

GAZI UNIVERSITY  
**JOURNAL OF SCIENCE**

PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY



e-ISSN 2147-9526

# GAZİ UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE

## PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

### Editorial Team

#### Editor-in-Chief

Güngör BAL, Gazi University

#### Assistant Editors

Orhan KAPLAN, Gazi University

#### Associate Editors

Hasan KÖMÜRCÜGİL, Doğu Akdeniz University

Youcef Soufi, University Larbi Tebessi

Mustafa ŞAHMARAN, Hacettepe University

Suat ÖZDEMİR, Hacettepe University

İlyas ÇANKAYA, Ankara Yıldırım Beyazıt University

Metin İPEK, Sakarya University of Applied Science

Sabri ÖZTÜRK, Abant İzzet Baysal University

Saffet AYASUN, Gazi University

Mustafa AKTAŞ, Gazi University

Zafer BARLAS, Sakarya University of Applied Science

Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ, Gazi University

Köksal ERENTÜRK, Atatürk University

Alpay ÖZER, Gazi University

Cevdet Emin EKİNCİ, Fırat University,

Fehim KÖYLÜ, Erciyes University

Cemal KOÇAK, Gazi University

Mehmet DEMİRTAŞ, Gazi University

Haitham Ebu-Rub, Texas A&M University at Qatar

Alpaslan TURGUT, Dokuz Eylül University

Necmi ALTIN, Gazi University

Adem TATAROĞLU, Gazi University

Zeynel SEFEROĞLU, Gazi University

Çetin KARATAŞ, Gazi University

Can Haşimoğlu, Sakarya University of Applied Science

Mehmet ARSLAN, Karadeniz Technical University

Metin ARSLAN, Ankara University

Fecir DURAN, Gazi University

Hamit SOLMAZ, Gazi University

Mete ÇELİK, Erciyes University

Naci GENÇ, Yalova University

Gürhan İÇÖZ, Gazi University

Murat MAYDA, Karamanoğlu Mehmetbey University

Abdullah Cemil İLÇE, Abant İzzet Baysal University

Mehmet Rıdâ TÜR, Batman University

#### Advisory Board

Jian-Xin Shen, Zhejiang University

Bekir Sami YILBAŞ, King Fahd University

Nesimi ERTUGRUL, University of Adelaide

Mustafa ERSÖZ, Selçuk University

Yusuf ÖZTÜRK, San Diego State University

Ali Fuat BOZ, Sakarya University of Applied Science

Homer RAHNEJAT, University of Central Lancashire

Nesimi ERTUGRUL, University of Adelaide

Behçet GÜLENÇ, Gazi University

İlhan M. KALYON, Stevens Institute of Technology

Fulya ALTIPARMAK, Gazi University

Murat SAATÇIOĞLU, The University of Ottawa

Mustafa M. ARAL, Georgia Institute of Technology

Ramazan BAYINDIR, Gazi University

Homer RAHNEJAT, University of Central Lancashire

Kraria HOCINE, Ferhat Abbas Sétif1 University

Vladimir Katic, University of Novi Sad

H. Serdar YÜCESU, Gazi University

Şemsettin ALTINDAL, Gazi University

Metin GÜRÜ, Gazi University

Fujio KUROKAWA, Nagasaki University

Sanjeevikumar PADMANABAN, Aalborg University

İlhami ÇOLAK, Nişantaşı University

Mehmet Bayram YILDIRIM, Wichita State University

Mustafa İLBAŞ, Gazi University

Orhan BÜYÜKALACA, Çukurova University

Ulvi ŞEKER, Gazi University

#### Technical Editor

Kenan ÜNAL, Gazi University

Ahmet ERDAĞ, Gazi University

Onur POLAT, Gazi University

Çağrı SUIÇMEZ, Gazi University

Comparison of TouchGFX and LVGL Embedded Hardware GUI Libraries

Gökhan İŞNAS, Nurettin ŞENYER

Review article

PART C: DESIGN AND TECHNOLOGY

A Simulated Annealing Algorithm for the Multi Resource Generalized Assignment Problem with Eligibility Constraint

Kumsal ERTEN Tuğba SARAC Feriştah ÖZÇELİK

Research article

Encircling Probe Design for Eddy Current Inspection System Used in The Aluminum Clad Steel Wire Inspection

Halim Burak TAŞKIN Nurettin ÜSTKOYUNCU

Research article

Current Approaches in Surface Processing of Biomedical Alloys; Laser Processes

Melek GEDİKOĞLU Aleyna KOLSAL Hatice TUTUŞ Sıdıka Mine TOKER

Review article

An Experimental Study Towards Decreasing the Energy Efficiency Index Value in Industrial Refrigerators

Elif Merve BAHAR Süleyman ERTEN Mustafa AKTAŞ

Research article

Estimates of Hydroelectric Energy Generation in Turkey with Jaya Algorithm-Optimized Artificial Neural Networks

Ergun UZLU

Research article

Investigation of a Storage Type Solar-Driven Solid Desiccant Cooling System

Nima KHOSRAVİ Devrim AYDIN

Research article

Route Optimization for Medication Delivery of Covid-19 Patients with Drones

Yasemin ÇETİN KAYA Mahir KAYA Ali AKDAĞ

Research article

Investigation of Low-Velocity Impact Performance of Glass Fiber Sandwich Panels Produced with Nano Particle Reinforced Polyurethane Adhesive

Mehmet Emin ÇETİN

Research article

Environmental and Financial Analysis of Solar Swimming Pool Heating System for 3 Different Regions of Turkey Using RETScreen Clean Energy Management Software

Kerim MARTİN

Research article

Virtual Reality and Augmented Reality in Psychiatric Disorders

Neşe ÖZKAN YILMAZ Fecir DURAN Uğur FİDAN

Review article

Estimation of Discharge Coefficient of the Trapezoidal Broad Crested Weir Flow Using Support Vector Machines

Oğuz ŞİMŞEK Veysel GÜMÜŞ Abdulkadir ÖZLÜK

Research article

2D Investigation of a Wing Concept with a NACA 4412 Airfoil in Ground Effect Operation

Tugay ÖZTÜRK Ömer Çağdaş ÇINKIR Satılmış ÜRGÜN Sinan FİDAN

Research article

Determination Working Modes of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) over Encrypted Wi-Fi Traffic using Artificial Neural Networks

Cengiz SERTKAYA Osman COŞKUN

Research article



## Comparison of TouchGFX and LVGL Embedded Hardware GUI Libraries

Gökhan İŞNAS<sup>1</sup> Nurettin ŞENYER<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>AYGUN Surgical Instruments R&D Department, Samsun/Turkey

<sup>2</sup>Samsun University, Faculty of Engineering, Software Engineering Department, Samsun/Turkey

### Article Info

Review Article  
Received: 13/04/2021  
Revision: 02/06/2021  
Accepted: 12/06/2021

### Keywords

Embedded Hardware  
Display  
Human Computer  
Interface  
GUI  
Graphical User Interface  
WYSIWYG

### Anahtar Kelimeler

Gömülü Donanım Ekran  
İnsan Bilgisayar Arayüzü  
GUI  
Grafiksel Kullanıcı  
Arayüzü  
WYSIWYG

### Abstract

Embedded hardware screens that provide communication between human and machine are becoming more common every day. User interfaces called GUI (Graphical User Interface) are used on embedded hardware displays to display data about the operation of the device and to control the functions of the device. The GUI library provides flexibility and convenience to the developer, and it also provides convenience to end users. These libraries facilitate the rapid generation of common visuals, speeding up the interface preparation process. GUI libraries are specially designed when used with embedded hardware due to the constraint of processing power. In this study, the LVGL library, which is presented by the open source culture widely used with embedded hardware and continues to be developed, and the free TouchGFX library supported by STMicroelectronics have been examined in depth. First of all, technical and commercial criteria were determined in the light of the literature review, related forum sites, trend analysis and the information provided by the companies. Then, the minimum system requirement, license status, code generation capability, display component support, performance, interfaces and input options, drawing capabilities, text features, display features, styles, compiler programs, popularity, technical support criteria were interpreted by comparing for both libraries. TouchGFX was founded by Stmicroelectronics and prepares easier interfaces for its own products. LittlevGL is developed by an independent developer community. Both libraries are widely used in embedded hardware displays. While LVGL offers coding-heavy development with C / C ++ language, TouchGFX allows direct GUI editing WYSIWYG (What You See Is What You Get) based development.

## TouchGFX ve LVGL Gömülü Donanım GUI Kitaplıklarının Kıyaslanması

### Öz

İnsan ile makine arasındaki iletişimi sağlayan gömülü donanım ekranlar her geçen gün daha yaygın hale gelmektedir. Gömülü donanım ekranlarda cihazın çalışması ile ilgili verileri görüntülemek ve cihazın işlevlerini kontrol etmek için tasarlanmış GUI diye adlandırılan kullanıcı arayüzleri kullanılmaktadır. GUI kitaplığı geliştiriciye esneklik ve kolaylık sağlarken, son kullanıcılara da kolaylık sağlamaktadır. Bu kitaplıklar ortak görsel öğelerin hızlıca üretilmesini kolaylaştırarak arayüz hazırlama sürecini hızlandırır. GUI kitaplıkları gömülü donanımlarla kullanıldığında işlem kaynaklarının kısıtından dolayı özel olarak tasarlanır. Bu çalışmada gömülü donanımlarla yaygın olarak kullanılan açık kaynak kültürünün ortaya koyduğu ve geliştirilmeye devam edilen LVGL (eski adı LittlevGL) kitaplığıyla STMicroelectronics firmasının desteklediği ücretsiz TouchGFX kitaplığı derinlemesine incelenmiştir. Öncelikle literatür taraması, ilgili forum siteleri, trend analizleri ve firmaların sağladığı herkese açık bilgiler üzerinden derlenen veriler ışığında öne çıkan teknik ve ticari kriterler belirlenmiştir. Belirlenen minimum sistem gereksinimi, lisans durumu, kod üretim kabiliyeti, ekran bileşen desteği, performans, sunduğu arayüzler ve giriş seçenekleri, çizim kabiliyetleri, metin özellikleri, görüntü özellikleri, stiller, derleyici programları, popülerlik, teknik destek kriterleri her iki kitaplık açısından karşılaştırılarak yorumlanmıştır. TouchGFX STMicroelectronics tarafından kurulmuş olup kendi ürünlerine yönelik daha kolay arayüzler hazırlamaktadır. LVGL ise bağımsız geliştirici topluluğu tarafından geliştirilmektedir. Her iki kitaplıkta gömülü donanım ekranlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. LVGL C/C++ dili ile kodlama ağırlıklı geliştirme sunarken, TouchGFX ise doğrudan GUI düzenleme WYSIWYG temelli geliştirmeye imkan sunar.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gömülü sistemler, günlük milyarlarca farklı sistem içerisinde yer alarak o sistemi akıllı hale getiren elektronik donanım ve yazılım ile oluşturulmuş entegre sistemlerdir [1]. Gömülü bir sistemin çekirdeğini, belirli bir sayıda görevi yerine getirmek için programlanan mikroişlemciler ya da mikrodenetleyiciler oluşturur. Mikroişlemcilerin içerisinde yalnızca merkezi işlem birimleri bulunmaktadır. Mikroişlemciler elektronik sistemlerdeki temel yapı taşlarından birisidir [2-3]. Mikrodenetleyiciler ise içerisinde bir mikroişlemci ve bunun yanı sıra RAM, ROM, osilatör, zamanlayıcı ve seri analog/dijital giriş-çıkışlar gibi bileşenlerle tek bir tümleşik devre olarak üretilmiş halidir.

Bilgisayarların, tabletlerin, akıllı telefonların kullanımı arttıkça insan ile makine arasındaki iletişimi sağlayan TFT (Thin Film Transistor) ekranlar her geçen gün daha da yaygın hale gelmektedir. TFT ekranlarda cihazın çalışması ile ilgili verileri görüntülemek ve cihazın işlevlerini kontrol etmek için tasarlanmış GUI (Graphical User Interface) diye adlandırılan kullanıcı arayüzleri bulunmaktadır [4-7]. Kullanıcılar ekran üzerinde GUI kabiliyeti ile gösterilen simge, ikon ve diğer görseller yardımıyla gömülü donanımla iletişime geçer. Bir grafiksel arayüzün en önemli özelliği kullanım kolaylığı sağlamasıdır [14]. GUI'lerin en yaygın kullanıldığı yerler mobil gömülü donanımlardır. Android mobil donanımlarında Aralık 2020 itibari ile 2,95 milyon farklı uygulamada [8], IOS'de ise 2.09 milyon farklı uygulamada [9] kullanıldığı raporlanmıştır.

Sistemler oluşturulurken her defasında gerekli olan yazılımsal işlemleri sıfırdan yapmak sıkıcı ve uzun zaman alan bir süreçtir. Yazılım kalıplarının tekrarlanması ve buna bağlı olarak ortaya çıkabilecek karmaşanın önlenmesini amaçlayan DRY (Don't repeat yourself) yazılım ilkesi [10] uyarınca geliştiriciler çoğunlukla hazır grafik kütüphaneleri kullanmayı tercih etmektedirler. Hazır grafik kütüphaneleri kullanmak süreçleri hızlandırır ve kolaylaştırır [11].

Kullanım alanına göre birçok farklı hazır kütüphane bulunmaktadır [12]. Bunlardan bazıları şöyledir;

- **LVGL (LittlevGL):** Kullanımı kolay grafik öğeler, güzel görsel efektler ve düşük bellek ayak iziyle gömülü GUI oluşturmak için ihtiyacınız olan herşeyi sağlayan açık kaynaklı bir grafik kitaplığıdır [13].
- **TouchGFX:** STM32 mikro denetleyicileri için optimize edilmiş, ücretsiz, gelişmiş bir grafik yazılımıdır. STM32 grafik özelliklerinden ve mimarisinden yararlanan TouchGFX, çarpıcı, akıllı telefon benzeri grafik kullanıcı arayüzleri oluşturarak insan makine etkileşimini hızlandırır [15].
- **emWin:** Gömülü GUI emWin, herhangi bir gömülü sistem üzerinde yüksek verimli ve yüksek kaliteli grafik kullanıcı arabirimlerinin oluşturulmasını sağlar [17].
- **Stemwin:** ST ile SEGGER Microcontroller GmbH ile olan ortaklık sayesinde, SEGGER emWin one'a dayalı STemWin grafik kütüphanesi oluşturulmuştur. Bu kitaplık, herhangi bir STM32, LCD/TFT ekran ve denetleyici ile Grafik Kullanıcı Arayüzlerinin oluşturulmasına olanak tanıyan profesyonel bir grafik yığın kitaplığıdır [18].
- **Total Cross:** Açık kaynaklı yazılım geliştirme kiti hızlı ve kolay bir şekilde gömülü sistemler, IoT, mobil ve masaüstüne GUI oluşturmayı sağlar [16].
- **WxWidgets:** Geliştiricilerin Windows, macOS, Linux ve diğer platformlar için tek bir kod tabanıyla uygulamalar oluşturmasına olanak tanıyan bir C++ kitaplığıdır. Ücretsiz ve açık kaynaklıdır. [19].
- **MCUXpresso:** Yazılım geliştirmenizi hızlandırmak için açık kaynaklı sürücüler, ara yazılımlar ve referans örnek uygulamalar sunar. İşlemcinize veya değerlendirme panosu seçimlerinize özel bir yazılım geliştirme kiti ile özelleştirir [20].
- **TARA Systems:** Kaynakları kısıtlı mikrodenetleyicilerde bile platformdan bağımsız ve yüksek performanslı grafik kullanıcı arabimleri oluşturmanıza olanak tanıyan TARA Systems'in yerleşik GUI teknolojisidir [21].
- **µC/GUI:** µC / GUI, gömülü uygulamalar için evrensel bir grafik yazılımdır. µC / GUI, bir LCD denetleyici ve CPU ile hemen hemen her boyuttaki fiziksel veya sanal ekrana uyarlanabilir [22].
- **GUISlice:** GUISlice, C'de gömülü GUI menüleri ve ekranları sağlayan açık kaynaklı (ücretsiz), hafif platformdan bağımsız bir kitaplık sağlar [23].

- **GUI Lite:** C de acemi olan birisinin bile kolay bir şekilde öğrenebileceği bir grafik kütüphanesidir. Kaynak kodu yalnızca temel C++ özelliklerini kullanır. Kod boyutunu daha küçük ve okunması kolay olması için C++ seçilmiştir [24].
- **Qt:** 3B/2B kullanıcı arabirimleri ile yüksek performanslı gömülü sistemler oluşturur. Qt, ürün yaşam döngünüz boyunca yazılımınızı tasarlamak, geliştirmek, test etmek, devreye almak ve bakımını yapmak için ihtiyacınız olan her şeye sahiptir [25].
- **µGFX:** µGFX, tam özellikli gömülü bir GUI oluşturmak için gereken her şeyi sağlayan, ekranlar ve dokunmatik ekranlar için hafif yerleşik bir kitaplıktır. Kullanılmayan her özelliği devre dışı bırakarak çok hızlı çalışır [26].

Bu çalışmada, gömülü donanımlarla yaygın olarak kullanılan açık kaynak kültürünün ortaya koyduğu ve geliştirilmeye devam edilen LVGL (Light and Versatile Graphics Library) kitaplığı ve STMicroelectronics firmasının desteklediği ücretsiz TouchGFX kitaplığı derinlemesine irdelenmiştir. Öncelikle literatür taraması, ilgili forumlar, trend analizleri ve firmaların sağladığı bilgiler üzerinden derlenen veriler ışığında öne çıkan teknik ve ticari kriterler belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHODS)

### 2.1. GRAFİK KİTAPLIKLARI (GRAPHIC LIBRARIES)

#### 2.1.1. TOUCHGFX (TOUCHGFX)

TouchGFX Designer programı STMicroelectronics firmasının bünyesinde olduğundan gömülü sistemlerde yaygın olarak kullanılan STM32 mikro denetleyiciler ile daha entegre çalışabilmektedir. TouchGFX Designer programı grafiksel arayüz kodlarını kendisi üretir bu sebeple kullanıcılar için ekstradan kodlama ihtiyacı yoktur.

#### 2.1.2. LVGL (LVGL)

LVGL grafik kitaplığı açık kaynak kodlu bağımsız bir yapıdadır. LVGL’de kodlar kütüphaneden seçilerek kullanıcı tarafından girilmelidir. Bu da kodlama sürecini zorlaştırmakta, maliyet artışı ve hatalara sebep olabilmektedir.

### 2.2. KRİTERLER (CRITERIAS)

TouchGFX ve LVGL yi daha iyi anlayabilmek farklarını, benzerliklerini veya üstün yönlerini belirleyebilmek için bazı kriterler belirlenmiş ve bu kriterlere göre kıyaslama yapılmıştır.

#### 2.2.1. MİNİMUM SİSTEM GEREKSİNİMLERİ (MINIMUM SYSTEM REQUIREMENTS)

Bir yazılımın çalışması için ihtiyaç duyduğu asgari donanımsal ve yazılımsal yeterliliğe minimum sistem gereksinimleri denmektedir. Her iki kitaplık işlemci ve bellek başta olmak üzere daha az sistem gereksinimine ihtiyaç duymaktadır. Her iki kütüphane en az 16 bit işlemci ve 16 MHz işleme hızı talep etmektedir. LVGL en az 64 Kb Flash ve 8 Kb RAM’e ihtiyaç duyarken [27] TouchGFX ise en az 20 Kb Flash ve 10 Kb RAM’e ihtiyaç duymaktadır [28].

#### 2.2.2. LİSANS DURUMU (LICENSE)

Bir yazılımın ya da yazılıma bağlı nesnelerin; üreticisi tarafından, kullanımına dair belge düzenleyen devlet makamı tarafından, nesnenin kullanımı, geliştirilmesi, yeniden yapılandırılması, değiştirilmesi, alıntısının yapılabilmesi gibi hususları belirleyen belgeye yazılım lisansı denir [29]. LVGL Ücretsiz MIT lisansına sahiptir [27]. TouchGFX ise STMicroelectronics tarafından üretilmekte, lisanslanmaktadır ve şu aşamada geliştiriciler ücretsiz şekilde kullanabilmektedir [15].

### 2.2.3. PROGRAMLAMA VE KODLAMA (PROGRAMMING AND CODING)

Kodlama, bir bilgisayara ya da cihaza nasıl davranacağını, hangi durumlarda ne tepki vereceğini ve bu tepkiler sonucunda nelerin etkileneceğini belirtme işlemidir. Her iki kitaplıkta C++ ile uyumludur [28]. Ayrıca LVGL C ile de uyumludur [27]. Kitaplıkların seçime bağlı üretilen kod ile geliştiricinin kodu birbirinden tamamen bağımsız yapıda değildir, üretilen kod içerisinde belirtilen USER CODE alanlarına geliştiriciler kendi kodlarını yazarlar.

### 2.2.4. EKCRAN ARAÇLARI (WIDGETS)

Widget, görsel programlamada, bir kütüphanedeki grafik bileşenlere verilen isimdir. CheckBox, ListBox, Button gibi bileşenler birer widget'tır. Windows Gadget kelimelerinden türetilmiştir. Widgetler pratik uygulamalardır [30]. Her iki kitaplıkta kendine özgün widgetlara sahiptir. TouchGFX ayrıca tamamen özgün ve sınırsız tasarım imkanına sahip; widgetlar yapmaya olanak sağlamaktadır [28].

### 2.2.5. EKCRAN PERFORMANSI (DISPLAY PERFORMANCE)

Çoklu ekran desteği ve özel renk formatı desteği ekranın performansını gösteren iki önemli özelliktir. Her iki kitaplıkta çoklu ekran desteği ve özel renk formatı desteği bulunmaktadır.

### 2.2.6. ARAYÜZLER VE GİRİŞLER (INTERFACES AND I/O)

Kullanıcı arayüzü insanların bir makine, cihaz, bilgisayar programı ya da karmaşık aletlerle etkileşimini sağlayan yöntemlerin bileşkesine verilen addır [31]. Her iki kitaplıkta kullanımı kolay bir arayüz kullanılmaktadır. Bu sebeple geliştiriciler ekstra bir grafik tasarımcı desteğine ihtiyaç duymamaktadırlar.

### 2.2.7. ÇİZİM ÖZELLİKLERİ (DRAW FEATURES)

Kenar yumuşatma, gölge, maskeleyme ve tasarım imkanı gibi etmenler bir GUI'nin çizim özelliklerini belirler. Her iki kitaplıkta benzer çizim özelliklerine sahiptir.

### 2.2.8. METİN ÖZELLİKLERİ (FONT PROPERTIES)

Metinin sahip olduğu çoklu dil desteği, özel yazı tipleri desteği gibi özelliklerdir. Her iki kitaplıkta benzer özelliklere ve çoklu dil desteğine sahiptir. Özel olarak Türkçe dilini de desteklemektedir.

### 2.2.9. GÖRÜNTÜ ÖZELLİKLERİ (IMAGE PROPERTIES)

PNG entegrasyonu, özellikle şeffaf resim desteği açısından kritiktir. Böylelikle siyah-beyaz PNG resim içerisinde bir icon tutulabilir. Bu icon yada resim bir başka resim üzerine getirdiğinde, üstteki PNG'de beyaz/şeffaf alanlara denk gelen, alttaki resim kısımları gözükmüyor; üstteki PNG'de siyaha denk gelen kısımlar ise doğrudan gözükmüyor (alttaki resmi maskeleymiş / göstermemiş olur, o kısımda). Her iki kitaplıkta görüntülerin yeniden renklendirilmesi, gerçek zamanlı yakınlaştırma ve PNG entegrasyonu gibi benzer özelliklere sahiptir.

### 2.2.10. DERLEYİCİ PROGRAMLAR (COMPILER)

Derleyici, farklı bir dilde oluşturulan kaynak kodun istenilen farklı bir kod haline dönüştürülmesine yardımcı olan otomatikleştirilmiş programlardır. Derleyici programlar yaygın olarak executable code olarak tanımlanan hemen çalıştırılabilir kodlar üretmektedir. Her iki kitaplıkta Cortex, Keil, IAR ve STM32IDE gibi mikrodenetleyici derleyicilerini desteklemektedir [27][28].

### 2.2.11. AKILLI TELEFON ÖZELLİKLERİ (MOBILE FEATURES)

Her iki kitaplıkta kaydırma, video oynatma ve dokunmatik hareketleri gibi akıllı telefon özelliklerine sahiptir [27][28].

### 2.2.12. POPÜLERLİK (POPULARITY)

Her iki kitaplıkta en popüler kitaplıklar arasındadır. Birbirlerine yakın popülerlik seviyeleri olmasına rağmen TouchGFX, LVGL'ye oranla biraz daha popülerdir (Şekil 1).

### 2.2.13. TEKNİK DESTEK (SUPPORT)

Her iki kitaplığında forumlarında birbirlerine yakın sayıda soru sorulmuş (LVGL 2.300 soru, TouchGFX 2.600 soru) ve en geç bir kaç gün içinde cevap verilmektedir. Buradan elde edilen bilgiler ışığında her iki kitaplıkta teknik destek konusunda yeterli seviyededir.

### 2.2.14. AÇIK KAYNAK (OPEN SOURCE)

Açık kaynak, bir bilgisayar yazılımının makine diline dönüştürülüp kullanımından önceki, programcılar tarafından okunur, anlaşılır, yeni amaçlara uygun değiştirilebilir hâlinin gizli tutulmayıp açık, yani okunabilir hâlde kamuya paylaşıyor olmasına verilen isimdir [32]. LVGL açık kaynak olmasına rağmen [27] TouchGFX ise STMicroelectronics'ın bir ürünüdür [28].

### 2.2.15. MALİYET (COST)

Her iki kitaplıkta ücretsizdir [27][28].

Literatür araştırması, forumlar, internet siteleri, Google Trends ve firmaların sağladığı bilgiler üzerinden veriler toplanmış ve bu veriler incelenerek öne çıkan teknik ve ticari kriterler belirlenmiştir. Minimum sistem gereksinimleri, lisans durumu, programlama ve kodlama, ekran araçları (widgets), ekran performansı, arayüzler ve girişler, çizim özellikleri, metin özellikleri, görüntü özellikleri, stiller, derleyici programları, akıllı telefon özellikleri, uluslararası ve yerel kullanım imkanları, popülerlik, etkinlik, teknik destek, kaynak, maliyet vb. kriterler arasında karşılaştırma yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Her iki kitaplıkta detaylı bir şekilde incelenmiş ve bunlar Tablo 1'de gösterilmiştir. Her iki kitaplık işletim sistemi bağımlılığı olmaksızın çalışabilmektedir. Buna göre her iki kitaplıkta ücretsiz, C++ ile uyumlu ve düşük sistem gereksinimi ile çalışabilmektedir. LVGL'nin başlıca avantajı açık kaynak kodlu olmasıdır. TouchGFX'in başlıca avantajı ise GUI araçlarını kolaylıkla düzenlemeye yarayan ve kod üretimini sunan WYSIWYG aracına sahip olmasıdır.

**Tablo 1.** LVGL ve TouchGFX Benzerlikleri ve Farklılıkları

<i>Minimum Sistem Gereksinimleri</i>	<i>LVGL</i>	<i>TouchGFX</i>
<i>Mikroişlemci (bit)</i>	<i>16 bit</i>	<i>16 bit</i>
<i>Mikroişlemci (Hız)</i>	<i>16 MHz</i>	<i>16 MHz</i>
<i>Bellek</i>	<i>8 kB RAM</i>	<i>10 kB RAM</i>
<i>Hafıza</i>	<i>64 kB Flash</i>	<i>20 kB Flash</i>
<i>Lisans Durumu</i>	<i>MIT license</i>	<i>STMicroelectronics</i>
<b><i>Programlama ve Kodlama</i></b>		
<i>C/C++ desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>

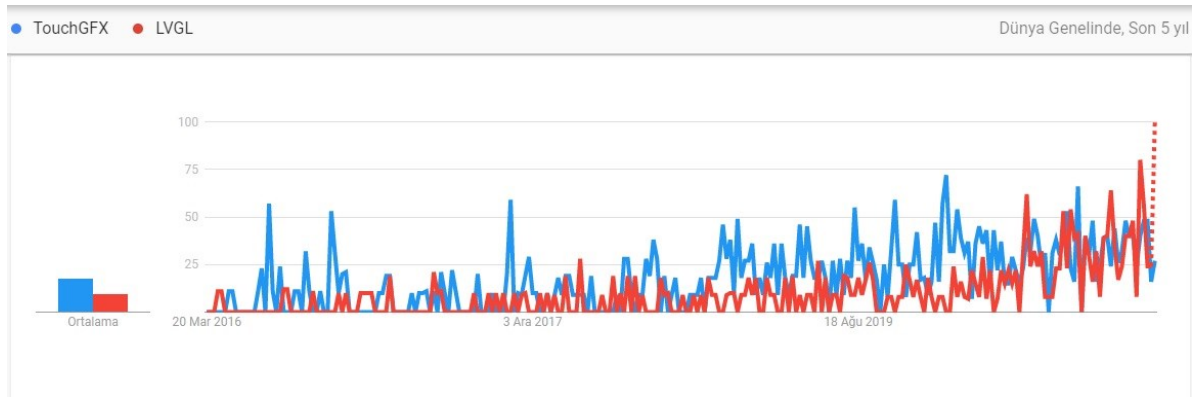


<i>microPython desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Yok</i>
<i>Yeniden üretilebilir kod desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Atollic, TrueStudio, CubeMX gibi araçlarla entegrasyon</i>	<i>Yok</i>	<i>Var</i>
<i>IAR Embedded Workbench, Arm Keil ve GCC tabanlı IDE'lerle entegrasyon</i>	<i>Yok</i>	<i>Var</i>
<b><i>Ekran Araçları</i></b>		
<i>Widget Sayısı</i>	<i>30'dan fazla</i>	<i>36'dan fazla</i>
<i>Özel widget tasarım desteği</i>	<i>Yok</i>	<i>Var</i>
<b><i>Ekran Performansı</i></b>		
<i>Çoklu ekran desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Özel renk formatı desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<b><i>Arayüzler ve Girişler</i></b>		
<i>Basit ve Kullanıcı Dostu Bir Arayüz</i>	<i>Evet</i>	<i>Evet</i>
<i>Harici Bir Grafik Tasarımcıya Duyulan İhtiyaç</i>	<i>Yok</i>	<i>Yok</i>
<i>Özel Grafik Kullanımında Kısıtlıma</i>	<i>Yok</i>	<i>Yok</i>
<i>Dokunmatik Yüzeysiz Gezinme için Tuş Takımı Desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Bilinmiyor</i>
<i>Aynı Ekran İçin Çoklu Cihaz Girişi</i>	<i>Var</i>	<i>Bilinmiyor</i>
<b><i>Çizim Özellikleri</i></b>		
<i>Kenar Yumuşatma</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Yarıçaplı Dikdörtgen</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Yarıçaplı Sınır</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Gölge</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Maskeleme</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Sınırsız Tasarım İmkani</i>	<i>Yok</i>	<i>Var</i>
<b><i>Metin Özellikleri</i></b>		
<i>Kenar Yumuşatma</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Karakter Aralığı</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>

<i>Kelime Kaydırma</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Özel Yazı Tipleri</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Çoklu Dil Desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Türkçe Dil Desteği</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Tam Çeviri Hizmeti</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<b><i>Görüntü Özellikleri</i></b>		
<i>Gerçek Zamanlı Renklendirme</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Gerçek Zamanlı Yakınlaştırma</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Harici bellek birimi kullanabilme (SD Kart vb.)</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>PNG Entegrasyonu</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<b><i>Derleyici Programlar</i></b>		
<i>Cortex-M0 +, M3, M4, M33 ve M7 ile</i>	<i>Çalışır</i>	<i>Çalışır</i>
<i>Keil</i>	<i>Destekler</i>	<i>Destekler</i>
<i>IAR</i>	<i>Destekler</i>	<i>Destekler</i>
<i>STM32CubeIDE</i>	<i>Destekler</i>	<i>Destekler</i>
<b><i>Akıllı Telefon Özellikleri</i></b>		
<i>Ekranı Sürükleme</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Kaydırma</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>3D efektler</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Video oynatma</i>	<i>Yok</i>	<i>Var</i>
<i>Alfa karıştırma</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Kenarları yumuşatılmış yazı tipleri</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<i>Dokunmatik hareketleri</i>	<i>Var</i>	<i>Var</i>
<b><i>Popülerlik</i></b>	<i>Google Trends verilerine göre son 5 yılda 100 üzerinden 10 aranma değerine ulaşmıştır.</i>	<i>Google Trends verilerine göre son 5 yılda 100 üzerinden 18 aranma değerine ulaşmıştır.</i>
<b><i>Teknik Destek</i></b>		

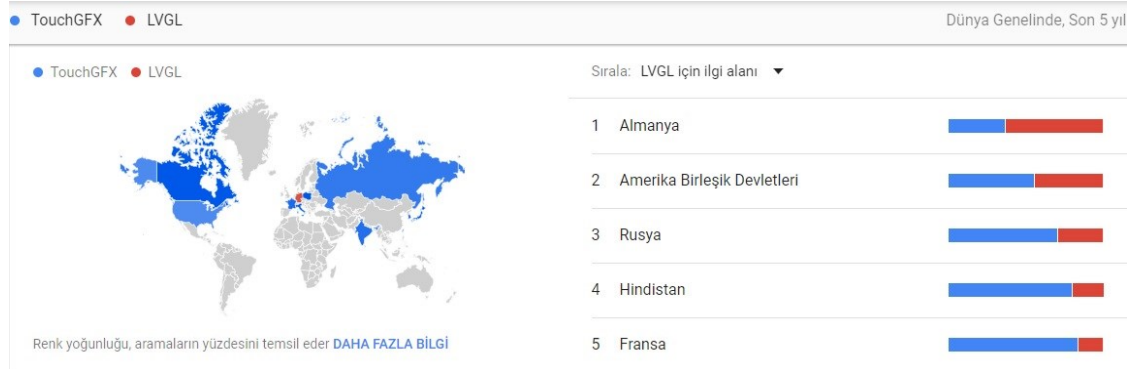
<i>Forumdaki Soru Sayısı</i>	<i>2.300 Adet [37]</i>	<i>2.627 Adet [28]</i>
<i>Aktif Kullanıcı Sayısı</i>	<i>1 Ayda 260 kullanıcı [37]</i>	<i>Bilinmiyor</i>
<b>Kaynak</b>	<i>Açık Kaynak Topluluğu</i>	<i>STMicroelectronics</i>
<b>Maliyet</b>	<i>Ücretsiz</i>	<i>Ücretsiz</i>

Google Trends verilerinin incelemesinde son 5 yıldaki LVGL ve TouchGFX arasındaki aramaların %65'ini TouchGFX oluşturmaktadır. Böylelikle son 5 yıl içerisinde TouchGFX'in daha yaygın olarak kullanıldığı tespit edilmiştir (Şekil 1). Karşılaşılan problemlerin çözümü ile alakalı olarak TouchGFX için kullanılan [33] forum sitesinde ve LVGL için kullanılan [34] forum sitesindeki göre %16 daha fazla etkinliğe rastlanmıştır (Tablo 1). Buna rağmen son 1 ayda açılan konu sayısında LVGL'nin önde olduğu (LVGL 118 konu, TouchGFX 103 konu) [34],[[touchgfxforum](#)] görülmektedir. Google arama verilerinde grafik incelendiğinde; %65 lik aranma oranının geçmişteki aranma sayısı üstünlüğüne bağlı olduğu görülmektedir. Günümüze yaklaştıkça LVGL ve TouchGFX'in aranma grafikleri birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir (LVGL %51 TouchGFX %49). LVGL geçmişe göre, günümüze yaklaştıkça TouchGFX'e göre benzer oranlarda kullanılmaya hatta daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. (Şekil 1).



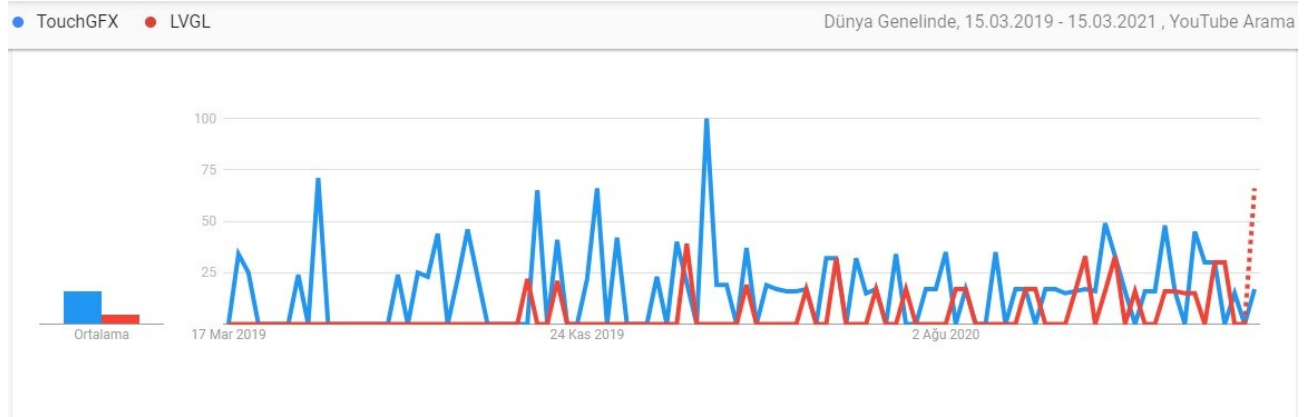
**Şekil 1.** TouchGFX ve LVGL 15 Mart 2021 itibari ile son 5 yıldaki google arama sayıları kıyaslaması (Tüm Dünya) [35]

Google trends verileri ülkeye göre incelendiğinde bu 2 GUI kitaplığının arandığı ülkeler arasında sadece Almanya'da LVGL aranma sayısı olarak TouchGFX'i geride bırakabilmiştir (LVGL %67 TouchGFX %33). Buna en yakın olarak ABD (Amerika Birleşik Devletleri)'yi görmekteyiz. Fakat ABD'de ufak bir fark olsa da TouchGFX'in üstünlüğü görülmektedir (LVGL %45 TouchGFX %55). Geri kalan ülkelerin tamamında TouchGFX daha fazla aranmıştır (Şekil 2).



**Şekil 2.** TouchGFX ve LVGL 15 Mart 2021 itibari ile son 5 yıldaki aranma sayıları ülkelere göre dağılımı [35]

Youtube arama sayıları kıyaslandığında (Şekil 3) geçtiğimiz son 3 yıldaki TouchGFX ve LVGL arasındaki aramaların %75'ini TouchGFX oluşturmaktadır. Günümüze yaklaştıkça bu oranda %60 olarak TouchGFX'in üstünlüğü görülmektedir. Bu aramaların son kullanıcı bazında Youtube'da aktif proje yapan veya yapmak için araştırma yapan insanlar olduğunu varsayabiliriz. Yapılan varsayım ile bilinirlik ve teknik destek gibi konulardaki verilere yardımcı ek veri olarak kullanılabilir.



**Şekil 3.** TouchGFX ve LVGL 15 Mart 2021 itibari ile son 3 yıldaki youtube arama sayıları [36]

TouchGFX kütüphanesinde yapılan güncelleştirmeler daha hızlı ve kolay bir şekilde uygulanabilmektedir. TouchGFX kütüphanesine gelen bir güncelleme önceden yazılmış bir koda aktif bir şekilde kendi kendine dönüşürken LVGL de ise dönüşmemekte ve migration guide'ların geliştirici tarafından uygulanmasını gerektirmektedir. Bu durum güncellemelerde büyük zorluklar yaşanmasına neden olmaktadır.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

TFT ekranlar teknolojinin ilerlemesi ile daha yaygın hale gelmiştir. TFT ekranların daha yaygın hale gelmesi ile GUI kullanımı artmıştır. Dokunmatik ekranlı GUI'ler her yerde karşımıza çıkmaktadır. GUI hazırlamanın en çok tercih edilen yöntemlerinden birisi de kütüphaneler ve derleyiciler kullanmaktır. En popüler gömülü donanımlara özel GUI kütüphanesi (LVGL ve TouchGFX) bu çalışmada detaylı olarak incelenmiştir.

Derlenen veriler ışığında minimum sistem gereksinimi, lisans durumu, kod üretim kabiliyeti, ekran bileşen desteği, performans, sunduğu arayüzler ve giriş seçenekleri, çizim kabiliyetleri, metin özellikleri, görüntü özellikleri, stiller, derleyici programları, popülerlik, teknik destek kriterleri her iki kitaplık açısından karşılaştırılmıştır. TouchGFX kullanıcı dostu arayüzü ve güncellemeleri eski kodlara uyarlaması ile dikkat çekmektedir. LVGL ise açık kaynak kodu ve bağımsız girişimciler tarafından desteklenmesi ve geliştiricilere hızlı prototip oluşturma veya ticari ürünler geliştirme için sade çözüm sunan MicroPython desteğiyle öne çıkmaktadır.

Her iki kütüphanede ücretsiz ve TFT ekranlarda sorunsuz çalışmaktadır. Her iki GUI kitaplığı yaygın olarak kullanılmaktadır fakat TouchGFX rakibine göre biraz daha fazla kullanılmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan diğer grafik arayüz kitaplıkları da dahil edilerek çözümlüğe, widget sayısına, saniyede kare sayısına vb bağlı olarak sistem gereksinimi ve performans kıyaslanması gelecek çalışmalarda yapılmasına ihtiyaç vardır.

#### 5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma AYGÜN Cerrahi Aletler A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Dumpa Prasad, P. Rahul Reddy, B. Sreelatha, Koya Jeevan Reddy, Sudharsan Jayabalan, Asisa Kumar, Panigrahy (2021) “Recent developments in code compression techniques for embedded systems” Materials Today: Proceedings DOI:10.1016/j.matpr.2021.02.643
- [2] P.D.S. Manoj, H. Yu (2013) “Cyber-physical management for heterogeneously integrated 3D thousand-core on-chip microprocessor” IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) (2013)
- [3] J. Lin, S. Zhu, Z. Yu, D. Xu, P.D.S. Manoj, H. Yu (2015) “A scalable and reconfigurable 2.5D integrated multicore processor on silicon interposer” IEEE Custom Integrated Circuits Conf. (2015)
- [4] Ming-Chih Chen, Jian-Yu Ciou, Guei-Sen Jhang, Yu-Shan Liang (2016) “LED image display system with mobile APP control” Computers and Electrical Engineering 52 (2016) 1-11
- [5] Yang Li and Yunliang Wang (2015) “Design of control system of Smart Home based on embedded Linux” International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy (ICISMME 2015)
- [6] Senka Krivić, Muhidin Hujdur, Aida Mrzić and Samim Konjicija (2012) “Design and Implementation of Fuzzy Controller on Embedded Computer for Water Level Control” MIPRO 2012, May 21-25,2012, Opatija, Croatia
- [7] Liu-Yang, Kun-Yue, Heming- Pang, Linying-Jiang (2010) “The Research of Qt Embedded and Embedded Linux Application in the Intelligent Monitoring System Control” 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control DOI: 10.1109/ICACC.2010.5487189
- [8] 2009 ile 2020 tarihleri arasında Google Play Store kullanılabilir uygulama sayısı. İnternet <https://www.statista.com/statistics/266210/number-of-availableapplications-in-the-google-play-store/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [9] 2015 ile 2020 yılları arasındaki App Store kullanılabilir uygulama sayısı. İnternet: <https://www.statista.com/statistics/779768/number-of-available-apps-in-the-apple-app-store-quarter/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [10] Andrew Hunt, David Thomas (1999) The Pragmatic Programmer Paperback – 24 Nov. 1999,
- [11] Le Yang, Yongsun Choi, Changjun Seo, Tongfeng Yang, MinSung Kim (2007) “Design of VY: A Mini Visual IDE for the Development of GUI in Embedded Devices” Fifth International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications DOI: 10.1109/SERA.2007.49
- [12] Da-peng Tan, Shu-ting Chen, Guan-jun Bao, Li-bin Zhang (2018) “An embedded lightweight GUI component library and ergonomics optimization method for industry process monitoring” Tan et al. / Front Inform Technol Electron Eng 2018 19(5):604-625 DOI: 10.1631/FITEE.1601660
- [13] Light and Versatile Graphics Library, internet: <https://lvgl.io/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [14] Ekaterina Kuzheleva (2021) “Designing UI for Embedded Devices: Four Factors to Remember” Designing UI for Embedded Devices: Four Factors to Remember
- [15] TouchGFX ürüne genel bir bakış, internet: <https://www.st.com/en/development-tools/touchgfxdesigner.html> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [16] Total Cross ,internet: <https://totalcross.com/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)

- [17] emWin - Gömülü Grafik Kitaplığı ,internet : <https://www.segger.com/products/user-interface/emwin/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [18] StemWin ürüne genel bir bakış, internet: <https://www.st.com/en/embedded-software/stemwin.html#overview> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [19] wxWidgets platformlar arası GUI kitaplığı, internet: <https://www.wxwidgets.org/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [20] MCUXpresso SDK Oluşturucu, internet: <https://mcuxpresso.nxp.com/en/welcome> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [21] Tara-Systems, GUI geliştirmenizi basitleştirir, internet: <https://www.tara-systems.de/components/embedded-wizard/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [22] Gömülü Ürünleriniz için  $\mu$ C / GUI, internet: <http://www.testech-elect.com/ucos/ucgui.htm> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [23] GUIslice: Ahududu PI ve Arduino için C'de Dokunmatik GUI, internet: <https://www.impulseadventure.com/elec/guislice-gui.html> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [24] GuiLite:Tüm platformlar için GUI kitaplığı, internet: <https://github.com/idea4good/GuiLite> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [25] Qt: Gömülü sistemler ve masaüstü için çapraz platform yazılım geliştirme, internet: <https://www.qt.io/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [26]  $\mu$ GFX: Ekranlar ve dokunmatik ekranlar için bir GUI kitaplığı, internet: <https://ugfx.io/> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [27] LVGL özellikleri, internet: <https://lvgl.io/features> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [28] TouchGFX özellikleri, internet: [https://www.st.com/content/st\\_com/en/stm32-graphic-user-interface.html](https://www.st.com/content/st_com/en/stm32-graphic-user-interface.html) (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [29] Yazılım lisansı nedir sorusuna bir cevap, internet: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Yaz%C4%B1m\\_lisans%C4%B1](https://tr.wikipedia.org/wiki/Yaz%C4%B1m_lisans%C4%B1) (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [30] Widget hakkında bilgi, internet: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Widget> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [31] Kullanıcı arayüzü nedir sorusuna bir cevap, internet: [https://tr.wikipedia.org/wiki/Kullan%C4%B1\\_aray%C3%BCz%C3%BC](https://tr.wikipedia.org/wiki/Kullan%C4%B1_aray%C3%BCz%C3%BC) (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [32] Açık kaynak nedir sorusuna bir cevap, internet: [https://tr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7%C4%B1k\\_kaynak](https://tr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A7%C4%B1k_kaynak) (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [33] TouchGFX Forumu, internet: <https://community.st.com/s/topic/0TO0X0000003iw6WAA/touchgfx> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [34] LVGL Forumu internet: [forum.lvgl.io](http://forum.lvgl.io) (Erişim Tarihi: 22.03.2021)
- [35] Google Trend 15 Mart 2021 itibari ile Google'da LVGL ve TouchGFX arasındaki aranma oranları, internet: <https://trends.google.com.tr/trends/explore?date=2016-03-15%202021-03-07&q=TouchGFX,LVGL> (Erişim Tarihi: 15.03.2021)

[36] Google Trend 15 Mart 2021 itibari ile Youtube’da LVGL ve TouchGFX arasındaki aranma oranları, internet: <https://trends.google.com.tr/trends/explore?date=2019-03-15%202021-03-15&gprop=youtube&q=TouchGFX,LVGL> (Erişim Tarihi: 15.03.2021)

[37] LVGL hakkında, internet: <https://forum.lvgl.io/about> (Erişim Tarihi: 22.03.2021)



## A Simulated Annealing Algorithm for the Multi Resource Generalized Assignment Problem with Eligibility Constraint

Kumsal ERTEN<sup>1</sup> Tuğba SARAÇ<sup>1,\*</sup> Feriştah ÖZÇELİK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Industrial Engineering, Eskişehir/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received:  
18/04/2021  
Revision:  
23/06/2021  
Accepted:  
24/06/2021

#### Highlights

- Bi-objective MRGAP with eligibility restrictions is considered
- The objective of minimizing the total number of agents has been discussed for the first time in the MRGAP literature
- A simulated annealing algorithm has been developed for considered problem.

#### Keywords

GAP  
Simulated annealing algorithm  
Load balancing

In this study, bi-objective multi-resource generalized assignment problem (MRGAP) with eligibility restrictions is considered and a simulated annealing algorithm is proposed for solving this problem.

**Purpose:** The MRGAP is an assignment problem in which each agent has more than one capacity-constrained resource. Although each agent cannot perform each job in real life, in the MRGAP literature it is generally assumed that each job can be assigned to each agent. In addition, working with as few agents as possible can create significant advantages, as each new agent creates audit tracking difficulties and additional costs. For this reason, in this study, the MRGAP problem, in which eligibility constraints are taken into account, has been addressed in a bi-objective manner. The objectives are to minimize the total load squares and the total number of agents. The objective of minimizing the total number of agents has been discussed for the first time in the MRGAP literature.

**Theory and Methods:** Considered objectives were scalarized by using the weighted sum method. A simulated annealing algorithm has been developed to solve large-scale problems.

**Results:** Randomly generated test problems were solved with GAMS/Dicopt and the proposed simulated annealing algorithm (TB) and the obtained results were compared.

Table A. Test results

problem	$\bar{z}_{GAMS}$	$\bar{z}_{TB}$	$n_{GAMS}$	$n_{TB}$	$\bar{t}_{GAMS}$	$\bar{t}_{TB}$
50-75-1	30,51	28,98	50	51	238	180
50-75-2	33,81	32,66	27	51	270	140
50-75-3	30,11	29,50	24	51	255	158
50-95-1	32,87	28,78	34	51	290	171
50-95-2	31,63	28,67	33	51	128	180
50-95-3	34,08	28,95	36	51	222	171
100-75-1	31,53	28,69	35	51	310	282
100-75-2	26,45	27,86	22	51	2446	287
100-75-3	-	33,04	0	51	7200	318
100-95-1	31,77	28,84	27	51	292	286
100-95-2	31,32	29,52	30	51	337	334
100-95-3	32,80	29,93	30	51	484	125
150-75-1	26,32	28,21	22	51	4315	300
150-75-2	27,78	28,68	20	51	353	158
150-75-3	-	31,30	0	51	7200	457
150-95-1	-	29,33	0	51	7200	682
150-95-2	31,83	27,94	29	51	2095	395
150-95-3	30,17	28,29	26	51	574	285
mean	30,87	29,40	24,72	51,00	1900,50	272,72

**Conclusion:** In 3 of the 18 problems, no feasible solution could be obtained with GAMS/Dicopt for any weight pair within the time limit. The TB algorithm has reached the same or more successful solutions than GAMS in 95% of the test problems. The TB algorithm was more successful than GAMS/Dicopt in terms of both the solution quality, the number of feasible solutions obtained, and the time.





## A Simulated Annealing Algorithm for the Multi Resource Generalized Assignment Problem with Eligibility Constraint

Kumsal ERTEN<sup>1</sup> Tuğba SARAÇ<sup>1,\*</sup> Feriştah ÖZÇELİK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir/Türkiye

### Abstract

The multi-resource generalized assignment problem (MRGAP) is an assignment problem in which each agent has more than one capacity-constrained resource. Although each agent cannot perform each job in real life, in the MRGAP literature it is generally assumed that each job can be assigned to each agent. In addition, working with as few agents as possible can create significant advantages, as each new agent creates audit tracking difficulties and additional costs. For this reason, in this study, the MRGAP problem, in which eligibility constraints are taken into account, has been addressed in a bi-objective manner. The objectives are to minimize the total load squares and the total number of agents. The objective of minimizing the total number of agents has been discussed for the first time in the MRGAP literature. These two objectives considered were scalarized by using the weighted sum method. A simulated annealing algorithm has been developed to solve large-scale problems. Randomly generated test problems were solved with the proposed methods and the obtained results were compared.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 18/04/2021  
Düzeltilme: 23/06/2021  
Kabul: 24/06/2021

### Keywords

GAP  
Simulated annealing  
algorithm  
Load balancing

### Anahtar Kelimeler

GAP  
Tavlama Benzetimi  
Yük Dengeleme

### Uygunluk Kısıtlı Çok Kaynaklı Genelleştirilmiş Atama Problemi İçin Bir Tavlama Benzetimi Algoritması

### Öz

Çok kaynaklı genelleştirilmiş atama problemi (MRGAP), her ajanın birden fazla kapasite kısıtlı kaynağının olduğu bir atama problemidir. Gerçek hayatta ajanların her işi gerçekleştirmediği durumlarla karşılaşılmasına rağmen, MRGAP literatüründe genellikle her işin her ajana atanabildiği varsayılmaktadır. Ayrıca, her yeni ajanın denetleme, izleme güçlüğü ve ek maliyetler yaratması nedeniyle, mümkün olduğunca az ajanla çalışmak ciddi avantajlar yaratabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, uygunluk kısıtlarının dikkate alındığı MRGAP problemi iki amaçlı olarak ele alınmıştır. Amaçlar, yük kareleri toplamının ve toplam ajan sayısının enküçüklenmesidir. Toplam ajan sayısının enküçüklenmesi amacı MRGAP literatürde ilk kez ele alınmıştır. Dikkate alınan iki amaç, ağırlıklı toplam yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir tavlama benzetimi (TB) algoritması geliştirilmiştir. Rassal olarak türetilen test problemleri, önerilen yöntemler ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Atama problemi, her ajana yalnızca bir işin atandığı ve amacın genellikle toplam maliyetin enküçüklenmesi olduğu temel problemlerden birisidir. Bir ajana birden fazla işin atanabildiği durumda problem, genelleştirilmiş atama problemi (GAP) ve bir ajanın birden çok kapasiteli kaynağının olduğu durum ise çok kaynaklı genelleştirilmiş atama problemi (MRGAP) olarak isimlendirilmektedir.

GAP literatürü, ele alınan amaç fonksiyonları yönüyle incelendiğinde önemli bir kısmının problemin klasik amaç fonksiyonu olan toplam yükü/maliyeti/kazancı ([1]-[19]) ele aldığı görülmektedir. Az sayıda çalışma çok amaçlı yapıdadır ([20]-[23]). GAP literatürü çözüm yöntemleri açısından incelendiğinde, çözüm yöntemlerinin kesin çözüm yöntemleri ([12], [13], [18]-[20], [24], [25]) ve sezgisel/metasezgisel yöntemler ([1], [3]-[6], [8]-[10], [15]-[17], [19], [21]-[23], [25]-[29]) olarak gruplanabileceği görülmektedir.

Metasezgisel yöntemlerden tavlama benzetimi algoritması, GAP problemlerine başarıyla uygulanmıştır ([30], [31], [32]).

GAP ile ilgili literatürde pek çok çalışma mevcut olmasına rağmen MRGAP ile ilgili az sayıda çalışma vardır. Shtub ve Kogan [33], talebin zamanla değiştiği ve kapasitelerin dinamik olduğu dinamik MRGAP'ı ele almıştır. LeBlanc vd. [30], amaç fonksiyonunda hem hazırlık sürelerini hem de hazırlık maliyetlerini birlikte dikkate alan hazırlık süreli MRGAP'ı ele almıştır. Yagiura vd. [34] ve Mitrović-Minić ve Punnen [35], klasik MRGAP problemini ele almışlardır. Özçelik ve Saraç [36], farklı yeteneklere ve önceliklere sahip ajanların ve aynı ajana atanması gereken işlerin olduğu MRGAP problemi için 0-1 karma tamsayılı bir hedef programlama modeli önermişlerdir. Janak vd. [37], hem ajan yüklerini dengeleyen hem de tercihleri dikkate alan bir MRGAP modeli geliştirmiştir. Karsu ve Azizoglu [38], en çok yüke sahip ajanın yükünün enküçüklenmesi darboğaz MRGAP problemini ele almıştır. Özçelik ve Saraç [39] uygunluk kısıtları olan darboğaz MRGAP problemi için bir matematiksel model önermişlerdir. Karsu ve Azizoglu [40], toplam yükün enküçüklenmesi ve en çok yüke sahip ajanın yükünün enküçüklenmesi olmak üzere iki amaçlı MRGAP'ı ele almıştır. MRGAP literatürü çözüm yöntemleri açısından incelendiğinde, çözüm yöntemlerinin kesin çözüm yöntemleri ([30], [36]-[39]), sezgisel ([33]-[35], [40]) ve metasezgisel yöntemler ([40]) olarak gruplanabileceği görülmektedir.

Bu çalışmada uygunluk kısıtlı MRGAP iki amaçlı olarak ele alınmıştır. Amaçlardan birisi ajan yüklerinin kareleri toplamının enküçüklenmesi, diğeri işlerin atandığı toplam ajan sayısının enküçüklenmesidir. Bu çalışmanın motivasyonu, bir beyaz eşya üreticisinin yarı mamullerini tedarik edeceği yan sanayilerin seçimi ve seçilen tedarikçilerin hangi yarı mamulleri üreteceğinin makina kapasiteleri ve yetenekleri (uygunluk) dikkate alınarak belirlenmesi problemidir. Burada iş, parça; ajan, yan sanayi ve dönem, ana sanayinin planlama periyodu olarak düşünüldüğünde ele alınan problem MRGAP'tır.

Literatürde MRGAP üzerine yapılan çalışmalarda genellikle ajan sayısının bilindiği ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Oysa en iyi ajan sayısının belirlenmesi de önemli bir karar problemidir. Bu çalışmada ajan sayısının ve ajan yüklerinin kareleri toplamının enküçüklenmesi amaçları birlikte ilk kez ele alınmıştır. Ayrıca MRGAP literatüründe ajan yeteneklerine bağlı olarak her işin her ajana atanmadığı durumu ele alan başka bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ele alınan problem tanımlanmış ve önerilen matematiksel model sunulmuştur. Geliştirilen tavlama benzetimi algoritması üçüncü bölümde açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlar, son bölümde ise sonuç ve öneriler verilmiştir.

## 2. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL (PROBLEM DEFINITION AND MATHEMATICAL MODEL)

Bu çalışmada  $n$  işin  $m$  ajana atanması durumunu inceleyen MRGAP ele alınmıştır. Problemden  $s$  dönem vardır. Ajanların her bir dönem için kapasiteleri sınırlıdır ve işlem süreleri, işin atandığı ajana göre değişmektedir. Bir işin tek bir ajana atanması gerekmektedir. Ele alınan problem, her işin her ajana atanmaması anlamına gelen uygunluk kısıtlarına sahiptir ve iki amaçlıdır. Amaçlardan birisi toplam yükün tüm ajanlara dengeli bir şekilde dağıtılmasını gerçekleştirebilmek için ajan yüklerinin kareleri toplamının enküçüklenmesi iken, diğeri amaç işlerin atandığı toplam ajan sayısının enküçüklenmesidir. Önerilen matematiksel model (M-MRGAP) ve matematiksel modelde kullanılan indisler, parametreler, karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

*İndisler:*

$i$ : ajan indisi  $i \in \{1, 2, \dots, m\}$

$j$ : iş indisi  $j \in \{1, 2, \dots, n\}$

$t$ : dönem indisi  $t \in \{1, 2, \dots, s\}$

*Parametreler:*

$p_{ijt}$  :  $j$  işinin  $t$  dönemi için  $i$  ajanındaki işlem süresi

$b_{it}$  :  $i$  ajanının  $t$  dönemi için kapasitesi

$h_{ij}$  :  $j$  işi  $i$  ajanına atanabiliyorsa 1, diğer durumda 0

*Karar Değişkenleri:*

$x_{ij}$  :  $j$  işi  $i$  ajanına atanmışsa 1, diğer durumda 0

$y_i$  :  $i$  ajanına herhangi bir iş atanmışsa 1, diğer durumda 0

(M-MRGAP):

*Kısıtlar:*

$$\sum_{j=1}^n p_{ijt} x_{ij} \leq b_{it} y_i, \quad \forall_i \in \{1, \dots, m\}, \forall_t \in \{1, \dots, s\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad \forall_j \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq h_{ij}, \quad \forall_j \in \{1, \dots, n\} \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall_i \in \{1, \dots, m\}, \forall_j \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall_i \in \{1, \dots, m\} \quad (5)$$

*Amaç Fonksiyonları:*

$$\text{enk } f_1 = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^s p_{ijt} x_{ij} \right)^2 \quad (6)$$

$$\text{enk } f_2 = \sum_{i=1}^m y_i \quad (7)$$

Problem iki amaçlıdır. Amaçlardan ilki (6) ajan yüklerinin kareleri toplamının enküçüklenmesi iken, diğer amaç (7) işlerin atandığı toplam ajan sayısını enküçükmektir. Kısıt (1) ajanların kapasite kısıtıdır, kısıt (2) her işin bir ajana atanmasını garantilemektedir. Kısıt (3) uygunluk kısıtları olup, işlerin atanabilecekleri ajanlara atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4) ve Kısıt (5) işaret kısıtlarıdır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, birden fazla amaç fonksiyonunu ele alan çalışmaların genellikle bu amaçları, tümünü temsil edebilecek tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürerek çözdüğü görülmektedir. Literatürde ağırlıklı toplam, epsilon kısıt, uzlaşık programlama yöntemleri, konik skalerleştirme gibi birçok amaç birleştirme yöntemi mevcuttur [42].

Bu çalışmada amaçların birleştirilmesinde, ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, her bir amaç fonksiyonu değeri ( $f_i(x)$ ) belirlenen bir ağırlık ( $w_i$ ) değeri ile çarpılıp toplanır. Bu çalışmada ajan yüklerinin kareleri toplamının enküçüklenmesi amacının ( $f_1$ ) ağırlığı,  $w_1$  ile gösterilirken; toplam ajan sayısının enküçüklenmesi amacının ( $f_2$ ) ağırlığı  $w_2$  ile gösterilmiştir. Amaç fonksiyonları nadir değerleri kullanılarak normalleştirilmiştir. Her amaç fonksiyonunun etkin çözümler içerisinde alabileceği en kötü değerlerden oluşan nadir nokta ( $f_1^N, f_2^N$ ) biçiminde gösterilir. Nadir noktaların hesaplanması ve çok amaçlı programlama ile ilgili ayrıntılı bilgilere Ehrgott [42]'den ulaşılabilir. Birleştirilmiş amaç fonksiyonu (8) aşağıda verilmiştir.

*Birleştirilmiş Amaç Fonksiyonu:*

$$\text{enk } z = w_1 \frac{\sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^s p_{ijt} x_{ij} \right)^2}{f_1^N} + w_2 \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{f_2^N} \quad (8)$$

### 3. ÖNERİLEN TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI (PROPOSED SIMULATED ANNEALING ALGORITHM)

GAP NP-zor bir yapıya sahiptir [41]. Dolayısıyla GAP'ın genelleştirilmiş versiyonu olan MRGAP da NP-zor yapıya sahiptir. Bu nedenle büyük boyutlu problemlerin çözülebilmesi için bir metasezgisel algoritmaya

ihtiyaç duyulmuştur. GAP'daki başarılı uygulamaları ([30], [31], [32]) dikkate alınarak bu çalışmada büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir.

Geliştirilen TB algoritmasında kullanılan başlangıç ve komşu çözüm türetme mekanizmaları, soğutma planı ve durdurma kriteri aşağıda açıklanmıştır:

#### *Başlangıç Çözüm:*

Başlangıç çözüm, M-MRGAP modelinin tüm kısıtlarını sağlayacak şekilde rassal olarak türetilmiştir. Problem iki amaçlı olduğu için her bir amaca hizmet edecek şekilde iki farklı başlangıç çözüm türetme mekanizması geliştirilmiştir. Türetilen iki başlangıç çözümden hangisinin kullanılacağına, birleştirilmiş amaç fonksiyonu değerlerine göre karar verilmektedir. Bu sayede hangi amaca daha büyük ağırlık verildiyse, aramanın çözüm uzayının ilgili amaç fonksiyonuna daha iyi değerler verebilecek bir noktadan başlanması sağlanmaktadır.

Birinci başlangıç çözüm türetme algoritması ( $BC_1$ ), ilk amaca (ajan yüklerinin kareleri toplamı;  $f_1$ ) yöneliktir. Algoritma adımlarına aşağıda yer verilmektedir.

#### *( $BC_1$ ):*

*Adım 1.* Atanmamış işler arasından rassal birini seç. Seçilen iş  $i_0$  olsun.

*Adım 2.* Rassal bir ajan seç. Seçilen ajan  $j_0$  olsun.

*Adım 3.* Seçilen iş ( $i_0$ ) seçilen ajana ( $j_0$ ) atanabiliyorsa (uygunluk ve kapasite kısıtları sağlanıyorsa) *Adım 4*'e git, diğer durumda *Adım 2*'ye git.

*Adım 4.* Atamayı gerçekleştir. Ajanların kalan kapasitelerini güncelle.

*Adım 5.* Tüm işler atanmadıysa *Adım 1*'e dön. Tüm işler atandığında algoritmayı sonlandır, amaç fonksiyonunu ( $z_1$ ) hesapla.

İkinci başlangıç çözüm türetme algoritması ( $BC_2$ ), ikinci amaca (toplam ajan sayısı;  $f_2$ ) yöneliktir. Algoritma adımlarına aşağıda yer verilmektedir.

#### *( $BC_2$ ):*

*Adım 1.* Rassal bir ajan seç. Seçilen ajan  $j_0$  olsun.

*Adım 2.* Atanmamış işler arasından birisini rassal olarak seç. Seçilen iş  $i_0$  olsun.

*Adım 3.* Seçilen iş ( $i_0$ ) seçilen ajana ( $j_0$ ) atanabiliyorsa (uygunluk ve kapasite kısıtları sağlanıyorsa) *Adım 4*'e git, diğer durumda *Adım 2*'ye git. Seçilen ajana ( $j_0$ ) atanabilecek iş yoksa *Adım 1*'e git.

*Adım 4.* Atamayı gerçekleştir. Ajanların kalan kapasitelerini güncelle.  $j_0$  ajanının kapasitesi dolmadıysa *Adım 2*'ye git.

*Adım 5.* Tüm işler atanmadıysa *Adım 1*'e dön. Tüm işler atandığında algoritmayı sonlandır, amaç fonksiyonunu ( $z_2$ ) hesapla.

Her iki başlangıç çözümün birleştirilmiş amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılır ve başarılı olan çözüm başlangıç çözüm olarak kabul edilir.

#### *Komşu Çözüm Türetme Mekanizması:*

Bu çalışmada iki farklı komşu türetme mekanizması kullanılmıştır. İlkinde, rassal seçilen bir iş, rassal olarak belirlenen başka bir ajana atanmaktadır. İkincisinde ise, farklı ajanlara atanmış iki iş karşılıklı yer değiştirmektedir. Her iki mekanizmada da uygunluk korunmaktadır. Türetilen çözümlerden en başarılısı, komşu çözüm olarak alınmaktadır.

#### *Soğutma Planı:*

TB'de soğutma işlemi algoritmanın performansını önemli derecede etkileyen parametrelerden birisidir. Bu parametre belirlenen sıcaklık düşürme prensibine göre algoritmanın sıcaklık değerini günceller. Literatürde değişik soğutma stratejilerinin kullanımlarına rastlamak mümkündür. Bu çalışmada (9) numaralı denklemde verilen geometrik soğutma planı kullanılmıştır.

$$T_k = T_{k-1} \times \alpha \quad (9)$$

Burada,  $T_k$ ,  $k$ 'nci iterasyondaki sıcaklık değerini göstermektedir. Soğutma oranı ( $\alpha$ ) için ise genellikle 0-1 arasında 1'e yakın bir değer kullanılmaktadır [43].

Bu çalışmada, literatürde önerilen parametre aralıkları [43] kullanılarak yapılan ön denemeler sonucunda başlangıç sıcaklığı 100, soğutma oranı 0,95 ve her bir sıcaklıkta türetilen çözüm sayısı ise 50 ve 100 iş problemlerinde 3, 150 iş problemlerinde 5 olarak alınmıştır.

#### Durdurma Koşulu:

Tavlama benzetimi algoritmasında durdurma koşulu olarak, önceden belirlenen en büyük iterasyon sayısına ulaşılması, belirlenen en düşük sıcaklığa ulaşılması ve istenen kriterleri sağlayan çözüme ulaşılması gibi yaklaşımlar kullanılabilir. Bu çalışmada, durdurma koşulu olarak son sıcaklığa ulaşılması kriteri seçilmiştir [43]. Son sıcaklık değeri 5 olarak alınmıştır.

Geliştirilen TB algoritmasının adımları aşağıda verilmiştir:

**Adım 1:** ( $BÇ_1$ ) ve ( $BÇ_2$ ) algoritmalarını kullanarak iki aday başlangıç çözüm türet. Her iki başlangıç çözümün birleştirilmiş amaç fonksiyonu değerlerini karşılaştır ve başarılı olan çözümü başlangıç çözüm ( $S_0$ ) olarak ata. En iyi çözüm ( $S_{eni}$ ), mevcut çözüm ( $S_m$ ) ve komşu çözüme ( $S_k$ ) başlangıç çözümü ata ( $S_{eni} = S_0$ ,  $S_m = S_0$ ,  $S_k = S_0$ ). Başlangıç sıcaklığı  $T$ , her bir sıcaklıkta türetilen komşu çözüm sayısı ( $N$ ) ve soğutma oranını ( $\alpha$ ) belirle.

**Adım 2:** Komşu çözüm sayacı oluştur,  $n = 1$

**Adım 3:**  $S_m$ ' den komşu çözüm  $S_k$  üret ve  $n = n+1$  yap.

Komşu çözüm ve mevcut çözümün amaç fonksiyonlarının farkını ( $\Delta$ ) bul:

$\Delta = f(S_k) - f(S_m)$ . Eğer  $\Delta \leq 0$  ise  $S_m = S_k$ , aksi halde (0,1) aralığında  $u$  rassal sayı türet.

Eğer  $u < e^{(-\Delta/T)}$  ise  $S_m = S_k$  yap.  $S_m < S_{eni}$  ise  $S_{eni} = S_m$

**Adım 4:**  $n < N$  ise **Adım 3'** e git.  $n = N$  ise denklem (9)'u kullanarak sıcaklığı güncelle ve **Adım 2'** ye git.

**Adım 5:** Son sıcaklığa ulaşınca kadar **Adım 2-4'** ü tekrarla.

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR (COMPUTATIONAL RESULTS)

Önerilen yöntemlerin performansları rassal olarak türetilen problemler kullanılarak test edilmiştir. Matematiksel model GAMS 24.5 ile kodlanmış ve Dicopt çözücüsüyle çözülmüştür. Önerilen TB algoritması C# dilinde kodlanmış ve tüm test problemleri 8 GB RAM'e sahip çift çekirdekli (Intel Core i7 2.27 GHz) bir bilgisayarda çözülmüştür. Test problemlerinin çözüm süresi 7200 saniye ile sınırlandırılmıştır.

Bu bölümün alt başlıklarında sırasıyla, örnek problem, türetilen test problemlerinin özellikleri ve bu problemlerin önerilen yöntemlerle çözümü ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

### 4.1. Örnek Problem (Sample Problem)

3 ajan, 5 iş ve 2 dönemin olduğu küçük boyutlu bir örnek problem türetilmiştir. Problemin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. İkinci iş ajan 2 ve 3'e, beşinci iş ise ajan 3'e atanmamaktadır.

**Tablo 1.** Örnek problemin parametreleri

Ajan/İş	$p_{ij1}$						$p_{ij2}$					
	1	2	3	4	5	$b_{i1}$	1	2	3	4	5	$b_{i2}$
1	16,28	7,00	7,90	24,61	15,46	58	14,00	8,02	6,24	20,55	14,84	24
2	9,99	-	10,40	10,58	8,11	76	8,44	-	12,48	9,63	7,02	25
3	6,69	-	7,59	11,05	-	55	5,75	-	8,05	13,54	-	46

Örnek problemin nadir noktası  $f^N=(4828,03; 3)$  olarak elde edilmiştir. Ağırlıklar ( $w_1, w_2$ ) [0-50] arasında tamsayı değer alacak ve  $w_1 + w_2 = 50$  olacak şekilde kademeli değiştirilerek 51 farklı ağırlık çifti elde edilmiştir. Örnek problem, her bir ağırlık çifti için hem GAMS/Dicopt hem de TB algoritması ile çözülmüştür. Problem GAMS/Dicopt ile 66 saniyede çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'den de görülebileceği gibi  $w_1$ 'in 0 ile 11 arasında  $w_2$ 'nin ise 50 ve 39 arasında değer aldığı 12 ağırlık çifti için  $(f_1, f_2)=(4828,03; 2)$ , diğer 39 ağırlık çifti için ise  $(f_1, f_2)=(2253,97; 3)$  olarak sadece iki farklı çözüm elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Örnek Problem için GAMS/Dicopt ile elde edilen sonuçlar

$w_1$	$w_2$	$f_1$	$f_2$
0-11	50-39	4828,03	2
12-50	38-0	2253,97	3

Örnek olarak  $w_1=46$   $w_2=4$  için elde edilen çözümde,  $x_{12}, x_{13}, x_{24}, x_{25}, x_{31}$  karar değişkenleri 1 değerini almıştır. Her 3 ajana da iş atandığından  $y_1, y_2$  ve  $y_3 = 1$  olmaktadır. Atama sonrası birinci amaç için,  $((12,44)^2 + (20,21 + 15,13)^2 + (15,02 + 14,14)^2)/4828,03 = 0,467$ , ikinci amaç için,  $3/3=1$  değerleri elde edilmiş olup, birleştirilmiş amaç fonksiyonu ise  $z=46*0,467+4*1=25,48$  olarak hesaplanmıştır.

Örnek problem, TB algoritması ile 20 saniyede çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 3’de verilmiştir. Tablodan da görülebileceği gibi TB algoritması ile de aynı iki çözüme ulaşılmıştır.

**Tablo 3.** Örnek Problem için TB algoritması ile elde edilen sonuçlar

$w_1$	$w_2$	$f_1$	$f_2$
0-19	50-31	4828,03	2
20-50	30-0	2253,97	3

#### 4.2. Test Problemlerinin Türetilmesi (Test Problem Generation)

Test problemleri, Karsu ve Azizoğlu’nun [38] çalışmalarında kullandıkları yönteme benzer şekilde adımları aşağıda verilen algoritma yardımıyla türetilmiştir.

*Adım 0.*  $p_{ij1} \sim U [25, 35]$  değerlerini türet.

*Adım 1.*  $b_{i1} = c \sum_{j \in J} p_{ij1} / m$  değerini hesapla.

*Adım 2.*  $p_{ijt} = 3p_{ij1}/4 + \gamma_{ijt}p_{ij1}/2, \quad \forall t \geq 2,$

*Adım 3.*  $b_{it} = c \sum_{j \in J} p_{ijt} / m$

Bu algoritmanın ilk iki adımında birinci döneme ait, son iki adımında ise ikinci ve sonraki dönemlere ait işlem süreleri ( $p_{ijt}$ ) ve kapasite değerlerinin ( $b_{it}$ ) nasıl türetildiği verilmiştir. Burada  $c$  önceden tanımlanan bir sabit değer,  $m$  ajan sayısı ve  $\gamma_{ijt} [0,1]$  arasında rassal sayıdır. Bu çalışmada  $n$  10,  $m$  50, 100 ve 150,  $s$  3 ve  $c$  katsayısının değeri 1,2 olarak alınmıştır. Uygunluk kısıtları ( $h$ ) açısından işlerin ajanların %95’ine ve %75’ine atanabildiği iki durum ele alınmıştır. Aynı  $m$  ve  $h$  değerlerine sahip her bir problem tipinden 3’er örnek türetilmiştir.

Problemler, iş-uygunluk-kullanılan veri seti örnek numarasından oluşan bir yapı kullanılarak isimlendirilmiştir. Örneğin; 50 iş, uygunluk oranı %75 olan problemin 2. örneği 50-75-2 olarak isimlendirilmiştir. Toplamda 18 adet test problemi türetilmiştir.

#### 5.3. Test Sonuçları (Test results)

Türetilen test problemleri önerilen her iki çözüm yaklaşımı ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4-9’da verilmiştir. Tabloların ilk iki sütununda birinci ve ikinci amaçların ağırlıkları, diğer sütunlarda sırasıyla ilgili problemin örnekleri için GAMS/Dicopt ( $z_{GAMS}$ ) ve TB algoritması ( $z_{TB}$ ) ile elde edilen birleştirilmiş amaç fonksiyonu değerleri verilmiştir. En başarılı değerler, koyu ile işaretlenmiştir.

Çözülen 18 problemin üçünde (100-75-3, 150-75-3, 150-95-1) GAMS ile hiçbir ağırlık çifti için 7200 saniye içinde uygun çözüm bulunamamıştır. Test problemlerinin tümü dikkate alındığında GAMS 50 iş problemlerinin %33’ünde 100 iş problemlerinin %53’ünde ve 150 iş problemlerinin %68’inde süre limiti içinde uygun çözüm elde edememiştir. Tavlama benzetimi ile test problemlerinin %95’inde GAMS ile aynı ya da GAMS’ten daha başarılı çözümler elde edilmiştir.

**Tablo 4.** 50-75 Problemleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

$w_1$	$w_2$	50-75-1		50-75-2		50-75-3	
		$z_{GAMS}$	$z_{TB}$	$z_{GAMS}$	$z_{TB}$	$z_{GAMS}$	$z_{TB}$
0	50	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>30,00</b>	<b>30,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>
1	49	<b>25,50</b>	<b>25,50</b>	-	<b>30,65</b>	-	<b>25,76</b>
2	48	<b>26,00</b>	<b>26,00</b>	-	<b>31,29</b>	-	<b>26,52</b>
3	47	<b>26,50</b>	<b>26,50</b>	-	<b>31,94</b>	-	<b>27,29</b>
4	46	<b>27,00</b>	<b>27,00</b>	-	<b>32,58</b>	-	<b>28,05</b>
5	45	<b>27,50</b>	<b>27,50</b>	-	<b>33,23</b>	-	<b>28,81</b>
6	44	<b>28,00</b>	<b>28,00</b>	-	<b>32,40</b>	-	<b>29,57</b>
7	43	<b>28,50</b>	<b>28,50</b>	-	<b>32,80</b>	-	<b>29,61</b>
8	42	<b>29,00</b>	<b>29,00</b>	-	<b>33,20</b>	-	<b>30,27</b>
9	41	<b>29,50</b>	<b>29,50</b>	-	<b>34,34</b>	-	<b>30,93</b>
10	40	<b>30,00</b>	<b>30,00</b>	-	<b>34,00</b>	-	<b>31,59</b>
11	39	<b>30,50</b>	<b>30,50</b>	-	<b>34,40</b>	-	<b>32,25</b>
12	38	<b>31,00</b>	<b>31,00</b>	-	<b>34,80</b>	-	<b>32,91</b>
13	37	<b>31,50</b>	<b>31,50</b>	-	<b>35,61</b>	-	<b>33,56</b>
14	36	<b>32,00</b>	<b>32,00</b>	-	<b>35,60</b>	-	<b>34,22</b>
15	35	<b>32,50</b>	<b>32,50</b>	-	<b>36,00</b>	-	<b>34,88</b>
16	34	<b>33,00</b>	<b>33,00</b>	-	<b>36,40</b>	-	<b>35,54</b>
17	33	<b>33,50</b>	<b>33,50</b>	-	<b>36,74</b>	-	<b>34,86</b>
18	32	<b>34,00</b>	<b>34,00</b>	-	<b>37,20</b>	-	<b>33,25</b>
19	31	<b>34,50</b>	<b>34,50</b>	-	<b>37,60</b>	-	<b>33,10</b>
20	30	<b>35,00</b>	<b>35,00</b>	-	<b>38,00</b>	-	<b>33,57</b>
21	29	<b>35,50</b>	<b>35,50</b>	-	<b>38,40</b>	-	<b>33,71</b>
22	28	36,00	<b>34,70</b>	-	<b>38,80</b>	-	<b>34,22</b>
23	27	36,50	<b>34,42</b>	-	<b>37,74</b>	-	<b>33,85</b>
24	26	37,00	<b>34,40</b>	-	<b>37,62</b>	-	<b>35,07</b>
25	25	35,90	<b>34,90</b>	40,71	<b>37,28</b>	-	<b>34,82</b>
26	24	-	<b>35,11</b>	41,13	<b>37,13</b>	40,32	<b>34,58</b>
27	23	36,37	<b>33,04</b>	41,56	<b>36,31</b>	-	<b>33,23</b>
28	22	36,60	<b>33,08</b>	41,99	<b>35,61</b>	41,50	<b>33,53</b>
29	21	36,84	<b>33,64</b>	42,42	<b>36,76</b>	-	<b>32,86</b>
30	20	37,03	<b>32,13</b>	42,85	<b>35,04</b>	37,05	<b>32,96</b>
31	19	37,27	<b>31,64</b>	43,28	<b>34,00</b>	37,29	<b>31,49</b>
32	18	37,50	<b>30,68</b>	43,60	<b>34,13</b>	37,53	<b>31,13</b>
33	17	37,88	<b>30,26</b>	44,02	<b>32,72</b>	37,12	<b>30,45</b>
34	16	36,03	<b>29,73</b>	38,29	<b>32,66</b>	37,22	<b>29,87</b>
35	15	36,21	<b>28,66</b>	38,38	<b>31,73</b>	33,80	<b>28,60</b>
36	14	33,46	<b>28,37</b>	33,82	<b>32,00</b>	33,76	<b>28,73</b>
37	13	32,64	<b>27,53</b>	33,65	<b>31,16</b>	33,73	<b>28,02</b>
38	12	30,30	<b>27,62</b>	33,86	<b>29,88</b>	33,69	<b>29,16</b>
39	11	30,04	<b>26,28</b>	31,01	<b>29,87</b>	28,23	<b>26,58</b>
40	10	28,98	<b>26,26</b>	30,65	<b>29,23</b>	30,51	<b>26,76</b>
41	9	28,29	<b>25,80</b>	30,29	<b>28,75</b>	28,86	<b>25,80</b>
42	8	28,41	<b>25,97</b>	29,94	<b>28,43</b>	28,59	<b>26,42</b>
43	7	25,25	<b>24,16</b>	<b>27,03</b>	<b>27,03</b>	28,32	<b>24,04</b>
44	6	24,79	<b>23,97</b>	<b>26,50</b>	26,51	24,78	<b>23,95</b>
45	5	21,67	<b>21,62</b>	<b>25,96</b>	26,03	24,32	<b>21,99</b>
46	4	21,04	<b>21,03</b>	25,43	<b>25,42</b>	<b>21,45</b>	21,63
47	3	20,41	<b>20,40</b>	<b>24,89</b>	25,21	<b>20,82</b>	<b>20,82</b>
48	2	19,78	<b>19,72</b>	<b>24,36</b>	<b>24,36</b>	20,20	<b>20,18</b>
49	1	19,15	<b>19,03</b>	<b>23,82</b>	<b>23,82</b>	19,58	<b>19,55</b>
50	0	18,63	<b>18,46</b>	23,36	<b>23,33</b>	<b>18,93</b>	18,95

**Tablo 5.** 50-95 Problemleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

$w_1$	$w_2$	50-95-1		50-95-2		50-95-3	
		$Z_{GAMS}$	$Z_{TB}$	$Z_{GAMS}$	$Z_{TB}$	$Z_{GAMS}$	$Z_{TB}$
0	50	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>
1	49	-	<b>25,50</b>	-	<b>25,60</b>	-	<b>25,57</b>
2	48	-	<b>26,00</b>	-	<b>26,19</b>	-	<b>26,13</b>
3	47	-	<b>26,50</b>	-	<b>26,79</b>	-	<b>26,70</b>
4	46	-	<b>27,00</b>	-	<b>27,39</b>	-	<b>27,26</b>
5	45	-	<b>27,50</b>	-	<b>27,98</b>	-	<b>27,83</b>
6	44	-	<b>28,00</b>	-	<b>28,58</b>	-	<b>28,40</b>
7	43	-	<b>28,50</b>	-	<b>29,18</b>	-	<b>28,96</b>
8	42	-	<b>29,00</b>	-	<b>29,77</b>	-	<b>29,53</b>
9	41	-	<b>29,50</b>	-	<b>30,37</b>	-	<b>29,27</b>
10	40	-	<b>30,00</b>	-	<b>30,00</b>	-	<b>29,74</b>
11	39	-	<b>30,50</b>	-	<b>30,47</b>	-	<b>30,22</b>
12	38	-	<b>31,00</b>	-	<b>31,00</b>	-	<b>30,69</b>
13	37	-	<b>31,50</b>	-	<b>31,50</b>	-	<b>31,17</b>
14	36	-	<b>32,00</b>	-	<b>32,00</b>	-	<b>31,64</b>
15	35	-	<b>32,50</b>	-	<b>32,21</b>	-	<b>32,11</b>
16	34	-	<b>33,00</b>	-	<b>32,94</b>	35,56	<b>32,59</b>
17	33	33,83	<b>33,45</b>	-	<b>33,45</b>	36,22	<b>32,20</b>
18	32	34,35	<b>33,62</b>	-	<b>33,49</b>	36,88	<b>32,25</b>
19	31	34,87	<b>33,62</b>	35,83	<b>33,64</b>	37,54	<b>33,97</b>
20	30	-	<b>33,74</b>	36,40	<b>34,26</b>	36,92	<b>33,18</b>
21	29	35,91	<b>33,97</b>	36,97	<b>34,22</b>	38,86	<b>34,20</b>
22	28	36,43	<b>33,82</b>	37,54	<b>34,79</b>	38,09	<b>34,48</b>
23	27	36,95	<b>34,37</b>	38,11	<b>34,73</b>	38,71	<b>34,23</b>
24	26	37,37	<b>34,94</b>	38,68	<b>34,46</b>	39,31	<b>33,94</b>
25	25	37,52	<b>35,17</b>	37,50	<b>34,41</b>	39,90	<b>36,41</b>
26	24	38,02	<b>34,61</b>	39,82	<b>34,03</b>	40,50	<b>34,33</b>
27	23	38,53	<b>34,36</b>	38,50	<b>33,39</b>	41,10	<b>34,00</b>
28	22	38,72	<b>32,96</b>	39,00	<b>33,01</b>	41,69	<b>33,30</b>
29	21	39,53	<b>32,29</b>	39,50	<b>32,99</b>	42,29	<b>32,72</b>
30	20	40,03	<b>32,85</b>	35,55	<b>31,99</b>	42,88	<b>32,19</b>
31	19	40,50	<b>31,03</b>	35,74	<b>30,77</b>	40,80	<b>32,36</b>
32	18	40,68	<b>30,49</b>	35,92	<b>30,51</b>	37,11	<b>31,12</b>
33	17	41,11	<b>30,00</b>	36,11	<b>30,12</b>	37,33	<b>30,67</b>
34	16	42,00	<b>29,10</b>	36,29	<b>29,53</b>	37,55	<b>29,92</b>
35	15	42,50	<b>28,55</b>	36,48	<b>28,37</b>	38,24	<b>29,64</b>
36	14	35,56	<b>28,46</b>	36,66	<b>27,58</b>	38,48	<b>29,44</b>
37	13	35,71	<b>27,24</b>	31,89	<b>26,93</b>	38,71	<b>28,35</b>
38	12	33,84	<b>27,30</b>	31,80	<b>26,42</b>	38,95	<b>27,04</b>
39	11	32,25	<b>26,06</b>	31,31	<b>25,53</b>	35,85	<b>26,96</b>
40	10	32,18	<b>25,27</b>	31,21	<b>24,88</b>	35,42	<b>25,66</b>
41	9	32,11	<b>24,74</b>	27,57	<b>24,22</b>	32,57	<b>25,29</b>
42	8	29,13	<b>24,32</b>	26,82	<b>23,51</b>	27,64	<b>24,63</b>
43	7	28,87	<b>23,70</b>	24,55	<b>23,10</b>	26,51	<b>24,33</b>
44	6	<b>22,47</b>	22,77	24,07	<b>22,20</b>	23,27	<b>23,00</b>
45	5	<b>21,84</b>	<b>21,84</b>	<b>21,40</b>	21,44	22,67	<b>22,21</b>
46	4	<b>21,22</b>	<b>21,22</b>	<b>20,77</b>	<b>20,77</b>	22,06	<b>21,59</b>
47	3	<b>20,59</b>	20,65	20,13	<b>20,06</b>	21,45	<b>20,99</b>
48	2	<b>19,96</b>	20,02	<b>19,59</b>	<b>19,59</b>	20,84	<b>20,36</b>
49	1	<b>19,34</b>	<b>19,34</b>	<b>18,83</b>	<b>18,83</b>	20,24	<b>19,74</b>
50	0	<b>18,78</b>	<b>18,78</b>	<b>18,20</b>	<b>18,20</b>	19,70	<b>19,12</b>



**Tablo 6.** 100-75 Problemleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

$w_1$	$w_2$	100-75-1		100-75-2		100-75-3	
		$Z_{GAMS}$	$Z_{TB}$	$Z_{GAMS}$	$Z_{TB}$	$Z_{GAMS}$	$Z_{TB}$
0	50	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	-	<b>30,00</b>
1	49	-	<b>25,50</b>	-	<b>25,50</b>	-	<b>30,40</b>
2	48	-	<b>26,00</b>	-	<b>26,00</b>	-	<b>30,80</b>
3	47	-	<b>26,50</b>	-	<b>26,50</b>	-	<b>31,17</b>
4	46	-	<b>26,98</b>	-	<b>27,00</b>	-	<b>31,59</b>
5	45	-	<b>27,49</b>	-	<b>27,50</b>	-	<b>31,94</b>
6	44	-	<b>27,99</b>	-	<b>28,00</b>	-	<b>32,34</b>
7	43	-	<b>28,49</b>	-	<b>28,50</b>	-	<b>32,80</b>
8	42	-	<b>29,00</b>	-	<b>29,00</b>	-	<b>33,20</b>
9	41	30,14	<b>29,49</b>	-	<b>29,50</b>	-	<b>33,60</b>
10	40	-	<b>30,00</b>	-	<b>30,00</b>	-	<b>34,00</b>
11	39	-	<b>30,49</b>	-	<b>30,50</b>	-	<b>34,40</b>
12	38	-	<b>30,99</b>	-	<b>31,00</b>	-	<b>34,66</b>
13	37	-	<b>31,50</b>	-	<b>31,50</b>	-	<b>35,20</b>
14	36	-	<b>32,00</b>	-	<b>32,00</b>	-	<b>35,54</b>
15	35	-	<b>32,49</b>	-	<b>31,92</b>	-	<b>35,88</b>
16	34	-	<b>32,98</b>	-	<b>33,00</b>	-	<b>36,18</b>
17	33	-	<b>33,18</b>	-	<b>32,91</b>	-	<b>36,54</b>
18	32	34,00	<b>33,62</b>	-	<b>33,11</b>	-	<b>37,20</b>
19	31	34,50	<b>33,21</b>	-	<b>33,80</b>	-	<b>37,60</b>
20	30	35,00	<b>34,45</b>	-	<b>32,89</b>	-	<b>38,00</b>
21	29	35,50	<b>33,63</b>	-	<b>33,64</b>	-	<b>38,36</b>
22	28	36,00	<b>34,74</b>	-	<b>33,15</b>	-	<b>38,76</b>
23	27	36,50	<b>34,28</b>	-	<b>33,91</b>	-	<b>39,16</b>
24	26	37,00	<b>35,52</b>	-	<b>34,62</b>	-	<b>39,41</b>
25	25	37,50	<b>34,64</b>	-	<b>33,69</b>	-	<b>37,49</b>
26	24	38,00	<b>34,04</b>	-	<b>33,51</b>	-	<b>37,26</b>
27	23	38,50	<b>33,45</b>	-	<b>32,60</b>	-	<b>36,68</b>
28	22	39,00	<b>32,96</b>	-	<b>31,72</b>	-	<b>36,11</b>
29	21	39,50	<b>32,14</b>	-	<b>31,24</b>	-	<b>35,93</b>
30	20	40,00	<b>31,86</b>	34,40	<b>30,44</b>	-	<b>35,26</b>
31	19	40,50	<b>30,97</b>	34,55	<b>29,83</b>	-	<b>34,66</b>
32	18	41,00	<b>30,44</b>	34,61	<b>29,07</b>	-	<b>34,04</b>
33	17	34,89	<b>29,72</b>	34,61	<b>28,58</b>	-	<b>33,57</b>
34	16	35,04	<b>29,17</b>	34,75	<b>27,84</b>	-	<b>33,29</b>
35	15	35,40	<b>28,71</b>	35,01	<b>27,31</b>	-	<b>32,38</b>
36	14	35,56	<b>27,69</b>	35,16	<b>26,59</b>	-	<b>31,81</b>
37	13	35,71	<b>27,02</b>	30,22	<b>25,83</b>	-	<b>31,20</b>
38	12	31,19	<b>26,58</b>	30,06	<b>25,21</b>	-	<b>30,66</b>
39	11	31,09	<b>25,75</b>	26,70	<b>24,70</b>	-	<b>30,76</b>
40	10	27,95	<b>25,42</b>	26,42	<b>24,05</b>	-	<b>30,30</b>
41	9	27,77	<b>24,94</b>	23,83	<b>23,19</b>	-	<b>29,74</b>
42	8	27,47	<b>24,10</b>	23,32	<b>22,41</b>	-	<b>28,93</b>
43	7	22,72	<b>22,71</b>	22,80	<b>21,76</b>	-	<b>28,65</b>
44	6	<b>22,09</b>	22,97	<b>20,62</b>	21,11	-	<b>28,01</b>
45	5	<b>21,45</b>	22,16	19,95	<b>19,92</b>	-	<b>28,49</b>
46	4	<b>20,80</b>	21,67	19,29	<b>19,09</b>	-	<b>26,79</b>
47	3	<b>20,17</b>	<b>20,17</b>	18,62	<b>18,57</b>	-	<b>26,60</b>
48	2	<b>19,53</b>	20,50	17,97	<b>17,74</b>	-	<b>26,20</b>
49	1	<b>18,90</b>	19,62	<b>17,31</b>	17,92	-	<b>25,31</b>
50	0	18,29	<b>18,26</b>	16,60	<b>16,46</b>	-	<b>26,00</b>

**Tablo 7.** 100-95 Problemleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

$w_1$	$w_2$	100-95-1		100-95-2		100-95-3	
		$z_{GAMS}$	$z_{TB}$	$z_{GAMS}$	$z_{TB}$	$z_{GAMS}$	$z_{TB}$
0	50	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>
1	49	-	<b>25,50</b>	-	<b>25,54</b>	-	<b>25,73</b>
2	48	-	<b>25,99</b>	-	<b>26,14</b>	-	<b>26,39</b>
3	47	-	<b>26,48</b>	-	<b>26,75</b>	-	<b>27,09</b>
4	46	-	<b>26,98</b>	-	<b>27,23</b>	-	<b>27,73</b>
5	45	-	<b>27,48</b>	-	<b>27,76</b>	-	<b>28,63</b>
6	44	-	<b>27,97</b>	-	<b>28,21</b>	-	<b>29,28</b>
7	43	-	<b>28,46</b>	-	<b>28,79</b>	-	<b>30,09</b>
8	42	-	<b>28,94</b>	-	<b>29,56</b>	-	<b>30,49</b>
9	41	-	<b>29,46</b>	-	<b>30,18</b>	-	<b>31,32</b>
10	40	-	<b>29,95</b>	-	<b>30,51</b>	-	<b>32,25</b>
11	39	-	<b>30,44</b>	-	<b>31,12</b>	-	<b>33,00</b>
12	38	-	<b>30,91</b>	-	<b>32,20</b>	-	<b>33,21</b>
13	37	-	<b>31,44</b>	-	<b>32,41</b>	-	<b>33,73</b>
14	36	-	<b>31,92</b>	-	<b>33,06</b>	-	<b>34,60</b>
15	35	-	<b>32,43</b>	-	<b>33,61</b>	-	<b>33,84</b>
16	34	-	<b>32,92</b>	-	<b>34,09</b>	-	<b>35,05</b>
17	33	-	<b>33,37</b>	-	<b>33,99</b>	-	<b>35,08</b>
18	32	-	<b>33,91</b>	-	<b>35,36</b>	-	<b>34,78</b>
19	31	-	<b>34,41</b>	-	<b>35,28</b>	-	<b>35,03</b>
20	30	-	<b>34,89</b>	-	<b>36,44</b>	-	<b>35,31</b>
21	29	-	<b>35,38</b>	-	<b>36,60</b>	37,89	<b>35,55</b>
22	28	-	<b>35,89</b>	37,74	<b>37,08</b>	38,50	<b>36,98</b>
23	27	37,69	<b>36,39</b>	38,32	<b>37,91</b>	39,12	<b>36,52</b>
24	26	-	<b>36,88</b>	38,90	<b>38,20</b>	39,73	<b>36,26</b>
25	25	38,80	<b>34,64</b>	39,48	<b>34,97</b>	40,35	<b>35,24</b>
26	24	39,35	<b>33,93</b>	40,06	<b>34,33</b>	40,96	<b>34,74</b>
27	23	39,90	<b>33,42</b>	40,64	<b>33,87</b>	41,57	<b>34,20</b>
28	22	40,45	<b>32,89</b>	41,22	<b>33,31</b>	42,19	<b>33,49</b>
29	21	41,00	<b>32,08</b>	41,80	<b>32,80</b>	42,80	<b>33,14</b>
30	20	41,56	<b>31,69</b>	40,02	<b>32,18</b>	40,00	<b>32,38</b>
31	19	-	<b>31,24</b>	40,52	<b>31,26</b>	40,50	<b>31,69</b>
32	18	42,52	<b>30,23</b>	35,26	<b>30,62</b>	-	<b>31,28</b>
33	17	43,08	<b>29,54</b>	35,10	<b>30,15</b>	41,50	<b>30,64</b>
34	16	43,63	<b>29,12</b>	35,49	<b>29,37</b>	42,00	<b>30,06</b>
35	15	36,45	<b>28,38</b>	35,65	<b>29,29</b>	36,17	<b>29,25</b>
36	14	36,64	<b>27,91</b>	31,51	<b>28,92</b>	36,35	<b>28,87</b>
37	13	36,82	<b>27,37</b>	30,99	<b>28,02</b>	33,99	<b>28,11</b>
38	12	32,72	<b>26,43</b>	30,88	<b>27,01</b>	32,47	<b>27,49</b>
39	11	32,25	<b>26,08</b>	27,92	<b>26,51</b>	32,42	<b>27,04</b>
40	10	28,46	<b>25,43</b>	27,61	<b>26,09</b>	28,57	<b>26,61</b>
41	9	28,15	<b>24,69</b>	26,01	<b>25,55</b>	28,29	<b>25,68</b>
42	8	27,87	<b>24,27</b>	25,54	<b>24,71</b>	25,67	<b>25,15</b>
43	7	22,89	<b>22,87</b>	24,66	<b>24,54</b>	25,21	<b>25,17</b>
44	6	<b>22,26</b>	23,08	24,19	<b>23,94</b>	24,75	<b>24,45</b>
45	5	<b>21,62</b>	22,31	23,76	<b>22,72</b>	22,84	<b>22,83</b>
46	4	20,99	<b>20,93</b>	<b>21,51</b>	22,57	<b>22,24</b>	22,28
47	3	20,36	<b>20,35</b>	20,90	<b>20,88</b>	<b>21,63</b>	21,66
48	2	<b>19,74</b>	20,31	<b>20,28</b>	<b>20,28</b>	<b>21,02</b>	21,78
49	1	<b>19,11</b>	19,66	19,66	<b>19,64</b>	20,42	<b>20,39</b>
50	0	18,49	<b>18,41</b>	19,09	<b>19,04</b>	19,84	<b>19,76</b>

**Tablo 8.** 150-75 Problemleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

$w_1$	$w_2$	150-75-1		150-75-2		150-75-3	
		$z_{GAMS}$	$z_{TB}$	$z_{GAMS}$	$z_{TB}$	$z_{GAMS}$	$z_{TB}$
0	50	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	-	<b>25,00</b>
1	49	-	<b>25,51</b>	-	<b>25,51</b>	-	<b>25,50</b>
2	48	-	<b>26,01</b>	-	<b>26,02</b>	-	<b>26,00</b>
3	47	-	<b>26,52</b>	-	<b>26,53</b>	-	<b>26,50</b>
4	46	-	<b>27,02</b>	-	<b>27,04</b>	-	<b>27,00</b>
5	45	-	<b>27,53</b>	-	<b>27,55</b>	-	<b>27,50</b>
6	44	-	<b>28,04</b>	-	<b>28,00</b>	-	<b>28,00</b>
7	43	-	<b>28,54</b>	-	<b>28,50</b>	-	<b>28,50</b>
8	42	<b>29,00</b>	29,05	-	<b>29,00</b>	-	<b>28,97</b>
9	41	-	<b>29,54</b>	-	<b>29,50</b>	-	<b>29,47</b>
10	40	-	<b>30,05</b>	-	<b>30,00</b>	-	<b>29,97</b>
11	39	-	<b>30,57</b>	-	<b>30,50</b>	-	<b>30,49</b>
12	38	-	<b>31,07</b>	-	<b>31,00</b>	-	<b>30,99</b>
13	37	<b>31,50</b>	31,58	-	<b>31,50</b>	-	<b>31,50</b>
14	36	-	<b>32,09</b>	-	<b>32,00</b>	-	<b>31,99</b>
15	35	-	<b>32,59</b>	-	<b>32,50</b>	-	<b>32,49</b>
16	34	-	<b>33,10</b>	-	<b>33,00</b>	-	<b>32,99</b>
17	33	-	<b>33,60</b>	-	<b>33,43</b>	-	<b>33,49</b>
18	32	-	<b>33,59</b>	-	<b>33,63</b>	-	<b>33,79</b>
19	31	-	<b>33,68</b>	-	<b>33,77</b>	-	<b>34,22</b>
20	30	-	<b>33,65</b>	-	<b>33,78</b>	-	<b>34,14</b>
21	29	-	<b>34,02</b>	-	<b>34,08</b>	-	<b>33,90</b>
22	28	-	<b>34,22</b>	-	<b>34,97</b>	-	<b>34,57</b>
23	27	-	<b>34,79</b>	-	<b>35,32</b>	-	<b>35,69</b>
24	26	-	<b>34,88</b>	-	<b>34,69</b>	-	<b>34,83</b>
25	25	-	<b>34,60</b>	-	<b>34,47</b>	-	<b>35,88</b>
26	24	-	<b>33,66</b>	-	<b>34,00</b>	-	<b>35,59</b>
27	23	-	<b>32,92</b>	-	<b>33,43</b>	-	<b>35,35</b>
28	22	-	<b>32,22</b>	-	<b>32,72</b>	-	<b>36,58</b>
29	21	-	<b>31,54</b>	-	<b>32,36</b>	-	<b>36,30</b>
30	20	-	<b>31,01</b>	-	<b>31,49</b>	-	<b>36,39</b>
31	19	-	<b>30,34</b>	-	<b>30,88</b>	-	<b>37,13</b>
32	18	34,73	<b>29,56</b>	35,59	<b>30,33</b>	-	<b>36,55</b>
33	17	34,67	<b>29,05</b>	35,76	<b>29,80</b>	-	<b>37,10</b>
34	16	34,79	<b>28,35</b>	35,83	<b>28,92</b>	-	<b>36,79</b>
35	15	34,88	<b>27,82</b>	36,11	<b>28,58</b>	-	<b>36,47</b>
36	14	31,40	<b>27,47</b>	36,29	<b>27,87</b>	-	<b>38,17</b>
37	13	31,18	<b>26,47</b>	36,46	<b>27,24</b>	-	<b>37,91</b>
38	12	30,58	<b>25,86</b>	31,53	<b>26,49</b>	-	<b>38,58</b>
39	11	27,33	<b>25,02</b>	31,33	<b>26,06</b>	-	<b>38,08</b>
40	10	27,00	<b>24,89</b>	31,23	<b>25,36</b>	-	<b>33,13</b>
41	9	24,53	<b>23,16</b>	27,58	<b>24,97</b>	-	<b>32,08</b>
42	8	24,03	<b>22,57</b>	27,28	<b>24,39</b>	-	<b>32,01</b>
43	7	23,53	<b>21,96</b>	24,82	<b>23,55</b>	-	<b>27,78</b>
44	6	21,23	<b>21,20</b>	22,03	<b>21,87</b>	-	<b>24,90</b>
45	5	<b>20,57</b>	20,65	<b>21,40</b>	21,95	-	<b>24,38</b>
46	4	19,91	<b>19,87</b>	20,75	<b>20,46</b>	-	<b>21,42</b>
47	3	19,26	<b>18,93</b>	<b>20,12</b>	20,38	-	<b>21,01</b>
48	2	<b>18,59</b>	18,60	<b>19,48</b>	19,51	-	<b>20,26</b>
49	1	<b>17,93</b>	17,95	<b>18,84</b>	19,71	-	<b>19,90</b>
50	0	17,30	<b>16,94</b>	<b>18,25</b>	18,90	-	<b>19,00</b>

**Tablo 9.** 150-95 Problemleri İçin Elde Edilen Sonuçlar

<b>w<sub>1</sub></b>	<b>w<sub>2</sub></b>	<b>150-95-1</b>		<b>150-95-2</b>		<b>150-95-3</b>	
		<b>z<sub>GAMS</sub></b>	<b>z<sub>TB</sub></b>	<b>z<sub>GAMS</sub></b>	<b>z<sub>TB</sub></b>	<b>z<sub>GAMS</sub></b>	<b>z<sub>TB</sub></b>
0	50	-	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>	<b>25,00</b>
1	49	-	<b>25,50</b>	-	<b>25,42</b>	-	<b>25,48</b>
2	48	-	<b>26,00</b>	-	<b>25,85</b>	-	<b>25,96</b>
3	47	-	<b>26,50</b>	-	<b>26,27</b>	-	<b>26,43</b>
4	46	-	<b>27,00</b>	-	<b>26,71</b>	-	<b>26,92</b>
5	45	-	<b>27,50</b>	-	<b>27,13</b>	-	<b>27,41</b>
6	44	-	<b>28,00</b>	-	<b>27,55</b>	-	<b>27,89</b>
7	43	-	<b>28,50</b>	-	<b>27,98</b>	-	<b>28,36</b>
8	42	-	<b>29,00</b>	-	<b>28,41</b>	-	<b>28,84</b>
9	41	-	<b>29,50</b>	-	<b>28,84</b>	-	<b>29,30</b>
10	40	-	<b>30,00</b>	-	<b>29,24</b>	-	<b>29,82</b>
11	39	-	<b>30,50</b>	-	<b>29,69</b>	-	<b>30,28</b>
12	38	-	<b>31,00</b>	-	<b>30,12</b>	-	<b>30,76</b>
13	37	-	<b>31,49</b>	-	<b>30,54</b>	-	<b>31,26</b>
14	36	-	<b>31,99</b>	-	<b>30,94</b>	-	<b>31,75</b>
15	35	-	<b>32,49</b>	-	<b>31,37</b>	-	<b>32,23</b>
16	34	-	<b>32,99</b>	-	<b>31,79</b>	-	<b>32,71</b>
17	33	-	<b>33,50</b>	-	<b>32,23</b>	-	<b>33,19</b>
18	32	-	<b>34,00</b>	-	<b>32,67</b>	-	<b>33,63</b>
19	31	-	<b>34,50</b>	-	<b>33,10</b>	-	<b>34,11</b>
20	30	-	<b>35,00</b>	-	<b>33,47</b>	-	<b>34,64</b>
21	29	-	<b>35,50</b>	36,59	<b>33,91</b>	-	<b>35,12</b>
22	28	-	<b>36,00</b>	-	<b>34,34</b>	-	<b>35,55</b>
23	27	-	<b>36,50</b>	37,70	<b>34,76</b>	37,84	<b>36,08</b>
24	26	-	<b>35,86</b>	38,25	<b>35,23</b>	-	<b>36,48</b>
25	25	-	<b>34,68</b>	-	<b>33,95</b>	38,96	<b>34,03</b>
26	24	-	<b>34,86</b>	39,35	<b>33,25</b>	39,51	<b>33,33</b>
27	23	-	<b>34,07</b>	39,84	<b>32,65</b>	-	<b>32,62</b>
28	22	-	<b>33,00</b>	40,39	<b>32,26</b>	40,63	<b>32,00</b>
29	21	-	<b>32,77</b>	40,94	<b>31,29</b>	41,19	<b>31,61</b>
30	20	-	<b>32,57</b>	41,49	<b>30,90</b>	41,75	<b>30,76</b>
31	19	-	<b>31,24</b>	42,04	<b>30,13</b>	41,46	<b>30,33</b>
32	18	-	<b>30,39</b>	42,59	<b>29,97</b>	-	<b>29,56</b>
33	17	-	<b>30,21</b>	43,14	<b>28,99</b>	41,52	<b>28,74</b>
34	16	-	<b>30,36</b>	43,71	<b>28,17</b>	42,02	<b>28,25</b>
35	15	-	<b>28,97</b>	44,26	<b>27,65</b>	35,41	<b>27,46</b>
36	14	-	<b>28,82</b>	34,89	<b>27,09</b>	35,36	<b>27,36</b>
37	13	-	<b>28,36</b>	35,39	<b>26,10</b>	31,51	<b>26,67</b>
38	12	-	<b>28,58</b>	31,88	<b>25,71</b>	30,15	<b>25,77</b>
39	11	-	<b>27,07</b>	30,45	<b>25,04</b>	27,12	<b>25,20</b>
40	10	-	<b>26,34</b>	27,07	<b>24,00</b>	27,37	<b>24,44</b>
41	9	-	<b>25,61</b>	26,76	<b>23,97</b>	24,48	<b>24,07</b>
42	8	-	<b>25,72</b>	23,84	<b>22,98</b>	23,94	<b>23,23</b>
43	7	-	<b>25,17</b>	23,24	<b>22,90</b>	23,48	<b>22,55</b>
44	6	-	<b>23,67</b>	<b>21,14</b>	21,58	23,09	<b>22,54</b>
45	5	-	<b>22,93</b>	<b>20,47</b>	20,87	20,47	<b>20,46</b>
46	4	-	<b>22,32</b>	<b>19,81</b>	19,86	19,79	<b>19,75</b>
47	3	-	<b>21,53</b>	<b>19,20</b>	19,57	19,12	<b>19,08</b>
48	2	-	<b>21,13</b>	<b>18,54</b>	<b>18,54</b>	<b>18,46</b>	19,09
49	1	-	<b>20,48</b>	<b>17,89</b>	<b>17,89</b>	17,80	<b>17,77</b>
50	0	-	<b>21,05</b>	<b>17,24</b>	<b>17,24</b>	17,11	<b>17,09</b>

**Tablo 10. Özet Sonuç Tablosu**

<i>problem</i>	$\bar{Z}_{GAMS}$	$\bar{Z}_{TB}$	$n_{GAMS}$	$n_{TB}$	$\bar{t}_{GAMS}$	$\bar{t}_{TB}$
50-75-1	30,51	28,98	50	51	238	180
50-75-2	33,81	32,66	27	51	270	140
50-75-3	30,11	29,50	24	51	255	158
50-95-1	32,87	28,78	34	51	290	171
50-95-2	31,63	28,67	33	51	128	180
50-95-3	34,08	28,95	36	51	222	171
100-75-1	31,53	28,69	35	51	310	282
100-75-2	26,45	27,86	22	51	2446	287
100-75-3	-	33,04	0	51	7200	318
100-95-1	31,77	28,84	27	51	292	286
100-95-2	31,32	29,52	30	51	337	334
100-95-3	32,80	29,93	30	51	484	125
150-75-1	26,32	28,21	22	51	4315	300
150-75-2	27,78	28,68	20	51	353	158
150-75-3	-	31,30	0	51	7200	457
150-95-1	-	29,33	0	51	7200	682
150-95-2	31,83	27,94	29	51	2095	395
150-95-3	30,17	28,29	26	51	574	285
<i>ortalama</i>	30,87	29,40	24,72	51,00	1900,50	272,72

Tablo 4-9’da verilen ayrıntılı sonuçlar Tablo 10’da özetlenmiştir. Tablo 10 yedi sütundan oluşmaktadır. İlk sütunda problem adı, ikinci sütunda GAMS/Dicopt ile elde edilen amaç fonksiyonu değerlerinin ortalaması ( $\bar{Z}_{GAMS}$ ), üçüncü sütunda TB algoritması ile elde edilen amaç fonksiyonlarının ortalaması ( $\bar{Z}_{TB}$ ), diğer sütunlarda ise sırasıyla 51 farklı ağırlık çiftinden oluşan bir ağırlık seti için elde edilen uygun çözüm sayıları ( $n_{GAMS}$ ,  $n_{TB}$ ) ve ortalama çözüm süreleri ( $\bar{t}_{GAMS}$ ,  $\bar{t}_{TB}$ ) verilmiştir.

Tablo 10’dan da görülebileceği gibi TB algoritması hem çözüm kalitesi, hem elde edilen uygun çözüm sayısı, hem de süre açısından GAMS/Dicopt’tan daha başarılı olmuştur.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, ajan yeteneklerine bağlı olarak her işin her ajana atanmadığı durumu ifade eden uygunluk kısıtlarının olduğu MRGAP ele alınmıştır. MRGAP’ta en iyi ajan sayısının belirlenmesi önemli olmasına rağmen, literatürde genellikle ajan sayısının bilindiği ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu çalışmada ajan sayısının enküçüklenmesi amacı, ajan yüklerinin kareleri toplamının enküçüklenmesi amacı ile birlikte ele alınmıştır.

Geliştirilen matematiksel modelin amaçları, ağırlıklı toplam yöntemi ile birleştirilmiş ve model GAMS paket programının Dicopt çözücü ile çözülmüştür. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir TB algoritması geliştirilmiştir. Rassal olarak türetilen test problemleri, önerilen yöntemler ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. 18 problemin 3’ünde GAMS/Dicopt ile hiçbir ağırlık çifti için süre limiti içinde uygun çözüm elde edilememiştir. Büyük boyutlu problemler için kullanılan TB algoritması ise test problemlerinin %95’inde GAMS ile aynı ya da daha başarılı çözümlere ulaşmıştır. TB algoritması hem çözüm kalitesi, hem elde edilen uygun çözüm sayısı, hem de süre açısından GAMS/Dicopt’tan daha başarılı olmuştur.

Gelecek çalışmalarda, amaçların birleştirilmesinde farklı çok amaçlı yöntemler kullanılarak başarıları karşılaştırılabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ahmed, Z.H., Performance analysis of hybrid genetic algorithms for the generalized assignment problem, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 19 (9), 216-222, 2019.

- [2] Bender, M., Thielen, C., Westphal, S., Packing items into several bins facilitates approximating the separable assignment problem, *Information Processing Letters*, 115, 570–575, 2015.
- [3] D’Ambrosio, C., Martello, S., Monaci, M., Lower and upper bounds for the non-linear generalized assignment problem, *Computers and Operations Research*, 120, 104933, 2020.
- [4] De Armas, L., Valdes, D., Morell, C., Bello, R., Solutions to storage spaces allocation problem for import containers by exact and heuristic methods, *Computación y Sistemas*, 23(1), 197–211, 2019.
- [5] Dörterler, M., A New Genetic algorithm with agent-based crossover for the generalized assignment problem, *Journal of Information Technology and Control*, 48(3), 389–400, 2019.
- [6] Dörtler, M., Bay, Ö.F., Akçayol, M.A., A modified genetic algorithm for a special case of the generalized assignment problem, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25, 794–805, 2017.
- [7] Fadaei S., Bichler, M., Generalized assignment problem: Truthful mechanism design without money, *Operations Research Letters*, 45, 72–76, 2017.
- [8] Haddadi, S., Variable-fixing then subgradient optimization guided very large scale neighborhood search for the generalized assignment problem, *4OR*, 17, 261–295, 2019.
- [9] Litvinchev, I., Mata, M., Saucedo, J., Rangel, S., Improved lagrangian bounds and heuristics for the generalized assignment problem, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 56(5), 803–809, 2017.
- [10] Liu, Y.Y., Wang, S.A., Scalable parallel genetic algorithm for the generalized assignment problem, *Parallel Computing*, 46, 98–119, 2015.
- [11] Luo, L., Chakraborty, N., Sycara, K., Distributed algorithms for multirobot task assignment with task deadline constraints, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12 (3), 876–888, 2015.
- [12] Valentin, E., de Freitas, R., Barreto, R., Towards optimal solutions for the low power hard real-time task allocation on multiple heterogeneous processors, *Science of Computer Programming*, 165, 38–53, 2018.
- [13] Munapo, E., Lesaoana, M., Nyamugure, P., Kumar, S., A transportation branch and bound algorithm for solving the generalized assignment problem, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 6(3), 217–223, 2015.
- [14] Murthy, I., Ransbotham, S., A new extended formulation of the Generalized Assignment Problem and some associated valid inequalities, *Discrete Applied Mathematics*, 271, 119–143, 2019.
- [15] Dauzère-Pérès, S., Hassoun, M., Sendon, A., A Lagrangian heuristic for minimising risk using multiple heterogeneous metrology tools, *International Journal of Production Research*, 58(4), 1222–1238, 2020.
- [16] Rawitz, D., Voloshin, A., Flexible allocation on related machines with assignment restrictions, *Discrete Applied Mathematics*, 250, 309–321, 2018.
- [17] Sethanana, K., Pitakaso, R., Improved differential evolution algorithms for solving generalized assignment problem, *Expert Systems with Applications*, 45, 450–459, 2016.
- [18] Singh, S.K., Rani, D, A branching algorithm to solve binary problem in uncertain environment: an application in machine allocation problem, *OPSEARCH*, 56, 1007–1023, 2019.

- [19] Wang, J., Liu, K., Li, B., Liu, T., Li, R., Han Z., Delay-Sensitive multi-period computation offloading with reliability guarantees in fog networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 19(9), 2062-2075, 2020.
- [20] Ceselli, A., Fiore, M., Premoli, M., Secci, S., Optimized assignment patterns in Mobile Edge Cloud networks *Computers and Operations Research*, 106, 246–259, 2019.
- [21] Masoud, M., Elhenawy, M., Almanna, M.H., Liu, S.Q., Glaser, S., Rakotonirainy, A., Heuristic approaches to solve e-scooter assignment problem, *IEEE Access*, 7, 175093-175105, 2019.
- [22] Wang, G., Lei, L., Integrated operations scheduling with delivery deadlines, *Computers & Industrial Engineering*, 85, 177–185, 2015.
- [23] Yang, L., Yao, H., Wang, J., Jiang, C., Benslimane, A., Liu Y., Multi-UAV-Enabled load-balance mobile-edge computing for IoT networks, *IEEE Internet of Things Journal*, 7(8), 6898-6908, 2020.
- [24] Fu, Y., Sun, J., Lai, K.K, Leung, J.W.K., A robust optimization solution to bottleneck generalized assignment problem under uncertainty, *Annals of Operations Research*, 233,123–133, 2015.
- [25] Wu, W., Iori M., Martello, S., Yagiura, M., Exact and heuristic algorithms for the interval min-max regret generalized assignment problem, *Computers & Industrial Engineering*, 125, 98–110, 2018.
- [26] Amorim, J.C., Alves, V., de Freitas, E. P., Assessing a swarm-GAP based solution for the task allocation problem in dynamic scenarios, *Expert Systems with Applications*, 152, 113437, 2020.
- [27] Tanganelli, G., Mingozzi, E., Energy-Efficient IoT service brokering with quality of service support, *Sensors*, 19, 693, 2019.
- [28] Xu, Y., Wang, X., Sun, T., Heuristic routing algorithm toward scalable distributed generalized assignment problem, *Soft Computing*, 22, 845–859, 2018.
- [29] Kat B., An algorithm and a decision support system for the panelist assignment problem: The case of TUBITAK, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(1), 69-87, 2021.
- [30] LeBlanc, L.J., Shtub, A., Anandalingam, G., Formulating and solving production planning problems, *European Journal of Operational Research*, 112, 54-80, 1999.
- [31] Osman, I.H., “Heuristics For The Generalized Assignment Problem: Simulated Annealing And Tabu Search Approaches”, *OR Spectrum*, 17, p. 211-225, 1995
- [32] Zhang, Z., Li, C., Wang, M.,Wu, Q., A Hybrid Multi-Objective Evolutionary Algorithm Operating Room Assignment Problem, *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 7(1),47-54, 2017.
- [33] Shtub, A., Kogan, K., Capacity planning by the dynamic multi-resources generalized assignment problem (DMRGAP), *European Journal of Operational Research*, 105, 91-99, 1998.
- [34] Yagiura, M., Iwasaki, S., Ibaraki, T., Glover, F., A very large-scale neighborhood search algorithm for the multi-resource generalized assignment problem, *Discrete Optimization*, 1 (1), 87–98, 2004.
- [35] Mitrović-Minić, S., Punnen, A. P., Local search intensified: Very large-scale variable neighborhood search for the multi-resource generalized assignment problem, *Discrete Optimization*, 6 (4), 370–377, 2009.
- [36] Özçelik, F., Saraç, T., Farklı yeteneklere ve önceliklere sahip ajanların ve aynı ajana atanması gereken işlerin olduğu çok kaynaklı genelleştirilmiş atama problemi için bir hedef programlama modeli, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (1) , 75-90, 2017.

- [37] Janak, S.L., Taylor M.S., Floudas C.A., Novel and effective integer optimization approach for the NSF panel-assignment problem: A multiresource and preference-constrained generalized assignment problem, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45, 258-265, 2006.
- [38] Karsu, Ö., Azizoglu, M., The multi-resource agent bottleneck generalised assignment problem, *International Journal of Production Research*, 50 (2), 309-324, 2012.
- [39] Özçelik F., Saraç T., The bottleneck multi resource generalised assignment problem with agent and resources eligibility restrictions, *International Symposium for Production Research*, Vienna, Austria, 13-15 September 2017.
- [40] Karsu, Ö., Azizoglu, M., Bicriteria multiresource generalized assignment problem, *Naval Research Logistics*, 61, 621-636, 2014.
- [41] Fisher, M. L., Jaikumar, R., Van Wassenhove, L. N., A multiplier adjustment method for the generalized assignment problem, *Management Science*, 32(9), 1095-1103, 1986.
- [42] Ehrgott, M., *Multicriteria Optimization*, 2nd ed., 323 p, 2005.
- [43] Kendall, G., 2000, "Artificial Intelligence Methods", <http://www.cs.nott.ac.uk/~pszgxk/aim/>, Erişim tarihi: 21.06.2021.



## Encircling Probe Design for Eddy Current Inspection System Used in The Aluminum Clad Steel Wire Inspection

Halim Burak TAŞKIN<sup>1,\*</sup>  Nurettin ÜSTKOYUNCU<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Hascelik Kablo Ind. & Trade. Corp., R&D Center, Kayseri/Turkey

<sup>2</sup> Erciyes University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kayseri/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, an encircling probe design used in the inspection of conductive wires, which are qualified as aluminum clad steel (ACS) wire is made as shown in Figure A.

### Article Info:

Research article

Received: 04/05/2021

Revision: 27/06/2021

Accepted: 07/07/2021

### Highlights

- Encircling Probe
- Eddy Current Inspection
- ACS Wire

### Keywords

Wire Inspection  
Eddy Current  
Non-Destructive Testing  
Probe  
Coil

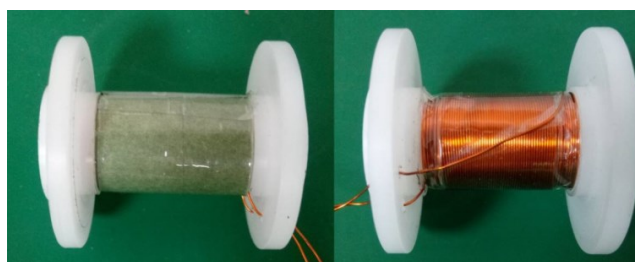


Figure A. Realized probes for the inspection system

**Purpose:** The eddy current systems are widely used for the quality control of conductive materials as one of non-destructive testing methods. In these systems, it is possible to design and to use different types of probes according to the material type. Internal, encircling and surface probe types are used for the inspection of pipes, wires and plate conductive materials, respectively. In this study, a sensitive encircling probe design is realized to detect various defect on wire surfaces.

**Theory and Methods:** The inductance value of the designed probe is calculated by using two and three dimensional finite element analysis (FEA) as shown in Figure B and the obtained results are compared.

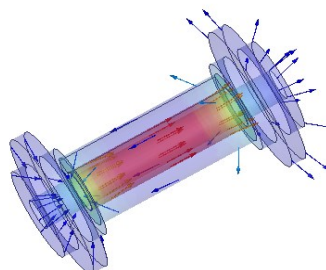


Figure B. Magnetic flux distribution of the realized probe

**Results:** The inductance change of the probe was measured by an LCR meter while the probe contained sample ACS wires with different types of defects, these values are given in the table and the change graph is plotted. In addition, an impedance bridge circuit was set up with the probe and the results of the change in voltage induction on the coil are given as an oscilloscope image.

**Conclusion:** Obtained results show that the realized probes can be used in the inspection of ACS wires.

GU J Sci, Part C, 9(3): 402-412 (2021)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Encircling Probe Design for Eddy Current Inspection System Used in The Aluminum Clad Steel Wire Inspection

Halim Burak TAŞKIN<sup>1,\*</sup> Nurettin ÜSTKOYUNCU<sup>2</sup> <sup>1</sup> Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Kayseri/Türkiye<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri/Türkiye

### Abstract

In this paper, an encircling probe design used in the inspection of conductive wires, which are qualified as aluminum clad steel (ACS) wire is made. The eddy current systems are widely used for the quality control of conductive materials as one of non-destructive testing methods. In these systems, it is possible to design and to use different types of probes according to the material type. Internal, encircling and surface probe types are used for the inspection of pipes, wires and plate conductive materials, respectively. The discontinuities on the conductor surfaces are detected and the changes in the inductance values of the coils of probes are analyzed with the electronic hardware and the quality control of the material is ensured. In this study, a sensitive probe design is realized to detect various defect on wire surfaces. The inductance value of the designed probe is calculated by using two and three dimensional finite element analysis (FEA) and the obtained results are compared. The inductance change of the probe was measured by an LCR meter while the probe contained sample ACS wires with different types of defects, these values are given in the table and the change graph is plotted. In addition, an impedance bridge circuit was set up with the probe and the results of the change in voltage induction on the coil are given as an oscilloscope image.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 04/05/2021  
Düzeltilme: 27/06/2021  
Kabul: 07/07/2021

### Keywords

Wire Inspection  
Eddy Current  
Non-Destructive Testing  
Probe  
Coil

### Anahtar Kelimeler

Tel Muayenesi  
Girdap Akımı  
Tahribatsız Muayene  
Prob  
Bobin

### Alüminyum Kaplanmış Çelik Tel Muayenesinde Kullanılan Girdap Akımları Muayene Sistemi için Çevreleyici Prob Tasarımı

### Öz

Bu çalışmada, alüminyum kaplanmış çelik (AKÇ, ACS: Aluminum Clad Steel) tel olarak nitelendirilen iletken tellerin tahribatsız muayene sürecinde kullanılmakta olan çevreleyici bir prob tasarımı yapılmıştır. İletken materyallerin üretim ve kalite kontrol süreçlerinde tahribatsız muayene yöntemlerinden olan girdap akımları sistemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, materyal türüne bağlı olarak farklı tipte problemlerin tasarlanması ve kullanılması mümkündür. Boruların, tellerin ve plaka şeklindeki iletken materyallerin muayenesi için sırasıyla dahili, çevreleyici ve yüzey prob türleri kullanılmaktadır. Bu problemler ile iletken yüzeylerindeki süreksizlikler tespit edilip, proba ait bobinlerin indüktans değerlerinde meydana gelen değişiklikler elektronik donanımlar ile analiz edilerek materyalin kalite kontrolü sağlanmaktadır. Bu çalışmada, tel yüzeylerindeki çeşitli kusurların algılanabilmesi için hassas bir prob tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan proba ait indüktans değerleri, iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen bu değerler karşılaştırılmıştır. Proba ait indüktans değişimi, içerisinde farklı türden kusurlar içeren numune AKÇ teller varken bir LCR metre vasıtasıyla ölçülmüş, bu değerler tabloda verilmiş ve değişim grafiği çizdirilmiştir. Aynı zamanda, prob ile bir empedans köprü devresi kurularak bobin üzerinde meydana gelen voltaj indüklenmesindeki değişim sonuçları osiloskop çıktısı olarak verilmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde metal endüstrisi alanında üretilen veya endüstriyel uygulamalarda kullanılan manyetik ve manyetik olmayan materyallerin yapılarında oluşabilen çizik, çatlak, korozyon ve ezilme gibi kusurlar malzemenin kullanım alanına göre maddi kayıplar veya riskler oluşturabilmektedir. Bu kayıp ve riskleri önlemek için üretim aşamasında veya sonrasında tahribatsız ya da tahribatlı test yöntemleri kullanılarak kusurlu materyal bölgeleri tespit edilebilmektedir. Özellikle iletkenlerin muayenesinde, test numunesine zarar vermemek ve üretim esnasında kalite kontrolünü sağlayabilmek için tahribatsız test yöntemleri günümüzde yaygınlık kazanmıştır. Bu test yöntemlerinden biri de girdap akımları tekniğidir. Bu teknik, oldukça hassas bir şekilde gözle görülemeyen kusurların tespitini gerçekleştirebilmesi nedeniyle endüstriyel alanda kendine yaygın olarak yer bulmaktadır. Girdap akımları tekniği ile kusur tespitinin yanı sıra iletken materyalin kalınlığı, öz direnci ve iletkenliği gibi değerlerinin ölçülmesi de mümkündür [1].

Tahribatsız test yöntemleri arasında, yüksek hızda test gerçekleştirebilecek en uygun teknik yöntemlerin başında girdap akımları tekniği gelmektedir. Zorlu çalışma koşullarında ve 150 m/sn hız değerlerine kadar yüksek hızda test yapılmasına izin veren girdap akımı sistemleri bulunmaktadır [2]. Bu sistemlerde yüksek hızlarda ölçüm yapılması, prob tasarımından ziyade elektronik donanımda iyileştirmeler ile sağlanmaktadır. Girdap akımı testi ile özellikle teller, çubuklar ve borular gibi yarı mamul ürünlerin üretimi esnasında hızlı bir muayene gerçekleştirilebilmektedir [3-5]. Anlık olarak sonuçlar alınabilen bu yöntemde, ferromanyetik özelliğe sahip olan ya da olmayan çok çeşitli iletken malzemelerde çatlak tespiti yapılabilmektedir [6].

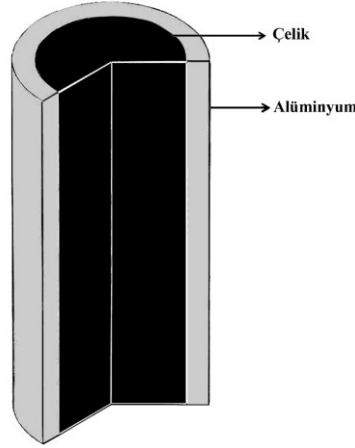
Literatürde girdap akımları tekniği ile ilgili yapılan çalışmalarda teorik ve pratik yaklaşımların ele alınabildiği görülmektedir [7-11]. Desjardins ve arkadaşları, problemlere ait bobinler ile indüktif olarak eşleştirilmiş devrelerde tüm elektromanyetik etkileşimleri tanımlayarak, kesin çözümlerin elde edilmesi için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, öz ve karşılıklı indüktans katsayılarına karşılık gelen zamandan bağımsız ifadeler üretmişlerdir [7]. Desjardins ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada uzun bir ferromanyetik iletken çubuğun çevreleyici koaksiyel prob ile gerilim kontrolü altında girdap akımı indüksiyon problemi çözümlerine analitik olarak yaklaşımı ele almışlardır [8]. Machado ve arkadaşları, boruların iç yüzeylerinde meydana gelen farklı yönelimlere sahip olası milimetre altı hataları tespit etmek için girdap akım problemleri geliştirmişlerdir. Problemlerin herhangi bir tarama pozisyonunda 0.5 mm derinliğindeki tüm kusurları tespit edebildiğini deneysel çalışmalar sonucunda göstermişlerdir [9]. Xin ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada mekanik olarak dönebilen ve 360° boruların iç duvar taramasını gerçekleştirebilen bir prob tasarımı yaparak, bu problemler ile alınan ölçümleri analiz etmişlerdir. Prob özelliklerini üç boyutlu Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) kullanarak araştırmışlardır ve deneysel sonuçlar ile ölçümleri doğrulamışlardır [10]. Xie ve arkadaşları, boru hattı yapısındaki kusurları tespit etmek için yeni bir bölünmüş tip prob önermiş ve geliştirmişlerdir. Yapılan benzetim çalışmaları ve deneyler ile çatlakların derinliği, eksenel ve çevresel pozisyonu bu çalışmada önerilen yeni prob ile doğrulanmıştır [11].

Bu çalışmanın amacı, Optik topraklama teli (OTT, OPGW: Optical Ground Wire) iletkenlerinde topraklama işlevlerini yerine getiren, alüminyum kaplanmış çelik (AKÇ) tellerin üretim esnasında yüzeylerinde meydana gelen kusurları tespit etmek için girdap akımları sistemlerinde kullanılacak olan prob tasarımının gerçekleştirilmesidir. Üretim esnasında AKÇ teller üzerinde meydana gelen kusurlar, bu tellerin işlevlerini yerine getirmesine engel olabilmekte ve yeterli topraklamanın sağlanamamasına neden olmaktadır. Gözle muayene gerçekleştirildiğinde çok belirgin kusurlar dışında birçok kusur algılanmadığından bu çalışmada, iletken çubukları hassas ve güvenilir bir şekilde muayene edebilen girdap akımları sistemi için çevreleyici tip bir prob tasarımı gerçekleştirilmiştir.

## 2. MALZEME ÖZELLİKLERİNE GÖRE İNDÜKTANS DEĞİŞİMİ (INDUCTANCE CHANGE ACCORDING TO MATERIAL PROPERTIES)

Bu çalışmada incelemesi yapılan AKÇ tel yapısı Şekil 1’de görülmektedir. Hatalı üretim durumlarında tel yüzeyindeki alüminyum kaplama incelenerek veya yok olarak çelik öze doğru bir açıklık veya incelme

oluşmaktadır. Bu durumda malzemenin manyetik geçirgenlik katsayısında bir değişiklik meydana gelmekte ve manyetik akı yoğunluğu değeri de buna bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 1. AKÇ tel kesitli görünüm

Eşitlik 1’de verilen temel indüktans ifadesinde, bobine ait indüktans değerinin malzemenin manyetik geçirgenlik katsayısı ile değiştiği görülmektedir [12].

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (1)$$

Burada N, bobinin sarım sayısını; l, manyetik akının aktığı uzunluğu; A, akının aktığı etkin kesit alanı ve  $\mu$  ise ortamın manyetik geçirgenlik katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca Eşitlik 2’den de görülebileceği üzere ortamın manyetik geçirgenlik katsayısı, ortamın bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı olan  $\mu_r$  ile boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı olan  $\mu_0$ ’a bağlı olarak değişmektedir.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2’ye bağlı olarak malzemenin manyetik özelliğine göre içerisinde bulunduğu bobinin indüktansını etkilediği görülmektedir. Dolayısıyla AKÇ telde yer alan alüminyum ve çelik malzemeye ait bağıl manyetik geçirgenlik değerleri dikkate alınarak ve Eşitlik 1’den yararlanılarak hata tespitinin yapılması mümkün olabilmektedir.

### 3. PROB TASARIMI VE İNDÜKTANS HESAPLAMALARI (PROBE DESIGN AND INDUCTANCE CALCULATIONS)

Tel muayenesi için girdap akımları test sistemlerinde kullanılan bobinler, dayanıklılığı çok yüksek ve üretilen manyetik alanı etkilemeyen malzemelere sarılmakta ve prob haline getirilmektedir. Kullanım alanlarına göre bu malzeme yapıları değişiklik gösterebilmektedir. PVC, kestamit ve delrin gibi farklı mukavemet değerlerine sahip malzemeler, bobinlerin sarılacağı sensör iskeletinin oluşturulmasında kullanılan yaygın malzeme türleridir. Bu çalışmada, seri üretim hattında kullanılacak, mukavemeti yüksek ve tel muayenesinin gerçekleştirilebilmesi için uygun merkez çapa ve karkas uzunluğuna sahip bobin iskeletinin oluşturulmasında kestamit malzeme seçilmiştir. Bobin iskeletleri, kullanılan girdap akımları sisteminin çalışma mantığına uygun olarak mutlak veya diferansiyel şekilde tasarlanabilmektedir. Mutlak tip problemler ise kendi içerisinde harici ve dahili kıyaslamalı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Harici kıyaslamalı mutlak tip problemlerin bünyesinde, test bobini ve referans bobin olmak

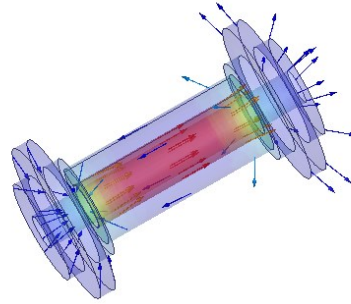
üzere iki ayrı prob bulunmaktadır. Test bobininde muayene edilecek kusurlu tel numunesi yer alırken referans bobinde ise kıyaslanmanın yapılacağı kusursuz tel numunesi yer almaktadır.

### 3.1. Bobin İndüktans Hesaplamaları (Coil Inductance Calculations)

Bu çalışmada, bobin indüktansının belirlenebilmesi için çok katmanlı hava çekirdekli bobin indüktans hesabı dikkate alınmıştır [13]. Çok katmanlı hava çekirdekli bobinler, daha büyük indüktans değeri ile yüksek frekanslı devrelerde kullanılmak için tasarlanmaktadır [14,15]. Girdap akımları test sisteminde kullanılan bobinler, 100 kHz ila 100 MHz arasında olmak üzere yüksek frekanslarda çalıştırılarak hassas ölçüm gerçekleştirmektedirler. Eşitlik 3'te kullanılan çok katmanlı bobinle ilgili indüktans ifadesi verilmiştir. Eşitlik 3'te b, bobin karkasının uzunluğunu; N, bobin sarım sayısını; c, katman boyunu ve a ise bobinin ortalama çapını ifade etmektedir. Eşitlik 3'te yer alan tüm parametrelerin birimleri inç cinsindedir ve indüktans değeri  $\mu H$  olarak hesaplanmaktadır [13].

$$L_0 = 0.8 \times \frac{n^2 a^2}{6a+9b+10c} \mu H \quad (3)$$

Eşitlik 3 ile verilen analitik hesaplama beraberinde nümerik hesaplama yöntemlerinden iki ve üç boyutlu SEA kullanılarak da ilgili indüktans değeri hesaplanmıştır. Şekil 2'de gerçekleştirilen üç boyutlu nümerik analizde elde edilen akı dağılımı vektörel olarak gösterilmiştir.

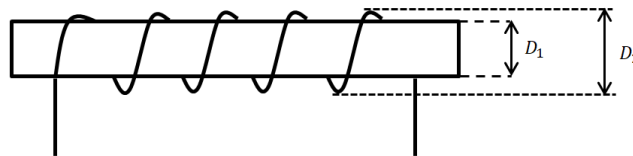


Şekil 2. Tasarlanan proba ait vektörel olarak manyetik akı dağılımı

### 3.2. Prob Tasarımı (Probe Design)

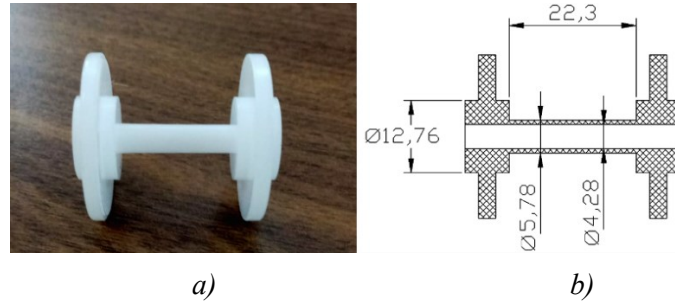
İndüktans hesaplaması yapılırken kullanılan probun merkez çapı, manyetik alanın malzeme yüzeyine bağlanmasında etkili doldurma faktörü,  $\eta$  ile sembolize edilmekte ve Eşitlik 4'te verilen ifade kullanılarak belirlenmektedir [16]. Şekil 3'ten de görülebileceği üzere Eşitlik 4'te yer alan  $D_1$ , tel sarım çapını ve  $D_2$  ise bobin çapını göstermektedir. Genellikle güvenilir muayene için % 70 ile % 90 arasında bir doluluk faktörüne sahip olunması beklenmektedir [17]. Sunulan çalışmada muayene edilmesi istenen AKÇ teller 4 mm çap değerine sahip olup bu değer ve doldurma faktörü dikkate alınarak probun iç çapı belirlenmiştir.

$$\eta = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (4)$$



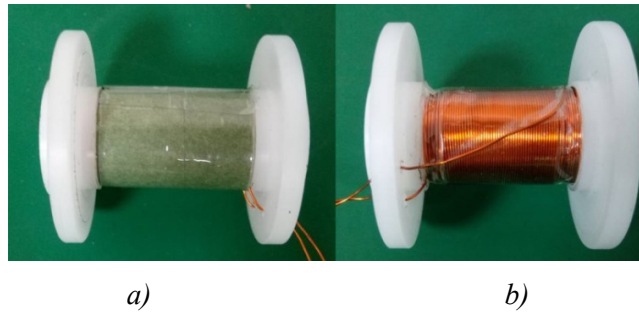
Şekil 3. Doldurma faktörü parametreleri

Şekil 4'te tasarlanan mutlak tip proba ait kestamit malzemedan üretilen karkas ve ilgili karkasa ait boyutlar mm olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Mutlak tip bobin karkası a) Bobin karkası b) Karkasa ait boyutlar

Çalışmada kullanılmak üzere tasarlanmış mutlak tip referans ve test problemlerine ait görüntüler ise Şekil 5'te gösterilmiştir.

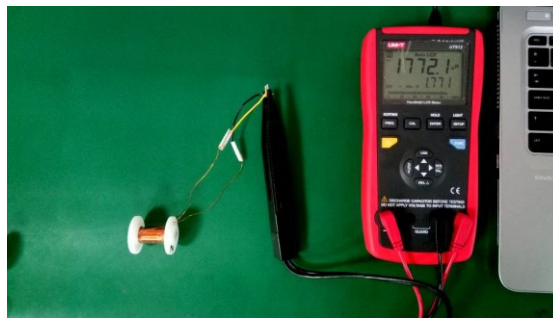


**Şekil 5.** Gerçekleştirilen mutlak tip problemler a) Referans probu b) Test probu

Tasarımı gerçekleştirilen proba ait bobin indüktansının farklı yöntemlerle elde edilmiş değerleri Tablo 1'de karşılaştırılmış ve yapılan deneysel ölçüme ait bir görüntü Şekil 6'da gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Bobin indüktans değeri

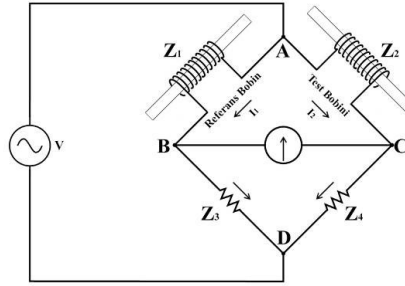
	Anolitik Sonuç (mH)	İki Boyutlu SEA Sonucu (mH)	Üç Boyutlu SEA Sonucu (mH)	Ölçüm Sonucu (mH)
Proba ait Bobin İndüktansı (mH)	1.66	1.53	1.53	1.77



**Şekil 6.** Mutlak tip referans bobine ait deneysel indüktans ölçümü ( $\mu\text{H}$ )

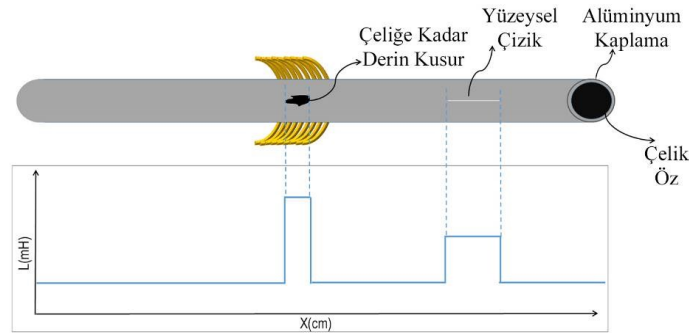
#### 4. TEST YÖNTEMİ VE DENEYSEL ÖLÇÜMLER (TEST METHOD AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS)

Girdap akımları test sisteminde test edilen teldeki kusurlu kısımlar, prob içerisindeki ilgili telin yüzeyinde bulunan süreksizliklerden kaynaklı olarak indüktansta meydana gelen değişime göre belirlenmektedir. Bu değişimin ölçülebilmesi için test ve referans bobinlerin yer aldığı ve Şekil 7’de gösterilen empedans köprü devresi kullanılmaktadır.



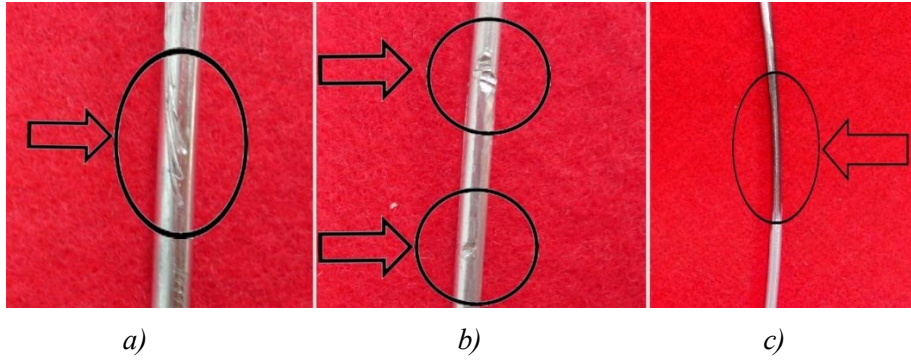
**Şekil 7.** Mutlak tip problar kullanılarak ölçüm yapılabilmesi için gerekli empedans köprü devresi

Şekil 7’de gösterilen köprü devresinde test edilen telin herhangi bir kusura sahip olması durumunda, Şekil 8’den de görülebileceği üzere test probunun indüktans değeri değişecek ve bunun neticesinde de B ile C noktaları arasında bir potansiyel fark oluşacaktır. Bu potansiyel farkların yorumlanması neticesinde ise tel üzerindeki kusurlar belirlenmiş olmaktadır.



**Şekil 8.** Kusurlara göre proba ait bobin indüktansının değişimi

Sunulan bu çalışmada tasarlanan sistem ile çeşitli türlerde kusurlara sahip AKÇ tel numuneleri ile deneyler gerçekleştirilmiştir. AKÇ tel üzerinde oluşan bu çeşitli kusurlar tel çekme üretim hattında meydana gelmektedir. Deneylerin gerçekleştirildiği numune teller, HASÇELİK Kablo San. Tic. A.Ş. firmasındaki tel çekme üretim hattından alınmıştır. Numune tellerin belirli kısımlarında oluşan kusurlar genellikle alüminyum kaplamanın çizilmesi, ezilerek çelik öze doğru açılmalarının olması veya soyulması ile oluşmaktadır. Deneylerin gerçekleştirildiği bu üç tür kusura sahip numune teller Şekil 9’da gösterilmiştir.



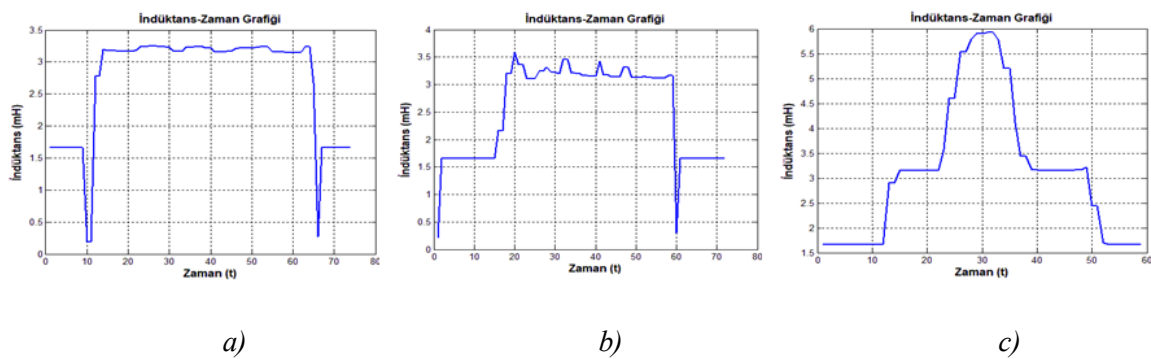
**Şekil 9.** Deneysel ölçümler için kullanılan kusurlu teller a) Al kaplama üzerinde yüzeysel çizik kusuru b) Al kaplama üzerinde yüzeysel ezik kusurları c) Al kaplama üzerinde derin kusur

Tasarlanan bobinler içerisinde kusurlu teller varken bobinlerin indüktans değerlerindeki değişim Tablo 2’de verilmiştir. Ölçümler UNI-T marka, UT612 model, 0.6 Vrms ölçüm voltajına, 100 kHz’e kadar ölçüm frekans değerine ve % 0.5 hata toleransına sahip LCR metre ile alınmıştır.

**Tablo 2.** Tasarlanan bobinin indüktans değişimleri

Kusur Türü	Alt Sınır Değeri (mH)	Üst Sınır Değeri (mH)
Yüzeysel Çizik Kusuru	3.085	3.309
Yüzeysel Ezik Kusuru	3.161	3.254
Çeliğe Kadar Ezik Kusuru	3.184	3.586
Derin Kusur	3.980	5.886

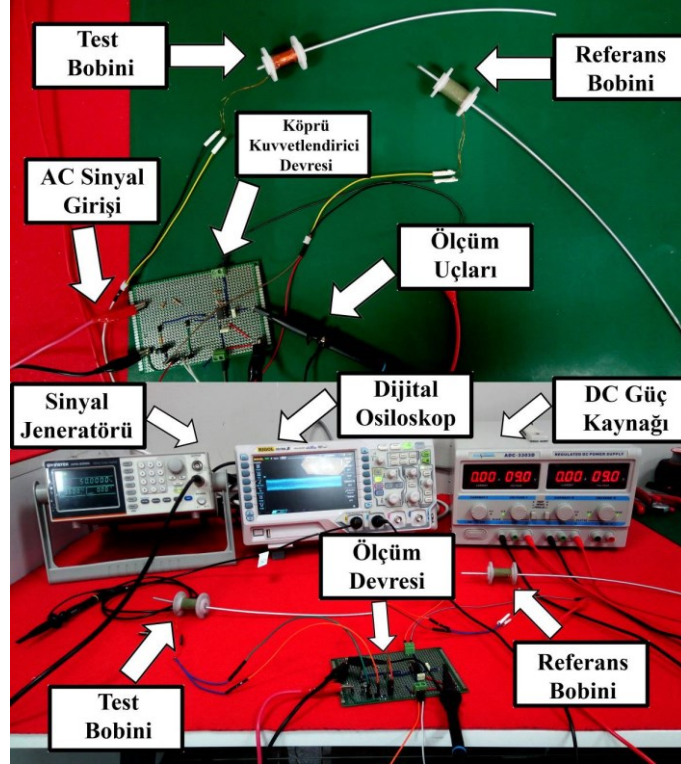
Tablo 2’de verilen değerler LCR metre ile ölçümler sonucunda kaydedilmiştir. Deneylerin gerçekleştirildiği çizik, çeliğe kadar ezik ve derin kusura sahip AKÇ telin muayenesi esnasında bobin indüktansındaki değişim grafikleri Şekil 10’da gösterilmiştir.



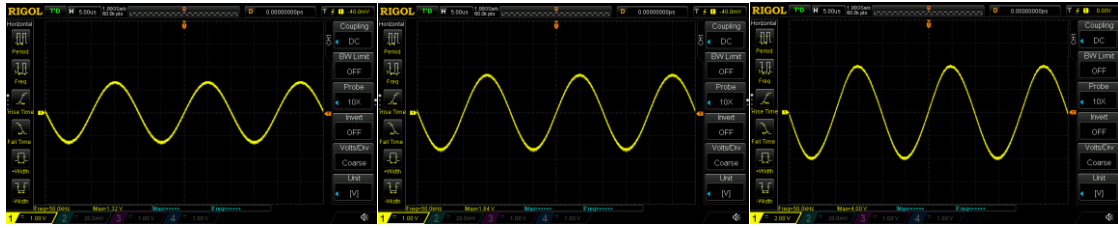
**Şekil 10.** Deneysel ölçümlerde elde edilen indüktans değişimleri a) Al kaplama üzerinde yüzeysel çizik kusur için b) Al kaplama üzerinde çeliğe kadar ezik kusurları için c) Al kaplama üzerinde derin kusur için

Tasarlanan problemlerden alınan elektriksel işaretlerin uygun şekilde değerlendirilebilmesi için enstrümantasyon kuvvetlendirici içeren bir devre kurulmuştur. Kuvvetlendirici olarak yüksek kazançta sahip olan ve köprü kuvvetlendiricileri ölçüm uygulamaları için tasarlanan INA118 entegresi kullanılmıştır. Kuvvetlendiricinin kazancı 6 olarak belirlenmiştir. Devrenin giriş AC işaret değerleri 0.5 Vpp ve 50 kHz’dir. Şekil 11’de deneysel ölçüm düzeneği, Şekil 12’de ise farklı ölçümlerde kuvvetlendirici çıkışında görülen gerilim dalga işaretleri gösterilmiştir.





Şekil 11. Deneysel ölçüm düzeneği



a)

b)

c)

Şekil 12. Kuvvetlendirici çıkışındaki gerilim dalga şekilleri a) Köprü denge durumundayken b) Test bobini içerisinde çizik kusuruna sahip AKÇ tel varken c) Test bobini içerisinde derin kusura sahip AKÇ tel varken

Deneysel ölçümlerde kullanılan AKÇ tel numuneleri üzerindeki yüzeysel çizik hatası yaklaşık olarak 1.2 cm uzunluğa ve 0.25 mm derinliğe sahiptir. Yüzeysel ezik hatası yaklaşık olarak 0.6 cm uzunluğa ve 0.65 mm derinliğe sahiptir. AKÇ tel üzerindeki derin kusur ise 4 mm uzunluğa ve 1 mm derinliğe sahiptir. Üretim sistemlerinde muayenenin anlık olarak yapılması gerektiğinden tasarlanan sistemin ölçüm hız kabiliyeti de önem arz etmektedir. Hataların sistem tarafından maksimum 1 m/sn hızda algılanabildiği laboratuvar ortamında tespit edilmiştir.

Tablo 2’de verilen değerlerden de görülebileceği üzere AKÇ tellerde üretim esnasında meydana gelebilecek hatalar, niteliğine bağlı olarak test bobininin indüktansının değişmesine neden olmaktadır. Test bobinine ait indüktans değişimi ise beraberinde ilgili bobinin empedans değişimini getirmekte ve dolayısıyla Şekil 12’den de görülebileceği üzere enstrümantasyon kuvvetlendirici çıkışında farklı genlikte gerilim işaretleri oluşmaktadır. Sonuç olarak, bu gerilim işaretlerinin değerlendirilmesi suretiyle de ilgili tellerdeki hataların ve niteliğinin saptanabilmesi mümkün olabilmektedir.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, AKÇ tellerin üretim hattında tahribatsız muayene sistemlerinden girdap akımları tekniği ile test edilebilmesi için çevreyici tip prob tasarımı yapılmış ve prototip olarak gerçekleştirilmiştir. Mutlak

tipde tasarlanan proba ait indüktans değerinin hesaplanmasında gerek analitik gerekse de nümerik yöntemler kullanılmış ve sonrasında elde edilen değerler deneysel ölçümlerdeki değerler ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanında, gerçekleştirilen sistemin üretim hattındaki yeterliliklerinin görülebilmesi için hattın daha önceden hazırlanmış olan küçük bir basit modelinde, tasarlanan problemler test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ilgili problemlerin AKÇ tellerde meydana gelebilecek farklı nitelikteki hataların saptanabilmesi ve sınıflandırılabilmesi için kullanılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca AKÇ telin işlevini yerine getirebilmesi için kalite kontrol sürecinde kabul edilebilir olarak belirlenmiş derinlikteki yüzeysel çizik hatalar da tasarlanan problemler ile tespit edilebilmektedir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1501 programı kapsamında 3181430 proje numarası ile desteklenmiştir. Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan HASÇELİK Kablo San. Tic. A.Ş.'ye teşekkür ederiz. Ayrıca, ilgili projede danışmanlık görevi yürüten Doç. Dr. Ahmet Turan ÖZDEMİR'e ve donanım bileşenlerinin hazırlanmasında katkısı bulunan proje ekibinden Şeref TOKMAK ve Merve Karlıtepe ÇETİNKAYA'ya teşekkür etmeyi bir borç biliyoruz.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Moulder, J. C., Uzal, E., & Rose, J. H. (1992). Thickness and conductivity of metallic layers from eddy current measurements. *Review of Scientific Instruments*, 63, 3455-3465.
- [2] Foerster I. D., Product Catalogue - Non-destructive eddy current testing of long products like tubes, bars, wire and profiles, DEFECTOMAT Sensor System Thermal Coil, 1-16, 2020.
- [3] Li, W., Wang, H., & Feng, Z. (2014). Ultrahigh-resolution and non-contact diameter measurement of metallic wire using eddy current sensor. *Review of Scientific Instruments*, 85, 085001-085001.
- [4] Alencar, D. A., Júnior, S. F. S., Vieira, A. L. P. S., & Soares, A. (2009). Eddy current NDT: a suitable tool to measure oxide layer thickness in PWR fuel rods. *International nuclear atlantic conference. Innovations in nuclear technology for a sustainable future, Brazil*.
- [5] Bennoud, S., & Zergoug, M. (2016). Simulation of Cracks Detection in Tubes by Eddy Current Testing. *The International Journal of Multiphysics*, 10, 417-426.
- [6] García-Martín, J., Gomez-Gil, J., & Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 11, 2525-65.
- [7] Desjardins, D. R., Krause, T. W., Tetervak, A., & Clapham, L. (2014). Concerning the derivation of exact solutions to inductive circuit problems for eddy current testing. *NDT & E International*, 68, 128-135.
- [8] Desjardins, D., Krause, T. W., & Clapham, L. (2015). Transient response of a driver-pickup coil probe in transient eddy current testing. *NDT & E International*, 75, 8-14.
- [9] Machado, M. A., Rosado, L., Pedrosa, N., Vostner, A., Miranda, R. M., Piedade, M., & Santos, T. G. (2017). Novel eddy current probes for pipes: Application in austenitic round-in-square profiles of ITER. *NDT & E International*, 87, 111-118.
- [10] Xin, J., Lei, N., Udpa, L., & Udpa, S. S. (2013). Rotating field eddy current probe with bobbin pickup coil for steam generator tubes inspection. *NDT & E International*, 54, 45-55.

- [11] Xie, S., Duan, Z., Li, J., Tong, Z., Tian, M., & Chen, Z. (2020). A novel magnetic force transmission eddy current array probe and its application for nondestructive testing of defects in pipeline structures. *Sensors and Actuators A: Physical*, 309, 112030.
- [12] Nave, R. Inductance of a Coil. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/indsol.html#c1>. Erişim tarihi: Temmuz 5, 2021.
- [13] Terman, F. E. (1943). *Radio Engineers' Handbook*. McGraw-Hill Book Company, Inc.: The United States of America, 74-78.
- [14] Peters, C., & Manoli, Y. (2008). Inductance Calculation of Planar Multi-Layer and Multi-Wire Coils: An Analytical Approach. *Sensors and Actuators A: Physical*. 145-146, 394-404.
- [15] University of Surrey. An Introduction to The Air Cored Coil. [http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air\\_coils.html#wht](http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air_coils.html#wht). Yayın tarihi: 2010. Erişim tarihi: Temmuz 5, 2021.
- [16] General Dynamics & George, C. (1967). *Marshall Space Flight, Nondestructive Testing Eddy Current Basic Principles RQA /M1- 5330.12 (V-I)*. San Diego, Hunstville NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 3-8.
- [17] Bhagi, P. C. (2011). Eddy Current Testing: Basics. *Journal of Non-Destructive Testing & Evaluation*, 10, 7-16.

## Current Approaches in Surface Processing of Biomedical Alloys; Laser Processes

Melek GEDİKOĞLU<sup>1</sup> , Aleyna KOLSAL<sup>1</sup> , Hatice TUTUŞ<sup>1</sup> , Sıdıka Mine TOKER<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Eskişehir/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Review article  
Received: 07/05/2021  
Revision: 21/06/2021  
Accepted: 08/07/2021

#### Highlights

- Biomedical alloys.
- Surface processing
- Laser

#### Keywords

Biomaterial  
Biocompatibility  
Osseointegration  
Laser surface configuration  
Nanosecond laser  
Femtosecond laser

In this study, current approaches in surface processing of biomedical alloys which are applied in order to improve biocompatibility, are reviewed with a focus on laser surface configuration methods.

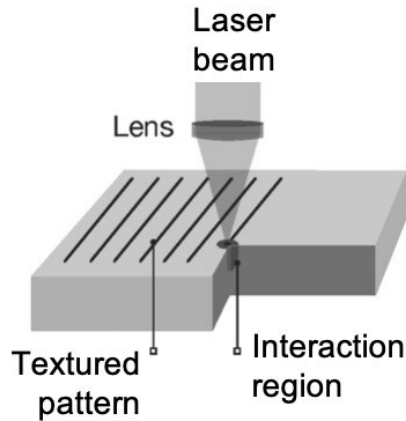


Figure A. Surface texturing with laser

**Purpose:** Biomedical alloys are widely preferred for orthopedic and dental implant applications, mainly owing to their superior mechanical properties. However, due to issues such as elastic mismatch or corrosion, biocompatibility of metallic biomaterials is yet to be improved. Since the first biomaterial-tissue interaction takes place at the biomaterial surface, surface processing methods are commonly applied to improve biocompatibility and specifically osseointegration of implant materials. With this motivation, the current study aims to review current approaches in surface processing of biomedical alloys with a special focus on novel laser surface texturing applications.

**Theory and Methods:** The common methods applied to alter surface properties of biomedical alloys include conventional methods such as; plasma spray coating, grit blasting, acid etching, a combination of sand blasting and acid etching and anodization, as well as novel laser etching methods.

**Results:** The conventional methods in surface processing have some disadvantages such as surface contamination or uneven surface texturing. Laser surface structuring methods on the other hand are promising methods as they provide contamination-free surfaces with controlled texturing.

**Conclusion:** Nanosecond and femtosecond laser surface structuring are novel and promising methods for the surface processing different biomaterial alloys. Especially femtosecond laser surface processing applications were shown to yield clean surfaces with periodic structures which promote cellular adhesion as well as controlling cellular orientation and exhibiting promising results for improving the osseointegration of biomedical alloys.



## Current Approaches in Surface Processing of Biomedical Alloys; Laser Processes

Melek GEDİKOĞLU<sup>1</sup>, Aleyna KOLSALI<sup>1</sup>, Hatice TUTUŞ<sup>1</sup>, Sıdıka Mine TOKER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Eskişehir/Türkiye

### Abstract

One of the branches of science where great developments are taking place today is biomaterials. Biomaterials are natural or artificial materials that can be used for the replacement of diseased or damaged organs or tissues, and in some cases, they can be used for purposes such as correcting body functions or increasing the functionality of organs, replacing a living system or working in contact with living tissue. The known material types that are metallic, ceramic, polymeric and composite materials are each used as biomaterials. Among these, metallic biomaterials and biomedical alloys, which are especially prominent in terms of their mechanical properties, are widely used in many biomedical applications such as orthopedic implants, fracture treatment screws, braces and dental implants. As in all biomaterials, the most important factor determining the success of biomedical alloys is their biocompatibility. Since their first interaction with the biological systems occurs on the material surface, surface treatments are commonly used methods for improving the biocompatibility of biomedical alloys. Among these methods, the laser surface structuring method is a promising, contamination-free, non-contact and environmentally friendly surface treatment technique to modify the surface properties of materials in the biomedical industry. Nanosecond and femtosecond laser surface structuring applications emerge at this point and allow to change the surface properties of different biomaterial alloys. Within the scope of this article, the changes in the surface properties of biomaterials with the effect of nanosecond and femtosecond laser irradiations, applications with different laser techniques were examined and the results were compiled.

### Makale Bilgisi

Derleme makalesi  
Başvuru: 07/05/2021  
Düzeltilme: 21/06/2021  
Kabul: 08/07/2021

### Keywords

Biomaterial  
Biocompatibility  
Osseointegration  
Laser surface  
configuration  
Nanosecond laser  
Femtosecond laser

### Anahtar Kelimeler

Biyomalzeme  
Biyouyumluluk  
Osseointegrasyon  
Lazer yüzey yapılandırma  
Nanosaniye lazer  
Femtosaniye lazer

## Biyomedikal Alaşımların Yüzey İşlemlerinde Güncel Yaklaşımlar; Lazer İşlemleri

### Öz

Günümüzde büyük gelişmelerin gerçekleştiği bir bilim dalı da biyomalzeme bilimidir. Biyomalzemeler, hastalıklı veya hasar görmüş organ ya da dokuların yerine kullanılabilen doğal veya yapay malzemeler olup, bazı durumlarda vücut fonksiyonlarını düzeltmek veya organların fonksiyonelliğini artırmak gibi amaçlarla da kullanılabilen, canlı bir sistemin parçası yerine geçen veya canlı doku ile temas halinde çalışması gereken malzemelerdir. Bilinen malzeme türleri olan metalik, seramik, polimerik ve kompozit malzemelerin her birinin biyomalzeme olarak kullanımı mevcuttur. Bunların arasında özellikle mekanik özellikleri açısından öne çıkan metalik biyomalzemeler ve biyomedikal alaşımların uygulama alanları arasında ortopedik implantlar, kırık tedavi vidaları, diş telleri ve dental implantlar gibi pek çok uygulama mevcuttur. Tüm biyomalzemeler gibi, biyomedikal alaşımların da başarısını belirleyen en önemli faktör biyoyumluluklarıdır. Biyolojik sistemlerle ilk temaslarının malzeme yüzeyinde gerçekleşmesi sebebiyle, biyomedikal alaşımların biyoyumluluklarının geliştirilmesinde yüzey işlemleri uygulanması yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler arasında lazer yüzey yapılandırma yöntemi biyomedikal endüstrisinde malzemelerin yüzey özelliklerini modifiye etmek için gelecek vadeden, kontaminasyonsuz, temassız ve çevre dostu bir yüzey işlem tekniğidir. Nanosaniye ve femtosaniye lazerler ile yüzey yapılandırma uygulamaları bu noktada karşımıza çıkmakta ve farklı biyomalzeme alaşımlarının yüzey özelliklerini değiştirmeye olanak tanımaktadır. Bu makale kapsamında nanosaniye ve femtosaniye lazer ışınlarının etkisiyle biyomalzemelerin yüzey özelliklerindeki değişimler, farklı lazer teknikleri ile yapılan uygulamalar incelenmiş ve sonuçları derlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Biyomalzemeler günümüzde çeşitli sebeplerle işlevini yitirmiş organ ve dokuların tedavisinde veya bunların yerine geçecek sistemlerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metalik, seramik, polimerik ve kompozit bütün malzeme çeşitlerinin, sahip olduğu özelliklere göre biyomalzeme olarak kullanıldığı alanlar bulunmaktadır. Bu malzeme çeşitleri arasında metalik biyomalzemeler, sağladıkları mekanik özellik avantajı sebebiyle özellikle ortopedik ve dental uygulamalar için yaygın olarak tercih edilmektedirler, fakat biyoyumlulukları halen iyileştirilmeye ihtiyaç duyulan bir alandır. Biyomalzemelerin dokularla etkileşimleri ilk olarak yüzeyde gerçekleştiğinden biyoyumlulukları yüzey özellikleri ile yakından ilişkilidir. Biyomedikal alaşımların kemik doku ile temas halinde kullanıldıkları implant uygulamalarında ise, çevre doku ile uyum ve fonksiyonel bağlantının sağlanabilmesi olarak tanımlanabilecek bir özellik olan osseointegrasyon, implantların başarısı açısından en önemli etkenlerden biridir. Metalik implant malzemelerine bu amaçla biyoyumluluk ve osseointegrasyon özelliklerinin geliştirilmesi için çeşitli yüzey işleme yöntemleri uygulanmakta ve yeni yöntemler geliştirilmektedir.

Bu derlemede temel olarak biyomedikal alaşımlara uygulanan güncel yüzey işlemlerine odaklanmak amaçlanmıştır. Bu amaçla biyomedikal alaşımlar, bu alaşımların yüzey özellikleri ve osseointegrasyon kavramı ile ilgili temel bilgiler verildikten sonra uygulanmakta olan geleneksel yüzey işleme yöntemleri tanıtılıp, yeni nesil bir yöntem olan lazerle işleme yöntemi üzerine yoğunlaşmıştır.

## 2. BİYOMEDİKAL ALAŞIMLAR (BIOMEDICAL ALLOYS)

Biyoyumlu metalik malzemelerin çekme ve yorulma dayanımları, kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri polimer ve seramik malzemelerden daha üstündür. Bu sebeple genellikle iskelet sistemi yapısında metalik biyomalzemeler kullanılmaktadır. Metalik biyomalzemelerin diş implantları, yapay eklemler, kalp kapakçıkları, kalça protezleri gibi uygulama alanları bulunmaktadır [1,2].

Biyomedikal alanda yaygın olarak kullanılan biyoyumlu metalik malzemelerden bazıları; kobalt-krom alaşımları, paslanmaz çelik, nikel-titanyum alaşımları ve titanyum alaşımlarıdır [1-10]. Yaygın olarak kullanılan bu metalik biyomalzemelerin mekanik özellikleri ve korozyon dayanımıyla ilgili bilgiler bir kıyaslama şeklinde Tablo-1'de özetlenmekte ve bu bölümün devamında detaylı olarak anlatılmaktadır.

Tablo- 1. Metalik biyomalzemelerin mekanik özellikleri ve korozyon dayanımı [4-7].

Metalik Biyomalzemelerin Mekanik Özellikleri	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	% Uzama Miktarı	Sertlik (HV)	Elastisite Modülü (GPa)	Korozyon Dayanımı
316 L Paslanmaz Çelik	540-1000	170	40	240	200	Karbon oranlarının düşük olması sebebiyle krom-karbür çökmesi oluşma ihtimali düşüktür ve bileşimindeki yüksek krom, nikel, molibden içeriğinden dolayı korozyon dayanımı yüksektir.
CoCrMo Alaşımı	900-1540	600	14	440	240	Yüksek korozyon direncine sahiptir.

Ti	900	480	50	500	105-125	Korozyona karşı üstün bir direnç göstermektedir. Reaktif bir metaldir. Hava, nemli veya redükleyici bir ortama bırakıldıklarında kararlı ince koruyucu tabaka oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka titanyum malzemenin korozyon direncini artırır.
Ti6Al4V	895	825	10	780	110	İyi yorulma dayanımı, işlenebilirlik ve şekillenebilirlik özelliklerine sahiptir. Ayrıca paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında yüksek korozyon direncine sahip olmaları tercih edilebilirliklerini arttırmıştır.
NiTi	1355	560	15,5	350	30-50	Çok iyi süneklik, yorulma dayanımı ve korozyon direncine sahiptir.

**Paslanmaz çelik** kullanılarak üretilmiş ilk metalik biyomalzeme 18/8 Cr/Ni paslanmaz çelik implantlarıdır. Bu tür biyoyumlu malzemeler sağlamlık ve yüksek korozyon dayanımı ihtiyacının karşılanabilmesi için Vanadyum (V) çeliği kullanılarak üretilmiştir. V çeliğinin implant olarak uzun zaman in vivo (canlı ortam) şartlarına maruz kalması yeterli korozyon dayanımının olmaması sebebiyle uygun bulunmamıştır. Bu yüzden paslanmaz çeliklerde korozyon dayanımının artırılması için 18/8sMo takviyesi yapılmıştır. Çelikte bulunan % Molibden (Mo) oranının artırılmasıyla birlikte tuzlu su solüsyonuna karşı korozyon dayanımının da arttığı gözlenmiştir. Bu alaşım ASTM 316 (American Society For Testing And Materials) paslanmaz çeliği olarak bilinen alaşımdır. 1950’li yıllarda yapılan bir çalışmada 316 paslanmaz çeliği içerisinde bulunan karbon (C) oranı maksimum %0,08’den %0,03’e indirilmiş ve alaşımın korozyon dayanımı incelenmiştir. İnceleme sonucunda tuzlu su solüsyonuna karşı korozyon dayanımının daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Karbon (C) oranı %0.03’e düşürülmüş olan 18/8 CrNi paslanmaz çeliğine ASTM 316 L çeliği adı verilmektedir. 316 ve 316L paslanmaz çelikleri implant üretimi için kullanımı en yaygın olan çeliklerdir [1,3,4,7,11].

**Kobalt-molibden-tungsten (Co-Mo-W) alaşımlarının** ilk kullanımı 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Öncelikle uçak motorlarında kullanılmak üzere geliştirilen bu alaşımlar daha sonraları diğer alaşımlara oranla oldukça iyi korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta iyi bir kullanım dayanımı göstermeleri sebebiyle biyomedikal alanda da kullanım imkânı bulmuşlardır. Kobaltın, molibden ve tungsten ile yaptığı bu alaşım “Vitalyum” olarak isimlendirilmektedir. Kobalt-molibden-tungsten (Co-Mo-W) alaşımına ilaveten kobaltın çeşitli alaşım elementleriyle takviyelendirildiği alaşımlar geliştirilmiştir. Bunlar; kobalt-nikel-krom-molibden (Co-Ni-Cr-Mo) alaşımı, kobalt-nikel-krom-tungsten-demir (Co-Ni-Cr-W-Fe) alaşımı ve kobalt-krom-molibden (Co-Cr-Mo) alaşımı olarak örneklenebilir. Günümüzde Co-Cr-Mo alaşımının dental uygulamalarda ve son yıllarda geliştirilen yapay eklem teknolojisinde kullanıldığını

bilmektedir. Ayrıca daha yeni geliştirilmekte olan Co-Ni-Mo alaşımı ise yük altında gösterdiği yüksek dayanım neticesinde eklemlerde (diz ve kalça gibi) ve protezlerde kullanım imkânı bulmaktadır [1-4,10].

**Titanyum (Ti) ve Ti alaşımları** gösterdikleri yüksek spesifik mukavemet (düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet), oldukça iyi korozyon direnci, vücut dokusuna karşı tam uyumluluk, kemik ve diğer dokularla bütünleşip tutunabilme özelliklerinden dolayı biyomedikal uygulama alanlarında en çok tercih edilen malzemelerdir. İmplant uygulamalarında kullanılacak metalik malzemeler için en önemli gereksinimlerden biri de kemik doku ile mekanik uyumdur. Kemik doku, karmaşık hiyerarşik yapısı sebebiyle anizotropik mekanik özellikler gösteren bir dokudur. Kişilerin yaş ve fiziksel özelliklerine göre kemiğin elastik modülü kortikal kemik için 12-30 GPa arası, süngerimsi kemik için ise 0.1-0.5 GPa arasında; basma mukavemeti ise kortikal kemikte 130-180 MPa, süngerimsi kemikte 4-12MPa aralığında değişmektedir [4,12,13]. İmplant malzeme kullanımında titanyum ve alaşımlarının diğer metallere oranla ön plana çıkmasında etkili olan bir diğer özellik de kemiğe daha yakın elastik modülüne sahip olmalarıdır (Tablo-1). Titanyum aynı zamanda biyomedikal uygulama alanları için, vanadyum (V), zirkonyum (Zr), alüminyum (Al), molibden (Mo), niyobyum (Nb), kalay (Sn) ve paladyum (Pd) gibi birçok metalle alaşım yapabilmektedir. Saf titanyum ve titanyum-alüminyum-vanadyum (Ti-6Al-4V) alaşımları ticari implant malzemesi olarak kullanım açısından oldukça sık karşımıza çıkmaktadır [2,4-6,8,9,13,14].

Titanyum, üzerinde oluşan oksit tabaka yapısının kimyasal olarak kararlı halde olması sayesinde mükemmel kimyasal inertlik, korozyon dayanımı ve biyoyumluluk göstermektedir. Yüzeyle oluşan bu oksit tabaka, vücudun karşılaşılabileceği oksidatif stres benzeri kimyasal etkilere karşı koruma sağlar. Aynı zamanda vücut içerisinde malzemenin inert hale getirilmesiyle de aşınmaya karşı implant malzemesini dirençli kılar. Bu mevcut oksit tabakanın zarar görmesi halinde, ortamdaki hava ve su varlığında yeniden oluşabilmesi de mümkün olmaktadır. Yüzeyle oluşan oksit tabaka çevre dokularda zararlı iyon salınımı engelleyerek metalik iyonların difüzyonunu sınırlandırır. Aynı zamanda bu tabakanın oluşumu implantın yüzeyinde kalsiyum ve fosfat birikimini destekler ve kemik ile implant arasındaki biyoyumluluğu sağlar, biyomoleküllerin ve hücrelerin malzemenin yüzeyine yapışmasını destekler [9,14].

**Nikel-Titanyum (Ni-Ti) alaşımları** akıllı malzemelerin bir çeşidi olan şekil bellekli alaşımlardır. Şekil bellekli alaşımların temel özelliği ise malzemeye uygulanan deformasyon sonucunda malzemenin tekrar eski şekil ve boyutunu kazanmasıdır [15]. Bu noktada şekil bellekli alaşımların temel karakteristiği, belirli bir dönüşüm sıcaklığını belirleyen farklı element oranlarıyla bu dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde meydana gelen iki farklı kristal yapı ve şekil oluşmasıdır. Belirlenen dönüşüm sıcaklığının üstünde meydana gelen yapıya östenitik yapı, altında meydana gelene yapıya ise martenzitik yapı adı verilir. Martenzitik yapının ısıtılarak östenitik yapı yani ana faza dönüştürülme işlemi ise şekil bellek özelliğini tanımlamakta ve tüm bu işlemler sonucunda malzeme ilk şekline geri dönmektedir [1-4].

NiTi alaşımları iyi bir korozyon direnci göstermelerinin yanı sıra ısı kararlılık, yorulma dayanımı, biyoyumluluk ve muhteşem süneklik gibi özelliklere sahiptir. Farklı birçok sektörde kullanılmakla birlikte özellikle biyomalzeme uygulamalarında ortopedik protezler, ortodontik teller, diş köprüleri ve kafatasındaki damar bağlantılarında kullanımı örnek gösterilebilir. [2, 3, 10, 15]

Metalik biyomalzemelerin mekanik özellikler açısından avantajlı olduğunu söylemek mümkündür (Tablo-1) [5-7]. Ancak bu biyomalzemelerin vücut içinde kullanımının, başta korozyon olmak üzere metal iyon salınımı, bazı dokulara göre daha sert yapı, yüksek yoğunluk ve biyoyumluluklarının diğer biyomalzemelere göre daha düşük olması gibi bazı dezavantajları vardır [1-7].

Metallerde biyolojik ortama uygunluk durumu vücut içinde malzemenin korozyona uğrama faktörüyle ilişkilendirilebilir. Korozyon malzemenin çevre etkisiyle bozulması ve kimyasal reaksiyon sonucu malzemenin aşınmasıdır. İnsan vücudunda bulunan kan, su, klorür, çözülmüş oksijen gibi farklı iyonlar ve vücuttaki farklı pH yapısı ise metalik biyomalzemeler için korozif bir ortam oluşturmaktadır. Korozyonun meydana gelmesiyle oluşacak korozyon ürünlerinin ise dokulardan hücrelere ulaşması ve hücreye zarar



vermesi risklidir [1-7,15]. Bu nedenle metalik biyomalzemelerin korozyon direncinin iyileştirilmesi oldukça önemli bir konudur.

Geçmişte korozyon direncinin düşük olması sebebiyle karbon çeliği yerini daha sonra krom, vanadyum ve nikel çeliklerine bırakmıştır. Ancak gelişen teknolojiyle birlikte ortaya çıkan bu yeni mühendislik malzemeleri de istenilen özellikleri tam anlamıyla karşılamamış ve bu malzemelerde de insan vücudunda toksik özellik meydana getirme ve korozyona dayanıklı olmama problemi açığa çıkmıştır. Daha sonrasında bazı alaşımlar temel biyomedikal malzeme olarak kullanılmaya başlanmış özellikle de titanyum ve titanyum alaşımları ortopedik uygulamalarda yaygın kullanılan biyomalzemeler haline gelmiştir [1-7,10].

Gelişen teknoloji ve sürekli yenilenen sistemle bu malzemelerin biyouyumluluklarını iyileştirme konusunda birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir. [2,4-7,11,15]

### 3. BİYOMEDİKAL ALAŞIMLARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİ VE İMPLANTLARDA OSSEOİTEGRASYON (SURFACE PROPERTIES OF BIOMEDICAL ALLOYS AND OSSEOİTEGRATION OF IMPLANTS)

Biyomedikal alanda kullanılan implant malzemelerin vücut içerisinde kullanımı biyouyumluluk başta olmak üzere, kullanılan implant malzemesinin özellikleri ve dizaynı gibi birçok faktöre bağlıdır [13]. Bu faktörler incelendiğinde özellikle yapısal bütünlük sağlama, mekanik dayanım ve biyouyumluluk özelliği biyomalzemelerin insan vücudunda istenilen işlevleri yerine getirebilmesi için sahip olması gereken özelliklerdir. En belirgin mekanik özelliklere iyi bir yorulma ve bükülme direncinin yanı sıra yeterli mekanik dayanım sağlaması örnek gösterilebilir. Burada önemli olan diğer bir özellik ise malzemenin, içinde bulunduğu biyolojik ortamda özelliklerinde bir bozulma olmadan işlevselliğinin devamlılığını sürdürebilmesidir ki implant malzemelerinde bu bozunum türleri biyolojik bozunum ve mekanik bozunum olarak karşımıza çıkmaktadır [8]. Bir biyomalzemenin vücuda implantasyonu sonrası, vücut implante edilen malzemeye karşı çeşitli şekillerde yabancı cisim doku reaksiyonu gösterir. İmplantasyon sonrası implant yüzeyine ilk olarak su molekülleri bağlanır. Yüzeydeki su moleküllerine  $Cl^-$ ,  $Na^+$ , and  $Ca^{+2}$  gibi iyonlar katılır ve bunu kan proteinleri ile dokuya özgü proteinlerin yüzeyde adsorbe olması süreci takip eder. Bu süreç ile yüzeyde oluşan biyofilm tabakası kemik hücrelerinin tutunma sürecini belirler. Hücre tutunması ise, yapışmayı sağlayan spesifik transmembran reseptörleri olan integrinler tarafından gerçekleştirilir [16]. Bu esnada vücut sıvısı ve dokuyla etkileşim durumunda olan biyomalzemeler, hızlı gelişen iltihap reaksiyonları ya da kronik iltihap reaksiyonları ile deformasyona uğrayabilir, korozyon ve çözülmenin sebep olduğu kimyasal değişimlerle birlikte bütünlüklerini yitirmeleri de deformasyonlarını tetikleyebilir. Oluşan bu deformasyonlar implant malzemesinin yerine getirmesi gereken görevi engellerken, malzemenin bozunuma uğraması ve dokuda hasara neden olacak ciddi problemlerin ortaya çıkmasına neden olur. Yapılan çalışmalar ve bu süreçte yaşanan gelişmelere rağmen bu sorunlar ile hala karşılaşmaktadır. [13,14].

İmplant malzemelerinin türüne, kullanıldığı bölgelere ve bu bölgelerin hareketlerine bağlı olarak implantlarda meydana gelen bozunumlar farklılaşabilmektedir. Dental ve ortopedik uygulamalarda uzun dönem implant başarısı, kullanılan implant malzemesi ile vücut dokusu arasında oluşacak olan bağın kuvvetine bağlıdır. Osseointegrasyon veya osteointegrasyon olarak isimlendirilen durum, kemik doku ile yük taşıyan implant malzemesinin yüzeyi arasında oluşan yapısal veya fonksiyonel bağlantının bir ölçüsüdür. Osseointegrasyonun tam olarak sağlanamaması durumunda implantın gevşemesi söz konusudur [17]. İmplantın yerleştirilmesinden sonra kemik ile implant arasında kuvvetli bağın oluşabilmesi için birkaç aylık süre tanınmaktadır. Kemik oluşumunun yeterli olmaması durumunda implant malzemesinin çevresinde fibröz denilen bağ dokusu birikimi gerçekleşir ve bu durum osseointegrasyonun sağlanamamasına neden olur [8]. Bu nedenle implant uygulamalarında implant malzemesi ile kemiğin uyum süreci oldukça önemlidir. Araştırmalar kemik doku ile implant bütünlüğünde, kullanılan implant malzemesinin sahip olduğu yüzey özelliğine bağlı olarak kemik dokunun gösterdiği tutunma şiddetinin değiştiğini göstermiştir. Bu durum bize cerrahi teknik ve implant tasarımının yanında osseointegrasyonun sağlanabilmesi için implant malzemesinin yüzey özelliklerinin de beraberinde bir tasarım parametresi

olarak büyük ölçüde önem arz etmekte olduğunu açıklamaktadır. İmplant malzemelerinde yüzey kimyası, yüzey topografyası, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey enerjisi gibi yüzey özelliklerinin değiştirilmesiyle osseointegrasyonun artırılması mümkündür.

Kusursuz implant malzeme tasarımındaki öncelikli amacın, implant malzemelerinin kemik iyileşme mekanizmasını engellemeyecek, aksine bu sürece yardımcı olacak bir yüzey etkisine sahip olması gerektiği vurgulanmaktadır [18]. Geçmiş çalışmalar implant yüzeyinde oluşan biyoaktif tabaka kaynaklı fizikokimyasal uyarılar ile implant yüzeyinde bulunan mikro veya nano ölçekteki çıkıntı, oyuk gibi yüzey özellikleri ve topografya ile ilişkili yapıların osseointegrasyon sürecini çok yakından etkilediğini göstermektedir [16].

Yüzey pürüzlülüğü osseointegrasyon kalitesi ve oranını etkileyen en önemli parametre olarak kabul edilmektedir. Titanyum implantların yüzey pürüzlülüğünün implantın osseointegrasyonunu ve biyomekanik fiksasyon oranını etkilediğini gösteren çok sayıda çalışma mevcuttur [19,20]. Osseointegrasyonun geliştirilmesi için implantlar üzerinde çeşitli yüzey işlemleri denenmiştir. Yüzey işlemleri, istenilen özelliklere sahip olan bir materyalin modifiye edilerek daha iyi özelliklere sahip olması için uygulanmaktadır. Bu şekilde ıslanabilirlik, hücre proliferasyonu, hücre büyümesi artmakta ve osseointegrasyon süreci hızlanmaktadır [21,22].

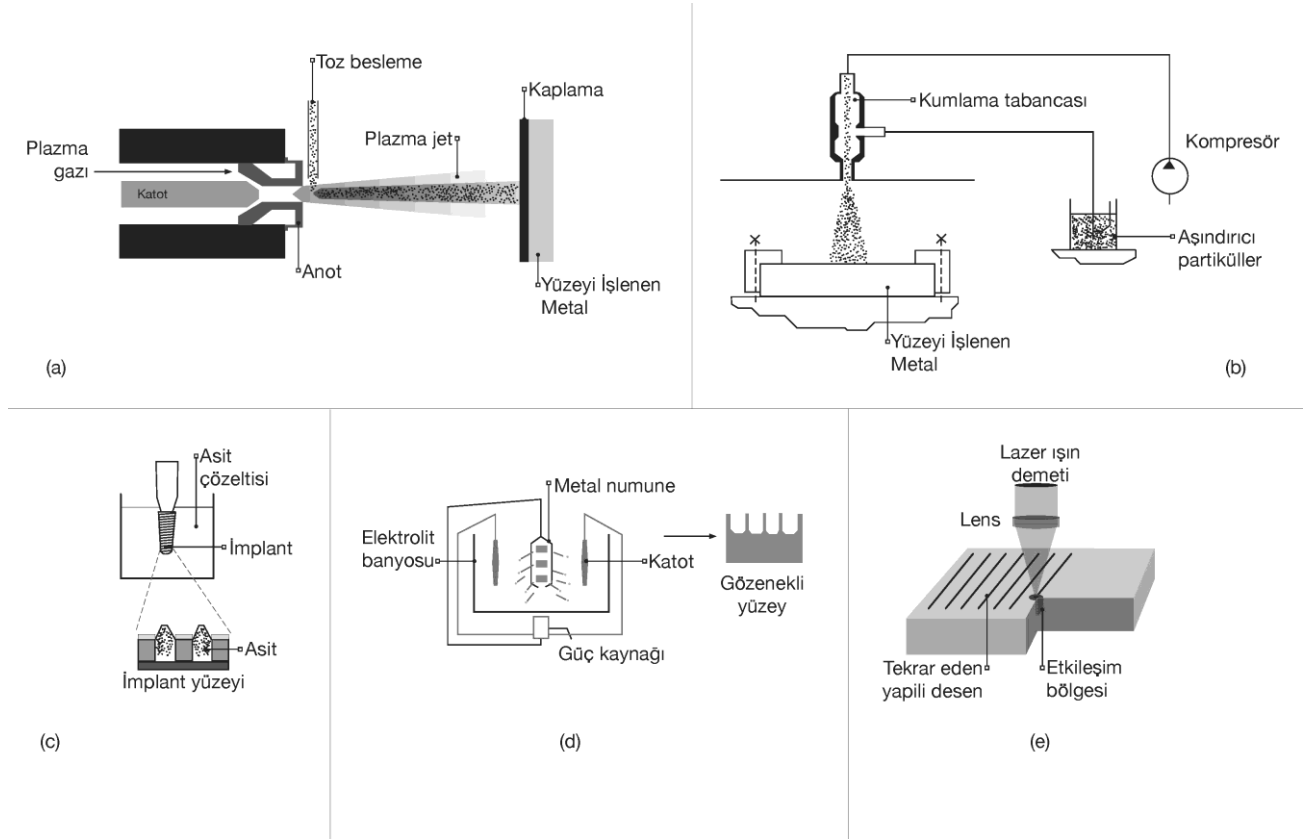
Yüzey pürüzlülüğü topoloji özelliğine göre üç gruba ayrılmaktadır. Dental implantlar için 10 µm ile milimetre arasındaki pürüzlülük makro, 1- 10 µm arasındaki pürüzlülük mikro ve 10 µm' den daha küçük pürüzlülük nano ölçek olarak adlandırılmaktadır. Pürüzlü implant yüzeylerinin ıslanabilirlik, hücre proliferasyonu, hücre büyümesi, osseointegrasyon süreci üzerinde avantajları olsa da pürüzlülüğün fazla olmasının dezavantajları da vardır. Fazla pürüzlülük implant ile kemik arasındaki mekanik bağlantıyı artırmakla birlikte iyonik sızıntıyı da artıracığından periimplantitis için büyük bir risk oluşturmaktadır [23]. Bu nedenle ortalama pürüzlülük değerinin 1–2 µm ile sınırlı tutulması gerekmektedir [24]. Teorik bir yaklaşıma göre ideal bir yüzeyin 4 µm çaplı yarım daire şeklinde 1,5 µm derinliğinde olması önerilmektedir [25]. Birçok çalışma bu aralıktaki yüzey pürüzlülüğünün diğer yüzey topoğrafilerine göre kemik-implant arasındaki teması ve yerinden çıkarıcı tork kuvvetlerine karşı direnci artırdığını göstermiştir [20-26].

#### **4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ DEĞİŞİMİ İÇİN İMPLANT MALZEMELERİNE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ (SURFACE PROCESSES APPLIED TO IMPLANT MATERIALS FOR SURFACE ROUGHNESS ALTERATION)**

İmplant yüzeylerini pürüzlendirmek için yapılan işlemler, yüzey işlemleri veya modifikasyon metotları olarak adlandırılmaktadır. İmplantların yüzey alanları artırılarak pürüzlendirme sağlanmaktadır. Yüzey alanı, ilave veya eksiltme gibi modifikasyon teknikleri kullanılarak önemli miktarda artırılabilir [27,28]. İlave metot, kaplama veya emdirme işlemleri ile gerçekleştirilmektedir. Eksiltici teknikler ise kor materyalden tabaka kaldırma veya yüzeyden yüzeysel olarak plastik deformasyon ile kor materyalin yüzeyinin pürüzlendirilmesi şeklinde olmaktadır.

İmplant yüzeyinin kemik minerali ile kimyasal olarak benzerlik gösteren ve kemik doku oluşumunu tetikleyici bir biyoseramik olan hidroksiapatit ile kaplanması veya yüzeyde biyoaktif apatit oluşumunu tetikleyici işlemler uygulanması da osseointegrasyonun artırılması amacıyla implant yüzeylerine yaygın olarak uygulanan yöntemler arasındadır [29-34]. Yüzeye hidroksiapatit tabakası kaplanması amacıyla kimyasal daldırma işlemleri, plazma sprey kaplama veya püskürtme gibi yöntemler kullanılmaktadır [29-32]. Sentetik vücut sıvıları içinde statik daldırma ile biyomimetik kaplama yöntemi ise, yüzeyde apatit oluşumunun tetiklenmesi ile biyoaktivitenin artırılması amacıyla uygulanan, osseointegrasyonun iyileştirilmesinde önemli rol oynayan bir diğer yöntemdir [33,34].

Bu bölümün odağını oluşturan implant yüzeylerinin pürüzlülüğünü değiştirmek amacıyla yaygın olarak uygulanan çeşitli yüzey işleme yöntemleri ise, bölümün devamında alt başlıklara ayrılarak açıklanmıştır. Bu işlemler şematik olarak ise Şekil 1’de gösterilmektedir [35-41].



Şekil 1. İmplant malzemelerine uygulanan yüzey işleme yöntemleri: (a) Plazma Sprey Kaplama, (b) Grit Kumlama, (c) Asitle Pürüzlendirme, (d) Anodizasyon, (e) Lazerle Yüzey Pürüzlendirme.

#### 4.1 Plazma Sprey Kaplama (Plasma Spray Coating)

Plazma sprej kaplama, birkaç milimetre ile birkaç mikrometre arasında değişen bir kalınlıkta kaplama oluşturulabilir. İmplantların titanyum sprej ile kaplanması (TPS) yaklaşık olarak 7  $\mu\text{m}$  arasında pürüzlülük sağlar. Kaplama işlemi termal olarak eritilmiş materyallerin implant yüzeyine püskürtülmesi şeklindedir [29, 35] (Şekil 1-a). Plazma sprej esas itibarıyla yüzey pürüzlülüğünü artırarak implantların yüzey alanını artırmaktadır [29, 35].

Plazma sprej kaplamanın mekanik olarak tutunmasını sağlamak için, metalik implantın yüzeyinin grit kumlama gibi bir yol kullanılarak pürüzlendirilmesi gereksinimi ve mini implantların kaplanması için çok etkin bir yöntem olmaması tekniğin dezavantajı olarak gösterilebilmektedir. Ayrıca çözünme, aşınma, sürtünme sonucu implantlardan salınan metal iyonlarının, lokal ve sistemik olarak potansiyel zararlı kanserojen etkilerinden dolayı endişe duyulmaktadır [29, 35].

#### 4.2 Grit Kumlama (Grit-Blasting)

Grit kumlama işlemi, sert seramik parçacıkları veya silika partiküllerinin basınçlı bir şekilde implant yüzeyi üzerine hızla atılması şeklinde gerçekleştirilmektedir (Şekil 1-b). Kumlama materyali olarak sıklıkla Alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kullanılmaktadır. Kumlama materyali genellikle implant yüzeyine gömülü olarak kalmaktadır [36, 42]. Grit kumlamayı her zaman yüzeyde kalan artık kumları uzaklaştırmak amacıyla asitle

aşındırma takip eder. Kumlama işleminin dezavantajı yüzeyde yüzeyi kirletici bir etkiye neden olmasıdır [43].

#### 4.3 Asitle Pürüzlendirme (Acid Etching)

Asitle dağlama 0,5-2 µm çap arasında değişen boyutları ile titanyum yüzeylerde mikro çukurlar oluşturur [44]. Asitle aşındırma işleminde asit seçimi ve süreç son derece önemli olmaktadır. Aşındırma oranının kullanılan asit tipine ve konsantrasyonuna bağlı olduğu rapor edilmiştir [45]. Konsantre HCl ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> karışımı içinde titanyum implantların birkaç dakika batırılması ve 100 °C üzerinde ısıtılması ile mikro pürüzlü yüzeyler üretilmektedir (Şekil 1-c). Bu işlem çift asitle aşındırma olarak isimlendirilir. Deneysel çalışmalar yüksek sıcaklıkta asit-dağlamanın TPS yüzeylere oranla homojen bir mikro pürüzlü bir yüzey ve daha yüksek kemik implant teması oluşturduğunu göstermiştir [37,38]. Fakat kimyasal işlemlerin titanyumun mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin, asitle aşındırma hidrojen gevrekleşmesine neden olup yüzey üzerinde mikro çatlaklar yaratarak implantların yorulma direncini azaltabilmektedir [46].

#### 4.4 Kumlanmış ve Asitlenmiş Yüzeyler (Sand Blasted Asit Etched (SLA) Surfaces)

Yüzey pürüzlülüğünü artırmak için grit kumlama ve asitle aşındırmanın art arda kombinasyonu şeklinde uygulanmaktadır (Şekil 1-b ve c). Ortalama yüzey pürüzlülüğü asitle dağlanan yüzeylerde 1,3 µm kumlanmış ve asitlenmiş yüzeylerde 2 µm olarak bulunmuştur [47].

#### 4.5 Anodizasyonla Pürüzlendirme (Anodization)

Metal yüzeyinde H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, HF gibi güçlü asitler içerisinde 200 A/m<sup>2</sup> yüksek akım yoğunluğu ya da 100 V potansiyel kullanılarak potansiyostatik veya galvanostatik anodizasyon ile mikro veya nano gözenekli yüzeyler üretilebilir (Şekil 1-d). Anotlama işlemi oldukça karmaşıktır ve akım yoğunluğu, asit konsantrasyonu, bileşimin elektrolit sıcaklığı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Biyomekanik ve histomorfometrik testler kullanılarak anotlanmış yüzeyler ve işlenmiş (machined) yüzeyler karşılaştırıldığında anotlanmış yüzeylerde kemik cevabının daha yüksek değerlere sahip olduğu gösterilmiştir [39,40].

#### 4.6 Lazerle Pürüzlendirilmiş Yüzeyler (Laser Etched Surfaces)

Daha güncel bir yöntem olan lazerle pürüzlendirme tekniğinde implant yüzeyinin bazı noktalarına yoğun lazer ışını uygulanmaktadır [40,41,48-55] (Şekil 1-e). Bu şekilde 1 µm veya daha küçük çukurcuklar elde edilebilir. Yüzey üzerinde geniş çukur oluşumunu engellemek amacıyla kinofom adı verilen ışın kırıcı element kullanılmaktadır [40]. Lazerle pürüzlendirme tekniği sayesinde ideal bir osseointegrasyon için gerekli olan yeterli pürüzlülük, yüksek saflık derecesi, artmış korozyon dayanıklılığı ve sertlik sağlanabilmektedir [40]. Yabancı element kontaminasyonu olmaksızın temiz bir yüzey elde edilmesi ve biyolojik avantaj sağlayan morfoloji oluşturması nedeniyle umut verici bir metottur [48].

Lazer ile pürüzlendirme yönteminde kullanılan lazerlerin temel çalışma prensibi, malzeme yüzeylerine çeşitli amaçlarla uygulanan lazer işlemleri ile implant yüzeylerinin lazerle işlenmesine dair detaylı bilgiler 5. kısımda sunulmuştur.

### 5. BİYOMEDİKAL ALAŞIM YÜZEYLERİNİN LAZER İLE İŞLENMESİ (LASER PROCESSING OF BIOMEDICAL ALLOY SURFACES)

Lazer ile yüzey işlenmesi esnasında optimum özelliklerin sağlanabilirliğinde birbiriyle rekabet eden birçok proses vardır ve bu noktada lazer ile işleme düşük distorsiyon ve yüksek üretilebilirlik gibi faydalarından dolayı endüstriyel uygulamalarda rekabetçi bir konuma sahiptir.

Lazerler (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), Theodore H. Maiman tarafından 1960 yılında üretilen ilk lazerden günümüze kadar çeşitli alanlarda (savunma [56], tıp [57], temel bilimler [58], iletişim [59], sanayi [60]) kullanımlarıyla öne çıkan ışık kaynaklarıdır. Lazerler, uyarılı

ışımının (stimulated emission) optik rezonatör ve kazanç ortamı (gain medium) vasıtasıyla yükseltilmesi (amplification) sonucunda; tek dalgaboyunda, tek yönlü, yüksek parlaklığa sahip ve uzay-zamanda uyumlu (coherent) fotonlar üretebilen cihazlardır [61,62].

Kazanç ortamının türüne bağlı olarak lazerleri sınıflandırmak mümkündür. Lazer çeşitleri arasında; katıhal, gaz, boya lazerleri yer almaktadır. Bunlar arasında, dayanıklılık, verimlilik, dalgaboyu ayarlanabilirlik, yüksek güçler ve kısa süreli optik darbeler üretebilme kabiliyeti gibi özellikleri nedeniyle öne çıkan ve hem ticari üretimde hem de laboratuvar ortamlarında sıklıkla kullanılan lazer türü katıhal lazerleridir. Bu makalede incelenen çalışmalarda da ışık kaynağı olarak katıhal lazerler tercih edilmiştir. Katıhal lazerlerinde kazanç ortamı olarak, lazer aktif iyon ile katkılandırılmış kristal, cam veya seramik tabanlı malzemeler kullanılmaktadır. Literatürde katıhal lazerler isimlendirilirken, kullanılan kazanç ortamının türünden faydalanılmaktadır. Örnek olarak Ti:safir lazeri, titanyum iyonu ile katkılandırılmış safir kristalini kazanç ortamı olarak kullanan ve yaygın olarak tercih edilen bir katıhal lazeridir. Üretilen ilk lazer de bir katıhal lazeridir [63] ve bu tip lazerler, kullanılan lazer aktif iyonun ışınım dalgaboyuna bağlı olarak yakın kızılaltı ve kızılötesi gibi bölgelerde ışık kaynağı olarak kullanılabilir [64].

Uygulama amacına bağlı olarak, sürekli-dalga (continuous-wave) ya da darbeli (pulsed) lazerler geliştirmek mümkündür. Sürekli-dalga lazerlerde, lazerin çıkış gücü zamana bağlı olarak dikkate değer bir değişim göstermemektedir. Darbe üreten lazerlerde ise çıkış gücü kısa süreli periyotlar şeklinde üretilmektedir [61, 64]. Katıhal lazerlerinden darbe üretim teknikleri başlı başına bir araştırma alanı olup, detaylı bilgilere [61,64,65]'da yer verilmektedir. Günümüzde, bir kaç femtosaniye mertebesinde süreye sahip darbeler üretilen katıhal lazerleri geliştirmek mümkündür [66]. Femtosaniye katıhal lazerleri kaynak olarak kullanan bir sistemde ise 43 attosaniye mertebelerine kadar süresi kısalmış darbe üretimi yakın zamanda gösterilmiştir [67]. Lazerler, sahip oldukları yüksek parlaklık ve üretilen ışığın dağılmadan ilerleyebilmesi gibi özellikleri sayesinde malzemelerin hassas bir şekilde işlenmesine olanak vermektedirler. Lazerlerin bu genel özelliklerinin yanı sıra, kısa süreli darbeler üretebilen lazerlerin ışık ile malzeme etkileşiminde öne çıkan ek özellikleri bulunmaktadır. Sürekli-dalga lazerlerden farklı olarak kısa süreli darbeler üretebilen lazerler, düşük çıkış güçlerinde (average output power) bile malzeme işleme için yeterli olacak darbe tepe güçlerine ve darbe enerjilerine (pulse peak power, pulse energy) erişebilmektedirler. Lazerin ürettiği darbenin süresi (darbe genişliği: pulse width) kısaldıkça, çıkış gücü aynı kalsa bile darbe tepe gücü artmaktadır. Benzer şekilde, lazerin ürettiği darbelerin tekrar frekansını (pulse repetition rate) azaltıkça aynı çıkış gücünde daha yüksek enerjiye sahip darbeler elde etmek mümkündür. Bu özellikler sayesinde malzemenin yapısına zarar vermeyecek şekilde anlık etkileşimler elde etmek mümkün olmaktadır. Sürekli-dalga çalışan bir lazer ile malzeme yüzeyinde işleme yapılmak istendiğinde malzemenin maruz kaldığı lazer gücü artmakta ve etkileşim süresi de uzamaktadır. Örnek olarak femtosaniye bir lazer ile işleme yapıldığında, lazer ve malzeme arasındaki etkileşim süresi kısalmakta ve istenilen yüzey değişikliği işlemi daha düşük güçlerde de yapılabilmektedir. Sonuç olarak malzeme daha az ısıya maruz kaldığı için mikroyapısı daha az etkilenmektedir ve daha hassas işleme yapılabilmektedir [68].

Lazerle yapılan birçok yüzey işleme tekniği mevcuttur. Bu teknikler yüzey özelliklerini ve yüzey modifikasyonunu geliştirmeyi amaçlamakla birlikte metalik malzemelerin yüzeylerinin sertleştirilmesi ve aşınma kaybının azaltılmasında fayda sağlamaktadır.

Metalik malzeme yüzeylerine lazerler ile uygulanan işlemler arasında yüzey sertleştirme işlemleri öne çıkmaktadır [69-73]. Geleneksel olarak yapılan ısı işlemler ile lazer ışını ile yapılan yüzey sertleştirme işlemleri karşılaştırıldığında; lazer ışını ile sertleştirilen yüzeylerde daha kaliteli yüzey, daha hızlı işlem, daha dar toleranslar ve prosesin kontrolünün daha kolay sağlanması gibi üstünlükler sağlanmaktadır [74]. Literatürde öne çıkan lazer işleme ile metalik malzemelere uygulanan bazı kaplama ve yüzey sertleştirme işlemleri aşağıda örneklendirilmiştir.

Zeisig vd. (2017) FeCrMoVC lazer kaplama alaşımının mikroyapı ve abrasiv aşınma davranışı odağında yüksek performanslı takım çelikleri için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada atımlı Nd: YAG lazer sistemi kullanılmış ve Fe85Cr4Mo8V2C1 (ağırlıkça%) lazer kaplama tel malzemesi yüksek performanslı

bir takım çeliğine (1.2379, X155CrMo12-1) başarıyla uygulanmıştır [69]. Soriano vd. (2010) östemperlenmiş sünek dökme demir kalitesinin, lazerle yüzey sertleşme sonucunda elde edilen mikroyapı sertlik ve artık gerilmelere etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda aşımaya dirençli etkili bir katman oluşturulduğu ve östemperlenmiş sünek demirlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için lazerle yüzey sertleştirme yönteminin uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir [70]. Lee vd. tarafından AISI H13 takım çeliğinde fiber lazer kullanılarak yüzey sertliğini iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmada, lazer ile yüzey sertleştirme işleminden sonra çeliğin sertleşme derinliği ve genişliğinin arttığı gözlenmiştir [71]. Adel (2014) tarafından CK45 çelik alaşımının kuru kayma özelliğinin geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmada Nd: cam lazer kullanılmış ve elde edilen sonuçlar sertlik değerinin yüksek lazer enerjisi ile önemli ölçüde arttığı ve lazerle yüzey sertleştirme işleminden sonra kuru kayma aşınma direncinin de yüksek olduğunu göstermiştir [72]. Guarino vd. (2017) tarafından, AISI 1040 çelik bileşenlerin yorulma ömrünü artırmak için yüksek güçlü bir diyet lazeri uygulanarak gerçekleştirilen çalışmada lazer ışını ile çelik yüzey arasındaki etkileşim incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda lazer işlemi uygulanmış bileşenlerin yorulma ömrünü önemli ölçüde arttırabileceğini ve böylece bu yöntemin endüstriyel uygulamalar için uygun olacağı belirtilmiştir [75]. Syed vd. (2017) tarafından lazer yüzey sertleştirme işlemi ile C-Mn düşük karbonlu otomotiv çelik sac üzerinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tabakalı kompozit bir yapı oluşturmak amacıyla, çelik sacda, derinlik ve kalınlık boyunca yüksek güçlü diyet lazer kullanılarak yüzey sertleştirme işlemi yapılmış ve sertlikte önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır [73].

Biyomedikal uygulamalarda ise lazer işlemleri ağırlıklı olarak yüzey özelliklerinin değiştirilmesi ile korozyon direnci, ıslanabilirlik, hücre yapışma ve büyüme davranışı gibi parametrelerin kontrolü ile implantlarda osseointegrasyonun iyileştirilmesi hedefiyle uygulanmaktadır [49-55]. Bu amaçla biyomedikal alaşımların yüzeyine uygulanan lazer işlemlerinde genel olarak darbeli katihal lazerleri kullanılmaktadır. Bu makalede incelenen çalışmalarda da kısa süreli (nanosaniye, femtosaniye) darbeler üreten lazerler ile yapılan çalışmalara yer verilmektedir. Farklı darbe sürelerinin malzeme işleme etkilerinin yanı sıra, lazer gücü veya farklı lazer akılarının malzeme işlemedeki etkisi de (fluence) çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmalarda lazer ile desenleme yöntemi olarak kullanılan lazer ışın demeti ya da yüzeyin birbirine göre hareketli olduğu düzenek Şekil 1-e’de şematik olarak gösterilmektedir [41]. Bu bölümün devamında metalik biyomalzemeler üzerinde femtosaniye ve nanosaniye lazerle yüzey işleme uygulamalarının sonucu olarak yüzey özellikleri ve morfolojik özelliklerde meydana gelen değişimler ile bu değişimlerin biyoyumlu özellikleri üzerindeki etkilerine yer veren güncel çalışmalar incelenmiştir.

Femtosaniye lazer ışınlama uygulamalarına örnek olarak; Ti uygulamaları, Ni-Ti alaşım uygulamaları, Ti6Al4V uygulamaları ve Mg-Gd-Ca alaşım uygulamaları incelenmiştir.

**Titanyum** yüksek korozyon direnci ve kemikle uyumlu mekanik özellikleri sayesinde biyomalzeme olarak kullanımı yaygın bir malzeme olmasına rağmen uzun süreli kullanımında biyoyumluğu ile ilgili sorunlar ortaya çıkabilmektedir [9, 49]. Bu sorunun çözümü için geliştirilen bir yöntem olarak; titanyum malzeme yüzeyinde femtosaniye lazer ile hücre yayılımını kontrol edebilen periyodik nanoyapılar oluşturulmuş ve darbe genişliği ile atış sayısının nanoyapılar üzerindeki etkisi incelenmiştir [49]. 200-800 femtosaniye (fs) arasında gerçekleştirilen çalışmada:

Periyodik nanoyapıların Ti plakası üzerinde,  $2.1 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> lazer akısında 200 fs ila 800 fs arasında darbe genişliği ile oluşturulduğu, nanoyapıların periyotlarının, aynı lazer yoğunluğunda, darbe genişliğinin 200 fs ila 800 fs arasında değişmesiyle neredeyse değişmediği; atış sayısı arttıkça periyotların azaldığı, yani atış sayısının değiştirilerek periyotların kontrol edilebileceği; hücre yayılımının ise, 590 nm periyodu ile nanoyapılar üzerindeki olukların yönü boyunca gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır [49].

Alaşımlar üzerinde femtosaniye lazer ile yapılan çalışmalar incelendiğinde ise öncelikle Ni-Ti alaşımları karşımıza çıkmaktadır.

**NiTi alaşımları (%50 Ni – %50 Ti)** implant malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılmakta ve kullanımı giderek artmaktadır fakat bu alaşımın da korozyon direnci ve biyoyumluluğunun iyileştirilmesi gerekmektedir [9, 15, 50]. NiTi alaşım yüzeylerinin lazer ile işlenmesinin ele alındığı bir çalışmada; 1

kHz'lik darbe tekrar frekansı, 50 fs darbe süresi (genişliği) ve 800 nm merkez dalga boyu parametreleri kullanılarak femtosaniye lazer (FSL) ile üretilen mikro desenli NiTi yüzeyinin biyouyumluluğu incelenmiştir [50].

Sırasıyla  $1.27 \text{ J / cm}^2$ ,  $2.55 \text{ J / cm}^2$  ve  $3.82 \text{ J / cm}^2$  lazer akısı ile işlenen NiTi alaşımlarının yüzey morfolojileri incelendiğinde NiTi yüzeyinde yüksek hassasiyetle düzenli mikro desenler oluştuğu gözlenmiştir. FSL işleminin kristal yapılar üzerinde hiçbir etkisinin olmadığı, ancak alaşım yüzeyindeki Ni / Ti oranının artan lazer enerjisi ile arttığı görülmüştür. Artan lazer enerjisiyle oluşan mikro desenlerin faydalı etkisi  $3.82 \text{ J / cm}^2$ 'ye kadar yükselmiştir. Keskin bir şekilde artan Ni / Ti oranı ile Ni'nin toksisitesinin NiTi yüzeylerin biyouyumluluğunu düşürdüğü görülmüştür. İdeal biyouyumluluğu elde etmek için, NiTi alaşımı yüzeylerinin  $3.82 \text{ J / cm}^2$ 'den daha fazla lazer akısı ile işlenmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Kültürlenen osteoblastların yüzey morfolojileri incelendiğinde ise lazerle işlenmiş yüzeylerde daha fazla hücre gözlemlenmiştir. Hücreler en çok  $2.55 \text{ J / cm}^2$  lazerde işlenmiş yüzeyde ardından  $1.27 \text{ J / cm}^2$  işlenmiş yüzey üzerinde çoğalma göstermiştir. FSL, mikro desenlerin yanı sıra nano partikülleri indüklemiş, sadece hücre yapışmasını ve çoğalmasını hızlandırmakla kalmayıp, aynı zamanda büyümelerini yönlendirmiştir. Yönlendirilmiş büyüme, malzeme insan vücuduna implante edildiğinde yara iyileşmesi yönünde fayda sağlamıştır [50].

NiTi alaşımlarına ek olarak **Ti6Al4V** üzerinde yapılan çalışmalar ve titanyum alaşımlarının implant malzemesi olarak kullanımı da günümüzde oldukça yaygınlaşmaya başlamıştır [9, 14, 51]. Bu alaşımlar, kemik ile lifli bir ara yüzey katmanı olmaksızın çok iyi birleşebilmekte ve aynı zamanda çeşitli karakteristik özelliklerinden faydalanılarak farklı tipte diş ve medikal implant uygulamalarında kullanılmaktadır. Femtosaniye lazer ile oluşturulmuş yapıların hücre davranışı üzerindeki biyolojik aktivite etkilerini inceleyen bir çalışmada, Ti6Al4V örnekleri üzerinde mikrometre ölçeğinde (genişlik: 25–75  $\mu\text{m}$ ; derinlik: 1–10  $\mu\text{m}$ ) çeşitli boyutlarda oluklar oluşturan femtosaniye lazer darbeleri ile mikro dokular oluşturulmuştur. Bu çalışma sonucu, femtosaniye lazer işleme ile 1 ila 10  $\mu\text{m}$  derinliğinde ve 25 ila 100  $\mu\text{m}$  genişliğinde derin oluklarla dokulu titanyum alaşımlı yüzeylerin (Ti-6Al-4V gibi) üretilebileceğini gösterilmiştir [51].

Ayrıca, hücrelerin lazerle tetiklenmiş/indüklenmiş periyodik yüzey yapıları (Laser induced periodic surface structures-LIPSS) yönünde gerilime maruz kaldığı ve birçok uzantı oluşturdıkları gözlenmiştir. Yani hücrelerin metal üzerindeki oryantasyonu LIPSS yönüne ve lazer ışını polarizasyonuna bağlıdır. [51].

Femtosaniye lazer ile biyomedikal alaşım yüzeyi işlenmesi uygulamalarının bir diğer örneği olarak Mg-Gd-Ca alaşımı üzerinde yapılan bir çalışmaya değinilmiştir [52].

**Mg-Gd** tabanlı alaşımlar biyouyumluluk ve nitelikli mekanik özellikler açısından yüksek bir performans göstermektedir. Diğer bazı nadir toprak elementleri gibi, Gd de iyi biyouyumluluğa sahiptir. Mg-6Gd-0.6 Ca alaşım yüzeyine hibrit bir lazer işlemi uygulanarak önce, argon (Ar) gazı koruması altında, 1064 nm'de sürekli-dalga (continuous-wave) fiber lazer ile yüzey ergitilmiş, daha sonra 800 fs darbe genişliği altında 400 kHz darbe tekrar frekansı ile ergitilmiş yüzeyde tekrar eden yapılar oluşturulmuştur. Çalışma sonunda lazer yüzey modifikasyonundan önce ve sonra Mg – 6Gd– 0.6Ca alaşımının mikro yapı gelişimi, korozyon davranışı ve biyouyumluluğu dikkatle incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Mg alaşımı bir a-Mg matrisi ve b-fazı  $Mg_5Gd$  içerir. Lazer modifikasyonundan sonra, X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları, lazerle eriyen yüzeyin sadece a-Mg fazını içerdiği gözlemlenmiştir. Lazerle eritilmiş bölgede katılma mikroyapıda b-fazının çözünmemesi ve b- $Mg_5Gd$  fazının galvanik katot olarak etki etmesi galvanik korozyon miktarını önemli ölçüde azaltmıştır. Lazer yüzey modifikasyonu sonucunda korozyonun etkisiz hale getirilmesiyle hücreler iyi yapışma davranışı sergilemiş ve anizotropik olarak tüm lazerle eritilmiş yüzeylerde yayılma göstermiştir [52].

Nanosaniye lazer ışınlama uygulamaların bakıldığında ise; Al uygulamaları ve Paslanmaz çelik (316 L) uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar göze çarpmaktadır [53, 54].

**Al uygulamalarında** süperhidrofobik yüzeyler, lazer işleme sırasında oluşan bir oksit tabakası ve ayrıca korozif türlerin nüfuz etmesine direnç gösteren ve katı alanı azaltan mikro boşluklarda hapsolmuş küçük hava hacmi nedeniyle korozyon hızında ve polarizasyon direncinde gelişme göstermiştir. Fakat alüminyumun aşınması kolay olan bir malzeme olması sebebiyle süperhidrofobik özelliği korozif ortamlar altında test edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu noktada nanosaniye (ns) lazer kaynakları, açık ortamda güvenilir bir şekilde çeşitli mikro / nano yapılar oluşturmak için kullanılmıştır. Bu amaçla çalışmada, 0.5 M NaCl sulu çözeltide korozyon direncini araştırmak için farklı lazer parametrelerinde süperhidrofobik alüminyum (Al) yüzeyler üretilmiştir. Çalışma sonunda nanosaniye lazer ile ultrahidrofobik Al yüzeyleri oluşturmanın doğrudan bir yol olduğu görülmüştür. Korozif türlerin (Cl gibi) Al yüzeyine temas etmesini önleyen mikro boşluklarda hapsolmuş hava kabarcıkları nedeniyle korozyon direncinin artırıldığı görülmüştür. En iyi korozyon önleme sonuçları, süperhidrofobik karakter ile korozyon önleyici davranış arasında bağlantı kuran, 20 mm aralıklarla üretilen ultra hidrofobik performanslı yüzeyde elde edilmiştir [53].

Son olarak nanosaniye lazer ışınlama uygulamalarından paslanmaz çelik üzerinde yapılan bir çalışma incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

İyi korozyon direnci ve biyouyumluluk özellikleri sebebiyle, tıbbi implantların üretiminde güvenilir bir biyomateryal olarak kullanılan **paslanmaz çelik (SS) sınıfı 316L alaşımını** inceleyen bu çalışmada; su ve havada nanosaniye darbeli lazer işleme uygulanmasıyla 316L SS yüzey morfolojisinin modifikasyonu, kimyası ve ıslanabilirlik gibi yüzey özelliklerinin değişimi ile yüzey hidrofiliğini artırma mekanizmaları araştırılmış ve farklı ortamdaki lazer işleme sonuçları karşılaştırılmıştır [54]. Sonuç olarak; lazerle işlenmiş yüzeylerde, işleme ortamına ve lazer parametrelerine bağlı olarak farklı yüzey yapıları ve morfolojileri oluşturulabildiği gözlenmiştir. Havada işlenen numunelerde, su altında işlenen numunelere kıyasla daha büyük mikro yapılar üretilmiştir. Havada ve suda işlenmiş yüzeyler, kimyasal bileşim yönünden işlemlerden önce ve sonra çok az farklılık göstermiştir. Tek önemli değişiklik, yüzey oksijen içeriğindeki dikkat çekici artışla ilgilidir. Süper hidrofilik durum, çelik örneklerin hava ortamında lazerle işlenmesi ile elde edilmiş, su içinde işlenen numunelerin ıslanabilirliğinde de bir artış tespit edilmiş ancak temas açısı azaltma oranı hava deneylerinden çok daha az oranda gerçekleşmiştir [54].

Literatürdeki güncel çalışmalar üzerinden örneklendirilen biyomedikal metal ve alaşım yüzeylerine uygulanan lazer işlemlerine dair bilgiler Tablo.2'de özetlenmiştir.

Tablo- 2. Biyomedikal metal ve alaşım yüzeylerine uygulanan lazer işlemleri [49-54].

Biyomedikal Metal / Alaşım	Uygulanan Lazer İşlemi ve Elde Edilen Yüzey Modifikasyonu	İncelenen Biyouyumluluk Parametreleri	Referans
Ti	Femtosaniye lazer işleme ile periyodik nanoyapılar oluşturma	Farklı darbe genişlikleri sonucu elde edilen nanoyapıların hücre yayılımına etkisi	[49]
NiTi alaşımı	Femtosaniye lazer işleme ile mikro desen oluşturma	Farklı lazer akıları ile elde edilen desenlerin hücre yapışması ve çoğalması ile hücrelerde yönlü büyüme davranışına etkisi	[50]
Ti6Al4V alaşımı	Femtosaniye lazer işleme ile farklı derinlik ve genişliklerde oluk dokulu periyodik yapıları yüzeyler elde etme	Lazerle tetiklenmiş/indüklenmiş periyodik yüzey yapılarının (LIPSS) hücre oryantasyonuna etkisi	[51]



Mg-6Gd-0.6 Ca alaşımı	Sürekli dalga fiber lazer ile ergitilen yüzeyde femtosaniye lazer ile tekrarlanan yapılar oluşturma	Lazerle yüzey modifikasyonun korozyon direnci ve hücre yapışması ile hücrelerin anizotropik yayılma eğilimine etkisi	[52]
Al alaşımı	Nanosaniye lazer işleme ile mikro / nano yapılar oluşturma	Oluşturulan periyodik yapılarda, yapılar arası mesafenin korozyon direncine etkisi	[53]
316L Paslanmaz çelik	Nanosaniye lazer işleme ile su ve hava ortamlarında yüzey morfolojisinin modifikasyonu	Lazer işleme uygulanma ortamının yüzey hidrofilitesine etkisi	[54]

İncelenen çalışmalar birbiri ile kıyaslandığında, femtosaniye lazer ile işleme uygulamalarının uygulama hızı ve kolaylığına ek olarak, hücre yayılması ve özellikle yönlenmesini sağlama açısından osseointegrasyonu iyileştirme konusunda daha umut vaat edici bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS)

Metalik biyomalzemeler, esas olarak yüksek mukavemet, kırılma direnci, iyi elektriksel iletkenlik ve biyouyumluluk özelliklerinden dolayı çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır. Metallerin biyomedikal alanda implant uygulamalarında kullanımları esnasında osseointegrasyonun sağlanması çok önemlidir. Bunu sağlayabilmek için de yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Biyomateryallerin yüzey modifikasyonunun, in vitro (laboratuvar ortamında) ve in vivo (canlı ortamda) gerçekleştirilen çalışmalarda hücre yapışmasını, göçünü, yönelimini, şeklini ve hatta gen ekspresyonunu kontrol etmek için etkili bir yöntem olduğunu görülmektedir. Desenli bir yüzey metabolitlerle su, tuz ve diğer besinlerin transferini kolaylaştırır, bu da hücrelerin dışarı atılmasını hızlandırabilir. Ek olarak, yüzey desenleri daha fazla yüzey alanı sağlar; proteinlerin adsorpsiyonunu iyileştirir ve osteoblastlar ile implant yüzeyi arasındaki bağlantıyı güçlendirir. İmplant yüzeylerinde ideal mikro modeller üretmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Geleneksel yüzey pürüzlendirme yöntemlerinde mikrometre düzeyinde pürüzlü yüzeyler elde etmek mümkündür fakat bununla kum tozlarının implant yüzeyine gömülü kalması; mikro desenlerin yüzeyde eşit olarak dağılmaması gibi sorunlar implantların biyouyumluluğunu azaltıcı etki gösterir. Bu nedenle, bu sorunları gidermek ve düzenli desenler elde etmek için yeni bir teknik olan lazer ile yüzey işleme yöntemleri geliştirilmiş ve son yıllarda hem bilim insanları hem de mühendisler tarafından büyük ilgi görmüştür. Lazer ile yüzey işleme yöntemleri yüksek etkili, kullanışlı, kolay kontrol edilen yöntemlerdir ve malzeme yüzeyinde düzenli desenlerle birlikte uygun hiyerarşiye sahip pürüzlülüğü oluşturulabilirler. Son yıllarda lazer ile yüzey işleme yönteminde büyük gelişmeler sağlanmıştır. Geleneksel yöntemlere alternatif olarak geliştirilen lazer tekniklerinin en önemli avantajları, nano ve mikro boyutlu topografyaya sahip oluşlarından dolayı yüksek homojenlik göstermeleri ve kirletici olmayışlarıdır. Lazerle işlenmiş yüzeydeki osteoblastlar, kumlama ve asitleme yöntemi uygulanan yüzeylere göre daha hızlı yayılırlar. Bu da bu tip yüzeylerin gelişmiş biyouyumluluğa işaret ettiğini göstermektedir.

Mikro ve nano işleme yöntemleri malzemeyi doğrudan kazıyabilen yüzeyde istenilen pürüzlülüğün ayarlanmasını sağlayan mükemmel ve kullanışlı bir araç olarak geliştirilmiştir. Ayrıca ıslanabilirlik ve yüzey enerjisinin artırılmasıyla daha çok hücrenin tutunmasının sağlanması ve hücrelerin yönlenmesi ile efektif tutunmanın gerçekleştiği görülmektedir. Lazer işleme teknolojileri arasından ise femtosaniye lazer ile işleme (FSL) yöntemi öne çıkmaktadır. FSL yönteminde yüzey çok hızlı biçimde işlendiğinden, işlem sırasında önemsiz sayılabilecek sıcaklık değişimleri meydana gelir bu nedenle ergime ve faz değişimi gibi yüzey kimyasını değiştirmeden malzeme işleme avantajı sağlamaktadır. FSL kaynaklı mikro desenler metalin mekanik özelliklerine de zarar vermez ve biyomakromoleküller ile kemik dokularının girişi için uygun yüzeyler oluşturulmasına olanak sağlar. Lazerle işlenmiş yüzeyler üzerine yapılan güncel çalışmalar sonucunda lazerle yüzey işleme yönteminin umut vadeden bir yöntem olduğu görülmektedir. Henüz yeni gelişmekte olan bu konu ile ilgili çalışmalar sürdürülmektedir. Bu çalışmalardan yola çıkarak daha yeni

veya elastik modülü kemiğe daha yakın biyoyumlu metallerde, yüzeyin lazerle işlenmesi sonucunda osseointegrasyon artırılabilir ve biyomedikal uygulamalar için kullanımları geliştirilebilir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Makalenin yazarları destek ve katkılarından ötürü Dr. Işın Baylam ve Prof. Dr. Umut Toker'e teşekkürlerini sunarlar.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bauer S., Schmuki P., Mark K., Park J., Engineering biocompatible implant surfaces Part I: Materials and surfaces, Progress in Materials Science, 58:3 (2013) 261-326.
- [2] Manam, N.S., Harun, W.S.W., Shri, D.N.A., Ghani, SAC., Kurniawan, T., Ismail, MH., Ibrahim, MHI., Study of corrosion in biocompatible metals for implants: A review, Journal of Alloys and Compounds, 701 (2017) 698-715.
- [3] Hin, TS. Introduction to biomaterials engineering and processing-an overview. Engineering Materials for Biomedical Applications, (2004).
- [4] Güner, A.T., Meran, C., Ortopedik implantlarda kullanılan biyomalzemeler. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26:1 (2020) 54-67.
- [5] Ateş, G. Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İç Yapısı ve Yüzey Özellikleri Üzerine Termokimyasal İşlem Parametrelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta (2018) 76 s.
- [6] Subaşı, M., Karataş, Ç., (2012), Titanyum ve Titanyum Alaşımından Yapılan İmplantlar Üzerine İnceleme, Politeknik Dergisi, 15: 87- 103.
- [7] Aran, A., Temel, M., (2004). Paslanmaz Çelik Yassı Mamüller Üretimi Kullanımı Standartları, 2, İstanbul.
- [8] Kalelioğlu D. (2015). Kemik Doku İmplant Malzemeleri: Osseointegrasyon ve Antibakteriyel Etkinlik, Yüksek Lisans Tezi Hacettepe Üniversitesi Biyomühendislik Anabilim Dalı, Ankara.
- [9] Liu, X., Chu, P. K., Ding, C. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. Materials Science and Engineering: R: Reports, 47:3-4 (2004) 49-121.
- [10] Ayhan, H. Biyomalzemeler. Bilim ve Teknik Dergisi, (2002) 2-11.
- [11] Toker S.M., Battal E., Demir Z., Çevik K.E., Mikrodeformasyon ile Yüzey Özellikleri Değiştirilen 316L Paslanmaz Çeliğin Sentetik Vücut Sıvısı ile Etkileşimi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8:4 2455-2467.
- [12] De Jonge, LT., Leeuwenburgh, S. C., Wolke, J. G., Jansen, J. A., Organic-inorganic surface modifications for titanium implant surfaces. Pharmaceutical research, 25:10 (2008) 2357-2369.
- [13] Pekşen C., Doğan A. İmplant dayanımı. Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği Dergisi, 10:2 (2011) 122-128.
- [14] Geetha, M., Singh, A., Asokamani, R., Gogia, A. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review. Progress in materials science, 54:3 (2009) 397-425.
- [15] Rezwan, K., Chen, Q. Z., Blaker, J. J., Boccaccini, A., R. Biodegradable and bioactive porous polymer/inorganic composite scaffolds for bone tissue engineering. Biomaterials, 27:18 (2006) 3413-3431.

- [16] Toker S.M., Canadinc D., Maier H. J., Birer O., Evaluation of passive oxide layer formation–biocompatibility relationship in NiTi shape memory alloys: Geometry and body location dependency. *Materials Science and Engineering: C* 36 (2014): 118-129.
- [17] Mavrogenis A., Dimitriou R., Parvizi J., Babis G. Biology of implant osseointegration. *J Musculoskelet Neuronal Interact*, 9:2 (2009) 61-71.
- [18] Uzun D, Keyf, P. İmplantların yüzey özellikleri ve osseointegrasyon. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 2 (2007) 43-50.
- [19] Cochran D.L., Schenk R.K., Lussi A, Higginbottom F.L., Buser D. Bone response to unloaded and loaded titanium implants with a sandblasted and acid- etched surface: A histometric study in the canine mandible. *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and the Australian Society for Biomaterials*, 40:1 (1998) 1-11.
- [20] Wennerberg A, Hallgren C, Johansson C, Danelli S. A histomorphometric evaluation of screw- shaped implants each prepared with two surface roughnesses. *Clinical oral implants research*, 9:1 (1998) 11-19.
- [21] Wheeler S. Eight-year clinical retrospective study of titanium plasma-sprayed and hydroxyapatitecoated cylinder implants. *Int J OralMaxillofac Implants*, 11 (1996) 340-50.
- [22] Tinsley D, Watson C, Russell J. A comparison of hydroxylapatite coated implant retained fixed and removable mandibular prostheses over 4 to 6 years. *Clinical Oral Implants Research*, 12:2 (2001) 159-166.
- [23] Becker W, Becker B.E., Ricci A, Bahat O, Rosenberg E, Rose L.F. A prospective multicenter clinical trial comparing one- and two- stage titanium screw- shaped fixtures with one- stage plasma- sprayed solid- screw fixtures. *Clinical implant dentistry and related research*, 2:3 (2000) 159-165.
- [24] Albrektsson T, Wennerberg A. The impact of oral implants-past and future, 1966-2042. *Journal of Canadian Dental Association* 71:5 (2005) 327.
- [25] Hansson S, Norton M. The relation between surface roughness and interfacial shear strength for bone-anchored implants. A mathematical model. *Journal of Biomechanics*, 32:8 (1999) 829-836.
- [26] Wennerberg A, Albrektsson T, Albrektsson B, Krol J.J. Experimental study of turned and grit-blasted screw-shaped implants with special emphasis on effects of blasting material and surface topography. *Biomaterials*, 17:1 (1996) 15-22.
- [27] Lacefield W.R. Materials characteristics of uncoated/ceramic-coated implant materials. *Advances in dental research*, 13:1 (1999) 21-26.
- [28] Ozcan M, Hammerle C. Titanium as a reconstruction and implant material in dentistry: advantages and pitfalls. *Materials*, 5:9 (2012) 1528-1545.
- [29] Ong J.L., Chan D.C. Hydroxyapatite and their use as coatings in dental implants: a review. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 28:5-6 (2000).
- [30] Toker S.M., Tezcaner A., Evis Z. Microstructure, microhardness, and biocompatibility characteristics of yttrium hydroxyapatite doped with fluoride. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* 96.2 (2011): 207-217.
- [31] Ratha, I., Datta, P., Balla, V. K., Nandi, S. K., Kundu., Effect of doping in hydroxyapatite as coating material on biomedical implants by plasma spraying method: A review. *Ceramics International* (2020).
- [32] Levingstone T. J., Ardhaoui M., Benyounis K., Looney L., Stokes J. T., Plasma sprayed hydroxyapatite coatings: Understanding process relationships using design of experiment analysis. *Surface and Coatings Technology*, 283 (2015) 29-36.

- [33] Habibovic P., Barrere F., Van Blitterswijk C.A., de Groot K., Layrolle, P., Biomimetic hydroxyapatite coating on metal implants. *Journal of the American Ceramic Society*, 85:3 (2002) 517-522.
- [34] Yılmaz, B., Evis Z., Güldiken M., Titanyum Alaşımının Biyomimetik Yöntemle Kalsiyum Fosfat Kaplanması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29:1 (2014).
- [35] Zhang Z., Lim, S. H., Chai J., Lai D. M. Y., Cheong A. K. H., Cheong, K. L., Pan, J. S., Plasma spray of Ti<sub>2</sub>AlC MAX phase powders: Effects of process parameters on coatings' properties. *Surface and Coatings Technology*, 325 (2017) 429-436.
- [36] Slătineanu, L., Potârniche, Ş., Coteaţă, M., Grigoraş, I., Gherman, L., Negoescu, F., Surface roughness at aluminium parts sand blasting. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 6:2 (2011) 69-74.
- [37] Novaes Jr AB, Papalexio V, Grisi MF, Souza SS, Taba Jr M, Kajiwarra JK. Influence of implant microstructure on the osseointegration of immediate implants placed in periodontally infected sites: a histomorphometric study in dogs. *Clinical Oral Implants Research*, 15:1 (2004) 34-43.
- [38] Papalexio V, Novaes Jr AB, Grisi MF, Souza SS, Taba Jr M, Kajiwarra JK. Influence of implant microstructure on the dynamics of bone healing around immediate implants placed into periodontally infected sites: A confocal laser scanning microscopic study. *Clinical oral implants research*, 15:1 (2004) 44-53.
- [39] Sul YT, Johansson CB, Jeong Y, Wennerberg A, Albrektsson T. Resonance frequency and removal torque analysis of implants with turned and anodized surface oxides. *Clinical Oral Implants Research*, 13:3 (2002) 252-259.
- [40] Gaggli A, Schultes G, Müller WD, Karcher H. Scanning electron microscopical analysis of laser-treated titanium implant surfaces—a comparative study. *Biomaterials*, 21:10 (2000) 1067-1073.
- [41] Riveiro A., Maçon, A. L., del Val J., Comesaña R., Pou J., Laser surface texturing of polymers for biomedical applications. *Frontiers in physics*, 6 (2018) 16.
- [42] Le Guehenec L, Soueidan A, Layrolle P, Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental materials*, 23:7 (2007) 844-854.
- [43] Aparicio C, Gil F.J., Fonseca C, Barbosa M, Planell J.A. Corrosion behaviour of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications. *Biomaterials*, 24:2 (2003) 263-273.
- [44] Massaro C, Rotolo F, De Riccardis F, Milella E, Napoli A, Wieland M. Comparative investigation of the surface properties of commercial titanium dental implants. Part I: chemical composition. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 13:6 (2002) 535-548.
- [45] Ban S, Iwaya Y, Kono H, Sato H. Surface modification of titanium by etching in concentrated sulfuric acid. *Dental materials*, 22:12 (2006) 1115-1120.
- [46] Yokoyama K, Ichikawa T, Murakami H, Miyamoto Y, Asaoka K. Fracture mechanisms of retrieved titanium screw thread in dental implant. *Biomaterials*, 23:12 (2002) 2459-2465.
- [47] Dalkız M. Dental implantlarda farklı yüzey özelliklerinin osseointegrasyona etkisi. In: Dalkız M, editör. *Pratik Diş Hekimliği İmplantolojisi*. 1. Baskı. İstanbul: Vestiyer Yayın Gubu, (2009) 133-41.
- [48] Berardi D, Colagiovanni M, Scoccia A, Raffaelli L, Manicone PF, Perfetti G. Evaluation of a new laser surface implant: scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray and X-ray photoelectron spectroscopy analyses. *Journal of biological regulators and homeostatic agents*, 22:3 (2008) 161-167.

- [49] Shinonaga, T., Kinoshita, S., Okamoto, Y., Tsukamoto, M., Okada, A. Formation of periodic nanostructures with femtosecond laser for creation of new functional biomaterials. *Procedia*, 42 (2016) 57-61.
- [50] Liang C., Wang H., Yang J., Li B., Yang Y., Li H. Biocompatibility of the micro-patterned NiTi surface produced by femtosecond laser. *Applied surface science*, 261 (2012) 337-342.
- [51] Raimbault O., Benayoun S., Anselme K., Mauclair C., Bourgade T., Kietzig A. M., Donnet C. The effects of femtosecond laser-textured Ti-6Al-4V on wettability and cell response. *Materials Science and Engineering*, 69 (2016) 311-320.
- [52] Hu G., Guan K., Lu L., Zhang J., Lu N., Guan Y. Engineered functional surfaces by laser microprocessing for biomedical applications. *Engineering*, 4:6 (2018) 822-830.
- [53] De Lara L. R., Jagdheesh R., Ocaña J. L. Corrosion resistance of laser patterned ultrahydrophobic aluminium surface. *Materials Letters*, 184 (2016) 100-103.
- [54] Razi S., Madanipour K., Mollabashi M. Laser surface texturing of 316L stainless steel in air and water: A method for increasing hydrophilicity via direct creation of microstructures. *Optics & Laser Technology*, 80 (2016) 237-246.
- [55] Celen S. Lazerle Mikro-İmalatta Q-Anahtarlama. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 3 (2015) 367-374.
- [56] Grasso R. J. Defence and security applications of quantum cascade lasers. In *Optical Sensing, Imaging, and Photon Counting: Nanostructured Devices and Applications 2016* Vol. 9933. International Society for Optics and Photonics. 2016.
- [57] Azadgoli B., Baker R. Y., Laser applications in surgery. *Annals of translational medicine*, 4:23 (2016).
- [58] König K., Multiphoton microscopy in life sciences. *Journal of Microscopy*, 200:2 (2000) 83-104.
- [59] Addanki S., Amiri, I. S., Yupapin P., Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers. *Results in Physics*, 10 (2018) 743-750.
- [60] Malinauskas M., Žukauskas A., Hasegawa S., Hayasaki Y., Mizeikis V., Buividas R., Juodkasis S., Ultrafast laser processing of materials: from science to industry. *Light: Science & Applications*, 5, e16133 (2016) 1-14.
- [61] Alphan S. (2010). *Photonics and Laser Engineering: Principles, Devices, and Applications* (First Edition). Mc Graw Hill.
- [62] Pedrotti F., Pedrotti L. (1993). *Introduction to Optics* (Second Edition). Prentice-Hall.
- [63] Maiman, T.H. (1960). *Stimulated optical radiation in ruby* (Second Edition). Nature.
- [64] W. Koechner, M. Bass. (2003). *Solid-State Lasers: A Graduate Text* (First Edition). Springer.
- [65] Jean-Claude D., Wolfgang R. (2006). *Ultrashort Laser Pulse Phenomena* (Second Edition). Elsevier.
- [66] Zhao Y., Wang P., Zhang W. Generation of 7-fs laser pulse directly from a compact Ti:sapphire laser with chirped mirrors. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy* 50 (2007) 261–266.
- [67] Gaumnitz T., Jain A., Pertot Y., Huppert M., Jordan I., Ardana-Lamas F., Wörner H. J. Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver. *Optics Express*, 25:22 (2017) 27506-27518.
- [68] Sugioka, K., & Cheng, Y., Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing. *Light: Science & Applications*, 3:4 (2014) 149-149.

- [69] Zeisig J., Schadlich N., Giebeler L., Sander J., Eckert J., Kuhni U., Hufenbach J. Microstructure and abrasive wear behavior of a novel FeCrMoVC laser cladding alloy for high-performance tool steels. *Wear*, (2017) 382–383: 107–112.
- [70] Soriano C., Leunda J., Lambarri J., Navas G. V., Sanz, C. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. *Applied Surface Science*, 257 (2011) 7101–7106.
- [71] Lee J. H., Jang J. H., Joo B. D., Son Y. M., Moon, Y. H. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel. School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea Received 18 June 2008; accepted 10 March 2009. *Transactions on Nonferrous Metals Society of China*, (2009)19: 917-920.
- [72] Adel K.M. Enhancement of Dry Sliding Wear Characteristics of CK45 Steel Alloy by Laser Surface Hardening Processing. *Procedia Materials Science*, (2014) 6: 1639 – 1643.
- [73] Syed B., Shariff S. M., Padmanabham G., Lenka S., Bhattacharya B., Kundu S. Influence of laser surface hardened layer on mechanical properties of reengineered low carbon steel sheet. *Materials Science & Engineering*, (2017) A 685: 168–177.
- [74] Karaslan A. Laser ile Malzeme işlemleri. Birinci basım, Literatür Yayıncılık, Dağıtım, Pazarlama, Sanayi ve Ticaret LTD. ŞTİ., Şefik Matbaası, İstanbul, (2009) 295 s.
- [75] Guarino S., Barletta M., Afilal A. High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbonsteel: Fatigue life improvement analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, (2017) 28: 266–271.



## An Experimental Study Towards Decreasing the Energy Efficiency Index Value in Industrial Refrigerators

Elif Merve BAHAR<sup>1,2,\*</sup>  Süleyman ERTEN<sup>3</sup>  Mustafa AKTAŞ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar University Hasan Ferdi Turgutlu Faculty of Technology, Energy Systems Engineering, Manisa/Turkey

<sup>2</sup>Gazi University Institute of Science, Energy Systems Engineering, Ankara/Turkey

<sup>3</sup>Nurdil Refrigeration Inc., Ankara/Turkey

### Article Info

Research article

Received: 26/03/2021

Revision: 15/05/2021

Accepted: 14/07/2021

### Keywords

Antifog Film

Energy Efficiency Index

Cooling System

### Abstract

Energy labeling is performed according to the energy efficiency index (EEI) value in industrial refrigerators. In order to reduce the EEI value calculated according to the amount of energy consumed and the characteristics of the cooler, two systems were designed in this study and the energy label class of the coolers was determined according to the results obtained. Two systems were designed in this study and the energy label class of the refrigerators was determined according to the obtained results. In this study, two different refrigerators (Type 1 and Type 2) were designed, manufactured and tested. The systems are designed using R290 (propane). It is a new generation natural and environmentally friendly refrigerant with two inlet-outlet evaporators, double condensers and double compressors that provide a homogeneous refrigeration. During the experiments, temperature-pressure measurements of the cooled products and refrigeration system equipment were taken from certain points every minute and test data were recorded. In the experiments, the average air temperature and relative humidity values of the test chamber of the experiment with resistance glass in the Type 1 refrigerator were measured as 25 °C and 59,09%, respectively, the average air temperature and relative humidity values of the test room of the Type 2 system experiment with antifogging film were measured as 25,231 °C and 57,207%, respectively. In the experiments, defrosting process was carried out twice a day in the refrigerators. During the experiment, the highest and lowest average temperatures of the cooled products were measured as -16,18 °C and -19,40 °C. Increasing product temperatures during defrosting and stopping cooling increased the power consumption in the system. As a result of the calculations, the energy efficiency index value of the Type 1 resistance model was calculated to be 60,53 and it was seen that the energy label was class "E". In the Type 2 model in which anti-fog coating film is used, the energy efficiency index value is 49,25 and it has been observed that the energy label is class "D".

## 1. INTRODUCTION

Industrial refrigerators can be defined in two main groups as display cabinets and storage cabinets. Industrial type display cabinets have many features such as horizontal, vertical, combined, open, closed, positive and negative set temperatures. Dairy products, packaged meat display refrigerator cabinets, fruit-vegetables etc. display refrigerator cabinets can be grouped as service sections (meat, appetizers, delicatessen products display section), deep freezers, cake cabinets, seafood display cabinets, frozen food display sections and promotional type refrigerator cabinets. In this study, vertical type door deep freezer industrial refrigerators are used and it includes the experimental results of the design that provides energy efficiency in industrial refrigerators. The performance of propane, which is one of the environmentally friendly refrigerants, and the performance of glass with anti-fog film were investigated experimentally, and it was aimed to contribute the results to the literature.

Since the vertical-door deep-freezer industrial type refrigerators operate at low evaporation ( $-35^{\circ}\text{C}$ ), there is a temperature difference between the freezer indoor temperature and the outdoor temperature. Due to this temperature difference and when doors are constantly opened and closed in a busy retail environment, condensation occurs on the windows of the doors. For this reason, customers cannot see the displayed products and as a result, a significant problem may arise that will affect sales. For this problem, the use of resistances in glasses creates high costs and increases energy consumption. Thanks to the anti-fog film that will be applied to the inner surface of the doors instead of the resistances used, it prevents fogging and maintains the glass transparency, allowing customers to see the products offered clearly. Thus, doors with anti-fog film provide the opportunity to save high levels of energy with “zero energy consumption”.

Anti-fog coatings are films that have recently started to be studied. These films lose their effectiveness over time and need to be reapplied to that area. Anti-fog films are resistant to oil and grease as well as being water resistant [1].

Anti-fog films do not form moisture on them when they have hydrophilic properties. The water particles that will form on the film cannot hold on to the film and slide.

These films are used in some sports and safety equipment (diving masks, safety glasses, visors...), delicatessen cabinets, car windows, glass doors of freezer cabinets, shower cabin windows and many more.

Thanks to the adhesion of anti-fog films to the windows of freezer cabinets in supermarkets, customers can easily see the products inside the cabinet. Since the freezer cabinet operates at low evaporation temperature, the temperature difference between inside and outside is large. Therefore, if the film is not attached, water condenses on the glass and condensation occurs due to the customer opening the cabinet door [2]. As a result, the visibility of the materials inside the cabinet is reduced. The installation of anti-fog films on the windows of freezer cabinets has been examined in the literature and it has been seen that not many studies have been done. Therefore, in the study, the effect of anti-fog film on the freezer cabinet windows on energy consumption was investigated and the energy efficiency index (EEI) value was calculated. The energy efficiency index “(EEI)” means an index value calculated in percent (%) for the relative energy efficiency of an industrial refrigerator with a direct sales function [22] and based on this value, an energy label is applied to industrial refrigerators.

Dixel tested for 2 conditions in his study. In the 1st test condition, freezing temperature of  $-20^{\circ}\text{C}$ , ambient temperature of  $26.2^{\circ}\text{C}$  and relative humidity of 48% were used. In the 2nd test conditions, the values when the freezing temperature is  $-20^{\circ}\text{C}$ , the ambient temperature is  $26.4^{\circ}\text{C}$  and the relative humidity is 48%, the cabinet heater is off and the anti-fog film were used. The average daily energy use was found to be 3.89 kWh before using the anti-fog film, and 2.54 kWh after using the anti-fog film. After using the anti-fog film, the average power consumption decreased by 0.056 kW, the average energy used daily was 1.36 kWh, and the energy consumption was reduced by 35% [1].

In another study, Dixel stated that using an anti-fog film saves between 20% and 60% energy and has a simple payback period of 10 months [3].

The study of Rauss et al. was based on 4 different scenarios. In the 1st scenario, it was studied on the refrigerator cabinet where the cabinet door materials are old, there is no anti-fog film, the lath heater between the glass had low capacity, there was a glass heater, and there was no frame heater. In the second scenario, a refrigerator cabinet was studied where the cabinet door materials were old, there was an anti-fog film, the lath heater between the glass had low capacity, there was no glass heater, and there was no frame heater. In the 3rd scenario, a refrigerator cabinet was studied, in which the cabinet door materials were developed, there was no anti-fog film, the lath heater between the glass was high capacity, there was no glass heater, and there was no frame heater. In the 4th scenario, a refrigerator cabinet was studied where the cabinet door materials were developed, there was an anti-fog film, the lath heater between the glass had high capacity, there was no glass heater, and there was no frame heater. In the room conditions at  $23,8^{\circ}\text{C}$  and 55% relative humidity, the cleaning time of the fog was 1.35 minutes for the 1st scenario and 2.40 minutes for the 3rd scenario, according to the scenarios. Since excessive sweating occurred outside the cabinet door in the 2nd scenario, it could not be calculated and no condensation was observed for the 4th scenario [4].



Madico window film company has done tests on hot water, refrigerator and freezer. They examined the effect of using the anti-fog film in these three places on the disappearance of the fog on the glass. In the hot water fog test, when the film is not used, the fog is cleared after 2.5 minutes, while no condensation occurs when the film is used. In the coolant fog test, when the film is not used, the fog is cleared after 13 minutes, while no condensation occurs when the film is used. In the freezer fog test, the fog was cleared after 19 minutes when the film was not used, and after 1 minute when the film was used [5].

Sabic Global company tested the anti-fog film on a five-door freezer cabinet. After the film was attached, the cabinet glass heaters were turned off. Experimental data were monitored for 2 years and it was seen that the power of the freezer was reduced by 400 W. It is estimated that the investment would be amortized in 10 months, depending on the store [6].

As a result of the work of the FSI coating technologies company, the anti-fog film remained clean for a longer time under 60% relative humidity, -25°C temperature conditions. In these weather conditions, the glass of the freezer whose door was left open can remain without fogging for 180 seconds. The cost of the film was calculated at \$40 per cabinet door. Using film ensures that the compressor life was extended since it does not require heating the glass of the freezer [7].

Sunray Film company examined the energy and economic savings of installing anti-fog film on the doors of 3 different cabinet types in the Grocery Market. The ice cream cabinet had 20 doors, the low temperature cabinet had 60 doors, and the medium temperature cabinet had 20 doors. As a result of the calculations, it is found that the ice cream refrigerator saves 16819 kWh, the low temperature refrigerator 50456 kWh and the medium temperature refrigerator 6307 kWh after the anti-fog film was installed. The annual cost savings were calculated as \$1867 for the ice cream refrigerator, \$5601 for the low temperature refrigerator and \$700 for the medium temperature refrigerator [8].

In another study by Sunray Film company, anti-fog film was attached to 52188 cabinet doors in Tesco markets and examined. As a result of the study, it is seen that 41004000 kWh energy savings were achieved and 31680 tons of CO<sub>2</sub> emissions per year are prevented [8].

According to ANSI/AHRI 1321 Standard, the coefficient of performance (COP) values of the reciprocating compressor-operated cooling system in medium temperature commercial refrigerator cabinets vary according to the dew point. COP values according to temperature; It was calculated as 2.86 at -18°C, 3.53 at -10°C, 4.61 at -1°C, 4.74 at 0°C, and 5 at 2°C [9].

According to ANSI/AHRI 1201 Standard, COP values vary according to the dew point of the reciprocating compressor-operated cooling system in medium temperature commercial refrigerator cabinets. COP values according to temperature; It was calculated as 2.69 at -18°C, 3.34 at -10°C, 4.41 at -1°C, 4.56 at 0°C, 4.86 at 2°C. The COP values in low temperature and freezer cabinets were calculated as 1.55 at -39°C, 1.96 at -30°C, 2.52 at -20°C, and 2.58 at -19°C [10].

In the study of Radha et al., the effect of R12 and R134a refrigerants in freezer cabinets used to prevent food from spoiling was investigated. According to the R12 refrigerant, ozone depletion potential is 0.86, global warming potential was 3.2, daily energy consumption was 6 kWh, mass flow rate was 0.0017 kg/h and COP value was 8.076. According to R134a refrigerant, ozone depletion potential was 0, global warming potential was 0.27, daily energy consumption was 4.25 kWh, mass flow rate was 0.0012 kg/h and COP value was 8.42. As a result of the calculations, it was seen that R134a provided more performance than R12 refrigerant [11].

Erten et al. conducted tests on the cooling cabinet using R290 refrigerant and air defrosting method. They observed the positive effects of defrosting on cooling performance. During the experiments in the cooling cabinet, 8 defrosting events occurred. According to the values measured before these 8 conditions occurred, COP values were found to be 2.13, 2.31, 2.30, 2.29, 2.6, 3.36, 3.29, 3.30 and 3.49, respectively [12].

Koşan et al., using R449a refrigerant, made calculations by selecting the condenser in the cooling system with classical and micro channels. In the cooling system with micro-channel condenser, the volume flow rate is 600 m<sup>3</sup>/h, the total energy consumption is 14.409 kWh, the average COP value is 2.351, the total CO<sub>2</sub> emission value is 346.524 kg/day. In the cooling system with a classical condenser, the volume flow rate is 780 m<sup>3</sup>/h, the total energy consumption is 16.202 kWh, the average COP value is 2.086, and the

total CO<sub>2</sub> emission value is 392.575 kg/day. As a result of the calculations, the average energy efficiency value was found to be 25.564% for the micro-channel system and 23.950% for the classical system. As a result of the study, it was concluded that the use of the micro-channel system was better than the classical system in terms of energy consumption, COP, energy efficiency and CO<sub>2</sub> emission [13].

According to the study of Waide et al., the classification of the energy efficiency index of refrigerators according to 5 types of energy efficiency classes according to China was examined.  $EEI \leq 55\%$  in 1st grade,  $55\% < 65\%$  in 2nd grade,  $65\% < 80\%$  in 3rd grade,  $80\% < 90\%$  in 4th grade, and  $90\% < 100\%$  in 5th grade. There were no energy efficiency labels in Brazil, India, Australia, Japan and South Africa [14].

According to the study of Tait et al., the EEI value of 80 in vertical refrigerator cabinets, the EEI value of 50 in horizontal freezer cabinets, the EEI value of 70 in beverage coolers and the EEI value of 75 in vending machine cabinets were considered according to the minimum energy performance standard. In addition, the COP value of the cooling system conforming to ISO 23953 and ARI standards and the COP values of the CO<sub>2</sub> and R404a refrigerant cooling systems made by Girotto et al. [15] were compared. COP values were taken as 2 according to the ISO 23953 standard, 3.25 according to the ARI standard, 3 according to the CO<sub>2</sub> refrigeration cycle made by Girotto and 3.75 according to the R404a fluid refrigeration cycle [16].

According to the study of Geilinger et al., the annual energy consumption for glass door vertical cabinets was 2168 kWh for beverage cooled, 1606 kWh for ice cream cabinets, 1348 kWh for storage refrigerators, and 3690 kWh for storage freezers. Energy efficiency classes were determined based on the energy efficiency index value calculated from these consumption values [17]. EEI values differed according to classes. In the best energy efficiency classes, the EEI value was  $< 10$  in class A, 10-20 in class B, and 20-35 in C. In the worst energy efficiency classes, it was 50-65 in the E class, 65-80 in the F class, and  $> 80$  in the G class.

Propane (R290), one of the refrigerants, is a natural refrigerant with excellent environmental and thermophysical properties. It is a natural hydrocarbon used in many refrigeration and air conditioning applications. Compared to standard HCFC and HFC refrigerants, it does not contain fluorine and therefore has lower environmental impacts. Compared with R22 and R134a refrigerants, R290 appears to have very good thermodynamic properties. The molecular weight of R290 is 49% lower than R22 and 56.7% lower than R134a. Its lower molecular weight indicates that the refrigerant has a high latent heat of vaporization. The latent heat of vaporization of R290 is 82% higher than R22. When compared for the same cooling capacity, it is sufficient to use less mass of R290, which has a high latent heat of evaporation, compared to R22 and R134a. R290 has an ozone depletion potential (ODP) of 0 and a global warming potential (GWP) of 3 [18].

Yan et al. simulated the use of a mixture of R290 and R600a refrigerants in a cascade refrigeration system and compared them with a classical refrigeration cycle. As a result of the comparison, in the system using R290 and R600a, the COP value improved by 7.8-13.3%, the volumetric cooling capacity improved by 10.2-17.1%, and the compressor pressure ratio decreased by 7.4-12.3% [19].

Ataer et al. conducted their study on a cooling system with 500 W cooling load using R134a, R404a, R407a, R410a, R507 and R290 fluids. As a result of the study, it was observed that the COP values of R404a, R407a, R410a and R507 refrigerants were low, while R134a, R290 were higher [20].

In Afshari's study, the COP values of Peltier thermoelectric refrigerators were calculated according to the operation in heating and cooling modes, and the air-to-water Peltier thermoelectric performance was experimentally investigated. It has been shown that when operating in cooling mode, the air-to-water Peltier thermoelectric device can reduce the refrigerator temperature below the freezing temperature of water. According to the experimental results obtained in the study, the COP or coefficient of performance value in the heating mode was found to be approximately 200% higher than the cooling mode [21].

Afshari et al., in their study, compared the COP values of heat pumps and chillers with similar working principles and using different refrigerants in heating and cooling conditions. They used R134a, R407c, R22 and R404a refrigerants as refrigerants. In the study, the suction and discharge lines of the compressor were closely examined considering the temperature, pressure, enthalpy, entropy and compression ratio. It has been determined that the optimum charge amount of the freezer is 15-25% lower than the system

when operating in the heat pump mode. Finally, the effect of condenser flow rate on performance is examined to compare another difference between heat pump and cooling devices. As a result of the experiments, it is found that the COP value of the heat pump is 100 times higher than the COP value of the cooling device in some cases [22].

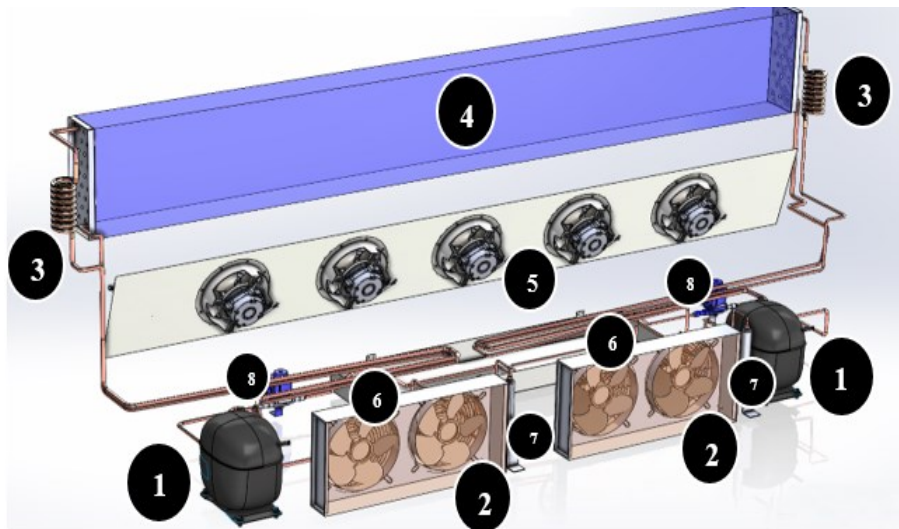
In this study, it was aimed to present the results to the researchers by making analyzes to compare the compressor power consumption, total power consumption and energy efficiency indexes by attaching a resistance (Type 1) and anti-fog film (Type 2) to the door windows of the 3-door vertical industrial freezer cabinet.

## 2. MATERIALS AND METHODS

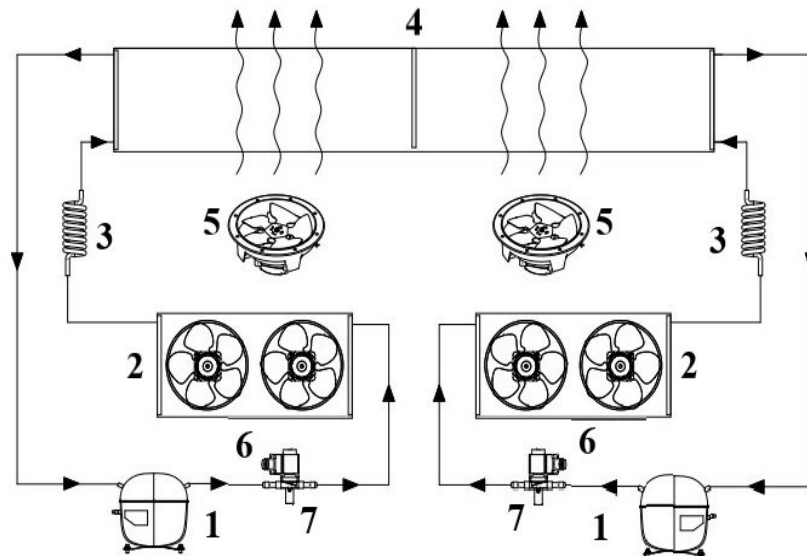
The aim of the study is to analyze the performance of a deep freezer with R290 refrigerant and to investigate the effect of without resistance anti-fog glass on the EEI value.

In the study, the refrigeration cycle for the designed and tested industrial freezer is shown in Figure 1a. In the refrigeration system, in Type 1 and Type 2, grooved pipe hydrophilic coated air-cooled evaporator with 5 fans at 1800 rpm, air-cooled microchannel condenser (2 pcs), hermetic piston compressor (2 pcs), capillary tube (4 pcs), high and low pressure measuring devices (4 units) and R290 refrigerant is used in the cycle. Type 1 uses resistant glass, while Type 2 uses non-heated glass with an anti-fog film attached. The reason for using R290 refrigerant in the cycle is that it is a new generation natural refrigerant, has low ODP and GWP values, and has a high latent heat of evaporation.

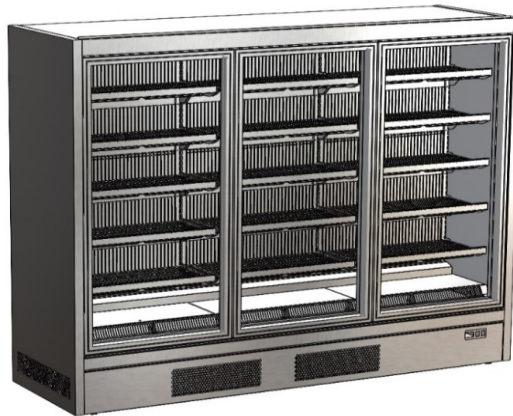
By using propane fluid in the system, it was desired to reduce the EEI value of the system to a lower level and to observe its effect on its performance. In addition, it was aimed to see the effect of using both propane fluid and glass with anti-fog film on the EEI value and to improve this value further. Tests were carried out in accordance with the TS EN ISO 23953-2 standard, and the EEI value of the deep freezer was determined to comply with the standard.



(a)



(b)



(c)

**Figure 1.** Schematic view and flow chart of the refrigeration system(a-b) 1. Compressor 2. Condenser 3. Capillary Tube 4. Evaporator 5. Evaporator Fans 6. Condenser Fans 7. Dryer 8. Pressure Gauge

Figure 2 shows an example of a freezer cabinet.



**Figure 2.** Vertical door freezer cabinet

Experiments were carried out in the test room with test equipment calibrated within the scope of TS EN ISO 23953-2 standard. The refrigeration performance of the system, energy consumption measurement,

temperature measurements, pressure measurements and energy efficiency tests were carried out. While performing these tests, temperature measurements were taken from certain points of the refrigeration system equipment (compressor, condenser and evaporator inlet-outlet temperature values) by means of thermocouples every minute. Information on measuring equipment used in prototype production and testing is given in Table 1.

**Table 1.** Measurement tools used in prototype production and tests and their technical specifications

<i>Device Name</i>	<i>Brand</i>	<i>Model</i>	<i>Measuring Range</i>	<i>Unit</i>	<i>Accuracy</i>
<i>Thermocouple</i>	<i>Omega</i>	<i>Cl-23a</i>	<i>-40 / +150</i>	<i>°C</i>	<i>±0.1</i>
<i>High Pressure Gauge</i>	<i>Eliwell</i>	<i>Hp</i>	<i>0-30</i>	<i>bar</i>	<i>±0.1</i>
<i>Low Pressure Gauge</i>	<i>Eliwell</i>	<i>Lp</i>	<i>0,5-8</i>	<i>bar</i>	<i>±0.01</i>
<i>Thermohygrometer</i>	<i>Rotronic</i>	<i>M23w2ht-1x</i>	<i>0 / +50</i>	<i>°C</i>	<i>±0.03</i>
			<i>0-100</i>	<i>%RH</i>	<i>±1.5%</i>
<i>Anemometer</i>	<i>E+E Elektronik</i>	<i>Ee660-V7</i>	<i>0-2</i>	<i>m/s</i>	<i>±0.01</i>
<i>Digital Gas Meter</i>	<i>Value</i>	<i>Ves-100b</i>	<i>0-100</i>	<i>kg</i>	<i>±0.05%</i>
<i>Digital Manifold</i>	<i>Testo</i>	<i>550</i>	<i>-50 / +150</i>	<i>bar</i>	<i>±0.1</i>
			<i>-1 / +60</i>		<i>± 0.01</i>
<i>Energy Analyzer</i>	<i>Janitza</i>	<i>Umg 508</i>	<i>-</i>	<i>amper</i>	<i>Current</i>
				<i>volt</i>	<i>Voltage</i>
					<i>±0.1%</i>
<i>Flow Meter</i>	<i>Siemens</i>	<i>Sitrans Fc Mass</i>	<i>0-1000</i>	<i>kg/h</i>	<i>±0.1%</i>
		<i>6000</i>			

The equipment used in the refrigeration system and their values are shown in Table 2.

**Table 2.** Type 1 and Type 2 values of the equipment used in the refrigeration system

<i>Equipment</i>	<i>Type 1</i>	<i>Type 2</i>
<i>Evaporator</i>	<i>1400 W</i>	<i>1400 W</i>
<i>Evaporator Fan</i>	<i>5x18 W</i>	<i>5x18 W</i>
<i>Evaporator Fan Flow Rate</i>	<i>5x350 m<sup>3</sup>/h</i>	<i>5x350 m<sup>3</sup>/h</i>
<i>Condenser</i>	<i>2x1300 W</i>	<i>2x1300 W</i>
<i>Condenser Fan</i>	<i>4x13 W</i>	<i>4x13 W</i>
<i>Condenser Fan Flow</i>	<i>4x200 m<sup>3</sup>/h</i>	<i>4x200 m<sup>3</sup>/h</i>
<i>Compressor</i>	<i>2x600 W</i>	<i>2x600 W</i>
<i>Door Resistance</i>	<i>375 W</i>	<i>0</i>
<i>Frame Resistor</i>	<i>400 W</i>	<i>400 W</i>
<i>Drainage Resistance</i>	<i>600 W</i>	<i>600 W</i>

For Type 1, the cost of the 3-door glass with resistance is 5500 TL, for Type 2 the cost of the glass with anti-fog film is 6500 TL, the electricity price is 1.07 TL/kWh [23] according to the TEDAŞ 2021 electricity sales price, and the payback period is calculated.

### 3. THEORETICAL ANALYSIS

The performance analyzes of the refrigeration system given in Figure 1 were made according to the 1st and 2nd Laws of thermodynamics. The evaporator capacity ( $Q_e$ ) used in the refrigeration system is determined by the following equation [28].

$$\dot{Q}_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \quad 1$$

Here,  $\dot{m}$  is the mass flow rate of the refrigerant,  $h_1$  is the enthalpy of the fluid at the evaporator outlet, and  $h_4$  is the enthalpy of the fluid at the evaporator inlet. The compressor power in the system is found by equation 2 [28].

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad 2$$

Here,  $h_2$  represents the enthalpy of the fluid leaving the compressor, and  $h_1$  the enthalpy of the fluid entering the compressor. The coefficient of performance (COP) of the refrigeration system can be calculated by equation 3 [28].

$$COP = \frac{Q_e}{W_{comp}} \quad 3$$

The energy efficiency index (EEI) value can be calculated with the 4th equation. The AE value in the equation represents the annual energy consumption (kWh/year), and the SAE value represents the reference value of the annual energy consumption amount [28].

$$EEI = \frac{AE}{SAE} \quad 4$$

Type 1 Class E boundary conditions are  $50 \leq EEI < 65$  and TYPE 2 Class D boundary conditions are  $35 \leq EEI < 50$  [24]. Energy efficiency classes are determined according to Table 3.

**Table 3.** Energy efficiency classes [24]

<i>Energy efficiency class</i>	<i>EEI</i>
<i>A</i>	$EEI < 10$
<i>B</i>	$10 \leq EEI < 20$
<i>C</i>	$20 \leq EEI < 35$
<i>D</i>	$35 \leq EEI < 50$
<i>E</i>	$50 \leq EEI < 65$
<i>F</i>	$65 \leq EEI < 80$
<i>G</i>	$EEI \geq 100$

To find the AE value in equation 4, it is necessary to know the daily energy consumption (Equation 5) [24].

$$AE = 365 \cdot E_{day} \quad 5$$

It is necessary to know some coefficients to find the SAE value in equation 4. These coefficients can be found in the "Regulation of the European Parliament and the Council" [24, 25]. According to the regulation, M coefficient is 7.5, N coefficient is 19.300, C temperature coefficient value is 0.9, P coefficient is 1.10 for vertical supermarket freezer cabinets. The Y value should be taken as the sum of the total display areas in  $m^2$  of all the compartments of the refrigeration device in the same temperature class.

$$SAE = 365 \cdot P \cdot (M + N \cdot Y) \cdot C \quad 6$$

When the electrical energy (kWh) consumed by the compressor used in the refrigeration system is evaluated, Sovacool in his published study [26] stated the average  $CO_2$  equivalent density for electricity

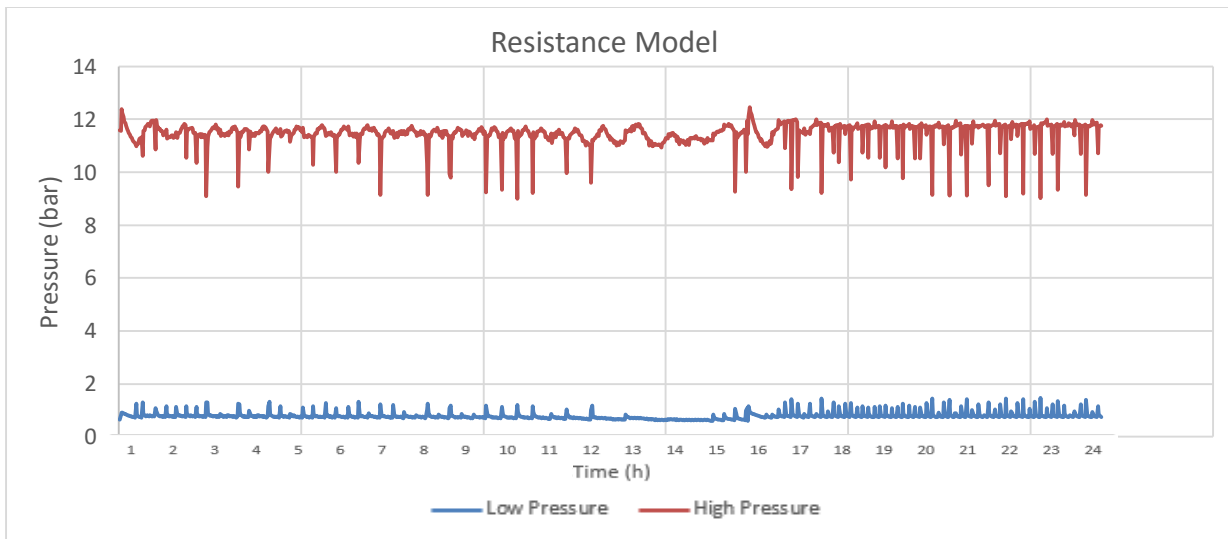
generation from coal as fuel as approximately 0.96 kg CO<sub>2</sub>/kWh. This value can be corrected as 2.08 kg CO<sub>2</sub>/kWh when calculated with 40% transmission and distribution losses and 20% losses due to inefficient electrical appliances used [27].

CO<sub>2</sub> reduction can be done with equation 7 [27].

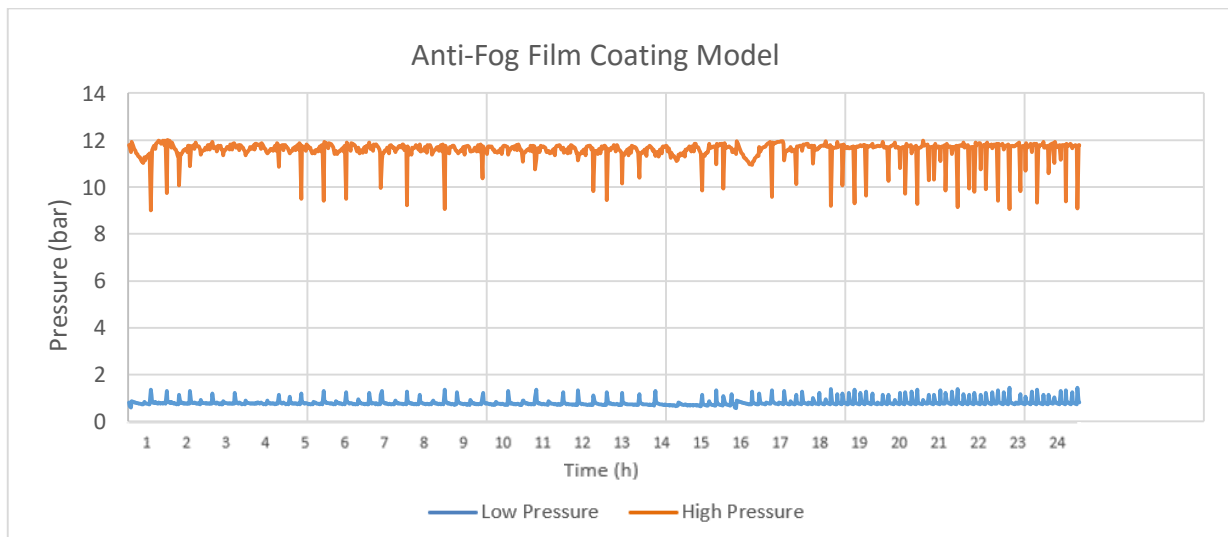
$$\Phi_{CO_2} = \Psi_{CO_2} \cdot \dot{Q}_u \quad 7$$

#### 4.RESULT

In this study, resistance and anti-fog film energy consumption, energy efficiency index, pressure calculations, evaporator temperature change analyzes were made on the 3 door vertical industrial freezer cabinet door glasses used in the industrial refrigeration system. R290a is used as refrigerant in both systems. The values obtained as a result of the 24 hour analysis are presented in the graphics. Figure 3 and Figure 4 show the operating pressure ranges of resistance and anti-fog film coating models, respectively. In the resistance model, it works in the range of high pressure 9-12.5, low pressure 0.6-1.3 bar, and in the anti-fog film-coated model, it works in the range of high pressure 9-12, low pressure 0.6-1.4 bar. Average low and high pressure values were found to be 1.06 and 9.67 bar for the resistance model, and 1.08 and 9.73 bar for the anti-fog film coated model. In this case, it was observed that the high pressure value was 0.06 bar lower in the resistance model.

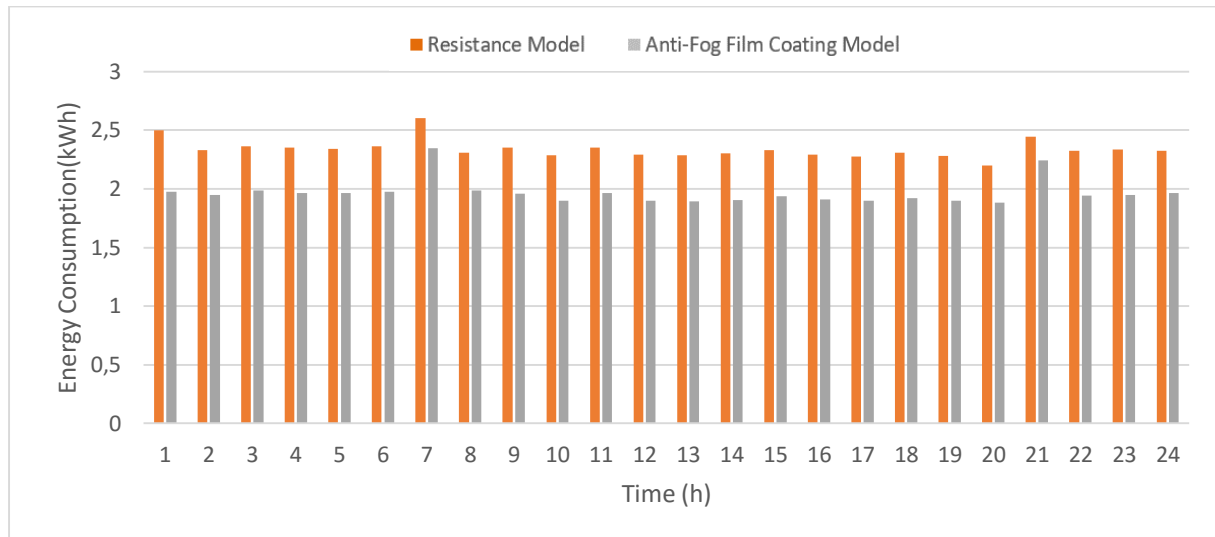


**Figure 3.** Time dependent high and low pressure values of the resistance model



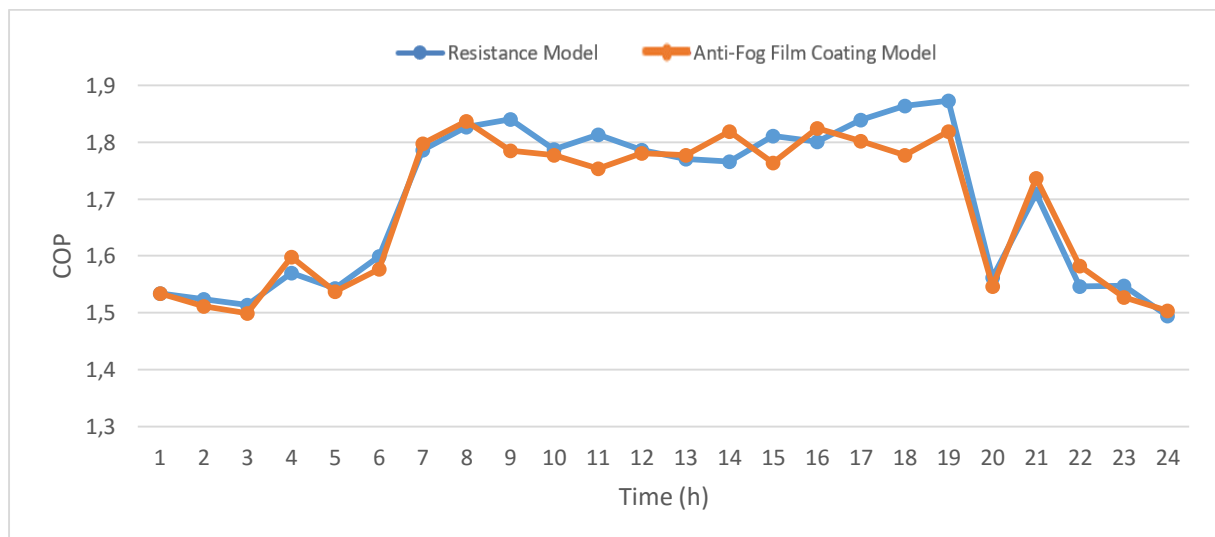
**Figure 4.** Time-dependent high and low pressure values of the anti-fog film coating model

The time-dependent energy consumed by the compressors and fans in the modelrefrigeration systems with resistance and anti-fog film coating is given in Figure 5. The compressor in the resistance model consumed more energy over time. The highest energy consumption was seen as 2.605 kWh in the 7th hour in the resistance model and 1.977 kWh in the 7th hour in the anti-fog film coated model. The average hourly energy consumption value of the resistance model was 2.014 kWh, and the model with anti-fog film coating was 1.638 kWh.



**Figure 5.** Energy consumption of the refrigeration system

Figure 6 shows the model refrigeration systems with time-dependent refrigeration COP resistance and anti-fog film coating. Refrigeration COP of the resistance and anti-fog film coated models was seen as the highest COP value of 1.873 for the resistance model at the 19th hour, while the highest COP value was seen as 1.837 for the anti-fog film-coated model at the 8th hour. The average refrigeration COP of the resistance and anti-fog film coated model is 1.696 and 1.686, respectively.



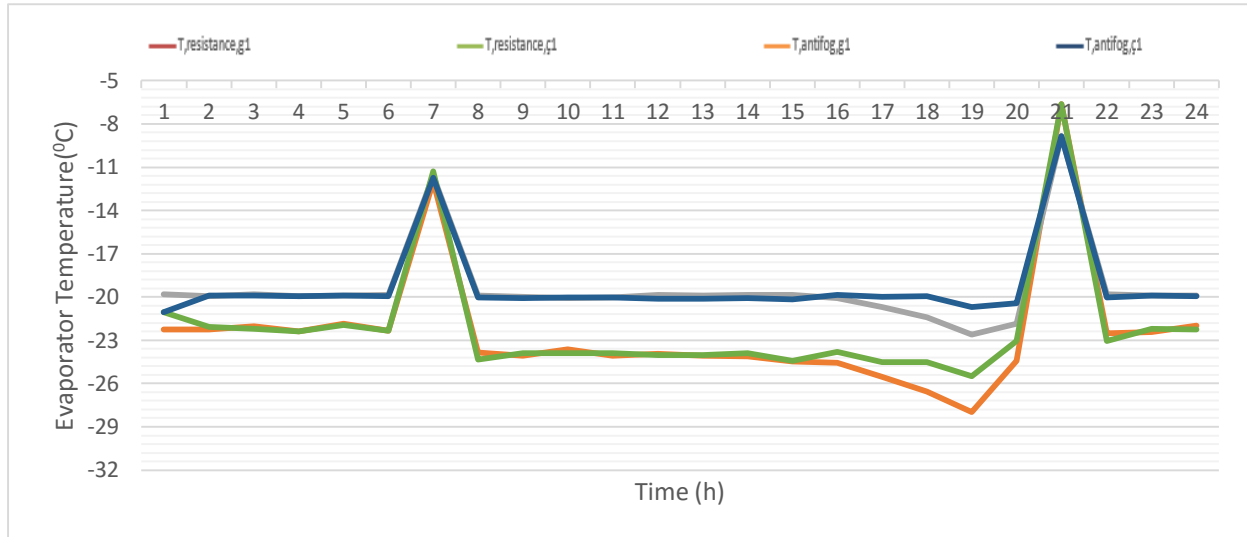
**Figure 6.** COP value of the refrigeration system

In the experimental setup shown in Figure 2, within the scope of TS EN ISO 23953-2 standard, defrosting twice a day, at 7:00 and 21:00, is a total of 31 minutes. During the experiment, the average air temperature and relative humidity values of the test room with resistance glass were measured as 25°C and 59.09%, respectively, and the average air temperature and relative humidity values of the test room of the anti-fog film-coated glass experiment were measured as 25.231°C and 57.207%, respectively, and reached the values specified in the standard found to be suitable. According to this measured temperature



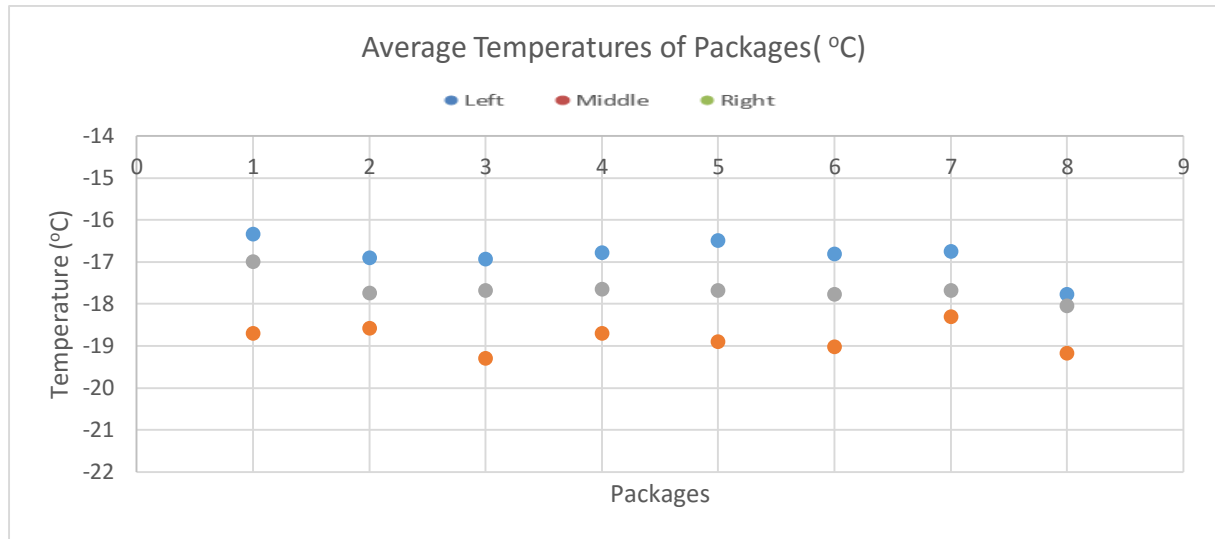
and relative humidity, the dew point thermometer temperature was found to be an average of 16.7°C from the psychrometric diagram.

The variation of the evaporator inlet and outlet air temperature over time is shown in Figure 7. The average inlet and outlet temperatures of the evaporators in the resistance model were calculated as -23.08°C, -19.11°C and -21.92°C, -19.68°C, respectively. The average inlet and outlet temperatures of the evaporators in the anti-fog film coated model were calculated as -22.82°C, -18.98°C and -21.60°C, -19.49°C, respectively.



**Figure 7.** Variation of evaporator inlet and outlet air temperature over time

As seen in Figure 7, moisture begins to condense on the glass surface because the evaporator temperatures are below the dew point. Despite the condensation of moisture, after a while in the experiment, ice formation was observed after the evaporator surface temperature dropped below the freezing temperature of the water. The effect of increased thermal resistance caused by ice formation in the experiment is understood by increasing the temperature of the evaporator outlet air at the end of each refrigeration period. However, the increased ice thickness on the evaporator surface can reduce the cross-sectional area through which the air passes, thus increasing the differential pressure in the air flow. During defrost (7th and 21st hours), it requires more cooling power due to the increasing temperatures of the products. Hotgas defrost method is used in this industrial refrigerator. As hot gas is sent to the evaporator while the system is in the defrosting process, the increase in evaporator inlet-outlet air temperatures is seen in the graph. With the hot gas defrost method, icing and snowing events on the evaporator surface are eliminated by performing an effective defrosting process in a short time without further temperature increases in the products. The water grains dissolved in the hydrophilic coated evaporators are drained quickly and a clean defrost process is made.



**Figure 8.** Average temperature values of packages inside the cabinet

As seen in Figure 8, the average temperature values of 8 packages on the left, middle and right sides of the cabinet are shown. The maximum temperature average value of the packages in the cabinet is  $-16,335^{\circ}\text{C}$ , and the minimum temperature average value is  $-19,292^{\circ}\text{C}$ .

## 5.CONCLUSION

In this study, the changes in the door glasses of the 3-door vertical deep freezer with industrial type R290 refrigerant type 1 with resistance and Type 2 with anti-fog film were compared.

Labeling of industrial display cabinets placed on the market in the EU after March 1, 2021 has become mandatory. Classification from A to G on the label is determined according to the energy efficiency index value. In addition, according to the eco-design requirement, as of March 1, 2021, the energy efficiency index value for vertical and combined supermarket cabinets must be less than 100, and as of September 1, 2023, it must be less than 80 [24]. These obligations, which will affect direct sales, in order for manufacturers to maintain their market shares and not lose their power in the competitive environment, in order to produce energy efficient high quality devices, as in this study, anti-fog film door, grooved-hydrophilic coated and microchannel heat exchanger, environmentally friendly efficient refrigerant, etc. systems should be studied and continuous improvement should be made.

In the resistance model, the daily total energy consumption in the compressor is 22.68 kWh, the daily energy consumption in the door heater is 9 kWh, and the total daily energy consumption is 48.34 kWh. As a result of the calculations, the energy efficiency index value was 60.53 and it was seen that the energy efficiency class was “E”. In the case of installing an anti-fog coating film, the daily energy consumption in the compressor is 22.46 kWh, and the total daily energy consumption is 39.33 kWh. As a result of the calculations, the energy efficiency index value was 49.25 and it was seen that the energy efficiency class was “D”. In the environmental approach, it has been calculated that there will be 18.72 kg CO<sub>2</sub>/day savings with the use of Type 2.

The cooling COP determines how effectively the refrigeration system is used. The average COP value of the resistance model was calculated as 1.696 and the average COP value of the anti-fog coating model was calculated as 1.686.

As a result, the anti-fog coating model was better determined in terms of energy consumption and energy efficiency index than the resistance model. As a result of the calculations, the payback period of Type 2 was found to be 3.46 months. In this sense, the low energy consumption of Type 2 and the use of anti-fog coating film will provide significant energy savings.

With the energy efficiency studies to be carried out, more work should be done to reduce the EEI value by reducing the operating time of the compressor and energy costs should be reduced. In addition, the negative effects of refrigerators on the environment will be reduced.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Nurdil Refrigeration Inc. for their contributions to this study.

## REFERENCES

- [1] Dixell Asia Co. Ltd. (2010). Case study of anti-fog film installation to prevent fogging on cabinet glass door.
- [2] Foster A., Hammond E., Brown T., Evans J., & Maidment G. (2018). Technological options for retail refrigeration. London South Bank University.
- [3] Dixell Asia Co. Ltd. (2009). Refrigerated case aftermarket anti-fogging film.
- [4] Rauss D., Mitchell S., & Faramarzi R. (2008). Cool retrofit solutions in refrigerated display cases. ACEEE Summer Study on Energy Efficient Buildings, 9, 233-244.
- [5] M956148 Anti Fog Design Guide Mock. (2014). Solution Series ByMadico.
- [6] Sabic Global. (2014). Price Chopper anti-fog film. Retrieved 10 17.
- [7] Anti Fog Film Products. (2021). Line Card, FSİ Coating Technologies.
- [8] Anti- Fog Presentation. Sunray Windows Films LCC.
- [9] ANSI/AHRI Standard 1321. (2012). 2011 Standard for performance rating of commercial refrigerated display merchandisers and storage cabinets for use with secondary refrigerants, AHRI.
- [10] ANSI/AHRI Standard 1201. (2013). 2013 Standard for performance rating of commercial refrigerated display merchandisers and storage cabinets, AHRI.
- [11] Radha K.K., Sarda S.N., & Rajagopal K. (2012). Development of a chest freezer – optimum design of an evaporator coil, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 5, 597-611. <http://dx.doi.org/10.15282/ijame.5.2012.6.0047>
- [12] Erten S., Koşan M., İşgen F., & Aktaş M. (2020). Experimental analysis of the air defrost process in an industrial cooling system, *KütahyaDumlupınar University Institute of Graduate Studies, Journal Of Scientific Reports-A*, 45, 143-157.
- [13] Koşan M., Erten S., Aktekel B., & Aktaş M. (2020). Performance analyses of the industrial cooling system with microchannel condenser: an experimental study, *Gazi University Journal of Science, Part A: Engineering and Innovation*, 7, 83-95.
- [14] Waide P., Slui S., & Michineau T. (2014). CLASP commercial refrigeration equipment: mapping and benchmarking, Waide Strategic Efficiency Ltd.
- [15] Girotto S., Minetto S., & Neksa P. (2004). Commercial refrigeration system using CO<sub>2</sub> as the refrigerant, *International Journal of Refrigeration* 27, 717–723. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017>
- [16] Tai J., Evans J., & Baton M. (2014). Analysis of specific issues regarding EU policy proposals for dg ener lot 12 commercial refrigeration, Tait Consulting Limited.
- [17] Geilinger E., Jansse M., Pedesen P.H., Huggins P., & Bush E. (2017). Best available technology of plug-in refrigerated cabinets, beverage coolers and ice cream freezers and the challenges of measuring and comparing energy efficiency, Topten International Services, Re/genT BV, Danish Technological Institute, The Carbon Trust, Topten International Services.

- [18] Choudhari C.S.,&Sapali S.N. (2018). Testing of environment friendly refrigerant R290 for water cooler application, *International Journal of Engineering, Ije Transactions A: Basics*, 31, 157-163. <https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.01a.21>
- [19] Ya G., Hu H.,& Yu J. (2014). Performance evaluation on an internal auto-cascade refrigeration cycle with mixture refrigerant R290/R600a, *Applied Thermal Engineering*, 75, 994-1000. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.063>
- [20] Ataer E.Ö., Özalp M.,&Bıyıkoğlu A. (2001). Refrigerant selection for vapor compression refrigeration systems, V. National Plumbing Engineering Congress and Exhibition.
- [21] Afshari F. (2020). Experimental study for comparing heating and cooling performance of thermoelectric peltier, *Polytechnic Magazine*, 23, 889-894. <https://doi.org/10.2339/politeknik.713600>
- [22] Afshari F., Çomaklı Ö., Karagöz S.,&Zavaragh H.G. (2018). A thermodynamic comparison between heat pump and refrigeration device using several refrigerants, *Energy and Buildings*, 168, 272-283. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.037>
- [23] Koşan M., Demirtaş M., Aktaş M., Dişli E. (2020). Performance analyses of sustainable PV/T assisted heat pump drying system, *Solar Energy*, 199, 657-672. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.040>
- [24] 2019/2018 of 11 March 2019 supplementing regulation (EU) 2017/1369 of the european parliament and of the council with regard to energy labelling of refrigerating appliances with a direct sales function. *Official Journal of the European Union*, (2019).
- [25] 2019/2024 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for refrigerating appliances with a direct sales function pursuant to directive 2009/125/EC of the european parliament and of the council. *Official Journal of the European Union*, (2019).
- [26] Sovacool B.K. (2008). Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey, *Energy Policy*. 36, 2950-2963. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017>
- [27] Tripathi R., Tiwari G.,& Dwivedi V. (2016). Overall energy, exergy and carbon credit analysis of N partially covered photovoltaic thermal (PVT) concentrating collector connected in series, *Solar Energy*, 136, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.002>
- [28] Yamankaradeniz R., Horuz İ., Kaynaklı Ö., Coşkun S.,&Yamankaradeniz N. (2017). *Cooling technique and heat pump applications*, Dora Publishing.



## Estimates of hydroelectric energy generation in Turkey with Jaya algorithm-optimized artificial neural networks

ErgunUZLU<sup>1\*</sup> <sup>1</sup>Karadeniz Technical University Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Trabzon/Turkey

### Article Info

Research article  
Received: 05/04/2021  
Revision: 16/07/2021  
Accepted: 18/07/2021

### Keywords

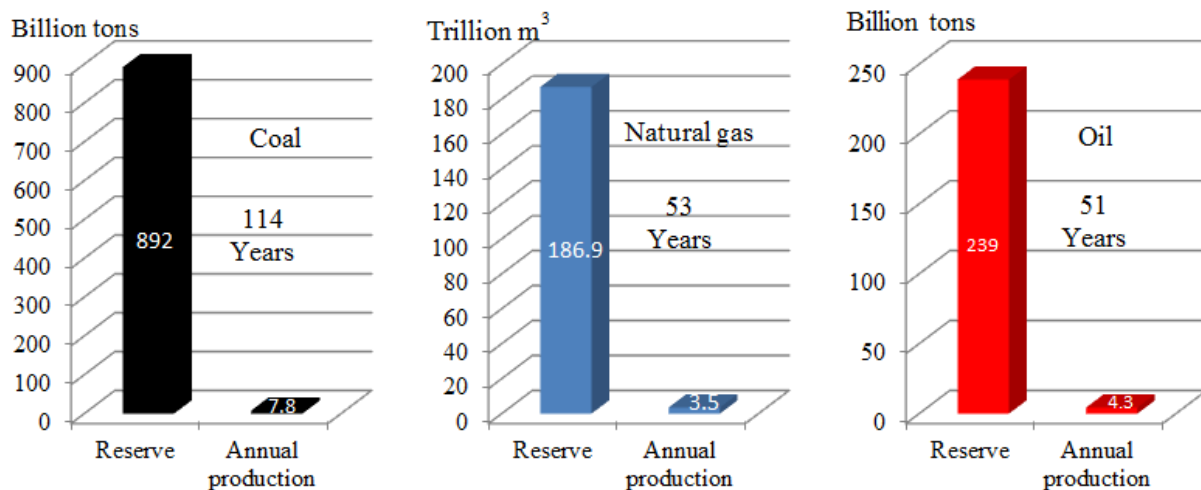
Jaya Algorithm  
ABC Algorithm  
Hydropower Generation  
Neural Networks

### Abstract

The main purpose of this study was to establish an artificial neural network (ANN) model trained by a Jaya algorithm, and use the model to predict Turkey's future hydroelectric energy generation (HEG). Population, gross domestic product (GDP), installed capacity, energy consumption, gross electricity energy demand (GEED), and average yearly temperature (AYT) data were inputted as independent variables in the model. ANN-Jaya was compared with ANN models trained by the other two high performance optimization methods, namely back-propagation (BP) and artificial bee colony (ABC) algorithms, to test its accuracy. The ANN-Jaya model converged to smaller error values than values obtained with the ANN-BP and ANN-ABC models for both the training and test datasets. When the average relative error (RE) values calculated for the test set are taken into account, ANN-Jaya performs 19.3% better than ANN-ABC and 31.2% better than ANN-BP. Therefore, Turkey's HEG projections were made out to the year 2030 using an ANN-Jaya model in a low and a high energy demand scenario. According to the developed projections, HEG values in Turkey in 2030 will be in the range of 104.81–124.66 TWh. The present results affirm that HEG can be modeled accurately with an ANN-Jaya technique and this method was shown to be advantageous for predicting future HEG.

## 1. INTRODUCTION

In 2020, 80% of energy consumption in the world was being met by fossil fuel resources. According International Energy Agency studies, the global primary energy demand is expected to increase by 45% in the next 20 years [1]. As shown in Figure 1, depletion of fossil fuel reserves—including oil, natural gas, and coal reserves—is accelerating due to ever-increasing global energy demands and reliance on fossil fuel resources is not sustainable. The insufficiency of fossil fuel resources to meet growing energy consumption demands is making it necessary for countries to undertake energy security measures. Additionally, there is growing awareness of the environmental harms caused by the CO<sub>2</sub> emissions produced by fossil fuel combustion.



*Figure 1. Remaining lifetimes of fossil fuel reserves [1].*

The share of total domestic energy production from fossil fuels in Turkey is 57.5%. (18,380MTOE ). This amount constitutes only 26.6% (31,944MTOE ) of Turkey's primary energy consumption [2]. Because Turkey does not have ample fossil fuel reserves, about half of its electricity consumption is delivered from imported sources (50.6% in 2016) and, consequently, energy importation costs represent a heavy national economic burden. Indeed, energy imports account for 20% of the total imports into Turkey by cost. Dependence on imported energy sources represents one of the biggest challenges faced by developing countries, such as Turkey, in the 21<sup>st</sup> century.

In 2018, the sources of energy used in Turkish electricity production were distributed as follows: coal, 37.2%; natural gas, 30.3%, hydropower 19.7%, wind 6.5%, solar 2.5%, and geothermal energy 2.5% [3, 4]. Hydroelectric energy generation (HEG), which yielded 59.9 billion kWh in 2018, is the biggest renewable contributor to electricity in Turkey. Increasing HEG is estimated to have the potential to produce 160 billion kWh/year in Turkey [3], which could play a vital role in developing sustainable domestic energy policies. While 24.7% of Turkey's electric energy consumption was supplied from hydroelectric energy in 2000, this rate declined to 19.7% in 2018 [4]. In recent years, there is a significant increase in amount of energy imported by Turkey. This increase jeopardizes the reliability of energy supply. Therefore, Turkish government has initiated a trend towards domestic resources in energy production. The private sector's interest in renewable energy sources increased with the "Electricity Market Law no. 4628" in 2001 and "Renewable Energy Incentive Law no. 5346" in 2005. In this way, the share of hydroelectric power plants in terms of installed power increased with new projects [5].

So far, 1244 hydroelectric power plants are in various stages of development in Turkey. 714 hydroelectric power plants have been put into operation, 37 are under construction and 493 are in various planning stages [6]. In 2018, the installed capacity and annual average energy generation capacity of the hydroelectric power plants in operation reached approximately 28,291 MW and 59.9 TWh, respectively [4]. According to these data, only 43% of Turkey's technically and economically hydroelectric potential has been developed. Thus, Turkish government should rapidly take hydroelectric power plants into operation in order to meet the increasing demand for electrical energy and to reduce the current account deficit.

Energy production and consumption projections are used to inform energy policy decisions. Unfortunately, official HEG estimates made by the Turkish Electricity Transmission Corporation (TEIAS) are considered to be unreliable and to be overestimated due to political concerns [7]. The Turkish government needs realistic HEG projections to undertake effective energy investment planning and meet future energy needs. Moreover, accurate short-term HEG predictions are needed to ensure adequate and uninterrupted electrical energy. Incorrect estimates can lead to disruptions in electrical energy supply or wasted energy. Obtaining precise estimates of HEG has been difficult because HEG is affected by a wide variety of factors, including climate, population, economic growth, and the status of energy facilities [7].

According to the literature review, there has no previously published study predicted HEG values of Turkey between the years of 2019-2030. In this study, a realistic HEG projection has been developed. The obtained projection is planned to be a guide to decision makers in Turkey's energy investments. Thanks to the obtained projection, the country's economic resources related to energy investments will be used more efficiently and the country will get rid of the heavy import burden on the economy. In addition, realistic energy investment plans can be made to increase renewable energy production. Furthermore, Turkey's climate change policies can be developed.

The aim of this study was to develop a predictive model for Turkey's future HEG and thus contribute to the development of policies aimed at increasing the domestic energy supply in Turkey. Towards this aim, a hybrid model consisting of artificial neural networks (ANNs) and a Jaya algorithm was developed to produce HEG predictions. The model is informed by six types of input data: GDP (gross domestic product), population, average yearly temperature (AYT), installed capacity, gross electricity energy demand (GEED), and energy consumption. This new ANN-Jaya model method was employed to obtain future HEG value estimates for two scenarios.

## **2.LITERATURE REVIEW**

Energy estimation methods include primarily statistical methods and artificial intelligence methods. Regression analyses, autoregressive integrated moving average (ARIMA) models, and grey estimation models commonly use statistical methods. However, because statistical methods require precise mathematical expressions, they are not readily adaptable to the fluctuations in independent variables that affect HEG and thus not well suited for HEG estimation. This limitation can be overcome with the use of artificial intelligence methods that advance nonlinear modeling abilities and do not depend on precise mathematical expressions, including ANNs, fuzzy logic, genetic algorithm, artificial bee colony (ABC), teaching learning based optimization (TLBO), ant colony optimization, and particle swarm optimization algorithms.

Geem and Roper [8], Ekonomou [9], and Kankal et al. [10] used ANN and regression analysis techniques to estimate energy consumption in South Korea, Greece, and Turkey, respectively. In all three studies [8, 9, 10], ANNs gave better results than regression analyses. Similarly, Pao [11] and Kandananond [12] found that ANN methods were more effective than statistical methods, such as ARIMA, for estimating electrical energy consumption in Taiwan and Thailand, respectively. Hence, these aforementioned studies indicate that ANN methods are superior to statistical methods for energy modeling. On the other hand, Uzlu [13] and Uzlu and Dede [14] used ANN-Jaya technique to estimate Turkey's future energy consumption and electricity consumption values, respectively. They utilized GDP, population, import and export data as independent variables in their models. They found that ANN-Jaya give better results than ANN-ABC and ANN-TLBO. In this study, six independent variables were used different from other ANN-Jaya models [13, 14]. This situation increased the number of ANN weights to be optimized and complicates the optimization problem. However, this problem can be solved by increasing the number of iterations and run numbers. ANN-Jaya algorithm gives better results than other algorithms for different data sets. This is a proof of its optimization power.

Similar statistical methods and ANNs have been used to make HEG projections. Wang et al. [15] used grey modeling and the seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) methods to estimate HEG in China, and obtained better results with the former than the latter. To estimate Canada's hydroelectric energy potential, Coulibaly and Anctil [16] developed an ANN model and developed an ANN-training method called the optimal weight estimate procedure. In Turkey, Cinar et al. [17] trained ANNs with a genetic algorithm and a back propagation (BP) algorithm to predict HEG, and found that genetic algorithm-trained ANN models performed better than BP-trained ANN models. In their models, electrical energy consumption, primary energy consumption, installed capacity, population, and GDP are treated as independent variables. Using the ANN-genetic algorithm model, they obtained HEG predictions for the years of 2007 and 2012. Uzlu et al. [7] developed BP- and ABC-trained ANN models to obtain HEG projections for Turkey for the time period of 2012–2021, with the ABC algorithm yielding better ANN training results than the BP algorithm. GEED, population, energy consumption, and AYT were used as input data in the model.

Although numerous studies related to energy consumption have been conducted, there have only been two studies that have modeled future HEG, both of which were mentioned above [7, 17]. Energy production projections are at least as important as energy consumption projections for national energy planning. Many studies have demonstrated the importance of Turkey's hydroelectric potential [18, 19, 20, 21, 22]. HEG projections are needed to inform investment planning for energy security as well as to guide the development of policies regarding alternative energy sources and climate change.

The Jaya technique proposed herein involves a new meta-heuristic algorithm, that is both simple and robust. The technique can be used to solve optimization problems that are either constrained or unconstrained. Although Jaya is relatively new, it has been applied in several engineering fields. Also, some researchers [13, 14] have used Jaya in energy modeling area to cope with the ANN problems of memorization and getting stuck in a local minimum. They found that the ANN-Jaya showed better performance than ANN-ABC and ANN-TLBO due to reasons such as the low number of control parameters in Jaya, the simpler structure of the algorithm and its convergence to the optimum solution requiring less effort. Furthermore, Jaya has better performance than other advanced optimization techniques including PSO and differential evaluation [23-25].

The facts that the Jaya algorithm has a high progression of fitness speed, it does not stick to local optima, does not search in abandoned areas, uses the random search feature more efficiently when faced with the problem of memorization, or when it cannot obtain a better result from the source, make Jaya superior to other algorithms. In addition, setting the optimum values for the control parameters of the metaheuristic algorithms is a very difficult task. While other metaheuristic algorithms include three or more control parameters, the Jaya algorithm has only two control parameters (maximum iterations and population size), making it advantageous compared to other meta-heuristic algorithms.

In this study, Turkey's future HEG potential is predicted with a hybrid ANN-Jaya algorithm model designed to output HEG projections. Economic, social, and climate factors that affect hydroelectric energy consumption, including GDP, population, AYT, installed capacity, GEED, and energy consumption, were used as input data in the models. Notable features that distinguish this study from others are listed below.

- A realistic and applicable HEG projection method was developed and applied to Turkey. There are no published HEG projections for Turkey for the years 2019–2030.
- The error values associated with the developed model are smaller than errors in other similar studies in the literature, and the model has high predictive power.
- The ANN-Jaya technique was used for the first time in a HEG prediction model.
- For the first time in HEG estimation, a model was created that incorporates GDP, population, AYT, installed capacity, GEED and energy consumption data.

This study has practical applications related to HEG and new energy sectors.

### 3.METHODOLOGY

#### 3.1. ANN Model

ANN models with a single hidden layer have been demonstrated to perform successfully [7, 10, 26]. In addition, if a single hidden layer is used, the number of ANN weights to be optimized is reduced, making ANN training easier. Therefore, here, a multilayer feed forward neural network consisting of single input, output, and hidden layers was used to predict HEG. Because there is no exact method for determining the number of neurons to be included in the hidden layer, the number was determined by trial and error [27, 28]. In previous studies [10, 26], use of 5, 10, 15, and 20 neurons in the hidden layer have yielded good results. Therefore, ANN architectures with 5, 10, 15, and 20 neurons in the hidden layer were tested in this study. Inter-layer transfer functions were determined based on previous studies [7, 10, 26]: a tangent sigmoid function and a linear function were used as transfer functions between the input and hidden layers and between the hidden and output layers, respectively. The weights of the ANN model were optimized with BP, ABC, and Jaya algorithms.



The mean square error (MSE), calculated according to equation (1), was used as the objective function in the ANN models [27]. During ANN training, BP, ABC, and Jaya algorithms were tried to find optimum ANN weights that yield the smallest MSE value.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad (1)$$

where  $o_k$  is the estimated value of ANN,  $y_k$  is the actual value, and  $n$  is the total number of data.

### 3.2. BP Algorithm

The BP algorithm has been used successfully in ANN training since 1986 [29]. However, the predictive power of BP-trained ANN models has been limited by memorization and local minimum traps. In addition, the selection of initial weights and special control parameters, such as learning and momentum rates, affects BP algorithm performance. Because optimal learning and momentum ratio selection is challenging and without a consensus method, the most suitable values can only be determined by trial and error. This situation prolongs optimization and makes ANN training difficult. The BP algorithm is quite mature and has been described in detail many times [7, 10, 26, 27, 29]. Thus, only a summary of its principles is provided here. First, the BP algorithm selects ANN weights randomly from within a predetermined range and calculates results using the selected weights. The proximity of the calculated value to an empirical value is measured by means of a predetermined error criterion. The calculated error value is distributed among the ANN weights according to learning rate. The ANN weights are updated continuously depending on their contribution to the error function. In this way, the BP algorithm approaches optimal weights that give values closest to the empirical target result. The cycle continues until the predetermined maximum number of iterations or error value is reached.

### 3.3. ABC Algorithm

ABC is a colony optimization algorithm based on the working and food searching processes of bees that was developed by Karaboga. It is a powerful optimization technique that is frequently used in ANN training in many different fields and gives successful results. The basic components of the ABC algorithm and its general operation are briefly summarized here. In the ABC algorithm, each solution corresponds to a food source, and bees try to find the locations of the most suitable food sources (highest amount of nectar) in a solution space. Conformance is the error value found for the chosen solution. As the error value of the solution gets smaller, its suitability increases. In this study, the ABC algorithm searched for the most suitable ANN weights in lieu of the most suitable food resources. The algorithm includes scout, onlooker, and employee bees. Initially, the bee population consists only of (equal numbers of) onlooker and employee bees. An employee bee is assigned for each "food source" (ANN weight in this study) [30].

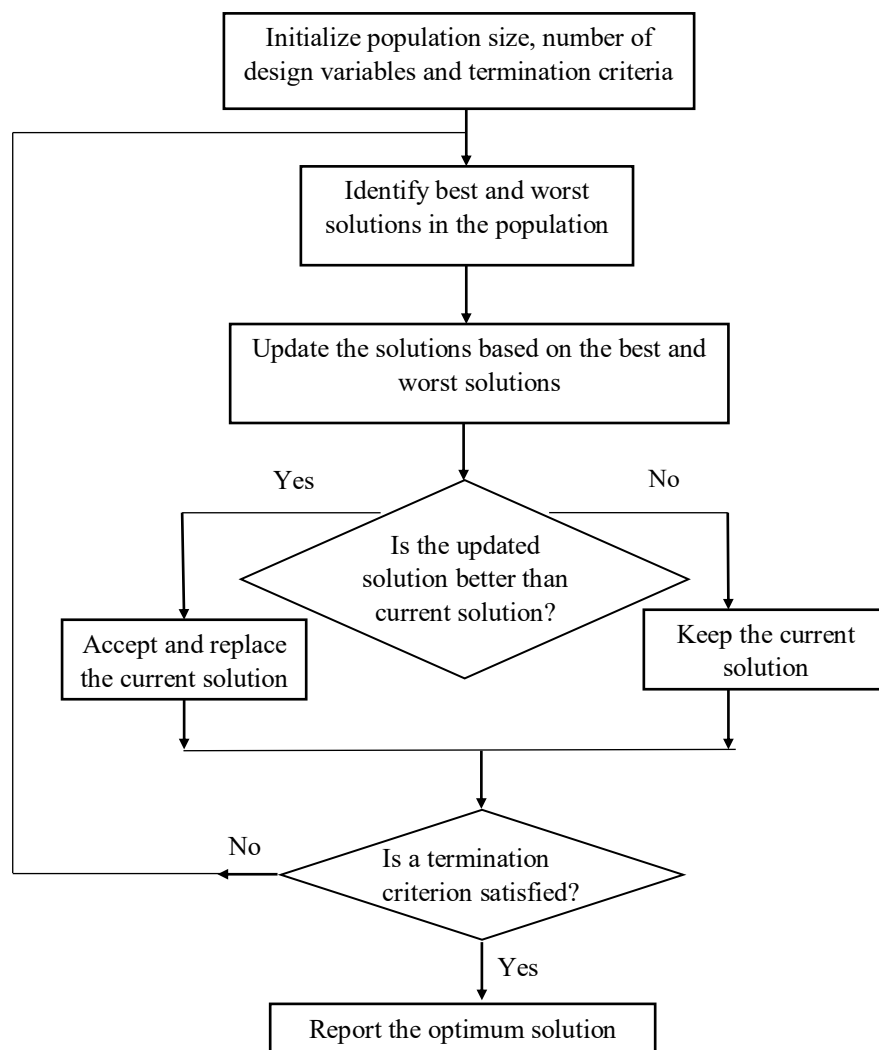
Regarding the algorithm's working principles, in the first stage, food sources are determined randomly by the algorithm. Then employee bees go to the algorithm-determined food sources and each calculates the amount of nectar present, thereby determining the suitability of the randomly chosen solutions. Employee bees share the information they gather with onlooker bees. Onlooker bees start looking for new sources near the most suitable source, based on the information from the employee bees. At this point, the onlooker bees turn into employee bees. If a better source cannot be found near a food source within the predetermined limit value, the worker bee leaves that source. Each employee bee that leaves a food source assumes the role of a scout bee. Scout bees choose new food sources randomly. The main difference between scout bees and onlooker bees is that they use external clues to find new food sources. In this way, the algorithm avoids becoming stuck in a local minimum and encountering memorization problems. The aforementioned series of events constitutes one cycle. The best solution in each cycle is recorded by the algorithm. The cycle is repeated until a predetermined number of cycles or desired error values are reached [30].

### 3.4. JAYA Algorithm

All meta-heuristic optimization algorithms require the inclusion of population size and number of iterations as control parameters. In addition to these, some algorithms require additional specific control parameters. For example, GA requires crossover probability, mutation probability, and a selection operator. The ABC algorithm requires parameters to limit the number of bees of each type. The particle swarm optimization, harmony search, cuckoo search, imperialist competitive, and differential evolution algorithms also have specific parameters [31]. The performance of these algorithms is dependent upon the correct choice of control parameters. Therefore, optimization algorithms with few control parameters, such as TLBO and Jaya algorithms, are very attractive.

A recently proposed Jaya algorithm provides population-based optimization with only two control parameters [23]. The Jaya algorithm includes only a single phase (unlike TLBO) and has a simple numerical structure [31]. Thus, it is simple to implement and code. Furthermore, Jaya does not get stuck in local minima, unlike other metaheuristic algorithms. These features make the Jaya algorithm superior to TLBO and other metaheuristic algorithms.

A Jaya algorithm flowchart is provided in Figure 2. First, a random initial population of solutions is produced. The objective function of the problem is used to determine the best and worst solutions. The algorithm's success is continuously improved by approaching an optimal solution while avoiding failure by moving further away from relatively poor solutions. In this way, all candidate solutions are updated.



**Figure 2.** Flowchart of the Jaya algorithm [23, 32].

Jaya solutions are updated according to Eq. (2):

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i} (X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|) - r_{2,j,i} (X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|) \quad (2)$$

where  $X_{j,k,i}$  represents the value of the  $j^{\text{th}}$  variable for the  $k^{\text{th}}$  candidate in the  $i^{\text{th}}$  iteration,  $X_{j,best,i}$  is the variable  $j$  value of the best candidate, and  $X_{j,worst,i}$  is the variable  $j$  value of the worst candidate.  $X'_{j,k,i}$  is the updated value of  $X_{j,k,i}$ ; and  $r_{1,j,i}$  and  $r_{2,j,i}$  are two random numbers in the range  $[0, 1]$  generated for the  $j^{\text{th}}$  variable during the  $i^{\text{th}}$  iteration [32].

If the objective function of a newly proposed solution ( $X'_{j,k,i}$ ) is less than that of the current solution ( $X_{j,k,i}$ ), then the new solution replaces the putative current solution. Otherwise, the algorithm preserves the current solution. This cycle is repeated until the convergence requirements have been met. Detailed information about the Jaya algorithm can be found in the literature [23, 31, 32].

### 3.5. ANN Training

Although the well-established BP algorithm gives very successful results in ANN training [7], its utility is limited by the risk of getting stuck in a best local solution, memorization problems, and difficulties with selecting control parameters [27]. Metaheuristic algorithms, such as ABC, TLBO, and JAYA, have been shown to give better results than BP in ANN training [7, 13, 26, 27]. In this study, to overcome the problems mentioned above and to develop an ANN model with high predictive power, herd-based optimization techniques, namely ABC and JAYA, were used in ANN training in addition to BP.

The weights and biases of ANN models were updated iteratively by a BP, ABC, or Jaya algorithm until the rates of change in the objective function decreased to an acceptable value (i.e., the objective function converges). The objective function to be minimized is in all cases was the MSE (1).

To evaluate how well the trained ANNs perform, average relative error (RE) [27], root mean square error (RMSE) values [7], mean absolute error (MAE) values [26], correlation coefficients (R values) [13], and U-statistic values [13] were determined. These measures describe the distance between the predicted energy consumption path ( $y_k$ ) and the true energy consumption path ( $o_k$ ). In eq. (7) below,  $\bar{y}_k$  and  $\bar{o}_k$  are means of predicted and real HEG values, respectively. RE, RMSE, MAE, U-statistic, and R values are defined as follows:

$$\text{averageRE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{y_k - o_k}{y_k} \right)}{n} \times 100 \quad (3)$$

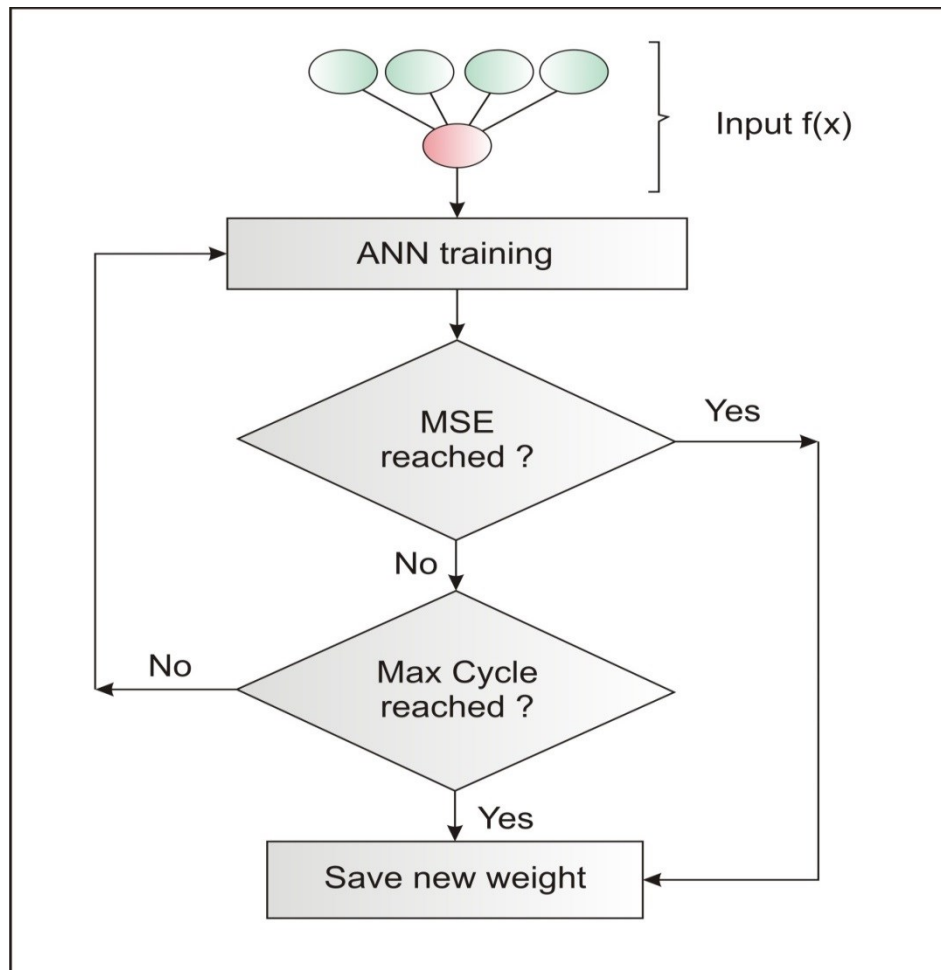
$$\text{RMSE} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_k - o_k)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_k - o_k)| \quad (5)$$

$$U = \frac{\text{RMSE}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (o_k)^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_k)^2}} \quad (6)$$

$$R = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (o_k - \bar{o}_k)(y_k - \bar{y}_k) \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_k - \bar{o}_k)^2 \sum_{i=1}^n (y_k - \bar{y}_k)^2}} \quad (7)$$

A maximum number of iterations of 5000 was selected for the BP, ABC and Jaya algorithms. Optimal learning and momentum ratios in the BP algorithm were determined by trial and error in the range of [0.1, 1]. Based on previous studies [7, 10, 17, 26, 27], initial weight values were selected in the range of [-0.01, 0.01] for the BP algorithm. A population size of 50 was selected for the ABC and Jaya algorithms. The limit value and quantity of employed/onlooker bees in the ABC algorithm were set to 100 and 25, respectively. The weights of the ANN were initialized randomly in the range [-1, 1] in the ABC and Jaya algorithms. The MSE target value was set to  $8 \times 10^{-8}$  for all three algorithms. The training process involves the application of a set of input vectors to the target network repeatedly, updating the weights in each subsequent iteration until a stop criterion (MSE or maximum iterations) is reached, as shown in the flowchart in Figure 3.



**Figure 3.** The proposed ANN training scheme [27].

## 4.DETERMINATION OF INDEPENDENT VARIABLES AND DATA USED

### 4.1. Determining the Independent Variables

HEG projections are difficult to produce due to HEG being affected by numerous parameters, including climate, demographic, and socio-economic factors. Population, GDP, installed capacity, energy consumption, GEED, and AYT have previously been determined to be the specific parameters that have the most pronounced effects on HEG [7, 17], and thus are the preferred parameters in HEG prediction models.

Trends, evident in historical data, show that the need for energy increases naturally as population increases. Population, energy consumption, and HEG data generally change in parallel with one another. GDP, a critical factor that reflects the economic performance of countries, changes in direct proportion to energy consumption. As the GDP increases, the economic activities in the country, especially the production of industrial products, increase. Consequently, there are related increased needs for energy.

In 2018, 31.2% of Turkey's total electricity energy consumption was provided from renewable energy sources [4], including hydroelectric energy (63% of that renewable energy). A majority of the energy used in thermal power plants is imported natural gas [3]. As the demand for GEED and primary energy increases, governments are investing more in HEG, which is a clean, domestic source of production, to reduce dependency on foreign energy sources. Investments in HEG aim to increase installed capacity. However, the contribution of HEG to total installed capacity should be considered in the context of other energy investments. As GEED and primary energy consumption increase, investments in energy production, including HEG, should increase, thereby increasing the installed capacity of HEG.

The climate factor of temperature is an important factor affecting HEG. Because changes in temperature relate directly to all other climate factors, they alter climate factor dynamics. For example, increasing temperatures affect evaporation, precipitation, surface runoff, aqueous saturation of the soil, and water flow volume in rivers. Therefore, temperature is closely related to HEG.

### 4.2. Data Used

To estimate Turkey's HEG, the factors of GDP, population, AYT, installed capacity GEED, and energy consumption data were used as independent variables. The input datasets cover the period of 1980–2018. The data are divided into a training set, used to develop the model, and a test set, used to determine the accuracy of the developed model. The training set consists of data from the years 1980–2010 and the test set consists of data from the years of 2011–2018. Data collected from different sources for each independent variable are presented in Figure 4.

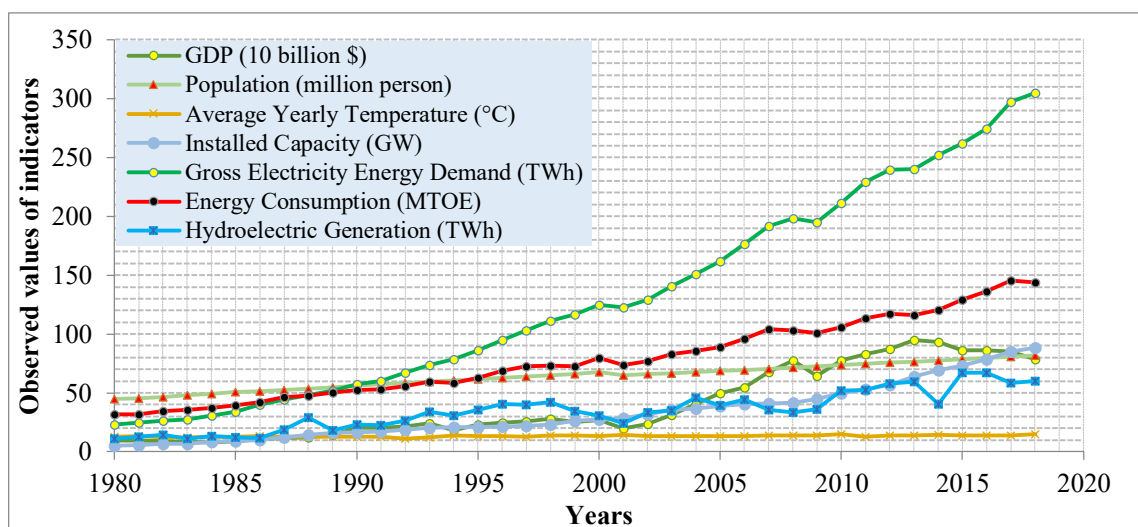


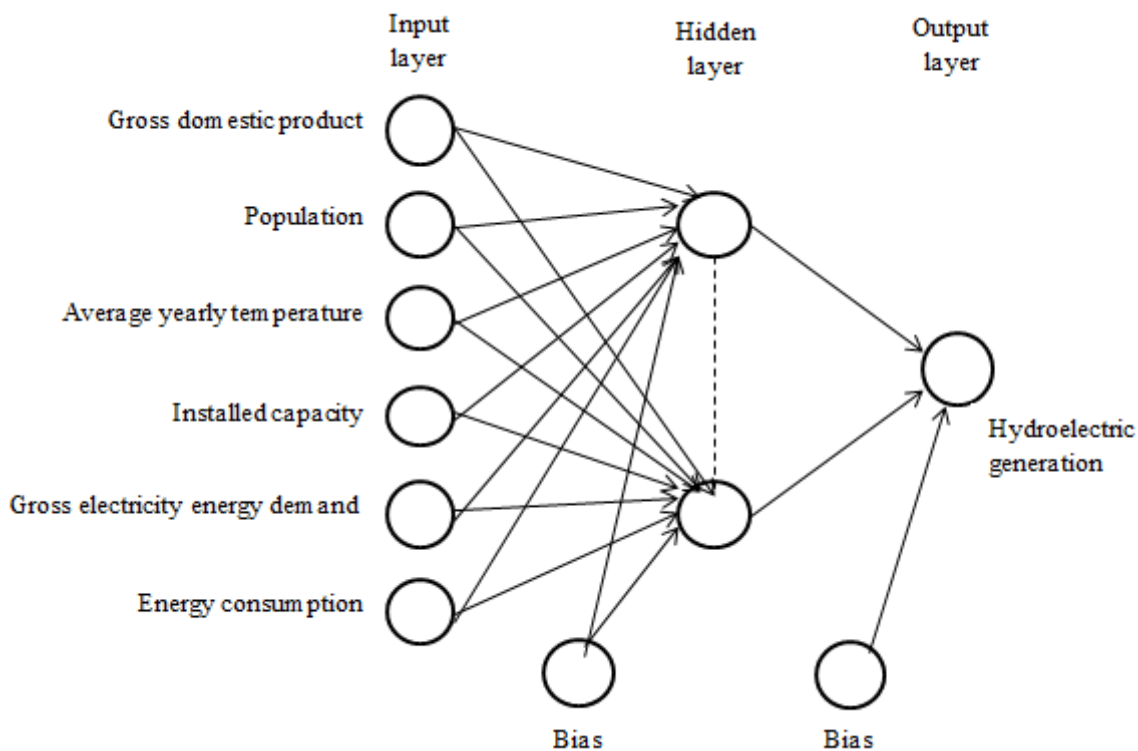
Figure 4. Variations in hydroelectric generation and predictor variables [33-37].

GDP, population, and AYT data were obtained from the Turkish Head of Strategy and Budget [33], Turkish Statistical Institute [34], and Turkish State Meteorological Service [35], respectively. Installed power, GEED, and HEG data were obtained from TEIAS [36]. Energy consumption data were obtained from the Ministry of Energy and Natural Resources [37]. To shorten the optimization process and facilitate the development of the most suitable ANN model, all data were normalized to the interval [0.1, 0.9] with eq. (8). Generally, the results of activation functions are in the [0, 1] interval [27]. To produce more effective results from the activation functions, which were used in ANN input and output layers, the range of [0.1, 0.9] was employed here.

$$\text{Normalized value} = \left[ \frac{\text{raw value} - \text{minimum value}}{\text{maximum value} - \text{minimum value}} \right] \times (0.9 - 0.1) + 0.1 \quad (8)$$

## 5. DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF THE FORECASTING MODEL

The three-layer network used in this study, includes an input layer, hidden layer, and output layer, which is presented in Figure 5. GDP, population, AYT, installed capacity, GEED, and energy consumption values are used in the input layer. HEG, which is the predicted variable, is in the output layer. BP, ABC, and Jaya algorithms were used to train the network. The smallest convergence values obtained for the trained ANN models are presented in Table 1. Error values are calculated using real values.



*Figure 5. Proposed ANN model for HEG prediction*

**Table 1.** The model results for training set

ANN architecture	MSE ((TWh) <sup>2</sup> )		
	ABC Algorithm	TLBO Algorithm	Jaya Algorithm
4-5-1	21.402	17.982	<b>14.508</b>
4-10-1	26.982	21.204	22.518
4-15-1	33.552	23.832	23.130
4-20-1	40.896	33.174	24.786

Note: The bold value is error value for the proposed model.

The best convergence values in all ANN models are obtained when there are 5 neurons in the hidden layer (see Table 1). As the number of neurons in the hidden layer increases, the error values found for the training set increase. In addition, as the number of neurons used increases, the optimization process gets longer. The smallest convergence value is found in the 150<sup>th</sup> iteration for ANN-Jaya (4-5-1) and in the 562<sup>nd</sup> iteration for ANN-Jaya (4-20-1). This situation reflects a pattern wherein a greater number of neurons in the hidden layer yields a greater number of ANN weights to be optimized. The best convergence (minimum MSE) values found for ANN-BP, ANN-ABC, and ANN-Jaya are 14.508, 17.982, and 21.402, respectively. As can be seen from these values, the Jaya algorithm performed 32.2% and 19.3% better than the BP and ABC algorithms, respectively, in ANN training.

These MSE values (presented in Table 1) are the error values calculated for the training set of the developed ANN models. Alone, they do not indicate the predictive power of the network. Due to algorithm limitations (e.g., getting stuck in a local solution and memorizing), predictive power can be low despite high-level training performance. For this reason, the ANN model with the smallest training error does not always have the highest predictive power. To determine which model has the highest predictive power, the test set error values of the ANN models (Table 2) should be taken into account. According to the values in Table 2, the model having the lowest mean RE, RMSE, and MAE values is the ANN-Jaya (4-5-1) model with 5 neurons in the hidden layer. The average RE, RMSE, and MAE error values obtained for the ANN-Jaya (4-5-1) model with the test set data are 3.224%, 9.672, and 7.092, respectively. Considering the error values calculated for both the training and test sets, the best model is the ANN-Jaya (4-5-1) model with 5 neurons in the hidden layer. R and U-statistic values calculated to describe the accuracy of the proposed model (training R, 0.893; test R, 0.935; training U-statistic, 0.018; and test R, 0.007) show that the predictive power of the proposed model is acceptable.

**Table 2.** The model results for testing set

ANN architecture	Average relative error (%)			RMSE (TWh)			MAE (TWh)		
	ABC	TLBO	Jaya	ABC	TLBO	Jaya	ABC	TLBO	Jaya
4-5-1	4.688	3.996	<b>3.224</b>	13.264	11.988	<b>9.672</b>	10.120	8.791	<b>7.092</b>
4-10-1	5.140	4.756	4.712	15.420	14.268	14.136	11.308	10.463	10.366
4-15-1	5.996	5.508	5.004	17.988	16.524	15.012	13.191	12.117	11.008
4-20-1	7.456	7.372	5.296	22.368	22.116	15.888	16.403	16.218	11.651

Note: The bold values are error values for the best model.

Previously reported average RE values of models developed to predict Turkey's HEG are 4.60%, reported by Uzlu et al. [7], and 5.76%, reported by Cinar et al. [17]. These values are greater than the average RE values calculated for the test set with the presently proposed ANN-Jaya model, affirming that the predictive power of the proposed ANN-Jaya model can be considered acceptable.

## 6. HEG FORECASTS

Turkey's HEG values were estimated for the years 2019–2030 in two scenarios using the proposed model. The population data used in the scenarios were taken from the Turkish Statistical Institute population projection [34]. Installed capacity and GEED values were obtained from TEIAS' 10-year demand forecast report [38]. Energy consumption data were obtained from Tefek et al.'s study [39]. The empirical GDP growth rate of 6.82% was employed. AYT values were obtained by regression analysis. The same population, GDP, AYT, and installed capacity values were used in both scenarios; GEED and energy consumption values differed between the scenario 1 (low energy demand) and 2 (high energy demand). The data used in the scenario 1 and 2 are presented in Tables 3 and 4, respectively.

**Table 3.** The data regarding GDP, population, AYT, installed capacity, GEED and energy consumption amounts used in scenarios

Year	GDP (Billion\$)	Population (10 <sup>6</sup> )	AYT (°C)	Installed capacity (MW)	GEED (TWh)		Energy consumption (MTOE)	
	Growth rate 6.82%	TURKSTAT [34]	Regression analysis	TEIAS [38]	TEIAS [38] Low demand	TEIAS [38] High demand	Low Demand [39]	High Demand [39]
2019	837.562	82.886	14.22	96536	315.807	323.788	143.9	150.3
2020	894.683	83.9	14.27	102455	328.409	343.242	148.7	156.7
2021	955.701	84.909	14.32	108046	341.037	363.443	153.7	163.3
2022	1,020.880	85.911	14.36	112368	354.156	384.848	159	170.3
2023	1,090.504	86.907	14.41	115739	367.876	407.889	164.7	177.6
2024	1,164.876	87.886	14.46	118054	381.814	431.664	170.6	185.3
2025	1,244.321	88.845	14.50	119069	396.139	456.471	176.9	193.4
2026	1,329.183	89.785	14.55	121450	410.53	482.263	183.6	201.9
2027	1,419.833	90.704	14.60	123879	424.973	508.611	190.9	210.8
2028	1,516.666	91.601	14.64	126357	439.496	535.941	198.7	220.2
2029	1,620.103	92.476	14.69	130148	454.136	564.135	207.1	230
2030	1,730.594	93.329	14.74	133702	468.399	592.844	216.2	240.3

**Table 4.** Scenarios for Turkey's hydroelectric energy generation

Scenarios	GDP	Population	AYT	Installed capacity	GEED	Energy consumption
Scenario 1	The original growth rate (about 6.82%)	The population data obtained from TURKSTAT [34]	The data obtained used regression analyses	The data received from TEIAS projection [38]	The data obtained from TEIAS [38] with low demand	The data obtained from Tefek et al. [39] with low demand
Scenario 2	The original growth rate (about 6.82%)	The population data obtained from TURKSTAT [34]	The data obtained used regression analyses	The data received from TEIAS projection [38]	The data obtained from TEIAS [38] with high demand	The data obtained from Tefek et al. [39] with high demand

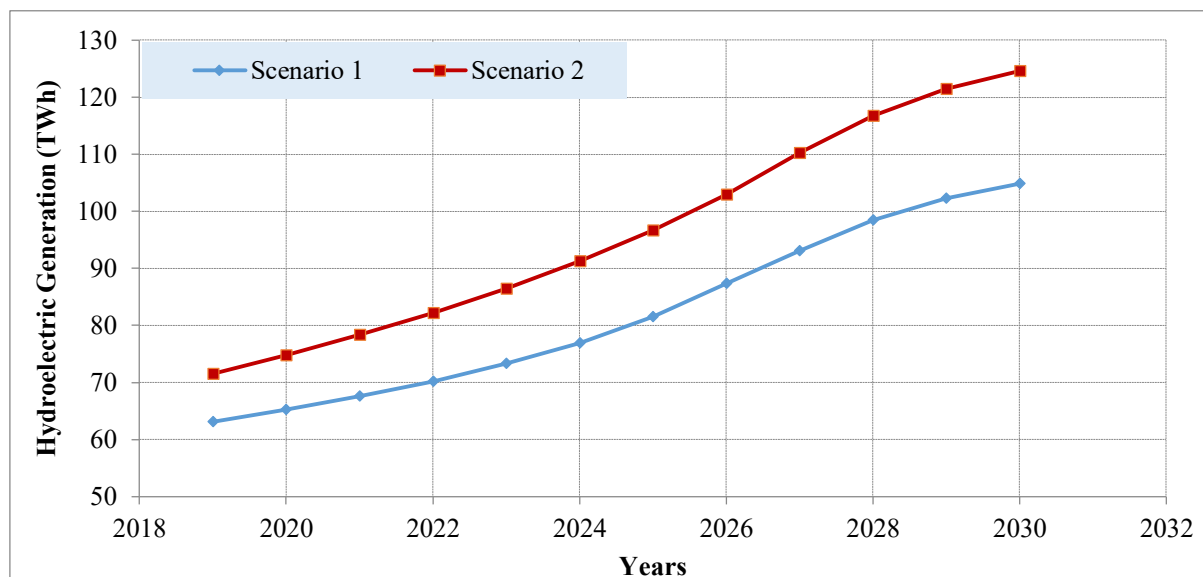
The HEG values estimated by ANN-Jaya (4-5-1) are reported in Table 5 and Figure 6. The ANN-Jaya (4-5-1) model predicts HEG values for Turkey in 2030 of 104.81 TWh under low energy demands (scenario 1) and of 124.66 TWh under high energy demands (scenario 2). Turkey is thus in a favorable situation to benefit from maximizing HEG, which is an environmentally-sensitive renewable and indigenous energy



source. Importantly, HEG projections for Turkey have been published for 2012–2021 [7] and 2017–2021 [40], but, before now, none have been published for years beyond 2021. The 2021 projections (67.62–78.36 TWh) obtained in this study overlap with the TEIAS projections for 2021 (69.39–116.56 TWh) [40] as well as Uzlu et al.'s prior projections (69.13–76.52 TWh) [7], affirming the accuracy of the presently developed projection model. These data indicate that Turkey will continue to benefit from a relatively low HEG level in 2021 and beyond. However, to become independent of foreign energy, Turkey should pursue a policy to augment HEG development.

**Table 5.** Future projections of hydroelectric energy in TWh according to current study

Year	Scenario 1	Scenario 2
2019	63.15	71.57
2020	65.29	74.83
2021	67.62	78.36
2022	70.23	82.22
2023	73.27	86.48
2024	76.94	91.26
2025	81.51	96.67
2026	87.37	102.91
2027	93.07	110.21
2028	98.45	116.73
2029	102.25	121.47
2030	104.81	124.66



**Figure 6.** Comparison of the two scenarios for Turkey's hydroelectric energy generation

To meet GEED projections predicted by the present data and TEIAS' electrical energy demand projections [40], the portion of energy produced by HEG should be increased in Turkey (Table 6). The Turkish government aims to produce 30% of its electrical energy from HEG by 2023. The present data indicate that Turkey is currently on pace for a HEG energy contribution in the range of 18–23.5% in 2023. For 2021, the present data predict a HEG contribution in the range of 18.6–23.0%, which is slightly

lower than but close to the previously predicted range for 2021 of 14.8–18% [7]. These results clearly show that the Turkish government should revise its energy investments and invest more in HEG to reach its desired HEG targets.

**Table 6.** *Hydropower's supply rate of Turkey's total annual electricity demand, between 2019 and 2030*

Year	% of the Total annual electricity demand			
	Current study			
	Scenario 1		Scenario 2	
	In the case of low demand [40]	In the case of high demand [40]	In the case of low demand [40]	In the case of high demand [40]
2019	20.0	19.5	22.7	22.1
2020	19.9	19.0	22.8	21.8
2021	19.8	18.6	23.0	21.6
2022	19.8	18.2	23.2	21.4
2023	19.9	18.0	23.5	21.2
2024	20.2	17.8	23.9	21.1
2025	20.6	17.9	24.4	21.2
2026	21.3	18.1	25.1	21.3
2027	21.9	18.3	25.9	21.7
2028	22.4	18.4	26.6	21.8
2029	22.5	18.1	26.7	21.5
2030	22.4	17.7	26.6	21.0

## 7. CONCLUSIONS

Estimates of HEG values under different scenarios are critical for the development of energy policies. In this study, Turkey's HEG values were modeled from 1980 through 2030 using the ANN-Jaya technique based on GDP, population, AYT, installed capacity, and GEED input data. The accuracy of the proposed ANN-Jaya model is supported by comparisons with the ANN-BP and ANN-ABC models. Comparing the three models, the smallest error values for both the test and training datasets were obtained with ANN-Jaya (4-5-1). Considering the average RE values calculated for the test set, ANN-Jaya performs 19.3% better than ANN-ABC and 31.2% better than ANN-BP. The average RE, RMSE, and MAE values calculated for ANN-Jaya (4-5-1) (3.224%, 9.672, and 7.092, respectively) indicate that the method can be used to estimate Turkey's HEG values in the period of 2019–2030.

The present data obtained for low- and high-energy demand scenarios indicate that HEG values for Turkey in 2030 will be between 104.8 and 124.6 TWh. According to these scenarios and TEIAS'GEED projections [40], the ratio of HEG needed to meet GEED will vary between 17.7% and 16.0%. The obtained results show that Turkey will not be able to reach its targets related to hydroelectric energy in 2030. The decrease in the share of hydroelectric energy production in the total energy production will cause an increase in the amount of imported energy and greenhouse gas emissions. This situation will adversely affect both the national economy and environmental health. If the plans for renewable energy production of Turkey are not revised, the country will face serious economic, environmental and energy problems. These results show that Turkey is lagging its energy composition targets and should revise its energy policies.

For Turkey to reduce its dependence on foreign energy, it will need to increase its HEG capacity. Because Turkey is a developing country, the Turkish government should plan HEG development carefully to maximize the efficiency of its use of resources. Therefore, there is a need for realistic projections related to Turkey's renewable energy production to minimize the possibility of encountering problems mentioned above. The presently reported HEG projections can assist policy makers in their energy investment decision-making. In addition, given that the present results were quite satisfactory, researchers should be encouraged to use the Jaya algorithm for energy modeling.

## REFERENCES

- [1] Natural Gas Distribution Companies Association of Turkey (GAZBİR). Energy situation in Turkey and in the world. <https://www.gazbir.org.tr/uploads/page/Dunya-ve-Turkiye-Enerji-Gorunumu.pdf>, Accessed:10/09/2020.
- [2] Istemi, B., & Ediger, V.Ş. (2016). Forecasting the coal production: Hubbert curve application on Turkey's lignite fields. *Resources Policy*, 50, 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.10.002>
- [3] Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources(MENR) <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-hidrolik-en>, Accessed:10/09/2020.
- [4] Turkish Electricity Transmission Corporation (TEİAŞ). <https://www.teias.gov.tr/en-US> Accessed:10/09/2020.
- [5] Uzlu, E., Akpınar, A., & Kömürcü, M.İ. (2011). Restructuring of Turkey's electricity market and the share of hydropower energy: The case of the Eastern Black Sea Basin. *Renewable Energy*, 36, 676–688. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.012>
- [6] General Directorate of State Water Works (DSİ). 2020 Annual Report. <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/759/1107/DosyaGaleri/DS%C4%B0%202020-yili-faaliyet-raporu.pdf>, Accessed:10/09/2020.
- [7] Uzlu, E., Akpınar, A., Öztürk, H.T., Nacar, S., & Kankal, M. (2014). Estimates of hydroelectric generation using neural networks with artificial bee colony algorithm for Turkey. *Energy*, 69, 638–647. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.059>
- [8] Geem, W.Z., & Roper, W. E. (2009). Energy demand estimation of South Korea using artificial neural network. *Energy Policy*, 37, 4049–4054. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.049>
- [9] Ekonomou, L. (2010). Greek long-term energy consumption prediction using artificial neural networks. *Energy*, 35, 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.018>
- [10] Kankal, M., Akpınar, A., Komurcu, M. I., & Ozsahin, T. S. (2011). Modeling and forecasting of Turkey's energy consumption using socio-economic and demographic variables. *Applied Energy*, 88, 1927–1939. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.005>
- [11] Pao, H. T. (2006). Comparing linear and nonlinear forecasts for Taiwan's electricity consumption. *Energy*, 31, 2129–2141. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.010>
- [12] Kandanond, K. (2011). Forecasting electricity demand in Thailand with an artificial neural network approach. *Energies*, 4, 1246–1257. <https://doi.org/10.3390/en4081246>
- [13] Uzlu, E. (2019). Application of Jaya algorithm-trained artificial neural networks for prediction of energy use in the nation of Turkey. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, And Policy*, 14, 183–200. <https://doi.org/10.1080/15567249.2019.1653405>
- [14] Uzlu, E., & Dede, T. (2020). Estimating electric energy consumption in turkey using artificial neural networks optimized with jaya algorithm. *Gazi Üniversitesi fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8, 511–528. <https://doi.org/10.29109/gujsc.684334>

- [15] Wang, Z. X., Li, Q., & Pei, L. L. (2017). Grey forecasting method of quarterly hydropower production in China based on a data grouping approach. *Applied Mathematical Modeling*, 51, 302–316. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.07.003>
- [16] Coulibaly, P., & Anctil, F. (2000). Neural network-based long-term hydropower forecasting system. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15, 355–364. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00199>
- [17] Cinar, D., Kayakutlu, G., & Daim, T. (2010). Development of future energy scenarios with intelligent algorithms: case of hydro in turkey. *Energy*, 35, 1724–1729. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.025>
- [18] Yuksel, I. (2008). Hydropower in Turkey for a clean and sustainable energy future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1622–1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.01.024>
- [19] Toklu, E. (2013). Overview of potential and utilization of renewable energy sources in Turkey. *Renewable Energy*, 50, 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.035>
- [20] Kentel, E., & Alp, E. (2013). Hydropower in Turkey: Economical, social and environmental aspects and legal challenges. *Environmental Sciences and Policy*, 31, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.02.008>
- [21] Yuksel, I. (2010). Hydropower for sustainable water and energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.025>
- [22] Capik, M., Yilmaz, A. O., & Cavusoglu, I. (2012). Hydropower for sustainable energy development in Turkey: the small hydropower case of the eastern black sea region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6160–6172. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.005>
- [23] Rao, R. V. (2016). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 7, 19–34. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2015.8.004>
- [24] Rao, R. V., More, K. C., Taler, J., & Oclon, P. (2016). Dimensional optimization of a micro-channel heat sink using Jaya algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 103, 572–582. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.135>
- [25] Du, D. C., Vinh, H. H., Trung, V. D., Quyen, N. T. H., & Trung, N. T. (2018). Efficiency of Jaya algorithm for solving the optimization-based structural damage identification problem based on a hybrid objective function. *Engineering Optimization*, 50, 1233–1251. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1367392>
- [26] Kankal, M., & Uzlu, E. (2017). Neural network approach with teaching-learning-based optimization for modeling and forecasting long-term electric energy demand in Turkey. *Neural Computing and Applications*, 28, 737–747. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2409-2>
- [27] Uzlu, E., Kankal, M., Akpınar, A., & Dede, T. (2014). Estimates of energy consumption in Turkey using neural networks with the teaching-learning-based optimization algorithm. *Energy*, 75, 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.07.078>
- [28] Çunkaş, M., & Altun, A. A. (2010). Long term electricity demand forecasting in Turkey using artificial neural networks. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 5, 279–289. <https://doi.org/10.1080/15567240802533542>
- [29] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 533–536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>
- [30] Uzlu, E. Estimates of greenhouse gas emission in Turkey with grey wolf optimizer algorithm-optimized artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, [article in press]. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05980-1>

- [31] Rao, R.V., & Saroj, A. (2017). Constrained economic optimization of shell-and-tube heat exchangers using elitist-Jaya algorithm. *Energy*, 128, 785–800. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.059>
- [32] Rao, R.V., & Waghmare, G. (2017). A new optimization algorithm for solving complex constrained design optimization problems. *Engineering Optimization*, 49, 60–83. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1164855>
- [33] Republic of Turkey Presidency of strategy and Budget (SBB). <http://www.sbb.gov.tr/ekonomik-ve-sosyal-gostergeler/#1540021349004-1497d2c6-7edf> Accessed:10/09/2020.
- [34] Turkish Statistical Institute (TURKSTAT). Main statistics, Population and Demography, Population Statistics, Population by Years, Age Group and Sex, Census of Population - ABPRS. <https://www.turkstat.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>, Accessed:10/09/2020.
- [35] Turkish State Meteorological Service. Statistical Analysis of Turkey's Meteorological Parameters. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/yayinlar/parametre-analiz.pdf> Accessed:10/09/2020.
- [36] Turkish Electricity Transmission Corporation (TEIAS). Turkey's gross electric generation by the electricity utilities and exports-imports-gross demand. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, Accessed:10/09/2020.
- [37] Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources(MENR): General Directorate of Electricity Affairs. Statistics, balance sheets. <https://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tablolari/Denge-Tablolari?page=2>, Accessed:10/09/2020.
- [38] Turkish Electricity Transmission Corporation (TEIAS). 10-year demand forecasts report. <https://www.teias.gov.tr>, Accessed:10/09/2020.
- [39] Tefek, M. F., Uğuz, H., & Güçyetmez, M. (2019). A new hybrid gravitational search–teaching–learning-based optimization method for energy demand estimation of Turkey. *Neural Computing and Applications*, 31, 2939-2954. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3244-9> Accessed:10/09/2020.
- [40] Republic of Turkey Energy Market Regulatory Authority (EPDK). Production capacity projection (2017-2021). <http://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-66/elektrikuretim-kapasite-projeksiyonlari#>, Accessed:10/09/2020.



## Investigation of a Storage Type Solar-Driven Solid Desiccant Cooling System

Nima KHOSRAVI<sup>1</sup> Devrim AYDIN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Eastern Mediterranean University, G. Magosa, TRNC, Mersin 10, Turkey

### Article Info

Research article  
Received: 27/05/2021  
Revision: 12/07/2021  
Accepted: 26/07/2021

### Keywords

Solid Desiccant  
Coolth Storage  
Evaporative Cooling  
Solar Energy  
Experimental

### Abstract

Solar-driven solid desiccant assisted evaporative cooling could be an effective alternative to conventional vapour compression cooling systems due to its lower operating costs and lower environmental impact. This technology has been widely investigated for continuous operation through the use of desiccant wheels. However, the investigation of such technology for storing solar radiation in the form of coolth energy is missing in the literature. In that regard, primary objective of the present study is to investigate a fixed bed solar driven desiccant assisted evaporative cooling system, that uses vermiculite-calcium chloride composite sorbent, to be utilized as a coolth storage in hot-humid climate. To achieve this aim, a prototype unit was designed, developed and tested under real climatic conditions of North Cyprus. According to the results, over six hours of charging period, at regeneration temperature between 51 – 62 °C and air mass flow rate of 0.03 kg/s, average moisture desorption rate of 3.9 g/min was obtained. On the other hand, over four hours of discharging at air inlet temperature of 32 – 35 °C and mass flow rate of 0.06 kg/s, vermiculite-calcium chloride / wood chips couple provided average air temperature drop and cooling capacity of 8.4 °C and 0.49 kW respectively. Hygrothermal efficiency of the system is also found 0.65. Additionally, the average wet-bulb effectiveness and average dew-point effectiveness were obtained as 121.6%, and 90.2% respectively. Furthermore average total and thermal coefficient of performance of 0.35 and 0.6 were achieved over the three consecutive cycles. These results suggest that the proposed system could be a potential technology for storing solar energy to be used in air conditioning applications in buildings.

## 1. INTRODUCTION

According to the International Institute of Refrigeration, 15% of the global electricity production is consumed for the refrigeration and air-conditioning. In addition, approximately 45% of the total energy consumed by the commercial buildings and residences is used for air-conditioning and the demand is increasing continuously [1]. Moreover, the concerns on the environmental impact of greenhouse gases are also increasing. Currently, conventional vapor compression based HVAC systems are widely used. However, these systems present some restrictions due to the environmental problems derived from the use of refrigerant gases and considerable energy consumption [2].

Desiccant assisted evaporative cooling (DAEC) has been regarded as an alternative residential air conditioning method, owing to its potential for considerably reducing electric power consumption. In particular, when DAEC system is combined with solar thermal collectors, it becomes an attractive sustainable air conditioning option, as in such configuration, the energy required for regeneration of the desiccant is supplied by solar energy [3].

Numerous experimental and mathematical studies have been previously conducted on desiccant cooling systems. Jagirdar et al. mathematically investigated an internally cooled and heated desiccant-coated heat-mass exchanger driven by low-grade heat [4]. According to the study results, cooling COP up to 9.8 and effectiveness value up to 0.88 is obtained. Jia et al. [5] analyzed an integrated rotary desiccant

dehumidifier-vapor compression air conditioning unit. They inferred that hybrid desiccant cooling can economize the electric power consumption up to 37.5% compared to a vapor compression refrigeration cycle. Asim et al. [6] present a critical study on the properties of adsorbent materials for desiccant cooling applications. The study focused on important factors such as environmental conditions, system design and costs. Jani et al. [7] proposed a hybrid solid desiccant vapor compression air-conditioning system for a hot and humid climate. Researchers concluded that the latent part of cooling load is considerably reduced by the integration of desiccant dehumidifier which enhances the performance of the cycle. Belguith et al. carried out a performance investigation of the impact of the ambient conditions on the desiccant cooling systems with cycle COP of 1.89 [8]. Aoul et al. investigated the feasibility of extending an existing solar thermal system in a school building in Abu Dhabi to provide dehumidification for the existing air conditioning system through a desiccant system. It was concluded that the system can remove 35% of the moisture from the air, simultaneously saving 10% of the building's energy [9]. Study of a novel dehumidification system based on silica gel packed beds is carried out by De Antonellis et al. [10]. Depending on bed thickness, airflow arrangement and air velocity, the humidity ratio of airflow supplied to the building can be increased from 1.5 g/kg to 4.8 - 5.8 g/kg when the indoor humidity ratio is 5.8 g/kg and the regeneration temperature is around 50 °C. Comino et al. [2] experimentally determined the seasonal coefficient of performance (SCOP) of a solar driven desiccant cooling system to control indoor conditions in a research lab room. The experimental results showed that the system independently adjusted the temperature and humidity of the supply air. 75% of the energy consumed by this air handling system comes from renewable sources. Hussain et al. [11] presented numerical investigations on a solar-assisted hybrid DAEC system integrated with solar air collectors for hot and humid climatic conditions of Kuwait. The outcomes of this work indicated that the proposed system is capable of providing average coefficient of performance of 0.85. Bleibel et al. investigated the performance of an integrated evaporatively-cooled window with a desiccant dehumidification system combined with a photovoltaic/thermal unit [12]. It was found that system reduces the inner window temperature up to 7 °C during summer period corresponding to 11% decrease of the total cooling load. In another research, Pandelidis et al. [13] presented a numerical study of a multi-stage desiccant A/C process designed for moderate climates. Maximum COP<sub>t</sub> of the investigated system was determined as 4. In different study, a solar-driven desiccant evaporative cooling system for air-conditioning was proposed, which converts solar heat energy into cooling with built-in daily storage and provided 122.86 kWh of cooling [14]. Kousar et al. [15] performed detailed techno-economic analysis for three different solar driven DAEC configurations. Maximum COP and energy efficiency ratio with direct EC in process and regeneration sides is achieved as 0.76 and 7.19 respectively. In another study, Heidari et al. [16] presented a DAEC system using silica gel for co-production of water and cooling. COP<sub>avg</sub> of the system was achieved as 1.53, whereas for the same operating conditions, COP for the VC system was found as 1.2. An integrated system to regenerate the desiccant materials in fixed bed filled with silica gel for solar A/C system applications was developed by Avargani et al. [17]. The regeneration rate of the desiccant material and the average daily thermal regeneration efficiency of the system were obtained as 0.4 kg water/hm<sup>2</sup> and 30%, respectively.

Taking into the account of the former researches in the literature, present study concerns with the design and development of a storage type solar driven solid desiccant assisted evaporative cooling (SD-SDAEC) system that could be utilized for air conditioning applications in hot-humid climates. In previous research of the authors, proposed DAEC process was tested in laboratory environment [18]. In present study, based on the obtained encouraging results in previous laboratory experiments, system is integrated with solar collectors and tested in real climate conditions. During the experiments, composite desiccant consisting of vermiculite and calcium chloride also wood chips as the evaporative cooling (EC) pad, which have been previously investigated by the authors, were utilized [18]. The developed system was tested to analyze the real-life implementation performance of SD-SDAEC for coolth energy storage in hot-humid climates. The study suggests an innovative integration method of the investigated process to the existing solar water heating systems in buildings. With the suggested method, the desiccant cooling system could be charged (desiccant dehumidification) with domestic solar water heaters (SWHs). As a result, coolth energy is stored within the SD-SDAEC system for later usage (i.e., night time cooling). In discharging (cooling) mode, the heat generated due to the moisture sorption could be rejected to the cold water tank, which is generally installed together with the existing SWH. The new contribution of this

study is to demonstrate a new storage type desiccant based air cooling process driven by solar energy. Also experimental investigation of such process under Mediterranean Climate is novel. The proposed integrated process consisting of solar water heater, air to water heat exchanger, fixed bed desiccant unit and fixed bed EC chamber is described and tested first time in the literature, and possible implementation of it in new and existing buildings could provide considerable energy and cost savings in A/c applications. Meanwhile, such applications could enhance the utility of existing solar water heating systems installed in buildings during the summer period.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Process Design

In the present work, a storage type SD-SDAEC system was tested in North Cyprus and its thermal performance assessment is carried out. As discussed earlier, proposed system can be driven by low grade thermal energy, such as renewable energy sources (i.e. solar energy), which has a large energy saving potential. Based on the available literature, none of studies have been conducted on the designing of a SD-SDAEC system using  $Vmc-CaCl_2$  as a desiccant material for coolth energy storage in hot and humid climate. The synthesize procedure of  $Vmc-CaCl_2$  was previously described in [18]. The 2-Dimensional view of the designed SD-SDAEC system is presented in Figure 1. The proposed concept consists of a solar water heating system, desiccant chamber and the evaporative cooling chamber. It has a cyclic operation. In charging mode, water is heated passively by the solar collector (1) and the hot water is collected in a hot water storage tank (2). The tank is connected to a water to air heat exchanger with a pipeline where the hot water circulates in between (3-5). Simultaneously, ambient air (6) is blown across the heat exchanger with the use of a ducting fan (7) thereby its temperature increases (8) as a result of the heat transferred from the water. Hot air then passes across the solid desiccant bed and desorbs the moisture (9). Moist air at the exit of desiccant chamber is released to the environment. As a result of this process, desiccant material is dehumidified and it gets ready for the discharging (cooling) cycle. In discharging cycle, pump in the hot water tank-heat exchanger line is deactivated and there is no hot water circulation across the heat exchanger (3-5). Ambient air (6) is blown to the system with the fan (7), it passes through heat exchanger without any heat exchange (8) and it enters the desiccant chamber where moisture is removed, and dry air leaves the chamber (9). The sorption heat generated during this process is eliminated by using a heat exchanger at the exit of the desiccant chamber (10). With the heat exchanger, the sorption heat of the air is transferred to a water tank with the water circulation (11-13) and the air temperature is reduced back to nearly ambient temperature. Finally dry air enters the evaporative cooling chamber and its temperature is reduced to the desired level. Finally, cool air (24-25 °C) is obtained at the evaporative cooler outlet (14).

In order to measure the water temperature in solar collector line during the charging mode, a thermometer with four channels has been used (Please see: Points 1-4 in Figure 1). Moreover, two SHTC3 Sensiron type sensors were installed at points (8) and (9) to measure the inlet and outlet desiccant temperature and humidity. Also one sensor was installed at point (6) to measure the ambient temperature and humidity. A PASCO-GLX airflow meter was used to measure the airflow speed at the system outlet (9). During the charging process the Eppley Precision Spectral Pyranometer (PSP) was used for measuring the solar intensity on the solar collector. On the other hand, in discharging process temperature and humidity of ambient air (6), inlet-outlet of desiccant unit (8-9) also outlet of heat exchanger and evaporation chamber (10-14) were measured with the installed SHTC3 Sensiron type sensors. A PASCO-GLX airflow meter was used to measure the airflow speed at the outlet of the system (14). Also a thermometer has been used to measure the circulation water temperature (11-13) inside the water tank. The measurement ranges of utilized sensors and their accuracies were listed in Table 1.

In the system, a ducting fan (120 W max. power) was installed at point (6) for air supply to the process. In addition, a 100 W water pump was installed at point (4) to circulate water between storage tank and the heat exchanger.



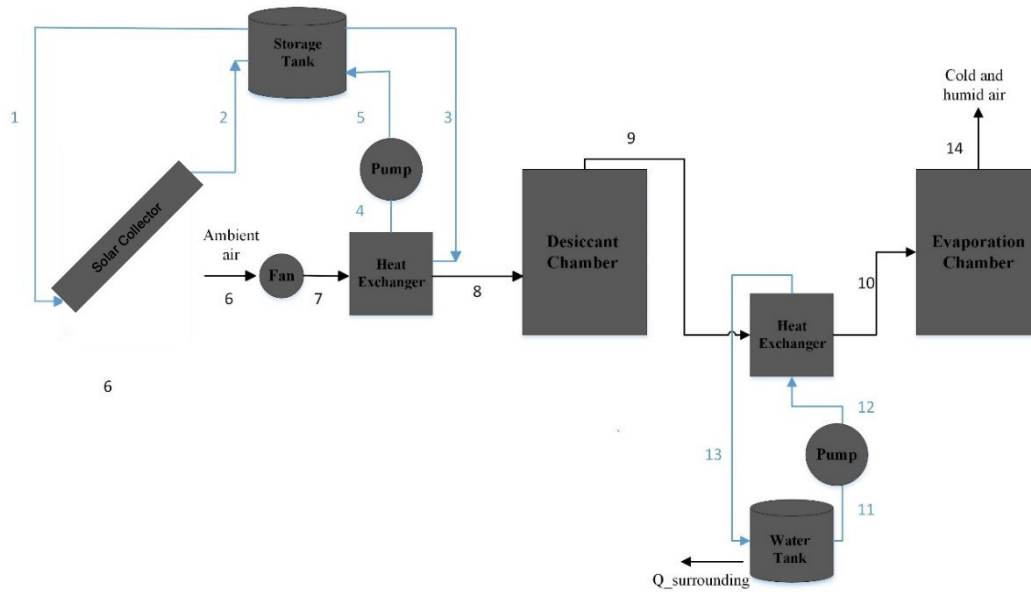


Figure 1. 2D view of the storage type SD-SDAEC system

Table 1. Range and accuracy of the measurement devices

Sensor	Measured parameter	Range	Accuracy
Temperature (Sensirion-SHTC3)	Temperature	0 – 130 °C	±0.2 °C
Humidity (Sensirion-SHTC3)	Relative humidity	0 – 100 %	±2 %
Anemometer (Pasco-Xplorer)	Air velocity	2 – 6 m/s	±0.1 m/s
Temperature Data Logger	Temperature	-100 – 1370 °C	±0.5 °C
Eppley Pyranometer (PSP)	Solar intensity	0 – 2800 W/m <sup>2</sup>	±3 W/m <sup>2</sup>

A single glazing flat plate solar collector was designed and assembled in order to utilize the solar thermal energy in the charging process of the solar-driven DAEC system. Because of better characteristics like light weight, high strength, proper corrosion properties, high surface reflectivity, and good thermal conductivity, Aluminum flat plate was used in this study. The geometrical parameters and properties of the flat plate solar collector are given in Table 2.

Table 2. The geometrical data of the designed flat plate solar collector

Item	Symbol	Value /Details	Unit
Length	L	1940	mm
Height	H	940	mm
Width	w	90	mm
Collector weight	-	24,5	kg
Insulation	-	50, special solar rock wool	mm
Collector glazing	-	3.2, structured solar safety glass	mm
Conversion factor	$\eta_0$	0,78	-

## 2.2. Experimental Procedure

The operation of the SD-SDAEC system can be described with the “charging – discharging” cyclic order. The tests were performed between 30<sup>th</sup> July and 15<sup>th</sup> August of 2020. All the discharging tests were done during the evenings between 18:00 and 22:00 in outdoors; hence, solar heat had no effect on the discharging tests. In the discharging and charging processes, air mass flow rate of 0.06 kg/s and 0.03 kg/s were used respectively. Views of the manufactured and investigated SD-SDAEC system are presented in Figure 2 (a-b). During the experiments, air temperature and humidity were measured in both charging and

discharging cycles. Accordingly, heat transfer rates across the system components, solar collector efficiency, wet bulb and dry bulb effectiveness values, thermal and total COP, also water absorption/desorption rates and hygro-cyclic efficiency were determined.



**Figure 2.** Photographs of the designed SD-SDAEC system (a) front view and (b) rear view

### 2.3. Governing Equations

The cooling capacity is determined via Equation (1) [19];

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_a \Delta h = \dot{m}_a \cdot C_p \cdot (T_8 - T_{14}) \quad (1)$$

Air absolute humidity could be obtained with the following equation [20];

$$w = 216.7 \left[ \frac{\frac{RH}{100\%} \cdot 6.112 \cdot \exp\left(\frac{17.62 \cdot T}{243.12 + T}\right)}{273.15 + T} \right] \quad (2)$$

Dehumidification and humidification rate of air could be obtained by consideration of air humidity content difference across the desiccant and EC units [21] as illustrated in Equations (3) and (4) respectively;

$$\dot{m}_{dhum} = \dot{m}_a \cdot (w_8 - w_9) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{hum} = \dot{m}_a \cdot (w_{14} - w_{10}) \quad (4)$$

The energy balance across the water-to-air heat exchanger could be written as;

$$\dot{m}_w \cdot c_p \cdot (T_{w,o} - T_{w,i}) = \dot{m}_a \cdot c_p \cdot (T_9 - T_{10}) \quad (5)$$

The wet-bulb ( $\epsilon_{wb}$ ) and dew point effectiveness ( $\epsilon_d$ ) of the process could be obtained via Equations (6) and (7) [22];

$$\epsilon_{wb} = \frac{T_8 - T_{14}}{T_8 - T_{wb}} \quad (6)$$

$$\epsilon_d = \frac{T_8 - T_{14}}{T_8 - T_d} \quad (7)$$

Where  $T_8$  is equal to the system inlet (ambient) temperature ( $T_6$ ), and  $T_{14}$  is the system outlet temperature.

In charging cycle,  $\dot{Q}_{solar,ava}$  represents the available solar energy on the collector surface and it could be calculated by multiplying the collector surface area ( $A_{ap}$ ) with the solar irradiance ( $I$ ), as given in Equation (8);

$$\dot{Q}_{solar,ava} = I \cdot A_{ap} \quad (8)$$

The rate of heat gain ( $\dot{Q}_{solar,g}$ ) by the flat plate solar collector in charging cycles is calculated with the Equation (9):

$$\dot{Q}_{solar,g} = I \cdot A_{ap} \cdot \eta_{collector} \quad (9)$$

Where  $\eta_{collector}$  could be calculated via Equation (10):

$$\eta_{collector} = \frac{\dot{m}_w \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)}{A_{ap} \cdot I} \quad (10)$$

Thermal ( $COP_{th}$ ) and total performance ( $COP_t$ ) coefficient of the system could be determined with Equations (11) and (12);

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_c \cdot t_{dc}}{\dot{Q}_{useful,Hx} \cdot t_{cr}} \quad (11)$$

$$COP_t = \frac{\dot{Q}_c \cdot t_{dc}}{E_i} \quad (12)$$

where, the nominator in both equations represents the produced total cooling in kJ, while the denominator in Equations (11) and (12) are; solar energy transfer to charging air (in kJ) and total energy consumption of system (thermal + electrical) in charging cycle.

Here, system's total energy consumption is calculated with Equation (13);

$$E_i = (\dot{W}_P + \dot{W}_f) \cdot (t_{dc}) + (\dot{W}_P + \dot{W}_f) \cdot (t_{cr}) + \dot{Q}_{useful,Hx} \cdot (t_{cr}) \quad (13)$$

Useful rate of solar energy transferred to the charging air could be determined by obtaining the enthalpy change of air across the heat exchanger via Equation (14) where, mass flow rate of charging air is defined as  $\dot{m}_a$ , and enthalpy of air at inlet and outlet of heat exchanger is specified as  $h_7$  and  $h_8$ , respectively.

$$\dot{Q}_{useful,Hx} = \dot{m}_a \cdot (h_8 - h_7) \quad (14)$$

The heat transferred from the air to the desiccant across the desiccant chamber can be found by using Equation (15):

$$\dot{Q}_{trans,des} = \dot{m}_a \cdot (h_8 - h_9) \quad (15)$$

where enthalpy at inlet and outlet of desiccant unit are specified as  $h_8$  and  $h_9$ , respectively.

The charging efficiency ( $\eta_{ch}$ ) is defined as the ratio of the heat transfer across the desiccant chamber to the solar energy gained by collector as presented in Equation (16):

$$\eta_{ch} = \frac{\dot{Q}_{trans,des}}{\dot{Q}_{solar,g}} \quad (16)$$

The hygrothermal efficiency ( $\eta_{hyg}$ ) is another important parameter that was analyzed in the study which is calculated by using Equation (17) as below:

$$\eta_{hyg} = \frac{m_{des}}{m_{abs}} \quad (17)$$

The overall uncertainty in calculation of the  $\varepsilon_{wb}$  can be expressed as [23,24];

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial \varepsilon_{wb}}{\partial T_1} w_{T_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon_{wb}}{\partial T_4} w_{T_4} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon_{wb}}{\partial RH_4} w_{RH_4} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (18)$$

From the Equation (18), overall uncertainty in calculation of  $\varepsilon_{wb}$  is found as 6.51%.

The uncertainty rate evaluated for different parameters are presented in Table 3.

**Table 3.** Evaluated uncertainty for various parameters

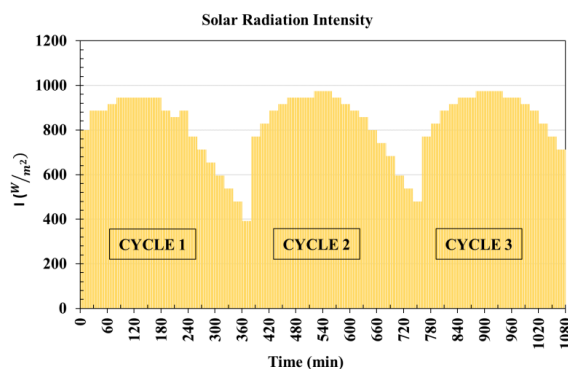
Parameter	Uncertainty Rate (%)
$\dot{Q}_C$	4.53
$\dot{Q}_{solar,g}$	2.16
$\dot{Q}_{useful,Hx}$	5.83
$\dot{Q}_{trans,des}$	6.14
$\varepsilon_{wb}$	6.51
$\varepsilon_d$	2.41
$\eta_{collector}$	2.37
$\eta_{ch}$	5.73
$\eta_{hyg}$	2.82
$COP_{th}$	5.44
$COP_t$	5.5

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this section, three cycles (charging/discharging) testing results of the investigated SD-SDAEC system were presented. Based on the obtained data through measurements, several performance parameters were analyzed and obtained results are presented below.

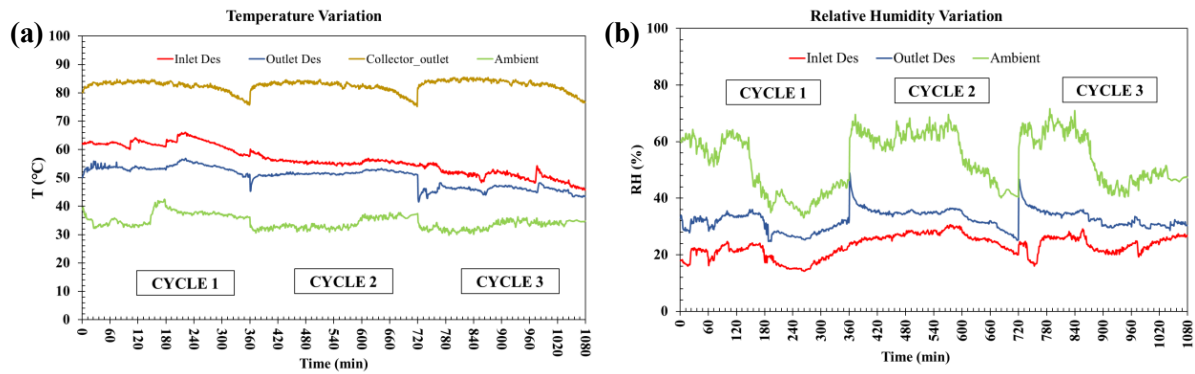
#### 3.1. Charging Cycle Analysis

The variation of the intensity of solar radiation during the charging tests is shown in Figure 3. The charging performance depends heavily on the solar radiation absorbed by the system. The solar irradiance measurements were performed every 20 minutes. The average of the solar irradiance for the three charging cycles was 842, 822, and 789 W/m<sup>2</sup>. Each cycle was completed in six hours.



**Figure 3.** Variation in the intensity of solar radiation entering the flat plate solar collector

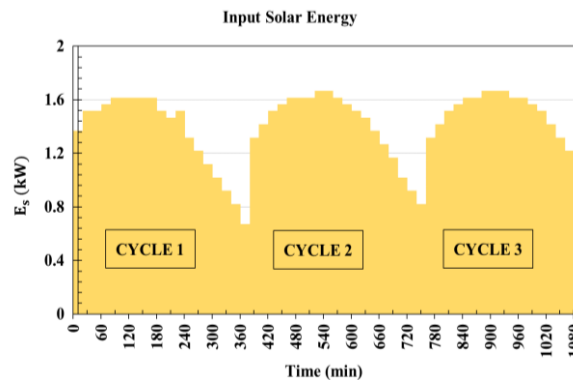
As seen in Figure 4(a), collector outlet water temperature for all cycles was in the range of 75 – 85 °C, while the desiccant inlet temperature varied between 57.5 °C – 66.1 °C, 54.1 °C – 60.1 °C and 46.3 °C – 55.4 °C for different testing days. In charging cycles, flow rate of air is selected as 0.03 kg/s, to enable ambient air to reach to the desired temperature required for regeneration.



**Figure 4.** (a) Variation of temperature, (b) RH of air in charging cycle

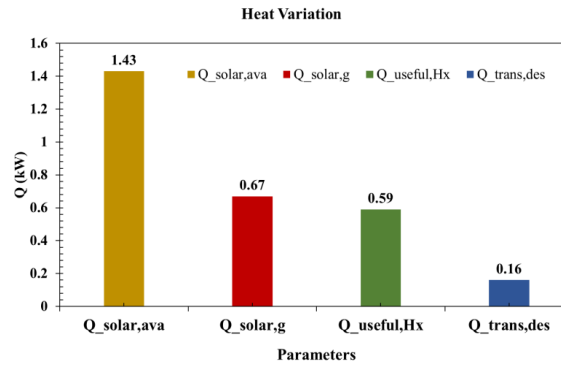
Figure 4 (b) illustrates the air relative humidity changes through the process components. As the air temperature increases at the inlet of desiccator, its relative humidity drops to a level between 15-30%, while at the desiccant outlet it increases to 30-40%. Based on the calculated air absolute humidities, average water desorption rate from the desiccant was found 3.53, 3.48 and 3.43 g/min in different tests.

The variation of the available solar energy that radiated to the flat plate solar collector during the charging cycle is shown in Figure 5. The average of the input solar energy for the three cycles is 1.44, 1.42, and 1.38 kW, respectively.



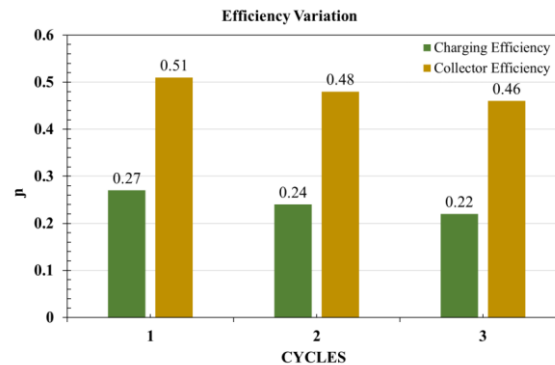
**Figure 5.** Variation of the input solar energy

The average values of available solar energy on collector surface ( $Q_{solar,ava}$ ), the rate of heat gain of solar collector ( $Q_{solar,g}$ ), heat transfer rate to the air across the AW-HEX ( $Q_{useful,Hx}$ ), and heat transfer rate to the desiccant for moisture desorption ( $Q_{trans,des}$ ) in charging cycles are illustrated in Figure 6. As shown, the average available solar radiation on the collector surface was 1.43 kW, whereas 0.67 kW of it is gained by the collector during the experiments. Furthermore, the rate of heat transfer to the charging air was found 0.59 kW, which indicates that the heat transfer across the heat exchanger was effective. Finally, results showed that the rate of heat consumption for moisture desorption was 0.16 kW, which was lower than the desired heat transfer ratio. The low desorption heat consumption could be due to the relatively low regeneration temperature used in charging  $< 65$  °C. Additionally, desiccant bed thickness and charging  $\dot{m}_a$  might influence desorption heat consumption, thereby, increasing the bed thickness and  $\dot{m}_a$  could enhance the heat transfer rate across the desiccant bed. Such improvements could be considered in future studies.



**Figure 6.** The average heat variation across the system

By calculating the energy break-down across the system components (Eqs. 8-9 and 14-15), cyclic  $\eta_{collector}$  and  $\eta_{ch}$  were determined (Eqs. 10 and 16) and presented in Figure 7. Here,  $\eta_{collector}$  is defined as the ratio of  $Q_{solar,g}$  to  $Q_{solar,ava}$ , whereas charging efficiency is the ratio of  $Q_{trans,des}$  to  $Q_{solar,g}$ . Accordingly,  $\eta_{collector}$  and  $\eta_{ch}$  were found in the range of 0.51-0.46 and 0.27-0.22 respectively. For both efficiencies, a slight drop is observed over the repeating cycles. This could be mainly due to the gradually decreasing  $Q_{solar,ava}$  over the cycles. As a result,  $Q_{solar,g}$  and  $Q_{trans,des}$  were decreased, which negatively influenced the  $\eta_{collector}$  and  $\eta_{ch}$ . In addition, some residual moisture remained inside the desiccant over the repeating charging cycles might have affected the heat transfer rate in desiccant chamber. Modifications in desiccant bed configuration could be considered for enhancing the  $\eta_{ch}$ .



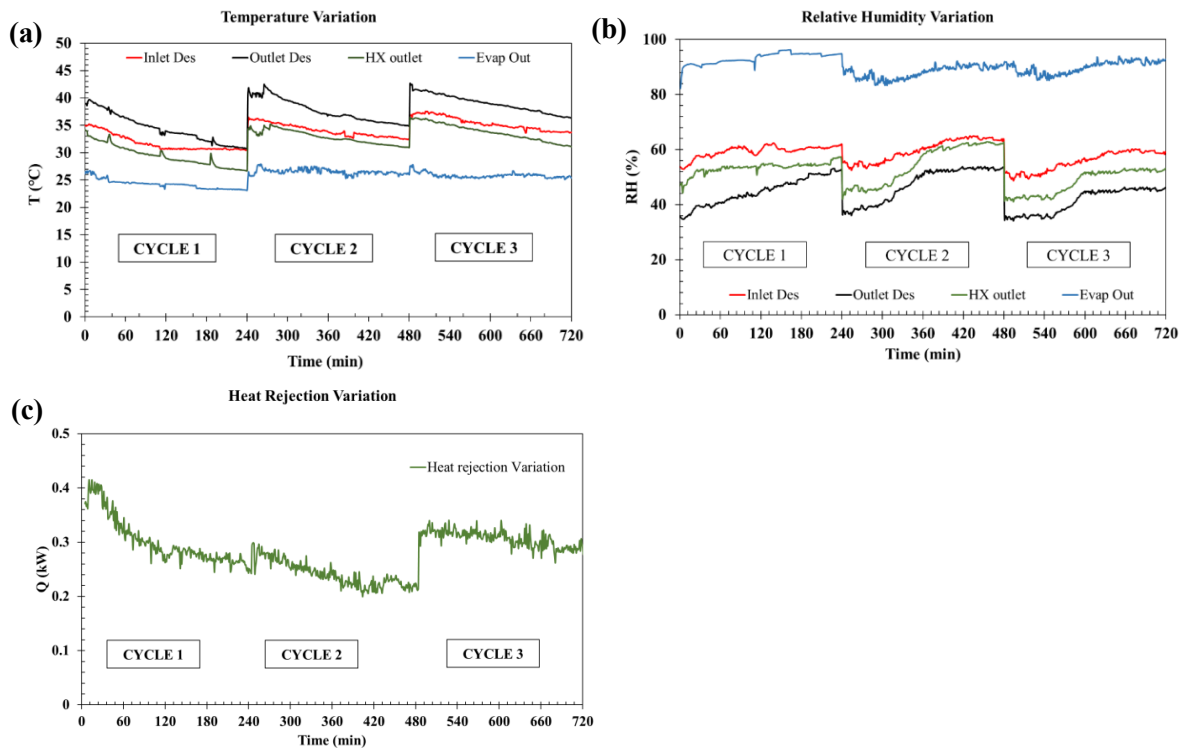
**Figure 7.** Collector efficiency and charging efficiency of the SD-SDAEC system

### 3.2. Discharging Cycle Analysis

Performance of the developed system for the three discharging cycles has been discussed in this section. Each cycle was completed in four hours. Figure 8(a) illustrates the temperature of air at different points of the process. System inlet and outlet temperatures were obtained in the range of 32-35 ° and 24-26 °C respectively. As can be seen in the figure, average temperature difference between desiccant inlet and evaporative cooling chamber outlet was about 7.4 °C, 7.6 °C and 7.9 °C respectively. The variation of the relative humidity at various points of the system is shown in Figure 8(b). Relative humidity at the desiccant inlet was in the range of 49– 65% for different cycles whereas at the outlet of the desiccant chamber it changed from 34% to 53%. The reason of this reduction is because of the water absorption of desiccant material. The relative humidity at the outlet of the heat exchanger and EC chamber was varying between 41-62% and 85-95% respectively.

In the system excess heat produced during desiccation is eliminated by transferring it to an external water tank. As illustrated in 6a, there is between 4-6 °C temperature drop across the heat exchanger (Outlet Des - HX outlet), illustrating the pre-cooling process of air prior to entering the EC chamber. The rate of the heat rejected to water in four hours was determined as 0.29, 0.24, and 0.32 kW, respectively (Please see:

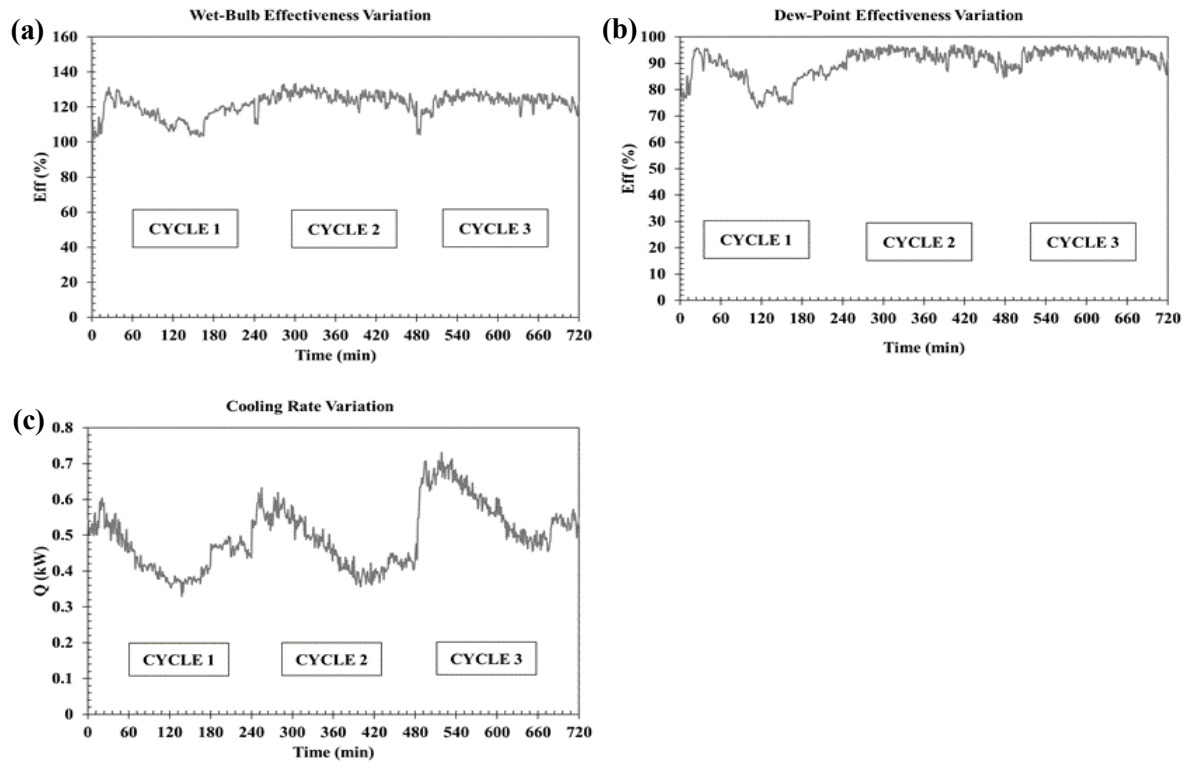
Figure 8c). By rejecting heat to the tank, the temperature of the processed air temperature decreases close to the ambient (desiccant inlet) temperature (Please see: Figure 4a), which consequently can increase the efficiency of the system.



**Figure 8.** Variation of (a) temperature, (b) RH of air and (c) heat rejection variation in discharging cycles

Figure 9(a) presents the wet-bulb effectiveness values of the process. The peak values were obtained as 134%, 131% and 130% in different tests, demonstrating the high performance of the system, where sub wet bulb temperatures were achieved. The dew-point effectiveness variation in discharging mode was demonstrated in Figure 9(b). As it is clear from figure, in the discharging process the first cycle provided dew-point effectiveness fluctuating between 73-95%, whereas in the second cycle values were in the range of 85-95%. The third cycle was in the range of 84-96%. The average dew point effectiveness for three cycles was ~90%, which demonstrated that the investigated process has good performance under real climate conditions.

The cooling rate variation in the discharging mode is presented in Figure 9(c). The cycles demonstrated a similar behavior with maximum cooling capacity of 0.73 kW, which was obtained in the third cycle. The average  $Q_c$  values were determined as 0.45 kW, 0.47 kW and 0.57 kW respectively. The reason of higher average  $Q_c$  in third cycle was the higher temperature and lower relative humidity of ambient air during that cycle. The average ambient temperature and relative humidity were 31.7 °C, 34.0 °C, 35.2 °C and 59.4%, 57.8%, 55.6% over the repeating cycles. Accordingly it could be stated that; beside the design and configuration of the system, the ambient conditions also significantly influences the SD-SDAEC performance. The higher ambient temperature and lower ambient relative humidity could enhance the cooling capacity as a result higher cooling performance could be achieved.



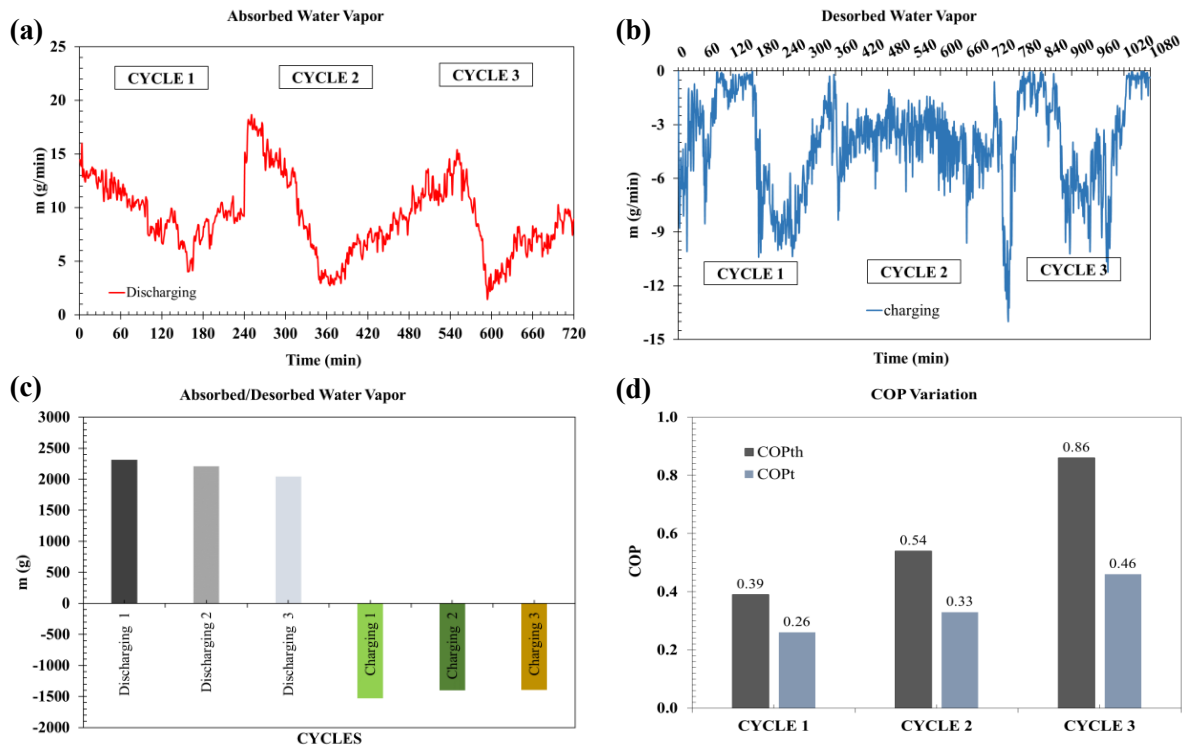
**Figure 9.** Variation of (a) wet-bulb effectiveness, (b) dew-point effectiveness and (c) cooling rate

### 3.3. Overall Performance Analysis

Figure 10(a-b) shows the rate of water absorption/desorption in different experiments. Average values are calculated as 9.64/4.24, 9.19/3.89 and 8.5/3.81 g/min for the cycle order of 1→3. In that regard, total amount of water loaded and removed from the desiccant were calculated as 2314.70/1529.13, 2206.12/1403.46, and 2041.41/1392.02 g for the same order of cycles (Please see: Figure 10(c)). It is also found that, with the decline of average charging temperature from 62 °C to 51 °C, the amount of moisture desorption was reduced. Therefore, it is suggested to increase the  $T_{reg}$  in order to rise the cyclic efficiency of the system. Also it is recommended to use more efficient solar collector, and/or an auxiliary heater driven with photovoltaics, although it will increase the cost of the system and affect the feasibility of the system.

The obtained values of the other important performance parameters,  $COP_{th}$  and  $COP_t$ , are given in Figure 10(d). Results showed that, both  $COP_{th}$  and  $COP_t$  showed an increasing trend from the first to third cycles. As discussed before, higher  $Q_c$  values were obtained over the repeating cycles due to the increase in ambient temperature and decrease in ambient humidity. Additionally,  $Q_{trans,Hx}$  dropped over the repeating cycles due to the decreased solar radiation. As  $COP_{th}$  and  $COP_t$  are directly proportional with  $Q_c$  and indirectly proportional to  $Q_{trans,Hx}$ , both of them showed a gradual increase over the repeating cycles. Accordingly,  $COP_{th}$  varied in the range of 0.39→0.86 whereas  $COP_t$  was between 0.26→0.46. The overall average  $COP_{th}$  and  $COP_t$  were calculated as 0.6 and 0.35 respectively. Table 4 represents summary of the present study in comparison with the previous studies in the literature.





**Figure 10.** (a) Rate of water (a) absorption (b) desorption, (c) cumulative moisture absorption / desorption, (d) COP variation

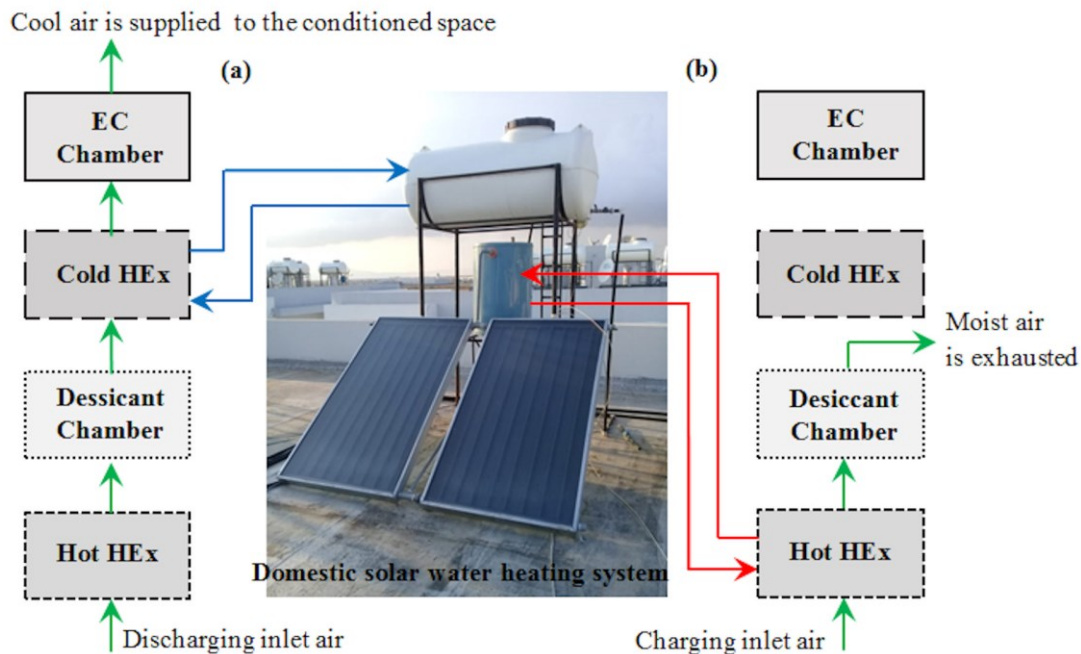
**Table 4.** Summary of the related studies

Reference	Year	Type of study	System Performance	Advantages	Disadvantages
Heidari et al. [16]	2019	Num.	COP <sub>avg</sub> of the proposed system was 1.53.	Good potential for coproduction of water and cooling in hot and humid climates.	Water production capacity of the system is limited
Lee et al. [3]	2020	Exp. And Num.	In DAEC mode maximum COP <sub>th</sub> of 0.23 was achieved.	System does not use refrigerant and compressor.	System performance was lower than vapor compression assisted desiccant system
Kousar et al. [15]	2021	Exp. and Num.	COP of 0.76 is achieved (in direct EC mode)	Provides energy savings >50% compared to conventional A/Cs	Complex system design. Also payback period is >5 years
Belguith et al. [8]	2021	Num.	COP of 1.89 was achieved.	Efficient in ventilation mode	System performance decreases with the increase of ambient humidity.
Present study	2021	Exp.	In DAEC mode maximum COP <sub>th</sub> of 0.86 was achieved.	System uses low cost desiccant and ECPMs. It has simple configuration and provides high effectiveness.	Not suitable for continuous operation.

### 3.4. Potential Real-Life Application of SD-SDAEC System

In this section, a potential low-cost implementation method of the investigated SD-SDAEC system in real building applications is presented. For that purpose, the case of Northern Cyprus (NC) is considered. In NC, nearly all buildings are equipped with flat plate solar collector systems for hot water production (Please see: Figure 11).

The schematic view of the investigated storage type SD-SDAEC unit, illustrating its operational modes, is given in Figure 11. The proposed concept consists of solar water heating system, a desiccant chamber, and the evaporative cooling chamber. Also hot and cold heat exchangers are used for transferring solar heat to the air in the charging cycle and rejecting sorption heat from the air in discharging cycle. As seen from the figure, in charging mode (Figure 11b), water from the hot water tank is circulated across the heating coil, and the air is heated. Hot air passes across the desiccant and desorbs the moisture. Moist air is then exhausted to the environment through the exhaust outlet. In discharging mode (Figure 11a), water circulation from the hot water tank is deactivated. Therefore, air passes across the heating coil without any heat transfer. Then it enters the desiccant chamber where the moisture is absorbed, and air humidity content is reduced. Following that, air passes across the pre-cooling heat exchanger, which is connected to the cold water storage tank. In this way, generated sorption heat is rejected to the cold water tank, and the temperature of the air is dropped to the ambient level. Finally, air enters the EC chamber, where its temperature is reduced to 22-25 °C. Product air is then supplied to the building. As the solar water heating system already exists in the majority of buildings, the installation costs of the system are expected to be low (1000-1500 €). Implementation of such a system could provide a low-cost and sustainable opportunity for reducing the indoor temperature in buildings.



**Figure 11:** Schematic illustration of; (a) discharging process, (b) charging process of the storage type SD-SDAEC system in residential buildings (Photo is taken by authors)

#### 4. CONCLUSIONS

The performance of the new storage type SD-SDAEC system developed in the present work was examined under NC climatic conditions. Based on the analysis results, the important conclusions are listed below:

- Three discharging- charging cycles, utilizing Vmc-CaCl<sub>2</sub> as the desiccant material and wood chips as the evaporation material, were conducted in the developed SD-SDAEC system. Over six hours of charging at  $T_{reg} = 62 - 51$  °C and  $\dot{m} = 0.03$  kg/s, in charging mode operation, average moisture desorption rate of 3.9 g/min was achieved.
- Over four hours of discharging at  $T_i = 32 - 35$  °C and  $\dot{m} = 0.06$  kg/s,  $\Delta T_{ave}$  and  $\dot{Q}_{c,ave}$  of 8.4 °C and 0.49 kW were achieved.
- System's  $\varepsilon_{wb,ave}$  and  $\varepsilon_{d,ave}$  were determined as 121.6% and 90.2%, respectively.
- With the drop of charging temperature from 62 °C to 51 °C, water removal capacity drop between 1529.13 g and 1392.02 g.

- Average value of  $\eta_{\text{hyg}}$  was obtained between 0.63-0.68 in different cycles.
- The  $\text{COP}_{\text{th,ave}}$  and  $\text{COP}_{\text{t,ave}}$  of the system were determined as 0.6 and 0.35.

As presented above, encouraging results were achieved from the real life testing of the investigated novel storage type SD-SDAEC system. Such configuration could be useful in buildings for storing solar radiation in the form of coolth energy. As a result, dependency on fossil fuel sourced cooling systems could be reduced. An important advantage of the investigated technology is its suitability for integration with existing solar collectors in buildings. This could ease the implementation of SD-SDAEC system while reducing the capital costs. However further research is required for improving material properties and heat/mass transfer effectiveness across the system components also optimizing the operating conditions.

## REFERENCES

- [1] Farooq, A. S., Badar, A. W., Sajid, M. B., Fatima, M., Zahra, A., Siddiqui M. S. (2020). Dynamic simulation and parametric analysis of solar assisted desiccant cooling system with three configuration schemes. *Solar Energy*, 197, 22-37.
- [2] Comino, F., González, J. C., Navas-Martos, F. J., de Adana, M. R. (2020). Experimental energy performance assessment of a solar desiccant cooling system in Southern Europe climates. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114579.
- [3] Lee, Y., Park, S., Kang, S. (2021). Performance analysis of a solid desiccant cooling system for a residential air conditioning system. *Applied Thermal Engineering*, 182, 116091.
- [4] Jagirdar, M., Lee, P. S., Padding, J. T. (2021). Performance of an internally cooled and heated desiccant-coated heat and mass exchanger: Effectiveness criteria and design methodology. *Applied Thermal Engineering*, 188, 116593.
- [5] Jia, C. X., Dai, Y. J., Wu, J. Y., Wang, R. Z. (2006). Analysis on a hybrid desiccant air-conditioning system. *Applied Thermal Engineering*, 26(17-18), 2393-2400.
- [6] Asim, N., Amin, M. H., Alghoul, M. A., Badiei, M., Mohammad, M., Gasaymeh, S.S., ... Sopian K. (2019). Key factors of desiccant-based cooling systems: Materials. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113946.
- [7] Jani, D. B., Mishra, M., Sahoo, P. K. (2015). Performance studies of hybrid solid desiccant–vapor compression air-conditioning system for hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 102, 284-292.
- [8] Belguith, S., Meddeb, Z., Slama, R. B. (2021). Performance analysis of desiccant cooling systems in a hot and dry climate. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6(1), 1-11.
- [9] Aoul, K. A. T., Hasan, A., Dakheel, J. A. (2021). Assessment of solar dehumidification systems in a hot climate. *Sustainability*, 13(1), 277.
- [10] De Antonellis, S., Colombo, L., Freni, A., Joppolo, C. (2021). Feasibility study of a desiccant packed bed system for air humidification. *Energy*, 214, 119002.
- [11] Hussain, S., Kalendar, A., Rafique, M. Z., Oosthuizen, P. (2020). Numerical investigations of solar-assisted hybrid desiccant evaporative cooling system for hot and humid climate. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(6), 1-16.
- [12] Bleibel, N., Ismail, N., Ghaddar, N., Ghali, N. (2020). Solar-assisted desiccant dehumidification system to improve performance of evaporatively cooled window in hot and -humid climates. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115726.

- [13] Pandelidis, D., Pacak, A., Cichoń, A., Anisimov, S., Drag, P., Vager, B., & Vasilijev, V. (2018). Multi-stage desiccant cooling system for moderate climate. *Energy Conversion and Management*, 177, 77-90.
- [14] Riaz, F., Qyyum, M. A., Bokhari, A., Klemeš, J. J., Usman, M., Asim, M., ... & Lee, M. (2021). Design and energy analysis of a solar desiccant evaporative cooling system with built-In daily energy storage. *Energies*, 14(9), 2429.
- [15] Kousar, R., Ali, M., Sheikh, N. A., Gilani, S. I. ul H. (2021). Holistic integration of multi-stage dew point counter flow indirect evaporative cooler with the solar-assisted desiccant cooling system: A techno-economic evaluation. *Energy for Sustainable Development*, 62, 163-174.
- [16] Heidari, A., Roshandel, R., & Vakiloroya, V. (2019). An innovative solar assisted desiccant-based evaporative cooling system for co-production of water and cooling in hot and humid climates. *Energy Conversion and Management*, 185, 396-409.
- [17] Avargani, V. M., Karimi, R., & Gheinani, T. T. (2019). Mathematical modeling of an integrated system for regeneration of solid desiccants using a solar parabolic dish concentrator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 142, 118479.
- [18] Khosravi, N., Aydin, D., Karim Nejhadd, M., Dogramaci, P. A. (2020). Comparative performance analysis of direct and desiccant assisted evaporative cooling systems using novel candidate materials. *Energy Conversion and Management*, 221, 113167.
- [19] Cengel, Y. A., Boles, M. A., (2007). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 6th Edition (SI Units) New York, NY, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [20] Introduction to Humidity: Basic Principles on Physics of Water Vapor, Retrieved from: [https://www.soselectronic.com/a\\_info/resource/c/sensirion/Sensirion\\_Introduction\\_to\\_Relative\\_Humidity\\_V2.pdf](https://www.soselectronic.com/a_info/resource/c/sensirion/Sensirion_Introduction_to_Relative_Humidity_V2.pdf) Access date: 10<sup>th</sup> May 2021.
- [21] Cao, Z., Tester, J. W., Sparks, K. A., Trout, B. L. (2001). Molecular computations using robust hydrocarbon– water potentials for predicting gas hydrate phase equilibria. *The Journal of Physical Chemistry B*, 105(44), 10950-10960.
- [22] Sonntag, R. E., Van Wylen, G. J., Borgnakke, C. (2008). *Fundamentals of Thermodynamics*. 8th ed. New York, NY, USA: Wiley.
- [23] Buker, M. S., Mempoou, B., Riffat, S. B. (2014). Performance evaluation and techno-economic analysis of a novel building integrated PV/T roof collector: An experimental validation. *Energy and Buildings*, 76, 164-175.
- [24] Jani, D. B., Mishra, M., Sahoo, P. K. (2018). Investigations on effect of operational conditions on performance of solid desiccant based hybrid cooling system in hot and humid climate. *Thermal Science and Engineering Progress*, 7, 76-86.



## Route Optimization for Medication Delivery of Covid-19 Patients with Drones

Yasemin ÇETİN KAYA<sup>1,\*</sup> Mahir KAYA<sup>1</sup> Ali AKDAĞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Computer Engineering, Tokat/Turkey

### Article Info

Research article  
Received:01/05/2021  
Revision:21/07/2021  
Accepted:27/07/2021

### Keywords

Metaheuristics  
TSP  
K-means  
Drone  
Drone Delivery  
Optimization  
Medicine Delivery

### Abstract

With the developments in information technologies and the intense use of online commerce, the use of drones in distribution process has gained importance. In order to transport products to more than one location, drones can perform the distribution by following a specific route, as in the traveling salesman problem. Drones provide advantages over land transportation since they are not affected by the traffic congestion and can be used autonomously. However, the limited battery durations increase the importance of using the optimum route in distribution processes. In this study, it is aimed to use drones in drug distribution. Nowadays, due to the Covid-19 pandemic, it is aimed to distribute the drugs for the patients in an optimum way with drones. In this study, it is aimed to find the optimized routes for drones in drug distribution since Covid-19 medicine distribution is a time-critic mission. Since the number of patients in a certain area may increase very quickly, it is ensured that the patients are divided into clusters and the optimum route is determined for each cluster. We propose a hybrid model consisting of a combination of K-means clustering and Ant Colony algorithms. In particular, Covid-19 patients use the mobile part of the developed application on their smartphones and transmit their medication requests to our central server. We have compared the performance of Ant Colony, Artificial Bee and Genetic algorithm metaheuristics at the stage of determining the most suitable route according to the demands collected dynamically on the central server. In the process of determining the most suitable route, Ant Colony algorithm yields the closest to optimum results for different location groups. We have developed the mobile and web site of the application to validate the proposed drug delivery model.

## 1. INTRODUCTION

An optimum route determination for the product distribution is gaining importance in air transport with drones today as well as in land transport [1]. With the drone, certain parcels of products can be transported to the routes at certain points, and the drone can also be used to control or surveillance along a certain route [2]. In this study, a solution has been presented to the problem of determining the most appropriate route for the distribution of drugs with drones, especially for the distribution of covid-19 drugs to patients in different locations. Due to the Covid-19 pandemic, many patients create requests with their smart phones to gather their medicines through a drone. These collected requests are distributed according to the most appropriate route determined by the application we have developed.

Product distribution is increasingly gaining importance with industrial development and online commerce. Firms have started to look for solutions to carry out their distribution operations, usually using land vehicles and unmanned aerial vehicle (UAV) together. Drones are not affected by the traffic congestion in big cities and their costs are lower because they are autonomous; however, the battery and product carrying capacity of drones is limited [3]. For this reason, distribution with drone turns into an optimization problem. Optimization is the process of obtaining the most appropriate solution by providing certain restrictions for the given purpose or objectives [4]. In other words, it is the process of finding the best solution from the solution space of a problem.

Even though classical mathematical methods are widely used in the solution of optimization problems, they have been insufficient in solving problems with a high problem size and difficult to express mathematically. However, acceptable successful results by heuristic/metaheuristic approaches have been obtained in solving many complex optimization problems with artificial intelligence optimization techniques. Ant Colony Optimization (ACO), Artificial Bee Colony (ABC), Genetic Algorithm (GA), Simulated Annealing (SA), Differential Evolution (DE), Particle Swarm Optimization (PSO) are among the most well-known methods used in solving optimization problems.

Optimization algorithms can generally be categorized based on solving continuous or discrete problems. The most known discrete optimization problem is the traveling salesman problem (TSP), which was mathematically defined in the 1930s. TSP aims to find the shortest possible tour back to the starting point by visiting all of the specified number of locations. Candidate solutions are permutations of the location array, which holds the order in which the locations are visited, that is, including each location exactly once. The sequence with the lowest cost among these permutations is considered to be the most optimal solution. Vehicle routing, circuit board design, data routing on the internet can be given as examples of real-life applications of the traveling salesman problem. Drone delivery problem turns into a TSP. Although the definition of TSP is simple, it is difficult to solve, and as the size of the problem increases, the solution becomes more difficult. TSP is in the NP-Hard problem class. The use of classical techniques, which require scanning the entire solution space, becomes almost impossible when the problem size increases too much. Artificial intelligence optimization techniques are widely used in the TSP solution by providing an acceptable solution even if it does not provide the optimum solution with an intuitive approach.

In this study, ACO, ABC and GA metaheuristic methods are used in different number of location groups and compared to calculate the optimum route. Based on the optimum route found, it is aimed to distribute the drugs requested to patients with drones. In the case of rapidly increased number of patients, clustering approach has been applied. A hybrid approach has been proposed using K-means and Ant Colony algorithm together. In particular, the drug demands of covid-19 patients have been collected on our server via a mobile application part of the framework software we have developed, along with location information. The mobile application, developed as a cross-platform using the Flutter framework, works on both Android and iOS smartphones. Drug requests and location information collected at the distribution center have been also grouped according to regions. Address information of the locations has been also collected with the mobile application. This information has been encrypted end-to-end and sent to the servers. The proposed web application collects requests and creates the optimum distribution routes. In the study, optimum route calculation has been performed by adapting ACO, ABC and GA algorithms to the TSP. Each algorithm has been run 20 times for location groups of different sizes, and average, min and max route lengths were calculated for comparison. As a result, ACO algorithm yields the most suitable solution in terms of route length. The mobile and web applications we have developed are available at "<http://ceng.gop.edu.tr/drone-router>".

## 2. LITERATURE REVIEW

Drone distribution is a system that gains importance over time despite the limitations of battery and carrying capacity and it is planned to be used intensively in the future. DHL company presented the first commercial unmanned aerial vehicle "Parcelcopter" to be used in transportation works in 2014 [5]. Since the distribution centers of the companies are far from the city centers, they are generally used for distribution with land vehicles. Kim and Moon [3] proposed a distribution system in the form of drone stations in city centers for the problem of remote distribution centers. They assumed that the drone station could provide enough drones and that the station's location was not dependent on the distribution center. After the packages to be delivered by a land vehicle are left at the station, the delivery process is carried out by the drones.

Yürek and Özmütlu [6] have developed a 2-stage iterative method to create the optimum route in distribution with drone. In the proposed method, the drones are intended to serve as many customers as possible in order to achieve a significant reduction in the truck's course. In the first stage, the truck route is determined, then the optimum drone route is created to minimize the truck wait. Ercan and Gencer [7] have investigated the problem of dynamically adding new targets that emerged during the process of

observing the pre-determined targets of unmanned aerial vehicles to the previously created routes. Adding the new emerged target to any route is done with the help of the fuzzy logic based algorithm. In fuzzy clustering, the target is placed in front of or after the closest point on a route, considering the degree of membership within the constraints. Thus, the first round is updated without being changed completely. This study eliminates the limitations of the existing methods that are using the near neighborhood approach.

Karaboğa and Görkemli [8] have suggested a new Artificial Bee Colony algorithm named “Combinatorial ABC” for the traveling salesman problem and showed that the Artificial Bee Colony algorithm can be used for TSP. Adewole et al. [9] have solved the traveling salesman problem by using simulated annealing and genetic algorithm. It has been observed that the simulated annealing works faster than the genetic algorithm and the working time of the genetic algorithm increases exponentially with the number of cities. However, they have shown that the genetic algorithm is better than the simulated annealing in terms of solution quality.

Kuzu et al. [10] have solved and compared 18 traveling salesman problems using several metaheuristic methods. As a result of the comparison, they have shown that the genetic and the ant colony algorithm obtained more optimum results than other algorithms. Haroun et al. [11] have compared the ant colony algorithm with the genetic algorithm for TSP and have concluded that the genetic algorithm is faster in terms of computational resources, easier to apply and cost-effective while the ant colony algorithm provides better results, especially in large problems.

Makuchowski [12] has proposed an effective method to solve the symmetrical traveling salesman problem using the simulated annealing approach. Chaudhari and Thakkar [13] have performed an experimental comparison using ACO, PSO, ABC, FA and GA in solving the TSP, and have shown that ACO and GA for TSP performed better than ABC, PSO and FA. Bhagade and Puranik [14] have concluded that the artificial bee colony algorithm can be used effectively in solving the traveling salesman problem, since few control parameters are taken into account when compared to other heuristic algorithms.

Valdez et al. [15] have shown that the ant colony algorithm finds better solutions in a shorter time than the genetic algorithm that solves the TSP and the simulated annealing algorithms. Yalçın [16] has found the optimum route for distribution from an Istanbul-based warehouse to the cities of the Black Sea Region with a simulated annealing based approach.

Torun et al. [17] have developed a hybrid path planning algorithm for autonomous robots using the random tree algorithm and artificial bee colony methods in their study. Öztürk et al. [18] have adapted the ABC algorithm to the automatic clustering problem by adding vectorial solution generation and global best region solution search mechanisms. In the proposed method, well-known image sets and data sets are tested. Xu et al. [19] have proposed a modified optimization algorithm to automatically train the parameters of a typical neural network, Feed Forward Artificial Neural Network. In the proposed algorithm, the information of neighbors with better performance is used to accelerate the convergence of working and tracking bees, respectively. Cao et al. [20] have proposed an improved Support Vector Machine (SVM) classification model based on the artificial bee colony algorithm, as the selection of SVM parameters is often based on experience. In this model, first, the traditional artificial bee colony algorithm has been optimized using global optimal solution guidance and contrasting learning ideas.

İlkuçlar and Güngör [21] have solved the physician assignment problem with a genetic algorithm. In the study, the rotation process of physicians to institutions was optimized. Aktürk [22] has shown that the difficulty level of the minefield game can be increased and decreased at the desired level by using the genetic algorithm and pixelization method together. Guo et al. [23] have proposed an intelligent diagnostic method for rolling bearings based on depth. The training speed has been improved by adapting the parallel computing to the DBN training process in order to achieve global optimization with the genetic algorithm and to achieve more successful results in diagnosis accuracy. Özgür and Erdem [24] have used genetic algorithm in intrusion detection systems. In this study, it is suggested that feature selection and classifier fusion weight determination in intrusion detection classification applications need to be performed by using genetic algorithm (GA). In the study conducted by Tarigian et al. [25], the efficiency of the genetic algorithm in optimizing the learning speed, momentum ratio and number of

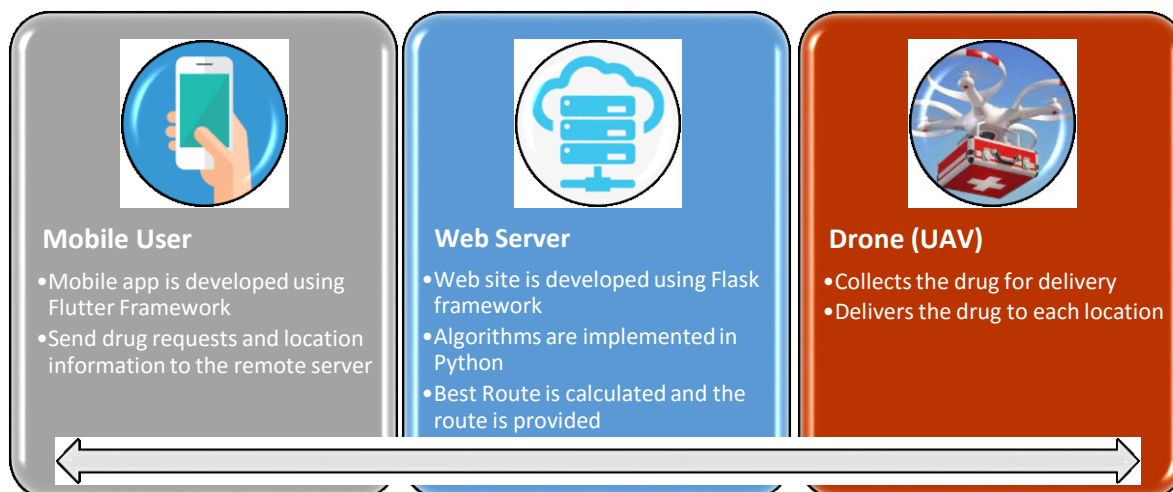
hidden neurons in Back Propagation Neural networks applied to the automatic plate scanner was examined.

Kılıç and Karahan [26] have proposed a robust fuzzy programming model that can be used in the fuzzy decision environment for the time-spaced vehicle routing problem using fuzzy sets and likelihood theories. An algorithm based on ant colony optimization has been developed in order to create a solution for the proposed models. Dikmen et al. [27] have optimized the Traveling Salesman Problem, one of the important problems of computer science, by using Ant Colony and Genetic Algorithms. The performance of these optimization algorithms in terms of route distance and the time to calculate this route were compared. It was found that the ant colony algorithm shows more successful performance.

### 3. PROBLEM DESCRIPTION AND METHODOLOGY

An empirical study has been conducted to solve the route optimization problem in order to make drug delivery in the most effective way under pandemic conditions and time-critical situations. As the number of distribution locations increases, it becomes more difficult to find the most suitable route so metaheuristic methods have been used to solve such problems. Population-based metaheuristic methods ACO, ABC and GA have been adapted to the routing problem. In order to determine which of these three methods gives better results, we have calculated the best route by increasing the number of locations from 10 to 60 by 10. Since these methods contain random coefficients, they can produce different results in each run. By running the algorithms once for the specified iteration, the shortest route change has been observed throughout the iteration. Thus, it has shown which algorithm converged faster. In order to determine the best method correctly, all three algorithms have been run 20 times under the same conditions and their average values have been checked. Moreover, in case of an increase in the number of locations in a certain region, it is divided into small regions with the clustering algorithm. In the empirical study, it is proposed to determine the most suitable route by using the clustering algorithm and the ACO algorithm together.

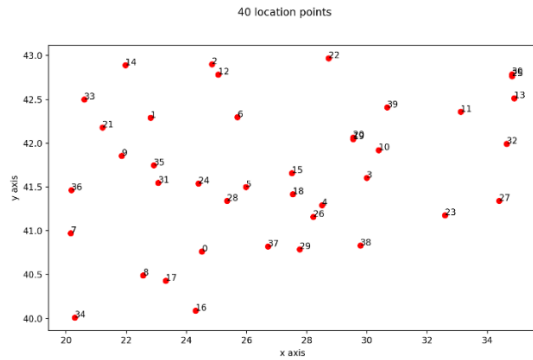
Mobile users create drug orders with their smartphones. The location information of the users is also collected on the web server by the developed mobile application. As seen in Figure 1, the web server collects the location information and prepares the optimum route for drug delivery.



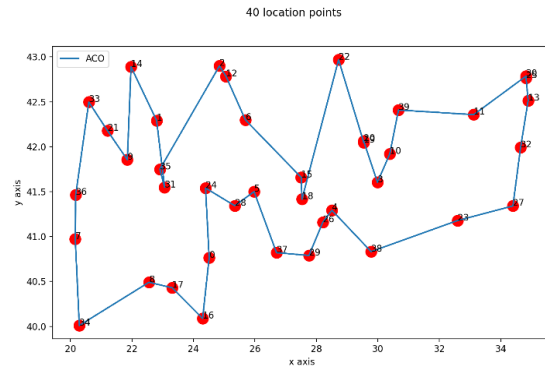
*Figure 1. The overview of the delivery with drone application*

Figure 2 shows the locations collected for drug delivery. With online commerce and recent developments in the UAV technology, the use of drones in product distribution has also gained importance. For this empirical study, we have also developed an application that will optimally distribute drugs to covid-19 patients under pandemic conditions. Adapting ACO, ABC and GA metaheuristic methods to the TSP and finding the most suitable route are performed on the server side. Thus, a sequential route is created as shown in Figure 3.





**Figure 2.** An example of the distributions of the locations



**Figure 3.** An example solution for the drug distribution

### 3.1. The Artificial Bee Colony Algorithm (ABC)

The Artificial Bee Colony Algorithm is a population-based, intuitive optimization algorithm developed by Karaboğa in 2005, inspired by the foraging behaviors of honey bees to collect nectar from flowers [28]. It has been used in the solution of many optimization problems since it was developed. The ABC algorithm tries to find the maximum or minimum point of the problem among the possible solutions by finding the source with the most nectar [29]. In the ABC algorithm, the colony consists of three types of bees: employed bees, onlooker bees, and scout bees. The ABC algorithm begins by generating randomly distributed food sources, each corresponding to a solution in the solution space. These food sources are passed through the employed bees, onlooker bees and scout bees phases until the separation criterion is met, and as a result, the most appropriate value is tried to be found. As a result, this value is the optimum value that is tried to be reached.

### 3.2. Genetic Algorithm (GA)

GA is a population-based algorithm, whose foundation was inspired by the evolutionary structure in nature by John Holland, his colleagues and students, in the 1960s and 1970s [30]. The algorithm consists of processes that take place from the individuals (chromosomes) in the population to transfer the characteristics of the strong ones to the next generations, while the weak ones are deleted from the population over time. The genetic algorithm consists of selection, crossover and mutation operations. The genetic algorithm begins by generating random individuals (chromosome), each corresponding to a solution in the solution space. In each generation, the stronger individuals in the population are selected by different selection methods. Crossover is performed between these selected individuals to create stronger individuals. In the mutation process, the gene of an individual randomly selected from the population is changed to prevent the solution from being stuck to the local minimum. The algorithm continues the selection, crossing-over, and mutation processes until the best solution is found or the stop criterion is met. The strongest individual formed as a result of the algorithm represents the optimum solution.

### 3.3. Ant Colony Optimization (ACO)

The ant colony algorithm was proposed by Dorigo [31] for the solution of the traveling salesman problem, inspired by the behavior of the ants, and turned into a metaheuristic for combinatorial optimization problems [31, 32]. It is an algorithm that models the behaviors of ants groups such as choosing the path and path they follow in order to reach food. Despite the obstacles they encounter along their way, the ants can find the shortest path between the starting point and the food point with the help of a chemical called pheromone. The ants deposit this chemical liquid into the paths they follow and cause the amount of pheromone on the path to increase. Thus, the amount of pheromone on the shortest path, which has a higher usage rate per unit time on the route they started randomly, will be more. The subsequent ant groups also use this way to increase the amount of pheromones secreted on the path. As a result, roads with a lot of pheromones are preferred, pheromones on roads with long routes disappear due

to evaporation and these roads are not preferred. The ant colony algorithm basically works in six steps. In the initial phase, the amount of pheromone is determined. Second, the ants are randomly placed at points in the problem space. Third, the ants complete their rounds by selecting nodes with the possibility of local search. Then, the length of the path the ants followed is calculated and the amount of local pheromone is updated. Fifth, Best values are calculated and taken into account in replenishing the overall pheromone amount. It is repeated after the first step until the number of cycles determined or the termination condition of the algorithm.

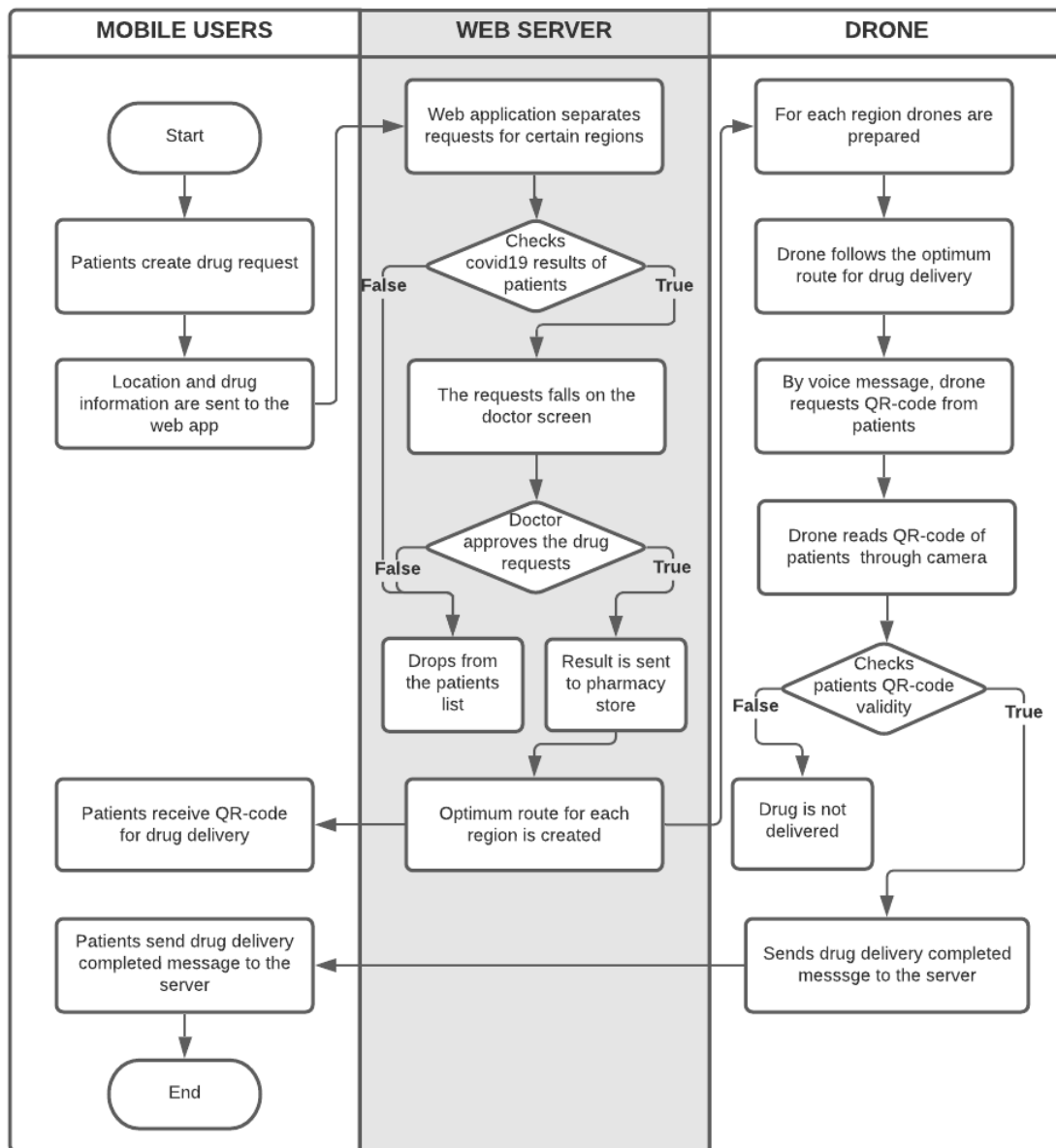


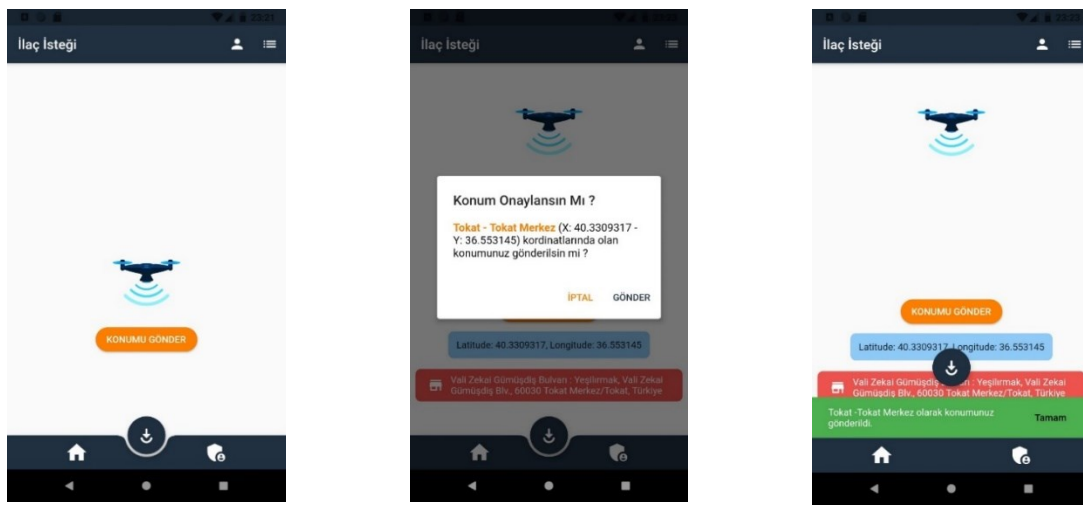
Figure 4. The workflow diagram of the application

#### 4. IMPLEMENTATION AND COMPUTATIONAL RESULTS

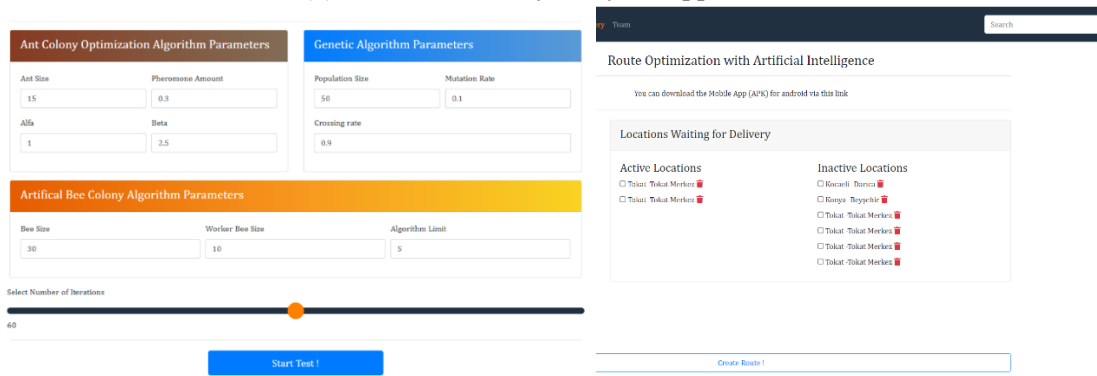
On the mobile side of this study, flutter framework software, which enables cross-platform application development, has been used. Applications can be developed for Android and iOS platforms with the flutter framework software using the Dart programming language. The server side is developed using the Flask framework software and the python programming language. The adaptation of metaheuristic methods to the TSP and the algorithms have been developed in python language.

Figure 4 shows the workflow of the application. The mobile user (Patient) has requested the medication. Patient and location information are sent to the server. The test result of the patient is checked on the server and the drug approval is displayed on the doctor's screen. A drug improvement notification is created. After the doctor's approval, the request is forwarded to the pharmacy department. In addition, optimum route is created for users in certain regions. The optimum route is sent to the drone center, at the same time the QR-Code created for each patient is sent to both the mobile users and the drone center. The drones start the distribution in the direction of the determined route and when they reached the desired coordinate, the patient is asked for the QR-Code. After this QR-Code is read with the drone's camera and approved, the drug is released to the patient.

As seen in Figure 5, a dynamic interface is presented in the TSP part of the mobile and web interface to see the effect of the change of parameters used in metaheuristic methods on the optimum route. In the distribution with drone interface, data from mobile users are collected on the server with the Restful API. It is provided dynamically to extract the optimum route for the desired number of locations from these collected data and to display their graphical results.



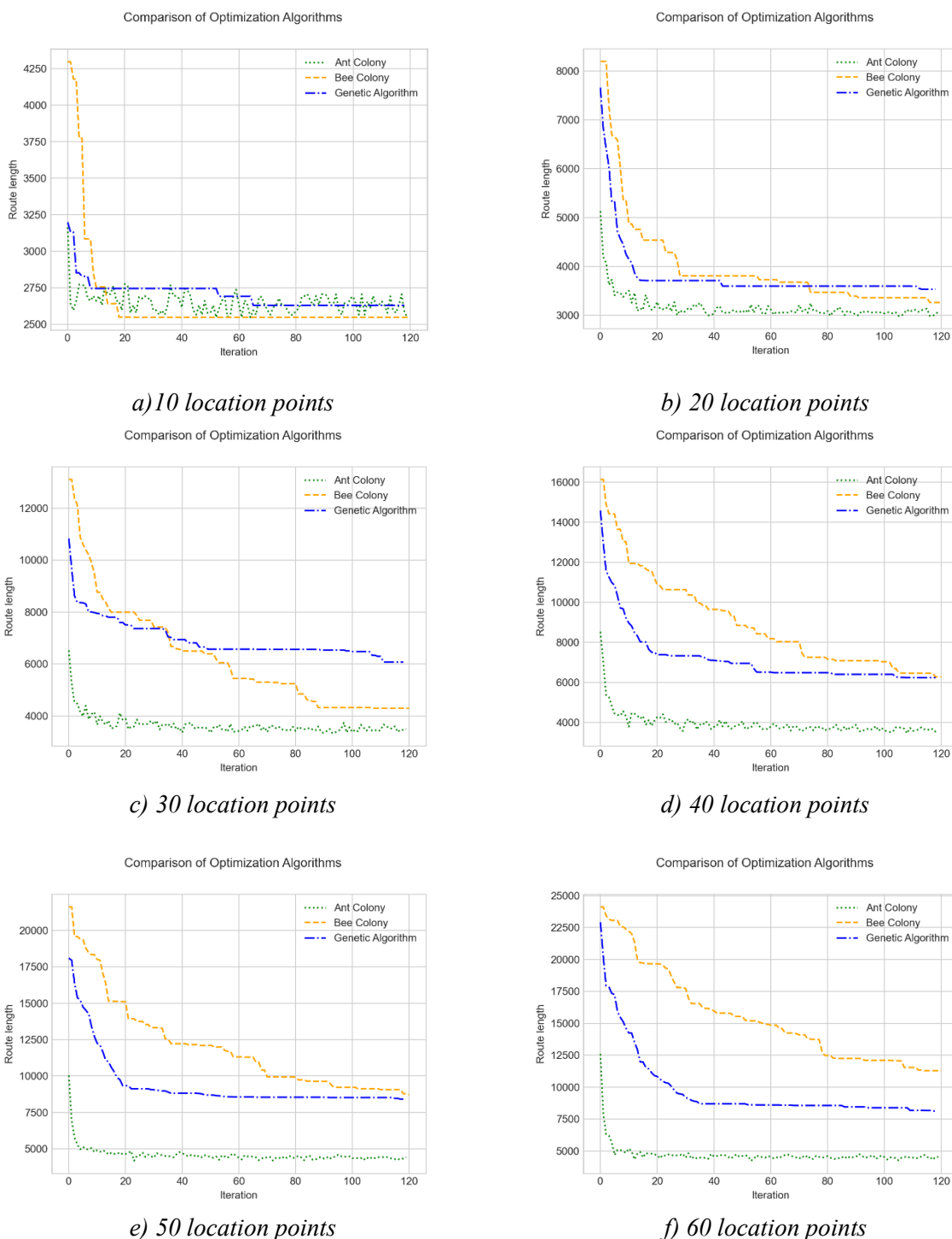
(a) The mobile interface of the application



(b) The web interface of the application

**Figure 5.** The mobile and web interfaces of the application

All three algorithms have been run once and the results are presented in Figure 6. In this one run, each algorithm performed 120 iterations. When looking at the comparisons of these runs, it is seen that the algorithm that converges to the optimum value in the fastest way is ACO. Hyperparameters used in algorithms are as follows: ACO: Pheromone Amount: 0.95, Alpha: 1, Beta: 2, Ant size: 2 \* number of nodes or patients. ABC: Food source size: 2 \* number of nodes or patients, Algorithm limit: 5. GA: Population size: 2 \* number of nodes or patients, Mutation rate: 0.1, Crossing rate: 0.9. The effect of hyperparameters on solutions can be observed with the application presented on the <http://ceng.gop.edu.tr/travellingsalesmanproblem> web page.

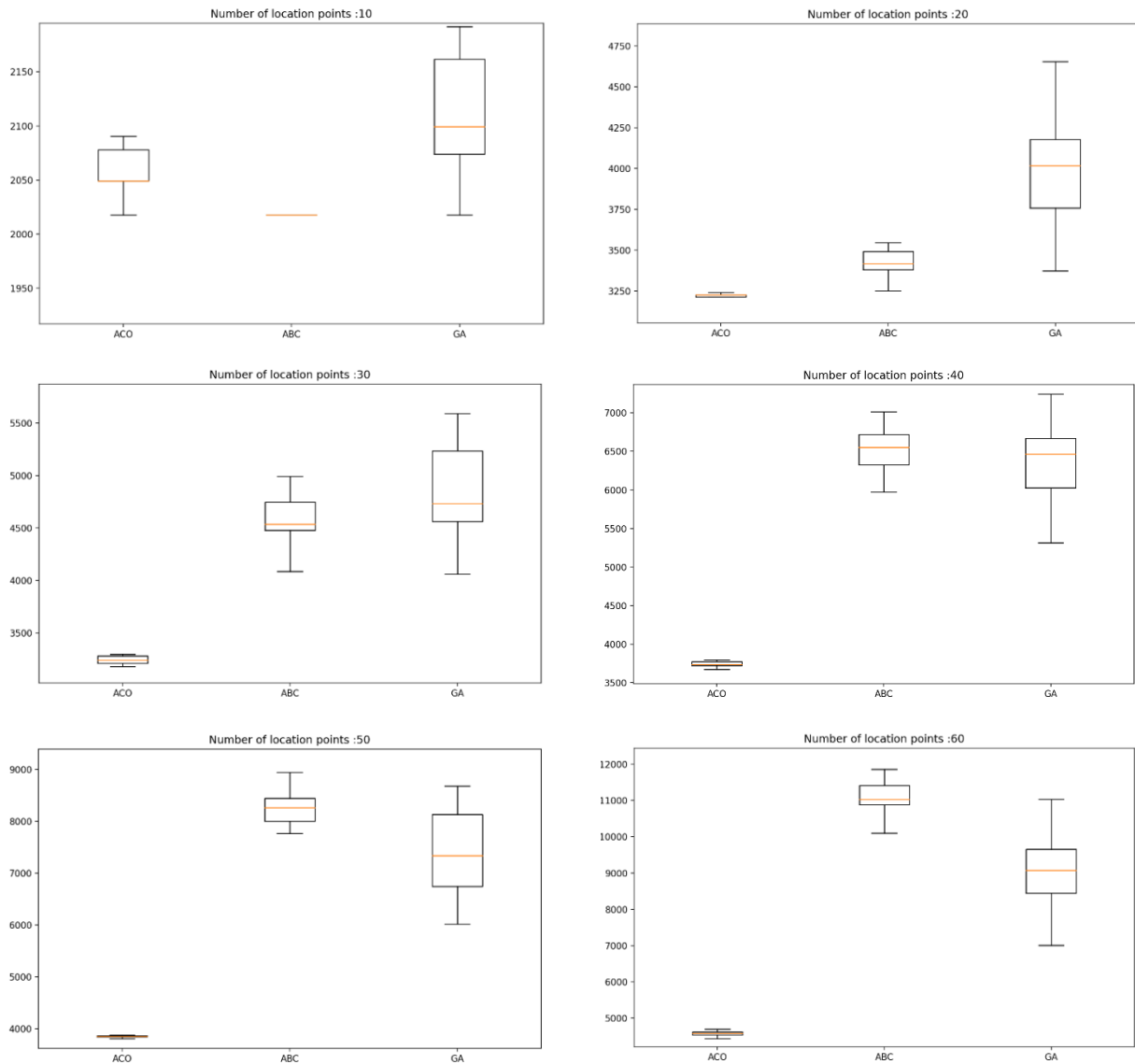


**Figure 6.** Comparison of the route length in one run

As seen in Figure 7, all three algorithms were run 20 times at the same iteration number for different location points and the results have been collected. Population-based metaheuristic methods ACO, ABC and GA are in an advantageous position as they try to find solutions at many points in the search space. The task of seeking solutions at many points in these metaheuristics is fulfilled by ants in ACO, bees in ABC and chromosomes in GA. Agents in each method aiming to reach the optimum solution also share information with each other and increase the quality of the solution. When the performances of the methods are examined at different location points in Figure 7, the best results are produced by ACO.

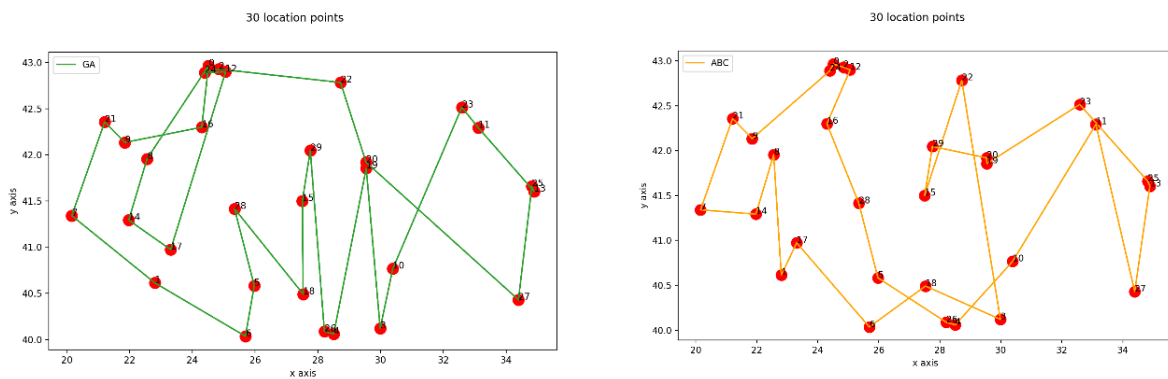
Generally, lowest standard deviation occurs in the ACO algorithm. In the other two methods, standard deviations change.

In the study, the closest results to the optimum have been found by the ACO algorithm. The average values, maximum and minimum limits obtained by running metaheuristic methods 20 times for each location group in different sizes are shown with box plots. One of the main purposes of this study is to compare the performances of each metaheuristic algorithm in predetermined iteration numbers.



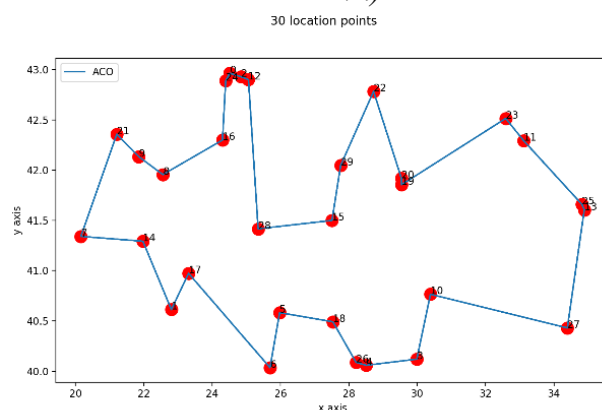
**Figure 7.** Statistical properties of the different number of location points for 20 times run

One of the optimum route examples created by these algorithms is given in Figure 8. In Figure 8, optimum routes produced by the ACO algorithm are given with the routes created by other two algorithms.



a) A GA route with 30 location points (54.11 km)

b) An ABC route with 30 location points (41.96 km)



c) An ACO route with 30 location points (33.77 km)

Figure 8. An Optimal route in km by each algorithm for medication delivery

### 5. CLUSTERING THE LOCATIONS

Since the number of patients in a certain area may increase very rapidly, clustering may be required considering both the drone capacities and the number of available drone resources. In clustering, the number of clusters can generally be determined by the elbow method, but in our practice, the number of clusters is determined by dividing the total number of patients requesting medications by the number of patients planned to be served by one drone. K-means clustering method is to partition a data set consisting of N data objects into K clusters given as input parameters. The aim is to ensure that within-cluster similarity is maximum and inter-cluster similarity is minimal. K-means is one of the most commonly used clustering algorithms. It is easy to apply. It can cluster large-scale data quickly and effectively. "K" refers to the number of fixed sets needed before starting the algorithm. With its repetitive partitioner structure, the K-means algorithm reduces the sum of the distances of each data to the set it belongs to. The K-means algorithm tries to detect K clusters that will make the square error the smallest.

Figure 9 presents the clustering process for patients' locations. If the number of patients in a certain area exceeds a threshold, clustering is performed. With the number of clusters determined according to the number of patients and drone capacity, the K-means algorithm is run and the locations are divided into specified clusters in Figure 9b. Then, as seen in Figure 9c, the optimum route is determined by running the ACO algorithm for each cluster and a drone is assigned to each cluster. Since drones distribute medications with limited resources in terms of batteries and product carrying capacity, it becomes important for them to carry out the distribution process with optimum routes. For this reason, algorithms giving the optimum route at different location numbers have been compared in Figure 10 and ACO algorithm yields the best result for each location. ABC algorithm produced the worst results. Basically, it can be said that the reason for this situation is that the ABC and GA algorithms start the solution with random points according to ACO algorithm and do not consider the distance parameter in the iteration. After approximately 30 locations, GA produced more successful results than ABC.

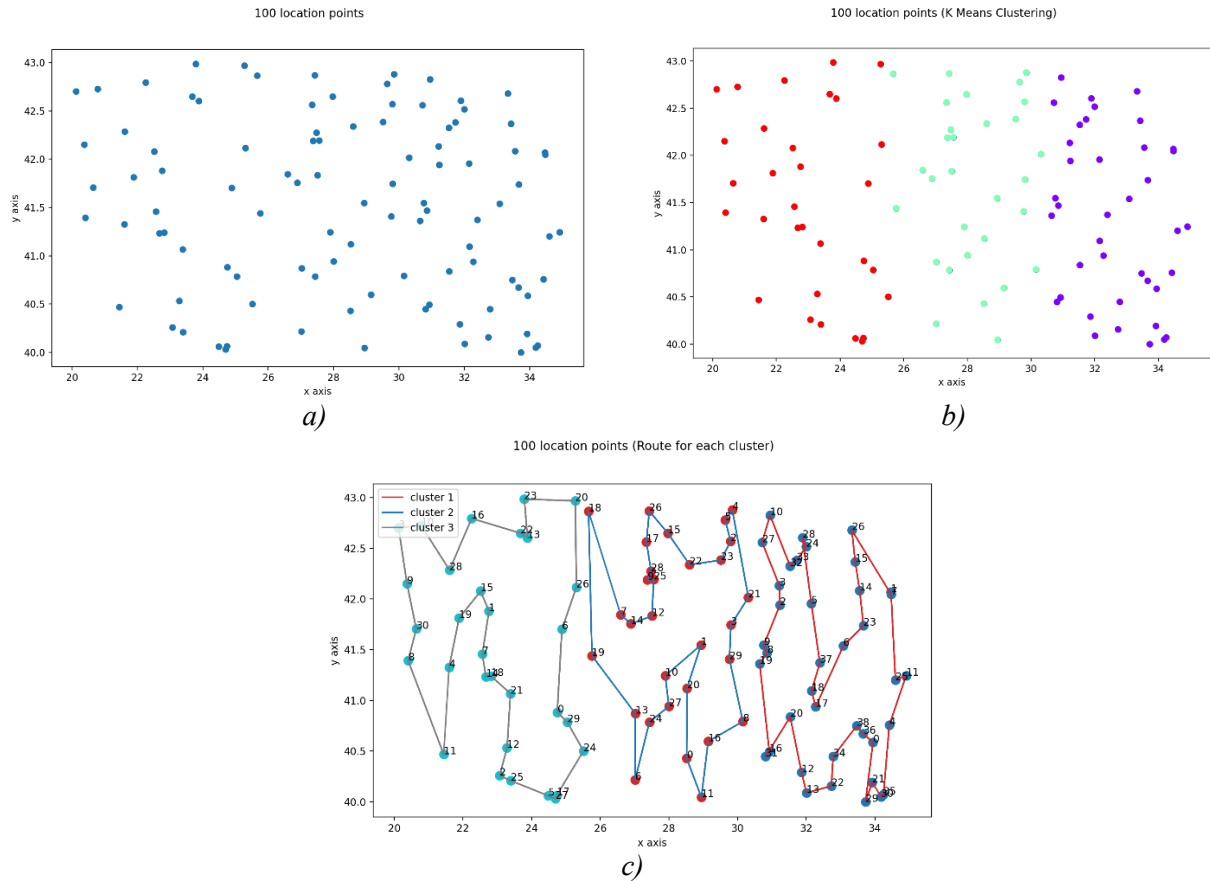


Figure 9. a) Locations of the patients b) Three clusters for the patents' locations c) Optimal route for each cluster

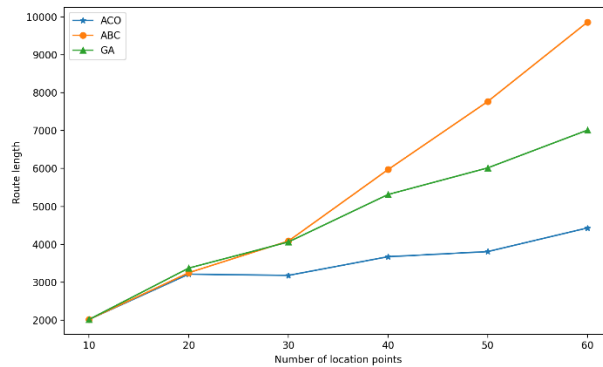


Figure 10. Comparison of the optimal results for each algorithm

6.CONCLUSIONS

Drone technology is also improved in parallel with the developments in informatics and mechatronics technologies. Along with online trade and industrial developments, drones (UAVs) have started to be used in the air transportation in distribution process. Companies have started to use land vehicles and drones together for transportation from distribution points located far from city centers to distribution stations in the city. Although drones provide advantages in terms of not being affected by traffic congestion and being autonomous, they also experience various capacity constraints. The most important capacity constraints of drones are battery and parcel limits. Therefore, it is very important to find the optimum route for the location points to be distributed.

In this study, it is aimed to distribute medications, especially covid-19 treatment drugs, to end users with drones due to the covid-19 pandemic. For the distribution of necessary drugs to patients with a positive Covid-19 diagnosis, patients will first make a request from the mobile application. These requests will be collected on a web server and distributed to location groups in the certain regions.

Since there are too many locations for distribution and considering the limitations of drones, the optimum route should be determined. In order to determine the optimum route, ACO, ABC and GA metaheuristic algorithms have been compared and as a result of the experimental studies, the results closest the optimum were produced by the ACO algorithm adapted to route planning. If the number of patients is too high in a specific region, it is planned to separate patients according to certain clusters with clustering based on the machine learning algorithm, to extract the optimum route for each cluster and to distribute to each cluster. We have implemented K-means algorithm to define clusters for distribution. A hybrid approach has been proposed using K-means and Ant Colony algorithm together.

In the future, considering the battery constraints of drones, those with a battery time below a certain value can be directed to charging centers at certain points in city centers. These charging stations are planned to be added to the model keeping in mind that it will change the structure of the model since the starting points will change by adding these charging stations.

## REFERENCES

- [1] Z., Tang, W. J., van Hoes, P., Shaw, “A Study on the Traveling Salesman Problem with a Drone.” In International Conference on Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research, Thessaloniki, Greece, 557-564, June, 2019.
- [2] D., Rojas Vilorio, E. L., Solano- Charris, A., Muñoz- Villamizar, J. R., Montoya- Torres, “Unmanned Aerial Vehicles/Drones In Vehicle Routing Problems: A Literature Review”, International Transactions in Operational Research, 28(4), 1626-1657, 2021.
- [3] S., Kim, I, Moon. “Traveling Salesman Problem With A Drone Station”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 49(1), 42-52, 2018.
- [4] M. Y., Özsağlam, M., Çunkaş, “Optimizasyon Problemlerinin Çözümü İçin Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması”, Politeknik Dergisi, 11(4), 299-305, 2008.
- [5] Internet: E. Adams. DHL’s Tilt-Rotor ‘Parcelcopter’ is Both Awesome and Actually Useful, <https://www.wired.com/2016/05/dhls-new-drone-can-ship-packages-around-alps/>, 16.04.2021
- [6] E. E., Yurek, H. C., Ozmutlu, “A Decomposition-Based Iterative Optimization Algorithm for Traveling Salesman Problem with Drone”, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 91, 249-262, 2018.
- [7] C., Ercan, C. Gencer, “A Decision Support System for Dynamic Heterogeneous Unmanned Aerial System Fleets” Gazi University Journal of Science, 31(3), 863-877, 2018.
- [8] D., Karaboğa, B., Görkemli, “A Combinatorial Artificial Bee Colony Algorithm For Traveling Salesman Problem”, International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Istanbul, Turkey, 50-53, June, 2011.
- [9] A.P. Adewole, K. Otubamowo, T.O. Egunjobi, K.M. Ng, “A Comparative Study of Simulated Annealing and Genetic Algorithm for Solving The Travelling Salesman Problem”, Int. J. Appl. Inf. Syst. (IJAIS), 4 (4), 6-12, 2012.
- [10] S., Kuzu, O. Önay, U. Şen, M., Tunçer, B., Yıldırım, T., Kesintürk, “Gezgin Satıcı Problemlerinin Metasezgiseller ile Çözümü”, İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 43(1), 1-27, 2014.
- [11] S. A., Haroun, B., Jamal, E. H., Hicham, “A Performance Comparison of GA and ACO Applied to TSP”, International Journal of Computer Applications, 117(19), 28-35, 2015.



- [12] Makuchowski, M. "Effective Algorithm Of Simulated Annealing For The Symmetric Traveling Salesman Problem", International Conference on Dependability and Complex Systems, Brunów, Poland, 348–359, July, 2018.
- [13] K., Chaudhari, A., Thakkar, "Travelling Salesman Problem: An Empirical Comparison Between ACO, PSO, ABC, FA and GA", Advances in Intelligent Systems and Computing, 397-405, 2019.
- [14] A. S., Bhagade, P. V., Puranik, "Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Vehicle Routing Optimization Problem", International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 2012.
- [15] F., Valdez, F., Moreno, P., Melin, "A Comparison of ACO, GA and SA for Solving the TSP Problem", Hybrid Intelligent Systems in Control, Pattern Recognition and Medicine, Volume:827, Editors: Castillo, O., Melin, P., Springer, Cham, 181-189, 2020.
- [16] A., Yılmaz Yalçınar, "Tavlama Benzetimi Temelli Yaklaşım ile Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Optimizasyonu: Karadeniz Bölgesi Örneği", European Journal of Science and Technology, (22), 239-248, 2021.
- [17] Y. Torun, Z. Ergül, A. Aksöz, "Optimum Enerji Verimliliğini Hedefleyen Rastgele Ağaçlar ve Yapay Arı Kolonisi Yöntemi ile Otonom Robotlarda Yol Planlama Algoritması", Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 7(4), 903-915, 2019.
- [18] C., Öztürk, E., Hançer, D., Karaboğa, "Küresel En İyi Yapay Arı Koloni Algoritması ile Otomatik Kümeleme", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29(4), 677-687, 2014.
- [19] F. Xu , C. Pun , H. Li, Y. Zhang , Y. Song, H. Gao, "Training Feed-Forward Artificial Neural Networks With A Modified Artificial Bee Colony Algorithm", Neurocomputing, 416, 69-84., 2019.
- [20] Y. Cao, S. Ji, Y. Lu, "An Improved Support Vector Machine Classifier Based On Artificial Bee Colony Algorithm", Journal of Physics Conference Series, 1550(4), 042073, 2020.
- [21] M., İlkuçar, İ., Güngör, "Hekim Atama Probleminin Genetik Algoritma ile Optimizasyonu", Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 10(24), 236-261, 2019.
- [22] C., Aktürk, "Genetik Algoritma ve Pikselleştirme Yöntemi ile Mayın Tarlası Oyununun Zorluk Seviyesini Belirleme", Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi, 2(2), 105-113, 2018.
- [23] C., Guo, L., Li, Y., Hu, J., Yan, "A Deep Learning Based Fault Diagnosis Method with Hyperparameter Optimization by Using Parallel Computing", IEEE Access, 8, 131248-131256, 2020.
- [24] A., Özgür, H., Erdem, "Saldırı Tespit Sistemlerinde Genetik Algoritma Kullanarak Nitelik Seçimi ve Çoklu Sınıflandırıcı Füzyonu", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(1), 75-87, 2018.
- [25] J., Tarigan, R., Diedan, Y., Suryana, "Plate Recognition Using Backpropagation Neural Network and Genetic Algorithm", Procedia Computer Science, 116, 365-372, 2017.
- [26] S., Kılıç, C., Kahraman, "Bulanık Karar Ortamında Karınca Kolonisi Optimizasyonu Yöntemiyle Araç Rotalama". İTÜdergisi/d . 8(4), 160-172, 2009.
- [27] H., Dikmen, H., Dikmen, A., Elbir, Z., Eksi, F., Çelik, "Gezgin Satıcı Probleminin Karınca Kolonisi ve Genetik Algoritmalarla En İyi İyilemesi ve Karşılaştırılması", Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 18(1), 8-13, 2014.

- [28] D. Karaboga, An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Technical Report TR06, Erciyes University, Turkey, 2005.
- [29] D., Karaboga, B. Akay, “A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm”, Applied Mathematics and Computation. 214(1), 108-132, 2009.
- [30] M., Mitchell, “Genetic Algorithms: An Overview”, Complexity, 1(1), 31–39, 1995.
- [31] M., Dorigo, M., Birattari, T., Stutzle, “Ant Colony Optimization”. IEEE Computational Intelligence Magazine, 1(4), 28-39, 2006.
- [32] S., Kuzu, O., Önay, U., Şen, M., Tunçer, B., Yıldırım, T., Keskindürk, “Gezgin Satıcı Problemlerinin Metasezgiseller ile Çözümü”, İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi, 43(1), 1-27, 2014.



## Increasing Low-Velocity Impact Strength of Glass Fiber Sandwich Composites with Nanoparticle Reinforced Adhesive

Mehmet Emin ÇETİN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Aerospace Engineering, Konya/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 12/06/2021  
Revision: 09/07/2021  
Accepted: 27/07/2021

#### Highlights

- Sandwich composites.
- MWCNT addition.
- Polyurethane adhesive.
- Low-velocity impact.

#### Keywords

Sandwich composite panels  
Nano adhesive  
Carbon nanotube

In this study, glass fiber reinforced composite aluminum honeycomb sandwich panels were produced using three different adhesives (pure, 0.1% MWCNT, and 0.2% MWCNT added) and an 8.86 mm cell diameter core. Low-velocity impact tests were applied to sandwich structures at an initial energy level of 50 J in a test setup designed according to ASTM 7136 standard.

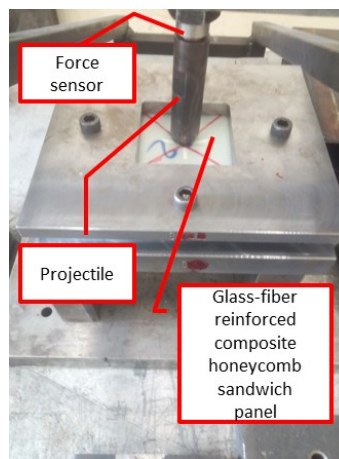


Figure A. Low-velocity impact test setup

**Purpose:** The original value of this study is to investigate the low-velocity impact properties of glass fiber honeycomb sandwich panels produced using MWCNT reinforced polyurethane-based adhesive. It is essential to improve the mechanical properties of adhesives in applications where adhesive connections are used in aircraft.

**Theory and Methods:** Sandwich structures with glass fiber composite surface and aluminum honeycomb core are fabricated using polyurethane-based MWCNT added adhesives. The specimens were analyzed in terms of load-time, load-deflection and energy-time behaviors. In addition, optical images were used to examine the deformation and damage properties of the sandwich panels.

**Results:** Load-time, load-deflection and energy-time graphs are used to evaluate the damage caused by low-velocity impact. The maximum contact forces of 0.1% MWCNT reinforced sandwich panels were approximately 3% higher than those produced using a neat polyurethane adhesive. Damage analyzes showed that the damaged area was narrower in the polyurethane adhesive specimens reinforced with MWCNT compared to the neat samples. Significant damage occurred in the specimens after the impact tests were applied at the 50 J energy level. The absorbed energy values due to the high-weighted projectile were close to each other for all specimens.

**Conclusion:** Examining the upper surface and cross-sections of the samples subjected to the impact test, fiber breakage and fracture, crushing and collapse of the honeycomb core were observed in glass-fiber sandwich panels. MWCNT addition increased cell density in polyurethane adhesives, increasing the impact strength of sandwich panels. The low-velocity impact performance of sandwich panels with glass fiber reinforced composite surface and aluminum honeycomb core can be improved with 0.1% MWCNT reinforcement.



## Increasing Low-Velocity Impact Strength of Glass Fiber Sandwich Composites with Nanoparticle Reinforced Adhesive

Mehmet Emin ÇETİN<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Konya/Türkiye

### Abstract

The use of sandwich composite structures in the aerospace industry is increasing. Therefore, Improving the impact and other mechanical properties of sandwich composite panels (SCP) is essential for aviation safety. In the manufacture of SCPs, bonding with the lower and upper surfaces of the honeycomb structure is provided by bonding connections. So, by improving the mechanical properties of the adhesives used in SCP, the mechanical rigidity of the whole structure will be enhanced. In this study, sandwich composite panels were produced using glass fiber reinforced composite, three different adhesives (pure polyurethane, 0.1% and 0.2% multi-walled carbon nanotube reinforced polyurethane) and an aluminum honeycomb with a cell diameter of 8.86 mm. Low-velocity impact tests were applied to the manufactured sandwich composites at the initial energy level of 50 J. After impact tests, load-time, load-deflection and energy-time graphs were obtained, and the effect of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) contribution was evaluated. Also, the effect of the MWCNT addition on impact properties was determined by making a damage analysis. It was observed that the carbon nanotube addition to the polyurethane adhesive increased the maximum contact force by 3%, improving the low-speed impact properties of SCPs.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 12/06/2021  
 Düzeltilme: 09/07/2021  
 Kabul: 27/07/2021

### Keywords

*Sandwich composite panels*  
*Nano adhesive*  
*Carbon nanotube*

### Anahtar Kelimeler

*Sandviç kompozit panel*  
*Nano yapıştırıcı*  
*Karbon nanotüp*

## Cam Fiber Sandviç Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Mukavemetinin Nano Parçacık Takviyeli Yapıştırıcı Kullanılarak Artırılması

### Öz

Sandviç kompozit yapıların havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımını artmaktadır. Bu nedenle sandviç kompozit panellerin (SKP) darbe ve diğer mekanik özelliklerinin geliştirilmesi havacılık emniyeti açısından önem arz etmektedir. SKP'lerin imalatında bal peteği yapının alt ve üst yüzeyler ile bağı yapıştırma bağlantıları ile sağlanmaktadır. Dolayısıyla SKP'de kullanılan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile bütün yapının mekanik rijitliği iyileştirilmiş olacaktır. Bu çalışmada cam fiber takviyeli kompozit, üç farklı yapıştırıcı (saf poliüretan, ağırlıkça %0,1 ve %0,2 çok cidarlı karbon nanotüp katkılı poliüretan) ve 8,86 mm hücre çapında alüminyum bal peteği kullanılarak sandviç kompozit paneller üretilmiştir. Üretimi yapılan sandviç kompozitlere 50 J ilk enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Darbe deneyleri sonrasında yük-zaman, yük-sehim ve enerji zaman grafikleri elde edilerek çok cidarlı karbon nano tüp (ÇCKNT) katkısının etkisi değerlendirilmiştir. İlave olarak, hasar analizi yapılarak ÇCKNT katkısının darbe özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Poliüretan yapıştırıcıya karbon nano tüp katkısının en büyük temas kuvvetini %3 oranında artırarak SKP'lerin düşük hızlı darbe özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan malzemelerde rijitlik ve hafiflik özellikleri ön plana çıkmaktadır [1–4]. Sandviç kompozit yapılar havacılık, denizcilik, uzay, raylı sistem endüstrisi ve astronomi gibi alanlarda yoğun olarak tercih edilmekte ve bu malzemelere olan ilgi artarak devam

ekmektedir [5–7]. Yolcu uçaklarının kanat ve kuyruk parçalarında ve buna ek olarak taban kaplaması bölümlerinde sandviç yapılar yer almaktadır [1,2]. Cam ve karbon fiber takviyeli sandviç paneller helikopterlerin kuyruk, gövde, kanat ve kargo kapısı kısımlarında tercih edilmektedir [1,2]. Uyduların gövde, güneş paneli ve yansıtıcı anten bölümlerinde karbon fiber kompozit alüminyum bal peteği sandviç paneller kullanılmaktadır [1,2]. Boeing Dreamliner-787 yolcu uçağının kanatçık, yön ve yükseliş dümenlerinde ve motorunun dış gövde kısmında karbon fiber sandviç kompozit yapıların kullanılması, bu panellerin yolcu uçaklarında tercih edilmesine örnek olarak verilebilir (Şekil 1) [8]. Sandviç kompozit panellerin bu alanlarda kullanımını için mekanik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmekte ve mekanik özelliklerinin istenilen düzeyde olabilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır [9–17].



**Şekil 1.** Boeing Dreamliner-787 uçağının gövde, kanat ve kuyruk kısmında kullanılan malzemeler [8]

Sandviç panellerin kendilerinden arzu edilen özellikleri sağlaması için farklı malzemeler ve imalat yöntemleri kullanılarak üretimleri yapılmaktadır. Sandviç panellerin üst ve alt yüzeylerinde bakır, çelik, alüminyum ve polimer kompozit malzemeler kullanılmaktadır [5,6]. Sandviç yapıların çekirdek malzemesi olarak köpük, fenolik reçine emdirilmiş aramid, polimer, ahşap ve alüminyum alaşımları kullanılmaktadır [5,6,18]. Sandviç kompozit paneller; yüzeylerine yapıştırıcı sürülmüş iki rijit yüzey arasına hafif çekirdek malzemenin yerleştirilmesi ve birleştirilmesi işlemiyle imal edilmektedir. Bal peteği, köpük, oluklu, üçgen ve dörtgen yapıya sahip çekirdek malzemeleri uygulamada yer almaktadır [5,6,18]. Sandviç panellerde kullanılan üst ve alt yüzeyler ince ve mukavemetli yapıdayken, çekirdekler ise hafif fakat yüzeylere göre dayanım açısından daha zayıftır. Çekirdek malzeme eğilme yüklerini, alt ve üst yüzeyler ise çekme-basma yükünü taşıyarak sandviç panellerin I profil davranışı göstermesini sağlarlar. Buna ek olarak çekirdek yapı kayma gerilmelerine karşı direnç göstermektedir. Çekirdek yapı üst ve alt yüzey arasındaki mesafeyi sabit tutarak üst ve alt yüzeylere destek sağlamakta ve bu yolla sandviç panelin yapısal rijitliği artmaktadır [5,6,18]. Çekirdek, üst ve alt yüzey ve yapıştırıcı tek bir bütün oluşturmaktadır.

Sandviç kompozit paneller imal edilirken üst ve alt yüzeylerde bal peteği yapının yapıştırılmasında nitril fenolik, epoksi, poliamid ve poliüretan tipi yapıştırıcılar tercih edilse de endüstriyel uygulamalarda genellikle poliüretan bazlı yapıştırıcıların kullanımı öne çıkmaktadır [19–21]. Yapıştırma bağlantıları farklı sektörlerdeki birçok endüstri uygulamasında ve kompozit malzemelerin birleştirme işlemlerinde hafiflik, uygulama kolaylığı ve düşük maliyet nedeniyle artan bir kullanıma sahiptir [19–21]. Bununla birlikte yapıştırma bağlantısı tercih edilmesi sayesinde gerilme yığılmaları azaltılarak yapıların yorulma ve korozyon dayanımları artırılmaktadır [19–22].

Zhou ve Hill [23] yaptıkları çalışmada bal peteği kompozit yapıların basma mukavemetlerine kıyasla kesme ve eğilme mukavemetlerinin daha zayıf olduğunu göstermişlerdir. Bu durumun uygulanan yükten etkilendiğini ve oluşan hasarın genelde yapıştırma bağlantısı bölgesinde ayrılma şeklinde olduğunu vurgulamışlardır. Jhen ve Chang [24] darbe kuvveti uygulaması sonucunda üst ve alt yüzey ile çekirdek arasında ayrılmaların göze çarptığını belirtmişlerdir. Bal peteği kullanılan sandviç panellerin darbelere karşı dayanımının farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcıların kullanımı ile iyileştirilebileceğini Jen vd. [25] yaptıkları çalışmada söylemişlerdir. Bu alanda yapılan son çalışmalar nano katkı yapıştırıcıların

endüstriyel uygulamalarda kullanımının arttığını ve yapıştırılan yüzeyler arasında kenetlenmeyi iyileştirdiğini göstermektedir [10,26–29]. Nano partiküller yapılarında barındırdıkları olağanüstü mekanik özellikler sayesinde, nanoyapıştırıcılar ve nanokompozitleri geliştirmek için yenilikçi bir alan oluşturmuşlardır [21,30,31]. Nano partikül türlerinden biri olan ÇCKNT'ler üstün tribolojik, termal ve mekanik özellikleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında kullanım için eşine az rastlanan bir malzeme türü olarak gösterilmektedir [21].

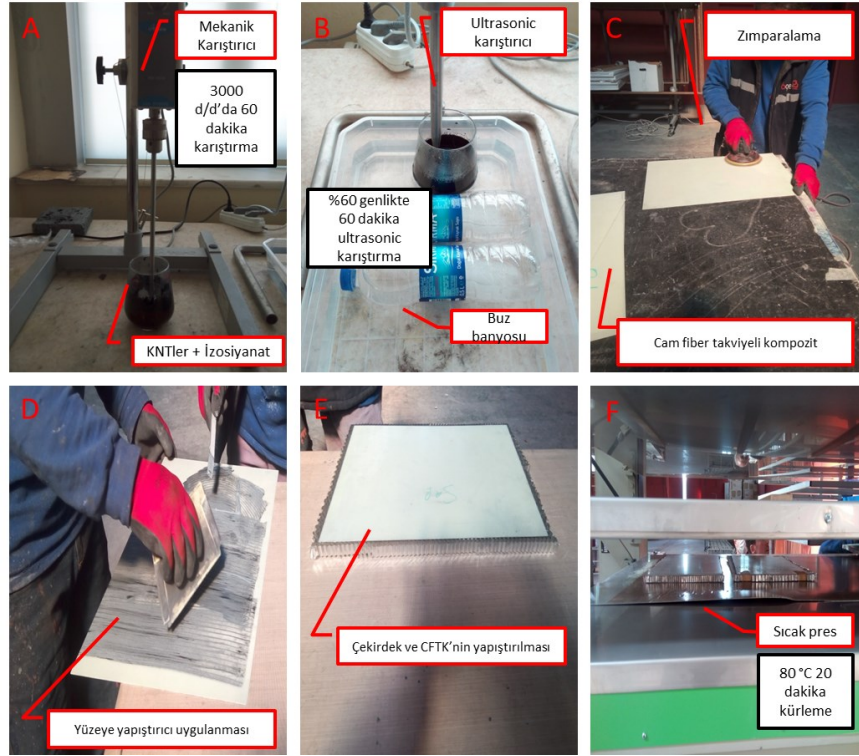
Kompozit malzemelerde nano katkı yapıştırıcıların kullanıldığı uygulama alanları mevcuttur. Fakat cam fiber kompozit yüzeye ve alüminyum balpeteği çekirdeğe sahip sandviç yapıların üretiminde poliüretan bazlı ÇCKNT katkı yapıştırıcıların kullanıldığı çalışma literatürde yer almamaktadır. Buna ek olarak darbeye karşı hassas olduğu bilinen bu yapıların düşük hızlı darbe davranışları da incelenmemiştir. Bu çalışmanın özgün değeri, ÇCKNT takviyeli poliüretan bazlı yapıştırıcı kullanılarak üretilen cam fiber altıgen sandviç panellerin düşük hızlı darbe özelliklerinin incelenmesidir. Hava araçlarında yapıştırma bağlantılarının kullanıldığı uygulamalarda yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma sayesinde, ülkemiz havacılık endüstrisinde yapılan çalışmalara malzeme geliştirme odaklı katkı sağlanmış olacaktır.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Cam fiber takviyeli kompozit (CFTK) malzeme üretimi için 110 gr/m<sup>2</sup> yoğunluklu düz örgülü atık prepreg kumaş kullanılmıştır. Reçine hacim oranı % 35'tir. CFTK prepregleri 50x200 cm boyutlarında kesilmiştir. Çelik bir kalıba yapıştırılmadan önce izopropil alkol (İPA) ile temizlenmiş teflon bantlar üzerine 14 kat olarak el yatırma tekniği ile yerleştirilmiştir. PLC kontrollü bir sıcak pres kullanılarak 120 °C'de 4 Bar basınç altında 1 saat kürlenmiş ve soğumaya bırakılmıştır. Üretim sonrası üretilen CFTK kalınlığı 1,5± 0,05 mm olarak ölçülmüştür.

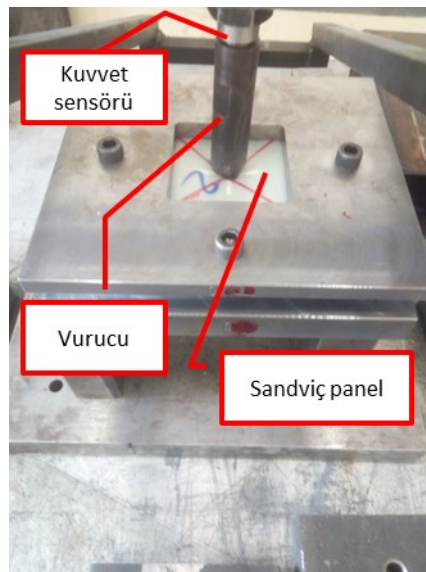
Poliüretan yapıştırıcı izosiyanat ve polioliol olmak üzere iki bileşen halinde temin edilmiştir (Sege). Polioliol ve izosiyanatın karışım oranı ağırlıkça 5:1'dir. ÇCKNT'ler 10-20 nm çaplarında ve 10-30 µm uzunluğunda ve %95 saflıkta temin edilmiştir (US Research Nanomaterials Inc.). %0,1 ve %0,2 olmak üzere iki farklı ağırlık oranında ÇCKNT poliüretan yapıştırıcıya eklenmiştir. İzosiyanat içerisinde ÇCKNT'leri dağıtmak için 3000 rpm devir sayısında 60 dakika mekanik karıştırma ve 60 dakika %60 genliğinde ultrasonik karıştırma işlemi buz banyosu içerisinde uygulanmıştır (Şekil 2 (a) ve (b)) [32,33]. ÇCKNT içeren izosiyanatın polioliol ile mekanik karıştırıcıda 12 saniye 400 d/d karıştırılmasıyla nano katkı poliüretan yapıştırıcı elde edilmiştir. ÇCKNT takviyesinin etkisini karşılaştırmak için saf yapıştırıcı polyol ve izosiyanatın 5:1 ağırlık oranında karıştırılması ile hazırlanmıştır.

CFTK, nano katkı ve saf poliüretan yapıştırıcıların hazır hale getirilmesinin ardından sandviç panel üretim aşamasına geçilmiştir. Sandviç panel imalatında kullanılacak CFTK malzemenin yüzeyi P100 zımpara ile zımparalanmıştır (Şekil 2 (c)). İPA ile yüzeyi temizlenerek yüzeyde yapışma yüzey alanını azaltarak yapışma mukavemetini düşmesine neden olacak kirlilikler uzaklaştırılmıştır [13]. Alüminyum 3005-H19 alaşımından üretilmiş bal peteği altıgen çekirdekler 0,05 mm hücre cidarı kalınlığında, 8,66 mm hücre çapında ve 13 mm hücre yüksekliğinde Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnş. Panel San. Ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. CFTK, poliüretan bazlı saf ve ÇCKNT katkı yapıştırıcı ve çekirdek hazır hale getirilmiştir. Daha sonra CFTK yüzeyine yapıştırıcı bir tarak vasıtasıyla uygulanmıştır (Şekil 2 (d)). Bunu takiben çekirdeklerin alt ve üst yüzeyine yapıştırıcı uygulanmış CFTK yüzeyler yerleştirilmiştir (Şekil 2 (e)). Yapıştırılan SKP'ler 20 dakika 80 °C'de sıcak pres kullanılarak (Umur Makine Sanayi) 1 Bar basınç altında kürlenmiştir (Şekil 2 (f)). Sandviç panel üretiminin tamamlanmasından sonra yapıştırıcının kürlenmesinin tamamlanması için sandviç paneller oda sıcaklığında bir hafta bekletilmiştir. CFTK sandviç paneller 100x100x16 mm<sup>3</sup> boyutlarında elektrikli testere yardımıyla kesilerek düşük hızlı darbe testleri için hazır hale getirilmiştir.



**Şekil 2.** Cam fiber takviyeli alüminyum çekirdek sandviç panellerin imalatı

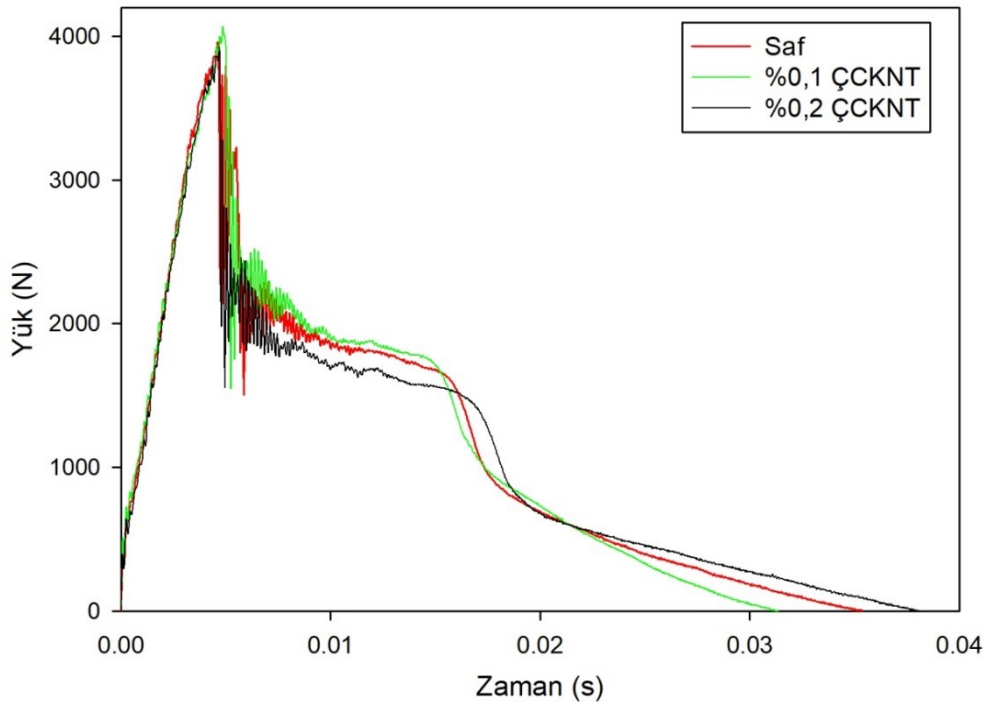
Düşük hızlı darbe testleri ASTM D7136 standardına göre hazırlanmış bir deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir [34]. Numuneler 75x75 mm orta açıklığı bulunan bir kalıp içerisine dört tarafı ankastre mesnet olacak şekilde yerleştirilmiştir. Belirlenen bir yükseklikten 20 kg ağırlık ve 12 mm çapa sahip vurucu sandviç panellerin belirlenmiş merkezlerine 50 J ilk enerji seviyesinde düşürülmüştür (Şekil 3). Testler sırasında ICP kuvvet sensörü (202 B) vurucu ve ağırlık arasına yerleştirilerek yük-zaman eğrisi elde edilmiştir. National Instruments (NI) Signal Express yazılımı veri işleme için kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe testleri her bir durum için en az üç defa tekrarlanmıştır.



**Şekil 3.** Düşük hızlı darbe test düzeneği

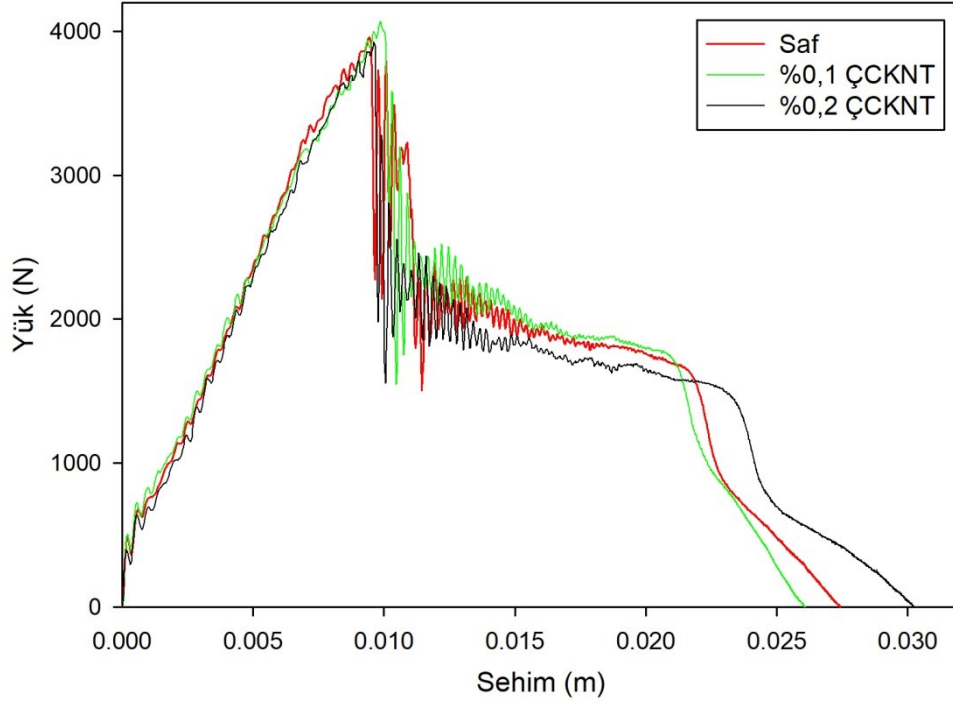
### 3. BULGULAR VE İRDELEME (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada ÇCKNT katkıli poliüretan yapıştırıcının cam fiber kompozit yüzeye ve alüminyum çekirdeğe sahip sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışına etkisi incelenmiştir. 50 J ilk enerji seviyesinde darbe testleri gerçekleştirilmiş ve numunelerin hasar durumları değerlendirilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla yük-zaman, yük-sehim grafikleri gösterilmiştir. Yük-zaman ve yük-sehim eğrileri incelendiği zaman, eğrilerde dalgalanmalar olduğu ve yükleme ve boşaltma kısımlarının simetrik olmadığı görülmektedir. Düşük hızlı darbe yüklemesi altında, herhangi bir malzeme ilk aşamada sürtünmeli elastik deformasyonla enerjiyi emer. Eğer yükleme seviyesi elastik deformasyonun üst sınırını aşarsa, numune deformasyon sırasında gevrek malzemeler için hasar mekanizmaları ve sünek malzemeler için plastik deformasyon yoluyla bu ekstra enerjiyi emer. Dolayısıyla sandviç panellerin üst ve alt kısımları kırılğan CFTK'dan üretilmiş olduğu için bu ekstra enerji kompozit üst yüzeyde delaminasyon ve fiber kopması hasarlarına sebep olur. CFTK altıgen sandviç panellerde ilk hasar CFTK üst yüzeyinde girinti şeklinde başlar, altıgen çekirdekte kayma kırılması, hücrelerin çökmesi ve ezilmesi şeklinde devam eder. Tablo 2 ve Şekil 6 'da deneylerden elde edilen sonuçlar hata payları ile birlikte verilmiştir. Tablo 1 ve Şekil 6'dan %0,1 ÇCKNT katkıli numune ile saf numune karşılaştırıldığında ÇCKNT takviyesinin en büyük temas kuvvetini 3961 N'dan 4066 N'a çıkarttığı bununla birlikte temas süresini ve sehimini de azalttığı görülmektedir. ÇCKNT katkısı en büyük temas kuvvetini %3 yakın oranda artırmıştır. Uğur vd. [10] çalışmalarında %1 ÇCKNT katkısının alüminyum balpeteği sandviç panellerin darbe özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Saf epoksi yapıştırıcılı numunelere göre en büyük temas kuvveti değerinde ÇCKNT katkıli numunelerde %4 ile %6 arasında değişen oranda artış sağlamışlardır. Bu çalışmada ise sağlanan %3'e yakın artış %0,1 ÇCKNT katkısı ile sağlanmıştır. Bu nedenle bütün panellerde kullanılan yüzey plakası ve balpeteği aynı olduğu için yapıştırıcıya yapılan ÇCKNT katkısı ile darbe özelliklerinin bu oranda artırılabilmesi sandviç panellerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Sandviç kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan kompozit malzemelere veya yapıştırıcılara nanopartikül katkısı üretim maliyetini artırabilir. Fakat sandviç kompozit malzemeler makalenin giriş kısmında belirtildiği gibi havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Hava ve uzay araçlarında kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinde sağlanacak artış uzun vadede daha dayanıklı malzeme sayesinde bakım maliyetlerinin düşmesine sebep olacaktır. Dolayısıyla bu çalışmada sandviç kompozit panellerin düşük hızlı darbe özelliklerinde sağlanan %3 artışın havacılık ve uzay uygulamalarına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca grafiklerden ÇCKNT katkısının %0,1'den %0,2'ye çıkmasının sehimini artırdığı, temas süresini ve en büyük temas kuvvetini 4066 N'dan 3922 N'a düşürdüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 4. Yük-zaman eğrisi

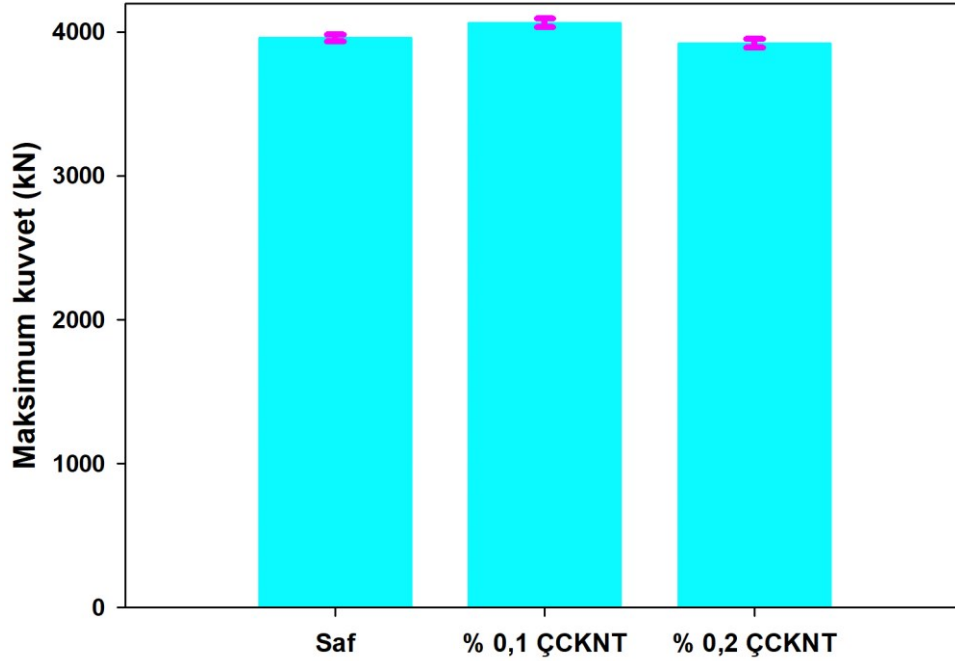




*Şekil 5. Yük- sehim eğrisi*

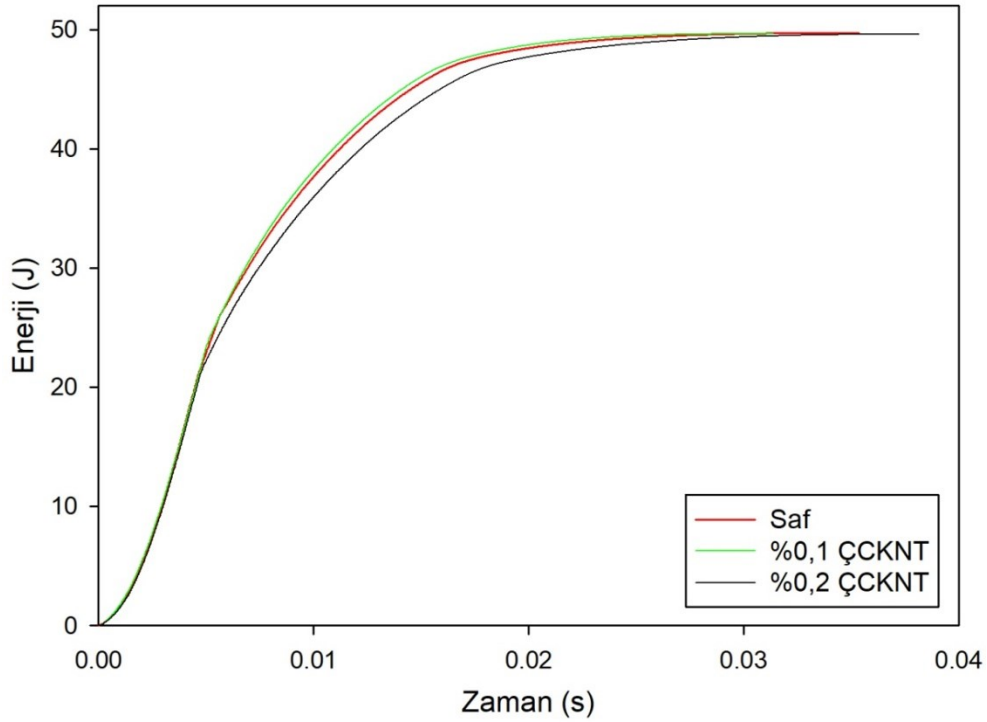
*Tablo 1. Darbe testlerinde elde edilen maksimum kuvvet değerleri*

Numune	Hücre genişliği (mm)	Hücre yüksekliği (mm)	Maksimum Kuvvet (N)
Neat	6.78	18	3961±9
%0,1 ÇCKNT	6.78	18	4066±10
%0,2 ÇCKNT	6.78	18	3922±12



Şekil 6. Maksimum kuvvet değerlerinin sütun grafiği şeklinde gösterimi

Çağlayan vd. [9] çalışmalarında ÇCKNT katkısının poliüretan köpük çekirdekli sandviç panellerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. %0,1 ÇCKNT katkısı sandviç panelin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirirken %0,2 ÇCKNT katkısının mekanik özelliklerde bir miktar düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu düşüşün sebebini %0,1'den daha fazla ÇCKNT katkısının topraklanmayı artırarak mekanik özelliklerde düşmeye neden olmasıyla açıklamışlardır. Dolayısıyla bu çalışmada da %0,2 ÇCKNT katkısının sandviç panellerin en büyük temas kuvveti değerlerinde azalmaya neden olması; artan ÇCKNT katkısı ile topraklanmaların artması ve mekanik özellik değerlerinin azalmasıyla açıklanabilir. Yük-sehim eğrisinin başlangıcından yük maksimum değere ulaşıncaya kadar numune darbe yüküne direnç göstermekte ve bu eğrinin eğimi yapısal rijitlik olarak isimlendirilmektedir. ÇCKNT katkısının yapısal rijitliği artırdığı anlaşılmıştır. Yük-zaman ve yük-sehim eğrilerinin yükleme ve boşaltma kısımlarında dalgalanmalar mevcuttur. Bu olgunun sebebi darbe bölgesinin tam altında kompozit yüzdeki tabakaların ayrılması ve kırılması, altıgen çekirdeğin ezilmesi ve bükülmesidir. Yük maksimum kuvvete ulaşıttan sonra hızlı bir şekilde düşer. Kompozit yüzey ve bal Peteği çekirdekdeki hasarların yapıyı daha rijit bir hale getirmesiyle tekrar artmaya başlar. CFTK fiberlerin kırılması ve kopmasına büyük oranda direnç göstererek dayanımı artırır. Yapıştırıcıya ÇCKNT takviye edilmesiyle yapıştırıcının rijitliği artırılmıştır. Bununla birlikte nano partiküllerin yapışma yüzeyini artırma özelliği nedeniyle saf numunelere göre poliüretan yapıştırıcıya ÇCKNT takviyesi sandviç panellerin darbe dayanımı artırmıştır. Ayrıca poliüretan yapıştırıcılara ÇCKNT eklenmesinin köpük yapıda daha kalın hücre duvarları ve birim hücre başına daha fazla hücre duvarına sahip olmasına neden olarak daha dayanıklı yapıştırıcı ve buna binaen daha dayanıklı sandviç panel üretilmesine sebep olduğu söylenebilir [35]. Numunelerin darbe deneyleri sırasında emdiği enerji değerleri enerji-zaman grafiği olarak Şekil 7'de verilmiştir. Kullanılan vurucu ağırlığı 20 kg olduğu için emilen enerji değerlerinde kayda değer bir farklılık görülmemiştir.



**Şekil 7.** Enerji-zaman eğrisi

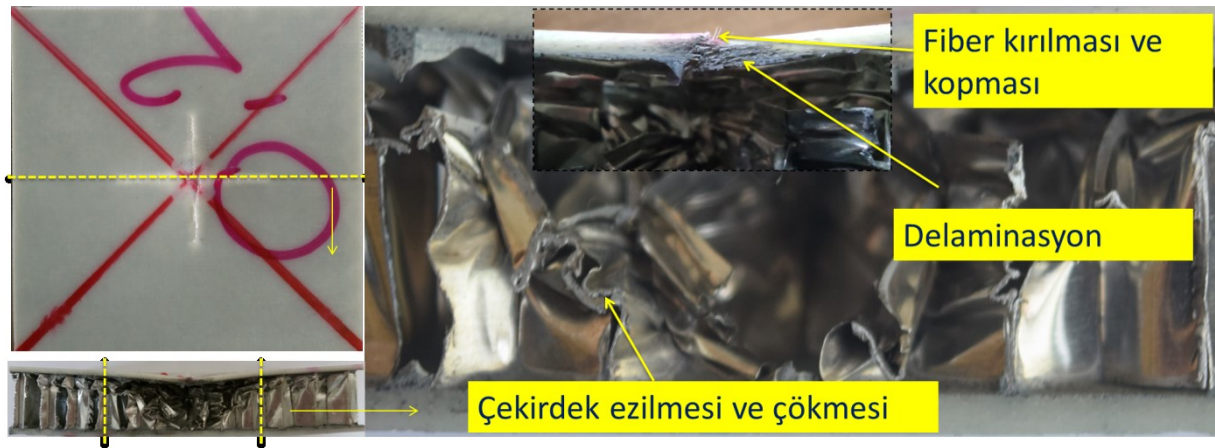
Saf ve ÇCKNT ile takviye edilmiş sandviç panel numunelerin darbe yüzeyi ve hasar bölgesinin kesit görünüşleri Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. 50 J ilk enerji seviyesinde uygulanan düşük hızlı darbe testlerinden sonra, vurucunun kompozit üst yüzeye girinim yaptığını ve vurucunun altında kalıcı hasarın oluştuğu görülebilmektedir. Buna ek olarak CFTK üst yüzeyde delaminasyon, fiber kırılma ve fiber kopmaları ortaya çıkmıştır. 8,66 mm hücre çapına sahip bal peteği çekirdek yapıda çökme, ezilme ve burkulma gözlenmiştir. Saf ve %0,2 ÇCKNT katkılı numunelerde üst kompozit yüzey ve altıgen çekirdek yapıda hasar alanında delaminasyon ve fiber kırılmalarıyla birlikte daha yoğun hasar göze çarpmaktadır. Yük-zaman grafiklerinden de anlaşıldığı üzere darbe süresinin uzaması girinim ve sehimi artırarak daha fazla hasar oluşmasına neden olmuştur. Şekil 8'de %0,1 ÇCKNT katkılı numunede hasarın daha az olduğu görülmektedir. %0,1 ÇCKNT ilavesinin darbe bölgesinde daha fazla yapıştırıcı yüzey alanı [10] ve bununla birlikte daha fazla hücre yoğunluğu [36] sağladığını ve bu yolla darbe direncini iyileştirdiği söylenebilir. Aynı zamanda poliüretan yapıştırıcıya %0,1 ÇCKNT ilavesinin sandviç panelin yapısal bütünlüğünü ve rijitliğini artırma konusunda etkili olduğu söylenebilir. Fakat %0,1'den daha fazla ÇCKNT ilavesinin %0,2 ÇCKNT'li numunelerde olduğu gibi saf numuneye kıyasla maksimum darbe kuvveti değerini düşürebileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Saf yapıştırıcılı numunenin üst yüzey ve kesit görüntüleri



Şekil 9. %0,1 ÇCKNT katkılı numunenin üst yüzey ve kesit görüntüleri



Şekil 10. %0,2 ÇCKNT katkılı numunenin üst yüzey ve kesit görüntüleri

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışma kapsamında cam fiber takviyeli kompozit yüzeye ve alüminyum çekirdeğe sahip sandviç paneller; üç farklı yapıştırıcı (saf, %0,1 ÇCKNT ve %0,2 ÇCKNT katkılı) ve 8,86 mm hücre çapında çekirdek kullanarak üretildi. Sandviç yapılar ASTM 7136 standardına göre tasarlanmış bir test

düzeninde 50 J ilk enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulandı. Numuneler yük-zaman, yük-sehim ve enerji-zaman davranışları açısından analiz edildi. Sandviç panellerin deformasyon ve hasar özelliklerini incelemek için optik görüntülerden faydalanıldı. Yapılan deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

1. Yük-zaman, yük-sehim ve enerji-zaman grafikleri düşük hızlı darbe sonucu oluşan hasarın değerlendirilmesi için yeterli veri sağlamıştır. %0,1 ÇCKNT takviyeli sandviç panellerde saf poliüretan yapıştırıcı kullanılarak üretilmiş olanlara göre yaklaşık %3 oranda daha yüksek maksimum temas kuvvetleri ortaya çıkmıştır.

2. Hasar analizleri, ÇCKNT ile takviye edilmiş poliüretan yapıştırıcı numunelerde saf numunelere göre hasar alanının daha dar olduğunu göstermiştir. 50 J enerji seviyesinde uygulanan darbe testleri sonrası numunelerde belirgin bir hasar oluşmuştur. Yüksek ağırlıklı vurucu nedeniyle absorbe edilen enerji değerleri bütün numuneler için birbirine yakın olarak tespit edilmiştir.

3. Darbe testi uygulanmış numunelerin üst yüzey ve kesitlerinin incelenmesi sonucunda CFTK'de fiber kırılması ve kopması, bal peteği çekirdekte ezilme ve çökme gözlemlenmiştir. ÇCKNT katkısının poliüretan yapıştırıcılarda hücre yoğunluğu artırmış buda sandviç panellerin darbe mukavemetinde artışla sonuçlanmıştır.

4. Cam fiber takviyeli kompozit yüzey alüminyum bal peteği çekirdeğe sahip sandviç panellerin düşük hızlı darbe performansı %0,1 ÇCKNT takviyesi ile artırılabilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Atık cam fiber prepreg kumaşların hibesi konusundaki desteği için Kordsa A.Ş.'ye teşekkür ederim. Bununla birlikte, bal peteği yapıların temini ve sandviç panellerin üretimindeki destekleri için Altıgen Uzay Havacılık Gemi İnş. Panel Ve San. Tic. Ltd. Şti.'ye şükranlarımı sunarım. Ayrıca laboratuvar imkânlarını kullanmama izin verdiği için Prof. Dr. Mesut Uyaner'e teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M.O. Kaman, M.Y. Solmaz, K. Turan, Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels, *J. Compos. Mater.* 44 (2010) 2819–2831. <https://doi.org/10.1177/0021998310371541>.
- [2] M. Aslan, O. Güler, Ü. Alver, The Investigation of the Mechanical Properties of Sandwich Panel Composites with Different Surface and Core Materials, *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.* 24 (2018) 1062–1068. <https://doi.org/10.5505/pajes.2018.37605>.
- [3] A. GÜNÖZ, Y. KEPİR, M. KARA, the Investigation of Hardness Properties of Gfrp Composite Pipes Under Seawater Conditions, *Turkish J. Eng.* 6 (2020) 34–39. <https://doi.org/10.31127/tuje.775536>.
- [4] Y. KEPİR, A. GÜNÖZ, M. KARA, Repairing of damaged composite materials and self-healing composites, *Turkish J. Eng.* 6 (2021) 149–155. <https://doi.org/10.31127/tuje.866955>.
- [5] V. Birman, G.A. Kardomateas, Review of current trends in research and applications of sandwich structures, *Compos. Part B Eng.* 142 (2018) 221–240. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>.
- [6] G.B. Chai, S. Zhu, A review of low-velocity impact on sandwich structures, in: *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 2011: pp. 207–230. <https://doi.org/10.1177/1464420711409985>.
- [7] T. TOPKAYA, Cıvata ile Birleştirilmiş Sandviç Kompozitlerin Bağlantı Mukavemetinin Karbon Fiber Takviye Kullanılarak Arttırılması, *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.* 8 (2020) 996–1004. <https://doi.org/10.29109/gujsc.804147>.
- [8] S. Georgiadis, A.J. Gunnion, R.S. Thomson, B.K. Cartwright, Bird-strike simulation for certification of the Boeing 787 composite moveable trailing edge, *Compos. Struct.* 86 (2008) 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.025>.
- [9] C. Caglayan, I. Osken, A. Ataalp, H.S. Turkmen, H. Cebeci, Impact response of shear thickening

- fluid filled polyurethane foam core sandwich composites, *Compos. Struct.* 243 (2020) 112171. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112171>.
- [10] L. Uğur, H. Duzcukoglu, O.S. Sahin, H. Akkuş, Investigation of impact force on aluminium honeycomb structures by finite element analysis, *J. Sandw. Struct. Mater.* 22 (2020) 87–103. <https://doi.org/10.1177/1099636217733235>.
- [11] X. Zhang, F. Xu, Y. Zang, W. Feng, Experimental and numerical investigation on damage behavior of honeycomb sandwich panel subjected to low-velocity impact, *Compos. Struct.* 236 (2020) 111882. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111882>.
- [12] X. Wu, H. Yu, L. Guo, L. Zhang, X. Sun, Z. Chai, Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure, *Compos. Struct.* 213 (2019) 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.081>.
- [13] M. Shifa, F. Tariq, A.D. Chandio, Mechanical and electrical properties of hybrid honeycomb sandwich structure for spacecraft structural applications, *J. Sandw. Struct. Mater.* (2019). <https://doi.org/10.1177/1099636219830783>.
- [14] J. Wang, C. Shi, N. Yang, H. Sun, Y. Liu, B. Song, Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body, *Compos. Struct.* 184 (2018) 1189–1196. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.038>.
- [15] K. Mehar, S.K. Panda, A. Dehengia, V.R. Kar, Vibration analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composite plate in thermal environment, *J. Sandw. Struct. Mater.* 18 (2016) 151–173. <https://doi.org/10.1177/1099636215613324>.
- [16] S. Belouettar, A. Abbadi, Z. Azari, R. Belouettar, P. Freres, Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests, *Compos. Struct.* 87 (2009) 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.01.015>.
- [17] M. Sadeghi, M.H. Pol, Investigation of behaviors of glass/epoxy laminate composites reinforced with carbon nanotubes under quasi-static punch shear loading, *J. Sandw. Struct. Mater.* 21 (2019) 1535–1556. <https://doi.org/10.1177/1099636217719223>.
- [18] A.S. Sayyad, Y.M. Ghugal, Bending, buckling and free vibration of laminated composite and sandwich beams: A critical review of literature, *Compos. Struct.* 171 (2017) 486–504. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.053>.
- [19] E. Burgaz, C. Kendirlioglu, Thermomechanical behavior and thermal stability of polyurethane rigid nanocomposite foams containing binary nanoparticle mixtures, *Polym. Test.* 77 (2019) 105930. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105930>.
- [20] E. Burgaz, *Polyurethane Insulation Foams for Energy and Sustainability*, 2019.
- [21] G. Otorugust, H. Dodiuk, S. Kenig, R. Tenne, Important insights into polyurethane nanocomposite-adhesives; a comparative study between INT-WS2 and CNT, *Eur. Polym. J.* 89 (2017) 281–300. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.02.027>.
- [22] A. Gunoz, Y. Kepir, M. Kara, Tensile Strength Alteration of GFRP Composite Pipes Under Seawater-Dominated Conditions, *J. Fail. Anal. Prev.* 20 (2020) 1426–1430. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00962-2>.
- [23] G. Zhou, M.D. Hill, Impact damage and energy-absorbing characteristics and residual in-plane compressive strength of honeycomb sandwich panels, *J. Sandw. Struct. Mater.* 11 (2009) 329–356. <https://doi.org/10.1177/1099636209105704>.
- [24] Y.M. Jen, L.Y. Chang, Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams, *Eng. Fail. Anal.* 16 (2009) 1282–1293. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.004>.
- [25] Y.M. Jen, C.W. Ko, H. Bin Lin, Effect of the amount of adhesive on the bending fatigue strength of adhesively bonded aluminum honeycomb sandwich beams, *Int. J. Fatigue.* 31 (2009) 455–462. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.07.008>.
- [26] A. Kaboorani, B. Riedl, Nano-aluminum oxide as a reinforcing material for thermoplastic adhesives, *J. Ind. Eng. Chem.* 18 (2012) 1076–1081. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.12.001>.

- [27] H. Akkus, H. Duzcukoglu, O.S. Sahin, Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with epoxy-based adhesives reinforced with nanoparticles, *J. Mech. Sci. Technol.* 31 (2017) 165–170. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1216-0>.
- [28] G. Otorogust, H. Dodiuk, S. Kenig, R. Tenne, Important insights into polyurethane nanocomposite-adhesives; a comparative study between INT-WS2 and CNT, *Eur. Polym. J.* 89 (2017) 281–300. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.02.027>.
- [29] A. Tounici, J.M. Martín-Martínez, Addition of small amounts of graphene oxide in the polyol during the synthesis of waterborne polyurethane urea adhesives for improving their adhesion properties, *Int. J. Adhes. Adhes.* 104 (2021) 102725. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102725>.
- [30] A. Gunoz, Y. Kepir, M. Kara, Effect of hydrothermal aging on the mechanical properties of nanocomposite pipes, *Mater. Test.* 63 (2021) 253–258. <https://doi.org/10.1515/mt-2020-0037>.
- [31] H. Sepetcioglu, A. Gunoz, M. Kara, Effect of hydrothermal ageing on the mechanical behaviour of graphene nanoplatelets reinforced basalt fibre epoxy composite pipes, *Polym. Polym. Compos.* (2021). <https://doi.org/10.1177/0967391121992939>.
- [32] M.E. Kabir, M.C. Saha, S. Jeelani, Effect of ultrasound sonication in carbon nanofibers/polyurethane foam composite, *Mater. Sci. Eng. A.* 459 (2007) 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.031>.
- [33] M.C. Saha, M.E. Kabir, S. Jeelani, Enhancement in thermal and mechanical properties of polyurethane foam infused with nanoparticles, *Mater. Sci. Eng. A.* 479 (2008) 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.06.060>.
- [34] M. Uyaner, M. Kara, Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact, *J. Compos. Mater.* 41 (2007) 2877–2896. <https://doi.org/10.1177/0021998307079971>.
- [35] A.A. Mohammed, M. V. Hosur, S. Jeelani, Processing and characterization of nanophased polyurethane foams, *Cell. Polym.* 25 (2006) 293–306. <https://doi.org/10.1177/026248930602500602>.
- [36] M.A. Bhuiyan, M.V. Hosur, S. Jeelani, Low-velocity impact response of sandwich composites with nanophased foam core and biaxial braided face sheets, *Compos. Part B Eng.* 40 (2009) 561–571. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.03.010>.

# Environmental and Financial Analysis of Solar Swimming Pool Heating System for 3 Different Regions of Turkey Using RETScreen Clean Energy Management Software

Kerim MARTİN\* 

Kahramanmaraş İstiklal University, Faculty of Elbistan Engineering, Department of Energy Systems Engineering, Kahramanmaraş/Turkey

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article

Received: 13/08/2021

Revision: 30/08/2021

Accepted: 01/09/2021

### Highlights

- Thermal application of solar energy
- Feasibility analysis

### Keywords

Retscreen  
Solar energy  
Swimming pool heating system

In this study, solar heating proses of a semi-Olympic swimming pool was analyzed by using RETScreen program.

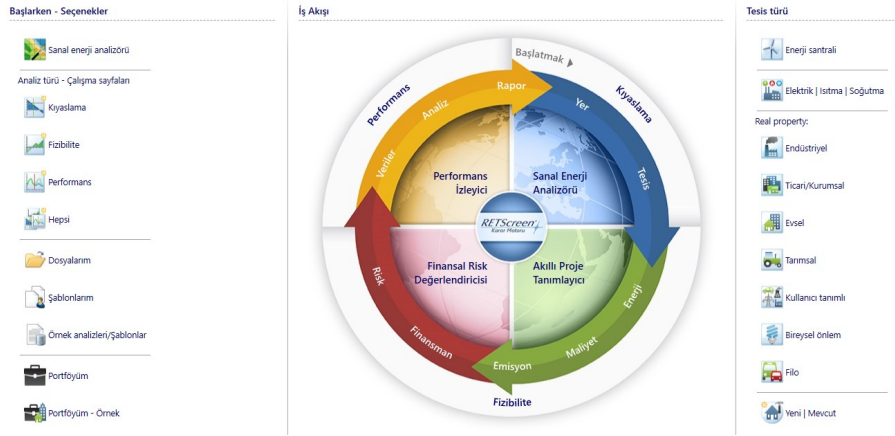


Figure A. Retscreen energy analysis program interface

**Purpose:** Solar energy is among in the most important renewable energy sources that our country has. It is a critical point that solar energy usage both PV systems and thermal applications must be increased. There are some analysis programs used to identify the potential of solar energy. One of these program is RETScreen. In this study, it is aimed to see if a swimming pool can be heated by solar energy for different regions of Turkey.

**Theory and Methods:** Energy analysis was performed by RETScreen program. The swimming pool, which is planned to be heated, is in semi-Olympic standards, with a relative humidity of 70 % and air velocity of 0.1 m/s. Selected provinces are Ankara, Antalya and Erzurum. The project has 25 years lifetime and the inflation rate is 7%.

**Results:** According to the results obtained, it has been observed that if such a system is established in Ankara, Antalya and Erzurum, natural gas savings of 9505 m<sup>3</sup>, 9701 m<sup>3</sup> and 7570 m<sup>3</sup> will be achieved, respectively. It has been observed that the annual greenhouse gas emissions can be reduced by 85% in Ankara, 88% in Antalya and 66% in Erzurum thanks to the project. In addition, the payback periods of the system were 8.8 years, 6.8 years and 12.1 years for Ankara, Antalya and Erzurum, respectively.

**Conclusion:** In this study, the feasibility of the pool water heating project designed with the Retscreen program for the pools in the standards of a semi-olympic pool in the provinces of Ankara, Antalya and Erzurum has been made. According to the feasibility results, it has been revealed that solar energy can be used for pool water heating in selected provinces representing the southern, inner and eastern regions of our country.





## Environmental and Financial Analysis of Solar Swimming Pool Heating System for 3 Different Regions of Turkey Using RETScreen Clean Energy Management Software

Kerim MARTİN\*

Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Mühendislik Fakültesi, Enerji sistemleri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye

### Abstract

Solar energy is one of the renewable energy sources that our country has. In this study, the analysis of the solar pool water-heating project that can be established in three different provinces of our country was made using the Retscreen program. The swimming pool, which is planned to be heated, is in semi-Olympic standards, with a relative humidity of 70 % and air velocity of 0.1 m/s. The selected provinces are Ankara, Antalya and Erzurum. In the calculations, it is assumed that naturel gas price is 0.271\$/m<sup>3</sup> and electricity price is 0.05\$/kWh. It is also taken into account that the project has 25 years lifetime and the inflation rate is 7%. According to the results obtained, it has been observed that if such a system is established in Ankara, Antalya and Erzurum, natural gas savings of 9505 m<sup>3</sup>, 9701 m<sup>3</sup> and 7570 m<sup>3</sup> will be achieved, respectively. It has been observed that the annual greenhouse gas emissions can be reduced by 85% in Ankara, 88% in Antalya and 66% in Erzurum thanks to the project. In addition, the payback periods of the system were 8.8 years, 6.8 years and 12.1 years for Ankara, Antalya and Erzurum, respectively.

### RETScreen Temiz Enerji Yönetim Yazılımı Kullanarak Türkiye'nin 3 Farklı Bölgesi İçin Güneş Enerjili Yüzme Havuzu Isıtma Sisteminin Çevresel ve Mali Analizi

#### Öz

Güneş enerjisi ülkemizin sahip olduğu yenilenebilir enerji kaynaklarının başında yer almaktadır. Bu çalışmada ülkemizin 3 farklı ilinde kurulabilecek güneş enerjili havuz suyu ısıtma projesinin analizi Retscreen programı kullanılarak yapılmıştır. Isıtılması planlanan havuz yarı olimpik standartlarda (25mx12.5mx2m) olup içerdeki bağıl nem %70 ve hava hızı 0.1 m/s olarak düşünülmüştür. Seçilen iller Ankara, Antalya ve Erzurum'dur. Hesaplamalarda doğalgazın m<sup>3</sup> fiyatının 0.271 \$, elektriğin kWh fiyatının ise 0.05 \$ olduğu varsayılmıştır. Ayrıca proje ömrünün 25 yıl ve enflasyon oranının %7 olduğu dikkate alınmıştır. Bu koşullarda elde edilen sonuçlara göre bu sistemin Ankara, Antalya ve Erzurum'da kurulması durumunda sırasıyla 9505 m<sup>3</sup>, 9701 m<sup>3</sup> ve 7570 m<sup>3</sup> doğal gaz tasarrufu sağlayacağı gözlemlenmiştir. Proje ile yıllık sera gazı salınımlarında mevcut duruma göre Ankara'da % 85, Antalya'da %88 ve Erzurum'da % 66 oranlarında azaltım sağlanabileceği öngörülmüştür. Ayrıca sistemin geri ödeme süreleri Ankara, Antalya ve Erzurum için sırasıyla 8.8 yıl, 6.8 yıl ve 12.1 yıl olarak hesaplanmıştır.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 13/08/2021  
Düzeltilme: 30/08/2021  
Kabul: 01/09/2021

#### Keywords

Retscreen  
Solar energy  
Swimming pool heating system

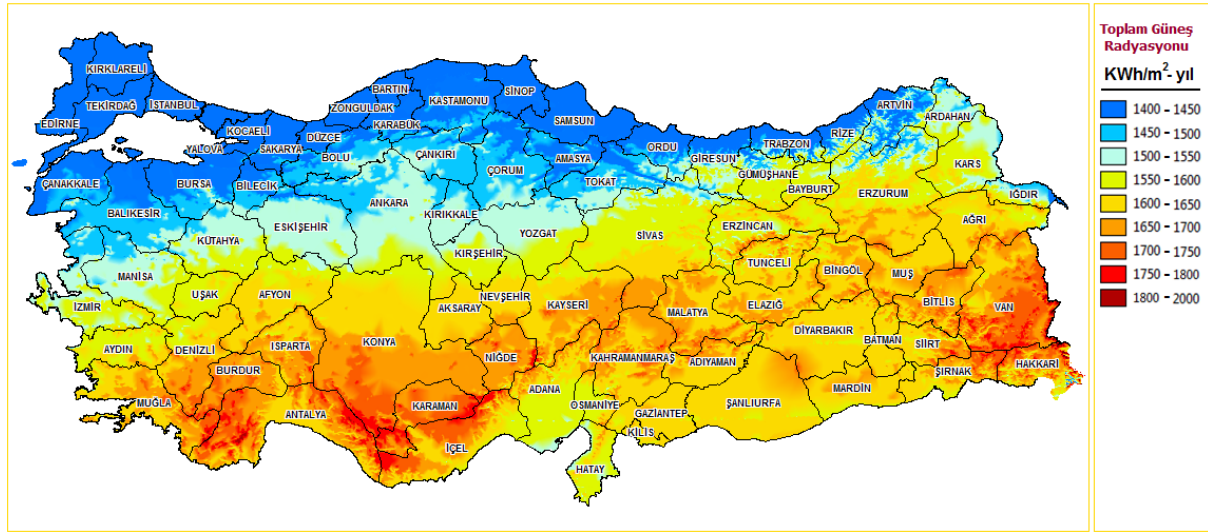
#### Anahtar Kelimeler

Retscreen  
Güneş Enerjisi  
Havuz suyu ısıtma sistemi

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fosil yakıt kullanımından kaynaklanan çevre kirliliği ve küresel ısınma problemleri son yıllarda artış göstermektedir [1]. Bu artışın önüne geçebilmek için fosil kökenli yakıtlardan vazgeçerek onlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmalıdır. Dünyadaki en büyük enerji kaynağı olan güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir.

Ülkemiz coğrafi konumu itibariyle güneş enerjisi potansiyeli bakımından oldukça avantajlı durumdadır. (Şekil 1) Sahip olduğumuz bu enerji kaynağının kullanımının ülke genelinde yaygınlaştırılması gerekmektedir. Güneş enerjisinden yararlanma yöntemlerinden fotovoltaik sistemler (PV) üzerine [3],[4],[5][6] ve termal güneş enerjisi sistemleri üzerine [7],[8],[9] literatürde çok sayıda çalışma yer almaktadır.



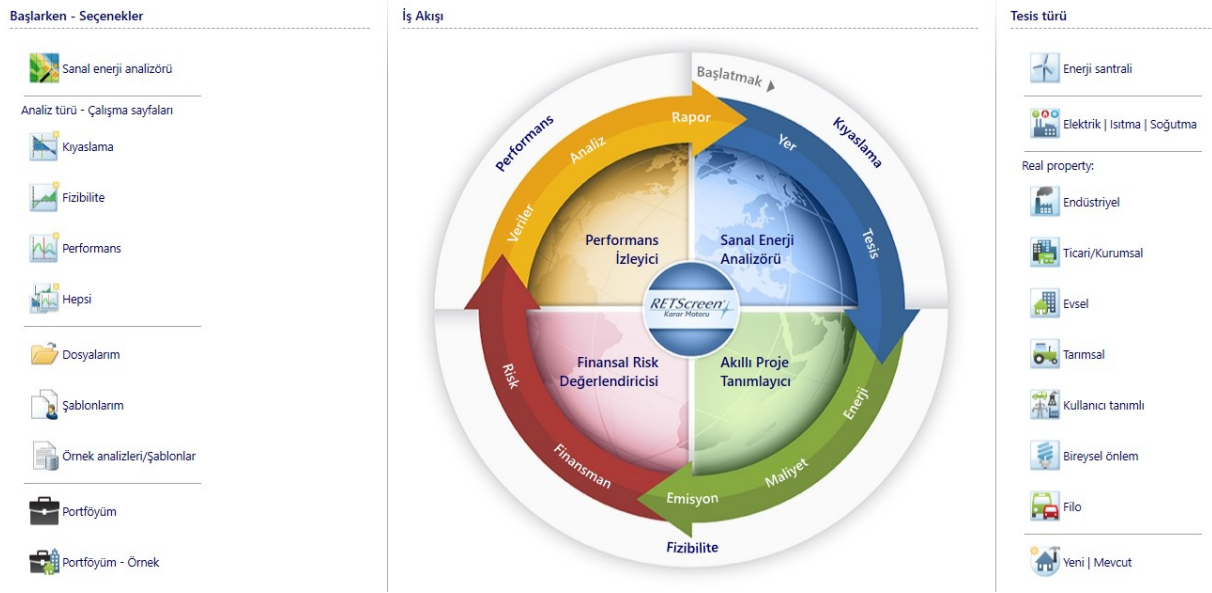
Şekil 1: Türkiye güneş enerjisi potansiyeli haritası [2]

Kurulacak olan bir güneş enerjisi sisteminin ön değerlendirmesi, geliştirilen çeşitli simülasyon programlarıyla hızlıca ve her hangi bir maliyet olmaksızın yapılabilen ve gerçeğe yakın sonuçlar alınabilmektedir. Bu programlardan biri de Retscreen enerji analiz programıdır. Bu çalışmada Türkiye'nin 3 farklı bölgesinde kurulabilecek bir güneş enerjisi destekli havuz suyu ısıtma projesinin analizi Retscreen programı ile yapılmıştır.

## 2.MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1.Retscreen Temiz Enerji Yönetim Yazılımı (Retscreen Clean Energy Management Software)

Retscreen enerji analiz programı Kanada Hükümeti tarafından sunulan, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve kojenerasyon sistemlerinin fizibilitesinin yapılabilmesine olanak sağlayan bir temiz enerji yönetim yazılımıdır. Retscreen Expert sürümü görüntüleme modunda ücretsiz olarak kullanıma sunulmaktadır [10]. Program dünyada sıklıkla tercih edilen simülasyon programlarından biridir. Bilgisayar ortamında yapılan fizibilite ile hem zaman açısından hem de mali açılarından kullanıcılara önemli avantajlar sağlamaktadır. Retscreen programı, analizi yapılacak olan projenin konum bilgilerinin girilmesine olanak sağlamayarak NASA'dan aldığı verileri kullanmaktadır [11]. Bu sayede gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Programın Türkçe ara yüzü de mevcut olup şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2: Retscreen enerji analiz programı ara yüzü

## 2.2. Analiz Yapılacak Olan İllerin Belirlenmesi (Determining the Provinces to be Analyzed)

Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli bakımından oldukça avantajlı bir konuma sahiptir. Coğrafi bölgelere göre yıllık sıcaklık ve güneşlenme miktarları değişiklik göstermektedir. Farklı bölgelerde kurulacak olan termal güneş kolektörü sistemlerinin çevresel ve mali açıdan analiz edilebilmesi için Antalya, Ankara ve Erzurum örnek iller olarak seçilmiştir. Bu iller için yıllık ortalama sıcaklık değerleri sırasıyla 18.4 °C, 11.4 °C ve 4.7 °C 'dir. Seçilen illerin aylara göre yıllık sıcaklık ve güneş radyasyonu değerleri Şekil 3'te verilmiştir.

## 2.3. Kurulacak Olan Isıtma Sisteminin Parametreleri (Parameters of the Heating System to be Installed)

### Havuz özellikleri (Pool properties)

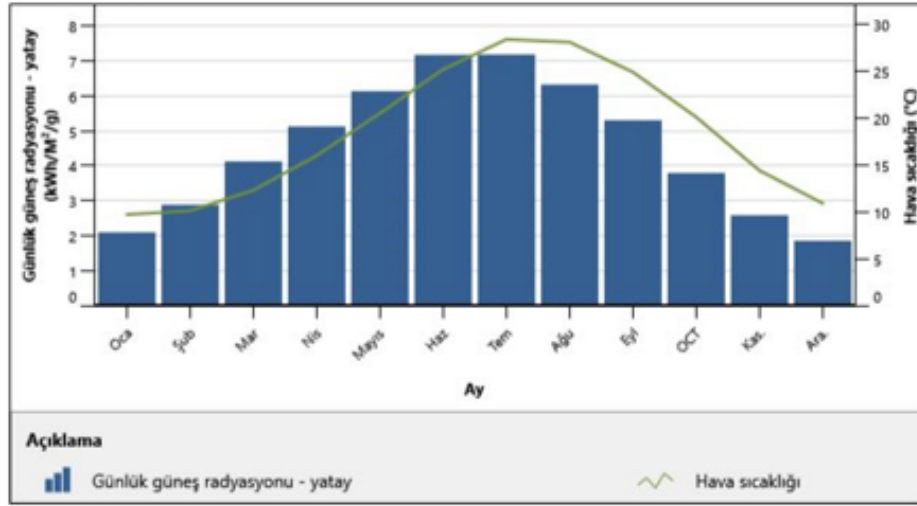
Güneş enerjisiyle ısıtılması planlanan havuz, yarı olimpik kapalı bir yüzme havuzu olarak düşünülmüş ve ebatları 25 m uzunluk, 12.5 m genişlik ve 2 m derinlik olarak dikkate alınmıştır. İçerdiği bağlı nemin %70 ve hava hızının 0.1 m/s olduğu varsayılmıştır. Havuzun nisan ayında %50 kapasite ile mayıs-eylül ayları arasında ise %100 kapasiteyle ısıtılması planlanmıştır. Ayrıca havuzun mevcut ısıtma sisteminin doğal gaz olduğu varsayımı ile kıyaslama yapılmıştır.

### Kolektör özellikleri (Collector properties)

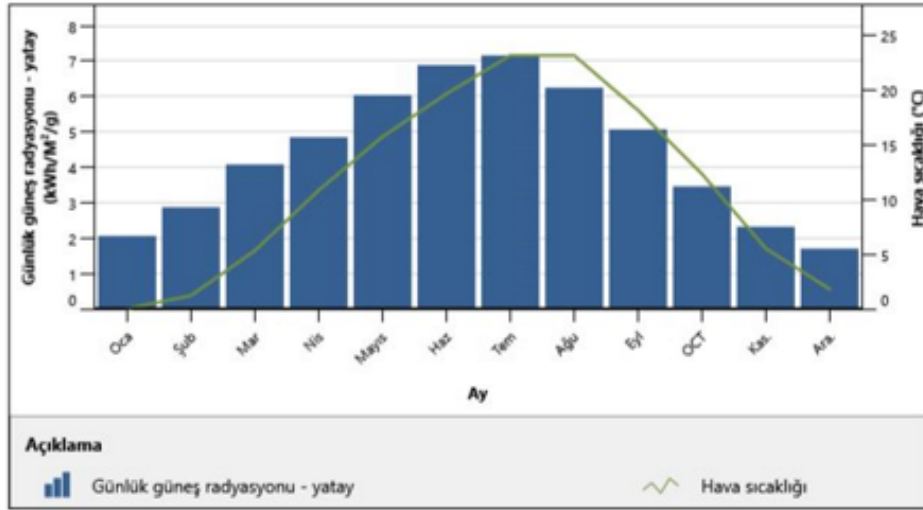
Kullanılan güneş kolektörleri Retscreen veri tabanından seçilmiş ve özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sistemin kurulacağı yere göre kolektör sayısı ve işletme-bakım giderleri değişiklik göstermektedir.

Tablo 1: Güneş kolektörü özellikleri

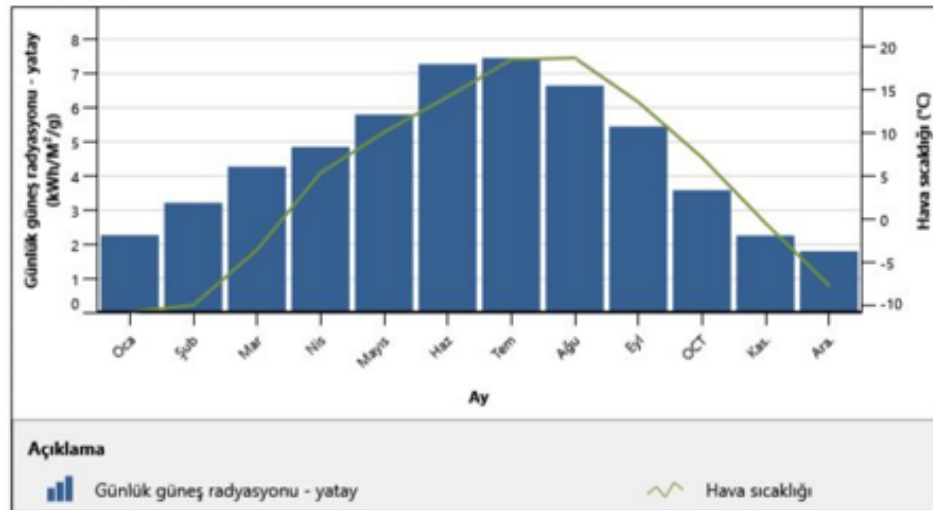
Güneş izleme sistemi	Yok
Tip	Sırsız
Açıklık alanı (m <sup>2</sup> )	2.266
Çeşitli kayıplar (%)	1
Isı değiştirici	Yok
Pompa gücü/Kolektör alanı (W/m <sup>2</sup> )	5



a)



b)



c)

Şekil 3: Seçilen illerin aylara göre sıcaklık ve güneş radyasyonu dağılımları a)Antalya, b)Ankara, c)Erzurum

## 2.4. Analiz Yöntemi (Analysis Method)

Belirlenen bölgelerde mevcut durumda havuz ısıtması için doğal gaz kullanıldığı ve m<sup>3</sup> fiyatının 0.271 dolar olduğu dikkate alınarak sistemin enerji ve mali analizi yapılmıştır. Ayrıca elektrik fiyatının 0.05 \$/kWh olduğu varsayılmıştır. Tüm hesaplamalarda enflasyon oranı %7 olarak hesaba katılmış ve proje ömrü 25 yıl olarak seçilmiştir. Ayrıca herhangi bir teşvik ve hibe programından yararlanılmadığı göz önüne alınmıştır.

## 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerini temsilen seçilen 3 il için, standart büyüklükte bir yüzme havuzunun güneş enerjisi yardımı ile ısıtılmasının fizibilite çalışması yapılmıştır. Eşit büyüklükteki bir havuzun ısıtılması için, güneşlenme ve iklim koşullarının farklılığından kaynaklı olarak, ihtiyaç duyulan kolektör sayıları farklılık göstermiştir. Retscreen programının önerdiği kolektör sayıları Ankara, Antalya ve Erzurum için sırasıyla 100, 70 ve 130 adet olmuştur. Buna bağlı olarak işletme bakım maliyetleri aynı sıra ile yıllık 120 \$, 90 \$ ve 150 \$ olarak belirlenmiştir.

Sonuçlar, her il için, enerji ve yakıt tasarrufu, sera gazı azaltım miktarı ve sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmiştir. Değerlendirme yapılırken mevcut durum ve önerilen durum karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

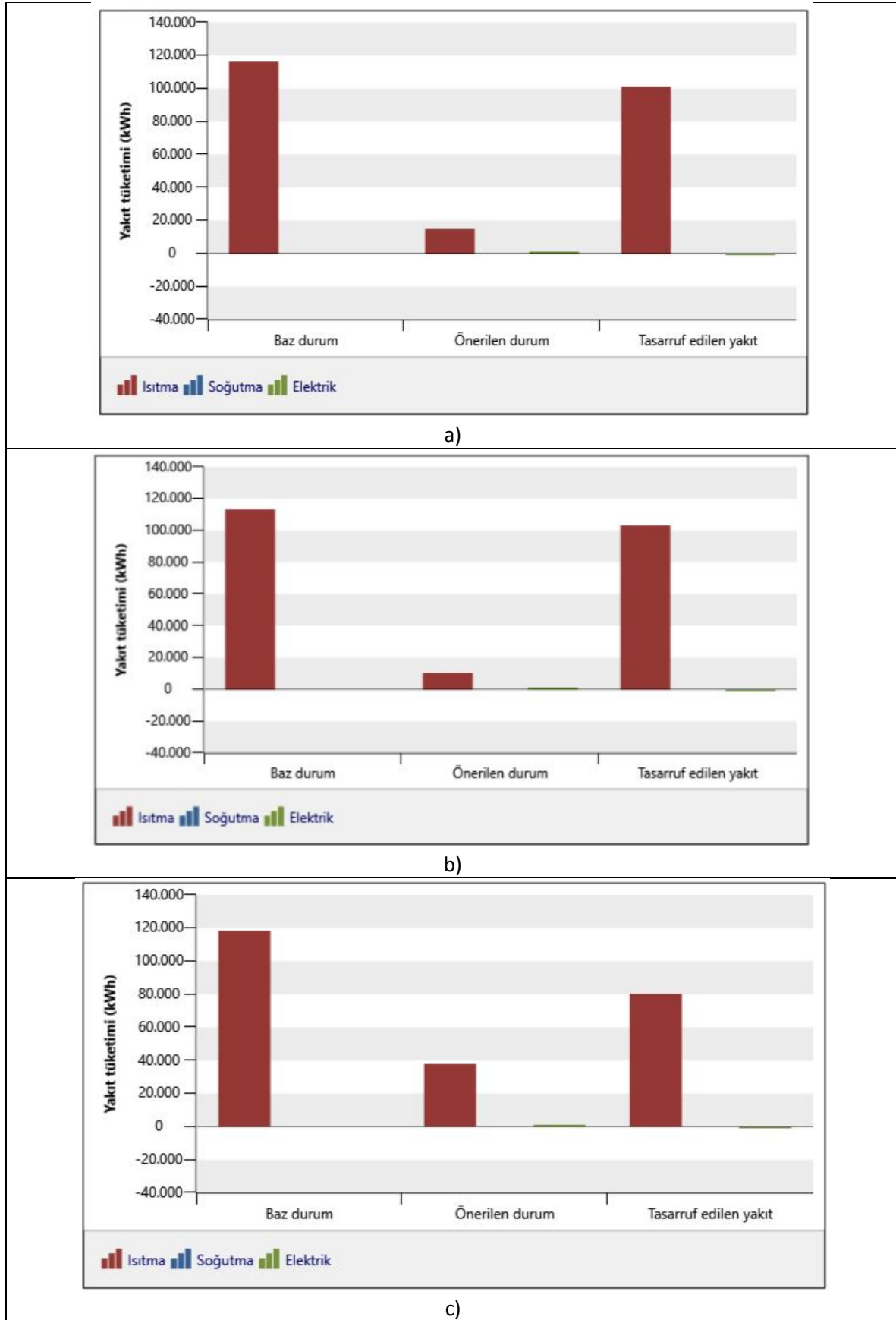
### 3.1. Enerji ve Yakıt Tasarrufu (Energy and Fuel Savings)

Tablo 2 belirlen illerde eşit büyüklükteki bir havuz ısıtması için mevcut durumda ve önerilen durumda tüketilen yakıt miktarlarını göstermektedir. Tablodan açıkça görülebileceği gibi önerilen durumda doğal gaz kullanımı mevcut duruma göre oldukça az miktardadır. Burada önerilen durumdaki elektrik tüketimi havuz suyunun sirkülasyonunu sağlayan pompadan kaynaklanmaktadır. Mevcut durumda harici bir pompa gereksinimi olmadığı için elektrik kullanımının olmadığı varsayılmıştır.

*Tablo 2: Yıllık tüketilen yakıt miktarları*

İl	Yakıt Türü	Birim	Yakıt Tüketimi (mevcut durum)	Yakıt Tüketimi (önerilen durum)	Tasarruf Miktarı
Ankara	D. Gaz	m <sup>3</sup>	10915	1410	9505
	Elektrik	kWh	0	992	-992
Antalya	D. Gaz	m <sup>3</sup>	10695	994	9701
	Elektrik	kWh	0	1007	-1007
Erzurum	D. Gaz	m <sup>3</sup>	11130	3560	7570
	Elektrik	kWh	0	817	-817

Şekil 4'deki grafikler mevcut ve önerilen durumlarda sırasıyla Ankara, Antalya ve Erzurum için yıllık enerji kullanım miktarlarını göstermektedir. Grafikler incelendiğinde mevcut durumda ısıtma için tüketilen enerji miktarlarının Ankara için 116003 kWh, Antalya için 113665 kWh ve Erzurum için 118285 kWh olduğu görülür. Bu enerji tüketimleri birbirine yakın olsa da önerilen durumdaki enerji tüketimleri, illerin iklim şartlarına bağlı olarak farklılık göstermiştir. Elde edilen tasarruf miktarları Ankara, Antalya ve Erzurum için sırasıyla % 86.2, % 89.8 ve % 67.3 olarak gerçekleşmiştir. Doğal gaz ve elektrik fiyatları hesaba katılırsa yıllık tasarruf miktarları yine sırasıyla 2526 \$, 2579 \$ ve 2011 \$ olarak ortaya çıkmaktadır. Bu rakamlar dikkate alındığında önerilen proje sayesinde ciddi anlamda bir tasarruf sağlanabileceği görülmektedir.



Şekil 4: Mevcut ve önerilen durumlardaki yakıt (enerji) tüketim miktarları a) Ankara, b) Antalya, c) Erzurum

### 3.2. Sera Gazı Azaltımı (Greenhouse Gas Reduction)

Artan sera gazı salınımı çevresel açıdan oldukça ciddi bir problemdir. Sera gazlarının atmosferde birikmesi küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin en önemli sebeplerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Önerilen projede sera gazı salınım miktarının azaltılabileceği öngörülmüştür. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ten görüleceği gibi önerilen durumda havuz ısıtmasında doğal gaz yerine güneş enerjisi kullanılarak Ankara, Antalya ve Erzurum için sırasıyla % 85, % 88 ve % 66 oranında sera gazı azaltımı sağlanabileceği görülmüştür. Yapılan bu azaltım miktarları Ankara, Antalya ve Erzurum için sırasıyla 7600 L, 7750 L ve 6000 L benzinin kullanılmaması anlamına gelmektedir.

*Tablo 3: Sera gazı azaltım oranları*

İl	Sera Gazı Salınımı (tCO <sub>2</sub> )		% Azaltım
	Mevcut Durum	Önerilen Durum	
Ankara	Mevcut Durum	20.8	85
	Önerilen Durum	3.2	
Antalya	Mevcut Durum	20.4	88
	Önerilen Durum	2.4	
Erzurum	Mevcut Durum	21.2	66
	Önerilen Durum	7.2	

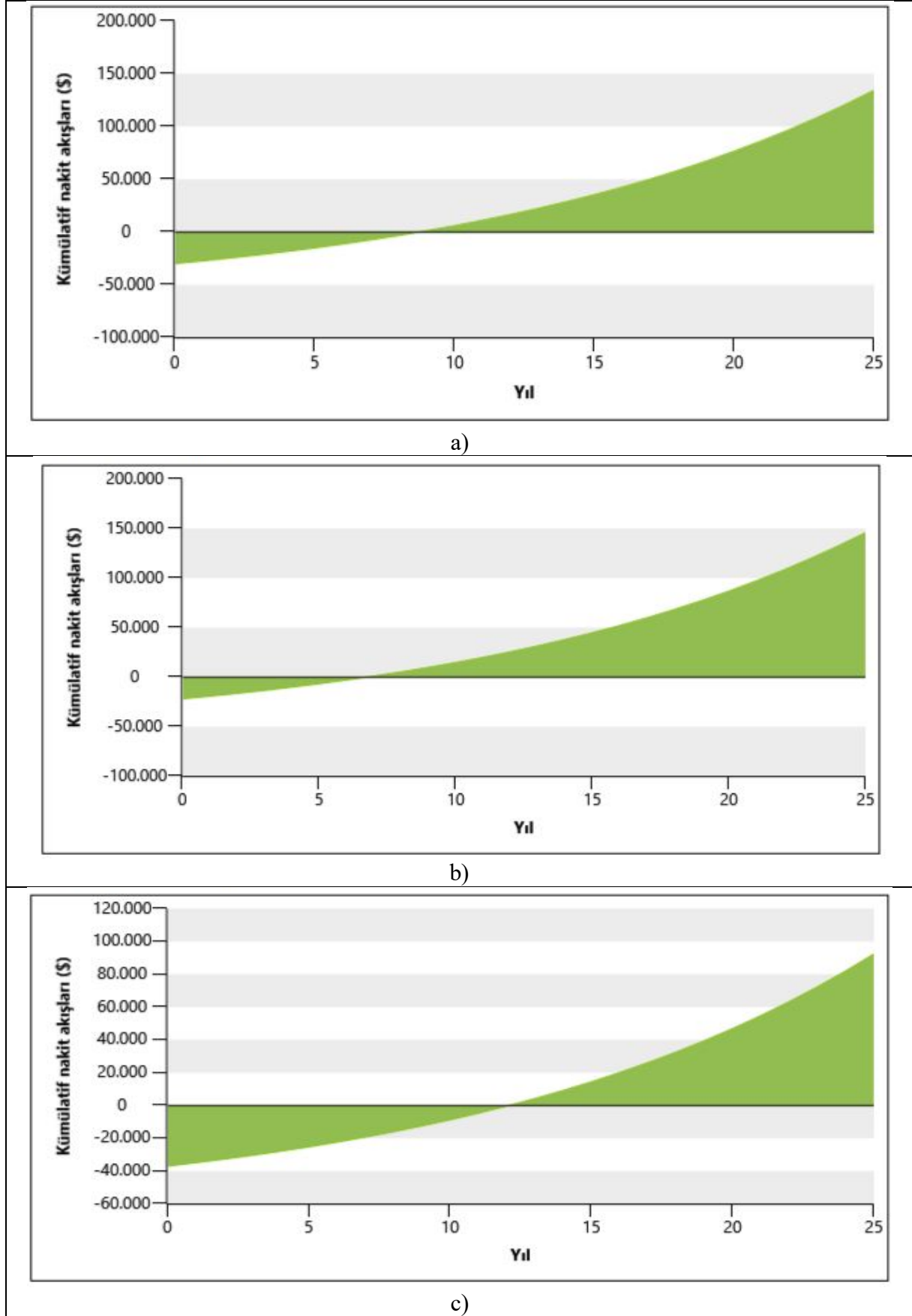
### 3.3. Sürdürülebilirlik (Sustainability)

Önerilen durum için, ilk yatırım maliyeti, yıllık işletme-bakım maliyeti ve yakıt maliyeti olmak üzere gider kalemleri ve yakıttan elde edilen tasarruftan elde edilen gelir kalemleri dikkate alınarak 3 il için basit geri ödeme zamanı ve öz sermaye geri ödeme zamanı hesaplanmıştır.

*Tablo 4: Önerilen durumun sürdürülebilirliği*

Maliyetler/Tasarruflar (\$)	İller		
	Ankara	Antalya	Erzurum
<b>İlk Yatırım Maliyeti</b>	30000	22000	37000
<b>Teşvik ve Hibe</b>	0	0	0
<b>İşletme-Bakım Maliyeti</b>	120	90	150
<b>Yıllık Yakıt Maliyeti</b>	432	320	1006
<b>Yıllık Yakıt Tasarrufu</b>	2958	2898	3016
<b>Yıllık Nakit Akışı</b>	2406	2488	1860
<b>Basit Geri Ödeme</b>	12,5	8,8	19,9
<b>Öz Sermaye Geri Ödeme</b>	<b>8,8</b>	<b>6,8</b>	<b>12,1</b>

Retscreen tarafından öngörülen basit geri ödeme zamanları Tablo 4'te görüldüğü gibi Ankara, Antalya ve Erzurum için sırasıyla 12.5 yıl, 8.8 yıl ve 19.9 yıl olmuştur. Öz sermaye geri ödemeleri ise yine aynı sırayla 8.8 yıl, 6.8 yıl ve 12.1 yıl olarak elde edilmiştir. Şekil 5'te yıllık kümülatif nakit akışları görülmektedir. Buradaki grafikler projenin sürdürülebilirliğinin göstergeleridir. Grafiklerden görüleceği gibi Ankara'da kurulacak bir güneş enerjili havuz suyu ısıtma projesi 12. yılın sonunda kümülatif olarak ilk yatırım maliyeti olan 30000 \$'dan fazla bir gelir seviyesine ulaşacaktır. Aynı durum Antalya için incelendiğinde ilk yatırım maliyetine ulaşma zamanının 11. yılın sonu olduğu görülmektedir. Erzurum'da ise 18. yılın sonunda ilk yatırım maliyeti olan 37000 \$'lık gelire ulaşabileceği belirlenmiştir.



Şekil 5: Yıllık kümülatif nakit akışları a) Ankara, b) Antalya, c) Erzurum



#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada Ankara, Antalya ve Erzurum illerinde yarı olimpik bir havuz standartlarındaki havuzlar için Retscreen programı ile tasarlanan havuz suyu ısıtma projesinin fizibilitesi yapılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar ve sonraki çalışmalar için yapılan öneriler aşağıda sıralanmıştır;

- Belirlenen illerde yarı olimpik bir yüzme havuzunun ısıtılması güneş enerjisiyle sağlanabilir.
- Böyle bir proje Ankara'da kurulması durumunda yılda 9505 m<sup>3</sup> doğal gaz tasarrufu sağlarken Antalya'da 9701 m<sup>3</sup> ve Erzurum'da ise 7570 m<sup>3</sup> doğal gaz tasarrufu sağlayacaktır. Doğal gazın m<sup>3</sup> fiyatının 0.271 \$ olduğu dikkate alınırsa Ankara, Antalya ve Erzurum için yıllık sırasıyla 2575 \$, 2628 \$ ve 2051 \$'lık doğal gaz tasarrufu sağlanmış olacaktır.
- Bu proje ile yıllık sera gazı salınımlarında mevcut duruma göre Ankara'da % 85, Antalya'da %88 ve Erzurum'da % 66 oranlarında azaltım sağlanabilecektir.
- Sistemin geri ödeme periyotları Ankara, Antalya ve Erzurum için sırasıyla 8.8 yıl, 6.8 yıl ve 12.1 yıl olarak ortaya çıkmıştır.
- Bu çalışma genişletilerek program verileri gerçek verilerle kıyaslanabilir.
- Önerilen durumun fizibilitesi ülkemizin farklı illeri için de yapılabilir. Fizibilite çalışmalarının çoğaltılması bu konuda yatırım yapmak isteyen işletmelere yol gösterme açısından faydalı olacaktır.
- Retscreen programının diğer uygulamaları üzerine çalışmalar yapılabilir.
- Retscreen programı ile diğer fizibilite programlarının kıyaslaması yapılabilir. Böylece hangi programın daha doğru sonuçlar verdiği ortaya koyulabilir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Kaya, A.F., Acır, A. ve Tanürün, H. E. (2021). Numerical investigation of radius dependent solidity effect on H-type vertical axis wind turbines. *Politeknik Dergisi*, \*(\*) : \*, (\*). Doi: 10.2339/politeknik.799767
- [2] Kaynar, N.K. (2020). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Güneş Enerjisinin Amasya İlindeki Potansiyeli. *Bilge Int. J. Sci. Technol. Res.* 4(2), 48–54.
- [3] Gündoğdu, K., Kabadayı, H. S. ve Öztürk, A. (2016). Fotovoltaik Paneller İçin Güneş Takip Edebilen Basit Ve Ekonomik Bir Sistem Tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.* 4(2), 634–639.
- [4] Sarı, V. ve Özyiğit, F. Y. (2020). Sivas İlinin Farklı İlçelerinde Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Santrallerinin Tasarımı ve Analizi. *Eur. J. Sci. Technol.*, 20, 425–437.
- [5] Sayın, S. ve Koç, İ. (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (Pv)Sistemler Ve Yapılarda Kullan Biçimleri. *Selçuk Univ. J. Eng. , Sci. Technol.*, 26(3), 89–106.
- [6] Topuz, A., Erdoğan, B. ve Taşkaya, G. (2017). Fotovoltaik Etki ile Çalışan Güneş Enerjili Sulama Sisteminin Modellenmesi. *Karaelmas Fen ve Müh. Derg.* 7(2), 356–363.
- [7] Koçak, B. ve Paksoy, H. (2020). Endüstriyel Uygulamalarda Güneş Enerjisinden Termal Olarak Yararlanma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, 35(September), 769–782.
- [8] Özsoy, A. ve Galip, M. (2018). Vakum Tüplü U-Borulu Güneş Kollektörünün Güneş Simülatöründeki Test Sonuçlarının Analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 229-236.
- [9] Özsoy, A. (2015). Güneş Enerjisinin Isıtma Amaçlı Mevsimlik Depolanması ve Isı Pompası Destekli Kullanımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Dergisi*, 19(2), 54–59.

- [10] İnternet: Government of Canada, 'RETScreen Clean Energy Management Software, <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>, Son Erişim Tarihi: 14.03.2021
- [11] Büyükzeren, R., Altıntaş, H. B., Martin, K. ve Kahraman, A. (2015). Binalardaki Fotovoltaik Uygulamasının Teknik, Çevresel ve Ekonomik İncelenmesi : Meram Tıp Fakültesi Hastanesi Örneği. *EMO Bilimsel Dergi*, 5(10), 9-14.



## Virtual Reality and Augmented Reality in Psychiatric Disorders

 Neşe ÖZKAN YILMAZ<sup>1,\*</sup> Fecir DURAN<sup>2</sup> Uğur FİDAN<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Afyon Kocatepe University Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, Afyonkarahisar/Turkey

<sup>2</sup>Gazi University Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, Ankara/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Review article

Received: 02/07/2021

Revision 12/08/2021

Accepted: 06/09/2021

#### Highlights

- Human Computer Interface.
- Head Mounted Display.
- VR and AR usage at Psychiatric Disorders.

#### Keywords

 Virtual Reality  
 Augmented Reality  
 Neurodevelopmental Disorders  
 Anxiety/Phobia  
 Pain Perception/Feeling  
 Mental Disorders

In this study, studies conducted in the last 10 years on the use of virtual reality and augmented reality applications in psychiatric disorders were examined. The study focused on 4 different disease groups (Figure A), namely neurodevelopmental, anxiety/phobia, pain perception/feeling and other mental disorders. Studies carried out to date; The psychiatric disorder studied, the equipment used, the number of people participating in the study, the database in which the study was scan and the results of the studies were examined.

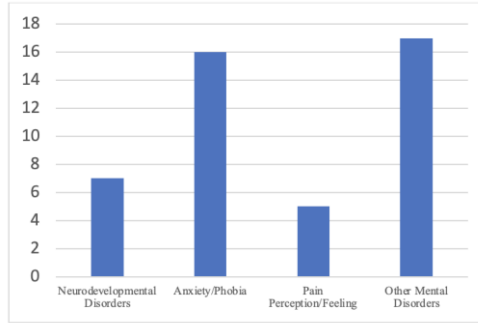


Figure A. Distribution of publications by disease groups

**Purpose:** This study aims to determine the effectiveness of virtual reality and augmented reality applications in psychiatric disorders, the characteristics of the technological infrastructure used and what types of psychiatric disorders are focused on. In this way, it is aimed to provide researchers with an alternative perspective in determining the deficiencies and new study subjects in this field.

**Theory and Methods:** Using PubMed and Scopus databases, publications on Psychiatric diseases and Virtual reality and/or Augmented reality between 2011-2021 until February 25, 2021 were searched. In the literature review, “(Virtual And Reality) and (Psychiatric And Disorder)”, “(Augmented And Reality) and (Psychiatric And Disorder)” and “(Virtual And Reality) and (Augmented And Reality) and (Psychiatric and Disorder)” The relationship between qualitative and quantitative obtained by using word groups was examined.

**Results:** It was observed that approximately 77% of the studies were conducted in the field of virtual reality and 23% in the field of augmented reality. Studies using questionnaires specific to the disease include 30% of all studies. In some studies, it is seen that physiological parameters are also used. Studies using physiological parameters correspond to 10% of all studies. Considering all the articles included in the study, it is seen that AR/VR applications have been developed mostly on phobia as a psychiatric disorder.

**Conclusion:** Studies in the literature show that AR/VR applications are an auxiliary equipment in the treatment of psychological disorders. In such applications, which will be used to support treatment, the cultural structure of the society, the age and gender of the user, the background design in the application and the selection of avatars are important. For this purpose, such applications should be prepared under the supervision of psychiatry and psychology experts. Another issue is that there are no tests that will allow monitoring the development of the client in the applications in the literature. The presence of the test section will allow the clients to follow their progress.

GU J Sci, Part C, 9(3): 450-471 (2021)

Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

## Psikiyatrik Rahatsızlıklarda Sanal Gerçeklik ve Artırılmış Gerçeklik

Neşe ÖZKAN YILMAZ<sup>1,\*</sup> Fecir DURAN<sup>2</sup> Uğur FİDAN<sup>1</sup> <sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar/Türkiye<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye

### Öz

Bu çalışmada sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik uygulaması ile psikiyatrik rahatsızlıklarda son 10 yılda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalar; çalışılan psikiyatrik rahatsızlık, kullanılan ekipmanlar, çalışmaya katılan kişi sayısı, çalışmanın tarandığı veri tabanı ve çalışmaların sonuçları kriterlerine göre ele alınmıştır. Hastalığa özgü kullanılan anketlerin kullanıldığı çalışmalar tüm çalışmaların %30'u içermektedir. Bazı çalışmalarda fizyolojik parametrelerden de yararlanıldığını görülmektedir. Fizyolojik parametrelerden yararlanılarak yapılan çalışmalar tüm çalışmalar içerisinde sadece %10'luk kısma denk gelmektedir. Gerçekleştirilen uygulamalar hastalığın getirdiği semptomları azaltmak ve kişilerin hastalık durumlarını ortadan kaldırmaya yardımcı olarak yaşam kalitesini arttırmaktır. Çalışmaların yaklaşık %77'si sanal gerçeklik alanında %23'si ise artırılmış gerçeklik alanında yapılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen makalelerden yola çıkarak psikiyatrik hastalıklarda sanal gerçeklik ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamaları ile ilgili bazı eksiklikler tespit edilmiştir. Örneğin yapılan uygulamaların kullanıcılar üzerinde rahatsız edici bir etkisinin olup olmama durumu SSQ anketi kullanılarak tespit edilmelidir. Ayrıca sanal çevreyi oluşturan görsel parametreler kadar işitsel parametreler de bu süreçte etkin olarak kullanılmalıdır. Literatürde yer alan çalışmalar içerisinde işitsel parametrelerin kullanıcıları olumlu ya da olumsuz etki durumlarına değinilmediği görülmüştür. Sanal gerçeklik ortamını kullanımında işitsel öğelerin de etkisini incelemek çalışmalar açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

### Makale Bilgisi

Derleme makalesi  
Başvuru: 02/07/2021  
Düzelme: 12/08/2021  
Kabul: 06/09/2021

### Anahtar Kelimeler

Sanal Gerçeklik  
Artırılmış Gerçeklik  
Nörogelişimsel  
Bozukluklar  
Anksiyete/Fobi  
Ağrı Algısı/Hissi  
Mental Bozukluklar

### Keywords

Virtual Reality  
Augmented Reality  
Neurodevelopmental  
Disorders  
Anxiety/Phobia  
Pain Perception/Feeling  
Mental Disorders

### Virtual Reality and Augmented Reality in Psychiatric Disorders

#### Abstract

In this study, studies conducted in the last 10 years in psychiatric disorders with virtual reality and augmented reality application were examined. Studies done so far; The psychiatric disorder studied, the equipment used, the number of people participating in the study, the database in which the study was scanned, and the results of the studies were evaluated according to the criteria. Studies using disease-specific questionnaires include 30% of all studies. In some studies, it is seen that physiological parameters are also used. Studies using physiological parameters correspond to only 10% of all studies. The practices carried out are to reduce the symptoms brought by the disease and to increase the quality of life by helping to eliminate the disease conditions of the people. Approximately 77% of the studies were carried out in the field of virtual reality and 23% in the field of augmented reality. Based on the articles examined within the scope of the study, some deficiencies in virtual reality and/or augmented reality applications in psychiatric diseases were identified. For example, whether the applications made have a disturbing effect on the users should be determined by using the SSQ questionnaire. In addition, the auditory parameters as well as the visual parameters that make up the virtual environment should be used effectively in this process. It has been observed that among the studies in the literature, the positive or negative effects of auditory parameters on users are not mentioned. It is considered that it will be beneficial for studies to examine the effect of auditory elements in the use of virtual reality environment.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bireylerin düşünceleri, sahip olduğu algı ve duygu biçimi bir araya gelip şekillenerek davranışa dönüşür. İletişimde ya da duygu biçimlerinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan bozukluklar psikiyatrik rahatsızlıklara

neden olur. Psikiyatrik rahatsızlıklara yaşamın her döneminde (çocukluk, ergenlik vb.) maruz kalınabilir. Psikiyatrik rahatsızlıklar genetik, çevresel (aile, evlilik, iş vb.), hormonal, kişilik özellikleri, çocukluk çağı travmaları vb. birçok sebebe bağlı olarak meydana gelebilmektedir. Psikiyatrik rahatsızlıklar ile ilgili artan bilgi ve hastalığın tedavisi ile ilgili çalışan uzman kişilere erişimin kolay olmasına rağmen hastalığın toplumda görülme sıklığı hala yüksektir. Bireylerin karşılaştıkları psikiyatrik rahatsızlıkları değerlendirmesi farklı disiplinlerin (Psikiyatri, Çocuk ve Ergen Psikiyatrisi, Psikoloji, Rehberlik ve Psikolojik Danışmanlık vb.) iş birliği ile mümkündür.

Psikiyatrik rahatsızlıkların tedavisinde ilaç tedavisinin yanı sıra uygulamalı müdahalelerde yer almaktadır. İlaç tedavisi klinik psikiyatristler tarafından kullanılması uygun görülen ilaçlar olup belirli aralıklarla takip edilerek tedavi yöntemi uygulanmaktadır. Bazı durumlarda ilaç tedavisinin tek başına kullanılmasının yeterli olmadığı görülmektedir. İlaç kullanımını sınırlayan etmenler aşağıdaki gibi sıralanabilir [1].

- a) Tedaviye kısmi cevap alma ya da alamama,
- b) Olası yan etkiler,
- c) Uzun vadeli maliyetler,
- d) Faydaları ile ilgili belirsizlik,
- e) Ebeveynler veya klinisyenlerin ilaçla ilgili olumsuz tutumları,

İlaç tedavisini sınırlayan etmenler sebebiyle uygulamalı müdahaleler ilaç tedavisine destek olarak kullanılmaktadır. Psikiyatrik rahatsızlık durumu olan kişilerin ilaca karşı olan olumsuz tutumları ve toplumdaki kişilerin psikiyatrik ilaç kullananlara karşı olan ön yargısı gibi sebeplerden ötürü ilaç tedavisi psikiyatrik hastalar tarafından tercih edilmemektedir. Bu sebeple psikiyatrik rahatsızlık durumu olan kişiler uzman kişiler tarafından uygulamalı müdahalelere yönlendirilmektedir. Uygulamalı müdahalelerin arasında son yıllarda Sanal gerçeklik (Virtual Reality-VR) ve Artırılmış gerçeklik (Augmented Reality-AR) uygulamaları da yer almaktadır. Sanal gerçeklik nesnelerin tüm fiziksel özelliklerini (hacim, ağırlık, yüzey sürtünmesi, vb.) paylaşmadan gerçek nesnenin en az bir özelliğini (genellikle görünümü) paylaşarak gerçek gibi görünen nesnelere veya varlıklardan oluşur. Sanal gerçeklik bilgi işlem teknolojisi tarafından oluşturulan 3B dijital bir alan (örneğin, bir video oyununun senaryosu) olarak tanımlanabilir. Bir yüzeye yansıtılan görsel uyaranlardan (örneğin, bir duvar, bir bilgisayar ekranı) ve genellikle bir elektronik cihaz (örneğin, bir kulaklık, hoparlörler) tarafından üretilen akustik uyarıcılardan oluşur. Artırılmış gerçeklik ise sanal gerçeklik sistemlerinin aksine sentetik unsurları kullanıcının dünya algısına dahil ederek sentetik olmayan bir ortam inşa eder. Sanal gerçeklik, mevcut fiziksel ortamı sanal bir ortamla değiştirirken, artırılmış gerçeklik, mevcut ortam üzerine inşa etmek için sanal öğeleri kullanır [2].

Sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik uygulamaları özellikle psikoterapide pek çok rahatsızlığın (fobi, anksiyete, travma sonrası stres bozukluğu, panik gibi.) tedavisi için son yıllarda etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar yapılan sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamalarının psikiyatrik rahatsızlıklardaki başarısını ortaya koymaktadır. Yapılan uygulamaların sunduğu olanaklar ve avantajları ise etkili olması, yeniden kullanılabilir, ucuz ve kolay uygulanabilir olması, çocuklar tarafından kolay tolere edilebilir nitelikte olması sebebiyle psikiyatrik rahatsızlıkların tedavisinde son yıllarda AR ve VR sistemlerini tercih edilebilir hale getirmiştir.

Bu çalışmada sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ile psikiyatrik rahatsızlıklar anahtar kelimeleri kullanılarak son 10 yılda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Psikiyatrik rahatsızlıklarda sıklıkla çalışılan hastalık, kullanılan sanal ve/veya artırılmış gerçeklik ekipmanları, çalışmaya katılan kişi sayısı, çalışmanın tarandığı veri tabanı ve çalışmaların sonucunda elde edilen bilgiler verilmiştir. İncelenen çalışmalar değerlendirildiğinde çalışmaların yaklaşık %77'si sanal gerçeklik alanında %23'si ise artırılmış gerçeklik alanında yapılmıştır. Hastalığa özgü kullanılan anketlerin kullanıldığı çalışmalar tüm çalışmaların %30'u içermektedir. Bazı çalışmalarda fizyolojik parametrelerden de yararlanıldığını görülmektedir. Fizyolojik parametrelerden yararlanılarak yapılan çalışmalar tüm çalışmalar içerisinde sadece %10'luk kısma denk gelmektedir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular psikiyatrik bozukluklar

için sanal ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamaları geliştiren araştırmacılara alandaki eksikliklerin tespitinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

## 2. METOT (METHOD)

PubMed ve Scopus veri tabanları kullanılarak 25 Şubat 2021 tarihine kadar 2011-2021 yılları arasında Psikiyatrik hastalıklar ve Sanal gerçeklik ve/veya Artırılmış gerçeklik ile ilgili yapılan yayınlar taranmıştır. Literatür taraması sırasında aşağıdaki anahtar kelimeler kullanılmıştır.

1. (Title-Abs-Key (Virtual And Reality) And Title-Abs-Key (Psychiatric And Disorder))
2. (Title-Abs-Key (Augmented And Reality) And Title-Abs-Key (Psychiatric And Disorder))
3. (Title-Abs-Key (Virtual And Reality) And Title-Abs-Key (Augmented And Reality) And Title-Abs-Key (Psychiatric And Disorder))

Tablo 1’de PubMed ve Scopus veri tabanlarından yararlanılarak Sanal gerçeklik ve/veya Artırılmış gerçeklik ile ilgili psikiyatrik rahatsızlıklarla yapılan çalışma sayıları verilmektedir.

**Tablo 1.** Veri Tabanında yer alan yayın sayıları

<i>Yayın Sayıları (2011-2021 yılları arasında)</i>		
<i>Anahtar Kelimeler</i>	<i>Pubmed Veri Tabanı</i>	<i>Scopus Veri Tabanı</i>
<i>Sanal Gerçeklik ve Psikiyatrik Bozukluklar</i>	985	280
<i>Artırılmış Gerçeklik ve Psikiyatrik Bozukluklar</i>	65	10
<i>Sanal Gerçeklik, Artırılmış Gerçeklik ve Psikiyatrik Bozukluklar</i>	47	7

Tabloda yer alan verilere göre çalışmaların büyük bir kısmı sanal gerçeklik uygulaması olarak yapılmıştır. Hem sanal gerçeklik hem artırılmış gerçeklik hem de psikiyatrik bozuklukların olduğu çalışma sayısı ise oldukça azdır.

Psikiyatrik rahatsızlıkların tedavisinde kullanılan yöntemler genellikle geleneksel tedavi yöntemleridir. Bunlar; ergoterapi, aromaterapi, müzik terapisi, ilaç tedavisi, radyo frekans tedavi yöntemidir. Teknolojik yöntemler ise tıbbi tedavinin kişiselleştirilmesi ile birlikte son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Kullanılan teknolojik yöntemler; artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, yapay zeka uygulamaları ve robotik teknolojisi, mobil sağlık teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır.

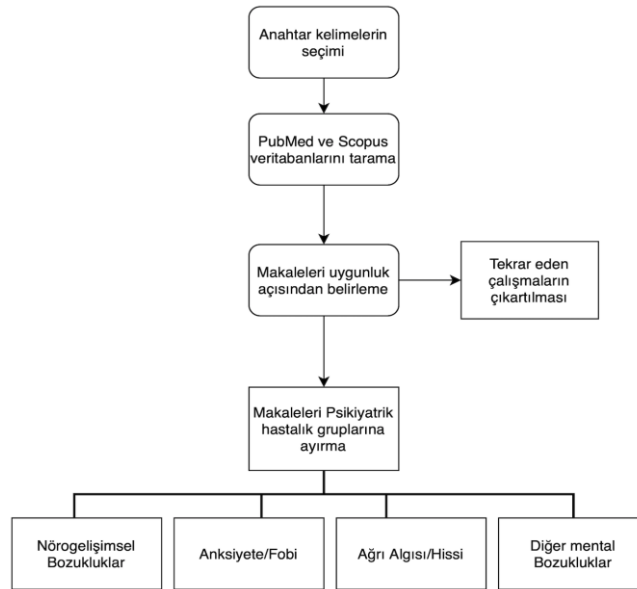
Bu uygulamalar günümüzde kliniklerin rutin uygulamalarına girmeye başlamıştır. Ülkemizdeki bir örneği NP İstanbul Beyin Hastanesinde psikiyatrik rahatsızlıklar için bilgisayarlı eğitim modülleri kullanılmaktadır. Modüller ile bilgisayar ortamında kişilerin zihinsel becerilerin tekrar kazandırılması veya mevcut becerilerin artırılmasına yönelik kişiye özgü eğitim modelleri bilgisayar ortamında hazırlanmaktadır. Uluslararası kliniklerde de (psious, venturebeat, jove vb) benzer uygulamalar kullanılmaktadır. Sanal gözlük ve ekipmanlar ile fobi, dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu, anksiyete gibi birçok psikiyatrik rahatsızlıkların tedavisinde AR/VR uygulamalarından yararlanılmaktadır.

## 2.1. Makale Seçme Kriteri (Article Selection Criteria)

Çalışmada yer alan makaleleri seçme aşamasında aşağıdaki kriterler dikkate alınmıştır.

- Yalnızca İngilizce hakemli yayınlarda yayımlanmış çalışmaların seçilmesi,
- Psikiyatrik hastalık grubunun çalışmada yer alması,
- İlaç kullanılarak yapılan çalışmaların hariç tutulması,
- Sanal gerçeklik ve/veya Artırılmış gerçeklik uygulamasının yer alması,

Bu kriterler göz önünde bulundurularak literatür taranmıştır. Şekil 1’ de çalışmada izlenen adımlar akış şeması olarak verilmiştir. İlk olarak uygun anahtar kelimeler veri tabanı taramaları öncesinde belirlenmiştir. PubMed ve Scopus veri tabanı kullanılarak yapılan taramaların ardından makaleler makale seçme kriterleri göz önüne alınarak eleme işlemine tabi tutulmuştur. Her iki veri tabanında da yer alan tekrarlı makalelerden sadece biri çalışmaya dahil edilmiş olup erişim izni olmayan makaleler hariç tutulmuştur. Bu eleme neticesinde toplamda 45 adet yayın incelenmiştir. İncelenen yayınlar dört psikiyatrik hastalık grubuna ayrılarak gruplandırılmıştır. Bu gruplar; nörogelişimsel bozukluklar, anksiyete/fobi, ağrı algısı/hissi, diğer mental bozukluklardır.



Şekil 1. Çalışma akış şeması

## 2.2. Araştırma Yöntemi (Research Method)

Çalışmaya dahil edilen yayınlarda yer alan psikiyatrik hastalıklar hastalık türüne (Nörogelişimsel Bozukluklar, Anksiyete/Fobi, Ağrı Algısı/Hissi ve Diğer Mental Bozukluklar) göre gruplandırılmıştır.

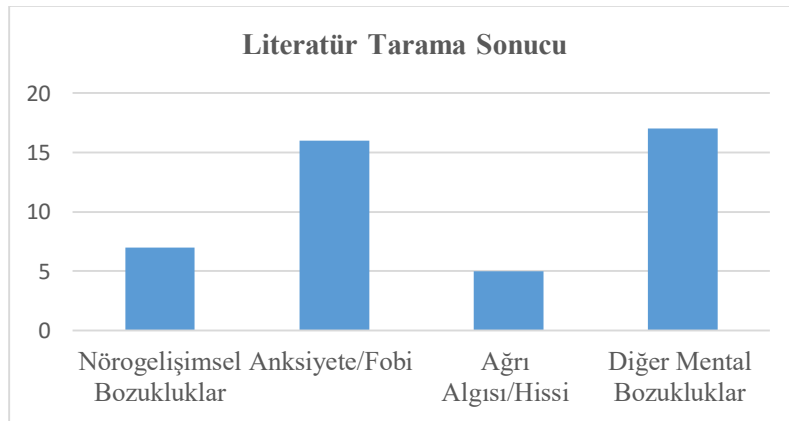
Nörogelişimsel bozukluklar; Nörogelişimsel bozukluklar yaşamın erken döneminde nöronal gelişimin farklılaşması ile ortaya çıkan bozukluklar olarak tanımlanır [3]. İnsan beyninin gelişim esnasında çeşitli faktörlerin etkisiyle farklılaşması sonucu nörogelişimsel bozukluklar meydana gelir. Nörogelişimsel bozukluklar literatür taramalarında; dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu, otizm, serebral pals, fetal alkol sendromu ve algısal işitsel bozukluklar olarak gruplandırılmıştır.

Anksiyete/Fobi; Anksiyete, stres ve korku durumu ile birlikte insanların hayatta kalabilmeleri için geliştirdikleri bir duygu durum tepkisidir. Anksiyete bozukluğu kişilerin hayatını normal olarak sürdürmelerini etkileyecek ölçüde ortaya çıkan durumdur [4]. Bu grup içerisinde yer alan rahatsızlıklar; anksiyete/fobi, travma sonrası stres bozukluğu, araba sürüş korkusu, uçma korkusu, araknofobi, agorofobi, klostrofobi olarak ayrılmıştır.

Ağrı Algısı/Hissi; Ağrı, Amerikan Psikiyatri ve Nöroloji kurumuna göre kişilerin günlük yaşam aktivitelerini kısıtlayan bir his olarak tanımlanmaktadır. Uluslararası ağrı araştırmaları derneğine göre ağrı “gerçek veya potansiyel bir doku hasarından kaynaklanan veya bu şekilde tanımlanan, hoş olmayan bir duyu ve duyusal deneyim” olarak ifade edilir [5]. İnsan vücudunda yolunda gitmeyen durumlarda meydana gelen ağrılar hastalığa karşı ön uyarıcı görevini görürler. Literatür taramaları sonucunda ağrı algısı/hissine dahil edilen yayınlarda ağrı durumları; acılı ağrı, kansere bağlı ağrı, diş ağrısı, deneysel olarak tetiklenen ağrı, akut ve kronik ağrı, iskelet kas sistemi ağrısı, hayali uzuv ağrısı ve omurilik yaralanması ağrısıdır.

Diğer Mental Bozukluklar; Psikiyatrik bozukluklar içerisinde nörogelişimsel bozukluklar, anksiyete ve ağrı algısı dışında kalan rahatsızlıklar diğer mental bozukluklar olarak gruplandırılmıştır [6]. Diğer mental bozukluklar grubunda psikoz, depresyon, madde bağımlılığı, yeme bozuklukları, şizofreni, mekânsal ihmal bilişsel bozukluk, demans, obsesif-kompulsif bozukluk, bilişsel bozukluklar, Parkinson ve Alzheimer yer almaktadır.

Psikiyatrik hastalıklarla ilgili yayınlarda nörogelişimsel bozukluklar, anksiyete/fobi, ağrı algısı/hissi ve diğer mental bozukluklar olarak gruplandırılmış ve hastalıkların son on yıldaki dağılımı Şekil 2’de verilmiştir. Son 10 yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde psikiyatrik hastalıklarda yapılan çalışma sayıları içerisinde ağrı algısı/hissi ve nörogelişimsel bozukluğun diğer hastalıklara oranla daha az çalışıldığını göstermektedir.



Şekil 2. Yayınların hastalık gruplarına göre dağılımı

### 3. BULGULAR (RESULTS)

Veri tabanı taraması sonucunda incelenen 45 adet yayın nörogelişimsel hastalıklar, anksiyete/fobi, ağrı algısı/hissi ve diğer mental bozukluklar olmak üzere psikiyatrik hastalık gruplarına ayrılmıştır. Makaleler yazar (yıl), taranan veri tabanı bilgisi, çalışmaya katılan kişi sayısı, hastalık grubu, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik çalışmalarından hangisi ile gerçekleştirildiği, kullanılan sanal gerçeklik ve/veya artırılmış gerçeklik ekipmanları ve çalışma sonuçları kronolojik sıra ile verilmiştir.

#### 3.1. Nörogelişimsel Hastalıklar (Neurodevelopmental Diseases)

Kandaloft vd. (2013) otizm teşhisi koyulan 8 kişiye sanal gerçeklik ortamını uygulamışlardır. Otizmliler kişilerin sosyal ilişkilerindeki zayıflıklarla başa çıkabilmelerini sağlayan sanal sahneler oluşturulmuştur. Katılımcılara 5 hafta boyunca toplamda 10 seans sanal sahneleri deneyimlemeleri sağlanmıştır. Çalışmanın sonucu sanal gerçeklik platformunun otizmde sosyal becerileri, bilişi ve işleyişi geliştirmek için umut verici bir araç olduğunu göstermektedir [7].

Díaz-Orueta vd. (2014) Dikkat Eksikliği ve Hiperaktivite Bozukluğu olan 57 kişiyi çalışmaya dahil etmişlerdir. Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu olan çocuklara sanal ortamda Connors ve Aula bilişsel performans testlerini uygulamışlardır. Testlerin sonuçlarını istatistiksel yöntem olan Shapiro-Wilk



analizini yapmışlardır. Dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu olan çocukların dikkat eksikliği durumu sanal ortam uygulaması ile azaldığı bilişsel testler ile ayrıca ortaya konulmuştur [8].

Lin vd. (2015) serebral palsi olan kişileri çalışmaya dahil etmişlerdir. Çalışmalarında artırılmış gerçeklik sistemi kullanmışlardır. Gerçekleştirilen uygulama 3 çocuk için kullanılmıştır. Kullanılan arayüz ile etkileşimin serebral palsi ve gelişimsel engelli kişiler için kullanılabilir olduğu görülmüştür [9].

Newbutt vd. (2016) otizm teşhisi konulan 29 kişide Oculus Rift sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmışlardır. Otizmliler için sanal ortamda gerçekleştirilen sahneleri deneyimlemeleri sağlanmıştır. Chi kare testi ve Mann–Whitney U testi uygulanmıştır. Sanal gerçeklik ortamını kullanma isteklerinin olduğu ve otizmlilerde sanal gerçeklik teknolojisinin kullanılabilir olduğu ortaya çıkarılmıştır [10].

Crowell vd. (2020) otizm rahatsızlığı olan 36 kişi için sanal gerçeklik uygulamasını kullanmıştır. Otizmliler için çocuklara sanal ortamda lego vb. oyunlar oynatarak anksiyete seviyeleri gözlemlenmiştir. Çocuklar için kaygı durum anksiyete ölçeği uygulanmıştır. Anksiyete seviyeleri deri direnci, kalp atım verileri ve anksiyete ölçeği verileri t testi uygulanmıştır. İstatistiksel analiz sonucunda anksiyete seviyelerinde azalma olduğu ortaya çıkmıştır [11].

Antao vd. (2020) otizmliler için 96 kişi üzerinde artırılmış gerçeklik uygulamasını test etmişlerdir. AR ortamında gerçekleştirilen eğitim sisteminin otizmliler için etkisi istatistiksel yöntem ile ortaya koyulmuştur. Uygulamada yer alan sembollerini tespit etme süreleri, hatalı bulma durumları ve doğru cevapları kaydedilmiştir. Veriler Mann–Whitney U testi ile kontrol grubu ve otizmliler grubu arasındaki farka bakılmıştır. Sonuçların özellikle otizmliler için örneklemi karakterize eden düşük düzeyde temel becerilere veya düşük motivasyona ve etkileşime sahip öğrenciler için kullanılabilir olduğu görülmüştür [12].

Newbutt vd. (2020) otizmliler için 31 kişiye sanal gerçeklik gözlüğü HTC Vive ile sanal ortamı tecrübe etmeleri sağlanmıştır. Otizmliler için sanal ortamı deneyimlemişlerdir. Çalışmada Likert ölçeği kullanılmış olup ölçekten elde edilen verileri üç kategoriye ayırmışlardır. Bunlar; zevk / yararlılık, fiziksel deneyim (Head Mounted Display (HMD), Kafaya takılan gözlüklerin genel adı) ve çocukların teknolojiyi tekrar kullanacak mı veya başkalarına tavsiye edecek mi sorularına verdikleri cevaplardır. Otistik çocukların HMD'yi değerlendirdiklerini gösteren üç kategorinin hepsinde yüksek bir anlaşma olduğunu sonucuna ulaşılmıştır [13].

Sonuç olarak nörogelişimsel hastalıklar içerisinde en çok çalışılan hastalık otizm ve sanal gerçeklik uygulamalarının artırılmış gerçeklik uygulamalarına kıyasla daha fazla çalışıldığı görülmektedir. Çalışmaların sonuçları incelendiğinde ölçeklerle ve hastalığa özgü yapılan sanal gerçeklik ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamalarıyla hastalık durumunun iyileşmesi hedeflenmiştir.

### 3.2. Anksiyete / Fobi (Anxiety/Phobia)

Gorini vd. (2008) anksiyete durumu olan 75 kişi için Sony Glasstron PLM S-700 sanal gözlüğünü kullanmalarını ve bu kişilerin sanal ortam sahnelerini deneyimlemelerini sağlamışlardır. Ayrıca çalışma sırasında katılımcıların EMG, kan basıncı ve solunum parametrelerini almışlardır. Sanal uygulama sonrasında kullanılan psikometrik ölçekler (Penn State Worry ölçeği, Beck anksiyete ölçeği, klinik değerlendirmeler ölçeği gibi) ile anksiyete seviyelerinde azalma olduğu görülmüştür [14].

Botella vd. (2010) fobi durumu olan 6 kişi için artırılmış gerçeklik sistemi tasarlamıştır. AR sistem ile kişilere tedavi öncesi, tedavi sonrası ve 3, 6, 12 aylık sürelerde korku durumları takip edilmiştir. Tedavi sonucunda kişilerin korku durumlarında korku ölçek anketi ve davranışsal kaçınma anketi verilerinden faydalanarak azalma olduğunu tespit etmişlerdir [15].

Powers vd. (2013) anksiyete durumu olan 26 kişinin Z800 3D sanal gerçeklik gözlüğü ile sanal ortam deneyimlemeleri sağlanmıştır. Çalışma sosyal görüşmelerde ve konuşmalarda anksiyete hisseden kişilerle yapılmıştır. VR ortamında kişilerin sosyalleşmesine izin veren sahneler sayesinde kişilerin anksiyete seviyeleri liebowitz sosyal anksiyete ölçeği, sübjektif değerlendirme ölçeği uygulanarak anksiyete seviyeleri tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde gerçek durumda sosyal görüşmelere göre sanal ortam sosyal görüşmeleri ölçeklere göre anksiyete seviyesini azaltmıştır [16].

Calafell vd. (2013) uçuş fobisi olan 15 kişiye sanal gerçeklik ortamı uygulamıştır. Uçuş korkusu olan kişilerin haftada 2 kez 6 seans halinde sanal ortam deneyimlemeleri sağlanmıştır. Katılımcılardan ayrıca tedaviden hemen sonra gerçek bir uçuşa geçmeleri istenmiştir. Sonuçlar, uçuş korkusu ile ilişkili azalmış klinik bulgular ile ilgili olarak sanal ve gerçek durum arasında hiçbir fark göstermedikleri ancak VR grubundaki katılımcılar, tedaviden sonraki gerçek uçuş sırasında daha az endişe yaşadıkları görülmüştür. Ayrıca, 6 aylık takipte tehlike beklentileri ve uçuş kaygısı azalmaya devam etmiştir [17].

Shiban vd. (2015) fobisi olan 58 kişide Z800 3D sanal gerçeklik gözlüğü kullanmıştır. Örumcek fobisi olan kişiler için sanal gerçeklik sahneleri tasarlayarak korku durumlarını azaltmaya çalışmışlardır. Davranışsal kaçınma ölçeğini kullanarak verilerin istatistiksel analizini yapmışlardır. Sonuçta, korku durumlarında azalma olduğu görülmüştür [18].

Botella vd. (2016) fobisi olan 15 kişi için sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik sistemini birlikte kullanmışlardır. Artırılmış Gerçeklik maruziyetinde katılımcılar tedaviyi daha az caydırıcı olarak değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Artırılmış Gerçekliğe maruz kalmanın belirli fobiler için etkili bir tedavi olduğunu ve katılımcılar tarafından kabul edildiğini göstermektedir [19].

Shiban vd. (2016) fobisi olan 96 kişiyi için sanal gerçeklik sistemi tasarımı yapmışlardır. Kapalı alan korkusu olan kişilerin sanal ortamda gerçekleştirdikleri sahneleri kullanmalarını sağlamışlardır. Sanal gerçeklik deneyimleri esnasında EKG verileri ve solunum parametreleri de takip edilmiştir. EKG verileri ve solunum parametreleri değerlendirildiğinde gerçekleştirilen sanal ortamın kişilerin EKG ve solunum düzeyleri ortam deneyimi esnasında normal düzeyde kalmıştır. Sonuçta; gerçekleştirilen sistemin kapalı alan korkusu üzerindeki etkisini Anova yöntemi ile ortaya koymuşlardır [20].

Schweizer vd. (2017) anksiyete durumu olan 269 kişi çalışmalarına dahil etmişlerdir. Gerçekleştirdikleri sanal sahneleri katılımcıların kullanmalarını sağlamışlardır. Sanal deneyim ve anksiyete ölçekleri ile kişilerin anksiyete seviyelerini takip etmişlerdir. Deneyimler neticesinde anksiyete seviyelerindeki azalmayı istatistiksel yöntemlerden olan Manova yöntemi ile ortaya koymuşlardır [21].

Tsai vd. (2018) fobi durumu olan 30 kişiyi için hem sanal gerçeklik hem de artırılmış gerçeklik sistemi tasarlamışlardır. Kapalı alan korkusu olan kişilerin AR ve VR ortamlarında gerçekleştirilen oyunlar kullanılarak korku durumlarının üstesinden gelmesi amaçlanmıştır. Anksiyete anketine ilişkin olarak katılımcılar, sanal gerçeklik ortamında anksiyetelerinin AR ortamındakilere göre anlamlı düzeyde daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [22].

Yeh vd. (2018) fobisi olan 34 kişi için sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik sistemini birlikte kullanmışlardır. Kişilerin korku durumlarının üstesinden gelmek için VR/AR sistemde çeşitli senaryolar kullanılmıştır. Korku anında anksiyete seviyeleri sürekli kaygı ölçeği ve öznel tehlike birimleri (SUD) ölçekler ile ortaya konulmuş olup eş zamanlı olarak uygulama esnasında kalp atım verileri alınmıştır. Sonuçta; AR ve VR'nin uyarılmış anksiyete üzerindeki etkilerinde anlamlı bir fark bulunmamıştır. İki sahne inşa etmenin maliyeti ve diğer faktörler göz önünde bulundurulduğunda AR'ın klostrofobinin tedavisi için VR'den daha uygun olduğu görüşüne varmışlardır [23].

Bras vd. (2018) fobi durumu olan 20 kişi için artırılmış gerçeklik sistemi tasarımı yapmışlardır. Gerçekleştirilen AR sistemi ile kullanıcıların laboratuvar ortamı dışında da korku durumları ile başa çıkabilmeleri sağlanmıştır. Gerçekleştirilen sistem ile her hastanın sürecinin kendine özgü özelliklerine ve anksiyete bozukluğu tanısına bağlı olarak farklı durumlara ve uyarılara uyarlanabilir olduğu görülmüştür [24].

Martens vd. (2019) fobi durumu olan 28 kişi için sanal ortam sahnesi tasarlamışlardır. Kapalı alan fobisi olan kişilerin sanal ortam sahnesi kullanmaları sağlamıştır. VR sahne sayesinde kullanılan N-Back sürekli performans ölçeği ile birlikte kişilerin kapalı alanlarda bulunma durumlarında stres seviyelerinin azaldığı görülmüştür [25].

Freeman vd. (2019) anksiyete durumu olan 432 kişinin HTC Vive sanal gerçeklik gözlüğü kullanarak sanal ortamı kullanmalarını sağlamıştır. Anksiyete yaşayan katılımcıların yarısına VR uygulamasını kullandırılmış kalan yarısına ise uygulamayı kullandırılmamıştır. 6 ay boyunca takip edilen kişilere

Oxford davranış değerlendirme ölçeği, Beck depresyon ölçeği ve bilişsel ölçek ile anksiyete durumundaki azalma ortaya konulmuştur [26].

Schwarzmeier vd. (2020) fobi durumu olan 204 kişiye Oculus Rift sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmışlardır. Örümcek fobisi olan kişilerin sanal gerçekliğe dayalı terapi yöntemi ile korku durumlarını azaltmaya çalışmışlardır. 6 ay boyunca kişiler takip edilmiştir. Korku durumları örümcek fobisi anketindeki bireysel puana göre %30 azalma ve davranışsal kaçınma testinde bireysel mesafeye göre %50 azalma olduğu görülmüştür [27].

Bossenbroek vd. (2020) anksiyete durumu olan 8 kişiye HTC Vive sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmışlardır. 6 katılımcının kaygıda azalma gösterdiği ve 5 katılımcının kullanılan uygulamadan sonra olumsuz davranışlarında azalma gösterdiği bulunmuştur. Sanal oyun oynadıkları günlerde, katılımcıların anksiyete seviyelerinde küçük ama anlamlı bir azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca katılımcıların sanal oyunu oynadıktan sonra sakin veya gevşemiş hallerinin ortalama 2 saat kadar sürdüğü tespit edilmiştir [28].

Dibbets (2020) Travma Sonrası Stres Bozukluğu olan 82 kişiye Oculus Rift sanal gerçeklik gözlüğü kullanmıştır. Travma geçirmiş olan kişilerin stres durumları ile ilgili sanal gerçeklik ortamında travma sahneleri tasarlamışlardır. Travma öncesi ve sonrası risk durumları ölçülmüştür. Travma sırasındaki olumsuz duygular ve sürekli anksiyete durumlarına katkıda bulunarak kullanıcılar sanal gerçeklik deneyimleri esnasında stresle başa çıkmayı öğrenmişlerdir [29].

Literatür incelendiğinde anksiyete/fobi grubu diğer psikiyatrik hastalık gruplarına kıyasla en fazla çalışılan psikiyatrik hastalık grubudur. Çalışmaların detaylarına bakıldığında ise örümcek fobisi, kapalı alan fobisi ve uçuş fobisinin anksiyete durumuna göre daha fazla çalışıldığı görülmektedir. Anksiyete/Fobi üzerine yapılan çalışmaların çoğu sanal gerçeklik çalışmaları iken sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik çalışmalarının birlikte yapıldığı çalışmalar da görülmektedir. Çalışmaların sonuçları incelendiğinde anketlerle ve hastalığa özgü yapılan sanal gerçeklik ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamalarıyla katılımcıların korku ve anksiyete seviyelerinde azalma olduğu görülmüştür.

### 3.3. Ağrı Algısı / Hissi (Pain Perception/Sentimental)

Raghav vd. (2016) diş ağrısı durumu ile başa çıkmaya çalışan 30 kişiye Oculus Rift sanal gerçeklik gözlüğü kullanmalarını sağlanmıştır. Diş tedavisi fobisi olan kişilere tedaviyi 4 aşamada sanal gerçeklik uygulayarak tedavi esnasında oluşan anksiyete durumlarını değerlendirmişlerdir. 1. hafta, 3. ay ve 6 aylık kontrol takiplerinde katılımcılara diş korkusu anketi uygulanmıştır. Çalışma sonuçları Manova yöntemi ile analiz edilmiş olup dental anksiyete ve fobisi olanlar için sanal gerçeklik uygulamalarının yardımcı bir yöntem olarak kullanılabilir olduğu değerlendirilmiştir [30].

Niharika vd. (2018) diş ağrısı olan 40 kişiye Google VR gözlüğünü kullanmışlardır. Çalışmaya katılan kişileri iki gruba ayrılmıştır. İlk gruba diş tedavisi sırasında VR gözlük ile çizgi film izleterek tedavi yapılmıştır. İkinci gruba ise normal VR gözlük kullanmadan diş tedavisi uygulanmıştır. Sonuçta; VR dikkat dağınıklığı, çeşitli dental prosedürlerle ilişkili ağrı ve kaygıyı hafifletme potansiyeli yüksek, klinik olarak uygulanabilir bir teknik olacağı belirtilmektedir. Tedavinin daha olumlu hatıraları ve tedaviye geri dönme isteğinin artması açısından etkili olmuştur [31].

Gujjar vd. (2018) diş ağrısı olan 10 kişi için sanal ortam sahneleri tasarlamışlardır. Diş fobisini tedavi etmek için sanal gerçekliğe dayalı terapi yöntemini kullanmışlardır. Sanal gerçekliğe dayalı bu yöntemle yapılan dental tedaviler neticesinde kişilerdeki tedavi esnasında görülen anksiyete durumlarında azalma görülmüştür. 14 haftalık çalışma süresi içinde ve 6 aylık takipte 16 kez yapılan ölçümler Posthoc testi ile analiz edilmiştir. Kullanılan ölçekler ile tedavi öncesi, tedavi sonrası ve takip eden süreçte sanal gerçekliğe dayalı maruziyetin ilişkili olduğu görülmüştür [32].

Jiang vd. (2020) diş ağrısı olan 43 kişiye Samsung Gear Sanal Gözlük kullanmışlardır. Çalışma diş tedavisinde kan, enjeksiyon ve yaralanma korkusu çekenler üzerinde yapılmıştır. Çalışmada dental anksiyete durumu başlangıçta, bir hafta sonra ve 3 ay sonra olmak üzere üç aşama olarak takip edilmiştir. Bulgular, tek seanslık sanal gerçekliğe dayalı terapinin enjeksiyon, yaralanma ve bayılma korkularında gelişmeler sağlayabileceğini göstermiştir [33].

Kanzler vd. (2020) Akut ve Kronik ağrı durumu olan 23 kişi için sanal gerçeklik sistemini uygulamışlardır. Teknolojik uygulamalar ile üst ekstremitelerde bozukluklarının hassas ve objektif karakterizasyonunu sağlanması ve elin fonksiyonel durumunu belirlenebilir. Sanal Çivi Yerleştirme Testi (VPIT), üst uzvun yerçikimine karşı aktif kaldırılmasını gerektiren hedefe yönelik görevi sırasında kol ve el hareketlerinin yanı sıra kavrama kuvvetlerini ölçerek bu sınırlamaları gidermeyi sağlayan sanal bir uygulamadır. Çalışmada, VPIT ölçümlerinin fonksiyonel görevlerin yerine getirilmesiyle ilgili kol ve el sensör-motor bozukluklarını karakterize etme yeteneğini değerlendirilmiştir [34].

Ağrı algısı/hissi diğer psikiyatrik hastalık gruplarına göre en az çalışılan psikiyatrik hastalık grubudur. Bu gruba ait makaleler çoğunlukla Pubmed veri tabanlarından elde edilmiş olup inceleme sonuçları kronolojik olarak verilmiştir. En sık çalışılan ağrı algısı/hissi diş ağrısıdır. Ağrı algısı/hissi üzerine yapılan çalışmalar sanal gerçeklik uygulamaları üzerine odaklanmış olup artırılmış gerçeklik uygulamasına rastlanılmamıştır. Çalışmalar sonuçları bakımından topluca değerlendirildiğinde yapılan sanal gerçeklik uygulamalarıyla katılımcıların diş çekimi esnasındaki ağrı algısı/hissi durumu ile başa çıkmalarına destek olunduğu görülmektedir.

### 3.4. Diğer Mental Bozukluklar (Other Mental Disorders)

Diğer mental bozukluklar hastalık grubuna ait makaleler Science Direct, Pubmed ve Scopus veri tabanlarında yer almakta olup detaylı inceleme sonuçları kronolojik sıra ile verilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde diğer psikiyatrik hastalık gruplarına kıyasla en fazla çalışılan psikiyatrik hastalık grubu olarak öne çıkmaktadır. Çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde Şizofreni, Parkinson ve Bilişsel bozuklukların daha fazla çalışıldığı görülmektedir. Diğer mental bozukluklar grubuna giren hastalıklar üzerine yapılan çalışmalar çoğunlukla sanal gerçeklik çalışmaları iken sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik çalışmalarının birlikte yapıldığı uygulamalar da görülmektedir. Çalışmaların sonuçlarına göre anketler ve hastalığa özgü yapılan sanal gerçeklik ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamaları katılımcıların ihtiyaçlarını bireysel olarak karşılama, yaşam kalitesini artırma ve var olan semptomların azaltılmasını hedeflemektedir. Literatürdeki çalışmalara göre;

Costa vd. (2004) şizofreni olan 4 kişinin sanal gerçeklik ortamını deneyimlemelerini sağlamışlardır. Şizofreni rahatsızlığı bulunan kişilerin günlük aktivitelerini yapmaları için sanal ortamda farklı sahneler tasarlamışlardır. Kullanıcıların sanal ortamda verilen görevleri tamamlamaları istemiştir. Çalışma sonucunda kullanıcıların günlük aktivitelerini daha kolay yapabilmeleri sağlanmıştır [35].

Sorkin vd. (2006) şizofreni olan 60 kişi için sanal gerçeklik sistemi kullanmıştır. Sanal gerçeklik teknolojisini kullanarak çok modlu performansı eşzamanlı olarak inceleme yeteneği, şizofreninin objektif prosedürlerle teşhisi için yeni bir olanak oluşturmuşlardır [36].

Kim vd. (2010) Obsesif-Kompulsif Bozukluk olan 57 kişiye sanal gerçeklik sistemi kullanmıştır. Bu çalışma, Obsesif-kompulsif bozukluğu olan hastalarda sanal gerçeklik ortamı kullanmıştır. Sanal ortamda ofis ve ev olmak üzere sahne tasarımı yapılmıştır. Sanal ortam deneyimleri eğitim, dikkat dağıtma ve ana test olmak üzere 3 aşamadan oluşmaktadır. Eğitim esnasında kişilere sanal ortamda gezinirken doğal davranışları istenmiş olup dikkat dağıtma esnasında katılımcılara ev ortamında yapması gereken bazı görevler verilmiştir. Test aşamasında ise bilgisayar tarafından oluşturulan ses kullanılarak görevi tamamlayıp tamamlamadıkları sorulmuş ve işlem adımlarına geri dönemeyecekleri söylenmiştir. Test aşamasında katılımcılara zaman kısıtlaması konulmamıştır. Görevler esnasında ise kontrol süreleri ve performans değerleri veri tabanına kaydedilmiştir. Veri tabanında yer alan veriler Levene testi ile analiz edilmiştir. 11 OKB katılımcısı gerçek dünyadaki ofis ortamlarını kompulsif olarak kontrol etme dürtüsünü bildirirken 22 OKB katılımcısı ise gerçek dünya ev ortamlarını kompulsif olarak kontrol etme dürtüsünü bildirmiştir. Korelasyon sonucundaki farklılığa göre sonuçta sanal ortam ve davranış ölçütlerini kullanarak OKB semptomlarını değerlendirirken ilgili sanal ortamları kullanmanın önemini vurgulamaktadır [37].

Chang vd. (2013) bilişsel bozukluklar yaşayan 3 kişi için artırılmış gerçeklik aracı (toolkiti) tasarlamışlardır. Çalışma gerçekleştirilen uygulama üzerinden yemek hazırlama ve sipariş oluşturma gibi görevler verilen 3 kişi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Verilen görevleri yapabilme durumları ve süreleri Kolmogorov-Smirnov testi ile analiz edilmiştir. Katılan kişiler de bilişsel olarak zorlu görevlere

girebilme, kendi işlerini bireysel olarak gerçekleştirebilme ve engelli bireyler için yaşam kalitesinin artırıldığı sonucuna ulaşıldığı belirtilmektedir [38].

Hervas vd. (2013) bilişsel bozuklukları bulunan 10 kişi için artırılmış gerçeklik yazılımı kullanmışlardır. Alzheimer semptomları, Asperger semptomları ve yaşa bağlı bilişsel eksiklikler gösteren kişilerin GPS verilerini kullanarak AR ortamında hazırladıkları sistemle kaybolma durumlarını önleyen sistem tasarlamışlardır [39].

Krieger vd. (2013) şizofreni teşhisi konulan 32 kişi üzerinde artırılmış gerçeklik ve sanal gerçekliği birlikte kullanmışlardır. Yürüme bozuklukları ve düşme korkusu olan kişilerin şizofreni hastalığını belirleyen semptomlarla ilişkili olduğu görülmüştür. Sanal gerçekliğe dayalı terapi sistemi ile hastalıkla ilişkili semptomlarda azalma olmuştur [40].

Schall vd. (2013) bilişsel bozukluk durumu olan 20 kişi için artırılmış gerçeklik yazılımı kullanılmıştır. AR yazılımı ile güvenli sürüş için sürücünün görevlerine müdahale etmeden tehlike algılama durumunu artırarak ileri yaşlardaki kişiler için sürücü güvenliğini iyileştirmeyi hedeflemişlerdir [41].

Mirelman vd. (2013) çalışmalarında yer alan 300 kişiyi Kontrol, Bilişsel bozukluk ve Parkinson olmak üzere üç gruba ayırmışlardır. Çalışma, sanal gerçeklikle artırılmış koşu bandı eğitimini birleştiren bir müdahalenin, çeşitli yaşlı yetişkinler grubunda düşme riskini azalttığı, hareketliliği iyileştirdiği ve bilişsel işlevi geliştirdiğini göstermiştir [42].

Calafell vd. (2014) şizofreni olan 12 kişiye üç boyutlu sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmalarını sağlamıştır. Gerçekleştirilen VR uygulamasının sosyal işlev bozukluğunu iyileştirmede etkili olabileceğini gösterilmiştir. VR programının kullanımı, yeni becerilerin hastanın günlük işleyişine genelleştirilmesine katkıda bulunmuştur [43].

Han vd. (2014) şizofreni rahatsızlığı olan 45 kişide Z800 3D sanal gözlüğü kullanmışlardır. Bu çalışmada, şizofreni hastalarında sanal çok taraflı sohbetler sırasında sosyal davranışların özellikleri araştırılmıştır. Sanal ortam avatarları, olumlu ve olumsuz duygu yüklü durumları, dinleme ve konuşma aşamalarını içeren sanal üç taraflı konuşma görevini gerçekleştirmişlerdir [44].

Veling vd. (2016) psikoz teşhisi konulan 55 kişide Sony HMZ-T1 3D sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmışlardır. Kişilerin günlük sosyal stresinin sanal ortamda hazırlanan sahnelerle azaltılması hedeflenmiştir. Sosyal paronaya durum skalası, sosyal ilişkiler anksiyete ölçeği ve sosyal kaygı ölçeği bu çalışmada kullanılmıştır. Toplanan veriler Anova testi ile incelenmiş ve elde edilen bulgular anksiyete seviyelerindeki azalma olduğunu göstermiştir [45].

Silva vd. (2017) şizofreni teşhisi konulan 3 kişide Sony 3D sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmışlardır. Şizofreni rahatsızlığı bulunan kişilerin karşılarında oturan kişilerle yüz yüze görüşme durumları hastaları zorlamaktadır. AR ortamında şizofreni hastalarının daha rahat bir şekilde karşılardaki kişiyle görüşüp sohbet edebildikleri çalışma içerisinde yapılan hastalığa yönelik sorular ile ortaya konulmuştur [46].

Donnari vd. (2019) mental bozukluklar yaşayan 21 kişinin artırılmış gerçeklik ortamını kullanmalarını sağlanmıştır. Artırılmış gerçeklik ortamı sanat terapisi ile birlikte kullanılarak kişilerin kendilerini ve yaratıcılıklarını ifade etmeleri sağlanmıştır. Kişilerin bireysel durumlarını ifade etmelerini ve dijital ortamda karakterler ile etkileşim halinde olmaları sağlanarak kişiye dönük tedavi programlarının oluşturulması hedeflenmiştir [47].

Rohrbach vd. (2019) Alzheimer Hastalığı olan 10 kişi için Microsoft HoloLens ile artırılmış gerçeklik ortamı tasarlamışlardır. Hastaların günlük aktivitelerinden biri olan yeme-içme aktivitesini AR ortamında gerçekleştirebilmeleri çay yapım aktivitesini ise sanal ortamda uygulamaları sağlanmıştır. Sanal ortam ve gerçek ortam arasındaki çay yapımı aşamasında verilen adımları sanal ve gerçek ortamda uygulama süreleri kaydedilmiştir. Kayıt altına alınan veriler Anova yöntemi ile analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen uygulama ile kişilerin günlük aktivitelerini bağımsız olarak yapabilme becerilerinin tekrar kazandırılması sağlanmıştır [48].

Roth vd. (2020) Parkinson hastalığı olan 1 kişiye Oculus Rift sanal gerçeklik gözlüğü ile sanal ortamı deneyimlemesini sağlamıştır. Nörolojik hastalıklarda ortaya çıkan uzaysal öğrenme ve gezinme beynin

sinirsel yapıları bozulduğunda görülmektedir. Bu çalışmada kişilerin uzayla öğrenme ve gezinme durumlarını Morris su labirenti sanal ortamında gerçekleştirilmiştir [49].

Coelho vd. (2020) demans teşhisi konulan 9 kişide Oculus Rift sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmışlardır. 2 hafta boyunca katılımcıların sanal ortamı deneyimlemeleri istenmiştir. Bu çalışmanın bulguları, katılımcıların refahına önemli bir zararın gözlenmediği göz önünde bulundurularak, demanslı kişilerle VR kulaklıkları ve konumların 360 derecelik videoları kullanılarak anıların teşvik edilmesini desteklemektedir [50].

Shin vd. (2021) İnternette oyun oynama bozukluğu olan 50 kişide Oculus Rift sanal gerçeklik gözlüğünü kullanmışlardır. Genç yetişkinler ve ebeveynler arasındaki oyunla ilgili çatışmaları simüle eden ve aile üyeleri arasındaki sorunları uyarlanabilir bir şekilde yönetme etkinliğini test eden bir VR programı geliştirilmiştir. Kişilere uyguladıkları SSQ ve PQ testleri ile de geliştirdikleri sanal ortamı test etmişlerdir [51].

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Çalışmaların içerikleri birlikte değerlendirildiğinde (Tablo 2) çalışmaların yaklaşık %77'si sanal gerçeklik alanında %23'si ise artırılmış gerçeklik alanında yapılmıştır. Hastalığa özgü kullanılan anketlerin kullanıldığı çalışmalar tüm çalışmaların %30'u içermektedir. Bazı çalışmalarda fizyolojik parametrelerden de yararlanıldığını görülmektedir. Fizyolojik parametrelerden yararlanılarak yapılan çalışmalar tüm çalışmalar içerisinde sadece %10'luk kısma denk gelmektedir. Çalışma kapsamında yer alan tüm makaleler ele alındığında psikiyatrik rahatsızlık durumu olarak daha çok fobi üzerinde AR/VR uygulamalarının yapıldığı görülmüştür. Sanal ekipman olarak ise HMD (Head Mounted Display), Oculus Rift, HTC Vice gibi çeşitli modellerde sanal ekipmanların kullanıldığı görülmektedir. İncelenen yayınlarda yer alan bilgilerden yola çıkarak psikiyatrik hastalıkların tedavisinde sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik uygulamalarının tedaviye yardımcı uygulamalar olarak kullanılabilceği görülmektedir. Gerçekleştirilen uygulamaların amacı hastalığın getirdiği semptomları azaltmak ve kişilerin hastalık durumlarını ortadan kaldırmaya yardımcı olarak yaşam kalitesini arttırmaktır.

**Tablo 2.** Mevcut durum değerlendirmesi

<i>Veriler</i>	<i>Nörogelişimsel Bozukluklar</i>	<i>Anksiyete/Fobi</i>	<i>Ağrı Algısı / Hissi</i>	<i>Diğer Mental Bozukluklar</i>
<i>Sanal Gerçeklik Uygulama (Virtual Reality-VR) sayısı</i>	5	14	5	11
<i>Artırılmış Gerçeklik Uygulama (Augmented Reality-AR) sayısı</i>	2	5	-	8
<i>Çalışmaya katılan kişi ortalaması</i>	~37	~87	~29	~40
<i>Fizyolojik parametrelerin dahil olduğu çalışma sayısı</i>	1	2	-	-
<i>Ölçeklerin dahil olduğu çalışma sayısı</i>	3	10	2	2
<i>İstatistik yöntemlerin kullanıldığı çalışma sayısı</i>	4	3	2	4
<i>HMD (Head Mounted Display) kullanan çalışma sayısı (Oculus Rift, HTC Vive vb.)</i>	4	15	5	10

Literatürde yer alan çalışmalar gösteriyor ki sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik uygulamalarının otizmli kişilerde sosyal beceriler, biliş ve işleyiş durumunu geliştirdiği ve uygulanabilir olduğu

[7,10,11,12,13], dikkat eksikliği ve hiperaktivite bozukluğu olan kişilerde dikkat eksikliği durumunda iyileşme gözlemlendiği [8], fobi durumunda sıklıkla sanal gerçeklik gözlüklerinin tercih edildiği görülmekte olup uygulamalara bağlı olarak kişilerin korku ve anksiyete durumlarında azalma olduğu [14-29] görülmektedir. Diğer mental bozukluk durumlarında ise kişilerin günlük aktivitelerini daha kolay yapabilmelerine, yaşam kalitesini artırdığı yapılan çalışmalar ile ortaya koyulmuştur [35,38,48].

Çalışma kapsamında incelenen makalelerden yola çıkarak psikiyatrik hastalıklarda sanal gerçeklik ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamaları ile ilgili bazı eksiklikler tespit edilmiştir. Bunlar;

- Çalışmaya dahil edilen araştırma gruplarının içerisinde sağlıklı bir kontrol grubu çoğu zaman yer almamakta sadece hasta grubu üzerinden çalışmalar tamamlanmaktadır.
- Uzun süreli bir araştırmanın ve alıştırmaların olmadığı çalışmaların kısa periyotlarda tamamlandığı görülmektedir.
- Artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik sistemini kullanan kullanıcıların geri bildirim yapabilmesine olanak sağlanarak holografik animasyonlar, ses ve/veya metin gibi öğelerle sistem üzerinde kişiselleştirme yapabilmelidir [48].
- Çalışmalarda bilişsel testler yapılmakta olup sanal ve/veya artırılmış gerçeklik ortamında bulunma hissi anketlerinden olan ortamda bulunma anketi (Presence Questionnaire, PQ) ve Simülatör rahatsızlığı anketinin (Simulator Sickness Questionnaire, SSQ) yapılmadığı görülmektedir [52].
- Özellikle bilişsel testlerin yanı sıra gerçekleştirilen sanal ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamasının kullanıcılar üzerinde rahatsız edici bir etkisinin olup olmaması durumu SSQ anketi kullanılarak tespit edilmelidir [52].
- Ayrıca yine sanal ortam deneyimleme sonrasında yapılan PQ anketi ile sanal ortamda bulunma hissine de yer verilmesi sanal ortamın etkinliğinin belirlenmesi açısından önemlidir.
- Sanal çevreyi oluşturan görsel parametrelerin yanı sıra işitsel parametreler de kullanılmalıdır. Literatürde yer alan çalışmalar içerisinde işitsel parametrelerin kullanıcıları olumlu ya da olumsuz etki durumlarına değinilmediği görülmüştür. Sanal gerçeklik ortamını kullanımında işitsel öğelerin de etkisini incelemek çalışmalar açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.
- Literatürde yapılan benzer araştırmalar gösteriyor ki çalışmaların çoğunun klinik olmayan örneklemeler üzerinde gerçekleşmesinden ötürü klinik örneklemeler üzerinde gerçekleştirilecek çalışmaların etkinliğinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Her danışan için programda bireysel esnekliğin olmaması da sanal uygulama yazılımlarının eksikliği olarak nitelendirilmektedir [53].
- Sanal ve/veya artırılmış gerçeklik uygulamalarının psikiyatrik bozukluklara etkisi ile ilgili ülkemizde yapılan çalışma sayılarının az olması bu alanda çalışma sayılarının artırılması yönünde dikkat çekilmektedir [54].

Literatürdeki çalışmalar AR/VR uygulamaların psikolojik rahatsızların tedavinde yardımcı bir ekipman olduğunu göstermektedir. Tedaviye destek amacı ile kullanılacak bu tarz uygulamalarda toplum kültürel yapısı, kullanıcının yaş, cinsiyeti ve uygulamadaki arka plan tasarımı ile avatarların seçimi önemlidir. Bu amaçla bu tarz uygulamaların psikiyatri ve psikoloji uzmanlarının gözetiminde hazırlanmalıdır. Bir diğer hususta literatürdeki uygulamalarda danışanın gelişimini izlemeye olanak verecek testlerin bulunmamasıdır. Test bölümünün bulunması danışanların gelişimini takip edebilmesine olanak sağlayacaktır.

Tüm bunlar değerlendirildiğinde ileride yapılması planlanan çalışmaların belirtilen noktalardaki hususlara yer verilmesi çalışmalar açısından önemlidir. İncelenen çalışmalardaki eksikliklerin tespiti ileride artırılmış gerçeklik ve/veya sanal gerçeklik çalışmaları yapacak araştırmacılara yol gösterici nitelikte olması beklenmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cortese, S., (2016), Attention-Deficit Hyperactivity Disorder and Autism Spectrum Disorder, In Psychiatric Symptoms and Comorbidities in Autism Spectrum Disorder Springer, Cham., (pp. 79-91).

- [2] Azuma, R., Bailiot, Y., (2001), Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., and MacIntyre, B., Recent advances in augmented reality. *Comput. Graph.*, 25, doi:10.1109/38. 963459, 1–15.
- [3] Aksoy, U. M., (2019), Nörogelişimsel Bozukluklar: Bir Ağacın Farklı Dalları. *İstanbul Kanuni Sultan Süleyman Tıp Dergisi*, 11(ek), 1-4.
- [4] Mantar, A., Yemez, B., & Alkın, T., (2011), Anksiyete duyarlılığı ve psikiyatrik bozukluklardaki yeri. *Türk Psikiyatri Dergisi*, 22(3), 187-193.
- [5] Tütüncü, R., & Günay, H., (2011), Kronik ağrı, psikolojik etmenler ve depresyon/Chronic pain, psychological factors and depression. *Dicle Tıp Dergisi*, 38(2), 257.
- [6] Välimäki, M., Hätönen, H. M., Lahti, M. E., Kurki, M., Hottinen, A., Metsäranta, K., ... & Adams, C. E., (2014), Virtual reality for treatment compliance for people with serious mental illness. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (10).
- [7] Kandalaft, M. R., Didehbani, N., Krawczyk, D. C., Allen, T. T., Chapman, S. B., (2013), Virtual reality social cognition training for young adults with high-functioning autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 43(1), 34-44.
- [8] Díaz-Orueta, U., Garcia-López, C., Crespo-Eguílaz, N., Sánchez-Carpintero, R., Climent, G., Narbona, J., (2014), AULA virtual reality test as an attention measure: Convergent validity with Conners' Continuous Performance Test. *Child Neuropsychology*, 20(3), 328-342.
- [9] Lin, C. Y., Chang, Y. M., (2015), Interactive augmented reality using Scratch 2.0 to improve physical activities for children with developmental disabilities. *Research in developmental disabilities*, 37, 1-8.
- [10] Newbutt, N., Sung, C., Kuo, H. J., Leahy, M. J., Lin, C. C., Tong, B., (2016), Brief report: A pilot study of the use of a virtual reality headset in autism populations. *Journal of autism and developmental disorders*, 46(9), 3166-3176.
- [11] Crowell, C., Sayis, B., Benitez, J. P., Pares, N., (2020), Mixed reality, full-body interactive experience to encourage social initiation for autism: Comparison with a control nondigital intervention. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 23(1), 5-9.
- [12] Antão, J. Y. F. D. L., Abreu, L. C. D., Barbosa, R. T. D. A., Crocetta, T. B., Guarnieri, R., Massetti, T., ... & Monteiro, C. B. D. M., (2020), Use of augmented reality with a motion-controlled game utilizing alphabet letters and numbers to improve performance and reaction time skills for people with autism spectrum disorder. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 23(1), 16-22.
- [13] Newbutt, N., Bradley, R., Conley, I., (2020), Using virtual reality head-mounted displays in schools with autistic children: views, experiences, and future directions. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 23(1), 23-33.
- [14] Gorini, A., Riva, G., (2008), The potential of Virtual Reality as anxiety management tool: a randomized controlled study in a sample of patients affected by Generalized Anxiety Disorder. *Trials*, 9(1), 1-9.
- [15] Botella, C., Bretón-López, J., Quero, S., Baños, R., & García-Palacios, A., (2010), Treating cockroach phobia with augmented reality. *Behavior therapy*, 41(3), 401-413.
- [16] Powers, M. B., Briceno, N. F., Gresham, R., Jouriles, E. N., Emmelkamp, P. M., Smits, J. A., (2013), Do conversations with virtual avatars increase feelings of social anxiety?. *Journal of anxiety disorders*, 27(4), 398-403.
- [17] Rus-Calafell, M., Gutiérrez-Maldonado, J., Botella, C., Baños, R. M., (2013), Virtual reality exposure and imaginal exposure in the treatment of fear of flying: a pilot study. *Behavior modification*, 37(4), 568-590.



- [18] Shiban, Y., Schelhorn, I., Pauli, P., Mühlberger, A., (2015), Effect of combined multiple contexts and multiple stimuli exposure in spider phobia: A randomized clinical trial in virtual reality. *Behaviour research and therapy*, 71, 45-53.
- [19] Botella, C., Pérez-Ara, M. Á., Bretón-López, J., Quero, S., García-Palacios, A., & Baños, R. M., (2016), In vivo versus augmented reality exposure in the treatment of small animal phobia: a randomized controlled trial. *PloS one*, 11(2), e0148237.
- [20] Shiban, Y., Peperkorn, H., Alpers, G. W., Pauli, P., Mühlberger, A., (2016), Influence of perceptual cues and conceptual information on the activation and reduction of claustrophobic fear. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 51, 19-26.
- [21] Schweizer, T., Schmitz, J., Plempe, L., Sun, D., Becker-Asano, C., Leonhart, R., Tuschen-Caffier, B., (2017), The impact of pre-existing anxiety on affective and cognitive processing of a Virtual Reality analogue trauma. *Plos one*, 12(12), e0190360.
- [22] Tsai, C. F., Yeh, S. C., Huang, Y., Wu, Z., Cui, J., Zheng, L., (2018), The effect of augmented reality and virtual reality on inducing anxiety for exposure therapy: a comparison using heart rate variability. *Journal of Healthcare Engineering*.
- [23] Yeh, S. C., Li, Y. Y., Zhou, C., Chiu, P. H., Chen, J. W., (2018), Effects of virtual reality and augmented reality on induced anxiety. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(7), 1345-1352.
- [24] Brás, S., Soares, S. C., Cruz, T., Magalhães, T., Marques, B., Dantas, C., ... & Fernandes, J. M., (2018), The feasibility of an augment reality system to study the psychophysiological correlates of fear-related responses. *Brain and behavior*, 8(9), e01084.
- [25] Martens, M. A., Antley, A., Freeman, D., Slater, M., Harrison, P. J., Tunbridge, E. M., (2019), It feels real: physiological responses to a stressful virtual reality environment and its impact on working memory. *Journal of Psychopharmacology*, 33(10), 1264-1273.
- [26] Freeman, D., Yu, L. M., Kabir, T., Martin, J., Craven, M., Leal, J., ... & Waite, F., (2019), Automated virtual reality (VR) cognitive therapy for patients with psychosis: study protocol for a single-blind parallel group randomised controlled trial (gameChange). *BMJ open*, 9(8), e031606.
- [27] Schwarzmeier, H., Leehr, E. J., Böhnlein, J., Seeger, F. R., Roesmann, K., Gathmann, B., ... & Dannlowski, U., (2020), Theranostic markers for personalized therapy of spider phobia: Methods of a bicentric external cross-validation machine learning approach. *International journal of methods in psychiatric research*, 29(2), e1812.
- [28] Bossenbroek, R., Wols, A., Weerdmeester, J., Lichtwarck-Aschoff, A., Granic, I., van Rooij, M. M., (2020), Efficacy of a virtual reality biofeedback game (DEEP) to reduce anxiety and disruptive classroom behavior: Single-case study. *JMIR mental health*, 7(3), e16066.
- [29] Dibbets, P., (2020), A novel virtual reality paradigm: Predictors for stress-related intrusions and avoidance behavior. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 67, 101449.
- [30] Raghav, K., Van Wijk, A. J., Abdullah, F., Islam, M. N., Bernatchez, M., De Jongh, A., (2016), Efficacy of virtual reality exposure therapy for treatment of dental phobia: a randomized control trial. *BMC oral health*, 16(1), 1-11.
- [31] Niharika, P., Reddy, N. V., Srujana, P., Srikanth, K., Daneswari, V., Geetha, K. S., (2018), Effects of distraction using virtual reality technology on pain perception and anxiety levels in children during pulp therapy of primary molars. *Journal of Indian Society of Pedodontics and Preventive Dentistry*, 36(4), 364.

- [32] Gujjar, K. R., Van Wijk, A., Sharma, R., De Jongh, A., (2018), Virtual reality exposure therapy for the treatment of dental phobia: a controlled feasibility study. *Behavioural and cognitive psychotherapy*, 46(3), 367.
- [33] Jiang, M. Y., Upton, E., Newby, J. M., (2020), A randomised wait-list controlled pilot trial of one-session virtual reality exposure therapy for blood-injection-injury phobias. *Journal of Affective Disorders*, 276, 636-645.
- [34] Kanzler, C. M., Schwarz, A., Held, J. P., Luft, A. R., Gassert, R., Lamercy, O., (2020), Technology-aided assessment of functionally relevant sensorimotor impairments in arm and hand of post-stroke individuals. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 17(1), 1-15.
- [35] da Costa, R. M. E. M., de Carvalho, L. A. V., (2004), The acceptance of virtual reality devices for cognitive rehabilitation: a report of positive results with schizophrenia. *Computer methods and programs in biomedicine*, 73(3), 173-182.
- [36] Sorkin, A., Weinshall, D., Modai, I., Peled, A., (2006), Improving the accuracy of the diagnosis of schizophrenia by means of virtual reality. *American Journal of Psychiatry*, 163(3), 512-520.
- [37] Kim, K., Kim, S. I., Cha, K. R., Park, J., Rosenthal, M. Z., Kim, J. J., ... & Kim, C. H., (2010), Development of a computer-based behavioral assessment of checking behavior in obsessive-compulsive disorder. *Comprehensive Psychiatry*, 51(1), 86-93.
- [38] Chang, Y. J., Kang, Y. S., & Huang, P. C., (2013), An augmented reality (AR)-based vocational task prompting system for people with cognitive impairments. *Research in developmental disabilities*, 34(10), 3049-3056.
- [39] Hervás, R., Bravo, J., & Fontecha, J., (2013), An assistive navigation system based on augmented reality and context awareness for people with mild cognitive impairments. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 18(1), 368-374.
- [40] Krieger, V., Lallart, E., & Jouvent, R., (2013), Bodily manifestations of affects: The example of gait and virtual reality. In *2013 Humaine Association Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction* (pp. 179-184). IEEE.
- [41] Schall Jr, M. C., Rusch, M. L., Lee, J. D., Dawson, J. D., Thomas, G., Aksan, N., & Rizzo, M., (2013), Augmented reality cues and elderly driver hazard perception. *Human factors*, 55(3), 643-658.
- [42] Mirelman, A., Rochester, L., Reelick, M., Nieuwhof, F., Pelosin, E., Abbruzzese, G., ... & Hausdorff, J. M., (2013), V-TIME: a treadmill training program augmented by virtual reality to decrease fall risk in older adults: study design of a randomized controlled trial. *BMC neurology*, 13(1), 1-12.
- [43] Rus-Calafell, M., Gutiérrez-Maldonado, J., Ribas-Sabaté, J., (2014), A virtual reality-integrated program for improving social skills in patients with schizophrenia: a pilot study. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 45(1), 81-89.
- [44] Han, K., Shin, J., Yoon, S. Y., Jang, D. P., Kim, J. J., (2014), Deficient gaze pattern during virtual multiparty conversation in patients with schizophrenia. *Computers in biology and medicine*, 49, 60-66.
- [45] Veling, W., Pot-Kolder, R., Counotte, J., van Os, J., van der Gaag, M., (2016), Environmental social stress, paranoia and psychosis liability: a virtual reality study. *Schizophrenia bulletin*, 42(6), 1363-1371.
- [46] Silva, R. D. D. C., Albuquerque, S. G., Muniz, A. D. V., Ribeiro, S., Pinheiro, P. R., Albuquerque, V. H. C., (2017), Reducing the schizophrenia stigma: a new approach based on augmented reality. *Computational intelligence and neuroscience*.

- [47] Donnari, S., Canonico, V., Fatuzzo, G., Bedetti, C., Marchiafava, M., Menna, M., Elisei, S., (2019), New technologies for art therapy interventions tailored to severe disabilities. *Psychiatria Danubina*, 31(Suppl 3), 462-466.
- [48] Rohrbach, N., Gulde, P., Armstrong, A. R., Hartig, L., Abdelrazeq, A., Schröder, S., ... & Hermsdörfer, J., (2019), An augmented reality approach for ADL support in Alzheimer's disease: a crossover trial. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 16(1), 1-11.
- [49] Roth, D., Purps, C. F., & Neumann, W. J., (2020), A Virtual Morris Water Maze to Study Neurodegenerative Disorders. In 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct) (pp. 141-146). IEEE.
- [50] Coelho, T., Marques, C., Moreira, D., Soares, M., Portugal, P., Marques, A., ... & Fernandes, L., (2020), Promoting Reminiscences with Virtual Reality Headsets: A Pilot Study with People with Dementia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9301.
- [51] Shin, Y. B., Kim, J. J., Kim, H., Kim, S. J., Eom, H., Jung, Y. H., Kim, E., (2021), Managing Game-Related Conflict with Parents of Young Adults With Internet Gaming Disorder: Development and Feasibility Study of a Virtual Reality App. *JMIR serious games*, 9(1), e22494.
- [52] Cieślik, B., Mazurek, J., Rutkowski, S., Kiper, P., Turolla, A., & Szczepańska-Gieracha, J., (2020), Virtual reality in psychiatric disorders: a systematic review of reviews. *Complementary Therapies in Medicine*, 102480.
- [53] Akdeniz, S., Zeynep, A. H. Ç. I., & Yumuşak, S. Sanal Gerçeklik ve Psikoterapide Kullanımı. *Karatay Sosyal Araştırmalar Dergisi*, (4), 1-20.
- [54] Özer, Ö., & Yöntem, M. K. (2019). Sosyal anksiyeteye müdahalede teknolojik bir araç: Sanal gerçeklik. *Psikiyatri Hemşireliği Dergisi*, 10(4), 296-301.



## Estimation of Discharge Coefficient of the Trapezoidal Broad Crested Weir Flow Using Support Vector Machines

Oğuz ŞİMŞEK<sup>1,\*</sup>  Veysel GÜMÜŞ<sup>1</sup>  Abdulkadir ÖZLÜK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Harran University Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Şanlıurfa/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 30/04/2021  
Revision: 22/06/2021  
Accepted: 07/09/2021

#### Highlights

- The  $C_d$  values from 88 experiments are used.
- The  $C_d$  coefficient estimated by three different kernel functions.
- Downstream and upstream slopes are important in the estimation of the  $C_d$  coefficient.
- The  $SVM_{Gau}$  method can be used to estimate the  $C_d$  coefficient

#### Keywords

Discharge coefficient  
Trapezoidal broad crested weir  
Support vector machine  
Kernel function

In this study, a total of 88 weir head ( $H_0$ ) of the trapezoidal broad crested weir with different upstream and downstream slopes are experimentally measured and discharge coefficient ( $C_d$ ) values are calculated according to the weir characteristics. It is observed that the  $C_d$  value decreased with the increase of  $H_0/L$  and  $\epsilon$  values, but the amount of decrease is directly related to the upstream and downstream slopes (Figure A).

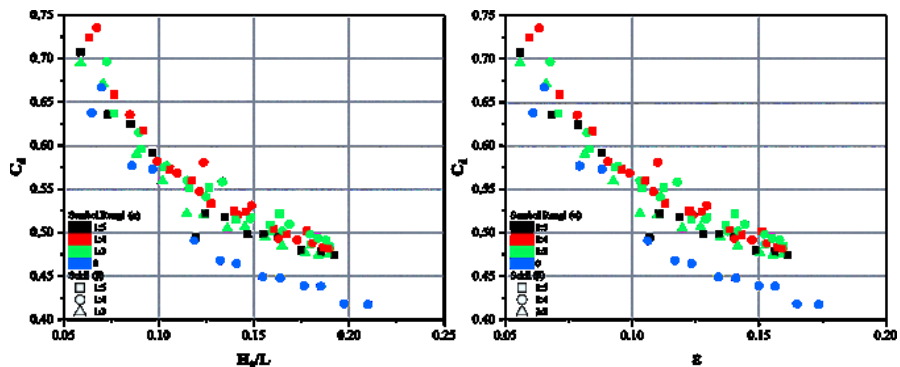


Figure A. Variation of discharge coefficient with  $H_0/L$  and  $\epsilon$

**Purpose:** This study aims to estimate the  $C_d$  with Support Vector Machines (SVM) regression methods. The  $C_d$  values are estimated using Linear ( $SVM_{Lin}$ ), Polynomial ( $SVM_{Pol}$ ) and Gaussian ( $SVM_{Gau}$ ) kernel functions in the SVM method with different input combinations.

**Theory and Methods:** The  $C_d$  values are calculated using the approach suggested by Hager and Schwalt (1994) according to experimentally measured parameters, and these values are estimated with 3 different kernel functions of the SVM method.

**Results:** It has been determined that  $H_0/L$  and upstream slope are effective parameters in the success of the models, and the addition of downstream slope as a third parameter increases the model success.

**Conclusion:** According to all performance criteria, Mean Square Error (MSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) and  $R^2$ , it is determined that the  $SVM_{Gau}$  is more successful than the  $SVM_{Pol}$  and  $SVM_{Lin}$  to estimate the  $C_d$  values for the trapezoidal broad crested weir.



## Discharge Coefficient of the Trapezoidal Broad Crested Weir Flow Using Support Vector Machines

Oğuz ŞİMŞEK<sup>1,\*</sup> Veysel GÜMÜŞ<sup>1</sup> Abdulkadir ÖZLÜK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa/Türkiye

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 30/04/2021  
Düzeltilme: 22/06/2021  
Kabul: 07/09/2021

### Keywords

Discharge Coefficient  
Trapezoidal Broad  
Crested Weir  
Support Vector Machine  
Kernel function

### Anahtar Kelimeler

Debi Katsayısı  
Trapez Geniş Başlıklı  
Savak  
Destek Vektör Makineleri  
Çekirdek Fonksiyon

### Abstract

Weirs are the oldest and most practical structures used to control, regulate, and measure flow in rivers or open channels. The ratio of the actual discharge, smaller than the theoretical discharge due to the separation zone and boundary layer development, to the theoretical discharge is defined as the discharge coefficient ( $C_d$ ).  $C_d$  values are depended on the hydraulic properties of the open channel flow and the type and geometric properties of the weir. In this study, a total of 88 weir head ( $H_0$ ) of the trapezoidal broad crested weir with different upstream and downstream slopes are experimentally measured and  $C_d$  values are calculated according to the weir characteristics. Calculated  $C_d$  values are estimated by using eight different input combinations with the dimensionless parameters. Three different kernel functions (Linear, Polynomial and Gaussian) of Support Vector Machines method are used. To determine the performance of the models, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), the coefficient of determination ( $R^2$ ), the coefficient of Nash-Sutcliffe Model Efficiency (NSE) and Percent Bias (PBIAS) values are employed. As a result of the study, the Gaussian kernel function is the most successful model and the input combination is  $H_0/L$  ( $L$  as crest height),  $\epsilon (H_0/(H_0+L))$ , upstream slope ( $\alpha$ ) and downstream slope ( $\beta$ ) parameters are found to be most successful model to estimate  $C_d$  values.

### Trapez Geniş Başlıklı Savakların Debi Katsayısının Destek Vektör Makineleri ile Tahmini

#### Öz

Savaklar, akarsularda veya açık kanallarda akımı kontrol etmek, düzenlemek ve akımın debisini ölçmek üzere kullanılan en eski ve pratik yapılardır. Akımda meydana gelen ayrılma bölgesi ve sınır tabası gelişiminden kaynaklı olarak teorik debiden daha küçük olan gerçek debinin, teorik olarak hesaplanan debiye oranı debi katsayısı ( $C_d$ ) olarak tanımlanmaktadır.  $C_d$  debi katsayısı, açık kanal akımının hidrolik özelliklerine ve savak yapısının türüne ve geometrik özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada, farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savak akımına ait toplam 88 savak yükü değeri ( $H_0$ ) deneysel olarak ölçülmüş ve savak özelliklerine göre  $C_d$  değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan  $C_d$  değerleri, boyutsuz parametreler yardımıyla oluşturulan sekiz farklı girdi kombinasyonu ile Destek Vektör Makineleri yöntemindeki üç farklı çekirdek fonksiyonu (Lineer, Polinom ve Gaussian) kullanılarak tahmin edilmiştir. Oluşturulan modellerin performansını belirlemek için Karekök Ortalama Karesel Hata (KOKH), Ortalama Mutlak Yüzde Hata (OMYH), belirlilik katsayısı ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE) ve Yüzde Sapma (PBIAS) değerleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, Gaussian çekirdek fonksiyonunun en başarılı model olduğu ve girdi kombinasyonu olarak savak yükü ( $H_0$ ) ve kret uzunluğu ( $L$ ) olmak üzere,  $H_0/L$ ,  $\epsilon (H_0/(H_0+L))$ , savak memba eğimi ( $\alpha$ ) ve savak mansap eğimi ( $\beta$ ) parametrelerinin kullanıldığı kombinasyonun  $C_d$  değerini tahmin etmede başarılı model olduğu belirlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Savaklar, akarsular ve açık kanallarda akımın debisini ve seviyesini kontrol etmek üzere inşa edilen hidrolik yapılardır. Savakların akım alanına inşa edilmesiyle memba bölgesinde su seviyesi artmakta, böylece

ihtiyaç duyulan suyun alınması ve yönlendirilmesi kolaylıkla yapılabilmektedir. Savaklar, geometrisine göre ogee, piyano, geniş başlıklı (dikdörtgen, eğrisel, trapez, üçgen) ve keskin kenarlı (dikdörtgen, üçgen, trapez) vb. olarak sınıflandırılmaktadır. Bu savak türleri arasında geniş başlıklı savaklar oldukça yaygın kullanımı olan ve kendi içinde uzun veya kısa başlıklı olarak adlandırılan savak türüdür. Bu savak türünün belirlenmesinde kret uzunluğunun (L), savak yüküne (H) oranı belirleyici bir parametredir ( $L/H > 1.5$  ise uzun,  $L/H < 1.5$  ise kısa) [1].

Savakların akım alanına inşa edilmesiyle açık kanal akımında rejim değişikliği meydana gelmekte ve geniş başlıklı savak kretinde kritik kesitin oluşmasıyla, akımın hızı ve debisi hesaplanabilmektedir. Akımın debisinin hesaplanması, suyun kullanım miktarının belirlenmesi için oldukça önemlidir. Savak yapısının özelliklerine bağlı olarak savak memba ve mansap bölgelerinde veya geniş başlıklı savak kretinde ayrılmalar meydana gelebilmektedir. Ayrıca, kanal tabanı üzerinde ilerleyen akım, savak yapısının etkisine girmesiyle yeni bir sınır tabakası gelişimi başlamakta ve eğri yörüngeli akım durumu oluşabilmektedir. Teorik olarak savaklara ait debinin hesaplanmasında gerçek modellemede akımda meydana gelen değişiklikler ihmal edilen kabuller yapılmaktadır. Teorik olarak hesaplanan debi, ihmal edilen özellikler nedeniyle gerçek debi değerinden büyük olmaktadır. Gerçek debi değerinin hesaplanabilmesi için teorik debinin bir katsayı ile çarpılması gerekmektedir. Gerçekte kullanılan debi miktarını hesaplamak için oldukça önemli olan bu katsayı, debi katsayısı ( $C_d$ ) olarak adlandırılmaktadır. Farklı savak tiplerine ait debi katsayısının ampirik formüllerle hesaplanmasına yönelik birçok çalışma literatürde bulunmaktadır [2-5]. Bu çalışmalarda genel olarak farklı savak tiplerine ait debi katsayısının değişim aralıklarının verildiği dikkat çekmektedir. Çalışmalarda trapez savaklarla ilgili olarak araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneylere bağlı olarak  $C_d$  katsayısı farklı akım ve/veya savak özelliklerine bağlı boyutsuz parametrelere bağlı olarak ampirik formüller önerilmiştir. Bunun yanında, son yıllarda farklı savaklara ait debi katsayısının tahmin edilmesi için gelişmiş makine öğrenme yöntemleri oldukça sık kullanılmakta ve oluşturulan modellerde genellikle debi katsayısına etki eden parametreler boyutsuzlaştırılarak girdi parametresi olarak değerlendirilmektedir [6-10]. Bileşik geniş başlıklı dikdörtgen savağın debi katsayısını belirlemek üzere çok sayıda deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kret uzunluğunun ve savak yüksekliğinin debi katsayısına olan etkisini araştırdıkları bu çalışmada, deneysel olarak elde edilen debi katsayısı sonuçlarını boyutsal analize dayalı çoklu regresyon denklemleri kullanılarak elde edilmiş ve bu elde edilen sonuçlar, bu yöntemlerin uygulanabilirliğini, yeteneğini ve doğruluğunu araştırmak için genetik programlama (GP) ve yapay sinir ağı (YSA) teknikleriyle de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda kriter olarak belirleme katsayısı ( $R^2$ ) ve kök ortalama kare hatası (KOKH) değerleri kullanılmış ve karşılaştırılma sonucunda, YSA yönteminin debi katsayısının belirlenmesinde GP yöntemine kıyasla daha az başarılı olduğu görülmüştür. GP yöntemiyle elde edilen performans ölçütlerinin oldukça yüksek olduğu ve  $R^2$  değerinin 0.952 olduğu belirlenirken, KOKH değerinin ise 0.065 olduğu belirlenmiştir [11]. Memba yüzü yuvarlatılmış dikdörtgen geniş başlıklı savağın debi katsayısını farklı akım durumlarında deneysel modellemelerle araştırılmıştır. Geniş başlıklı dikdörtgen savağın debi katsayısının memba bölgesindeki H, L ve kanal genişliğiyle (b) ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Memba yüzü yuvarlatılmış dikdörtgen geniş başlıklı savakların deşarj katsayısını hesaplamak için boyutsal analiz konseptine dayalı çoklu regresyon analizi denklemleri geliştirilmiş ve geniş başlıklı savaklar üzerinden deşarj hesaplamak için deşarj katsayısı denklemi kullanılmıştır. Ölçülen değerler ile önerilen denklem kullanılarak hesaplanan değerler arasındaki uyumun oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, kritik altı akım koşullarında yuvarlatılmış dikdörtgen geniş başlıklı savakların debi katsayısının belirlenmesi için güvenle kullanılacak bir denklem önerilmiştir [12]. Basamaklı dolu savakların debi katsayısının belirlenmesi için Gen İfade Programlama (Gen Expression Programming- GEP) ve Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine-SVM) yöntemlerinde girdi olarak nap ve sıyırma akış rejimi bölgesine ait boyutsuz geometrik ve hidrolik parametreler kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerin her ikisinin de kademeli dolusavak debi katsayısının tahmin edilmesinde yüksek  $R^2$  ve düşük hata oranlarına sahip olduğu belirlenmiş, ancak debi katsayısının belirlenmesinde yüksek performans, basit ve açık denklemin çıkarılması nedeniyle GEP modelinin kullanılması önerilmiştir. Ayrıca, nap akışındaki  $Fr_1$  ve  $H_0/y_1$  parametrelerinin ve sıyırma akışındaki  $Fr_1$  ve  $Re$  parametrelerinin, kademeli dolusavak deşarj katsayısının modellenmesinde en önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir ( $Fr$  Froude sayısı,  $Re$  Reynolds sayısı,  $H_0$  toplam savak yükü,  $y_1$  memba su derinliği) [13]. Yan savakların debi katsayısını belirlemek üzere savak uzunluğu, savak yüksekliği, yakınsama açısı ve mansap kanal genişliği parametreleri değişken kabul edilerek 248 adet deney gerçekleştirilmiştir. Debi katsayısının tahmin edilmesinde MATLAB programı

yardımıyla üç farklı yapay sinir ağı modeli ve geometrik ve hidrolik özellikler boyutsuzlaştırılarak girdi parametresi olarak kullanılmıştır. Debi katsayısının tahmininde 4 farklı girdi kombinasyonunda, bulanık mantık sinir ağlarının (ANFİS) kullanılan diğer modellere kıyasla en az hataya sahip olduğu ve debi katsayısını %99.8 doğrulukta tahmin ettiği belirtilmiştir [14]. Dikdörtgen keskin kenarlı savağın debi katsayısını tahmin etmek için geleneksel yöntemlere kıyasla daha az zaman alan ve geniş uygulama alanına sahip makine öğrenme modelleri, YSA, SVM ve aşırı öğrenme makinesi (Extreme Learning Machine-ELM) yöntemleri kullanılmıştır. Modellerin başarısının değerlendirilmesinde istatistiksel kriterler kullanılmış ve üç farklı girdi kombinasyonunda debi katsayısı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Farklı yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, tahminde kullanılan yöntemlerin genel olarak başarılı olmasının yanında SVM modelinin biraz daha iyi performans sergilediği belirlenmiştir. Bu modelde elde edilen maksimum ve ortalama bağıl hatanın sırasıyla %5.44 ve %0.99 olduğu, belirleme katsayısı ve ortalama kare hata değerlerinin ise sırasıyla 0.95 ve 0.01 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, elde edilen bulgulardan makine öğrenim modellerinin debi katsayısının tahmin etmede başarılı olduğu vurgulanmıştır [3]. Bu çalışmalardan da görüleceği üzere farklı savak tiplerine ait debi katsayısının belirlenmesine yönelik hem deneysel hem de teorik birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, debi katsayısının tahmin edilmesinde farklı girdi kombinasyonlarıyla çeşitli yöntemlerin başarısı birçok başarı ölçütü kullanılarak araştırılmaktadır.

Bu çalışmada, farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savağa ait debi katsayısı deneysel olarak farklı akım durumları için elde edilmiştir. Savak özellikleri ve akım durumuna göre debi katsayısına etki eden farklı parametrelerin girdi olarak kullanıldığı yapay zekâ yöntemleriyle debi katsayısının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Farklı savak ve akım durumlarından bağımsız olarak geliştirilen tahmin modellerinin kullanıcılar tarafından pratik olarak kullanılması için girdi kombinasyonlarında akım ve savak özellikleri boyutsuz olarak kullanılmıştır. Yapay zekâ yöntemlerinin debi katsayısını tahmin etmedeki başarısı farklı başarı ölçütleriyle belirlenmiş ve farklı kombinasyonlarında kullanılan tahmin modellerinin sonuçları değerlendirilmiştir.

## 2. DENEYLER (EXPERIMENTS)

Bu çalışmada, farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez geniş başlıklı savağın debi katsayısının belirlenmesi için deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Harran Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Hidrolik Laboratuvarında bulunan dikdörtgen kesitli açık kanal modelinde yapılmıştır (Şekil 1). Bu açık kanal modelinin uzunluğu 4 m, genişliği (b) ve yüksekliği 0.35 m'dir. Trapez geniş başlıklı savakla etkileşim halinde olan akımın derinliği 0.1 mm hassasiyetine sahip dijital limnometreyle, akım debisi ise kanal giriş bölgesindeki boru üzerinde bulunan 0.01 m<sup>3</sup>/saat hassasiyetli ultrasonik debi metre kullanılarak ölçülmüştür. Deneyler gerçekleştirilirken farklı zaman adımlarında çok sayıda debi ve yükseklik okuması yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak elde edilen ortalama değerler debi katsayısının hesabında kullanılmıştır.

Trapez geniş başlıklı savak yapısı modüler olarak tasarlanmış olup dikdörtgen ve üçgen elamanlar kullanılarak farklı eğimlerin elde edilmesi pratikleştirilmiştir. Trapez savağın teşkil edilmesinde kullanılan dikdörtgen parça, açık kanal içerisine kanal başlangıcından itibaren 1.40 m uzağa yerleştirilmiştir. Böylelikle, kanal girişinden itibaren akımın düzenli olması sağlanmıştır. Şekil 2'de, deneysel çalışmada kullanılan farklı eğimlere sahip trapez savakların geometrik özellikleri verilmiştir. Şekildeki L savak kret uzunluğunu, P savak yüksekliğini,  $\alpha$  memba yüz eğimini,  $\beta$  mansap yüz eğimini, h savak memba bölgesindeki su derinliğini ve  $H_0$  toplam savak yükünü ( $h+V^2/2g$ , V memba bölgesindeki ortalama akım hızı, g yer çekim ivmesi) ifade etmektedir. Savak kret uzunluğu ve yüksekliği sabit alınmış olup bu değerler sırasıyla 0.3 m ve 0.1 m'dir. Şekilden de görüleceği üzere  $\alpha$  açısı 14.07° ile 90° aralığında yani  $m:n_1$  değeri dik olan kısım dışında, 1:3, 1:4 ve 1:5,  $\beta$  ise 14.7° ile 26.57° aralığında yani  $m:n_2$  değeri 1:3, 1:4 ve 1:5 olmaktadır. Memba bölgesinde su derinliği  $0.0164 \text{ m} \leq h \leq 0.0602 \text{ m}$  değişirken, savak yükü ise  $0.0166 \text{ m} \leq H_0 \leq 0.0629 \text{ m}$  aralığında değişmekte olup, savak genişliği (b) ise tüm deneylerde 0.35 m'dir. Savak yükünün, savak kreti ile olan ilişkisini tanımlayan  $\epsilon$  ifadesi ise  $H_0/(H_0+L)$  şeklinde hesaplanmaktadır.

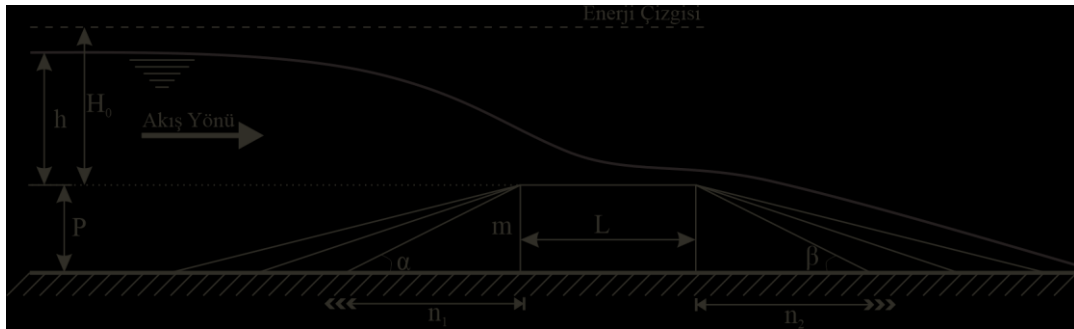


*Şekil 1. Deney düzeneği*

Laboratuvar ortamında Şekil 2’de verilen savak modellerinde 88 adet ölçüm gerçekleştirilmiş ve bu deneysel veriler kullanılarak Denklem 1’de verilen debi katsayısı hesaplanmıştır [15]. Farklı savak tiplerine ait hesaplanan debi katsayısının 0.28 ile 0.57 aralığında değiştiği belirlenmiştir.

$$C_d = \frac{Q_{\text{gerçek}}}{b\sqrt{2gH_0^3}}$$

1

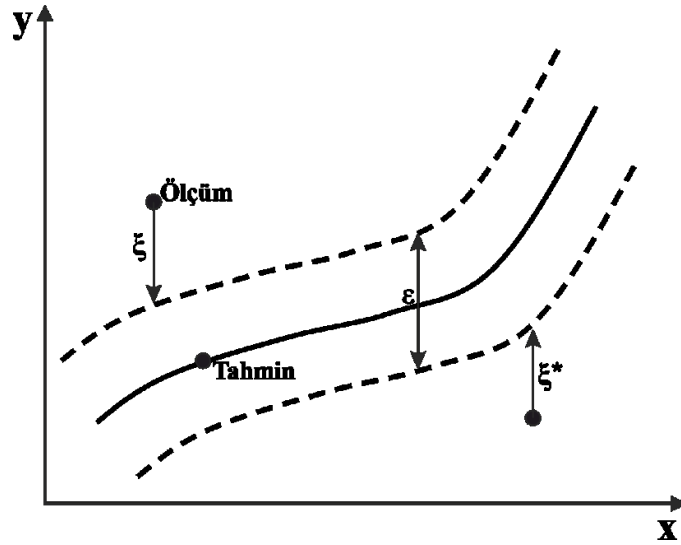


*Şekil 2. Trapez geniş başlıklı savakların geometrik özellikleri*

### 3. YÖNTEMLER (METHODS)

Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine- SVM), hem sınıflandırma hem de regresyon için kullanılabilen bir makine öğrenme modelidir [16, 17]. Sınıflandırma, regresyon, dönüştürme ve yenilik tespiti gibi farklı öğrenme problemlerini çözmede başarılı bir yöntem olarak kabul edilmektedir [18]. SVM teorisi başlangıçta sınıflandırma amacıyla geliştirilmiştir, daha sonra girdi değerlerine göre nicel bir çıktı tahmini yapan SVR yöntemi ortaya çıkmıştır [19]. SVM ile regresyon yöntemi, ilk olarak giriş verilerini çekirdek işlevi tarafından tanımlanan yüksek boyutlu bir özellik uzayına eşler ve eğitim verilerini maksimum marjla ayıran optimum hiper düzlemi elde eder [20]. SVR ise, aykırı değerlerin regresyon denklemleri üzerindeki etkisini en aza indirmek için katsayılar arar; ancak, yalnızca mutlak değerde bazı pozitif sabitlerden daha büyük artıklar kayıp fonksiyonunda dikkate alınır [19, 21].





Şekil 3. Destek vektör makinelerine ait parametreleri

$$|y - f(x)|_{\varepsilon} = \begin{cases} 0, & \text{eğer } |y - f(x)| \leq \varepsilon \\ |y - f(x)| - \varepsilon, & \text{yoksa} \end{cases} \quad 2$$

Çok boyutlu veriler için  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  ( $x_i \in X \subseteq \mathbb{R}^m$ ,  $y_i \in Y \subseteq \mathbb{R}$ ).  $n$  eğitim örnek sayısıdır. Yaklaşılan çok değişkenli regresyon fonksiyonu Denklem 3 olarak yazılabilir [23].

$$f(x) = w \cdot \phi(x) + b \quad 3$$

Burada  $\phi(x)$ , öznitelikten çekirdek uzayına dönüşümdür. SVR, tahmin edilen ve istenen çıktılar arasındaki farkı en aza indirirken epsilon değerini de minimize etmeye çalışmaktadır. Fonksiyon yaklaşım problemi, Denklem 4'te gösterilen bir optimizasyon problemine dönüştürülür:

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad 4$$

$$y_i - w \cdot \phi(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i^* \quad i = 1, \dots, n$$

$$w \cdot \phi(x_i) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \quad i = 1, \dots, n$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0 \quad i = 1, \dots, n$$

Burada,  $\xi_i$  ve  $\xi_i^*$  aykırı değerlere karşı koruma sağlamak ve yumuşak geçiş için ortaya çıkan değerlerdir ( $\xi_i, \xi_i^* \geq 0$ ).  $C$ , hatayı en aza indiren değişken bir ağırlık parametresidir.

Denklem 4'teki ikinci dereceden optimizasyon problemi,  $\lambda$ ,  $\lambda^*$ ,  $\alpha$  ve  $\alpha^*$  değerleri pozitif gerçekte sayılar olmak üzere, Denklem 5'te gösterilen Lagrangian denklemi ile çözülür.

$$\begin{aligned}
L(w, b, \xi_i, \xi_i^*, \lambda, \lambda^*, \alpha, \alpha^*) &= \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \\
&+ \sum_{i=1}^n \alpha_i^* (y_i - w \cdot \phi(x) - b - \varepsilon - \xi_i^*) \\
&+ \sum_{i=1}^n \alpha_i (-y_i + w \cdot \phi(x) + b - \varepsilon - \xi_i) \\
&- \sum_{i=1}^n (\lambda_i \xi_i + \lambda_i^* \xi_i^*)
\end{aligned} \tag{5}$$

Doğrusal olmayan regresyon için, çekirdek fonksiyonları  $k(\dots)$ , ham veriyi daha yüksek bir doğruluk elde etmek için doğrusal hale getirmek üzere daha yüksek boyutlu bir alana eşlemek için kullanılır (Denklem 6'da gösterilmiştir). Fonksiyon yaklaşımı Denklem (7)'de gösterilmektedir.

$$k(x_i, x) = \phi(x_i) \cdot \phi(x) \tag{6}$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_{SV}} (\alpha_i^* - \alpha_i) k(x_i, x) + b \tag{7}$$

Denklem 7'de bulunan çekirdek fonksiyonu teriminin,  $k(x_i, x)$ , tanımlanmasında üç yaklaşım bulunmaktadır, bunlar Lineer, Polinom ve Gaussian çekirdek fonksiyonlarıdır ve sırasıyla Denklem 8-10'da verilmiştir [24].

$$\text{SVM}_{\text{Lin}}: k(x_i, x) = x_i \cdot x \tag{8}$$

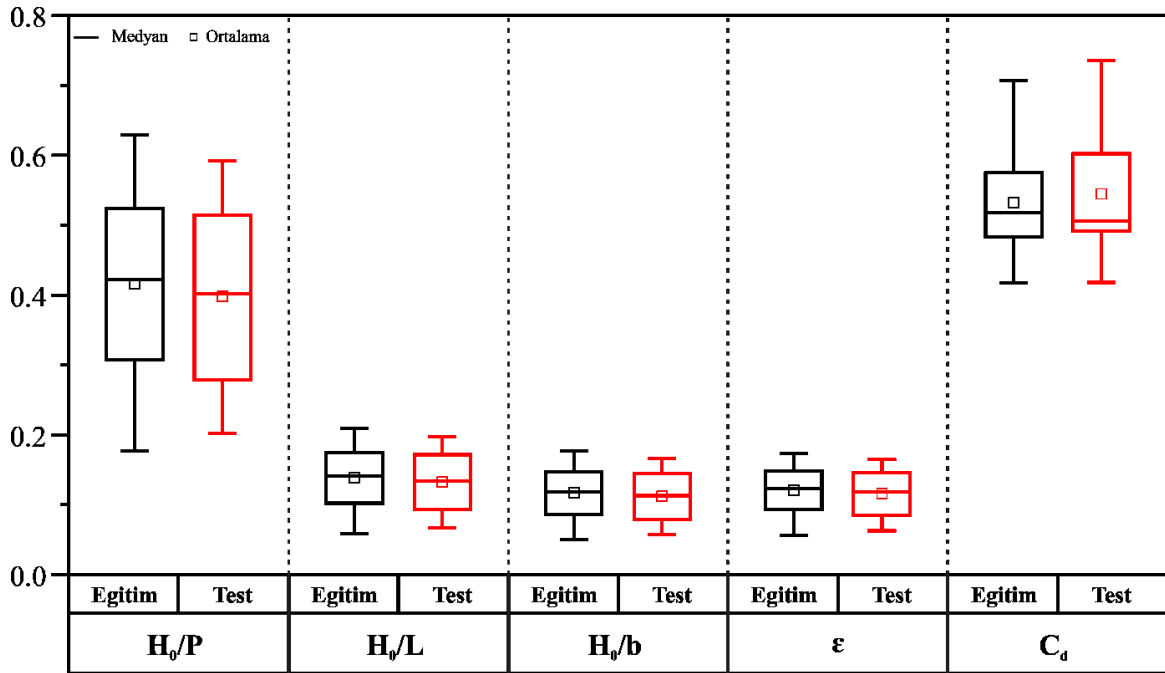
$$\text{SVM}_{\text{Pol}}: k(x_i, x) = (\text{scale} \cdot x_i \cdot x + \text{offset})^{\text{derece}} \tag{9}$$

$$\text{SVM}_{\text{Gau}}: k(x_i, x) = \exp\left(-\sigma \|x_i - x\|^2\right) \tag{10}$$

Analizler, Matlab ile hazırlanmış kodlar ile yapılmış olup, SVM'ye ait çekirdek fonksiyonu içerisindeki parametreler ( $C$ ,  $d$ ,  $r$ , ve  $\gamma$ ) Bayesian optimizasyon algoritması [25] ile belirlenmiştir.

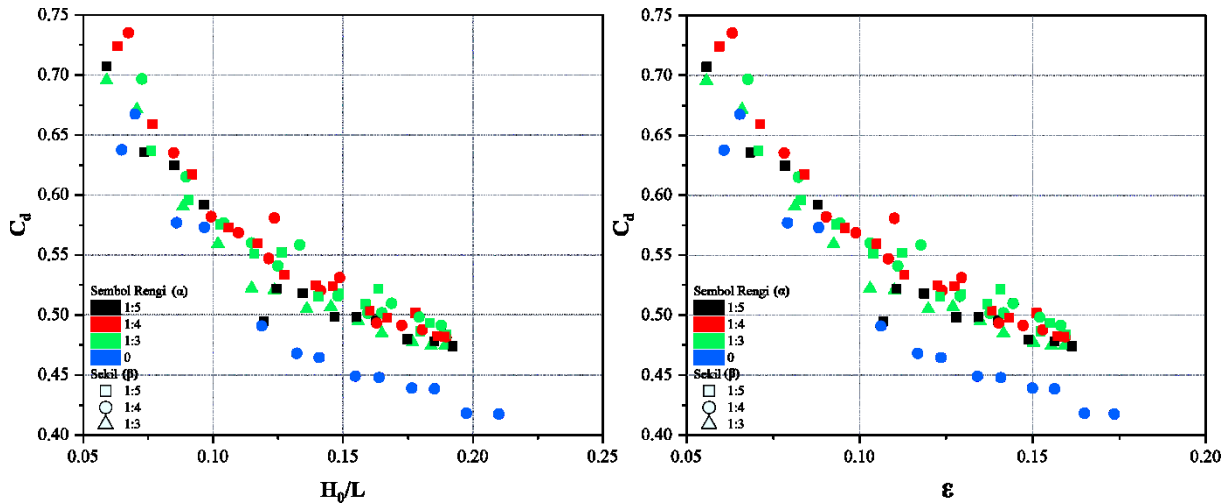
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

$C_d$  değerini tahmin etmek için kurulan modellerde veri setinin rastgele seçilen %68'i eğitim sürecinde, %32'u ise test sürecinde kullanılmıştır. Bu modellerde girdi parametresi olarak kullanılan  $H_o/P$ ,  $H_o/L$ ,  $H_o/b$  ve  $\varepsilon$  değerlerinin ve model çıktı parametresi olan  $C_d$  katsayısının eğitim ve test süreçlerinde ortalama, minimum ve maksimum değerlerinin değişimleri Şekil 4'te verilmiştir. Modellerde dört girdi parametresi ve çıktı parametresi olan  $C_d$ 'ye ait eğitim ve test süreçlerindeki ortalama, minimum ve maksimum değerlerin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Buradan, 88 deneysel parametrenin eğitim ve test süreçlerindeki dağılımının tutarlı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, model çıktı parametresi olan  $C_d$ 'nin eğitim sürecinde elde edilen ortalama değeri ile test sürecinde elde edilen ortalama değeri arasındaki fark da oldukça küçük olmuştur. Böylece, eğitim ve test süreçleri için değerlendirmeye alınan rastgele veri setlerinin uygun olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Model parametrelerinin eğitim ve test sürecindeki değişim miktarları

Debi katsayısının farklı memba ve mansap eğimlerine sahip trapez savakta  $H_0/L$  ve  $\epsilon$ 'a göre değişimi Şekil 5'te verilmiştir. Burada simge renkleri memba eğimi olan  $\alpha$  değerini temsil ederken, simge şekli ise mansap eğimi olan  $\beta$ 'ya göre  $H_0/L$  ve  $\epsilon$  değerlerinin dağılımını vermektedir. Mansap eğimin dik olduğu mavi renkli simge durumunda en düşük  $C_d$  değeri  $\beta=18.43^\circ$ 'de belirlenirken, en yüksek  $C_d$  değeri ise  $\alpha=26.57^\circ$ ,  $\beta=14.04^\circ$ 'te belirlenmiştir.  $H_0/L$  ve  $\epsilon$  değerlerinin artmasıyla  $C_d$  değerinin azaldığı, ancak azalma miktarının doğrudan memba ve mansap eğimleri ile ilişkili olduğu görülmüştür. Bu nedenle,  $C_d$  tahmin modellerinde girdi kombinasyonlarına memba ve mansap eğimleri de eklenmiştir.



Şekil 5. Debi katsayısının  $H_0/L$  ve  $\epsilon$  ile değişimi

Tablo 1'de, SVM yöntemlerinde  $C_d$  katsayısını tahmin etmek üzere oluşturulan sekiz farklı girdi kombinasyonu verilmiştir. Girdi parametresi olarak kullanılan büyüklükler boyutsuz hale getirilerek parametreden bağımsız hale getirilmiştir. İlk dört modelde tek girdi parametresi kullanılarak tahmin modellerinin başarısı değerlendirilmiştir. Daha sonrasında girdi parametre sayısı artırılarak memba ve

mansap eğimlerinin  $C_d$  katsayısının belirlenmesinde etkisi irdelenmiştir. D07 ve D08 kombinasyonlarında ise savağın hem memba hem de mansap eğimleri girdi parametresi olarak kullanılmıştır

**Tablo 1.** Tahmin modellerinde kullanılan girdi kombinasyonları

Model	Girdi	Tahmin
D01	$H_o/P$	$C_d$
D02	$H_o/L$	$C_d$
D03	$H_o/b$	$C_d$
D04	$\varepsilon$	$C_d$
D05	$H_o/L, \alpha$	$C_d$
D06	$H_o/L, \varepsilon$	$C_d$
D07	$H_o/L, \alpha, \beta$	$C_d$
D08	$H_o/L, \varepsilon, \alpha, \beta$	$C_d$

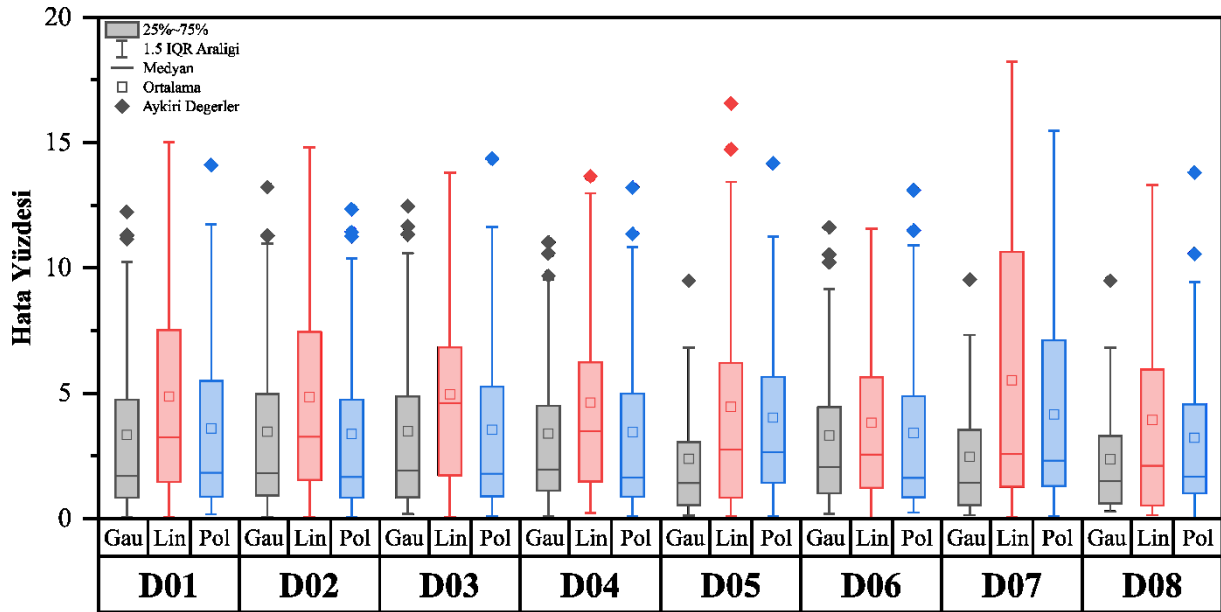
Kullanılan modellerin başarısı, belirlilik katsayısı ( $R^2$ ), karekök ortalama karesel hata (KOKH), ortalama mutlak yüzde hata (OMYH), Nash-Sutcliffe verimlilik katsayısı (Nash-Sutcliffe Efficiency-NSE) ve yüzde sapma (percent bias-PBIAS) değerlerine göre belirlenmiştir.  $R^2$  ve NSE değerinin 1'e, KOKH ve OMYH değerinin ise 0'a yakın olması modelin başarısını ifade etmektedir. PBIAS değerinin  $\pm 10$  değerinden küçük olması da ilgili modelin başarılı olduğunu göstermektedir. SVM yöntemi ile ele alınan üç farklı çekirdek fonksiyonu kullanılarak Tablo 1'de verilen sekiz farklı model için elde edilen  $R^2$ , KOKH, OMYH, NSE ve PBIAS değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Kullanılan tüm modellerin PBIAS değerinin  $\pm 10$  değerinden küçük olduğu yani tüm modellerin yüzde hata cinsinden uygun olduğu değerlendirilmiştir. SVM<sub>Lin</sub> yöntemi kullanılarak eğitim ve test süreçlerinde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, girdi parametresi olarak  $H_o/L$  ve  $\varepsilon$ 'u kullanan D06 modelinin diğer modellere nazaran daha başarılı olduğu görülmüştür. Ancak, D06 modeli girdi parametrelerinin yanında girdi parametresi olarak memba ve mansap eğimlerini kullanan D08 modeli de SVM<sub>Lin</sub> yönteminde D06'a oldukça yakın sonuçlar vermiştir. SVM<sub>Pol</sub> yönteminde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, girdi olarak  $H_o/L$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin kullanıldığı D08'in eğitim periyodunda tüm başarı ölçütlerine göre en başarılı model olduğu ve test sürecinde  $R^2$  değeri 0.9173, KOKH değeri 0.0310 olurken, aynı zamanda OMYH değeri de % 3.2 civarında olmuştur, ancak bu modelde NSE değeri diğer modellere nazaran düşük olmuştur. Bunun yanında, bu yöntemde D08 modelinde eğitim periyodunda test periyoduna göre daha iyi tahminde bulunduğu tabloda verilen değerlerden görülmektedir. SVM<sub>Gau</sub> yöntem sonuçlarına göre ise, test sürecinde, oluşturulan D08 modele ait  $R^2$ , KOKH, OMYH ve NSE başarı ölçütlerinde elde edilen değerlerin, diğer iki yöntemin test sürecinde elde edilmiş olan  $R^2$  ve NSE değerlerinden yüksek, KOKH ve OMYH değerlerinden ise küçük olduğu görülmüştür. Ayrıca, test sürecinde elde edilmiş olan KOKH ve OMYH oldukça düşük olduğu ve D08 modelinde KOKH değerinin 1.03, OMYH değerinin %2.37 ve NSE değerinin ise 0.9391 olarak belirlenmiştir. Böylece performans kriterleri olan  $R^2$ , KOKH ve OMYH parametrelerine göre  $C_d$  değerini tahmin etmede en başarılı yöntem SVM<sub>Gau</sub>, en başarılı modelin de  $H_o/L$ ,  $\varepsilon$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerini girdi olarak kullanan D08 modeli olmuştur. Tüm yöntemlerde  $H_o$ 'ın bir fonksiyonu olan  $H_o/P$ ,  $H_o/L$ ,  $H_o/b$  parametrelerinin tek başlarına girdi olarak alan modeller, ikinci parametrenin girdi olarak kullanıldığı modellere kıyasla daha az başarılı tahminde bulunmuştur. Bu nedenle, bu parametrelerden herhangi biri ile yapılacak tahmin çalışmasında eğer L, b ve P değerleri sabit ise, sonuçlar arasında çok fark olmayacağından herhangi birinin kullanılmasının yeterli olduğu değerlendirilmektedir. Sonuçların genel olarak değerlendirilmesinden,  $C_d$ 'nin tahmin edilmesinde savak memba eğiminin oldukça etkin parametre olduğu görülmüştür.

Tablo 2'de verilmiş olan OMYH değerleri, hataların yani tahmin edilen değerden gerçek değer çıkarılması ve elde edilen sonucun mutlak değerinin gerçek değere bölünmesiyle hesaplanan tüm hata yüzdelilerinin ortalamasını vermektedir. Ancak, Tablo 2'de de görüldüğü gibi, bazı durumlarda KOKH değeri ile OMYH değerleri arasında tam bir uyum olmayabilir. Bunun için değerlerin sadece ortalamasının değil, tamamının değerlendirilebilmesi için hata yüzdelilerinin test sürecindeki her bir yöntem ve model için

dağılımları Şekil 6'da verilmiştir. Bu grafikte çeyreklik açıklığı (IQR), ortalama ve medyan değerleri verilmiştir. 1.5IQR değerinin dışında kalan değerler ise aykırı değer olarak tanımlanmakta ve özellikle tahmin çalışmalarında bu aykırı değerler ortalama hata yüzdesini arttırabilmektedir. Yani, bir değerde çıkan bir anormal değer farkı, tüm modelin başarısız olma olasılığını da arttırmaktadır. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere, SVM<sub>Gau</sub> yönteminde ortaya çıkan hata değerleri daha sınırlı olmakta, bazı modellerde iki ya da üç aykırı değer olması nedeniyle OMYH değerleri nispeten yüksek çıkabilmektedir. Örneğin, SVM<sub>Gau</sub> yöntemindeki D08 modeli ile elde edilmiş olan hata değerlerinin aralığı diğer modellere benzer olsa da bir aykırı değer nedeniyle ortalama, medyan değer üstüne çıkmış ve OMYH değerleri de bu nedenle yüksek olarak belirlenmiştir. Kullanılan yöntemler arasında hata paylarının oluşumu incelendiğinde SVM<sub>Gau</sub> yönteminin diğer yöntemlere kıyasla oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca, SVM<sub>Gau</sub> yönteminde D05 ve D08 modellerinin değişimlerinin benzer olduğu söylenebilir.

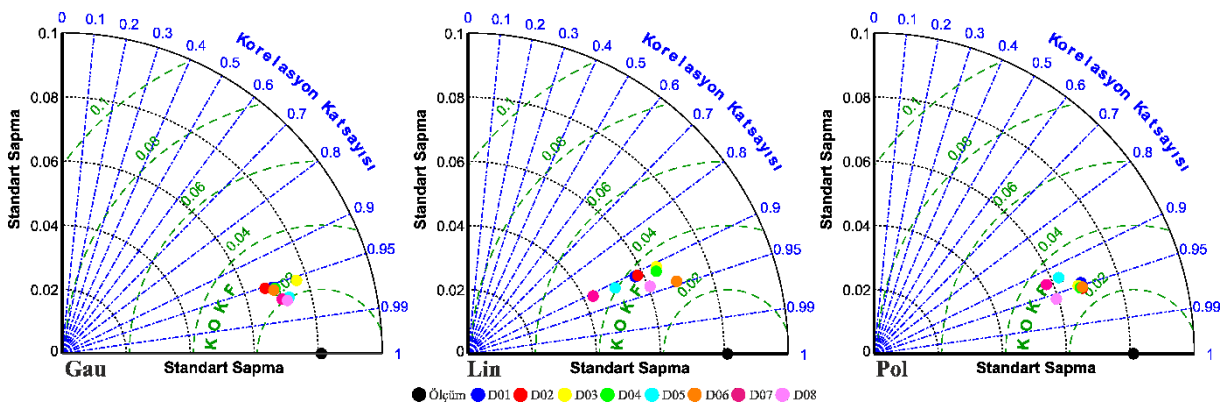
**Tablo 2.** Farklı yöntemler ve modelleriyle elde edilen  $R^2$ , KOKH, OMYH, NSE ve PBIAS değerleri

Yöntem	Kriter	$R^2$		KOKH		OMYH		NSE		PBIAS	
	Model	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
SVM <sub>Lin</sub>	D01	0.8279	0.8246	0.0277	0.0384	3.64	4.87	0.8160	0.7753	0.3262	1.4659
	D02	0.8279	0.8246	0.0275	0.0380	3.64	4.85	0.8186	0.7801	0.2754	1.4023
	D03	0.8279	0.8246	0.0271	0.0364	3.82	4.97	0.8236	0.7979	0.7887	1.8077
	D04	0.8420	0.8386	0.0257	0.0345	3.65	4.63	0.8414	0.8184	0.0641	1.0340
	D05	0.8752	0.8332	0.0275	0.0424	3.29	4.47	0.8185	0.7262	0.9547	2.1894
	D06	<b>0.8841</b>	<b>0.8923</b>	<b>0.0220</b>	<b>0.0279</b>	<b>3.18</b>	<b>3.83</b>	<b>0.8838</b>	<b>0.8817</b>	0.1919	0.6455
	D07	0.8279	0.8246	0.0334	0.0467	4.05	5.52	0.7318	0.6682	0.3811	1.7392
	D08	0.8783	0.8797	0.0244	0.0321	3.31	3.93	0.8563	0.8428	-1.2151	-0.4188
SVM <sub>Pol</sub>	D01	0.8821	0.8949	0.0224	0.0276	3.04	3.60	0.8793	0.8839	-0.6149	-0.1905
	D02	0.8920	0.9102	0.0218	0.0261	2.91	3.37	0.8858	<b>0.8959</b>	-0.9324	-0.5788
	D03	0.8856	0.9004	0.0223	0.0274	2.98	3.54	0.8799	0.8853	-0.8310	-0.4189
	D04	0.8898	0.9070	0.0219	0.0266	2.94	3.45	0.8850	0.8922	-0.7836	-0.3991
	D05	0.8580	0.8552	0.0246	0.0341	3.37	4.03	0.8539	0.8228	0.3430	1.3397
	D06	0.8903	0.9071	0.0219	0.0264	2.94	3.42	0.8846	0.8937	-0.8952	-0.5326
	D07	0.8442	0.8617	0.0268	0.0363	3.09	4.17	0.8266	0.7998	0.8571	1.9119
	D08	<b>0.9249</b>	<b>0.9173</b>	<b>0.0204</b>	<b>0.0310</b>	<b>2.07</b>	<b>3.22</b>	<b>0.8999</b>	0.8540	0.8435	1.6940
SVM <sub>Gau</sub>	D01	0.8926	0.9106	0.0217	0.0259	2.90	3.35	0.8870	0.8981	-0.8939	-0.5965
	D02	0.8907	0.9069	0.0218	0.0270	2.93	3.47	0.8852	0.8893	-0.7528	-0.3682
	D03	0.8950	0.9114	0.0215	0.0259	2.70	3.49	0.8887	0.8976	-0.8932	-1.7369
	D04	0.8916	0.9144	0.0213	0.0250	3.02	3.40	0.8909	0.9047	-0.3086	-0.0195
	D05	0.9680	0.9425	0.0117	0.0205	1.54	2.38	0.9672	0.9362	0.3009	0.5769
	D06	0.8923	0.9176	0.0214	0.0249	2.92	3.32	0.8902	0.9059	-0.5106	-0.3434
	D07	0.9803	0.9428	0.0092	0.0213	1.13	2.46	0.9797	0.9310	0.2892	0.7370
	D08	<b>0.9819</b>	<b>0.9475</b>	<b>0.0088</b>	<b>0.0200</b>	<b>1.03</b>	<b>2.37</b>	<b>0.9812</b>	<b>0.9391</b>	0.2669	0.6315



Şekil 6. Farklı modellere ait test sürecinde elde edilen OMYH değerlerinin değişimi

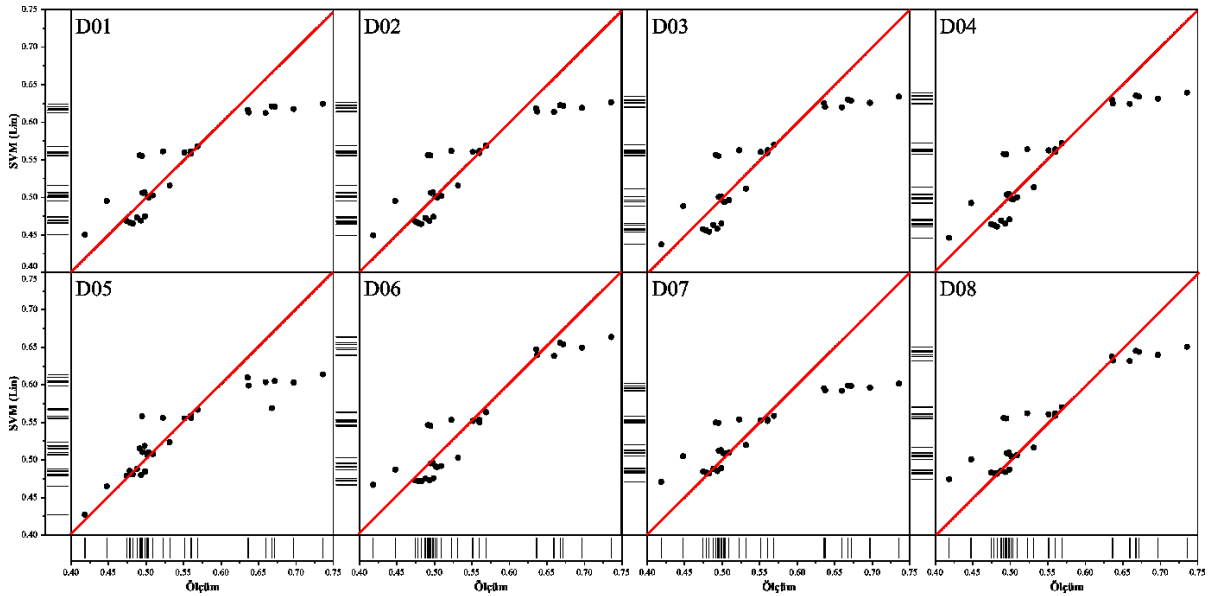
Şekil 7’de, farklı yöntemler ve modellerle elde edilen  $C_d$  değerlerinin Taylor diyagramları verilmiştir. Taylor [26] tarafından önerilen bu diyagramlar ile tahmin modelinin gerçek değerlere göre değerlendirilmesinde üç farklı kriter kullanılmaktadır. Bunlar, korelasyon katsayısı, R, standart sapma ve merkezi Karekök Ortalama Karesel Fark (KOKF) parametreleridir. Bu diyagramlarda, ölçüm verilerine (grafikte siyah nokta olarak verilmiş) ait değerlere yakınsama model performansının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bu diyagramlardan,  $SVM_{Gau}$  yöntemi kullanılarak elde edilen  $C_d$  değerlerinin Karekök Ortalama Karesel Fark (KOKF) değerlerinin 0.02-0.04 aralığında değiştiği, standart sapma değerlerinin 0.06-0.08 aralığında oluştuğu ve korelasyon katsayısının tüm modeller için 0.95 civarında olduğu görülmektedir. D08 modelinin standart sapmasının yaklaşık 0.07 olduğu ve KOKF değerinin ise yaklaşık 0.02 olduğu söylenebilir. Ölçüm değerine ait standart sapma değerinin yaklaşık olarak 0.08 olduğu belirlenmiştir. Lineer yöntemine ait diyagrama göre, tüm modellerin KOKF değerlerinin 0.02-0.05 aralığında oluştuğu, standart sapma değerlerinin ise 0.04-0.08 aralığında olduğu ve korelasyon katsayısının genellikle 0.9 ile 0.95 arasında değiştiği görülmektedir. Polinom yöntemiyle elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bu modele ait sonuçların Lineer yöntemiyle benzer olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7. Farklı model ve yöntemlerle elde edilen  $C_d$  değerlerine ait Taylor diyagramları

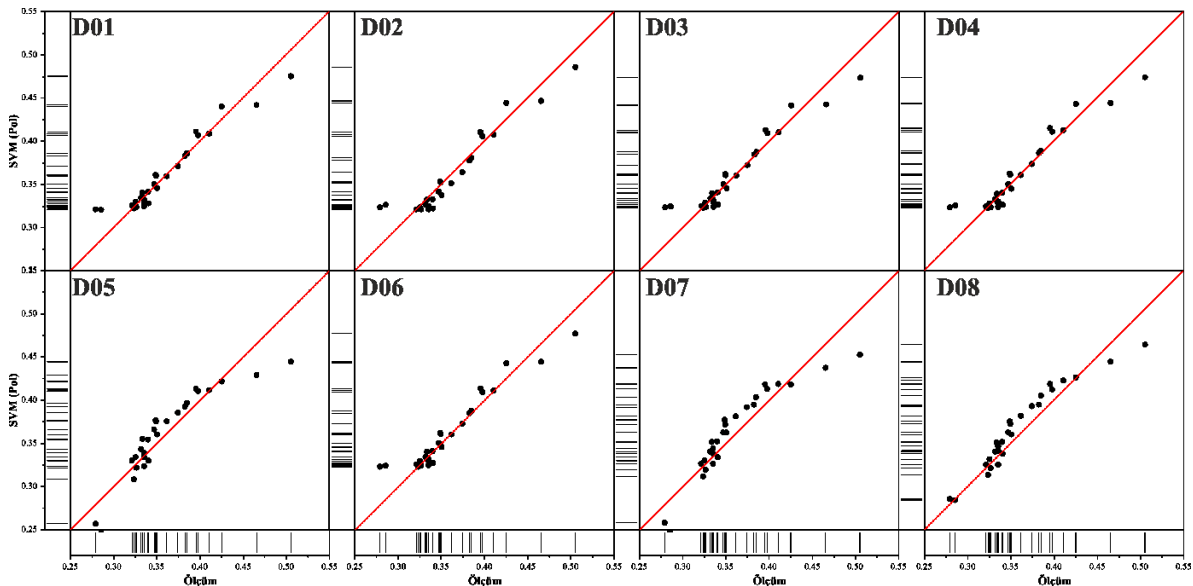
Lineer yöntemiyle farklı girdi parametreleri kullanılarak oluşturulan modellerle tahmin edilen ve ölçüm değerlerinin saçılım grafikleri Şekil 8’de verilmiştir. D05 modeli hariç tüm modellerin çok küçük ve büyük

$C_d$  değerlerini tahmin etmede, ortalama  $C_d$  değerlerini tahmin etmedeki kadar başarılı olmadığı görülmektedir. D06 modeline ait saçılım grafiği incelendiğinde küçük, orta ve büyük  $C_d$  değerlerinin belirlenmesinde oldukça başarılı olduğu ve değerlerin 1/1 çizgisi etrafında dağılım sergilediği görülmektedir. D05 modelinin küçük  $C_d$  değerlerini tahmin etmekte başarılı olduğu belirlense de tahmin edilen değerlerin genel değerlendirilmesinde hata payının D06 modelin de daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu sonucun farklı yöntemler kullanılarak modellerin başarılarının verildiği Tablo 2 ile uyumlu olduğu söylenebilir.



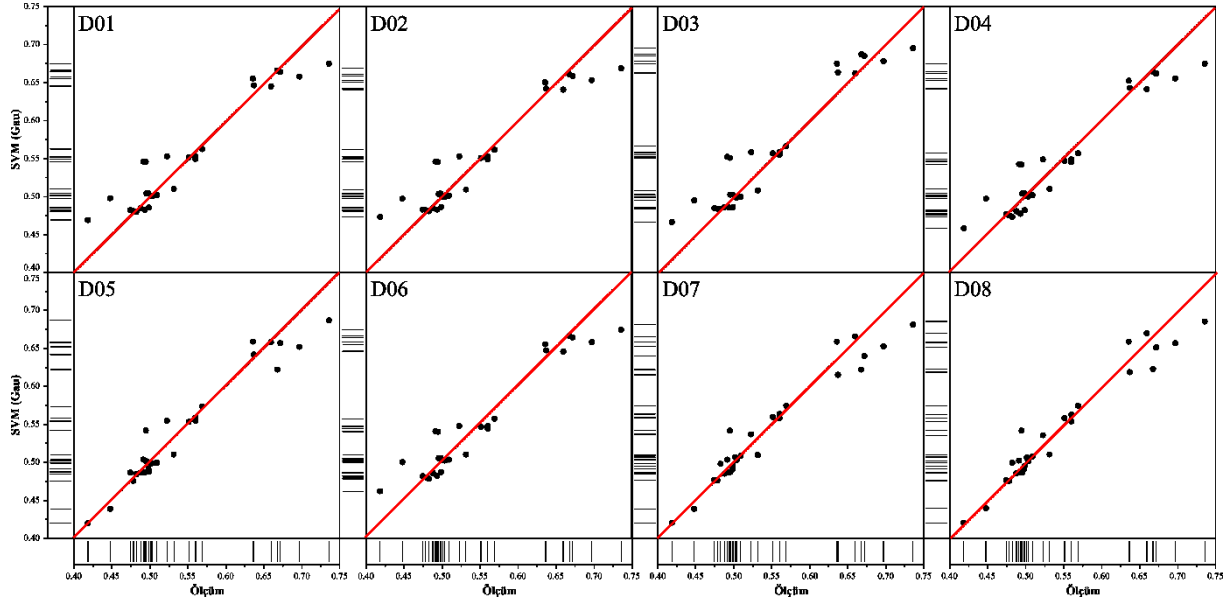
Şekil 8. Test sürecine ait ölçülen ve lineer yöntemiyle elde edilen  $C_d$  değerlerinin saçılım grafikleri

Şekil 9'da, polinom kernel fonksiyonu kullanılarak farklı modellerle tahmin edilen  $C_d$  değerlerinin ölçümlerden hesap edilen  $C_d$  değerlerinin saçılım grafikleri verilmiştir. Farklı modellere kullanılarak Polinom fonksiyonuyla elde edilen saçılım grafiklerinin birbirine benzer olduğu ve genellikle tüm modellerin büyük  $C_d$  değerlerini ve D08 haricindeki modellerin ise küçük  $C_d$  değerlerini de tahmin etmedeki başarısının düşük olduğu görülmektedir. D08 modeli kullanılarak elde edilen saçılımın diğer modellere kıyasla 1/1 çizgisine daha yakın olduğu açıkça söylenebilir.



Şekil 9. Test periyoduna ait ölçülen ve polinom yöntemiyle elde edilen  $C_d$  değerlerinin saçılım grafikleri

Şekil 10'da,  $SVM_{Gau}$  yöntemi kullanılarak test sürecinde elde edilen  $C_d$  değerlerinin saçılım grafikleri görülmektedir. D01-D06 modellerine ait saçılım grafiklerinin, D07 ve D08 modellerinin de birbirine benzer saçılımlara sahip olduğu söylenebilir. Tablo 2'de verilen değerler incelendiğinde D07 ve D08 modelleri arasında bariz farklılığın bulunmadığı anlaşılmakta ve bu değerlendirme şekillerden de yapılabilmektedir. Küçük  $C_d$  değerlerini tahmin etmekte başarılı olan modellerin diğer modellere üstünlük sağladığı değerlendirilebilir.



Şekil 10. Test sürecine ait ölçülen ve gaussian yöntemiyle elde edilen  $C_d$  değerlerinin saçılım grafikleri

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapay açık kanallar veya doğal akarsularda debiyi ölçmek ve su seviyesini kontrol etmek için oldukça sık kullanılan ölçme savaklarının pratik kullanımı açısından debi katsayısının belirlenmesi ve bunun tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Farklı girdi kombinasyonlarında  $C_d$ 'nin tahmin edilmesi için farklı tahmin metodları kullanılabilir.  $C_d$  üzerinde etkin parametrelerin belirlenmesi ve  $C_d$  tahmininde bu parametrelerin girdi olarak kullanılması tahmin yöntemlerinin başarısını arttırmaktadır. Bu çalışmada farklı mamba ve mansap eğimine sahip geniş başlıklı trapez savağın debi katsayısı destek vektör makineleri yöntemiyle tahmin edilmiştir. Üç farklı alt fonksiyonunun 8 farklı girdi kombinasyonunda başarısı  $R^2$ , KOKH, OMYH, NSE ve PBIAS başarı ölçütlerine göre araştırılmıştır. Debi katsayısının,  $H_o/L$  ve  $\epsilon$  parametrelerinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlardan, tüm başarı ölçütlerine göre  $SVM_{Gau}$  yönteminin  $SVM_{Pol}$  ve  $SVM_{Lin}$  yöntemlerine kıyasla daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemle test sürecinde en başarılı modelde  $R^2$  değeri 0.9475, KOKH değeri 0.02, OMYH değeri %2.37, NSE değeri ise 0.9391 olarak elde edilmiştir. Tüm oluşturulan modellerde PBIAS değerinin  $\pm 10$ 'dan küçük olduğu ve başarılı olduğu belirlenmiştir. Oluşturulan modellerin başarısında  $H_o/L$  ve mamba eğiminin etkin parametreler olduğu, bunların yanında üçüncü bir parametre olarak mansap eğiminin eklenmesinin model başarısının arttırdığı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan,  $SVM_{Gau}$  yöntemiyle dört başarı ölçütüne göre  $H_o/L$ ,  $\epsilon$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin girdi olarak kullanıldığı D08 modelinin en başarılı model olduğu ve geniş başlıklı trapez savaklara ait debi katsayısının destek vektör makineleri yöntemiyle başarılı bir şekilde tahmin edilebileceği belirlenmiştir.







**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Chanson, H., (2004). *Hydraulics of Open Channel Flow*. Burlington: Elsevier.
- [2] Mehboudi, A., Attari, J., Hosseini, S. (2016). Experimental study of discharge coefficient for trapezoidal piano key weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*, 50, 65-72.
- [3] Li, S., Yang, J., Ansell, A. (2021). Discharge prediction for rectangular sharp-crested weirs by machine learning techniques. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 1-9.
- [4] Sargison, J.E., Percy, A. (2009). Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 115-118.
- [5] Emiroglu, M.E., Agaccioglu, H., Kaya, N. (2011). Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(4), 319-330.
- [6] Ameri, M., Ahmadi, A., Dehghani, A.A. (2015). Discharge coefficient of compound triangular–rectangular sharp-crested side weirs in subcritical flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 45, 170-175.
- [7] Johnson, M.C. (2000). Discharge coefficient analysis for flat-topped and sharp-crested weirs. *Irrigation science*, 19(3), 133-137.
- [8] Haghiabi, A.H., Parsaie, A., Ememgholizadeh, S. (2018). Prediction of discharge coefficient of triangular labyrinth weirs using adaptive neuro fuzzy inference system. *Alexandria Engineering Journal*, 57(3), 1773-1782.
- [9] Roushangar, K., Alami, M.T., Shiri, J., Asl, M.M. (2018). Determining Discharge coefficient of labyrinth and arced labyrinth weirs using support vector machine. *Hydrology Research*, 49(3), 924-938.
- [10] Parsaie, A., Haghiabi, A.H. (2017). Improving modelling of discharge coefficient of triangular labyrinth lateral weirs using SVM, GMDH and MARS techniques. *Irrigation and Drainage*, 66(4), 636-654.
- [11] Salmasi, F., Yıldırım, G., Masoodi, A., Parsamehr, P. (2013). Predicting discharge coefficient of compound broad-crested weir by using genetic programming (GP) and artificial neural network (ANN) techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7), 2709-2717.
- [12] Hoseini, S.H., Afshar, H. (2014). Flow over a broad-crested weir in subcritical flow conditions. *Physical Study, Journal of River Engineering*, 2(1), 1005-1012.
- [13] Roushangar, K., Akhgar, S., Salmasi, F. (2018). Estimating discharge coefficient of stepped spillways under nappe and skimming flow regime using data driven approaches. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 79-87.
- [14] Saffar, S., Babarsad, M.S., Shooshtari, M.M., Riazi, R. (2021). Prediction of the discharge of side weir in the converge channels using artificial neural networks. *Flow Measurement and Instrumentation*, 78, 1-9.
- [15] Hager, W.H., Schwalt, M. (1994). Broad-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1), 13-26.
- [16] Kabacoff, R. (2015). *R in Action: data analysis and graphics with r*: Manning Publications Co., Shelter Island, New York.
- [17] Smola, A.J., Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and Computing*, 14(3), 199-222.

- [18] Magoulès, F., Zhao, H. (2016). Data mining and machine learning in building energy analysis: Wiley Online Library.
- [19] James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. (2013). An introduction to statistical learning, 112. Springer.
- [20] Yu-Wei, C.D.C. (2015). Machine learning with r cookbook: Packt Publishing Ltd.
- [21] Kuhn, M., Johnson, K. (2013). Applied Predictive Modeling, Vol. 26. Springer.
- [22] Vapnik, V. (2013). The nature of statistical learning theory. New York: Springer science & business media.
- [23] Awad, M., Khanna, R. (2015). Efficient learning machines: theories, concepts, and applications for engineers and system designers: 248p. Springer Nature, New York.
- [24] Hornik, K., Meyer, D., Karatzoglou, A. (2006). Support vector machines in r. Journal of statistical software, 15(9), 1-28.
- [25] Pelikan, M., Goldberg, D.E., Cantú-Paz, E. (1999). BOA: The Bayesian optimization algorithm. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO-99, 525-532.
- [26] Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106 (7), 7183-7192.

## 2D Investigation of a Wing Concept with a NACA 4412 Airfoil in Ground Effect Operation

Tugay ÖZTÜRK<sup>1,\*</sup>  Ömer Çağdaş ÇINKİR<sup>1</sup>  Satılmış ÜRGÜN<sup>2</sup>  Sinan FİDAN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Kocaeli University, Institute of Science, Aviation Science and Technologies, Kocaeli/Turkey

<sup>2</sup> Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Aviation Science and Technologies, Kocaeli/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, Lift/Drag and Moment/Lift values of a wing concept with NACA 4412 airfoil under ground-effect conditions were investigated in 2D at varying altitudes.

### Article Info:

Research article

Received: 20/06/2021

Revision: 08/09/2021

Accepted: 11/09/2021

### Highlights

- ANSYS
- Realizable  $k-\epsilon$
- Angle of Attack.

### Keywords

Hoverwing  
Fluent  
Airfoil  
Turbulence Modelling  
Chord

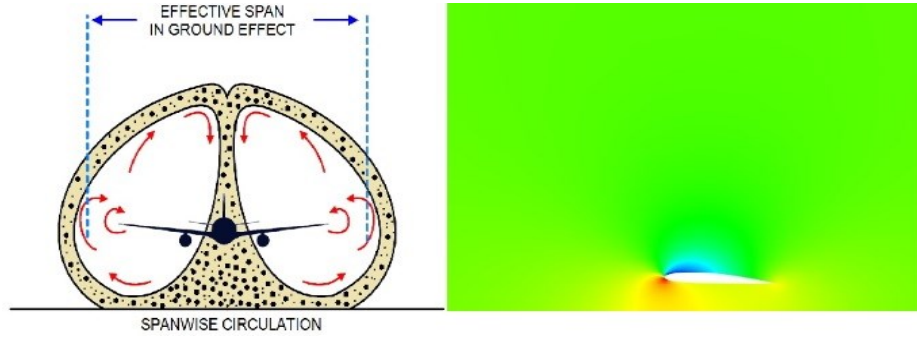


Figure A. Ground effect schematic and pressure distribution around airfoil

**Purpose:** In this study, turbulence modeling of the wing concept designed for a hoverwing operating using ground effect has been made. At varying angles of attack and altitudes, altitude and angle of attack values were tried to be obtained where the maximum lift/drag and minimum moment/lift ratios were the most ideal.

**Theory and Methods:** Analyzes were made using the ANSYS Fluent Academic program. It is made with a realizable  $k-\epsilon$  turbulence model at 0 to 10 degrees of attack angles by decreasing by 0.1 chord in each step from 1 chord height to 0.1 chord height. In these analyzes, changes in lift/drag and moment/drag values were observed.

**Results:** The values obtained after the analyzes were compared. It was observed that the maximum lift/drag ratio was obtained at an angle of attack of 4 degrees at an altitude corresponding to 0.1 chord height, and an increase of 38% compared to 1 chord height. Moment/drag, another factor that was taken into account when evaluating the analyzes, showed a remarkable decrease at 0 to 4 degrees of attack angle and changed very little after 4 angles of attack.

**Conclusion:** It was observed that the NACA 4412 airfoil with a length of 2.75 m, which was analyzed, reached the values that it would be both the most efficient and balanced at 4 angles of attack under ground-effect conditions, but wind tunnel experiments were not carried out due to time and financial constraints. In order to make a definite judgment about the analysis results, wind tunnel experiments should definitely be done as a future study.



## 2D Investigation of a Wing Concept with a NACA 4412 Airfoil in Ground Effect Operation

Tugay ÖZTÜRK<sup>1,\*</sup> Ömer Çağdaş ÇINKIR<sup>1</sup> Satılmış ÜRGÜN<sup>2</sup> Sinan FİDAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri 41000, Kocaeli/Türkiye

<sup>3</sup> Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri, Kocaeli/Türkiye

### Abstract

Vehicles that operate at altitudes close to the sea surface by taking advantage of the ground effect enable us to overcome the hydrodynamic force exerted by the water on the vehicle, allowing us to reach general aviation speeds, while also making it possible to carry more cargo than an aircraft by taking advantage of the ground effect. In this article, the NACA 4412 profile, which has a wide usage area, high lift/drag ratio and a flat bottom surface, has been chosen as a wing concept for a hoverwing vehicle that operates by making use of ground effect. Turbulence modeling was carried out at flight altitudes where it would be exposed to ground effect with a speed of 22,22 m/s and  $Re=4,068 \times 10^6$ . While the height to the ground was decreased by 0.1 starting from the height of 1 chord, the angle of attack was increased up to 10 degrees in increments of 2 degree, starting from 0 degrees, and computational fluid dynamics analyzes were performed in 2D in the Realizable K-Epsilon experimental model with the help of ANSYS Fluent. As a result of the analyzes made, the highest lift/drag value was obtained as 50 at an angle of attack of 4 degrees and at a height corresponding to 0.1 chord value.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 20/06/2021  
Düzeltilme: 08.09.2021  
Kabul: 11.09.2021

### Keywords

Hoverwing  
Fluent  
Airfoil  
Turbulence Modelling  
Chord

### Anahtar Kelimeler

Hoverwing  
Fluent  
Kanat Profili  
Türbülans Modelleme  
Veter

### NACA 4412 Kanat Profiline Sahip Bir Kanat Konseptinin Yer Etkisinde 2 Boyutlu İncelemesi

### Öz

Yer etkisinden faydalanarak deniz yüzeyine yakın irtifada operasyon yürüten taşıtlar, suyun taşıta uygulamış olduğu hidrodinamik kuvveti yenmemizi sağlayarak genel havacılık hızlarına ulaşılmasına olanak tanırken yer etkisinden faydalanarak bir uçaktan daha fazla yük taşımamızı da mümkün kılmaktadır. Bu makalede yer etkisinden faydalanarak operasyon yürüten bir hoverwing taşıtı için kanat konsepti olarak geniş bir kullanım alanına sahip, kaldırma/sürüklenme oranı yüksek ve düz bir alt yüzeye sahip olan NACA 4412 profili seçilmiştir. Hız olarak 22,22 m/s ve  $Re=4,068 \times 10^6$  değerlerinde yer etkisine maruz kalacağı uçuş irtifalarında türbülans modellemesi yapılmıştır. Zemine olan yükseklik 1 veter yüksekliğinden başlayarak 0.1'lik oranda azaltılırken, hücum açısı 0 dereceden başlayarak 2 şer derecelik artımlarla 10 dereceye kadar artırılarak ANSYS Fluent yardımı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri Realizable K-Epsilon deney modelinde 2D olarak yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda 4 derece hücum açısında ve 0.1 veter değerine denk gelen yükseklikte en yüksek kaldırma/sürüklenme değeri 50 olarak elde edilmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

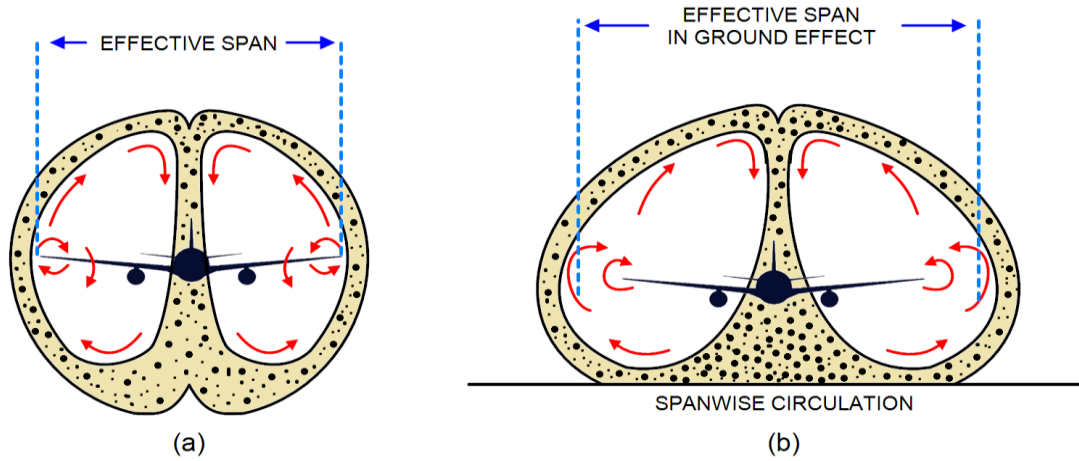
Hoverwing taşıtlar kanatlarla donatılmış bir tür deniz taşıtlarıdır. Sahip olduğu kanatlar sayesinde su yüzeyine iniş-kalkış yaparak bir hava taşıtı gibi davranırken, kanatları söküldüğünde ise normal bir deniz taşıtı gibi operasyon yürütebilen ve gemiler ile uçaklar arasındaki teknolojik boşluğu doldurabilecek konumda olan amfibi taşıtlardır [1-2-3-4-5]. Hoverwing taşıtlar su yüzeyine yakın mesafede yani kanat firar kenarı ile su yüzeyi arasındaki mesafe kanat veter uzunluğu olan değer 0.15c irtifada operasyon yürüttükleri için yer etkisini oldukça verimli bir şekilde kullanacak şekilde tasarlanmışlardır. Bu

özellikleri sayesinde kanatların üretmiş olduğu kaldırma kuvvetinin sonucu olarak oluşan indüklenmiş sürüklenme değerini azaltmaktadır. Hoverwing taşıtlar yer etkisini verimli bir şekilde kullandıkları için kaldırma/sürüklenme oranı 30 ve üzerindeki değerlere çıkabilmektedir. Bu oran bir helikopter için 3, hidro-uçaklar için 8 ve normal bir uçak için ise 12'dir [6-7-8]. Bu avantajı sayesinde hoverwing taşıtlar bir uçaktan daha fazla yük taşıyabilir; bir gemiden çok daha yüksek sefer hızlarına ulaşabilir. Ayrıca eşit hız değerleri için uçak ve gemiler ile kıyaslandıklarında yakıt tüketimi daha düşük seviyededir. Ayrıca hoverwing taşıtlar su yüzeyinde herhangi bir bölgeye iniş kalkış yapabildikleri ve yüksek irtifada operasyon yürütmedikleri için;

- Su üzeri operasyonlarda oldukça hızlıdırlar.
- Acil durumlarda kolaylıkla su yüzeyine iniş yapabilirler.
- Havalimanının yetersiz kaldığı bölgelerde havayolu operasyonlarına yardımcı olabilirler.
- Radar ve diğer elektronik cihazlara karşı düşük görünürlüktedir.
- Geleneksel taşıtlar ile karşılaştırıldığında daha yüksek taşıma kapasitesi vardır.
- Yüksek irtifada operasyon yürütmedikleri için kabin ya da taşıtın kendisi ticari uçaklarda olduğu gibi basınçlandırılmayacağı için buna göre tasarlanmasına gerek yoktur.
- Düşük irtifada 400 knot hıza kadar operasyon yürütebilirler.
- Kumsallarda ve basit limanlarda yükleme-boşaltma faaliyetleri için uygundur [5-9-10].

Deniz yüzeyi karasal bir yüzey ile kıyaslandığında daha stabil sınır değeri sağlamaktadır ve bu sebeple Wing-in-Ground-Effect taşıtlar yüksek hızlı deniz taşımacılığında kullanılması için daha uygun ve çevre dostudur. Belirtilen özellikleri dikkate alındığında uzun sahil şeridinde sahip, ada veya adacıklardan ulaşan ülkeler için hızlı deniz taşımacılığı konusunda gelecek vadeden bir yere sahiptir [9].

Serbest akış ortamında kanat aerodinamik özellikleri değişmez. Bir hava taşıtı yer yüzeyine yaklaştıkça kanada etki eden aerodinamik kuvvetler değişim göstermeye başlar. Bu aerodinamik kuvvetlerdeki değişimin sebebine yer etkisi denir. Yer etkisi, kaldırma sisteminin alt yüzeyinin yere yakınlığı ile bağlantılı olarak kaldırma/sürüklenme oranının artması olarak açıklanmaktadır. Daha genel bir tanım olarak yer etkisi; yer yüzeyine yakın mesafede operasyon yürüten taşıtlarda meydana gelen aerodinamik ve aeroelastik etkilerdir. Yer etkisi, bir uçak yer yüzeyine 1 veter uzunluğu ve daha düşük uçuş irtifasında iken ortaya çıkmaktadır. Kanat ucu vorteks akışının kısıtlaması sonucunda, indüklenmiş sürüklenme ve downwash hareketleri kısıtlanır. Kanat alt yüzeyi ve yer arasında oluşan bu akış blokajı efektif kanat açıklığının geometrik kanat açıklık oranından daha fazla olmasını sağlayıp bu bölgedeki basıncı arttırarak kaldırma kuvvetini arttırır. Sonuç olarak hava taşıtlarında kaldırma/sürüklenme oranı aynı zamanda verimliliğin de oranı olduğu için uçuş verimliliği arttırılmış olur [1-3-9-10-11].



**Şekil 1.** Kanat etrafındaki akışın (a) serbest akışta ve (b) yer etkisindeyken gösterimi [12]

Rüzgâr tünelleri çeşitli geometrik yapılaraya sahip ve pervaneler tarafından ya da sıkıştırılmış hava ile test bölgesinde bulunan cisim etrafındaki hava akış hareketlerinin incelendiği aerodinamik laboratuvarlardır. Rüzgâr tünelleri 19. Yüzyılın sonlarında icat edilmiş olup 20. Yüzyılın başlarında yaygınlaşmış ve günümüzde de sadece havacılık ve uzay araştırmalarıyla sınırlı kalmayıp geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak rüzgâr tünelleri deneylerinde oluşturulan deney ortamı modelden modele değişmekte olduğundan her bir konsept için ayrı bir ortam oluşturma zorunluluğu içerdiğinden dolayı oldukça pahalıdır ve zaman kaybına neden olmaktadır [13]. Bilgisayar teknolojisindeki hızlı yükseliş sayesinde, yüksek konfigürasyona sahip bilgisayarlarla birlikte hesaplama metodlarının da aynı hızda gelişmesiyle; rüzgâr tünelleri deneylerinde günler aylar sürecektir akış deneyleri ve hesaplamaları daha kısa sürede yapılabilmektedir. Akış programları ile birden fazla konsept tasarımı karşılaştırılmak istenilen bütün deney koşullarında rüzgâr tünelleri deneyleri ile kıyaslandığında çok kısa sürede ve rüzgâr tünelleri deneylerine yakın değerlerde hesaplama yapmamıza olanak sağlayarak amaca uygun konsept hakkında fikir elde edilebilmesi için hem zaman hem de maddi yönden kazanç sağlanmış olur [14-15].

Literatürde, yer etkisinin incelenmesi konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yer etkisi 1927 yılında Reid, Elliott G. A. tarafından ilk kez tam ölçekli olarak incelenmiştir [16]. 1965 yılında Saunders yer etkisinde iken oluşan düzensizlikleri hem deneysel hem de sayısal araştırmalar ile açıklayarak sınırlı durağan olduğu modellerde sayısal hesaplamalar ile deneysel sonuçların eşlemediğini ortaya çıkarmış ve birkaç kesin deneysel tekniğin sayısal çözümlenmeleri doğrulamada kullanılabileceğini yinelemiştir. Saunders öne sürmüştüğü tekniklerin sabit yer düzleminden daha doğru sonuçlar verdiğini öne sürmüştür [17]. 1989 yılında Nuhait ve Mook birbirinden farklı kanat platformları kullanarak durağan ve durağan olmayan yer etkisi çalışmalarına yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmalar sonucunda Nuhait ve Mook çok sayıda aerodinamik parametrenin durağan ve durağan olmayan akışlarda yer etkisinden etkilendiğini göstermişler ve durağan olmayan akışta katsayıların durağan akışta olduğundan daha yüksek değerlerde olduğunu kanıtlamışlardır [18]. 1990 yılında Chawla, M. D. Edwards ve Franke NACA 4415 kanat profilini rüzgâr tünellerinde panolar yardımıyla yeri simüle ederek yer etkisini incelemiş ve yer etkisinde iken kaldırma sürüklenme katsayılarının arttığını gözlemlemiştir. Bu çalışma daha önceki çalışmalarda öne sürülen sürüklemenin yer etkisindeyken azaldığı iddiasındaki çelişkiyi ortadan kaldırmıştır [19]. 1993 yılında Nuhait ve Zedan yer etkisindeyken yaratılan durağan olmayan akışlarla alakalı daha fazla sayısal araştırmalar yapmışlardır. Yapılan bu çalışmalarda vortex-lattice metodu kullanılarak iniş ve kalkış aşamalarındaki aerodinamik kuvvetleri incelemişlerdir [20]. 1996 yılında Hsiun ve Chen NACA 4412 profilinin yer etkisinin Reynolds sayısına etkisini k-epsilon türbülans modelinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerini yapmışlardır. Bu çalışmada elde ettikleri verileri Pinkerton'nin deneysel verileri ile kıyaslayarak; yere yakın irtifada operasyon yürütüldükçe kaldırma katsayısı ve Reynolds sayısı artarken sürüklenme katsayısının azaldığını elde etmişlerdir [21]. 1997 yılında Wolfe ve Ochs tipik rüzgâr türbini kanat profillerinin aerodinamik karakteristiklerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonunda doğruluğunu hesaplamışlardır [22]. 1999 yılında Barber, Leonardi ve Archer yer etkisi çalışmalarında hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin doğruluğu için çalışmalara başlayarak ve 4 ihtimal üzerinde yoğunlaşmışlardır. Üzerinde yoğunlaştıkları ihtimaller;

görüntü (kanat profili yansıması), kayma (yer üzerinde sıfır kesme gerilimi), durağan zemin ve hava ile aynı hıza sahip hareketli zemindir. Bu sınır koşulları içerisinde deneysel sonuçlara en yakın sonuçları hava ile aynı hıza sahip hareketli zemin sınır koşullarında elde etmişlerdir [23]. 2002 yılında Barber, Leonardi ve Archer daha önce yapmış oldukları yer etkisi araştırmasındaki metodları tekrardan gözden geçirmişler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellerinin doğrulanmasından sonra yer etkisinin hareketli yer sınır koşullarında kesin bir şekilde çıkarımının yapılabilmesine olanak sağlayan tek sınır koşulu olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen hatalardan bir tanesi ise su yüzeyi üzerinde uçuş durumudur [24]. 2003 yılında Fonseca, Bodstein ve Hirata yer etkisi süresince yer ve vortexler arasındaki etkileşimi nümerik olarak incelemişlerdir. Bu model ile kanat profilinin yaratmış olduğu girdapların yer ile etkileşime girdiği ve bu etkileşim sayesinde aerodinamik kuvvetlerin değişerek yer ile basınç etkileşimi oluştuğunu gözlemlemişlerdir [25]. 2006 yılında Barber birçok deneysel sonuçta gösterildiği gibi zemin durumu için mutlak hızda serbest akışlı akışa eşit hareketli bir sınır belirleyerek deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği araştırması yapmıştır ve yer etkisi çalışmalarında hem nümerik hem de deneysel araştırmaların aynı anda yürütülmesi gerektiğini ileri sürmüştür [26]. 2007 yılında Ahmed NACA 4412 kanat profilini hareketli zemine sahip rüzgâr tüneli ile test ederek kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri ile kanat üzerindeki basınç dağılımlarını gözlemlemiştir. Aynı çalışmada Takasaki ve Kohama NACA 4412 kanat profilini yer etkisine maruz kaldığı değişken irtifalarda rüzgâr tüneline test etmişler ve  $4^0$  hücum açısından sonra kaldırma kuvvetinin arttığını gözlemlemişlerdir [2]. Abramowski 2007 yılında yer etkisinden faydalanarak operasyon yürüten taşıtının kanat profilini sistem girişine 3 veter uzunluğu, sistem çıkışına 5 veter uzunluğu ve üst duvara 4 veter uzunluğu olacak şekilde konumlandırarak deneysel verilerle arasında çok büyük fark olmayan sonuçlar elde etmiştir [27]. 2008 yılında Smith NACA 4412 ve Wortmann FX-63-137 kanat profillerini 2 boyutlu olarak laminar akışta  $0^0 - 6^0$  hücum açılarındaki yer etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerini yapmışlardır [28]. Badran ve ekibi 2008 yılında iki denklemlilik türbülans modelleri ile NACA 4412 kanat profilini inceleyerek deneysel sonuçlara oldukça yakın sonuçlar elde etmişlerdir [29]. James ve ekibi 2015 yılında küçük, orta ve büyük olmak üzere 3 farklı hesaplama alanında analiz ortamı oluşturarak yer etkisini incelemiş ve orta ölçekli 200000 node yoğunluklu ortamda en uygun sonuçları elde etmişlerdir [11]. Zhang ve ekibi 2017 yılında gurney kanatçıklı NACA 0012 kanat profilini koşulsuz akış ortamında (unbounded) hem türbülans modellemeli yer etkisi analizlerini hem de rüzgâr tüneli analizlerini yaparak karşılaştırmıştır [30]. Bravo-Mosquera 2018 yılında tarımsal amaçla kullanılmak amacıyla tasarlanan konseptin önce winglet'li kanat konseptini daha sonra tüm gövdeyi K-Omega SST türbülans modelinde yer etkisindeyken performansını incelemiştir [31]. Oxyzoglou ve ekibi 2020 yılında bir yarış arabasında kullanılması öngörülen çift elementli kanat yapısını hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellemesiyle hem de rüzgâr tüneline inceleyerek ihtiyaç duydukları geliştirmeler için kanat üzerindeki vorteksler hakkında araştırma yapmışlardır [32].

Bu çalışmada konsept kanat modeli tasarımında verimlilik ve dengeyi sağlayabilmek için en önemli aşama olan kanat profili seçimi için hem zaman kazanmak hem de ihtiyaçları fazlasıyla karşılayacak özelliklere sahip ve oldukça geniş bir kullanım alanına sahip NACA 4412 kanat profili seçilmiştir. Seçilen bu profil değişen yüksekliklerde verimliliğin ölçüsü olan Kaldırma/Sürüklenme ( $C_L/C_D$ ) oranı ve dengenin ölçüsü olan Moment/Kaldırma ( $C_M/C_L$ ) değerleri ANSYS Fluent yazılımı yardımıyla 2 boyutlu (2D) olarak K-Epsilon türbülans modelinde türbülans modellemesi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda bütün irtifalarda değerlerinde en yüksek  $C_L/C_D$  oranı  $4^0$  hücum açısında elde edilmiş ve 0.1 veter uzunluğu irtifada maksimum kaldırma/sürüklenme oranı 50,46 olarak ortaya çıkmıştır. Yapılan analizlerde dengenin tanımı olan aerodinamik merkez kayması yani  $C_M/C_L$  oranı yine bütün irtifa değerlerinde  $4^0$  hücum açısına kadar hızlı değişim gösterirken  $4^0$  hücum açısından sonra ciddi değişimler göstermemiştir. 0,1 veter uzunluğuna denk gelen irtifada elde edilen Moment/Kaldırma oranı 0,8922 olarak gözlenmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarını doğrulamak için elde edilen sonuçlar, literatürdeki deneysel çalışmalar ve yapılmış diğer türbülans modelleme analizleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

“Realizable k-ε” türbülans modeli, çift denklemlidir. Türbülans viskozitesindeki taşınım denklemini çözmek için iki ayrı denkleme sahiptir. K-ε türbülans modeli düzlemsel kayma gerilmesi (planar shear stress) ve devir daim akışları (recirculating flows) için tasarlanmıştır. Bu model endüstriyel ve çevresel akışlar için oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Reynolds kayma gerilmelerinin en önemli yere sahip olduğu sınırlı akışlar (confined flows) ve küçük basınç gradyanlı serbest kayma tabakalı (free-shear layer) akışlar için oldukça kullanışlıdır. B.E. Launder ve D.B. Spalding tarafından 1974 yılında ortaya atılmıştır. Realizable k-ε türbülans modelinin denklemleri aşağıda verilmiştir [33].

### 2.1. Taşınım Denklemleri (Convection Equations)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon + Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_1 \epsilon \frac{\epsilon}{k} C_3 \epsilon P_b + S_\epsilon \quad (2)$$

Buradan

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3)$$

Bu denklemlerde  $P_k$  hız gradyanları tarafından üretilen türbülans kinetik enerjisinin ifadesidir. Standart k-ε model ile aynı yoldan hesaplanır.  $P_b$  ise kaldırma kuvveti ile üretilen türbülans kinetik enerjisinin ifadesidir. Buda yine standart k-ε model ile aynı yoldan hesaplanır.

Türbülans viskozitesinin modellenmesi:

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

Buradan

$$C_u = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\epsilon}} \quad (5)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (6)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \epsilon_{ijk} \omega_k \quad (7)$$

$$\Omega_{ij} = \underline{\Omega}_{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k \quad (8)$$

$\underline{\Omega}_{ij}$  açılmal hız ile ( $\omega_k$ ) ile dönen bir referans çerçevesi içinde görüntülenen ortalama dönme hızı tensörü anlamına gelmektedir. Bu modelin sabitleri  $A_0$  ve  $A_s$  aşağıda verilmiştir.

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (9)$$



$$\phi = \frac{1}{3}(\sqrt{6}W, W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3}, \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$$

(10)

Modelin deneysel sabitleri:

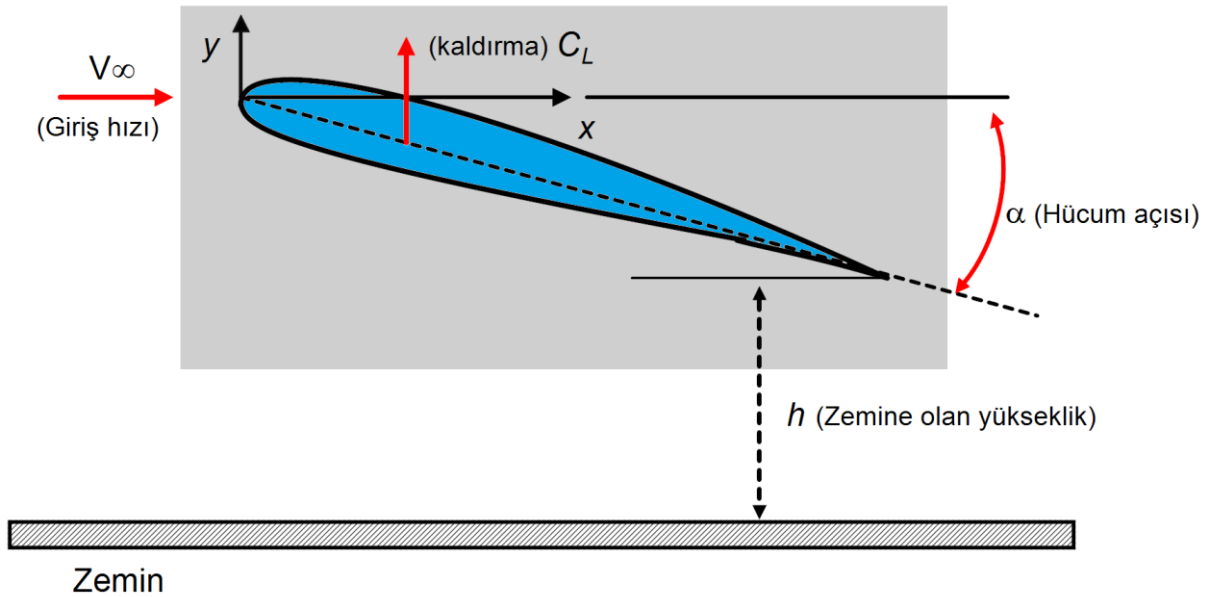
$$C_{1\epsilon} = 1.44 C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2$$

## 2.2. İşlem Süreci (Process Period)

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ANSYS Fluent 2020 Academic yazılımı kullanılarak 2 boyutlu (2D) olarak gerçekleştirilmiştir. Analizler için  $4,068 \times 10^6$  Reynolds sayısına denk gelecek şekilde 2,75 m veter uzunluğu, 22,22 m/s hız koşullarında NACA 4412 kanat profili kullanılarak oluşturulmuştur. Fiziksel modelleme 2 boyutlu ve Reynolds-Averaged Navier Stokes denklemlerinden Realizable K-Epsilon türbülans modeli ile yer etkisinde operasyon koşullarında verimlilik (kaldırma/sürükleme) ve denge (moment/kaldırma) durumları incelenmiştir. NACA 4412 kanat profilinin fiziksel özellikleri aşağıda Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** NACA 4412 Kanat Profili Fiziksel Özellikleri

Kanat Profili	Maksimum Kamburluk (%)	Veterde (%)	Maksimum Kalınlık (%)	Veterde (%)
NACA 4412	4	40	12	30



**Şekil 2.** Yer Etkisi İnceleme Şematiği

Hesaplama alanı modellemesi kanat profili dikdörtgen bloktan çıkartılarak yapılmıştır. Kanat profili olarak ultra hafif genel havacılık uçaklarında oldukça geniş bir kullanım alanına sahip NACA 4412 kanat profili bu işlem için seçilmiştir. Hesaplama alanında kanat profili sistem girişine 6 veter uzunluğu, sistem çıkışına 7 veter uzunluğu, üst duvara 5 veter uzunluğu olacak şekilde konumlandırılmıştır. Kanat firar kenarını referans noktası olarak belirlenip zeminden 1 veter yükseklikten başlayarak 0.1 veter uzunluğuna kadar değişen yüksekliklerde Şekil 2’de gösterildiği gibi modellenmiştir. Yapılan analizlerle maksimum

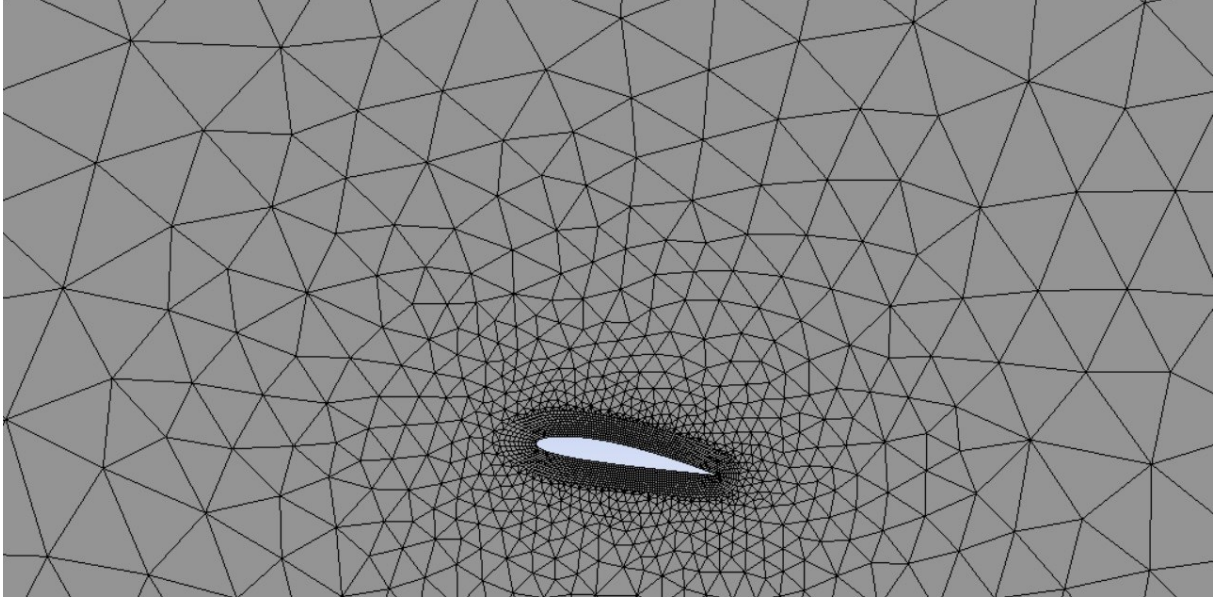
verimlilik ve en uygun denge unsurlarını sağlayacak açı ve irtifa değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Sistem girişi hız koşulu 22,22 m/s, sistem çıkış koşulu basınç-çıkışlı ve kayma yok (no-slip) duvar yer koşulu seçilmiştir. Yer koşulu aynı zamanda sistem giriş hızı ile aynı yönde 22,22 m/s olarak ayarlanmıştır. 2 boyutlu üçgen çözüm ağı kullanılmıştır. Kanat profili etrafı akış ayrışmasının olduğu bölge olduğu için zayıf bölge olarak isimlendirilmektedir ve analiz sonuçlarında basınç konturlarını daha iyi gözlemleyebilmek için kanat profili etrafındaki çözüm ağı yoğunluğu artırılmıştır. Çözüm ağı modelleme özellikleri Tablo 3'te ve çözüm ağı Şekil 3'te gösterilmiştir. Analizler yapılırken elde edilmek istenen parametreler tablosu Tablo 2'de açıklanmıştır.

**Tablo 2.** Yer Etkisi Gereklilikler Tablosu

Gereklilikler	İstenen	Açıklama
Yüksek Kaldırma/Sürüklenme oranı	$C_L/C_D$ =maksimum olmalı	Yer etkisinde operasyon yürütürken maksimum verimlilik
Denge	$C_M/C_L$ =minimum olmalı	Değişen yüksekliklerde minimum aerodinamik merkez kayması

**Tablo 3.** Çözüm Ağı Modelleme Özellikleri

Nodes	2601
Elements	3325
Inflation Option	First Layer Thickness
First Layer Height	3,4e-002m
Maximum Layers	10
Growth Rate	1,2
Element Size	3,4e-002m
Behaviour	Soft



*Şekil 3. Çözüm Ağı Modellemesi*

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

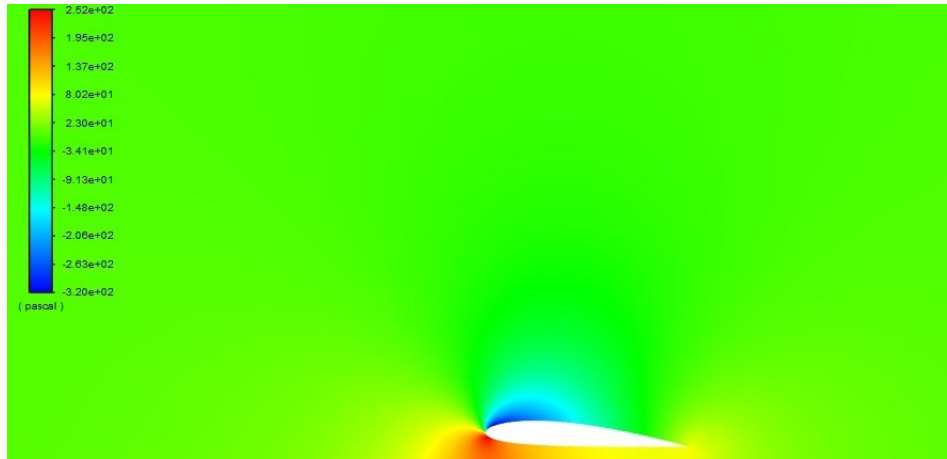
Analizler 1 veter uzunluğu irtifadan yapılmaya başlanmıştır. Bütün yükseklik değerlerinde kaldırma/sürüklenme 4 derece hücum açısına kadar artarken, 4 derece hücum açısından sonra düşmeye başlamıştır. 1 veter uzunluğu irtifa ve 4 derece hücum açısında kaldırma/sürüklenme oranı 36,54 olarak elde edilmiştir. 0,1 veter uzunluğu irtifa ve 4<sup>0</sup> derece hücum açısında kaldırma/sürüklenme oranı 50,46 olarak elde edilmiştir. Analizlere ait kaldırma/sürüklenme ( $C_L/C_D$ ) ve moment/kaldırma ( $C_M/C_L$ ) değerleri Tablo 4, Şekil 8, Şekil 9’da ve analizlerde elde edilen kanat profili etrafındaki basınç dağılımları Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

Rabii El Maani ve ekibi yaptıkları çalışmada Spalart Allmaras, k- $\omega$  ve k- $\epsilon$  türbülans modellerinin deneysel sonuçlara en yakın sonuçların elde edildiği türbülans modelleri olduğunu göstermiştir [34]. Salim M. Salim ve S. C. Cheach yapmış oldukları çalışmada Relizable k- $\epsilon$  türbülans modelinin %5,78 hata payı ile deneysel sonuçlara yakın sonuçlar elde edildiğini açıklamıştır [35]. Shaowei Li ve ekibi çalışmalarında  $4,1 \times 10^6$  Reynolds sayısında Relizable k- $\epsilon$  türbülans modelinin kaldırma, sürüklenme ve basınç katsayıları hesaplamasında %4 hata payı ile deneysel çalışmalarla örtüştüğünü göstermişlerdir [36].

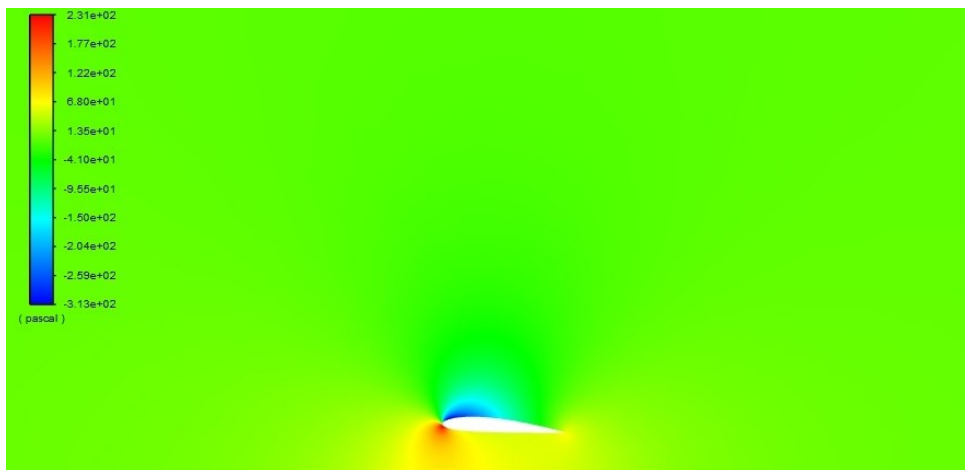
Bu çalışmada elde edilen veriler ve hesaplama alanının doğruluğu hakkında yorum yapılabilmesi amacıyla literatürde yer alan Ahmed ve ekibinin [2] yapmış olduğu deney sonuçlar dikkate alınmıştır. Ahmed ve ekibi  $3,0 \times 10^5$  reynolds sayısı ve 8<sup>0</sup> hücum açısında NACA 4412 kanat profilinin kaldırma katsayısını 1,2680 olarak hesaplamıştır. Aynı reynolds sayısı ve hücum açısında oluşturulan hesaplama alanında kaldırma katsayısı 1,3817 olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma ve yapmış olduğumuz sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında %8,23 gibi düşük bir farklılık bulunmaktadır. Hem maddi hem de zaman kısıtlamaları nedeniyle hesaplama alanı deneysel çalışmaya gerek görmeden doğru kabul edilmiştir. Ancak kesin yargıya varılabilmesi adına ileriki çalışmalarda mutlaka rüzgâr tüneli deneylerinin yapılması gerekmektedir.

**Tablo 4.** Değişen irtifalarda elde edilen  $C_L/C_D$  ve  $C_M/C_L$  değerleri

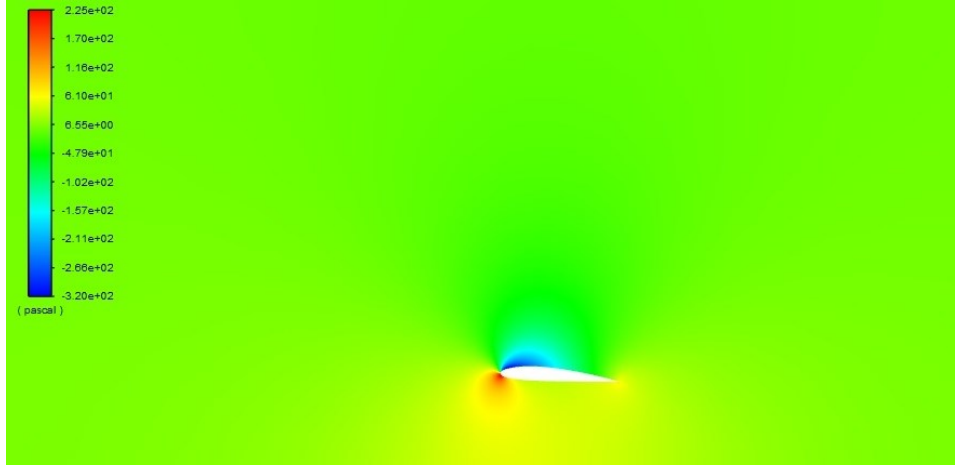
Yükseklik/Veter	$C_L/C_D$	$C_M/C_L$
1	36,5459	0,9025
0,9	37,9260	0,9969
0,8	42,3722	0,9021
0,7	42,0916	0,9037
0,6	31,6550	0,9094
0,5	34,7311	0,9123
0,4	42,5538	0,9082
0,3	35,3082	0,9191
0,2	48,5920	0,9100
0,1	50,4682	0,8922



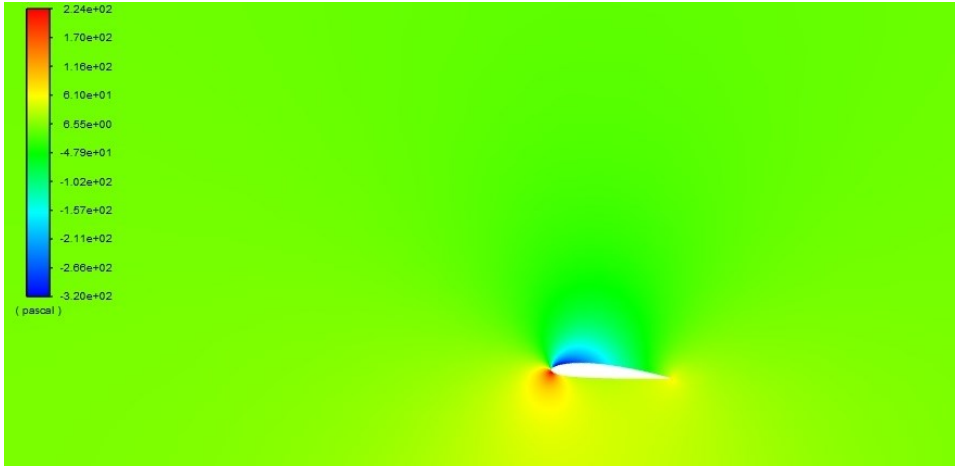
**Şekil 4.**  $h/c=0,1$  İrtifasında Kanat Profili Etrafında Oluşan Basınç Dağılımları



**Şekil 5.**  $h/c=0,4$  İrtifasında Kanat Profili Etrafında Oluşan Basınç Dağılımları

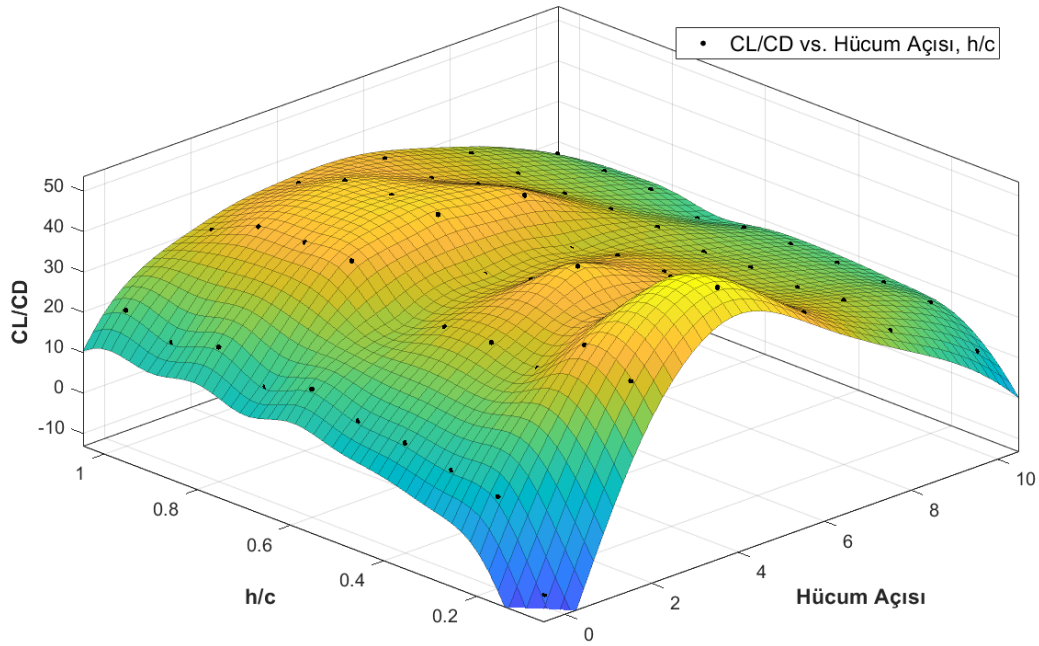


**Şekil 6.**  $h/c=0,8$  İrtifasında Kanat Profili Etrafında Oluşan Basınç Dağılımları

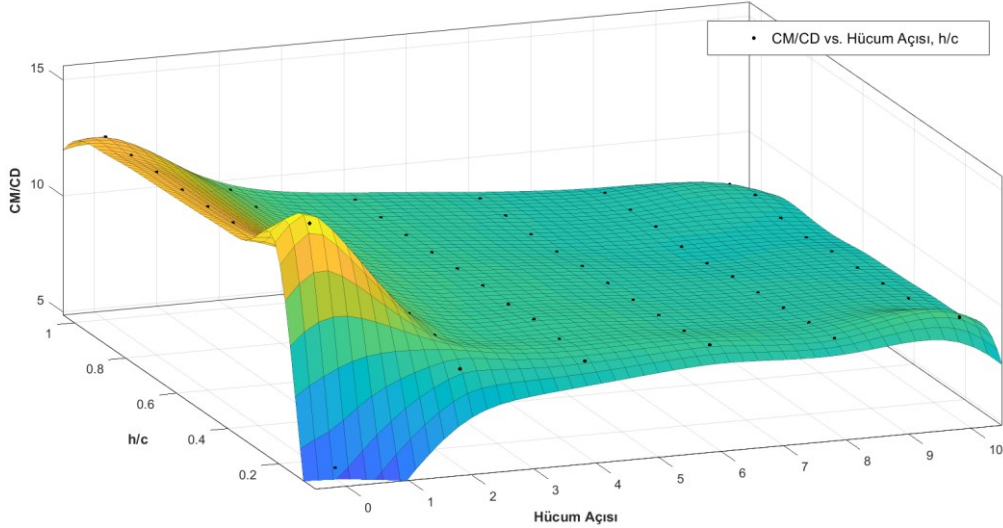


**Şekil 7.**  $h/c=1$  İrtifasında Kanat Profili Etrafında Oluşan Basınç Dağılımları

Veter ağırlıklı (chord dominated) yer etkisi kanat profiline çarpan havanın etkisiyle (ram air effect) ortaya çıkmaktadır. Kanat yere yaklaştıkça kanat alt yüzeyinden geçen hava neredeyse durma noktasına gelerek kanat altında mümkün olan en yüksek basınç seviyesi oluşturularak kaldırma kuvveti serbest akış ortamıyla kıyas yapıldığında arttırılmış olur. Kanat alt yüzeyinde oluşturulan bu yüksek basınç alanı sayesinde kanadın üretebileceği kaldırma kuvvetini arttırdığı için Kaldırma/Sürükleme ( $C_L/C_D$ ) oranı yani verimlilikte arttırılmış olur. Şekil 4 incelendiğinde 2,75m veter uzunluğuna sahip NACA 4412 kanat profili 1 veter yüksekliği irtifadan 0,1 veter yüksekliği irtifaya kadar  $4^0$  hücum açısında kanat alt yüzeyinde oluşan basınç dağılımları verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda da görülebileceği üzere irtifa azaldıkça kanat alt yüzeyindeki basınç dağılımının arttığı net bir şekilde gözlemlenmektedir. Kanat alt yüzeyinde artan bu basınç dağılımından doğan Kaldırma/Sürükleme ( $C_L/C_D$ ) oranındaki artışın grafiği Şekil 5'te verilmiştir.



**Şekil 8.** Değişen İrtifalarda  $4^0$  Hücum Açısında Elde Edilen Kaldırma/Sürüklenme ( $C_L/C_D$ ) Oranları



**Şekil 9.** Değişen İrtifalarda  $4^0$  Hücum Açısında Elde Edilen Moment/Sürüklenme ( $C_M/C_L$ ) Oranları

Yunuslama moment katsayısı (pitching moment coefficient) bir kanat profilinin aerodinamik merkezinin tanımıdır. Kanat tasarımı yapılırken kanat profilinin aerodinamik merkezi değişen hücum açısıyla birlikte minimum değerde değişim gösterdiği hücum açılarında değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu yüzden yer etkisinde operasyon yürüten taşıtlarda aerodinamik merkez kayması kaldırma kuvvetiyle birlikte incelemektedir. Şekil 6'da görüleceği üzere moment/kaldırma oranı  $4^0$  hücum açısına kadar gözle görülür bir şekilde azalmış olup,  $4^0$  hücum açısından sonra çok küçük değerlerde değişim göstermiştir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

NACA 4412 profiline sahip bir kanat konseptinin veter baskılı (chord dominated) yer etkisine maruz kaldığı yükseklik değerlerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirilirken Tablo 2’de verilen yer etkisi gerekliliklerine göre değerlendirme yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda 2,75m veter uzunluğuna sahip kanat profili, analizleri yapılan bütün yükseklik değerlerinde en ideal kaldırma/sürükleme oranı ve moment/kaldırma oranlarını  $4^0$  hücum açısında yakalanmaktadır. En yüksek kaldırma/sürükleme oranı 0,1 veter uzunluğu yükseklikte elde edilmiştir ve sonuç olarak %38 oranında kaldırma/sürükleme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan analizler değerlendirilirken dikkat edilen bir diğer faktör olan denge (moment/sürükleme)  $0^0 - 4^0$  hücum açılarında dikkate değer şekilde düşüş göstermiştir ve  $4^0$  hücum açısından sonra çok küçük değerlerde değişime uğramıştır. Analizleri yapılan 2,75m veter uzunluğuna sahip NACA 4412 kanat profili yer etkisi koşullarında  $4^0$  hücum açısında hem en verimli hem de dengede olacağı değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] ROZHDESTVENSKY, Kirill V. Wing-in-ground effect vehicles. *Progress in aerospace sciences*, 2006, 42.3: 211-283. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2006.10.001>
- [2] AHMED, Mohammed R.; TAKASAKI, T.; KOHAMA, Y\_. Aerodynamics of a NACA4412 airfoil in ground effect. *AIAA journal*, 2007, 45.1: 37-47. <https://doi.org/10.2514/1.23872>
- [3] JIA, Qing; YANG, Wei; YANG, Zhigang. Numerical study on aerodynamics of banked wing in ground effect. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2016, 8.2: 209-217. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.03.001>
- [4] HAHN, Tobias, et al. Analysis of wing-in-ground-effect vehicle with regard to safety ensuring control. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47.3: 863-868. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01832>
- [5] WANG, H., et al. Computational aerodynamics and flight stability of wing-in-ground (WIG) craft. *Procedia Engineering*, 2013, 67: 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.002>
- [6] WIRIADIDJAJA, Surjatin, et al. Wing In Ground Effect Craft: a Case Study in Aerodynamics. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, 7.4: 5-9.
- [7] ZERAATGAR, Hamid; ROSTAMI, Ali Bakhshandeh; NAZARI, Abolfazl. A study on performance of planing-wing hybrid craft. *Polish Maritime Research*, 2012, 16-22.
- [8] CUI, Erjie; ZHANG, Xin. Ground effect aerodynamics. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae022>
- [9] LAO, C. T.; WONG, E. T. T. Cfd simulation of a wing-in-ground-effect uav. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018. p. 012006.
- [10] PILLAI, Nikhil S., et al. Investigation on airfoil operating in Ground Effect region. *International Journal of Engineering & Technology*, 2014, 3.4: 540-544.
- [11] JAMES, Daniel; COLLU, Maurizio. Aerodynamically alleviated marine vehicle (AAMV): Bridging the Maritime-to-air domain. In: *SNAME 13th International Conference on Fast Sea Transportation*. OnePetro, 2015. <https://doi.org/10.5957/FAST-2015-019>
- [12] YUN, Liang; BLIAULT, Alan; DOO, Johnny. WIG craft and ekranoplan. *Ground Effect Craft Technology*, 2010, 2.
- [13] CHANETZ, Bruno. A century of wind tunnels since Eiffel. *Comptes Rendus Mécanique*, 2017, 345.8: 581-594. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.05.012>
- [14] UYGUN, Murat; TUNCER, Ismail. A computational study of subsonic flows over a medium range cargo aircraft. In: *21st AIAA Applied Aerodynamics Conference*. 2003. p. 3661. <https://doi.org/10.2514/6.2003-3661>
- [15] NAVIN, Kumar B., et al. Computational Fluid Dynamics Analysis of Aerodynamic Characteristics of NACA 4412 vs S809 Arifoil for Wind Turbine Applications. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2016, 7: 168-173.
- [16] REID, Elliott G. *A full-scale investigation of ground effect*. US Government Printing Office, 1927.

- [17] SAUNDERS, George H. Aerodynamic characteristics of wings in ground proximity (Ground effect on aerodynamic characteristics of wings and lifting surface theory for finite wing of arbitrary planform). *Canadian Aeronautics and Space Journal*, 1965, 11: 185-192.
- [18] NUHAIT, A. O.; MOOK, D. T. Numerical simulation of wings in steady and unsteady ground effects. *Journal of aircraft*, 1989, 26.12: 1081-1089. <https://doi.org/10.2514/3.45884>
- [19] CHAWLA, M. D.; EDWARDS, L. C.; FRANKE, M. E. Wind-tunnel investigation of wing-in-ground effects. *Journal of Aircraft*, 1990, 27.4: 289-293. <https://doi.org/10.2514/3.25270>
- [20] NUHAIT, A. O.; ZEDAN, M. F. Numerical simulation of unsteady flow induced by a flat plate moving near ground. *Journal of Aircraft*, 1993, 30.5: 611-617. <https://doi.org/10.2514/3.46389>
- [21] HSIUN, Chih-Min; CHEN, Cha'o-Kuang. Aerodynamic characteristics of a two-dimensional airfoil with ground effect. *Journal of aircraft*, 1996, 33.2: 386-392. <https://doi.org/10.2514/3.46949>
- [22] WOLFE, Walter P.; OCHS, Stuart S. *Predicting aerodynamic characteristic of typical wind turbine airfoils using CFD*. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States), 1997. <https://doi.org/10.2172/534484>
- [23] BARBER, T. J.; LEONARDI, E.; ARCHER, R. D. A technical note on the appropriate CFD boundary conditions for the prediction of ground effect aerodynamics. *The Aeronautical Journal*, 1999, 103.1029: 545-547. <https://doi.org/10.1017/S0001924000064368>
- [24] BARBER, Tracie Jacqueline; LEONARDI, E.; ARCHER, R. D. Causes for discrepancies in ground effect analyses. *The Aeronautical Journal*, 2002, 106.1066: 653-668. <https://doi.org/10.1017/S0001924000011726>
- [25] FONSECA, Gustavo F.; BODSTEIN, Gustavo CR; HIRATA, Miguel H. Numerical simulation of inviscid incompressible two-dimensional airfoil-vortex interaction in ground effect. *Journal of aircraft*, 2003, 40.4: 653-661. <https://doi.org/10.2514/2.3169>
- [26] BARBER, Tracie. Aerodynamic ground effect: A case study of the integration of CFD and experiments. *International Journal of Vehicle Design*, 2006, 40.4: 299-316. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2006.009068>
- [27] ABRAMOWSKI, Tomasz. Numerical investigation of airfoil in ground proximity. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 2007, 45: 425-436.
- [28] SMITH, Justin; GRAHAM, Henry; SMITH, James. The validation of an airfoil in the ground effect regime using 2-D CFD analysis. In: *26th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*. 2008. p. 4262. <https://doi.org/10.2514/6.2008-4262>
- [29] BADRAN, Omar; ALDUDAK, Regis Quadros Fettah; UND AERODYNAMIK, Fachgebiet Stromungslehre. Two-equation turbulence models for turbulent flow over a NACA 4412 airfoil at angle of attack 15 degree. *Mechanical Engineering Department Faculty of Engineering technology, Al-Balqa Applied University, PO Box*, 2008, 331006.
- [30] ZHANG, Xuan; QU, Qiulin; AGARWAL, Ramesh K. Computation of flow field of an airfoil with gurney flap in ground effect. In: *35th AIAA applied aerodynamics conference*. 2017. p. 4466. <https://doi.org/10.2514/6.2017-4466>
- [31] BRAVO-MOSQUERA, Pedro David, et al. Conceptual design and CFD analysis of a new prototype of agricultural aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 80: 156-176. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.07.014>
- [32] OXYZOGLU, Ioannis; XIE, Zheng-Tong. Effects of heaving motion on the aerodynamic performance of a double element wing in ground effect. *Fluid Dynamics and Material Processing*, 2020, 1. doi:10.32604/fdmp.2020.012237
- [33] LAUNDER, Brian Edward; SHARMA, Bahrat I. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1974, 1.2: 131-137.
- [34] EL MAANI, Rabii, et al. Study of the turbulence models over an aircraft wing. *Incert Fiabilité Des Systèmes Multiphysiques*, 2018, 2.2: 1-11.
- [35] SALIM, Salim M.; CHEAH, S. Wall Y strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. In: *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists*. 2009. p. 2165-2170.
- [36] LI, Shaowei, et al. Aerodynamic investigation of RAE2822 airfoil in ground effect. *Procedia Engineering*, 2015, 126: 174-178. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.208>





## Determination Working Modes of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) over Encrypted Wi-Fi Traffic Using Artificial Neural Networks

Cengiz SERTKAYA<sup>1,\*</sup> Osman COŞKUN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ostım Technical University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, Ankara/Turkey

<sup>2</sup>Ostım Technical University, Institute of Natural and Applied Sciences, Department of Software Engineering, Ankara/Turkey

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 07.08.2021  
Revision: 12.09.2021  
Accepted: 20.09.2021

#### Highlights

- Artificial Neural Network Models.
- Principal Component Analysis.
- Data Mining.

#### Keywords

UAV Perception  
Encrypted Wi-Fi Traffic  
Artificial Neural Networks

In this study, models are proposed to determine operating modes of UAVs. In the proposed models, there are five step processes have been implemented.

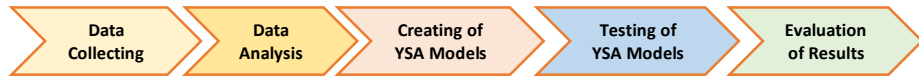


Figure A. Applied process steps during the implementation of models

**Purpose:** This study, it is aimed to determine the different operating modes (One-Way Data Flow, Bi-Directional Data Flow) of UAVs. It is described how to apply data mining methods on the dataset of operating mode data obtained over Wi-Fi traffic. The dataset prepared for the application of artificial intelligence methods. The different model parameters of the Feed Forward and Back Propagation Artificial Neural Networks (FFBP ANN) are examined to understand how the model success is affected.

**Theory and Methods:** The proposed system's data obtained over Wi-Fi traffic. Data has been analyzed by using data mining methods such as data cleaning, principal component analysis and normalization. Then, four different FFBP ANN based artificial intelligence models are created. Developed models are explained in detail.

**Results and Conclusion:** In order to evaluate the success of the models, coefficient of determination (R), mean of squares of error (MSE) and accuracy methods are used. According to the results, the FFBP ANN model which includes two hidden layers with ten neurons, using the TRAINLM is the most successful model. The accuracy rate of this model is 99.29%. In addition, even if the same learning functions are used, it has been seen that the correct selection of system parameters such as the number of hidden layers and the number of neurons in these layers is important for the success of the models. In future studies, datasets obtained from other wireless connection technologies, including Bluetooth and GSM network communication technologies, can be created to determine the operating mode of UAVs. It has been suggested that different artificial intelligence methods can be applied to these datasets.



## Determination Working Modes of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) over Encrypted Wi-Fi Traffic using Artificial Neural Networks

Cengiz SERTKAYA<sup>1,\*</sup> Osman COŞKUN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ostim Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye

<sup>2</sup>Ostim Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yazılım Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara/Türkiye

### Abstract

Developing technology has also made the Unmanned Aerial Vehicles (UAV) widespread. While UAVs provide beneficial use in many sectors from engineering solutions to visual arts, they also come up with malicious uses and can even be used as a tool for committing crimes. Although the states are trying to register its use with legislation in order to prevent this problem, the problem has not been completely eliminated. The most important problem we face about UAVs is to be able to percept quickly and effectively for what purpose they are flying over a certain region. Although previous studies in the literature were partially successful in solving this problem, it could not be considered as an effective solution due to high costs and long detection time.

In this study, encrypted Wi-Fi traffic data of UAVs recorded in a circular area was used to determine the operating modes of UAVs. Since the amount of data and data processing speed are the most important factors in the detection of UAVs, data mining methods such as data cleaning, principal component analysis, and normalization were applied to the dataset. The operating modes of the UAVs were estimated with the feed-forward and back-propagation artificial neural networks selected as the artificial intelligence method and a 99.29% success rate was obtained.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 07.08.2021  
Düzeltilme: 12.09.2021  
Kabul: 20.09.2021

### Keywords

UAV Perception  
Encrypted Wi-Fi Traffic  
Artificial Neural Networks

### Anahtar Kelimeler

İHA Algılama  
Şifrelenmiş Wi-Fi Trafik  
Yapay Sinir Ağları

## İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Şifrelenmiş Wi-Fi Trafik Üzerinden Çalışma Modlarının Yapay Sinir Ağları Aracılığı İle Belirlenmesi

### Özet

Gelişen teknoloji İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. İHA'lar mühendislik çözümlerinden görsel sanatlara kadar bir çok sektöre faydalı kullanım imkanı sağlarken aynı zamanda kötü amaçlı kullanımlarla da karşımıza çıkmakta, hatta suç işleme aracı olarak da kullanılabilir. Devletler bu sorunun önüne geçebilmek için mevzuatlar ile kullanımını kayıt altına almaya çalışıyor olsa da sorun tamamen ortadan kaldırılabilmemiş değildir. İHA'ların belirli bir bölge üzerinde hızlı ve etkin bir şekilde algılanabilmesi ve ne amaçla uçtuğunun tespit edilebilmesi karşımıza çıkan en önemli sorundur. Literatürde daha önce yapılan çalışmalar bu sorunun çözümünde kısmen başarılı olmuş olsa da yüksek maliyetler ve algılama süresi uzunluğu nedeniyle efektif bir çözüm olarak değerlendirilememiştir.

Bu çalışmada İHA'ların çalışma modlarının tespiti için dairesel bir alanda kaydedilen, İHA'lara ait şifrelenmiş wi-fi trafiği verileri kullanılmıştır. Eldeki veri miktarı ve veri işleme hızı İHA'ların tespitinde en önemli etken olduğundan veriseti üzerinde veri temizleme, temel bileşen analizi ve normalizasyon gibi veri madenciliği metodları uygulanmıştır. Yapay zeka yöntemi olarak seçilen ileri beslemeli ve geri yayımlı yapay sinir ağları ile İHA'ların çalışma modları tahmin edilmiş ve %99,29 başarı oranı elde edilmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz dünyasında artan teknolojik gelişmeler ile yüksek teknoloji üreten ve ürünlerini ihraç eden ülkeler uluslararası rekabet açısından diğer ülkelerin önüne geçmektedir. Bununla beraber gelişen üretim

yöntemleri, yüksek teknolojili ürünlerin daha uygun fiyatlar ile son kullanıcılara ulaşmasına imkan sağlamıştır. Bu sayede yüksek teknolojiye ihtiyaç duyan otonom araçların kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır [1].

İnsansız Hava Araçları (İHA), üzerinde kullanıcıyı taşımayan hava araçlarıdır. İHA'lar uzaktan kontrol edilebilir veya belirlenen uçuş güzergahında otonom şekilde uçabilirler. Önceleri bir hobi aracı olan İHA'lar günümüzde gelişerek farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Askeri kullanımlarının yanı sıra, kargo dağıtımını yapan, tarımsal ilaçlama işlerinde kullanılan veya arama kurtarma faaliyetlerinde kullanılan İHA'lar bulunmaktadır. Kamera sistemi veya farklı donanımlar entegre edilebilen İHA'lar ise mühendislik çözümlerinden görsel sanatlara kadar bir çok sektörde uygulama aracı olarak kullanılmaktadır[2].

İHA teknolojilerine günümüzde kolaylıkla ulaşılabilmesi, yüksek hız ve hareket kabiliyetlerine sahip olmaları nedenleriyle kullanımı oldukça yaygındır. İHA'ların yaygın kullanımının bir sonucu olarak kötü amaçlı kullanım örnekleri de oldukça fazladır. Saldırı amaçlı kullanımlar, özel hayatın ihlali ve casusluk faaliyetleri başlıca problemler arasındadır[3]. Örneğin 2017 yılı Eylül ayında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ordusuna ait bir helikopter, İHA saldırısı sonucu düşürülmüştür[4]. Yine ABD'de 2016 yılı Nisan ayında bir İHA, ABD Massachusetts'te bir kişinin görüntülerini kayıt ederken tespit edilmiştir[5]. Yine ABD'de Başkanlık Sarayı üzerinde görüntü kaydı yapan bir İHA yakalanmıştır[6]. Ülkemizde 2019 yılında gerçekleştirilen bir suç olayında İHA kullanılmıştır[7]. Yine ülkemizde 2020 yılı Ekim ayında Diyarbakır ilinde yasak bölge statüsündeki askeri üs üzerinde casusluk amaçlı uçurulan İHA yakalanmıştır[8].

Yerel yönetimler ve güvenlik güçleri İHA'ların kullanımını belli kaideler çerçevesinde denetim altına almaya çalışmaktadır. Amerika Federal Havacılık Dairesi(FAA) bu konuda bir yönetmelik yayınlamıştır[9]. Ülkemizde de Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) yine benzer bir yaklaşımla İHA'ları bir kimlik numarası ile kayıt altına almaya başlamış ayrıca İHA pilotlarının da sertifikalandırarak kaçak uçuşların denetimi hususunda kararname yayınlamıştır [10]. Yapılan denetim çalışmaları mevcut sorunların ortadan kalkmasını amaçlasada, kamu güvenliği ve kişisel hakların ihlali gibi konular tamamen ortadan kalkmış değildir.

İHA'ların tespiti için literatürde yapılan bir çalışmada, askeri kökenli bir teknoloji olan Radar(Radio Detection And Ranging) yöntemi ile radyo dalgalarının yansması üzerinden uzaktaki nesnelere ve bu nesnelere hız, yön ve mesafesini tespit etmeye yarayan cihaz geliştirilmiştir[11]. Başka bir çalışmada Multi-array Lidar (Light Detection and Ranging) yöntemi ile hedefi çok dizili lazer ışığıyla aydınlatarak ve yansıyan darbeleri bir sensörle ölçerek nesneye olan mesafeyi belirleyen bir ölçme yöntemi kullanılmıştır[12]. Diğer çalışmada Akustik Sistem(Acoustic System) adı verilen bir yöntem ile İHA'ları pervane seslerinin farklılığından yola çıkarak algılama temelli bir sistem geliştirilmiştir[13]. Bahsi geçen yöntemler hali hazırda kullanılıyor olsa da İHA'ların sahip oldukları hız ve hareket kabiliyeti ve şehirlerin genel yapısındaki binalar, ağaçlar gibi etkenler ile İHA'ların görünürlük, izleme ve takip sorunları halen çözümlenememiş problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu problemlerin çözümünde insan zekasına yakın çözümler üretebilen ileri düzey yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

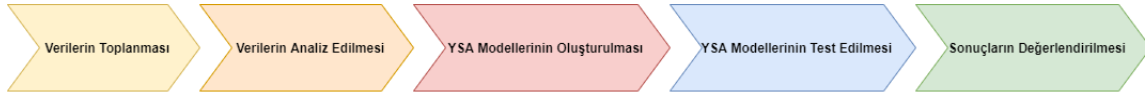
İHA'lardan veri toplanmasına yönelik literatürde yapay zeka yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada İHA'ların kullanıldığı hassas tarım uygulamalarında yapay zeka tabanlı görüntü işleme işlemi için İHA'lardan alınan görüntü verisi kullanılmıştır[14]. Diğer bir çalışmada İHA'lar üzerinden dinamik hedef takibi yapabilmek amacıyla alınan veriler üzerinde yapay zeka yöntemleri kullanılmıştır[15].

İHA'ların tespit edilmesi üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan bir çalışmada İHA'ların tespiti için için makine öğrenmesi metodlarından Yapay Sinir Ağları yöntemi (YSA) kullanılmıştır. Bu yöntemle İHA'ların çalışma modlarının tahmininde %92,5 başarı oranına ulaşılmıştır[16].

Bu çalışmada, İHA'ların farklı çalışma modlarının (Tek Yönlü Veri Akışı, Çift Yönlü Veri Akışı) tespitinin yapılması amaçlanmıştır. Wi-fi trafiği üzerinden elde edilmiş çalışma modu verileri üzerinde temizleme, temel bileşen analizi ve normalizasyon gibi veri madenciliği yöntemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ardından ileri beslemeli ve geri yayımlı YSA metoduna dayalı 4 ayrı yapay zeka modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen modeller ile İHA'ların wifi trafiği verileri üzerinden çalışma modlarını tahmin edebilen özgün çözümler önerilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Modellerin geliştirilmesinden önce kullanılacak verilerin yapay zeka metodlarında kullanmaya uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 1’de verilen adımlar uygulanmıştır.



*Şekil 1. Modellerin kurulması sırasında uygulanan adımlar*

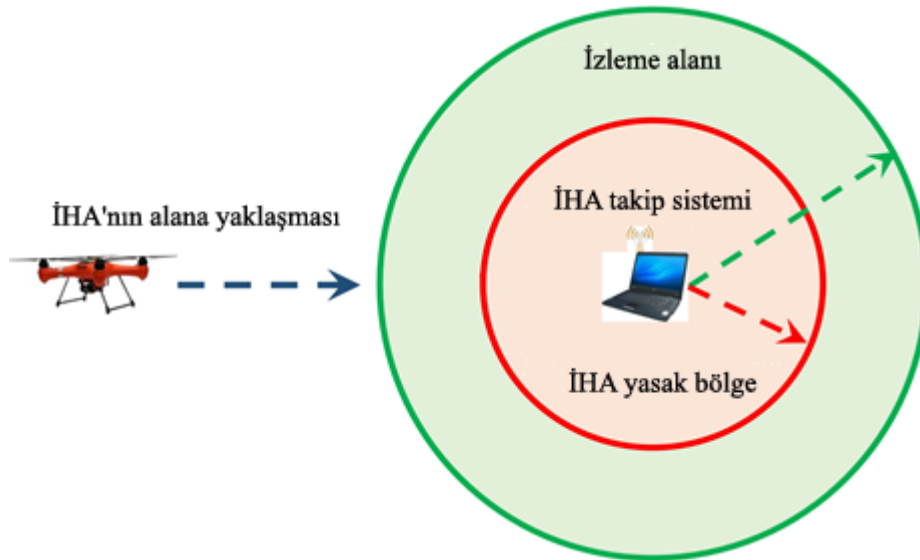
### 2.1. Veri Toplama (Data Collecting)

Bu çalışmada kullanılan veri seti, Kaliforniya Irvine Üniversitesine ait UCI makine öğrenmesi veritabanından elde edilmiştir. Veri setinde 2020 Nisan ayında toplanmış, üç farklı tip İHA’ya ait, veriler içermektedir. İHA’lar ortalama düzeyde kullanıcıların kullanabileceği cihazlar olup, marka ve modellerinin isimleri sırası ile ParrotBepot (1), DBPower UDI (2), DJI Spark (3) olarak adlandırılmaktadır[18]. Kullanılan İHA’ların görselleri Şekil 2’de gösterilmiştir.



*Şekil 2. Veri setinde yer alan İHA türleri[18]*

Veri toplama işlemi ağ trafiğinden veri elde etmeyi sağlayan Wireshark programı kullanılarak yapılmıştır. Wireshark programı bir ağ paket ve protokol analiz (sniffer) yazılımıdır. Bu sayede bir bilgisayar ağı üzerinde akan trafiğin yakalanmasına ve izlenmesine imkan sağlamaktadır. Veri toplama işleminde uygulanan senaryoda, merkezde konumlandırılmış Wi-fi anteni ile 70 metre çapındaki dairesel alanda gerçekleşen tüm Wi-Fi trafiği kaydedilmiştir[19]. Senaryo görseli Şekil 3’de gösterilmiştir.



*Şekil 3. Veri toplama sistemi senaryosu[18]*

Veri toplama işlemi yapılırken İHA’ların tek yönlü veri akış trafiği ve çift yönlü veri akış trafiği izlenmiş ve kaydedilmiştir[18]. Wi-fi kullanılarak yapılan iletişimde cihazlar verileri farklı güvenlik seviyelerinde şifrelenerek gönderilmektedir. Şifrelenmiş bu veri paketlerinin boyutları üzerinden tahmin yapılarak İHA’ların çalışma modları tespit edilmiştir. Bu senaryolar uygulanarak elde edilen veri seti üzerinde “Özellik hesaplamalı bağımlılık grafiğini kullanarak büyük ölçekli maliyete duyarlı sınıflandırma” istatistik yöntemi kullanılmış, 26,600 satır ve 18 öznitelikten oluşan veri seti elde edilmiştir[20]. Öznitelikler ve açıklamaları Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Veri seti öznitelikleri

No	Öznitelik	Açıklama
1	Size Mean	Tek Yönlü Wi-fi Trafığı Ortalama Değer
2	Size Median	Tek Yönlü Wi-fi Trafığı Ortanca Değer
3	Size MAD	Tek Yönlü Wi-fi Trafığı Ortalama Mutlak Sapma
4	Size STD	Tek Yönlü Wi-fi Trafığı Standart Sapma
5	Size Skewness	Tek Yönlü veri Trafığı Çarpıklık Değeri
6	Size Kurtosis	Tek Yönlü Wi-fi Trafığı Yığılma Değeri
7	Size Max	Tek Yönlü Wi-fi Trafığı En Büyük Değer
8	Size Min	Tek Yönlü Wi-fi Trafığı En Küçük Değer
9	Size Mean Square	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Kareler Ortalaması
10	Interval Mean	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Ortalama Değer
11	Interval Median	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Ortanca Değer
12	Interval Mad	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Ortalama Mutlak Sapma
13	Interval Std	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Standart Sapma
14	Interval Skewness	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Çarpıklık Değeri
15	Interval Kurtosis	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Yığılma Değeri
16	Interval Max	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı En Büyük Değer
17	Interval Min	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı En Küçük Değer
18	Interval Mean Square	Çift Yönlü Wi-fi Trafığı Kareler Ortalaması
19	UAV Type	İHA türü

## 2.2. Veri Temizliği (Data Cleaning)

Veri seti analizi sırasında uygulanması gereken adımlardan ilki veri kaydı sırasında hatalardan veya gürültüden kaynaklı verilerin tespit edilmesidir. Bu tür veriler modellerin başarısını olumsuz etkileyeceğinden veri setinden çıkarılmalıdır. Bu amaçla herbir öznitelik için veri değişim aralıklarını gösteren grafikler çizilerek incelenmiştir. Veri setini temsil etmediği düşünülen hatalı verilerin tespitinde pik yapmış olan veriler veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlem sonucunda 396 adet satır veri setinden silinmiştir.

## 2.3. Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis)

Temel bileşen analizi(PCA), yapay zeka modellerinin oluşturulmasında yaygın olarak kullanılan çok değişkenli bir istatistiksel yöntemdir. Bu yöntemde değişkenlerin arasındaki bağlantı, değişkenlerin doğrusal birleşimleri vasıtasıyla belirlenebilmektedir[21,22]. Bu çalışmada kullanılma amacı, giriş öznitelikleri ile çıkış öznitelikleri arasındaki ilişkinin ne düzeyde olduğunun ortaya çıkarılmasıdır. Analiz sonucunda ilişkinin düzeyi eşik değer altında olan giriş öznitelikleri belirlenerek veri setinden çıkarılmaktadır. Bu sayede model daha az sayıda giriş ile çalıştığından işleyeceği veri sayısı azalır ve daha hızlı sonuç üretebilmektedir[21]. Denklem 1’de yer alan formüle kullanılarak gerçekleştirilen PCA analizine göre elde edilen sonuçlar Tablo 2’de gösterilmektedir.

$$Corr(X, Y) = \frac{E(X-\mu_x)(Y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} \quad (1)$$

Burada E beklenen değer operatörünü, X ve Y beklenen  $\mu_x$  ve  $\mu_y$  değerlerine karşılık seçilen rastgele değerleri,  $\sigma_x$  ve  $\sigma_y$  ise standart sapma değerlerini ifade etmektedir.

**Tablo 2.** PCA analizi sonuçları

No	Öznitelik	PCA
1	Size Mean	-0.001
2	Size Median	0.001
3	Size MAD	-0.002
4	Size STD	-0.008
5	Size Skewness	-0.025
6	Size Kurtosis	-0.011
7	Size Max	0.001
8	Size Min	-0.052
9	Size Mean Square	0.001
10	Interval Mean	0.255
11	Interval Median	0.442
12	Interval Mad	0.325
13	Interval Std	0.257
14	Interval Skewness	-0.026
15	Interval Kurtosis	0.013
16	Interval Max	0.361
17	Interval Min	-0.051
18	Interval Mean Square	0.310

PCA sonuçları ile birlikte giriş özniteliklerinin, çıkış özniteliği olan İHA türü arasında bulunan ilişki dereceleri görülmektedir. Öznitelik azaltma işlemi için belirlenen eşik değerin hangi değer olarak seçileceği yönünde literatürde standart bir yöntem bulunmadığı ve problem özgü seçilmesi gerektiği önerilmiştir[21]. Bu nedenle bu problem için eşik değeri 0.01 olarak seçilmiştir. Buna göre eşik değerin altında kalan, tabloda kırmızı ile işaretlenmiş, sırasıyla 1,2,3,4,7 ve 9 nolu öznitelikler verisetinden çıkarılmıştır.

PCA analizinin ardından elde kalan 12 giriş özniteliği için veri setinin son halinde özniteliklerin değişim aralıkları, ortalama ve standart sapma değerleri incelenmiş ve sonuçlar Tablo 3’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.** PCA sonrası özniteliklerin min, max, ortalama ve standart sapma değerleri

No	Öznitelik	Min	Max	Ortalama	Standart Sapma
1	Size Skewness	-1,93	9,84	4	2,25
2	Size Kurtosis	-1,98	98	23,03	23,62
3	Size Min	0	0.008	0,007	0
4	Interval Mean	63,52	1675,72	747,56	0,32
5	Interval Median	0,20	761,06	352,09	514,34
6	Interval Mad	62	1676	864,56	657,85
7	Interval Std	0	1136,41	97,63	192,50
8	Interval Skewness	-9,70	9,84	-0,50	2,22
9	Interval Kurtosis	-2,01	98,01	4,63	14,08
10	Interval Max	68	1676	1121,86	657,78
10	Interval Min	61	1676	167,02	151,79
12	Interval Mean Square	63,98	1675,72	843,75	550,86

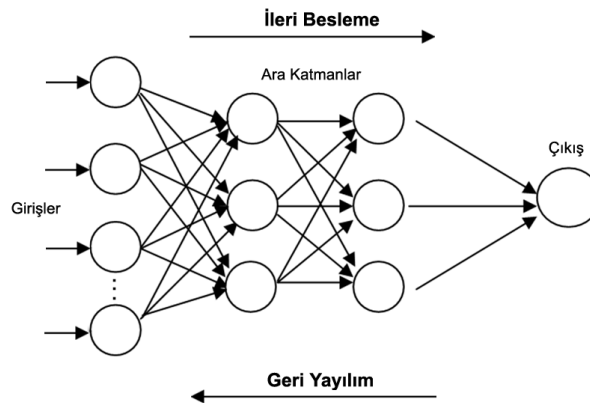
Özniteliklerin veri değişim aralıkları incelendiğinde birbirinden oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu tür bir durumda kurulacak yapay zeka model başarısını etkileyeceğinden özniteliklerin aynı değer aralığına getirilmesi önemlidir. Bu amaçla öznitelikler yapay zeka modellerine verilmeden önce normalizasyon işlemi uygulanarak özniteliklerin değer değişim aralığı 0-1 aralığına getirilmiştir. Normalizasyon işlemi için kullanılan formül Denklem 2’de gösterilmiştir.

$$N(x_i) = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2)$$

Burada  $x_i$  özneliğin orijinal değerini,  $N(x_i)$  normalize sonucu oluşan değeri,  $x_{max}$  ve  $x_{min}$  sırasıyla özneliğin maximum ve minimum değerlerini ifade etmektedir

#### 2.4. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

Yapay sinir ağlarında (YSA) başarılı sonuç elde edebilmek için çözülmek istenen probleme özgü modelin seçilmesi ve öğrenme parametrelerinin doğru ayarlanması önemlidir. parametrelerin model seçimi problemin sonuçlarına doğrudan etki etmektedir. Var olan problemin nitelikleri ve daha önce yapılan benzer çalışmalardan edinilen bilgiler ışığında İleri Beslemeli ve Geri Yayılımlı (FFBP) yapay sinir ağı model olarak seçilmiştir. FFBP YSA yöntemi veri akışının hep ileri doğru olduğu, katmanlar arasında döngü bulunmayan yapay sinir ağı türüdür[16]. FFBP YSA yönteminin sembolik gösterimi Şekil 4’de gösterilmiştir.

**Şekil 4.** FFBP YSA yönteminin sembolik gösterimi

FFBP YSA yönteminde model girişine verilen öznitelikler üzerinden model çıkış özneliği arasında katmanlardaki ağırlık değerlerini belirleyerek bir formül oluşturulmaya çalışılır. Tahmin edilen ile gerçek

çıkış değeri arasındaki farkı minimize etmeye çalışacak şekilde geriye dönerek katmanlardaki ağırlık değerleri değiştirilir ve bu şekilde problemi ifade eden modeli oluşturmaya çalışmaktadır.

FFBP YSA modelinin kurulması ve simülasyon süreçlerinde Matlab programı kullanılmıştır. Oluşturulan modellerde çeşitli denemeler yapılarak en uygun modellerin ne kadar ara katmandan oluşacağı, katmanlardaki nöron sayısı, öğrenme fonksiyonu olarak hangisini kullanması gerektiği belirlenmiştir. En iyi sonuçların bu problem için Levenberg-Marquardt (TRAINLM) ve Momentumlu Gradyan İnişi (TRAINGDM) öğrenme fonksiyonları kullanılarak elde edildiği görülmüştür.

TRAINLM öğrenme fonksiyonu Levenberg-Marquardt optimizasyonuna göre ağırlık ve bias değerlerini güncelleyen bir ağ eğitim işlevidir. Fonksiyonun temelinde Levenberg-Marquardt algoritması yer almaktadır[23]. Parametrelerin güncelleme işleminin gerçekleştirilmesini ise bütün girdiler için hesaplanan hata vektörü ve Jacobian matrisi değerleri ile yapmaktadır. Fonksiyon içerisinde Denklem 3 ve 4'teki hesaplamalar yapılmaktadır[24].

$$e = \frac{1}{2} \sum (y_i - t_i) \quad (3)$$

Burada  $E$ , istenen  $y_i$  ile gerçekleşen  $t_i$  değerleri arasındaki hata toplamlarının kare kökünü ifade etmektedir.

$$w_{i+1} = w_i - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (4)$$

Burada bağlantının ağırlık değerini belirten  $w$  değeri hesaplanırken kullanılan,  $J$  Jacobian matrisini,  $\mu$  sönümleme terimini ve  $I$  kimlik matrisini ifade etmektedir.

TRAINLM fonksiyonu kullanan ağın eğitimi daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Ağın genelinde iyileşme durduğunda eğitim sonlanmaktadır [16].

TRAINGDM öğrenme fonksiyonunda, adaptif öğrenme oranıyla radyan inişine göre ağırlık değerlerini güncelleyen bir ağ eğitim işlevidir. TRAINGDM fonksiyonunda öğrenme parametreleri belirlenirken ağın öğrenme hızının artırılması, öğrenme esnasında oluşabilecek osilasyonların giderilmesi ve lokal minimumlardan kaçılması gibi özelliklere sahiptir[25]. Fonksiyon hesaplanmasında Denklem 5 ve 6'daki formüller kullanılmaktadır[26].

$$D(w_t) = S f'(w_{t-1}) + M D(w_{t-1}) \quad (5)$$

Burada  $D$ ,  $w$  ağırlık değerinin  $t$  anındaki değişimini,  $S$  öğrenme oranını,  $M$  momentum değerini ifade etmektedir.

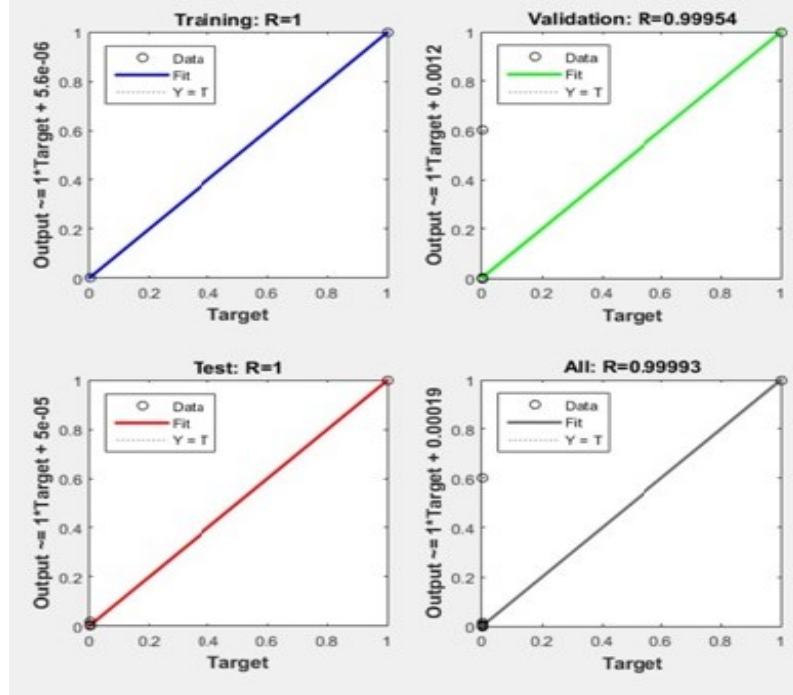
$$w_t = w_{t-1} - D(w_t) \quad (6)$$

Burada  $w$  ağırlık değerinin  $t$  anındaki değeri hesaplanmaktadır.

## 2.5. YSA Modellerinin Uygulanması (Application of ANN Models)

Modellerin kullanacağı toplam verisetinde, verilerin %60'ı eğitim, %40'ı test seti olmak üzere ayrılmıştır. Modellerin uygulanmasında Matlab programı kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda Matlab programında en iyi sonuçların elde edildiği, ara katmanlarında 10 nöron bulunan ve 2 ara katman sayısına sahip TRAINLM öğrenme fonksiyonunu kullananan modele ait, eğitim ve test simülasyon aşamalarını içeren görsel Şekil 5'te gösterilmektedir.





Şekil 5. Matlab YSA eğitim simülasyonu

Şekil 5 incelendiğinde öğrenme sürecinin ideal şartlarda tamamlandığı görülmektedir. Burada regresyon(R) değerinin 1'e yaklaşması hedeflenerek simülasyon devam ettirilmektedir. 1'e ne kadar yakın olursa ilgili süreç okadar başarılıdır[27]. Test grafiğinde görüldüğü üzere tahmin aşaması da başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND CONCLUSION)

Modellerin başarı değerlendirmesinin yapılması amacıyla determinasyon katsayısı(R), hata karelerinin ortalaması(MSE) ve doğruluk (accuracy) yöntemleri kullanılmıştır. Simülasyon sonrası test verileri için elde edilen bu değerler Tablo 4'de gösterilmektedir.

Tablo 4. Geliştirilen YSA modelleri ve başarı değerleri

Model No	Öğrenme Fonksiyonu	Nöron Sayısı	Ara Katman Sayısı	R	MSE	Doğruluk
1	TRAINGDM	10	2	0,55	0,43	56,29
2	TRAINGDM	100	3	0,74	0,18	81,59
3	TRAINLM	250	2	0,74	0,18	81,59
4	TRAINLM	100	2	0,98	0,01	98,10
<b>5</b>	<b>TRAINLM</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>0,99</b>	<b>0,007</b>	<b>99,29</b>

Elde edilen sonuçlara göre, FFBP YSA modellerinden TRAINLM öğrenme fonksiyonunu kullanan 2 ara katmanı olan ve her bir ara katmanda 10 nörona sahip model %99,29 doğruluk oranıyla en başarılı model olmuştur

Bu çalışmada yüksek teknoloji ürünlerinden olan ve son yıllarda kullanımı oldukça yaygın hale gelen İHA'ların çalışma modlarının tespiti için, üç farklı İHA modeline ait kablosuz trafik verileri analiz

edilmiştir. Veriler üzerinde gerçekleştirilen analiz yöntemleri ile kablosuz ağ trafiği verilerinin yapay zeka modellerine verilmeden önce uygulanması gereken adımlar açıklanmıştır.

Çalışmada ileri beslemeli ve geri yayımlı YSA metodu kullanılarak farklı öğrenme algoritmaları ve ara katman değerleri üzerinden modeller oluşturulmuştur. En iyi başarının elde edildiği modelde %99,29 gibi oldukça yüksek bir doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bu değerlere göre geliştirilen model kullanılarak İHA çalışma modlarının başarılı şekilde tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

Ayrıca çalışmada aynı öğrenme fonksiyonları kullanılsa dahi ara katman sayısı ve bu katmanlardaki nöron sayısı gibi sistem parametrelerinin doğru seçilmesinin model başarısında önemli olduğu görülmüştür. Nitekim aynı öğrenme fonksiyonuna sahip olmasına karşın sistem parametrelerinin farklı seçilmesi 3 ve 4 nolu modellerde başarı oranını etkilemiştir.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte henüz yaygın olmasa da wi-fi dışında farklı kablosuz iletişim teknolojileri de İHAlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu anlamda ileriki çalışmalarda İHA'ların çalışma modu tespitinde, içinde bluetooth ve GSM şebekesi iletişim teknolojilerinin de olduğu, bu teknolojilere ait ağ bilgilerinin yer aldığı verisetleri oluşturulabilir. Bu veriler üzerinde yapay sinir ağı modelleri oluşturulabilir. Ayrıca farklı yapay zeka metodları da uygulanarak sonuçlar karşılaştırılabilir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Erdiñ Z., Aydınbaş G., Yüksek Teknoloji Ürünleri İhracı ve Belirleyicileri: Panel Veri Analizi, *International Social Mentality and Researcher Thinkers Journal*, No. 30 (2020) 496-507.
- [2] Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Idries A., Mohammed F., *Unmanned Aerial Vehicles Applications In Future Smart Cities, Technological Forecasting & Social Change*, 153 (2020) 119293.
- [3] Altawy R., Youssef A.M., *Security, Privacy, and Safety Aspects of Civilian Drones: A Survey, ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 1(2) (2016) 1-25.
- [4] NYPOST, *Civilian Drone Crashes Into Army Helicopter*, <https://nypost.com/2017/09/22/army-helicopter-hit-by-drone>.
- [5] RT, *Peeping Drone: UAV Hovers Outside Of Massachusetts Teen's Bedroom Window*, <https://www.rt.com/usa/341404-drone-privacy-teenager-window>.
- [6] NYTIMES, *White House Drone Crash Described As A U.S. Worker's Drunken Lark*, <https://www.nytimes.com/2015/01/28/us/white-house-drone.html>.
- [7] CNNTURK, *Ankara'da Lüks Villadan 4 Milyon Liralık Hırsızlık... Günlerce Drone İle İzlemişler*, <https://www.cnnturk.com/turkiye/ankarada-luks-villadan-4-milyon-liralik-hirsizlik-gunlerce-drone-ile-izlemisler>.
- [8] CNNTURK2, *Atatürk Havalimanı Üzerine Drone Uçaran Kişiyeye Hapis Cezası Verildi*, <https://www.cnnturk.com/turkiye/ataturk-havalimani-uzerine-drone-ucaran-kisiye-hapis-cezasi-verildi>.
- [9] FAA, *Federal Aviation Administration*, <https://www.faa.gov>.
- [10] İHAY, *İHA Yönetmeliği*, [http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/SHT-IHA\\_WEB.pdf](http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/SHT-IHA_WEB.pdf).
- [11] Moses A., Rutherford M.J., Valavanis K.P., *Radar-Based Detection and Identification for Miniature Air Vehicles, IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of 2011 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Denver, 28-30 (2011) 933-940*.

- [12] Salhi M., Boudriga N., Multi-Array Spherical LIDAR System for Drone Detection, 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), (2020), doi-10.1109/ICTON51198.2020.9203381.
- [13] Sedunov A., Haddad D., Salloum H., Sutin A., Sedunov N., Yakubovskiy A., Stevens Drone Detection Acoustic System and Experiments in Acoustics UAV Tracking, IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), USA, (2019), doi- 10.1109/HST47167.2019.9032916.
- [14] Ampatzidis Y., Partel V., Costa L., Agroviev: Cloud-Based Application To Process, Analyze And Visualize UAV Collected Data For Precision Agriculture Applications Utilizing Artificial Intelligence, Computers and Electronics in Agriculture 174 (2020) 105457, doi-10.1016/j.compag.2020.105457.
- [15] Chithapuram C., Kumar A., Artificial Intelligence Guidance for Unmanned Aerial Vehicles in Three Dimensional Space, International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Mysore India, (2014), doi-10.1109/IC3I.2014.7019634.
- [16] Alipour-Fanid A., Dabaghchian M., Wang N., Wang P., Zhao L., Zeng K., Machine Learning-Based Delay-Aware UAV Detection and Operation Mode Identification over Encrypted Wi-Fi Traffic, IEEE CNS International Workshop On Cyber-Physical Systems Security (CPS-Sec), USA, (2019), doi-10.1109/TIFS.2019.2959899.
- [17] UCI, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Intrusion Detection Data Set, <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Unmanned+Aerial+Vehicle+%28UAV%29+Intrusion+Detection>.
- [18] Banerjee U., Ashutosh V., Mukul S., Evaluation of the Capabilities of WireShark as a tool for Intrusion Detection, International Journal of Computer Applications 6-7 (2010), doi-10.5120/1092-1427.
- [19] McGregor A., Hall M., Lorier P., Brunskill J., Flow Clustering Using Machine Learning Techniques, Lecture Notes in Computer Science, 3015 (2004) 205-214.
- [20] Li Q., Alipour-Fanid A., Slawski M., Ye Y., Wu L., Zeng K., Zhao L., Large-scale Cost-aware Classification Using Feature Computational Dependency Graph, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 33-5 (2021) 2029-2044.
- [21] Sertkaya C., Yurtay N., Artificial Immune System Based Wastewater Parameter Estimation, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 26 (2018) 3356- 3366.
- [22] Yıldız K., Çamurcu Y., Veri Madenciliğinde Temel Bileşenler Analizi ve Negatifsiz Matris Çarpanlarına Ayırma Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi, Akademik Bilişim'10, (2010).
- [23] Çizmeçi, H., Atila, Ü., Karaş, İ. R., Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Yükseköğretimde Öğrenci Adaylarının Başarı Durumlarının Tahmin Edilmesi, Karabük Üniversitesi 20. Akademik Bilişim 2018 Konferansı, (2018) 183–186.
- [24] Arthur, C. K., Temeng, V. A., Ziggah, Y. Y., Performance Evaluation of Training Algorithms in Backpropagation Neural Network Approach to Blast-Induced Ground Vibration Prediction. Ghana Mining Journal, 20-1 (2020) 20–33.
- [25] Qian N., On The Momentum Term İn Gradient Descent Learning Algorithms, Neural Networks 12 (1999) 145-151.
- [26] GDM, Gradient Descent With Momentum from Scratch, <https://machinelearningmastery.com/gradient-descent-with-momentum-from-scratch>
- [27] Ozkan M. T., Kaygısız M., Elipsel Delikli Plakalarda Oluşan Gerilmelerin Tanımlanması ve Yapay Sinir Ağları ile Tahmini, GU J Sci, Part C, 4-3 (2016) 135-145.