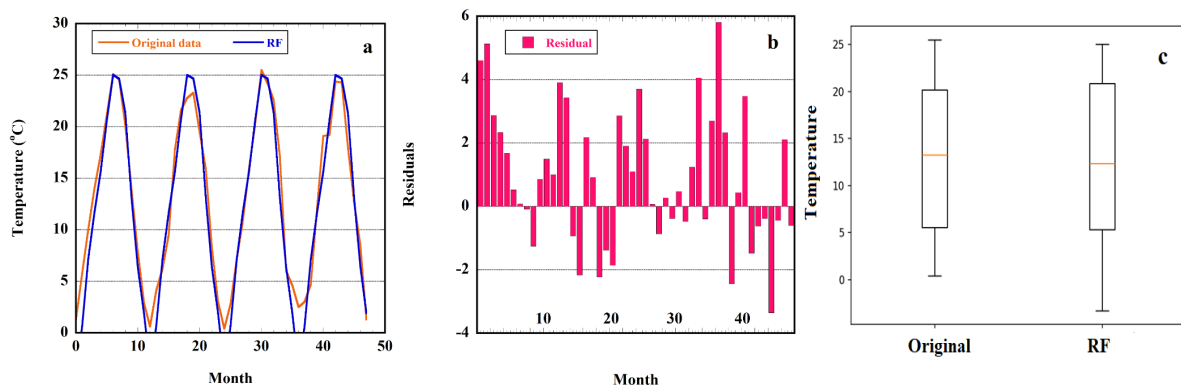


Figure 4. (a) Comparison of RF prediction results with original data for (2018-2021) **(b)** Residuals from RF prediction for (2018-2021) **(c)** Box plots of RF's predictions with original data for (2018-2021)

For the future predictions of the average air temperature for 2022-2025, GP, GB and RF algorithms were considered to give successful results. Figure 5a shows the prediction of the GP algorithm. The GP method predicts a minimum of $-1.50\text{ }^\circ\text{C}$, a maximum of $25.12\text{ }^\circ\text{C}$, and an average of $12.39\text{ }^\circ\text{C}$ for the average temperature between these years. Figure 5b shows the prediction of the GB algorithm. In this algorithm, the mean temperature's minimum, maximum and mean values are $0.89\text{ }^\circ\text{C}$, $24.55\text{ }^\circ\text{C}$, and $12.39\text{ }^\circ\text{C}$, respectively. For the RF algorithm, these values were estimated as 1.74 , 24.59 , and $12.63\text{ }^\circ\text{C}$, respectively (Figure 5c).

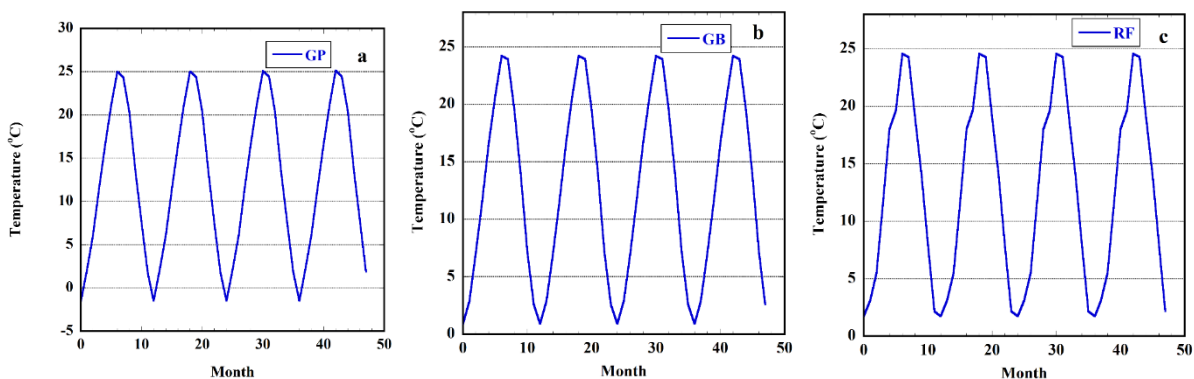


Figure 5. (a) GP predictions for average temperature **(b)** GB predictions for average temperature **(c)** RF predictions for average temperature (2022-2025).

Predicting monthly average temperature is critical in many areas, such as climate change, agricultural productivity, energy consumption, and health. Temperature data plays an important role in planning agricultural activities and crop selection. In addition, energy demand predictions are essential for energy management and the development of sustainable energy policies. Weather changes can also impact human health; accurate forecasts help mitigate adverse impacts. In this context, monthly average temperature predictions for Konya province will contribute to a better understanding and management of these important variables. In this study, GP, GB, and RF techniques were used to predict the temperature of Konya province using monthly average air temperature data between 1960 and 2017. First, the expected average monthly temperature values between 2018-2021 (48 months total) were compared with the actual values. Then, future predictions for the years 2022-2025 were also performed. Metrics used in model evaluations include MAE, RMSE, and coefficient of determination R^2 . Successful results such as $R^2= 0.9477$, $RMSE= 1.950$, and $MAE= 1.5000$ were obtained for the genetic programming model. In the test phase of the model, $R^2= 0.9560$, $RMSE= 1.7070$, and $MAE= 1.3790$ values were recorded. These findings show that the GP model is successful. In the training of the GB

model, $R^2= 0.9663$, $RMSE= 1.564$, and $MAE= 1.203$ values were obtained. The results in the test phase were $R^2= 0.9211$, $RMSE= 2.285$ and $MAE= 1.777$. These results also reveal the effectiveness of the model. In the training of the RF model, very good results such as $R^2= 0.9905$, $RMSE= 0.833$, and $MAE= 0.625$ were obtained. In the testing phase, $R^2= 0.9205$, $RMSE= 2.294$, and $MAE= 1.812$. The GP, GB, and RF algorithms for future forecasts produced different results for the average air temperature between 2022 and 2025. The GP method predicted the average temperature between -1.50 °C and 25.112 °C, while the GB algorithm predicted between 0.89 °C and 24.0 °C, and the RF algorithm predicted between 1.74 °C and 24.59 °C. As a result, the applied machine learning methods yielded successful results in monthly average air temperature predictions for Konya province. These findings show that machine learning techniques can effectively predict air temperature.

5. Conclusion

The findings of this study reveal the effectiveness of machine learning techniques such as GP, GB and RF in predicting monthly average air temperatures for Konya province. The comparison of the forecasts for the period 2018-2021 with the actual values and the future projections for the years 2022-2025 revealed the reliability and accuracy of the models. The GP performed well with high R^2 values and low error metrics, while the GB and RF models produced effective results on complex data sets. The small differences in the future predictions of the models emphasize the importance of evaluating more than one method to improve prediction accuracy. The findings suggest that machine learning methods can provide useful insights in agriculture, energy planning, and public health. In future studies, some improvements can be made to increase the accuracy and generalizability of the forecast models. First, more comprehensive models can be developed by integrating air temperature and other meteorological parameters such as humidity, wind speed, and solar radiation into the forecasting process. Such multivariate approaches can provide higher accuracy, especially in agriculture, energy, and climate change scenarios.

Furthermore, using datasets covering a wider range of dates can help improve the reliability of long-term projections. Another recommendation is the use of hybrid modeling methods. Hybrid models that utilize the strengths of various algorithms can potentially reduce error rates. Instead of limiting this study to Konya province, it is important to apply it to other regions with different climatic conditions to test the generalizability of the models and provide solutions suitable for different geographical conditions. Finally, scenarios can be created that assess the applicable impacts of the predictions obtained on agricultural planning, energy demand management, and public health. Such studies will contribute to the scientific literature and policy development processes at local and national levels.

6. Acknowledgments

The authors thank the Turkish State Meteorological Service for the data used in the study.

7. References

- [1] T.H. Abebe, Time Series Analysis of Monthly Average Temperature and Rainfall Using Seasonal ARIMA Model (in Case of Ambo Area, Ethiopia), *Int. J. Theor. Appl. Math.* 6 (5) (2020) 76-87.
- [2] J.Sillmann, T. Thorarinsdottir, N. Keenlyside, N. Schaller, L.V. Alexander, G. Hegerl, S.I. Seneviratne, R. Vautard, X. Zhang, F.W. Zwiers, Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities, *Weather and Climate Extremes* 18 (2017) 65-74.
- [3] E. Olmedo, A. Turiel, V. Gonzalez-Gambau, C. Gonzalez-Haro, A. Garcia-Espriu, C. Gabarro, M. Portabella, I. Corbella, M. Martin-Neira, M. Arias, R. Catany, R. Sabia, R. Oliva, K. Scipal, Increasing stratification as observed by satellite sea surface salinity measurements, *Scientific Reports* 12 (1) (2022)1-9.
- [4] X. Liu, P. Coulibaly, Downscaling ensemble weather predictions for improved week-2 hydrologic forecasting, *Journal of Hydrometeorology* 12 (6) (2011)1564-1580.
- [5] E.S. El-Mallah, S.G. Elsharkawy, Time-Series Modeling and Short Term Prediction of Annual Temperature Trend on Coast Libya Using the BoxJenkins ARIMA Model, *Advances in Research* 6 (5) (2016)1-11,

- [6] S. E. Perkins-Kirkpatrick, S.C. Lewis, Increasing trends in regional heatwaves, *Nature Communications* 11 (1) (2020)1-8.
- [7] A. Sulikowska, A. Wypych, Seasonal Variability of Trends in Regional Hot and Warm Temperature Extremes in Europe, *Atmosphere* 12 (5) (2021)1- 21.
- [8] S. Al-Yahyai, Y. Charabi, A. Gastli, Review of the use of numerical weather prediction (NWP) models for wind energy assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9) (2010) 3192-3198.
- [9] P. Bauer, A. Thorpe, G. Brunet, The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature* 525 (2015) 47–55.
- [10] A. Dai, Increasing drought under global warming in observations and models, *Nature Climate Change* 3 (2013) 52-58.
- [11] B. Özgür, The assessment of socio-economic impacts of climate change in rural areas: the case of Konya, Thesis (M.S.) Graduate School of Natural and Applied Sciences, City and Regional Planning. Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, 2019.
- [12] J.W. Jones, J.W. Hansen, F.S. Royce, C. D. Messina, Potential benefits of climate forecasting to agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82(1-3) (2000)169-184.
- [13] C. Oğuz, A. Y. Ögür, Climate Change and Agriculture: The Case of Konya Province in Recent Academic Studies in Sciences, B Rangelov R. Efe, M.S. DINU, E. Atasoy (Eds), Sofia: St. Kliment Ohridski University Press, (2021)1-20.
- [14] İ. Kınacı, Konya İli Sıcaklık Verilerinin Çift Doğrusal Zaman Serisi Modeli İle Modellenmesi, 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Türkiye, Mersin, 2005
- [15] Ö. Terzi, T. Ersoy, Yapay Sinir Ağları ile Konya İli Kuraklık Tahmini. DSI Technical Bulletin/DSI Teknik Bülteni, (2018) (127).
- [16] A. A. Shafin, Machine learning approach to forecast average weather temperature of Bangladesh, *Global Journal of Computer Science and Technology* 19(3) (2019) 39-48.
- [17] S. Suzulmus, Prediction of average temperatures using artificial neural network methods: the case of Gaziantep Provnice, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* 28(2A) (2019) 1494-1502.
- [18] A. Turgut, A. Temir, B. Aksoy, K. Özsoy, Yapay Zekâ Yöntemleri ile Hava Sıcaklığı Tahmini İçin Sistem Tasarımı ve Uygulaması, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 3(3) (2019) 244-253.
- [19] J. Cifuentes, G. Marulanda, A. Bello, J. Reneses, Air temperature forecasting using machine learning techniques: a review, *Energies* 13(16) (2020) 4215.
- [20] A. Sevinç, B. Kaya, Derin öğrenme ve istatistiksel modelleme yöntemiyle sıcaklık tahmini ve karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (28) (2021) 1222-1228.
- [21] R. M. Adnan, Z. Liang, A. Kuriqi, O. Kisi, A. Malik, B. Li, F. Mortazavizadeh, Air temperature prediction using different machine learning models, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 22(1) (2021) 534-541.
- [22] A. Sevinç, B. Kaya, Derin Öğrenme Yöntemleri ile Sıcaklık Tahmini: Diyarbakır İli Örneği, *Computer Science Special* (2021) 217-225.
- [23] B. Azari, K. Hassan, J. Pierce, S. Ebrahimi, Evaluation of machine learning methods application in temperature prediction, *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE)* 8(1) (2022) 1-12.

- [24] D. Fister, J. Pérez-Aracil, C. Peláez-Rodríguez, J. Del Ser, S. Salcedo-Sanz, Accurate long-term air temperature prediction with machine learning models and data reduction techniques, *Applied Soft Computing* 136 (2023) 110118.
- [25] C. B. Yılmaz, H. Bodu, E. S. Yüce, V. Demir, M. F. Sevimli, Türkiye'nin uzun dönem ortalama sıcaklık (°C) değerlerinin üç farklı enterpolasyon yöntemi ile tahmini, *Geomatik* 8(1) (2023) 9-17.
- [26] S. Coşkun, tuz gölü-konya kapalı havzalarının yaz mevsimi ortalama sıcaklık, yağış, buharlaşma ve akım verilerindeki değişimlerin karşılaştırmalı trend analizi, *The Journal of Social Sciences* (46) (2024). 123-138.
- [27] C. Gagné, M. Parizeau, Genericity in evolutionary computation software tools: Principles and case-study, *International Journal on Artificial Intelligence Tools* 15(02) (2006) 173-194.
- [28] A. N. Sloss, S. Gustafson, 2019 evolutionary algorithms review, *Genetic programming theory and practice XVII*, (2020) 307-344.
- [29] A. Tripathi, R. Singh, A. K. Singh, P. Gupta, S. Vats, M. Singhal, Significance of Evolutionary Artificial Intelligence: A Detailed Overview of the Concepts, Techniques, and Applications, *Artificial Intelligence, Machine Learning and User Interface Design* 27(53) (2024) 27-53.
- [30] A. Natekin, A. Knoll, Gradient boosting machines, a tutorial, *Frontiers in neurorobotics* 7 (2013) 21.
- [31] I. Pence, R. Yıldırım, M. S. Cesmeli, A. Güngör, A. Akyüz, Evaluation of machine learning approaches for estimating thermodynamic properties of new generation refrigerant R513A. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 55 (2023) 102973.
- [32] S. Babu Nuthalapati, A. Nuthalapati, Accurate weather forecasting with dominant gradient boosting using machine learning, *Int. J. Sci. Res. Arch* 12(2) (2024) 408-422.
- [33] S. J. Rigatti, Random forest, *Journal of Insurance Medicine* 47(1) (2017) 31-39.
- [34] A. Parmar, R. Katariya, V. Patel, A review on random forest: An ensemble classifier. In *International conference on intelligent data communication technologies and internet of things Springer International Publishing (ICICI) 2018* (2019) (pp. 758-763)
- [35] I. Pence, K. Kumas, M. S. Cesmeli, A. Akyüz, Animal-based CO₂, CH₄, and N₂O emissions analysis: Machine learning predictions by agricultural regions and climate dynamics in varied scenarios, *Computers and Electronics in Agriculture* 226 (2024)109423.
- [36] Turkish State Meteorological Service (TSMS) Turkish State Meteorological Service <https://www.mgm.gov.tr/tahmin/turkiye.aspx> (accessed 6.22.23) Ankara Turkey



GEMİ TESPİTİ UYGULAMASINDA YOLOV8 VE YOLOV9 ALGORİTMALARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

*Beyzanur TEKİNDEMİR¹, Fatih Ahmet ŞENEL¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 01.11.2024, Kabul/Accepted: 06.12.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Gemi tespiti ve sınıflandırması, deniz gözetimi ve izleme alanında kritik bir konu olup; balıkçılık yönetimi, göçmen izleme, deniz kurtarma ve deniz savaşlarına kadar geniş bir yelpazede uygulanmaktadır. Uzaktan algılama teknolojileri, geniş kapsama alanı ve düşük maliyetli erişim gibi avantajları nedeniyle gemi izleme için kullanılmaktadır. Bu çalışma, nesnelerin insan tarafından tespiti, sayımı ve takibi süreçlerinin bilgisayarlı görme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile gerçekleştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu çalışmada, YOLO mimarileri, gemi tespiti ve sınıflandırmasının hızlı ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için kullanılan bir teknoloji olarak ele alınmaktadır. YOLOv8 ve YOLOv9 mimarileri ile uzaktan algılama kullanılarak gemi tespiti çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gemi tespiti için 1658 görüntüden oluşan "Ships in Google Earth" adlı veri seti kullanılarak YOLOv8 ve YOLOv9 mimarilerinin performansını karşılaştırmaktadır. Eğitim ve doğrulama kayıpları, kesinlik, duyarlılık ve ortalama hassasiyet kriterleri açısından değerlendirilen modeller, eğitim sürecinde belirli bir başarı ve öğrenme hızı sergilemiştir. Her iki modelin de gemi tespitinde etkili çözümler sunduğu görülmüştür. Ancak, YOLOv9 modeli, özellikle başlangıçta daha hızlı yakınsama ve genel tespit performansında üstünlük sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: Evrimsel sinir ağı, derin öğrenme, gemi tespiti, yolov8, yolov9.

PERFORMANCE EVALUATION OF YOLOV8 AND YOLOV9 ALGORITHMS IN SHIP DETECTION APPLICATION

ABSTRACT

The detection and classification of vessels represents a pivotal challenge in the domain of maritime surveillance and monitoring. Its applications encompass a diverse range of fields, including fisheries management, migrant monitoring, maritime rescue operations, and maritime warfare. The utilisation of remote sensing technologies for the tracking of ships is a consequence of the advantages they offer, including extensive coverage and low-cost accessibility. This study emphasizes the importance of human detection, counting and tracking of objects using computer vision and machine learning methods. In this study, the potential of YOLO architectures as a technology for rapid and precise ship detection and classification is explored. The YOLOv8 and YOLOv9 architectures were employed for the detection of ships utilising remote sensing techniques. This study compares the performance of the YOLOv8 and YOLOv9 architectures using a dataset, referred to as the "Ships in Google Earth" dataset, which consists of 1658 images for ship detection. The models were evaluated in terms of training and validation losses, precision, recall and average precision, and demonstrated a certain degree of success and learning speed during the training process. Both models were found to provide effective solutions for ship detection. However, the YOLOv9 model exhibited superior performance in terms of faster convergence and overall detection accuracy, particularly at the outset.

Keywords: Convolutional neural network, deep learning, ship detection, yolov8, yolov9.

1. Giriş (Introduction)

Nesnelerin insan tarafından tespiti, sayımı ve takibi gibi etmenler zaman kaybı, hata ihtimali ve maliyet gibi sorunlara yol açmaktadır. Bu süreçlerin bilgisayarlı görme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile gerçekleştirilmesi bu olası sorunların çözümü için önem taşımaktadır [1]. Gemi tespiti, otomatik balıkçılık yönetimi, gemi trafiği hizmeti, liman yönetimi ve deniz savaşının gerçekleştirilmesinde temel bir konudur [2]. Gemi tespiti ve sınıflandırması, deniz gözetimi ve izlemesinde kritik zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bir yandan, balıkçılık yönetimi, yasadışı göçmen izleme ve deniz kurtarma gibi sivil alanlarda uygulamalar bulurlar. Öte yandan, gemiler deniz muharebesinde önemli hedeflerdir. Gemi tespiti ve sınıflandırması, deniz savaş alanının kontrolünü ele geçirme ve askeri operasyonların başarısını sağlamada büyük önem taşıyan zamanında deniz askeri istihbaratı elde etmeye yardımcı olmaktadır [3].

Uydular ve uçaklar gibi platformlara monte edilmiş sensörler tarafından kolaylaştırılan uzaktan algılama teknolojisi, kara hedeflerinin uzun mesafeli temassız görüntülenmesini sağlamaktadır [4]. Uzaktan algılama teknolojileri yüksek zamanlılık, geniş kapsama alanı, düşük maliyetli erişilebilirlik sunması ve coğrafi koşullar tarafından kısıtlarının olmaması nedenleri ile gemilerin izlenmesi için birincil yöntem olarak ortaya çıkmıştır [5]. Son yıllarda, uydu uzaktan algılama görüntüleme teknolojisinin hızla gelişmesiyle, uzaktan algılama görüntülerinden gemi hedeflerinin tespiti ve sınıflandırılması, uzaktan algılama hedef tanımının önemli bir uygulama alanı haline gelmiştir [6]. Gemi tespiti, görüntülerde gemi olup olmadığını otomatik olarak belirlemeyi, bunları hassas bir şekilde sınıflandırmayı ve yerleştirmeyi hedeflemektedir [7]. Gemi tespiti için SPOT-5, QuickBird, HRSC2016, Sentinel-1, SSDD, FGSD gibi birçok veri seti bir arada kullanılarak CNN tabanlı ve Transformer tabanlı derin öğrenme modelleri incelenmiş ve gemi tespitinin diğer gelişiminin diğer nesne tespiti çalışmalarının çok gerisinde kaldığı görülmüştür [8]. Gemi tespiti çalışmalarında karmaşık deniz ortamları, yetersiz ayırt edici özellikler, büyük ölçekli varyasyonlar, yoğun ve döndürülmüş dağılımlar, büyük en boy oranları ve pozitif ve negatif örnekler arasındaki dengesizlikler zorluklar olarak belirlenmektedir [7].

Gemi tespiti ve sınıflandırmasını tek ağda birleştiren YOLO mimarisi hızlı ve doğru sonuçların elde edilebilmesi için kullanılmaktadır [9]. Sadece Bir Kez Bak (You Only Look Once, YOLO) çerçevesine dayalı nesne dedektörleri, otomatik gemi tespitinde dikkate değer bir doğruluk göstermiştir [10]. Gemi tespiti çalışmalarında YOLO mimarisinin de sıkça kullanıldığı ve yüksek başarılar gösterdiği görülmektedir [11–14]. Gemi tespiti ve sınıflandırmasında YOLO mimarisinin etkinliği, çeşitli iyileştirmelerle daha da artırılmıştır. Örneğin, SAR-LtYOLOv8 modeli, çok ölçekli özellikleri geliştiren ve küçük nesnelerin algılanmasını optimize eden yapıları içermektedir. Bu model, özellikle karmaşık deniz ortamlarında gemi tespiti için üstün performans sergilemektedir ve HRSID ve SSDD veri kümelerinde dikkate değer bir doğruluk artışı sağlamıştır [15]. Benzer şekilde, Ship-Fire Net, gemi yangınlarının hem içeride hem de dışarıda tespiti için hafif bir yapı sunarak yüksek hızlı ve hassas bir çözüm olarak öne çıkmıştır. Bu model, YOLOv8 tabanlı olup, GhostNet ve SCConv gibi yenilikçi özelliklerle donatılmıştır ve 0.9 mAP@0.5 doğruluk seviyesine ulaşmıştır [16]. Ayrıca, aktif kontur ve YOLOv8 tabanlı modeller, SAR görüntülerinde gemi hedeflerinin hassas tespiti ve sınıflandırılması için önerilmiştir. Bu modeller, hem doğruluk hem de kapsam açısından dengeli sonuçlar sunarak karmaşık deniz senaryolarında umut verici bir çözüm sunmaktadır [17].

Bu çalışmada YOLO mimarilerinden YOLOv8 ve YOLOv9 kullanılarak uzaktan algılama ile gemi tespitinin yapılması hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan yöntemler ve veri seti hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve dördüncü bölümde ise sonuçların bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

2.1. YOLO algoritması (YOLO algorithm)

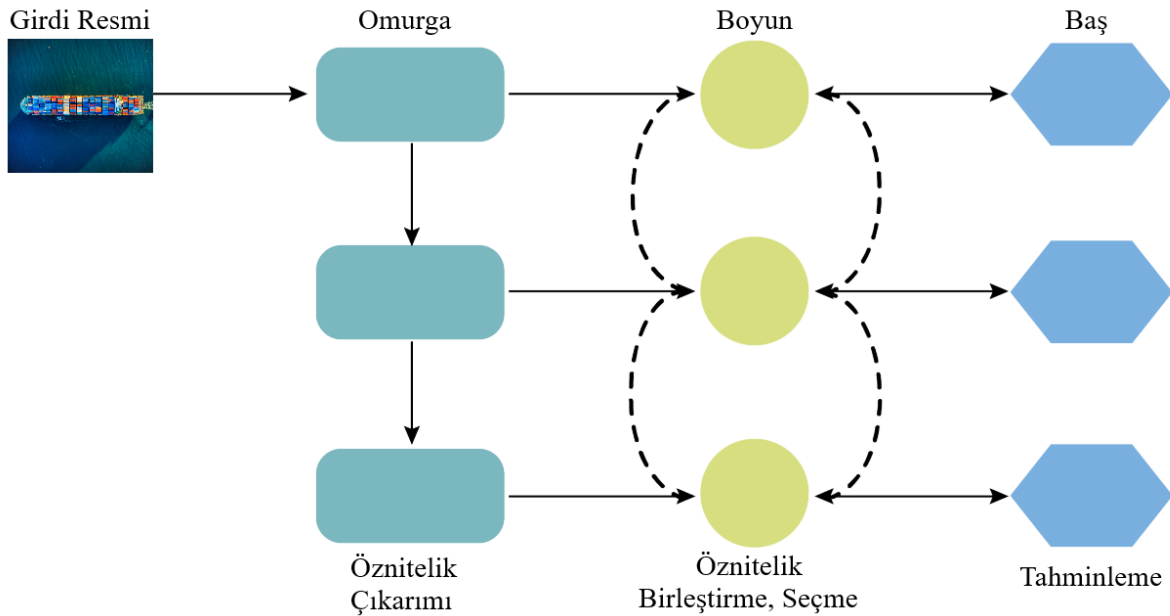
YOLO, 2015 yılında Joseph Redmon ve arkadaşları tarafından 'You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection' başlıklı bir makale yayımlanmasıyla bilgisayarlı görüş topluluğuna tanıtılmış ve nesne tespiti için birleşik bir model olan YOLO tam görüntüler üzerinde doğrudan eğitilebilir ve model

oluşturulması basit olarak belirtilmiştir [18]. YOLO, nesne algılama görevini hesaplama karmaşıklığını azaltan tek bir regresyon problemi olarak ele almaktadır. Temel fikir, tüm görüntüyü ağa giriş olarak kullanmak ve doğrudan çıkış katmanında sınırlayıcı kutu koordinatlarını ve sınıf olasılıklarını döndürmektir [19]. Sonraki yıllarda YOLOv1'den YOLOv9'a kadar birçok YOLO sürümü geliştirilmiştir. Şekil 1'de YOLO mimarisinin zamanla geliştirilen versiyonları verilmektedir.



Şekil 1. YOLO Tarihsel Gelişim Çizelgesi (YOLO Historical Development Chart) [20]

Temel olarak YOLO mimarileri 3 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; omurga (Backbone), boyun (Neck) ve baş (Head) bölümleridir. Omurga bölümünde girdi olarak verilen resimlerin öz niteliklerinin çıkarılması işlemleri gerçekleştirilir. Boyun bölümde çıkarılan öz niteliklerin birleştirilme ve seçilme işlemleri gerçekleştirilirken baş bölümünde ise tahminleme yapılır. Şekil 2'de YOLO mimarisinin bölümleri görsel olarak verilmiştir.



Şekil 2. YOLO Mimarısının Bölümleri (Parts of YOLO Architecture) [21]

2016 yılında YOLO9000 olarak da bilinen YOLOv2 tanıtılmış ve bu modelde, "batch normalization" kullanılarak eğitim süresi kısaltılmış ve model doğruluğu artmıştır. Ayrıca daha fazla nesne sınıfını algılayabilen bir ağ yapısı olan Darknet-19 geliştirilmiştir. YOLOv2, çeşitli veri kümelerinden öğrenebilen "kapsamlı eğitim" (joint training) tekniğini kullanarak, nesne sınıflandırma performansını artırmıştır [22]. 2018 yılında Darknet-53 olarak bilinen yeni bir ağ yapısı kullanılmış ve çoklu ölçeklerde tespit yapılabilmesi sağlanmıştır ve önceki versiyonlara göre daha gelişmiş bir mimariye sahip olduğu, özellikle daha küçük nesnelerin tespitinde performansının iyileştirildiği öne sürülmüştür [23]. 2020 yılında CSPDarknet53 mimarisini kullanarak geliştirilen YOLOv4, mozaik veri arttırma, CIOU kaybı ve SAM bloğu gibi yenilikçi tekniklerle önceki versiyonlara göre hem daha yüksek doğruluk hem de daha iyi hız sağlayarak gerçek zamanlı nesne tespiti için güçlü bir model olarak sunulmuştur [24]. Aynı yıl Ultralytics tarafından geliştirilen ve PyTorch tabanlı bir model olan YOLOv5, eğitim sürecini basitleştiren, geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşan, hızlı ve hafif bir model olarak tanıtılmıştır [25]. 2022 yılında YOLOv6 PyTorch tabanlı ve hız ile doğruluk açısından YOLOv5'e alternatif olarak geliştirilmiştir [26]. Aynı yıl YOLOv7 nesne tespitinde yüksek doğruluğa sahip bir model olarak ve özellikle gerçek zamanlı uygulamalar için optimize edilerek geliştirilmiştir [27]. Önceki YOLO modellerine göre mimari, hız, doğruluk ve kullanım kolaylığı açısından çeşitli geliştirmeler

içeren YOLOv8 modeli tanıtılmıştır [28]. Yakın bir zamanda YOLOv9 derin bir sinir ağına dayalı bir nesne algılama algoritması olarak geliştirilmiştir [29].

2.2.YOLOv8 algoritması (YOLOv8 algorithm)

Ultralytics, Ocak 2023'te tanıtılan YOLOv8 [28], kullanıcılara kapsamlı bir dizi geliştirme ve çok yönlü yetenekler sunarak YOLO serisinde önemli bir gelişme göstermiştir [30]. Mimari, kayıp fonksiyonları ve segmentasyon yeteneklerindeki ilerlemeleriyle YOLOv8, çok çeşitli uygulamalar için güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır [20]. YOLOv8 tarafından önerilen C2f (Cross Stage Partial) modülü, derin öğrenme ağları içindeki gradyan akışını önemli ölçüde iyileştirerek, modelin öğrenme yeteneğini artırmakta ve dolayısıyla daha hızlı bir NMS (Non-Maximum Suppression) sürecine zemin hazırlamaktadır. Bu modül, katmanlar arası geçişlerdeki bilgi kaybını minimize ederken, katmanların iş birliğini güçlendirir ve öğrenim sürecinde daha verimli bir gradyan akışı sağlar. Gradyan akışının optimize edilmesi, modelin daha kısa sürede daha yüksek performans göstermesine olanak tanır, çünkü bu durum ağırlıkların güncellenmesi sırasında daha etkili bir geri yayılım sağlar. Böylece, C2f modülü, tespit süreçlerinde zaman tasarrufu sağlarken aynı zamanda algoritmanın genel verimliliğini artırmaktadır [31].

2.3.YOLOv9 algoritması (YOLOv9 algorithm)

Omurga ağının birincil işlevi, giriş görüntüsünden özellikler çıkarmaktır. Bu, özellik haritasını iki ayrı bölüme ayıran omurga olarak CSPDarknet53 kullanılarak elde edilir. Bir bölüm derin evrimsel katmanlardan geçerken, diğeri hafif evrimsel katmanlardan geçer ve daha sonra bu iki bölüm özellik gösterimini geliştirmek için yeniden birleştirilir. Gradyan kaybolması sorununu azaltmak için artık bir yapı benimsenir. Özellik birleştirme ağı, özellik birleştirmeyi başarmak için Mekansal Piramit Havuzlama (SPP) modülleri ve Yol Toplama Ağı (PAN) modülleri kullanarak farklı ölçeklerdeki özellik haritalarını entegre etmekle görevlendirilmektedir. Bununla birlikte, YOLOv9 modeli, önceki nesil YOLO modellerinden birçok kavramı bünyesinde barındırmaktadır. Örneğin, YOLOv5'ten elde edilen CSP Bloğu, YOLOv6'dan alınan RepVGGBlock ve YOLOv7'den entegre edilen ELAN bloğu, YOLOv9'un RepNCSPELAN4 modülünde bir araya getirilmiştir. Bu entegre yapı, modelin öğrenme kapasitesini artırarak daha karmaşık nesne tespiti görevlerinde daha yüksek doğruluk oranları elde edilmesini sağlamaktadır [32].

2.4. Veri Seti (Data set)

Bu çalışmada, veri seti olarak Kaggle üzerinde orijinal olarak barındırılan ve daha sonra Roboflow tarafından kullanıma sunulan "Ships in Google Earth" veri seti kullanılmıştır. Veri seti, toplamda 1658 görüntüden oluşmaktadır. Bu görüntülerin tamamı uydu çekimi olup gemileri kuş bakışı görecektir. Ayrıca veri seti farklı hava şartlarını, farklı ışık şiddetlerini (gece-gündüz) ve farklı tip, uzunluktaki gemi resimlerinden meydana gelmektedir. Veri seti, modelin eğitimi, doğrulaması ve testi için üç farklı kümeye ayrılmıştır. Eğitim seti, toplam görüntülerin %86'sını oluşturan 1420 görüntüden oluşurken, doğrulama seti %10'luk bir payla 159 görüntüye sahiptir. Test seti ise toplamda %5'lik bir payla 79 görüntü içermektedir. Görüntüler, Google Earth'ten çıkarılmış ve çözünürlüğü genellikle 30 ila 50 cm arasında olan görüntülerden oluşur. Görüntüler, genellikle boş okyanus arka planına karşı farklı boyutlarda gemi/tekne içerir, ancak bazı görüntüler, gemilerin sahil şeridine yakın ya da birden fazla teknenin küme halinde olduğu durumlarla da yakalanmıştır.

Veri ön işleme sürecinde, görüntüler öncelikle otomatik yönlendirme (Auto-Orient) uygulanarak düzgün bir hale getirilmiştir. Ardından, görüntüler, modelin işlemesi için daha uygun bir hale getirmek amacıyla 640x640 piksel olacak şekilde yeniden boyutlandırılmıştır (Resize: Stretch to 640x640).

Veri artırma (augmentation) sürecinde ise, her eğitim örneği için 3 çıktı oluşturulmuştur. Bu süreçte, görüntüler yatay olarak çevrilmiştir (Flip: Horizontal) ve hem saat yönünde hem de saat yönünün tersine 90 derece döndürülmüştür (90° Rotate: Clockwise, Counter-Clockwise). Her gemi, YOLOv5 dahil olmak üzere model eğitimine uygun bir şekilde sınırlayıcı kutu (bounding box) ile etiketlenmiştir [33].

3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

Yapılan çalışmada her iki YOLO mimarisi de 25 iterasyon çalıştırılmıştır. Her iki model içinde batch_size değeri 16 olarak seçilmiştir. 25 iterasyon sonrasında modelin eğitimdeki başarısında değişiklik azaldığı için eğitim süreci tamamlanmıştır. Eğitimin başarısı kesinlik, duyarlılık ve ortalama hassasiyet (mAP) metriklerine göre karşılaştırılmıştır. Denklem 1, 2 ve 3'te sırasıyla kesinlik, duyarlılık ve ortalama hassasiyet formülleri verilmiştir.

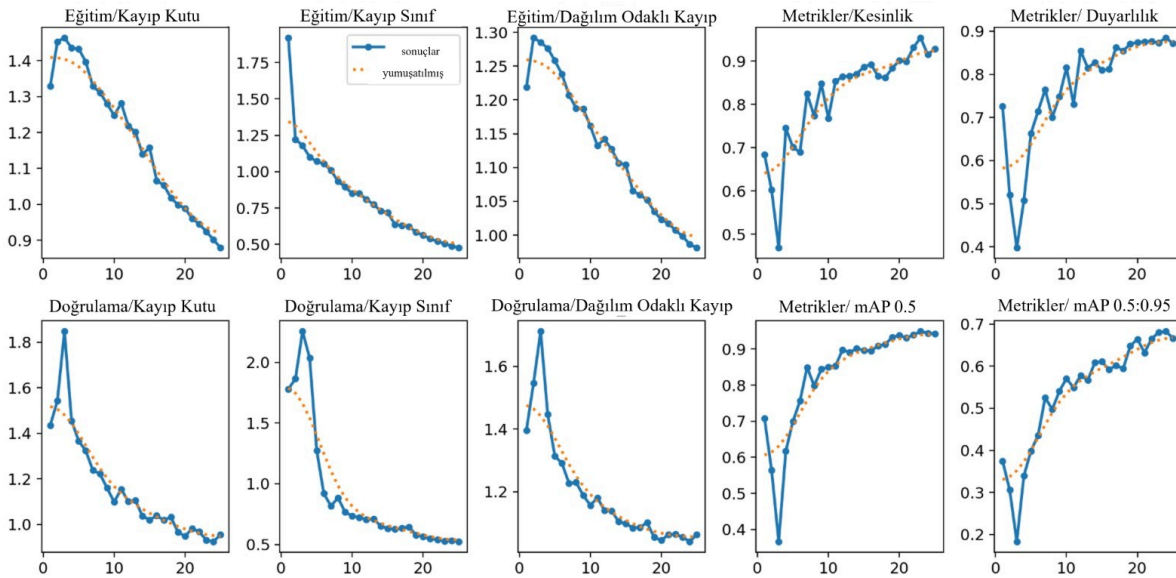
$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

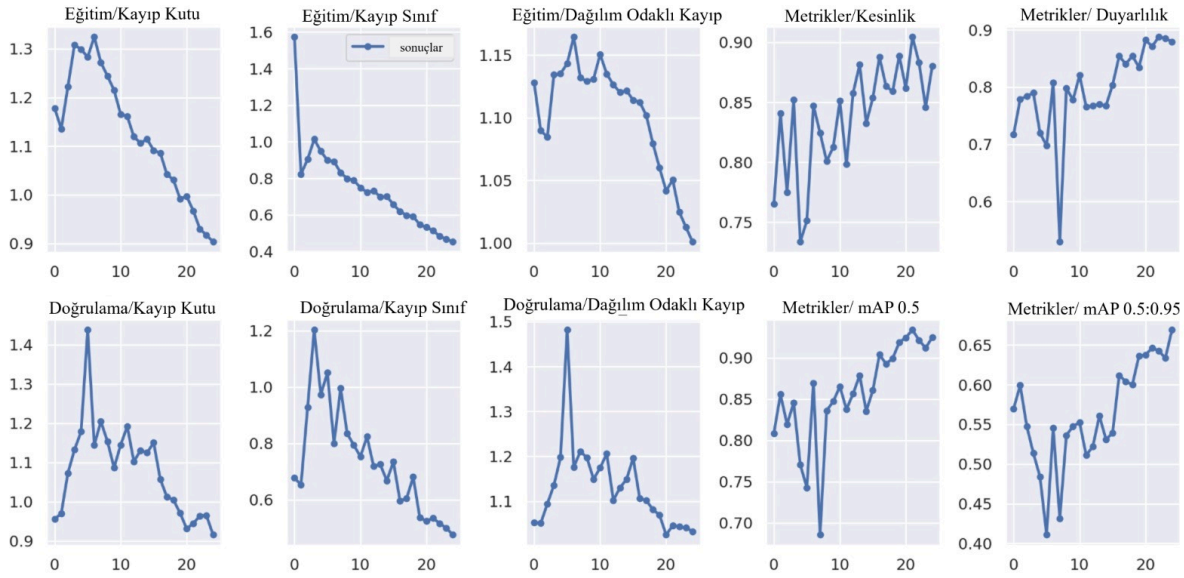
$$\text{Ortalama Hassasiyet} = \frac{\sum_1^c AP(c)}{c} \quad (3)$$

Burada TP doğru pozitif, FP yanlış pozitif, FN yanlış negatif sınıflandırılmış örnek sayılarını ifade etmektedir. AP her bir sınıf için ortalama kesinlik değerini ifade ederken, c sınıf sayısını temsil etmektedir.

YOLOv8 ve YOLOv9 modellerinin eğitim süreçleri boyunca elde edilen eğitim metrik değerlerinin değişimini gösteren grafikler Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmaktadır.



Şekil 3. YOLOv8 Eğitim Metrikleri (YOLOv8 Training Metrics)



Şekil 4. YOLOv9 Eğitim Metrikleri (YOLOv9 Training Metrics)

Bu grafikler, modellerin eğitim sürecindeki başarısını ve öğrenme hızını göstermektedir. YOLOv8 ve YOLOv9'un performans analizi eğitim kayıpları, doğrulama kayıpları, kesinlik ve duyarlılık değerleri, ortalama hassasiyet kriterleri açısından değerlendirilmiştir. Eğitim kayıpları açısından bakıldığında; YOLOv8 ve YOLOv9'un eğitim kayıp değeri iterasyon sayısı arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Ancak, YOLOv8'in kayıp eğrileri biraz daha yumuşak olması daha stabil bir eğitim süreci olduğunu göstermektedir. YOLOv9'un eğitim kayıpları başlangıçta daha hızlı bir düşüş göstermektedir ve bu da modelin daha hızlı yakınsadığını işaret etmektedir. YOLOv8 ve YOLOv9'un doğrulama kayıpları da zamanla azalmakta, ancak eğitim kayıplarına göre daha fazla dalgalanma göstermektedir. YOLOv9'un doğrulama kayıpları sonlarda biraz daha düşük görünmekte, bu da doğrulama setinde daha iyi bir genelleme performansı sergilediğini göstermektedir. Yine de her iki modelde de bir miktar dalgalanma mevcut olduğundan modele ek düzenleme veya veri artırımı uygulanmasının faydalı olabileceği öngörülmektedir.

YOLOv9, eğitimin başlarında YOLOv8'e göre biraz daha yüksek kesinlik ve duyarlılık değerlerine ulaşmaktadır. Bu, özellikle bu veri seti için daha iyi bir tespit kapasitesine işaret etmektedir. YOLOv8'in duyarlılık değerleri başlangıçta daha düşük, ancak zamanla YOLOv9'un seviyelerine yaklaşmaktadır. YOLOv9, YOLOv8'e kıyasla daha yüksek mAP değerlerine ulaşmakta (özellikle başlangıç iterasyonlarında) bu durum genel tespit performansının daha iyi olduğunu göstermektedir. Modellerin mAP@0.5:0.95 değerlerindeki fark mAP@0.5'e göre daha küçük, bu da her iki modelin yüksek Intersection over Union (IoU) eşiklerinde iyi performans sergilediğini ancak YOLOv9'un daha küçük ya da kısmen gizli nesnelere tespitinde ufak bir üstünlük sağladığını göstermektedir.

4. Tartışma ve Sonuç (Discussion and Conclusion)

İki model, YOLOv8 ve YOLOv9, bu çalışmada gemi tespiti uygulaması için incelenmiştir. Her iki model de YOLO (You Only Look Once) ailesinin üyeleri olup, nesne tespiti ve görüntü segmentasyonu için son teknoloji çözümler sunmaktadır. Bulgularda gözlemlenen sonuçlar doğrultusunda YOLOv9, genel olarak mAP ve duyarlılık açısından YOLOv8'e göre biraz daha iyi performans sergilemektedir. YOLOv9'un gelişmeleri özellikle erken iterasyonlarda belirgin, bu da modelin daha hızlı yakınsadığını ve daha az iterasyon ile eğitildiğinde bile yüksek performans gösterebileceğini işaret etmektedir. Eğer önceliğiniz tespit kalitesi ise, YOLOv9 bu veri seti için daha iyi bir seçim olabilir. Ancak, seçim aynı zamanda çıkarım hızı ve hesaplama verimliliği gibi diğer faktörlere de bağlı olabilir. Her iki modelin de gemi tespiti için etkili çözümler sunduğu görülmüştür. Ancak, YOLOv9'un performansı ve verimliliği, onu gemi tespiti uygulaması için özellikle cazip bir seçenek haline getirirken, YOLOv8 daha geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Bu nedenle, seçim, belirli bir uygulamanın gereksinimlerine ve mevcut kaynaklara bağlı olacaktır.

YOLOv8 ve YOLOv9 mimarileri ile gemi örneklerinden oluşan bir veri setinin sınıflandırılması başarı ile gerçekleştirilmiştir. YOLO mimarilerinin başka türdeki veri setleri üzerinde de başarılı sonuçların elde edildiğine dair literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, sadece gemi türleri değil deniz araçlarının birçoğunu kapsayacak bir veri seti ile çalışılması planlanmaktadır. YOLO mimarilerinin gelişimi ile en güncel YOLO mimarilerinin kullanımı gelecekteki çalışmalarında başarılı sonuçlarla yapılabileceğine imkân tanıyacaktır.

5. Kaynaklar (References)

- [1] M. Çelik, F. Akar, C. Bayılmış, D. Akgün, A real-time valve counting system based on YOLOv8, in: 2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), IEEE, 2024, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/IDAP64064.2024.10710962>.
- [2] H. Li, L. Deng, C. Yang, J. Liu, Z. Gu, Enhanced YOLO v3 Tiny Network for Real-Time Ship Detection from Visual Image, IEEE Access 9 (2021) 16692–16706, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3053956>.
- [3] C. Zhang, X. Zhang, G. Gao, H. Lang, G. Liu, C. Cao, Y. Song, Y. Guan, Y. Dai, Development and Application of Ship Detection and Classification Datasets: A review, IEEE Geosci Remote Sens Mag (2024), <https://doi.org/10.1109/MGRS.2024.3450681>.
- [4] B. Li, X. Xie, X. Wei, W. Tang, Ship detection and classification from optical remote sensing images: A survey, Chinese Journal of Aeronautics 34 (2021) 145–163, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.022>.
- [5] Z. Zhao, K. Ji, X. Xing, H. Zou, S. Zhou, Ship surveillance by integration of space-borne SAR and AIS - Review of current research, Journal of Navigation 67 (2014) 177–189, <https://doi.org/10.1017/S0373463313000659>.
- [6] E. Chuvieco, Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach, n.d.
- [7] T. Zhao, Y. Wang, Z. Li, Y. Gao, C. Chen, H. Feng, Z. Zhao, Ship Detection with Deep Learning in Optical Remote-Sensing Images: A Survey of Challenges and Advances, Remote Sens (Basel) 16 (2024), <https://doi.org/10.3390/rs16071145>.
- [8] M.J. Er, Y. Zhang, J. Chen, W. Gao, Ship detection with deep learning: a survey, Artif Intell Rev 56 (2023) 11825–11865, <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10455-x>.
- [9] A.F. Bayram, V. Nabiyevev, Derin öğrenme tabanlı saklanan kamufle tankların tespiti: son teknoloji YOLO ağlarının karşılaştırmalı analizi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi (2023), <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1271208>.
- [10] S. Wang, Y. Li, S. Qiao, ALF-YOLO: Enhanced YOLOv8 based on multiscale attention feature fusion for ship detection, Ocean Engineering 308 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118233>.
- [11] Y. Gong, Z. Chen, W. Deng, J. Tan, Y. Li, Real-Time Long-Distance Ship Detection Architecture Based on YOLOv8, IEEE Access 12 (2024) 116086–116104, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3445154>.
- [12] L. Ting, Z. Baijun, Z. Yongsheng, Y. Shun, Ship Detection Algorithm based on Improved YOLO V5, in: Proceedings - 2021 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering, CACRE 2021, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 483–487, <https://doi.org/10.1109/CACRE52464.2021.9501331>.
- [13] X. Cao, J. Shen, T. Wang, C. Zhang, Ship Detection Based on Improved YOLOv8 Algorithm, in: 2024 3rd International Conference on Robotics, Artificial Intelligence and Intelligent Control, RAIIC 2024, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 20–23, <https://doi.org/10.1109/RAIIC61787.2024.10670907>.
- [14] S. Liang, X. Liu, Z. Yang, M. Liu, Y. Yin, Offshore Ship Detection in Foggy Weather Based on Improved YOLOv8, J Mar Sci Eng 12 (2024), <https://doi.org/10.3390/jmse12091641>.
- [15] Z. Zhang, L. Tan, R.L.K. Tiong, Ship-Fire Net: An Improved YOLOv8 Algorithm for Ship Fire Detection, Sensors 24 (2024), <https://doi.org/10.3390/s24030727>.

- [16] C. Niu, D. Han, B. Han, Z. Wu, SAR-LtYOLOv8: A Lightweight YOLOv8 Model for Small Object Detection in SAR Ship Images, *Computer Systems Science and Engineering* 48 (2024) 1723–1748, <https://doi.org/10.32604/csse.2024.056736>.
- [17] T. Singh, T. Babu, R.R. Nair, P. Duraisamy, Ship Detection in Synthetic Aperture Radar Imagery: An Active Contour Model Approach in Computer Vision Deep Learning, in: *Procedia Comput Sci*, Elsevier B.V., 2024, pp. 1793–1802, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.04.170>.
- [18] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi, You only look once: Unified, real-time object detection, in: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society, 2016, pp. 779–788, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>.
- [19] Y. Yin, H. Li, W. Fu, Faster-YOLO: An accurate and faster object detection method, *Digital Signal Processing: A Review Journal* 102 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2020.102756>.
- [20] M. Hussain, YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection, *Machines* 11 (2023), <https://doi.org/10.3390/machines11070677>.
- [21] J. Terven, D.M. Córdova-Esparza, J.A. Romero-González, A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS, *Mach Learn Knowl Extr* 5 (2023) 1680–1716, <https://doi.org/10.3390/make5040083>.
- [22] J. Redmon, A. Farhadi, YOLO9000: Better, Faster, Stronger, (2016), <http://arxiv.org/abs/1612.08242>.
- [23] J. Redmon, A. Farhadi, YOLOv3: An Incremental Improvement, (2018), <http://arxiv.org/abs/1804.02767>.
- [24] A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, H.-Y.M. Liao, YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, (2020), <http://arxiv.org/abs/2004.10934>.
- [25] Q. Yu, Y. Han, X. Gao, W. Lin, Y. Han, Comparative Analysis of Improved YOLO v5 Models for Corrosion Detection in Coastal Environments, *J Mar Sci Eng* 12 (2024), <https://doi.org/10.3390/jmse12101754>.
- [26] C. Li, L. Li, H. Jiang, K. Weng, Y. Geng, L. Li, Z. Ke, Q. Li, M. Cheng, W. Nie, Y. Li, B. Zhang, Y. Liang, L. Zhou, X. Xu, X. Chu, X. Wei, X. Wei, YOLOv6: A Single-Stage Object Detection Framework for Industrial Applications, (2022), <http://arxiv.org/abs/2209.02976>.
- [27] C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy, H.-Y.M. Liao, YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, (2022), <http://arxiv.org/abs/2207.02697>.
- [28] M. Talib, A.H.Y. Al-Noori, J. Suad, YOLOv8-CAB: Improved YOLOv8 for Real-time Object Detection, *Karbala International Journal of Modern Science* 10 (2024) 56–68, <https://doi.org/10.33640/2405-609X.3339>.
- [29] J.J. Yen, Y.H. Pan, C.H. Wang, Deer Species and Gender Detection system based on YOLO v9, in: *11th IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, ICCE-Taiwan 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 463–464, <https://doi.org/10.1109/ICCE-Taiwan62264.2024.10674650>.
- [30] M. Sohan, T. Sai Ram, Ch.V. Rami Reddy, A Review on YOLOv8 and Its Advancements, in: 2024, pp. 529–545, https://doi.org/10.1007/978-981-99-7962-2_39.
- [31] S. Du, W. Pan, N. Li, S. Dai, B. Xu, H. Liu, C. Xu, X. Li, TSD-YOLO: Small traffic sign detection based on improved YOLO v8, *IET Image Process* 18 (2024) 2884–2898, <https://doi.org/10.1049/ipr2.13141>.
- [32] Y. Li, M. Wang, C. Wang, M. Zhong, A method for maize pest detection based on improved YOLO-v9 model, in: *2024 7th International Conference on Computer Information Science and Application Technology, CISAT 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 858–861, <https://doi.org/10.1109/CISAT62382.2024.10695307>.
- [33] Robin Public, Roboflow Universe, <https://Universe.Roboflow.Com/Robin-Public/Kaggle-Ships-in-Google-Earth-Dfqwt> (2022).



ENDÜSTRİ YAPILARININ YENİDEN İŞLEVLENDİRİLMESİ; NAZİLLİ SÜMERBANK BASMA FABRİKASI LOJMAN BİNASI ÖRNEĞİ

*Kamertap CIRIK¹, Hasan Ş. HAŞTEMOĞLU²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Mimarlık Planlama ve Tasarım AD., Isparta

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Isparta

(Geliş/Received: 13.11.2024, Kabul/Accepted: 02.12.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ÖZ

Bu çalışma, sanayi devrimi sonrası işlevini yitiren endüstri yapılarının yeniden işlevlendirilmesiyle sosyal sürdürülebilirliğe katkıda bulunma potansiyelini incelemektedir. Türkiye’de, erken Cumhuriyet dönemi sanayileşme sürecinin bir ürünü olan Sümerbank fabrikaları, kültürel miras ve modern ihtiyaçlar arasında bir köprü kurarak yeniden işlevlendirilmeye adaydır. Çalışmada Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası’nda yer alan lojman binası için bir işlev değişikliği modeli önerilmektedir. Bu bağlamda öncelikle endüstriyel miras yapılarının yeniden işlevlendirilmesi, koruma ve sürdürülebilirlik bağlamında ele alınmıştır. Sümerbank fabrikalarının tarihsel ve sosyoekonomik etkileri incelenmiş, Türkiye’deki endüstri miras alanlarına yönelik mevcut koruma uygulamaları değerlendirilmiştir. Yeniden işlevlendirmede fonksiyon seçimine etki eden faktörler belirlenip, bu ölçütlerin puanlamasına dayalı bir yöntem geliştirilerek Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası örneğinde endüstriyel mirasın yeniden işlevlendirilmesi için bir model önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: Endüstri Mirası, Yeniden İşlevlendirme, Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası.

REFUNCTIONALITY OF INDUSTRIAL BUILDINGS; NAZİLLİ SUMERBANK FABRIC FACTORY RESIDENCE BUILDING EXAMPLE

ABSTRACT

This study examines the potential to contribute to social sustainability by re-functioning industrial structures that lost their functions after the industrial revolution. Sümerbank factories, which are a product of the industrialization process of the early Republican period in Turkey, are candidates for re-functioning by establishing a bridge between cultural heritage and modern needs. In the study, a function change model is proposed for the lodging building located in Nazilli Sümerbank Fabric Factory. In this context, first of all, the re-functioning of industrial heritage structures is addressed in the context of protection and sustainability. The historical and socio-economic effects of Sümerbank factories are examined, and current protection practices for industrial heritage areas in Turkey are evaluated. The factors affecting the selection of functions in re-functioning are determined, a method based on the scoring of these criteria is developed, and a model is proposed for the re-functioning of industrial heritage in the example of Nazilli Sümerbank Fabric Factory.

Keywords: Industrial Heritage, Re-functionalization, Nazilli Sümerbank Fabric Factory.

1. Giriş (Introduction)

Sanayi Devrimi sonrası inşa edilen endüstri yapıları, dönemin toplumsal ve ekonomik gelişiminde kritik rol oynamıştır. Ancak teknolojinin hızla gelişmesi ve üretim süreçlerindeki değişimler sonucunda, pek çok endüstriyel yapı zamanla işlevsiz hale gelmiştir. Bu bağlamda, endüstri mirasının korunması ve yeniden işlevlendirilmesi, bu yapıların kültürel ve mimari değerlerini koruyarak çağdaş ihtiyaçlara uygun biçimde yeniden kullanılmasını sağlamaktadır. 20. yüzyılın sonlarından itibaren özellikle terk edilmiş endüstri yapılarının yeniden işlevlendirilmesi, sosyal sürdürülebilirlik açısından önemli bir strateji haline gelmiştir. Türkiye'de ise erken Cumhuriyet dönemi sanayileşme sürecinde inşa edilen Sümerbank fabrikaları, ülkenin ekonomik ve endüstriyel gelişiminde önemli bir yere sahiptir. Teknolojik ilerlemelerle birlikte işlevlerini yitiren bu yapılar, kültürel miras değerleri göz önüne alınarak korunmalı ve yeniden işlevlendirilmelidir. Bu çalışmada, Türkiye'nin ilk modern tekstil fabrikalarından biri olan Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası'nda yer alan lojman binasının yeniden işlevlendirilmesine yönelik bir model önerilmektedir. Çalışma kapsamında, toplamda dört bloktan oluşan lojman binalarından A blok ele alınmış olup, mevcut binanın rölevesi alınarak, plan ve görünüşleri çizilmiş, mekânsal oluşum, hacim/büyüklik, cephe düzeni ve yapısal duruma müdahale gibi parametrelerin dikkate alındığı bir puanlama yöntemiyle yeni işlev önerisi geliştirilmiştir. Çalışma, Sümerbank fabrikalarının tarihi ve kültürel değerlerini sürdürülebilir bir biçimde koruyarak kullanıma kazandırılması için bir model sunmayı amaçlamakta olup, endüstriyel mirasın korunması ve yeniden işlevlendirilmesi konusunda literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir.

2. Yeniden İşlevlendirme Kavramı ve Fonksiyon Seçimine Etki Eden Faktörler (The Concept of Adaptive Reuse and Factors Influencing Function Selection)

Yeniden işlevlendirme, ekonomik, sosyal ve politik nedenlerle işlevini kaybetmiş ve bakımsız hale gelmiş yapıların, yapısal özelliklerini koruyarak yeniden kullanıma sunulmasını ifade etmektedir. Toplumların yaşam biçimleri, zaman içinde çeşitli faktörlerden etkilenerek değişim göstermektedir. Bu değişim, mekânlarla olan etkileşimleri de kapsar. Başlangıçta belirli bir işlev için tasarlanmış mekânlar, zamanla bu işlevi yerine getiremez hale gelebilir; bu durum, mekânın iç dinamiklerinden veya toplumun değişen beklentilerinden kaynaklanabilir [1]. Yeniden işlevlendirme, fiziksel varlıkları koruyarak mevcut işlevlerini yerine getiremeyen yapıların, yeni bir işlevle değerlendirilerek tekrar kullanılmasını sağlamaktadır [2]. Yeniden kullanım, mevcut bir yapının orijinal işlevinin dışında bir amaca hizmet etmesi için yapılan düzenlemeleri ifade eder. Kent kimliğinin korunmasında önemli rol oynayan bu kavram, çağdaş koruma anlayışında sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Yeniden kullanım, bir yapının özgün işlevinin değişmesi ya da genişlemesi sonucu yeni bir işlev kazanarak hayatta kalmasını sağlayan uygulamaları kapsar. D. Kuban bu kavramı kültürel varlıkların bakımını, korunmasını, onarımını ve gelecek kuşaklara aktarımını hedefleyen her türlü çalışmayı kapsayacak şekilde tanımlamaktadır [3]. Yapıların toplumsal yaşam biçimleri ve estetik anlayışları gibi önemli bilgileri nesilden nesile aktarma rolü göz önüne alındığında, yeniden kullanım bu yapıların korunmasında kritik bir araçtır [4]. Örnekler arasında hamamların çarşıya dönüştürülmesi, medreselerin yurt olarak kullanılması ve hapishanelerin otel haline getirilmesi bulunmaktadır [3]. Binaların fonksiyonlarının değişmesi tarihi bir olgu olarak görülmemiştir; geçmişte binalara yeni işlevler verilerek uzun süre kullanılmaları sağlanmıştır. Endüstri devrimi öncesinde binaların yıkımı nadiren yaşanırken, bu dönemden sonra yıkım ve yeniden inşa yaygın bir uygulama haline gelmiştir. II. Dünya Savaşı sonrası yaşanan yıkım ve yenileme çalışmaları bu değişimi hızlandırmıştır. Yeni çağda, ticari ve endüstriyel faaliyetlerin şehir merkezlerinden banliyölere kaydırılması, değerli arazilerin ofisler ve alışveriş merkezleri gibi işlevlere tahsis edilmesine yol açmıştır. Bu süreçte birçok bina işlevini ve kullanıcılarını kaybetmiştir [5]. Uyarlamalı yeniden kullanım (adaptive reuse) kavramı, 1960'larda yeni bir mimarlık yaklaşımı olarak ortaya çıkmış ve 1970'lerde çevre hareketleriyle önem kazanmıştır. Bu yöntem, tarihi binaların yıkılmasını önlemek için geliştirilmiş ve zamanla ekonomik değere sahip ancak kullanım ömrü tamamlanmamış binalar için de uygulanır hale gelmiştir. 1967'de İngiltere'de kabul edilen Toplumsal Tesisler Yasası, yerel yönetimlerin koruma alanlarını belirlemeye başlamasına öncülük etmiştir. Bu yasal düzenleme, Avrupa'da koruma uygulamaları için bir örnek teşkil etmiştir. 1980'lerden itibaren rehabilitasyon ve yeniden kullanım, inşaat sektöründe önemli bir yere sahip olmuştur; bu tür projeler, inşaat sektörünün %40'ına kadar iş yükü oluşturabilmektedir.

1990'lı yıllardan itibaren, küresel ölçekte 'sürdürülebilirlik' kavramı, uyarlamalı yeniden kullanıma güçlü bir destek sağlamıştır. Çevresel sürdürülebilirliği teşvik eden geri dönüşüm yaklaşımı, atıkların

azaltılması ve malzemelerin yeniden kullanımı konularında geniş bir etki alanı yaratmaktadır [6]. Ancak, şehir merkezindeki eski binaların yeniden kullanımı karmaşık bir süreçtir; tasarımcılar, mevcut yapının uygun kullanım önerileri geliştirmek durumundadır. Hem bireyler hem de devlet, eski bina stoklarının yeniden kullanımı için yenilikçi yöntemler geliştirmelidir [7].

Sonuç olarak, her bina için yeniden kullanımda özgün dinamikler ve özellikler vardır. Yeniden kullanımın tasarım ve uygulama kriterleri konusunda net bir fikir birliği sağlanamamıştır; ancak, hem binanın hem de kullanıcıların ihtiyaçlarını karşılayan bir yaklaşım benimsemek kritik öneme sahiptir. Gelişen teknoloji, yeni olanaklar sunarken, yeni fonksiyonların sürdürülebilirliği gelecekte büyük önem taşımaktadır [8]. Yapılara yeni işlev kazandırmak, mekânsal düzenlemelerde klasik tasarım yaklaşımlarından farklı bir süreç gerektirir. Bu sürecin başarılı olması, yapının mimari özelliklerine, çevresine ve yasal düzenlemelere uyumlu işlevlerin seçimine bağlıdır [9]. Yeniden işlevlendirmede dikkate alınması gereken temel kriterler, binanın mevcut mimari özellikleri ve çevresel faktörler olarak iki başlıkta incelenebilir. Bu çalışmada; yapının mimari özellikleri değerlendirilecektir. Öyle ki, eski yapıların yeni işlevlere uyarlanması sürecinde, yapının mimari özellikleri dikkate alınması gereken başlıca unsurlar arasında yer alır. Bu özellikler; mekânsal organizasyon, mekân boyutları, işlevsel kurgu, strüktürel sistem ve teknik altyapı gibi unsurları kapsar. Mimari özelliklerin her biri, yeni işlevin başarılı bir şekilde entegre edilmesi için farklı boyutlarda önem taşır.

Mekânsal Organizasyon; yapının iç mekânsal organizasyonu, yeni işlevin doğrudan uygulanabilirliği açısından kritik rol oynar. Özellikle tek mekânlı yapılar, genellikle birden fazla mekâna sahip yapılardan daha sınırlı işlevsellik sunar. Tek mekânlı yapılar, kültürel etkinlikler, konser salonları veya sergi alanları gibi işlevlerle uyumlu olabilirken; birden fazla mekâna sahip yapılar, daha fazla esneklik sunarak farklı işlevsel kurgulara daha kolay uyum sağlayabilir [10]. Mekânsal organizasyonun esnekliği, yapının yeni işlevlerle çelişmeden uyum sağlaması açısından önemlidir.

Mekân Boyutları; yapının genel boyutları ve her bir mekânın büyüklüğü, yeni işlevin gereksinimlerine göre uyarlanabilmelidir. Örneğin, han gibi geniş bir yapı otel olarak yeniden kullanılmak istendiğinde, odaların boyutları konaklama işlevine uygun hale getirilmelidir. Ancak, mekân boyutlarının yetersiz kaldığı durumlarda, odaların birleştirilmesi veya bölünmesi gibi müdahaleler yapılabilir (Altınoluk, 1998). Buna karşın, yapı boyutlarının işlev gereksinimleriyle uyumsuz olması durumunda, binanın mekânsal karakteri olumsuz yönde etkilenebilir [4].

İşlevsel Kurgu; tarihi yapıların yeniden işlevlendirilmesi sürecinde, mevcut mekânsal bağlantılar ve işlevsel sirkülasyon yeni işlevin taleplerine göre uyarlanmalıdır. Her mekânın gerektirdiği eylemler ve mekânlar arası ilişkiler, kullanıcının davranışlarına uygun hale getirilmelidir. Yeni işlevin sağlıklı bir biçimde uygulanabilmesi için, yapı içindeki mevcut sirkülasyon ve işlevsel kurgunun yeni düzenlemelerle desteklenmesi gerekir.

Strüktürel Sistem ve Teknik Altyapı; yapının strüktürel sistemi, yeniden işlevlendirme sürecinde en az mekânsal organizasyon kadar önemlidir. Yeni işlevin gerektirdiği yapısal ve teknik ihtiyaçlar, yapının strüktürel dengesini koruyacak şekilde adapte edilmelidir. Örneğin, büyük yapısal değişiklikler gerektiren işlevlerden kaçınılmalı ve yük dengesini bozmayan çözümler üretilmelidir [11]. Ayrıca, modern teknik altyapı ihtiyaçlarının eklenmesi gerektiğinde, yapının orijinal özelliklerine zarar vermeden bu entegrasyonun sağlanması önemlidir [12]. Elektrik, su tesisatı, havalandırma ve veri altyapısı gibi çağdaş gereksinimlerin, binanın estetik ve tarihsel değerini zedelemekten uygulanması tercih edilmelidir.

Sonuç olarak, yapının mimari özellikleri, yeni işlevin entegrasyonunda dikkate alınması gereken temel unsurlardır. Yapının mekânsal düzeni, işlevsel yapısı, strüktürel durumu ve teknik altyapısı, yeni işlevin mekâna uygun şekilde adapte edilmesi için önemli kriterler sunar.

3. Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası ve Lojman Binaları (Nazilli Sumerbank Textile Factory and Residential Buildings)

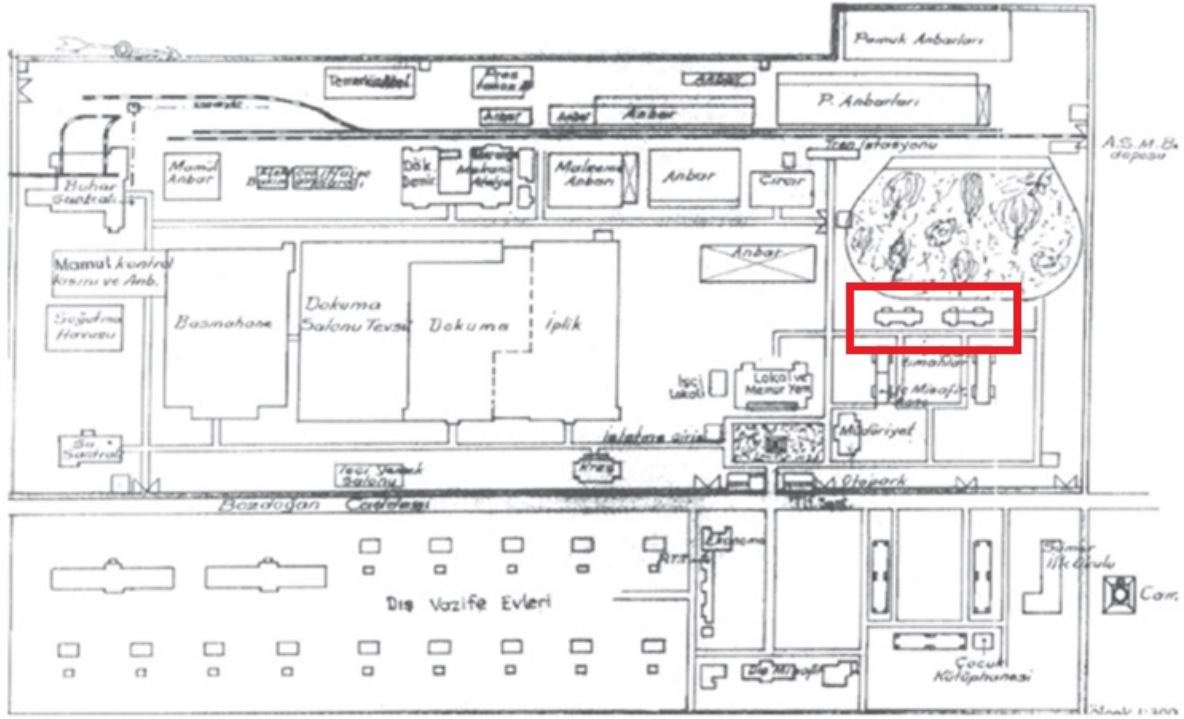
Nazilli, Türkiye'nin batısında yer alan Aydın ilinin en büyük ilçesi olup, E24 karayolu ve demir yolu ağı üzerinde konumlanmıştır. Pamuk yetiştirme potansiyeli nedeniyle burada Sümerbank Nazilli Basma Fabrikası kurulmuş, temeli 1937 yılında İktisat Vekili Celal Bayar tarafından atılmıştır. Fabrika, 9 Ekim 1937'de Mustafa Kemal Atatürk tarafından açılmıştır. İnşaat sürecinde Sovyetler

Birliği'nden kredi ve teknik destek alınmış, proje Sovyet uzmanlar tarafından gerçekleştirilmiştir. 1949'da tüzel kişilik kazanan fabrika, 1956'da İzmir Basma Sanayii Müessesesi'ne bağlanmıştır. Nazilli'nin güneyinde, Bozdoğan yolu üzerinde yer alan fabrika, çevresindeki bataklık alanların kurutulmasıyla sıtma hastalığını azaltmıştır [13]. Fabrika, elektrik santrali, ambarlar, tamirhane, tren istasyonu, spor sahası gibi çeşitli yapılar içermektedir. Mimari tarzı, dönemin sade ve fonksiyonel mimarisini yansıtmaktadır. Fabrikanın inşasıyla birlikte Nazilli'de büyük bir dönüşüm başlamış, alınan dış göçler nedeniyle kent Aydın ve Denizli ile rekabet eder şekilde büyümüş, fabrika yerleşimin kentleşmesinde çok önemli rol oynamıştır [14]. 1960 yılında müessese statüsüne yükseltelen Sümerbank Nazilli Basma Fabrikası, İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı çerçevesinde yenileme çalışmaları için önemli bir yatırım almıştır. 1980 yılında özelleştirilmiş, 1998'de ise sit alanı olarak ilan edilmiştir [15].

2002 yılında kapatılarak Adnan Menderes Üniversitesi'ne devredilmiş, üniversitenin kullanımına ayrılan alanların dışında kalan yapılar atıl durumda kalmıştır. Günümüzde bu yerleşke, Nazilli Meslek Yüksekokulu, Nazilli Sağlık Meslek Yüksekokulu olarak hizmet vermekte ve yaklaşık 2500 öğrenciye eğitim sunmaktadır. 2023 yılında Kuyucak Meslek Yüksekokulu da bu kampüste eğitim vermeye başlamıştır. Yerleşke, 235 dönüm alana yayılmakta olup, mevcut 31 yapıdan yalnızca 7'si aktif olarak kullanılmaktadır. Diğer yapılar zamanla tahrip olmuş ve atıl bırakılmıştır. Kampüs, Aydın Menderes Üniversitesi Sümer Kampüsü olarak anılmakta, işçi konutları ise Dr. Yüksel Yalova Rekreasyon Alanı olarak yeniden düzenlenmiştir. Son yıllarda, Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası ile ilgili çeşitli girişimler ortaya çıkmıştır. 2020 yılında Balo Salonu'nun restorasyonu için bir sponsor ile anlaşma sağlanmış, 2021'de müze oluşturulması amacıyla bir protokol imzalanmıştır. Ancak, bu projelerin somut bir ilerleme kaydetmediği belirtilmektedir. Ayrıca, fabrikanın sit alanı statüsü 2020'de "Doğal Sit-Sürdürülebilir Koruma ve Kontrollü Kullanım Alanı" olarak güncellenmiştir.

Sümerbank fabrikalarının çalışanlarına sunduğu en önemli imkanlardan biri barınma olanaklarıydı. 1942 yılına ait planda dört iç apartman, üç dış apartman, bir bekar evi, 15 işçi evi ve iki pavyon olmak üzere toplam 25 konut birimi bulunmaktadır. 1953 yılında yapılan eklemeye bu sayı, 30 ev, 132 apartman dairesi, 228 işçi evi, 56 baraka ve 31 diğer ev ile birlikte toplam 477'ye çıkmıştır. Dış apartmanlarda, dönemin rasyonel fonksiyoncu anlayışının izleri gözlemlenmektedir. Yaklaşık 20 yıl sonra (1950'ler) inşa edilen tekil konut birimlerinde de aynı yaklaşım devam etmektedir. Bu konutlar, vaziyet planının netliği, tüm yapıların tek katta ve yoğun bir yeşil dokunun içinde tasarlanmasıyla dikkat çekmektedir. Çalışanların ihtiyaçları doğrultusunda oluşan bu yerleşim birimi, aynı zamanda Nazilli'nin ilk toplu konut örneğini teşkil etmektedir [15].

Yerleşkedeki tüm konut bölgeleri tek bir istisna dışında giriş aksının hemen solunda yer almaktadır. Konut bölümü müdüriyet binasının arkasında yer alan ve 4 binadan oluşan gruptur. Bu grubun dışında memur apartmanları, bekar evleri, bekar memur apartmanları, evli memur apartmanları gibi çeşitli gruplar için ayrılmış bina modelleri bulunmaktadır. İşçi apartmanları haricindeki bu tüm diğer gruplar için yapılan binalar giriş aksının solunda yer almaktadır. Tüm konutlar için ortak olan özellik sıkışık bir yerleşke içerisinde olmayışlarıdır. Bahçeler ve yeşil doku alanlarıyla fabrika bölümlerinden ayrılmaya çalışan konut bölümlerinde çalışanların fabrika ortamından algısal olarak çıkması hedeflenmiştir. Diğer taraftan konut bölümü içerisinde yer alan tüm değişken bina modelleri konumlanırken dikkate alınan noktanın hiyerarşi sırası olduğu görülür. İdarecilere, mühendislere ve memurlara ait lojman binaları fabrikaya yakınlık bağlamında hiyerarşik olarak sıralanmıştır.

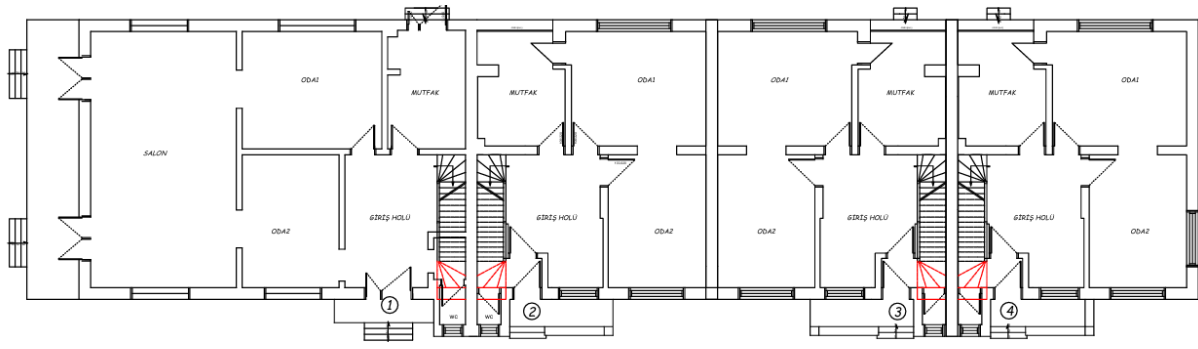


Şekil 1. 1950 yılı öncesine ait fabrika vaziyet planı (Factory site plan prior to 1950) [16]

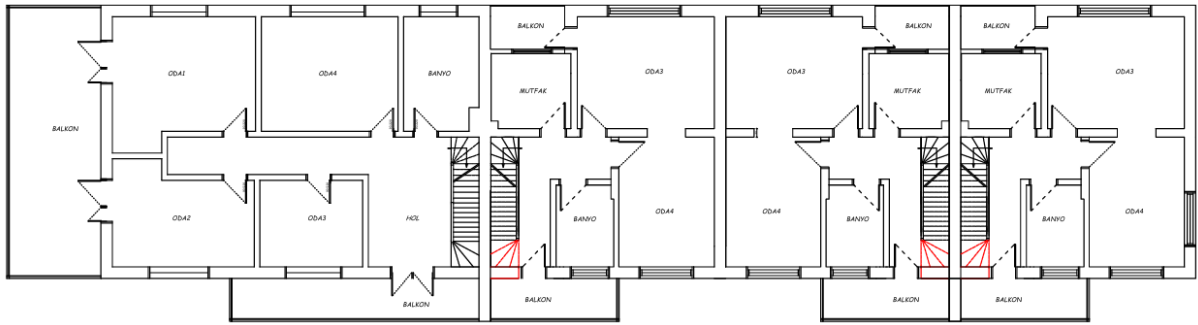
Şekil 1’de işaretli A Blok, 1950 yılına ait vaziyet planında yer aldığı gibi yapılan arşiv çalışmalarında Turkstroj tarafından hazırlanan ilk vaziyet planında da mevcut olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Fabrika müdürü ve teknik personel kullanımı için tahsis edilmiş 4 adet bitişik nizam, iki katlı konut örneğidir.



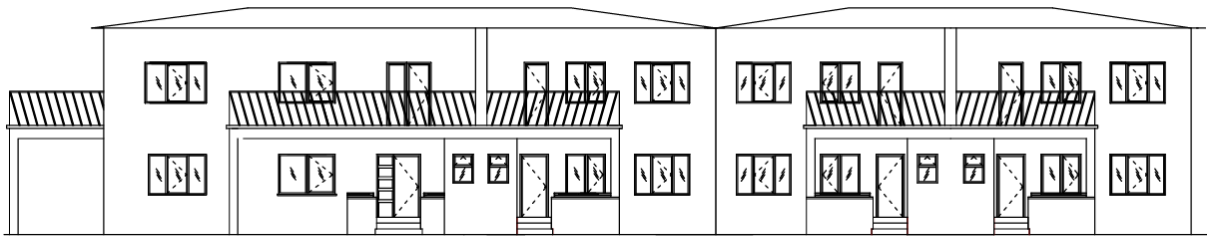
Şekil 2. 1937 yılı lojmanların inşaat sonrası görünümü (The appearance of the residential buildings after construction in 1937) [17]



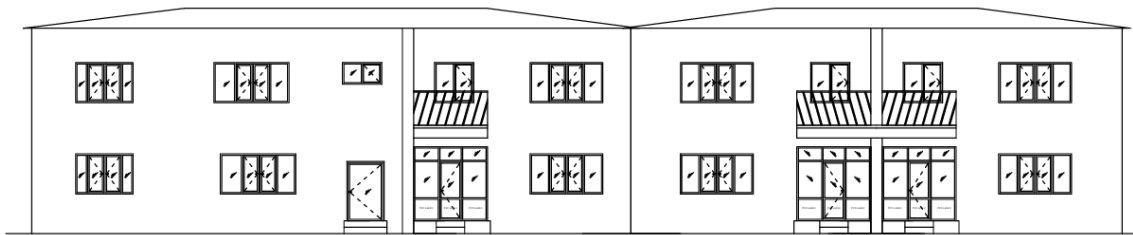
Şekil 2. A Blok mevcut zemin kat planı (Existing ground floor plan of block A)



Şekil 3. A Blok mevcut zemin kat planı (Existing ground floor plan of block A)



Şekil 4. A blok doğu cephesi (Eastern facade of block A)



Şekil 5. A blok batı cephesi (Western facade of block A)

İç apartmanlar olarak adlandırılan yapı grubu 4 ana bloktan oluşmuş olup çalışmada A blok ele alınmıştır. Taşıyıcı sistemi betonarme olan bina, bitişik nizam, iki katlı 4 ayrı bağımsız bölümden oluşmaktadır. İlk bağımsız bölüm arşiv kayıtlarında “müdür lojmanı” olarak geçmekte olup fabrikanın üst düzey yöneticileri için, diğer 3 bağımsız bölüm ise fabrika mühendislerinin kullanımı için ayrılmıştır. Günümüzde kullanılmayan konutlar boş ve atıl durumdadır.



Şekil 6. A Blok dış cephe mevcut durum (Current condition of the exterior facade of Block A)



Şekil 7. A Blok iç mekan mevcut durum (Current condition of the interior of Block A)

Çalışmada, Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası günümüzde Adnan Menderes Üniversitesi mülkiyetinde olduğu için, yerleşke içerisinde yer alan A blok lojman binası için yeniden işlevlendirme öneri fonksiyonlarının eğitim sektöründen seçilmesine karar verilmiştir. Üniversite kampüslerinde bulunması gereken temel fonksiyonlar ve bina çeşitleri, hem akademik hem de sosyal yaşamı destekleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu nedenle bu çalışmada yeni işlev önerileri olarak “merkezi derslik, atölye/stüdyo, kütüphane, yemekhane, kültür merkezi, enstitü binası, idari bina ve rektörlük (yönetim) binası” fonksiyonları belirlenmiştir. Bu fonksiyonlar mekânsal kurgu, hacim/büyüklik, cephe düzeni ve yapısal müdahale ölçütleri doğrultusunda puanlanmıştır. Puanlama yapılırken en uygun/olumlu durum 5 puan verilerek, en olumsuz durum 1 puan verilerek değerlendirme yapılmıştır. Bu doğrultuda bir tablo oluşturularak lojman A blok için en uygun yeni işlev önerisine ulaşılmaya çalışılmıştır.

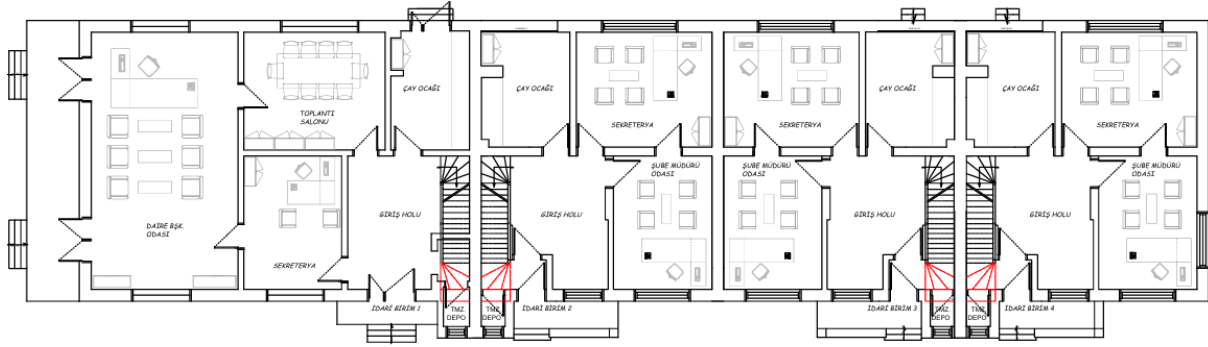
Tablo 1. İşlev Değerlendirmesi (Function Assessment)

LOJMAN A BLOK	Merkezi Derslikler	Atölyeler/ Stüdyolar	Kütüphane	Yemekhane	Kültür Merkezi	Enstitü Binası	İdari Bina	Rektörlük Binası
Mekansal Kurgu	2	2	2	1	2	3	4	2
Hacim/ Büyüklik	1	1	2	1	2	3	4	2
Cephe Düzeni	2	2	2	1	2	3	5	2
Yapısal Müdahale	2	2	2	2	2	3	5	3
TOPLAM	7	7	8	5	8	12	18	9

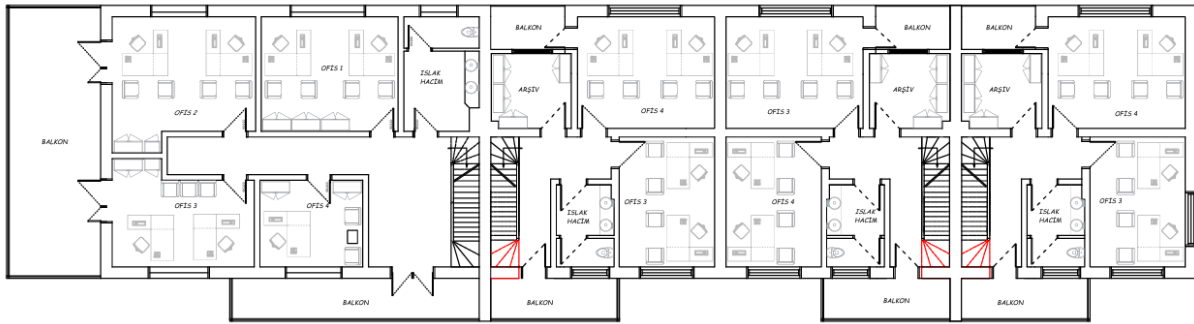
Bu puanlama yöntemiyle lojman A blok için yeni işlev önerisi olarak “idari bina” fonksiyonu en uygun bulunmuştur. Bir yüksek öğretim yerleşkesinde idari birimler; daire başkanlıkları ve onlara bağlı müdürlükler/şeflikler şeklinde hizmet verirler.

Lojmanlar 4 ana bloktan oluştuğu için A blok için getirilen bu fonksiyon önerisi diğer lojman bloklarında da uygulanarak her bir bloğun, farklı bir daire başkanlığına dönüştürülmesine olanak

sağlamaktadır. A blokta yer alan müdür lojmanı daire başkanı, sekreteryaya, toplantı salonu, çay ocağı ve ofislere, teknik personel lojmanı olarak adlandırılan diğer 3 bağımsız villa tipi yapı da daire başkanlığına bağlı hizmet veren şube müdürlükleri olarak yeniden işlevlendirilmiştir. Mevcut yapıda yer alan mutfak çay ocağına, yatak odaları ofislere, salonlar şube müdürü odalarına dönüştürülmüştür.



Şekil 8. A blok öneri zemin kat planı (Proposed ground floor plan for block A)



Şekil 9. A blok öneri 1. kat planı (Proposed first floor plan for block A)

4. Araştırma Bulguları ve Sonuç (Research Findings and Conclusion)

Sümerbank, 2262 Sayılı Kanun ile Ankara merkezli olarak 1933'te kurulmuştur. Bu tarihten itibaren bünyesinde başta dokuma olmak üzere kimya, maden, selüloz ve seramik alanında çok sayıda fabrika inşa edilmiştir. 1930'lardaki kuruluş ve gelişim evresi 1950'lere kadar sürmüştür, 1960- 1980 döneminde kalkınmada içe dönük bir iktisadi politikanın uygulanması Sümerbank'ın yatırımlarına yeniden ivme kazandırmıştır. Sümerbank 1980'lere kadar yeni yatırımlar ile sanayi ve bankacılık alanında yol almaya devam ederken 1980'lerden itibaren değişen ekonomi politikası ve uygulamaları sonucu başlatılan özelleştirme çalışmaları, Sümerbank'ı da etkilemiştir. Yaşanan süreçte 2000'li yıllara kadar pek çok işletme özelleştirilmiş veya kapatılmıştır [18]. Bu dönüşümler sırasında pek çok dönem yapısı endüstri mirası yapı yıkılmış veya değiştirilmiştir.

Örneğin 1937 yılında Sümerbank tarafından kurulan Ereğli Tekstil Fabrikası, özel bir şirket tarafından 1997 yılında satın alınmış, modernize edilen tesisler; iplik fabrikası, dokuma fabrikası, boya fabrikası, baskı fabrikası, konfeksiyon fabrikası ve dikiş ipliği fabrikası olarak kullanılmaya devam edilmektedir.

Sümerbank Bergama Fabrikasının 1954 yılında inşasına başlanmış, 1960 yılında işletmeye açılmış, ardından 2003 yılında kapanan fabrika, önce Bergama Belediye Başkanlığı'na ardından 2012 yılında, Dokuz Eylül Üniversitesine tahsis edilmiştir. Günümüzde fabrika yapılarının bir bölümü onarılarak Bergama Meslek Yüksekokulu olarak kullanılmaya devam etmektedir [19].

1939 tarihinde üretime başlayan Malatya Bez ve İplik Fabrikası uzun yıllar kente hizmet verirken Malatya'nın ilk toplu konut uygulaması olan işçi ve memur lojmanları da yerel kimlik ve ihtiyaçlar göz önünde tutularak bahçeli ve müstakil olarak yapılmıştır. Ancak 2004 yılında özelleştirilen fabrikanın üretim ve konut alanı tamamen yıkılmış, Fabrikadan geriye yalnızca Sümer İlkokulu kalmıştır [20].

Bir diğer örnekte Bursa’da kurulan Merinos Fabrikası zaman içerisinde gelişmiş, 1960’larda Bursa ekonomisine en önemli katkıyı sağlayan kurum haline gelmiştir. Ardından diğer Sümerbank işletmeleri ile benzer süreçler yaşanmış, üretim durdurulmuş ve 2004 yılında fabrika özelleştirilmiştir. Daha sonra kuruma ait arazi ve üzerindeki taşınmazlar Bursa Büyükşehir Belediyesi’ne tahsis edilmiş ancak 2006 meydana gelen yangın sonrası yapılar kullanılamaz hale gelmiştir. Araziye 2007 yılında bir kültür merkezi ve park inşa edilmiştir.

1933’te halı üretimine başlanan, 1943’te Sümerbank’a devredilen, Sümerhalı Isparta Fabrikası 2008’de faaliyeti durana dek Anadolu’daki sanayileşme ve modernleşme çabaları ve dokuma sektöründeki gelişmelerin bir bileşeni olarak varlığını sürdürmüştür [21]. Ardından Sağlık Bakanlığına devredilen arazi üzerindeki tesisler yıkılarak Isparta Şehir Hastanesi yapılmıştır.

Diğer taraftan 2000 sonrası ise az sayıdaki Sümerbank fabrikası kültürel sürdürülebilirlik bağlamında endüstri mirası olarak koruma altına alınmaya başlanmış ve yeniden işlevlendirme projeleri hayata geçirilmiştir. Bunun en başarılı örneklerinden biri Kayseri Bez Fabrikasıdır.1996 yılında Türkiye Cumhuriyeti tüm devlet fabrikalarında üretimi durdurmaya karar vermesiyle Kayseri Sümerbank Bez Fabrikası da 1999 yılında kapanmıştır. Ulusal öneminin tanınması nedeniyle özelleştirme kapsamından çıkarılmış ve Erciyes Üniversitesi’ne tahsis edilmiş, Kompleks 2003-2004 yıllarında kültür varlığı statüsü kazanmıştır. 2012’de yeni kurulan Abdullah Gül Üniversitesi’ne tahsis edilmiştir [22]. Mevcut endüstri yapıları üniversite kampüsü şeklinde yeniden işlevlendirilmiştir.



Şekil 10. Yeniden İşlevlendirme Sonrası Kayseri Sümerbank Bez Fabrikası Kayseri (Sumerbank Textile Factory After Adaptive Reuse) [22]

Bir diğer örnekte Antalya Dokuma Fabrikasının Sümerbank’ın tasfiye sürecinde, 2003 yılında üretimi durdurulmuş, kampüsün mülkiyeti 2005 yılında Antalya Kepez Belediyesi’ne devredilmiştir. Bölge Koruma Kurulu fabrikanın giriş kapısı, yönetim binası, bu alandaki çevre düzenlemeleri, yemekhane ve depo yapılarını ‘kültür varlığı’, ağaç dokusunu da ‘kent dokusunu tanımlayan, kent imajına etkisi olan ağaç grubu’ olarak tescil etmiştir. Ardından fabrika sahasının çevre düzenlemeleri yapılarak, ‘kapsamlı onarım’ statüsünde uygulamalar gerçekleştirilmiş, kreş yapısı Anadolu Oyuncak Müzesi, müdür lojmanı kafe, işçi yemekhanesi sanat galerisi ve memur yemekhanesi de emekli fabrika mensupları için lokal olarak yeniden işlevlendirilmiştir [23].



Şekil 11. Yeniden İşlevlendirme Sonrası Antalya Sümerbank Dokuma Fabrikası (Antalya Sumerbank Weaving Factory after Adaptive Reuse) [23]

Sonuç olarak örneklerden ve yaşanan süreçlerden görüldüğü üzere Türkiye’de endüstri mirası açısından büyük önem taşıyan Sümerbank fabrikaları ve yerleşkeleri tam anlamıyla korunamamıştır. Az sayıda örnekte başarılı uygulamalar dikkat çekerken, genel olarak yapılar yıkılmış veya atıl kalmıştır.

Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası gibi eski endüstri yapılarının yeniden işlevlendirilmesi, tarihi ve kültürel mirasın korunması, kent hafızasının canlı tutulması ve bölgesel ekonomik kalkınmaya katkı sağlaması açısından büyük önem taşır. Bu tür endüstri yapıları, yalnızca üretim merkezleri olarak değil, aynı zamanda toplumların sosyo-ekonomik gelişimine ve kent dokusuna olan etkileriyle de dikkat çeker. Sümerbank gibi bir fabrikanın yeniden işlevlendirilmesi, özellikle modern Türkiye’nin sanayileşme sürecinde oynadığı rol ve toplum belleğinde bıraktığı iz nedeniyle önemlidir. Bu bağlamda, Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası’nın bir eğitim kurumu olarak kullanılması, bölgenin kültürel ve ekonomik yapısına katkıda bulunurken, bu alanın bir eğitim, araştırma ve kültür merkezi olarak işlev kazanması da toplumsal belleğin devamlılığını sağlayacaktır.

Çalışmada en uygun yeni işlev önerisinin bulunması için yapılan tablolama ve puanlama yöntemiyle ulaştığımız idari bina fonksiyonu; cephe düzeni ve yapısal/teknik altyapı kapsamında herhangi bir müdahale gerektirmediği gibi işlevsel kurgu, hacim/büyükölçü bağlamında da olumlu sonuç vermiştir. Sonraki çalışmalarda bu parametleri puanlamak yönteminin baz alındığı bir algoritma geliştirilerek tüm yerleşkedeki yeniden işlevlendirilecek binalara uygulanması mümkün olacaktır. Sonuç olarak, Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası’nın yeniden işlevlendirilmesi, tarihi dokunun korunması, kültürel mirasın aktarılması ve sürdürülebilir kent gelişimi için önemli bir model teşkil edecektir. Bu tür yeniden işlevlendirme projeleri kentin kimliğini güçlendirirken, toplumun mekansal ve tarihsel aidiyet duygusunu pekiştirmeye yardımcı olacaktır.


5. Kaynaklar (References)

- [1] Ç. Çetinkaya, Yeniden İşlevlendirilen Endüstriyel Mekânların Görsel Algı Değerlendirmesi: İzmir Tarihi Havagazı Fabrikası, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2015.
- [2] B. Kaşlı, İstanbul’da Yeniden İşlevlendirilen Korumaya Değer Endüstri Yapıları ve İç Mekan Müdahaleleri: Santralistanbul Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [3] D. Kuban, Tarihi Çevre Korumanın Mimarlık Boyutu-Kuram ve Uygulama, YEM Yayınları, İstanbul, 2000.
- [4] E. Mardan, N. Özgönül, Kültürel ve Doğal Değerlerin Korunması, TMMOB Mimarlar Odası Yayınları, Ankara, 2005.
- [5] S. Cantacuzino, S. Branndt, Saving Old Buildings, The Architectural Press, London, 1989.

- [6] DEH, Preserving Our Past, Building Our Future, Adaptive Reuse, Pirion, Canberra, 2004.
- [7] D. Latham, Creative Reuse of Buildings, Donhead, 2000.
- [8] S. Conejos, C. Langston, J. Smith, Improving the Implementation of Adaptive Reuse Strategies for Historic Buildings, in: Safeguard of Architectural, Visual, Environmental Heritage Conference, Naples, Italy, June 2011.
- [9] H. Ş. Haştemoğlu, Demiryolu İstasyon Binalarına Yeni Fonksiyon Önerileri Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2012.
- [10] Ü. Altınoluk, Binaların Yeniden Kullanımı, YEM Yayınları, İstanbul, 1998.
- [11] E. Yıldız, Anıtsal Yapıların Kullanım Sürecinde Değerlendirilmesine Yönelik Bir Model Önerisi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2003.
- [12] B. Özel, Eski Yapıların Yeni İşlevle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [13] Ö. Arıtan, Kapitalist/Sosyalist Modernleşme Modellerinin Erken Cumhuriyet Dönemi Mimarlığının Biçimlenişine Etkileri-Sümerbank Kit Yerleşkeleri Üzerinden Yeni Bir Anlamlandırma Denemesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2004.
- [14] G. Güneş, Nazilli Sümerbank Basma Fabrikası, Famaktüel Dergisi 2 (18) (2007) 4-7.
- [15] S. Zeybekoğlu, Erken Cumhuriyet Dönemi Sanayi Komplekslerinin Mekansal Analizi: Nazilli, Kayseri, Bursa ve Eskişehir Örnekleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.
- [16] D. Aydın, E. Aksoy, Nazilli Sümerbank Fabrikasının Sosyal Tesis Binasının İşlevsel Dönüşümü İçin Analizler, Güney Mimarlık Dergisi 8 (2012) 40-46.
- [17] URL 1. 1937 Lojman Fotoğrafi, <https://www.facebook.com/basmafab/posts/i%C3%A7-lojmanlar-1937/3973552336101567/>, Erişim: Eylül 2024.
- [18] M.G. Polatoğlu, Türkiye'nin Kalkınmasında Sümerbank ve Etkinliği (1933-1987), Atatürk Araştırma Merkezi Dergisi 37 (104) (2021) 261-306.
- [19] G. Baki, Y. Tunca, Fabrika Mekânın Hafızası, Hafızanın Mekânı Sümerbank Bergama Tekstil Fabrikası Projesi (2022), <https://www.saridenizalti.com/fabrika2022>, Erişim: Eylül 2024.
- [20] I.Y. Eldeş, Sümerbank Dokuma Fabrikaları'nın Dönüşümü (1935-2019): Kayseri, Ereğli, Nazilli, Bursa ve Malatya Örnekleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [21] Ö. Küçükerman, J. Edirne, Sümerbank Sümerhalı Isparta Fabrikasının Özgün Çalışma Modeli ve Anadolu Halıcılık Kültüründeki Rolü, Arış Dergisi 22 (2023) 66-83.
- [22] B. Asiliskender, N. Baturayoğlu Yöney, Kayseri Sümerbank Bez Fabrikası, Bir Mimarlık Tarihi Dizimi.
- [23] K. Karabağ, Bir Endüstri Mirası Olarak Antalya Dokuma Fabrikası, Online Journal of Art and Design 8 (2) (2020) 43.



A STUDY ON THE UTILIZATION OF WASTEWATER TREATMENT SLUDGE IN THE CONSTRUCTION SECTOR

*Yusuf Tahir ALTUNCI¹ 

¹Isparta University of Applied Sciences, Technical Sciences Vocational School, Department of Civil Engineering, Building Inspection Program

(Geliş/Received: 28.11.2024, Kabul/Accepted: 28.12.2024, Yayınlanma/Published: 31.12.2024)

ABSTRACT

Sewage sludge is a type of waste generated during the wastewater treatment process. If not properly disposed of, this waste can pose a risk to human health. This study explores the use of wastewater treatment sludge in the construction sector, with a focus on evaluating its impact on CO₂ emissions and its contribution to sustainability. The findings suggest that, following the calcination process, wastewater treatment sludge acquires pozzolanic properties, which enable its partial incorporation into cement and concrete production. Moreover, the incorporation of wastewater treatment sludge into cement and concrete will contribute to both the reduction of CO₂ emissions and the promotion of sustainability.

Keywords: Wastewater treatment sludge, CO₂ emissions, Sustainability.

ATIKSU ARITMA ÇAMURUNUN İNŞAAT SEKTÖRÜNDE KULLANIMI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

ÖZ

Kanalizasyon çamuru, atık su arıtma tesislerinde ayrıştırılan bir atık çeşididir. Bu atık malzeme düzgün bir şekilde bertaraf edilmezse insan sağlığına zarar verebilir. Atık su arıtma çamurunun inşaat sektöründe kullanımının araştırıldığı bu çalışmada, atık su arıtma çamurunun CO₂ emisyonuna etkisi ve sürdürülebilirliğe olan katkısının irdelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın sonucunda, atık su arıtma çamurunun kalsinasyon süreci sonunda kül haline getirilmesi ile puzolanik özellik kazandığı ve çimento-beton üretiminde kısmen de olsa kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca atık su arıtma çamurunun çimento ve beton içerisinde değerlendirilmesiyle hem CO₂ emisyonlarının düşürülmesine hem de sürdürülebilirliğe katkı sağlanmış olacaktır.

Anahtar kelimeler: Atık su arıtma çamuru, CO₂ emisyonu, Sürdürülebilirlik.

1. Introduction

The increasing use of construction materials poses significant threats to natural resources and the environment [1]. It is well known that approximately 5-7% of CO₂ (carbon dioxide) emissions in the atmosphere are attributed to cement production [2]. In the case of widely consumed construction materials such as concrete and brick, attention should be focused on reducing consumption or finding substitute materials with lower greenhouse gas emissions per unit [1]. Consequently, researchers are actively exploring sustainable materials that can serve as alternatives to, or substitutes for, cement. Wastewater treatment sludge is one such alternative material. Wastewater treatment sludge can be directly used as a raw material in clinker production [3]. Additionally, ash generated from the incineration of wastewater treatment sludge can serve as a potential substitute for cement.

There are several significant studies in the literature regarding the use of wastewater treatment sludge in the construction industry. Pinarli and Kaymal [4] replaced 5%, 10%, 15%, and 20% of the cement weight with sewage sludge ash. Their findings indicated that an increase in the replacement ratio resulted in longer initial and final setting times. They also noted that the effects on Le Chatelier expansion and the specific surface area of the mortar were negligible. While the compressive strength decreased with the addition of sludge ash, a 10% replacement ratio still resulted in compressive and flexural strengths within the acceptable limits at 28 days. In their study, Lin et al. [5] added up to 3% nano-SiO₂ additive to mortar mixtures composed of Portland cement, sewage sludge ash, and fly ash. They found that the nano-SiO₂ additive improved the hydration of the mortar, thereby enhancing early strength development. Donatello and Chessemann [6] conducted a study on the recycling and recovery methods of sewage sludge ash. Their research concluded that approximately 1.7 million tons of sewage sludge ash are produced annually worldwide, a figure expected to rise in the future. They highlighted that utilizing this material as a raw material in applications such as cement mortars, concrete, sintered bricks, tiles, glass-ceramics, and paving stone production is the most effective disposal method. Chakraborty et al. [7] identified that the use of 70% sewage sludge ash, combined with 20% unslaked lime, 10% blast furnace slag, and an alkali activator (NaOH), is an effective technique for developing sustainable construction materials and improving waste management. Vouk et al. [8] conducted a study in which they obtained sewage sludge ash at three different combustion temperatures (800, 900, and 1000 °C). They found that the combustion temperature did not affect the fresh mortar properties, and the optimal combustion temperature for mechanical properties was 900 °C. Additionally, they stated that substituting up to 20% of cement with sewage sludge ash was a suitable value for their study. Oliva et al. [9] investigated the effects of different temperatures and calcination durations on the partial replacement of cement with sewage sludge ash in Portland and blended cements. They found that lower burning temperatures combined with longer calcination durations increased the specific surface area of the sewage sludge ash, positively influencing the mechanical performance of concrete through hydraulic and pozzolanic activity. Krejcirikova, Rode, et al. [10] found that as the amount of sewage sludge ash replaced with cement increased, the 28-day compressive strengths of the hardened mortars decreased. They also observed that replacing 30% of the cement with sewage sludge ash resulted in a 15% reduction in thermal conductivity, and as the cement-to-ash ratio decreased, the water vapor permeability increased. Zhou et al. [11] investigated the effects of adding sewage sludge ash to lime and Portland cement by incorporating 10%, 20%, and 30% by weight of sewage sludge ash. They produced lime, cement pastes containing sewage sludge ash, and observed that the lime pastes with sewage sludge ash exhibited higher reactivity and heat generation compared to the cement pastes. The study concluded that in lime-based systems, the development of strength was primarily governed by the formation of crystalline phases, including brucite and calcium phosphate hydrates. Additionally, they recommended the substitution of 30% lime for sewage sludge ash in the production of controlled low-strength materials. Cong et al. [12] suggested that to reduce the adverse effects of sewage sludge ash on cement hydration, drying and grinding the sewage sludge to a powder form and heating it in a microwave oven for 15 minutes was more beneficial than subjecting it to the same pre-treatment followed by calcination at 500 °C for 2 hours. Gu et al. [13] in their study found that using sulfate-rich sewage sludge ash as a cement replacement material negatively impacted workability, compressive strength, and flexural strength, delayed setting times, reduced autogenous shrinkage, and resulted in a longer drying shrinkage and greater expansion of the cement paste. However, they concluded that replacing up to 5% of cement with sulfate-rich sewage sludge ash did not cause significant detrimental effects on the properties of the cement paste. This substitution led to a 4.98% reduction in CO₂ emissions and a 25.42% reduction in cost. D. Pang et al. [14] investigated the physicochemical properties of different types of sludge. Based on their study, they concluded that utilizing wastewater treatment sludge as a substitute for raw materials

and as an alternative fuel could lead to a reduction in carbon emissions of approximately 25 million tons annually. Huang et al. [15] produced glass ceramics by using waste glass and sewage sludge ash together. They reported that the resulting new product exhibited successful compressive strength and water absorption performance, as well as the ability to stabilize heavy metal leaching. Alrefaei et al. [16] improved the early-age performance of silico-alumino-phosphate geopolymer by using sewage sludge ash.

2. Material and Method

Wastewater from the sewage system is initially screened to remove large debris. In the second stage, heavy contaminants settle at the bottom, resulting in the formation of sludge. In the third stage, an aeration process is applied to eliminate bacteria [17]. Finally, the sludge is dried and compacted; making it suitable for utilization. Figure 1 presents an image of the dried wastewater treatment sludge.



Figure 1. Image of dried wastewater treatment sludge

The incineration of sewage sludge results in the production of a large amount (70% by mass and 90% by volume) of odorless, cellular, porous, and lightweight sewage sludge ash, which helps address an environmental issue [4,11,18]. The SEM image of sewage sludge ash [19] is presented in Figure 2, and its chemical properties [20] are provided in Table 1.

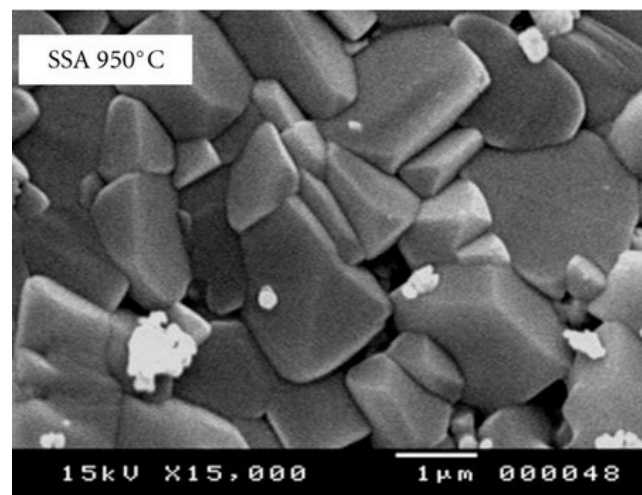


Figure 2. SEM image of sewage sludge ash

Table 1. Chemical composition of sewage sludge ash

Component	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	SO ₃
%	31.74	26.71	16.71	6.80	13.08	0.69	0.47	1.08	0.45	2.27

The particle size distribution of sewage sludge ash is similar to that of cement particles [9]. Moreover, the composition of silicon, calcium, aluminum, iron, and other elements in wastewater treatment sludge ash is similar to the composition of raw materials used for cement production [14].

Information on several significant studies regarding the use of wastewater treatment sludge ash as a cement replacement material is provided in Table 2.

Table 2. Information on some notable studies

Cement Type	Replacement ratio (%)	Calcination temperature (°C)	Paste / Mortar / Concrete/ Geopolymer	Reference
OPC	5-20	800	Mortar	[21]
CEM I 42,5 R	5-10	850	Concrete	[22]
Clinker	0-30	850-900	Mortar	[23]
OPC	0-40	800	Mortar	[24]
OPC	0-30	900	Concrete	[25]
CEM I	0-50	-	Paste	[26]
OPC	0-20	900	Concrete	[27]
OPC	0-20	Microwaved high temp.	Concrete	[28]
OPC	25-50	850	Mortar	[29]
CEM I 52,5 N	10-30	850	Mortar	[10]
CEM I 42,5 R	10-30	700	Mortar	[30]
OPC	0-30	-	Mortar	[31]
CEM I 42,5 R	10-20	-	Mortar	[32]
-	50	550-850	Geopolymer	[33]
CEM I 52,5 R	25-50	850	Mortar	[34]
CEM I 52,5	0-60	-	Mortar	[35]

Examining Table 2 reveals that a temperature range of 550-900°C is sufficient for wastewater treatment sludge to acquire pozzolanic properties through incineration. Additionally, it is noted that a microwave oven has been utilized for the calcination process. Although replacement ratios between 0-60% have been investigated, the optimal ratio is approximately 10% [23,35]. This phenomenon can be attributed to the ability of sewage sludge ash to effectively fill micro-voids up to a proportion of 10% [36].

3. Results and Discussion

Due to its high content of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K), sewage sludge is considered one of the most suitable materials for application to agricultural land. However, the disposal of sewage sludge on agricultural land is limited due to its potential to increase methane gas emissions and cause outbreaks of diseases such as foot-and-mouth disease [6]. In contrast, the use of wastewater treatment sludge ash in the cement and concrete industries contributes to reducing greenhouse gas emissions and preserving non-renewable natural resources [37]. Therefore, the most appropriate disposal method is to incinerate the sludge, converting it into ash, which can subsequently be utilized in cement and concrete production. In this context, the use of wastewater treatment sludge ash in concrete and cement results in:

- Environmental pollution is mitigated, supporting waste management efforts and promoting sustainability
- The durability of concrete in sulfate and acidic environments is improved.
- Due to its pozzolanic properties, the long-term strength of concrete increases.
- The workability of fresh concrete improves.
- The unit weight of concrete decreases.

Along with the positive aspects of using sewage sludge ash in concrete and cement, it is also important to consider the potential negative aspects. Specifically, research focused on improving its adverse effects on mechanical performance is necessary. Such studies will make the use of sewage sludge ash in concrete and cement production more efficient. As a result, utilizing sewage sludge ash will contribute to sustainability in the construction sector.

References

- [1] B. Huang, Y. Chen, W. McDowall, S. Türkeli, R. Bleischwitz, Y. Geng, Embodied GHG emissions of building materials in Shanghai, *J. Clean. Prod.* 210 (2019) 777–785. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.030>.
- [2] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, A. Bahadori, Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry, *J. Clean. Prod.* 51 (2013) 142–161. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.10.049>.
- [3] Ö. Ersoy, M. Özbay, Marmara Bölgesinde Bulunan Organize Sanayi Bölgelerinin Atık Su Arıtma Tesislerinde Oluşan Arıtma Çamurlarının Enerji Kaynağı Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi, 6 (2023) 64–81.
- [4] V. Pinarli, G. Kaymal, An innovative sludge disposal option reuse of sludge ash by incorporation in construction materials, *Environ. Technol. (United Kingdom)*. 15 (1994) 843–852. <https://doi.org/10.1080/09593339409385491>.
- [5] D.F. Lin, K.L. Lin, W.C. Chang, H.L. Luo, M.Q. Cai, Improvements of nano-SiO2 on sludge/fly ash mortar, *Waste Manag.* 28 (2008) 1081–1087. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.023>.
- [6] S. Donatello, C.R. Cheeseman, Recycling and recovery routes for incinerated sewage sludge ash (ISSA): A review, *Waste Manag.* 33 (2013) 2328–2340.
- [7] S. Chakraborty, B.W. Jo, J.H. Jo, Z. Baloch, Effectiveness of sewage sludge ash combined with waste pozzolanic minerals in developing sustainable construction material: An alternative approach for waste management, *J. Clean. Prod.* 153 (2017) 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.059>.
- [8] D. Vouk, D. Nakic, N. Stirmer, C. Cheeseman, Influence of combustion temperature on the performance of sewage sludge ash as a supplementary cementitious material, *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 20 (2018) 1458–1467. <https://doi.org/10.1007/S10163-018-0707-8>.
- [9] M. Oliva, F. Vargas, M. Lopez, Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems, *J. Clean. Prod.* 223 (2019) 1029–1041. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.147>.
- [10] B. Krejcirikova, L.M. Ottosen, G.M. Kirkelund, C. Rode, R. Peuhkuri, Characterization of sewage sludge ash and its effect on moisture physics of mortar, *J. Build. Eng.* 21 (2019) 396–403.
- [11] Y. fan Zhou, J. shan Li, J. xin Lu, C. Cheeseman, C.S. Poon, Recycling incinerated sewage sludge ash (ISSA) as a cementitious binder by lime activation, *J. Clean. Prod.* 244 (2020).
- [12] X. Cong, S. Lu, Y. Gao, Y. Yao, M. Elchalakani, X. Shi, Effects of microwave, thermomechanical and chemical treatments of sewage sludge ash on its early-age behavior as supplementary cementitious material, *J. Clean. Prod.* 258 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120647>.
- [13] C. Gu, Y. Ji, Y. Zhang, Y. Yang, J. Liu, T. Ni, Recycling use of sulfate-rich sewage sludge ash (SR-SSA) in cement-based materials: Assessment on the basic properties, volume deformation and microstructure of SR-SSA blended cement pastes, *J. Clean. Prod.* 282 (2021) 124511. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124511>.
- [14] D. Pang, Y. Mao, Y. Jin, Z. Song, X. Wang, J. Li, W. Wang, Review on the use of sludge in cement kilns: Mechanism, technical, and environmental evaluation, *Process Saf. Environ. Prot.* 172 (2023) 1072–1086. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.004>.
- [15] Y. Huang, Z. Chen, Y. Liu, J.X. Lu, Z. Bian, M. Yio, C. Cheeseman, F. Wang, C. Sun Poon, Recycling of waste glass and incinerated sewage sludge ash in glass-ceramics, *Waste Manag.* 174 (2024) 229–239. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2023.12.007>.

- [16] Y. Alrefaei, H.A. Ali, J.C. Lao, J.G. Dai, C.S. Poon, Micro and macro properties of silico-aluminophosphate geopolymer: Role of incinerated sewage sludge ash (ISSA), *Constr. Build. Mater.* 416 (2024) 135231. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.135231>.
- [17] D. Orhon, Evolution of the activated sludge process: The first 50 years, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 90 (2015) 608–640. <https://doi.org/10.1002/jctb.4565>.
- [18] C.J. Lynn, R.K. Dhir, G.S. Ghataora, R.P. West, Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete, *Constr. Build. Mater.* 98 (2015) 767–779. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.122>.
- [19] M.A. Tantawy, A.M. El-Roudi, E.M. Abdalla, M.A. Abdelzaher, Evaluation of the Pozzolanic Activity of Sewage Sludge Ash, *ISRN Chem. Eng.* 2012 (2012) 1–8. <https://doi.org/10.5402/2012/487037>.
- [20] L. Wang, G. Skjevrak, J.E. Hustad, M.G. Grønli, Sintering characteristics of sewage sludge ashes at elevated temperatures, *Fuel Process. Technol.* 96 (2012) 88–97.
- [21] X. Zhou, X. Zhou, L. He, Y. Zhang, Effect of sewage sludge ash on mechanical properties, drying shrinkage and high-temperature resistance of cement mortar, *Case Stud. Constr. Mater.* 20 (2024) e03101. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03101>.
- [22] M.A. Mosaberpanah, S.B. Olabimtan, A.P. Balkis, B.O. Rabiou, B.O. Oluwole, C.S. Ajuonuma, Effect of Biochar and Sewage Sludge Ash as Partial Replacement for Cement in Cementitious Composites: Mechanical, and Durability Properties, *Sustain.* 16 (2024). <https://doi.org/10.3390/su16041522>.
- [23] Y. Li, X. Guo, Coupling evaluation of carbon emissions and strength: Early carbonation curing of cement mortar containing incinerated sewage sludge ash (ISSA), *Constr. Build. Mater.* 427 (2024) 136278. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136278>.
- [24] Y. Zhou, P. Yu, H. Yang, S. Li, S. He, Pore structure and compressive strength of alkali activated mortar with sewage sludge ash (SSA) under optimal incineration conditions, *Constr. Build. Mater.* 433 (2024) 136745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136745>.
- [25] F. Azarhomayun, M. Haji, M. Kioumars, A. Kheyroddin, Combined Use of Sewage Sludge Ash and Silica Fume in Concrete, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 17 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00593-5>.
- [26] Y.L. Yaphary, S.F.Y. Li, Enhanced immobilization of metal pollutants in sewage sludge ash (SSA)-cement pastes by calcium chloride and nitrate: Experimental and DFT studies, *J. Environ. Chem. Eng.* 11 (2023) 110888. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110888>.
- [27] S. Al Shanti, A. El-Dieb, M.A. Maraqa, Utilization of Sewage Sludge Ash in Self-Compacted Concrete, in: *Int. Conf. Civil, Struct. Transp. Eng.*, 2021: pp. 1–8. <https://doi.org/10.11159/iccste21.126>.
- [28] M.A. Azed, D.S. Ing, Properties of concrete containing microwaved sewage sludge ash, *J. Mech. Eng. Sci.* 15 (2021) 8469–8479. <https://doi.org/10.15282/jmes.15.4.2021.01.0667>.
- [29] M. Mejd, M. Saillio, T. Chaussadent, L. Divet, A. Tagnit-Hamou, Hydration mechanisms of sewage sludge ashes used as cement replacement, *Cem. Concr. Res.* 135 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2020.106115>.
- [30] M. Záleská, Z. Pavlík, M. Pavlíková, L. Scheinherrová, J. Pokorný, A. Trník, P. Svora, J. Fořt, O. Jankovský, Z. Suchorab, R. Černý, Biomass ash-based mineral admixture prepared from municipal sewage sludge and its application in cement composites, *Clean Technol. Environ. Policy.* 20 (2018) 159–171. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1465-3>.
- [31] J.S. Li, M.Z. Guo, Q. Xue, C.S. Poon, Recycling of incinerated sewage sludge ash and cathode ray tube funnel glass in cement mortars, *J. Clean. Prod.* 152 (2017) 142–149.
- [32] W. Piasta, M. Lukawska, The Effect of Sewage Sludge Ash on Properties of Cement Composites, *Procedia Eng.* 161 (2016) 1018–1024. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.842>.
- [33] T.C. Mahutjane, L.N. Tchadjié, T.N. Sithole, The feasibility of utilizing sewage sludge as a source of

- aluminosilicate to synthesise geopolymer cement, *J. Mater. Res. Technol.* 25 (2023) 3314–3323. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.116>.
- [34] M. Cyr, M. Coutand, P. Clastres, Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1278–1289. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.04.003>.
- [35] M. Coutand, M. Cyr, P. Clastres, Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars, *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.* 159 (2006) 153–162. <https://doi.org/10.1680/COMA.2006.159.4.153>.
- [36] S. Saxena, A.R. Tembhurkar, Developing biotechnological technique for reuse of wastewater and steel slag in bio-concrete, *J. Clean. Prod.* 229 (2019) 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.363>.
- [37] D. Nakic, Environmental evaluation of concrete with sewage sludge ash based on LCA, *Sustain. Prod. Consum.* 16 (2018) 193–201. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2018.08.003>.