

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

Yousef 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

Uraz YAVANOĞLU, Gazi University

Fehim KÖYLÜ, Erciyes University

Cemal KOÇAK, Gazi University

Mehmet DEMİRTAŞ, Gazi University

Hüseyin POLAT, Gazi University

Serhat AYDIN, Sakarya University of Applied Sciences

Faraz AFSHARI, Erzurum Technical University

İsmail ÖZTÜRK, Pamukkale University

Sertaç BAYHAN, 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

Derya YILMAZ, Gazi University

Gürhan İÇÖZ, Gazi University

Murat MAYDA, Karamanoğlu Mehmetbey University

Abdullah Cemil İLÇE, Abant İzzet Baysal University

Mehmet Rıda TÜR, Batman University

Mustafa ALTUNOK, Gazi University

Saadın OYUCU, Adıyaman University

Fatih Emre BORAN, Gazi University

Nihat DALDAL, Bolu Abant İzzet Baysal University

Yunus DEMİR, Bursa Technical University

Bülent BOSTAN, Gazi 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

## Volume 9 - Issue 4

Selection of Electric Vehicle Chassis Material Using Multi-Criteria Decision-Making Techniques  
*Gülüstan Tuğçe ALVALI, Ali BALBAY, Turan ŞİŞMAN, Serkan GÜNEŞ*  
Research article

Prototype Development of A Solar-Powered Backpack for Camping Applications  
*Mustafa Engin BAŞOĞLU, Salihcan Muhammet ÜSTEK*  
Research article

Use of PID control during Education in Reinforcement Learning on Two Wheel Balance Robot  
*Emrah ATAC, Kazim YILDIZ, E. Emre ULKU*  
Research article

Measuring the Security Effectiveness of Machine Learning Methods Used Against Cyber Attacks in Web Applications  
*Mesut TOĞAÇAR*  
Research article

A New Integrated Approach for Determination of Turkey's Solar Energy Production Strategies: The Fuzzy Expanded SWOT  
*Buket KARATOP, Buşra TAŞKAN*  
Research article

An Overview on Reliability Analysis and Evaluation Methods Applied to Smart Grids  
*Necmi ALTIN, Melih BİLGİN*  
Research article

Regression Modeling of the Effect of Chip Slenderness Ratio and Cutting Parameters on Vibration  
*Oktay ADIYAMAN*  
Research article

Biologically Inspired Design: A Case Study on Furniture Design Experiences of Interior Architecture Students  
*Gülçin Cankız ELİBOL, Vildan DÜNDAR TÜRKKAN, İsmail BEZCİ*  
Research article

Computer-Aided Interface Design for Real-Time Pupil Motion Detection and An Application for Physically Disabled Persons  
*Ahmet Reşit KAVSAOĞLU, İsmail MERSİNKAYA, Ömer Faruk YILDIZ, Hasan GÜDEK*  
Research article

Extraction of Photovoltaic Cell and Photovoltaic Module Parameters Using African Vultures Optimization Algorithm  
*Mehmet YEŞİLBUDAK*  
Research article

Investigation of the Potential of Using Lakes and Dams as Solar Power Plants: The Case of Yamula Dam  
*Ali Rıza DAL*  
Research article

Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump  
*Rıza BÜYÜKZEREN, Ali KAHRAMAN, Mehmet Numan KAYA, Halil İbrahim DAĞ*  
Research article

Design and Application of Multi-Axis Solar Tracking System to Increase the Efficiency of Solar Cell  
*İlhan GARİP*  
Research article





Result Weighting-Based Resnet Feature Pyramid Network Architecture for Surface Defect Detection  
*Hüseyin ÜZEN, Muammer TÜRKÖĞLU, Davut HANBAY*  
Research article

s-to-z Transformation Tool for Discretization  
*Fahri VATANSEVER, Metin HATUN*  
Research article

Comparison of the Shape, Depth and  $N_y$  Factors Used in the Bearing Capacity Equation  
*Mustafa ÖZER*  
Research article

High Performance Classification of Cancer Types with Gene Microarray Datasets: Hybrid Approach  
*Yılmaz ATAY, Muhterem Oğuzhan YILDIRIM, Cuma Umur DOĞAN*  
Research article

## Selection of Electric Vehicle Chassis Material Using Multi-Criteria Decision-Making Techniques

Gülüstan Tuğçe ALVALI<sup>1,\*</sup>  Ali BALBAY<sup>2</sup>  Turan ŞİŞMAN<sup>2</sup>  Serkan GÜNEŞ<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> OSTİM Technical University, Vocational School, Hybrid and Electric Vehicles Technology Program, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup> OSTİM Technical University, Vocational School, Machine Program, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
 Received:  
 14.07.2021  
 Revision:  
 21.09.2021  
 Accepted:  
 23.09.2021

#### Highlights

- Ansys
- Machinability
- Multi-Criteria Decision Applications

#### Keywords

Electric vehicle  
 Chassis design  
 Material selection  
 Multi-Criteria Decision Making  
 TOPSIS  
 VIKOR

In this study, analyzes were made on the 3-wheeled L2E class electric vehicle chassis structure in software environment according to different material types. The optimum material combination was determined by examining with multi-criteria decision making methods, taking into account the analyzes made and different criteria.

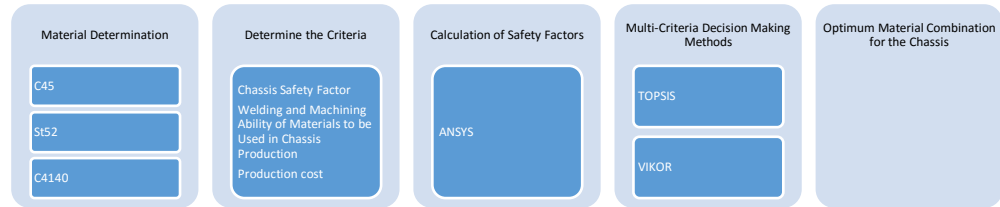


Figure A. Required steps to determine the chassis material

**Purpose:** The main purpose of this study is to determine the type/combinations of chassis materials that enable the chasis, the structure that carries many systems of the car, to be safe, durable, cost-effective, easy to manufacture, and to have the appropriate chemical composition and physical properties in order to realize the most efficient and effective applications of the movable or fixed connections on it.

**Theory and Method:** The study focused on the choice of chassis material for the chassis design of a 3-wheeled L2E class electric. Safety, cost, weldability and machinability factors for St52, Ck45 and C4140 steels were comparatively analyzed using the Technique for Order Preference By Similarity (TOPSIS) and VIKOR, multi-criteria decision making methods (MCDM). As a result of the analyses, with which specified factors and materials the horizontal elements, vertical elements and ribs that make up the chassis will be the most suitable and efficient has been determined.

**Results:** With the analysis results obtained in the software environment; the construction of the chassis horizontal profiles from C4140 tempered steel and the other chassis elements from St52 general structural steel turned out to be the most ideal option with both multi-criteria decision making methods. As the second ideal optimization option, it was concluded from the analyses that while the horizontal profiles and ribs could be made of C4140 tempered steel, all vertical profiles could be made of St52 general structural steel.

**Conclusion:** In this study, analyzes were carried out in software environment on a 3-wheeled L2E class electric vehicle chassis structure and solutions were presented accordingly. In this context, this study will shed light on future studies. It will contribute to the creation of a wide and increasingly deep literature on this subject both with the new studies planned after this study and the studies that different researchers will carry out with different vehicle types and innovative materials. Moreover, an information infrastructure supported by scientific studies will be provided to chassis manufacturers and vehicle producing companies.



Gazi Üniversitesi

**Fen Bilimleri Dergisi**  
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

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


## Selection of Electric Vehicle Chassis Material Using Multi-Criteria Decision-Making Techniques

Gülüstan Tuğçe ALVALI<sup>1,\*</sup> Ali BALBAY<sup>2</sup> Turan ŞİŞMAN<sup>2</sup> Serkan GÜNEŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Hibrid ve Elektrikli Taşıtlar Teknolojisi Programı, 06500, Yenimahalle/ANKARA

<sup>2</sup> OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine Programı, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Abstract

The chassis is the basic structure that contains various systems of the car and supports all parts such as the engine, transmission, brake system, body, suspension installed on it. The chassis must be safe, inexpensive and have a suitable structure and suitable chemical composition for welded joints in order to apply movable connections such as bolts on it. In addition, it is important that it is easy to produce. In this study, the selection of chassis material for the chassis design of a 3-wheel L2E class electric vehicle was studied. St52, Ck45, and C4140 steel for safety, cost, weldability and machinability factors, the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) and ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR), multi-criteria decision-making methods (MCDM) using a comparative analysis has been made. As a result of the analysis, it has been determined that the horizontal elements, vertical elements, and ribs that make up the chassis will provide the most appropriate use with the specified factors and materials. As a result, producing horizontal profiles of C4140 steel and other profiles of St52 Steel had been seen the most ideal option for both methods. The Second ideal optimization option is that horizontal profiles and federations are made of C4140 steel, and vertical profiles are preferred as St52 steel.

### Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri Kullanılarak Elektrikli Araç Şasi Malzemesi Seçimi

#### Öz

Şasi, otomobilin çeşitli sistemlerini bünyesinde bulunduran temel yapı olup üzerine takılı olan motor, şanzıman, fren sistemi, gövde, süspansiyon gibi tüm parçaları desteklemektedir. Şasinin güvenli, ucuz maliyetli ve üzerinde bulunan cıvata gibi hareketli bağlantıların uygulanabilmesi için uygun yapıda ve kaynaklı birleştirmeler için uygun kimyasal kompozisyona sahip olması gerekmektedir. Bunun yanı sıra kolay üretilebilir olması da önemlidir. Bu çalışmada 3 tekerlekli L2E sınıfı bir elektrikli aracın şasi tasarımının gerçekleştirilmesine yönelik şasi malzemesi seçimi üzerinde çalışılmıştır. St52, Ck45 ve C4140 çelikleri için güvenlik, maliyet, kaynak edilebilirlik ve işlenebilirlik faktörleri, İdeal Çözüme Benzerlik ile Sipariş Tercihi Tekniği (TOPSIS) ve VIKOR, çok kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV) kullanılarak karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Analizler sonucunda şasiyi oluşturan yatay elemanlar, dikey elemanlar ve federlerin, belirtilen faktörler ve malzemelerden hangisi ile en uygun kullanım sağlayacağı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, yatay profillerin C4140 çeliği ve diğer elemanların St52 çeliğinden yapılması her iki yöntem için en ideal seçenek olduğu ortaya konulmuştur. İkinci ideal optimizasyon seçeneği ise yatay profiller ve federler C4140 çeliğinden yapılırken dikey profillerin St52 çeliği olarak tercih edilmesidir.

#### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 14.07.2021  
Düzeltilme: 21.09.2021  
Kabul: 23.09.2021

#### Keywords

*Electric vehicle*  
*Chassis design*  
*Material selection*  
*Multi-Criteria Decision Making*  
*TOPSIS*  
*VIKOR*

#### Anahtar Kelimeler

*Elektrikli araç*  
*Şasi tasarım*  
*Malzeme seçimi*  
*Çok Kriterli Karar Verme*  
*TOPSIS*  
*VIKOR*

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv teknolojilerinde şasi tasarımı ve imalatı önemli parametrelerden biridir. Özellikle şasi malzemesi seçimi ve seçilen malzemeye uygun üretim/işleme özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Yanlış seçilmiş malzemelerle yapılan imalat ve montaj işlemlerinde olası hataların ortaya çıkma ihtimali yüksektir. Örneğin uygun olmayan bir malzeme ile şasi imalatına başlanıldığında kaynaklı birleştirme sorunları yaşanabilecek ya da henüz ilk başta talaşlı imalat operasyonlarında sıkıntılar ortaya çıkabilecektir. Bu durum üretim hızını ve doğruluğunu olumsuz etkileyecektir. Bunun yanı sıra uygun niteliklerde seçilmemiş

malzemeler beklenmedik maliyet artışlarına neden olabilecektir. Hem alternatif yakıtlı hem de fosil yakıtlı araçlar için çeşitli komponentlerin seçimine yönelik yapılan çalışmalarda 3 boyutlu tasarım yazılımları, sonlu elemanlar yazılımları ve ÇKKV, Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (BAHS) çok fazla kullanılmıştır [0,0]. TOPSIS, minimum sapma ve ideal negatif çözümden maksimum ayrılma fikrine sahip alternatif mükemmel pozitif çözüm sunar. VIKOR ise, genel faydayı en üst düzeye çıkarmayı amaçlarken bireysel pişmanlığın da en aza indirilmesini sağlar [3].

Literatür incelendiğinde hem alternatif yakıtlı hem de fosil yakıtlı araçlar için çeşitli komponentlerin seçimine yönelik çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda 3 boyutlu tasarım yazılımları, sonlu elemanlar yazılımları ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin yoğunlukla kullanıldığı belirlenmiştir. Söz konusu literatür tarama sonuçlarının bazıları aşağıda verildiği gibidir.

Subaşı yüksek lisans çalışmasında; kesme kalıpları imalatında kullanılan çelikler arasından uygun çelik seçimi araştırılmış ve çözüme kavuşturulmuştur. Etki eden kriterler olarak; aşınma direnci, tokluk, yüksek sıcaklıkta çalışma sertliği, genel kullanım sertliği, bulunabilirlik, maliyet ve işlenebilirlik belirlenmiştir. Uygun malzeme seçiminde seçenek olarak takım çelikleri sınıfından soğuk iş takım çeliklerinden D2, D3, D4, D5, D7 çelikleri uygun görülmüştür. Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi ile problem çözümü için Expert Choice (EC) programından faydalanılmıştır. Duyarlılık analizleri sonucunda, kriterlerden aşınma direnci %26 olan kriter, en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Malzemeler arasından ise en uygun malzeme olarak D2 çeliği görülmüştür [4]. Yiğit ve Gök çalışmalarında; lastiklerin seçimi için ÇKKV yöntemini kullanarak beş temel kriter; ıslak/kuru zemin performansı, gürültü, aşınma ve yakıt tüketimi olarak belirlenmiştir. Beş kriter ve on altı alternatif barındıran karar problemi Gri İlişkisel Analiz (GİA) ve TOPSIS yöntemleri ile çözümlenmiştir. Analiz sonucu ulaşılan sonuçlar; Allgemeiner Deutscher Automobil Club (ADAC) test sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve tüm sıralama sonuçları belirlenmiştir [5]. İç ve Yurdakul çalışmalarında bulanıklığın ve belirsizliğin bulunduğu seçim problemlerinde ÇKKV modelinde tamsayıların yerine bulanık sayıları kullanmışlardır. Makine-ekipman seçimi çalışmalarında en sık rastlanan Bulanık ÇKKV yöntemleri olan BAHS ve Bulanık TOPSIS (BTOPSIS) yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmada on altı adet işleme merkezi ve yedi adet seçim kriteri ile yapılmıştır. Ayrıca sıralamalar arasındaki farklılıklar Spearman'ın sıra ilişkisi testi ile yapılmıştır. Bulanık sayıların kullanımında oluşan yararın seviyesini belirlemek için çeşitli koşullar incelenmiştir [1].

Khorshidi ve Hassani çalışmasında güçlendirilmiş alüminyum matris kompozitlerin mukavemet ve işlenebilirlik kombinasyonlarının TOPSIS ile tercih seçim indeksi (PSI) yöntemleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Ampirik bulgular sonucunda hem TOPSIS hem de PSI yöntemlerinin, tercih edilen alternatif olarak 16 ml SiC partikül boyutu ve %90 nispi yoğunluklu %90 oranında öğütülmüş Al – 5% SiC kompozit seçimine yol açtığını görülmüştür [6]. Chauhan ve Vaish çalışmalarında; çeşitli çok kriterli karar verme yaklaşımlarını kullanarak sert kaplama malzemesi seçimi uygulanmışlardır. Malzemelerin seçiminde TOPSIS yöntemi kullanılmıştır [7]. Yazdani ve Payam çalışmalarında; mikro elektromekanik sistemler (MEMS) elektrostatik aktüerlerin farklı uygulamaları için, çalıştırma voltajı ve kuvveti, çalıştırma hızı ve elektriksel dirence göre en uygun malzemeler seçilmiştir. Bu amaçla, Çok Amaçlı Karar Verme (MODM) tekniği olarak Ashby yaklaşımı, TOPSIS ve Çoklu Nitelikli Karar Verme (MADM) tekniği olarak VIKOR yöntemleri uygulanmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada Ashby, VIKOR ve TOPSIS uygulamaları arasındaki karşılaştırmalar sunulmuştur [3].

Shidpour ve arkadaşları çalışmalarında, üç boyutlu eşzamanlı mühendislik (3D-CE) yaklaşımını kullanarak yeni bir yöntem sunmaktadır. En iyi konfigürasyon ürün tasarımını, montaj sürecini ve bileşen tedarikçilerini belirlemek için TOPSIS yönteminde uygulayarak Çok Amaçlı Doğrusal Programlama (MOLP) modeli kullanır. Metodun uygulanabilirliğini göstermek için sayısal bir örnek kullanılarak gelecekteki araştırmalar için bazı alanlar önerilmiştir [8]. Wang ve Duan çalışmalarında, sezgisel bulanık ve çokgen bulanık kümeler dayanan n-sezgisel çokgen bulanık küme kavramını önermektedir. Daha sonra aritmetik işlemi ve Hamming mesafesi formülünü göstermişlerdir. Ek olarak, pozitif (negatif) ideal çözümün öznel matrisini elde etmek için standartlaştırılmış ve ağırlıklandırma yöntemini uygulayarak ve TOPSIS'i sağlamak için her şema ile pozitif (negatif) ideal çözüm arasındaki Hamming mesafesini hesaplanmıştır. Bu araştırma, göreceli benzerlik derecesine göre alternatif çözümler üzerinde optimize edilmiş sıralar sunmuş ve örnekler aracılığıyla etkinliğini ve uygulanabilirliğini göstermiştir [9]. Rafieyan ve arkadaşları çalışmalarında; Bulut bilişim sistemindeki aksaklıklar üzerine araştırmalar yapmışlardır. Bu sorunları çözmek için bu makalede, en iyi-en kötü çok kriterli karar verme yöntemi (BWM) ve VIKOR

yöntemi kavramının bir kombinasyonuna dayanan yeni bir uyarlanabilir yaklaşım sunmaktadır. VIKOR yöntemi, görev önceliklerini belirlemek için bir karar verici olarak sağlanır. Simülasyon sonuçları, tavsiye edilen yaklaşımın, benzerlerine kıyasla, dikkate alınan tüm deneysel senaryolar için iş hacmi, üretim süresi, bekleme süresi, sanal makine (VM) kullanımı ve VM kullanım maliyeti gibi performans ölçümlerini iyileştirdiğini kanıtlamaktadır [10].

Özcan ve Ömürbek çalışmalarında; demir çelik üretimi yapan bir firmanın 2000-2018 yılları arasındaki üretim, satış, faaliyet karı, çalışan sayısı, ihracat, ithalat, net satışlar, enerji tüketimi, kapasite kullanım oranı kriterleri esas alınarak performansı ve genel durumu hakkında değerlendirmesi yapılmıştır. Demir çelik firmasının performansının değerlendirilmesinde ENTROPİ yöntemiyle kriter ağırlıkları hesaplanıp daha sonra çok kriterli karar verme yöntemlerinden oldukça yaygın kullanılan TOPSIS, MULTIMOORA ve MAUT yöntemleri uygulanmıştır. Performans değerlendirilmesinde kullanılan bu 3 yöntemin çıktıları sonucu 2018 yılının en iyi performansa sahip yıl olduğu belirlenmiştir [11]. Yiğit ve Akpınar çalışmalarında; üç farklı tip rüzgâr türbini kulelerinin (çelik, hibrid ve betonarme) BAHS yöntemiyle seçimi üzerine çalışmışlardır. Kurulum ve bakım maliyetleri, ekonomik ömrü sonundaki geri dönüşüm oranları gibi kriterler bu çalışmada dikkate alınarak. Bu kriterler göz önüne alınarak farklı en uygun rüzgâr tribünü BAHS metodu ile analiz edilmiş ve en uygun kule tipinin hibrid tipi kule olduğu görülmüştür [12]. Kul ve arkadaşları çalışmalarında; her geçen gün ortaya çıkan yüksek mukavemetli yeni malzemelerin işleme gereksinimi, çok küçük işleme alanlarında çalışma gerektiren parçaların varlığı, çok hassas ve kırılğan parçaların işlenmesi ihtiyacı ve karmaşık geometrilerin işlenmesinde ortaya çıkan zorluklar nedeniyle geleneksel imalat yöntemlerinin ötesinde yeni üretim teknolojilerine duyulan ihtiyaç Alışılmamış İmalat Yöntemleri (AİY) ile çözümlenmektedir. Ayrıca birbirinden çok farklı ve sayıları gittikçe artan AİY arasında işlenecek parçaya ve üretim koşullara en uygun olanını seçmek imalatçılar için oldukça önemli bir problem olarak ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada AİY seçimi için, BAHS ve BTOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Bulanıklığın da dahil edildiği seçim yöntemleri geliştirilmiş ve uygulamalar sonucunda bulanıklığın ve farklı seçim yaklaşımlarından ziyade ikili karşılaştırmalar aracılığıyla yapılan ağırlıklandırmanın sıralama sonucunda daha etkili olduğu ve Bulanık TOPSIS'ten ziyade Bulanık AHP aşamasının çok daha önemli olduğu görülmüştür [13].

Karaatlı ve arkadaşları çalışmalarında; Ülkemizde 2012-2013 sezonunda Süper Lig de en fazla gol atan 6 futbolcunun performanslarını değerlendirmelerine çalışmışlardır. Çalışmalarında Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi ile kriterlerin ağırlıklarını elde etmişlerdir. Bu bulguları kullanarak öncelikle TOPSIS yönteminde daha sonra VIKOR yönteminde kullanılarak futbolcuların performansları değerlendirilerek sıralama yapılmıştır. Değerlemede kullanılan bu iki uygulama göre her iki yöntemde de aynı fakat atılan gol sayısına göre yapılan (gol krallığı sıralaması) sıralamadan daha farklı bir sonuca ulaşılmıştır [14].

Uçakcıoğlu ve Eren çalışmalarında; Savunma sanayisinde yapılacak proje yatırımlarının karar ve süreçlerinde çok ölçütlü karar verme yöntemleri sıkça kullanılmaktadır. Çok ölçütlü karar verme yöntemleri, bugüne kadar proje seçimi, yer seçimi, tedarikçi seçimi gibi neredeyse karar verme süreci içeren tüm alanlarda kullanılmıştır. Bu çalışmada, hava savunma sanayisine yapılacak yatırım projelerinin seçimi ele alınarak, çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Prosesi ve VIKOR yöntemi, belirli kriterler ve alternatifler arasında yatırım projesi seçiminde kullanılmıştır [15]. Tran ve arkadaşları çalışmalarında; ideal bir çözüme (Gray-TOPSIS) benzerlik ile tercih sırasına göre tekniğe gömülü gri ilişkisel katsayı üzerinde CFRP bazında işleme yaparken delme işleminin optimum parametresi hakkında kararlar vermeyi hedeflemektedir. Süreç varyasyonunun reddedilmesinde çok etkilidir ve diğer çok kriterli karar verme yaklaşımlarından daha büyük bir yardımcı stratejidir [16]. Wang ve arkadaşları çalışmalarında; bir Faz değişim malzeme (PCM) için etkiyen faktörleri ölçmek ve en iyi PCM yi seçmek için uygun bir yöntem sağlamak için, VIKOR yöntemi PCM seçimi alanında gösterilmiştir. PCM'leri seçmek için etkili ve pratik olduğunu ve stearik asidin düşük sıcaklıkta termal enerji depolaması için seçenekler arasında optimal PCM olduğu anlaşılmıştır [17].

Ceyhan, Yüksek Lisans Tezinde; L7 tipi elektrikli bir aracın şasi tasarımının analizlerini yapmıştır. Ayrıca dayanım, korozyon ve hafiflik gibi nedenlerden dolayı termoplastik kompozit salıncak kolu tasarımı yapılmıştır. Salıncak kolu tasarımındaki parametreleri belirlemek için simülasyon programları yardımıyla kaza animasyonu oluşturulmuştur. Salıncak koluna gelen yükler doğrultusunda tasarım yapılmış ve yapılan tasarım CAE programı aracılığıyla yapılmıştır. İncelemelerde farklı malzemeler ve katman sayılarının etkisi araştırılmıştır [18]. Görener çalışmasında; imalat sektörü göz önünde bulundurularak tedarik zinciri

stratejisinin seçimi konusu irdelenmiştir. Çalışmada uygun stratejinin belirlenebilmesi için, sayısal ve sayısal olmayan kriterlerin ele alınmış, VIKOR yöntemi ve bulanık mantık tabanlı bir metodoloji geliştirilmiştir. En küçük indeks değerine sahip strateji olan, “yalın-çevik” tedarik zinciri stratejisinin seçilmesi uygun görülmüştür [19].

TOPSIS yöntemi güçlendirilmiş alüminyum matris kompozitler (16 mikron SiC’da Al-5%SiC kompozit) [6], sert kaplama malzemesi [7] MEMS elektrostatik aktüerlerini [3] işleyebilmek için uygulanmıştır. Ayrıca bu yöntem en iyi konfigürasyon ürün tasarımı, montaj süreci ve bileşen tedarikçilerini belirlemek MOLP modeli kullanılarak [8], Hamming mesafe hesaplaması [9], demir çelik üretimi performans değerlendirmesi [11], futbolcu performansı değerlendirmesi [14] amacıyla da kullanılmıştır.

MEMS elektrostatik aktüerleri [3], bulut bilişim sistemi aksaklıkların belirlenmesi [10], futbolcu performansı değerlendirmesi [14], hava savunma sanayisine yapılacak yatırım projelerinin seçimi [15], faz değişim malzeme seçimi [17], imalat sektörünün tedarik zinciri stratejisi seçimi [19] çalışmalarında VIKOR yönteminden faydalanılmıştır.

Demir çelik üretimi performans değerlendirmesi için TOPSIS, MULTIMOORA ve MAUT yöntemleri [11], rüzgâr türbini kulelerinin seçiminde BAHS yöntemi [12], yüksek mukavemetli yeni malzemelerin işlenmesinde BAHS ve BTOPSIS yöntemleri [13], karbon fiber takviyeli plastiğin (CFRP) işleme yaparken delme işleminin optimum parametresinin karar verme sürecinde Gray-TOPSIS [16], L7 tipi elektrikli bir aracın şasi tasarımının analizleri bilgisayar destekli mühendislik (CAE) programı [17], imalat sektörünün tedarik zinciri stratejisi seçiminde bulanık mantık tabanlı bir metodoloji [19] uygulanmıştır.

Kesme kalıpları imalatında kullanılan soğuk iş takım çeliklerinden D2, D3, D4, D5, D7 çelikleri için aşınma direnci, tokluk, yüksek sıcaklıkta çalışma sertliği, genel kullanım sertliği, bulunabilirlik, maliyet ve işlenebilirlik parametreleri incelenerek Analitik Hiyerarşi Prosesinin Expert Choice (EC) programı kullanılarak duyarlılık analizine göre en uygun malzemenin %26 aşınma direncine sahip D2 çeliği olduğu görülmüştür [4].

Yapılan çalışmalarda otomobil şasisi malzeme seçimi amacıyla Solidworks 3 boyutlu modelleme yazılımı ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak TOPSIS yöntemi ve VIKOR yöntemlerinin karşılaştırıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada üretim hızı, doğruluğu ve uygun niteliklerde seçilmemiş malzemeler gibi belirtilen problemlerin önüne geçebilmek amacıyla farklı 3 çelik malzeme için çeşitli kriterler üzerinden bir değerlendirme yapılarak en iyi malzeme seçim kombinasyonları belirlenmiştir. Analizlerde Solidworks 3 boyutlu modelleme yazılımı, ANSYS sonlu elemanlar yazılımı, TOPSIS yöntemi ve VIKOR yöntemi kullanılmıştır. Çalışma bu yönüyle literatüre katkı sağlayacaktır.

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

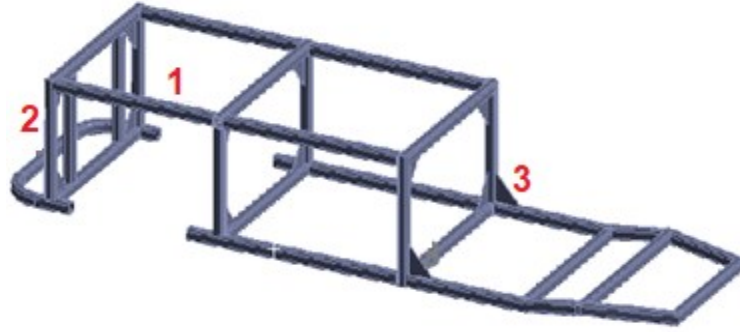
Şasi üretiminde rol oynayan önemli parametreler; şasinin emniyet faktörü, üretimde kullanılan malzemelerin kaynak edilebilme ve işlenebilme yeteneği ve üretim maliyetidir. Emniyet katsayısının belirlenebilmesi için çalışmada şasi, Solidworks yazılımı ile 3 boyutlu modellenmiş, üzerine etki eden kuvvetler hesaplanmış, analiz sınır şartları belirlenmiş ve son olarak analiz ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Üretimde kullanılan malzemelerin kaynak edilebilirlik ve işlenebilme parametrelerinin tayininde malzemelerin kimyasal özellikleri ve karbon eşdeğer miktarı göz önünde bulundurularak derecelendirme yapılmıştır. Üretim maliyeti, şasi imalatı için kullanılan malzemelerin piyasa fiyatları dikkate alınarak tespit edilmiştir.

### 2.1. Şasi Emniyet Faktörünün Belirlenmesi

Emniyet faktörü, üretimi yapılacak her parça ve bu parçanın kullanılacağı sistemin geneli için çok önemlidir. Tasarım aşamasında yazılımlar vasıtasıyla gerçekleştirilen analizler, tasarımın ömrü hakkında üretime başlamak için fikir vermektedir. Çalışmada yolcu güvenliği, imalat kolaylığı ve günümüzde tercih edilen otomobil ve kamyon şasileri merdiven tipi koşullarına göre yeni bir şasi tasarımı yapılmıştır.



Şasi konstrüksiyon yapısı, kaynaklı birleştirmelerle birbirine entegre edilmiş yatay (1), dikey (2) ve federler (3) olarak üç ana parçadan oluşmaktadır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Tasarımı yapılan şasi konstrüksiyonu

Tasarlanan şasiye günlük kullanımda etki edecek kuvvetler Tablo 1.'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Şasiye etki eden yükler

Yük	Uyguladığı Kuvvet (N)
Kabuk	912,5
Sürücü	800
Taşınacak yük	512,5
DC motor	200
Akü grubu	600

Tablo 1.'de belirtilen kuvvetlere göre gerçekleştirilen statik analizler sonucunda şasinin farklı malzeme kombinasyonları için emniyet katsayısı faktörü (s) belirlenmiştir. Uygulanan kuvvetler sonucu oluşan akma gerilmesinin, malzemenin akma gerilmesine oranlanması olan emniyet katsayısı faktörünün yüksek olması beklenmektedir.  $S > 1$  olması tasarımın güvenli olduğunu göstermektedir.

Optimizasyon işlemi sırasında emniyet faktörüne maksimizasyon yapılmıştır.

## 2.2. Şasi Üretiminde Kullanılacak Malzemelerin Kaynak Edilebilme ve İşlenebilme Yeteneği Parametrelerinin Belirlenmesi

Üretim aşamasını etkileyen bir diğer faktör de üretimde kullanılacak malzemelerin kaynak edilebilme ve işlenebilme yeteneğidir. Karbon miktarı %0,2'nin üzerinde olan çelik malzemeler tavlama işlemi yapıldıktan sonra kaynak edilmelidir. Çeliğin kimyasal içeriğinde; karbon (C), silisyum (Si), potasyum (P), kükürt (S), nikel (Ni), bakır (Cu) ve mangan (Mn) gibi elementler bulunmaktadır. Bu elementler çeliğin kaynak edilebilirlik parametresini etkilemektedir. Etki oranının hesaplanabilmesi için karbon eşdeğeri (Ceş) adında bir eşitlik geliştirilmiştir (Denklem 1) [22,23].

$$C_{eş} = \%C + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

Üretimde kullanılacak çelik malzemelerin Ceş değerlerinin yüksek olması kaynak kabiliyetlerini düşürdüğünden dolayı optimizasyon işleminde kaynak edilebilme için Ceş değerinin düşük olması beklenmekte olup minimizasyon işlemi yapılmıştır. Optimizasyon işlemine katılacak çelik malzemelerin kimyasal özellikleri ve Ceş değerleri Tablo 2.'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Malzemelerin kimyasal özellikleri

Çelik Türü	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%N	%Cu	Ceş
------------	----	-----	-----	----	----	----	-----	-----

Ck45	0,43	0	0,6	0,04	0,05	-	-	0,53
St52	0,24	0,55	1,6	0,035	0,035	0,012	0,55	0,543333
C4140	0,38	0,15	0,75	0,035	0,04	-	-	0,505

Üretimi etkileyen bir diğer parametre olan işlenebilirlik yeteneği parametresi ise çelik malzemelerde kullanılan C miktarları (Tablo 3) ve alaşım elementlerinin işlenebilirliğe etkisi (Tablo 4) açısından incelenmiştir. Karbon miktarı artıkça malzemenin mukavemeti artacağı için işlenebilirlik yeteneği de azalacağından dolayı optimizasyon sırasında C miktarı minimizasyon yapılarak hesaba katılmıştır. İşlenebilirliğe etki eden bir diğer unsur ise çeliğin yapısında bulunan/katılan farklı alaşım elementleridir. Kimyasal özelliklerin sayısallaştırarak hesaba katılabilmesi için bir eşitlik geliştirilmiştir (Denklem 2) [21].

**Tablo 3.** Malzeme %C miktarları

Çelik Türü	C miktarı
Ck45	0,43
St52	0,24
C4140	0,38

**Tablo 4.** Alaşım elementlerinin işlenebilirliğe etkisi [0]

	Si	Mn	Cr	Al	W	V	Co	Mo	S	P
İşlenebilirlik	↓	↓	-	↓	↓↓	-	↔	↓	↑↑ ↑	↓↓ ↓

İşlenebilirlik parametresini sayısallaştırarak TOPSIS ve VIKOR yöntemlerinde kullanabilmek amacıyla Tablo 2 kullanılarak bir formül türetilmiştir [0,23]. Denklem 2. dikkate alınarak alaşım elementlerinin hesaplanan işlenebilirlik katsayısı (COM) değerleri Tablo 5.'te verilmiştir.

$$COM = 3x\%S - \%Si - \%Mn - \%Ni - 2x\%W - \%Mo - 3x\%P \quad (2)$$

**Tablo 5.** Malzeme COM değerleri

Çelik Türü	COM
Ck45	-0,57
St52	-2,15
C4140	-0,885

### 2.3. Üretim Maliyeti

Üretim aşamasını etkileyen bir diğer önemli parametre ise kullanılacak çelik malzemelerin kilogram (kg) fiyatlarıdır. Tablo 6'da ulusal çelik firmalarının web sitelerinde yayınlamış oldukları çelik kg fiyatları görülmektedir.

**Tablo 6.** Malzeme fiyatları

Çelik Türü	Fiyat (TL/kg)
Ck45	0,011847165
St52	0,00973
C4140	0,0146

Şasi üretiminde 3 farklı çelik alaşımı için (Ck45, St52, C4140) malzeme seçiminde çok kriterli problem oluşturulmuştur. Çok kriterli problem çözümünde çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS ve VIKOR yöntemi kullanılmıştır.

## 2.4. TOPSIS Yöntemi

İdeal seçim artan veya azalan varyasyon olarak tanımlanabilir. Böylelikle, en ideal optimizasyon en iyi özneliliklerden oluşurken; en kötü çözüm en kötü özneliliklerden oluşur. TOPSIS yöntemi, en ideal çözüme yakın ve en kötü çözüme uzak çözümler seçmeye çalışır [6,24]. İlk olarak problem matrisi ve her bir parametre için ağırlık matrisinin oluşturulması gerekmektedir (Denklem 3-4) [3].

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu yöntem, matematiksel olarak özetlenmiştir;

1. Normalleştirilmiş karar matrisi  $r_{ij}$  değeri hesaplanır (Denklem 5);

$$r_{ij} = A_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m X_i^2} \quad i = 1,2,3 \dots m; j = 1,2,3 \dots n \quad (5)$$

2. Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisini hesaplanır (Denklem 6);

$$V_{ij} = W_{ij} \times r_{ij} \quad i = 1,2,3, \dots m; j = 1,2,3 \dots m \quad (6)$$

3. Pozitif ve negatif ideal çözümler belirlenir (Denklem 7-8);

$$V^+ = \left\{ \left( \sum_i^{\max} V_{ij} / j \in J \right), \left( \sum_i^{\min} V_{ij} / j \in J \right) / i = 1,2,3, \dots m \right\} = V_1^+, V_2^+, V_3^+ \dots \quad (7)$$

$$V^- = \left\{ \left( \sum_i^{\min} V_{ij} / j \in J \right), \left( \sum_i^{\max} V_{ij} / j \in J \right) / i = 1,2,3, \dots m \right\} = V_1^-, V_2^-, V_3^- \quad (8)$$

4. İdeal pozitif ve ideal negatif değerler hesaplanır (Denklem 9-10);

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad i = 1,2,3, \dots m \quad (9)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad i = 1,2,3, \dots m \quad (10)$$

5. Pozitif ideal çözüme yakınlık belirlenir (Denklem 11);

$$R_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \quad S_i^+ \geq 0, \quad S_i^- \geq 0 \text{ ve } R_i \in [0,1] \quad (11)$$

## 2.5. VIKOR Yöntemi

Çalışmada kullanılacak çok kriterli karar verme yöntemlerinden bir diğeri VIKOR yöntemidir. Bu yöntem, en uygun karar seçeneklerini belirlemek için seçeneklerden performansın en iyi olanın seçilmesi ya da karar

seçeneklerini performanslarına göre sıralanmasına dayanmaktadır. Yöntemin amacı, karar seçeneklerinin sıralanmasında en ideal çözüme en yakın olan uzlaşık çözüme ulaşmaktır. Problem matrisi ve her bir parametre için ağırlık matrisinin Denklem 3 ve 4'te belirtilmiştir. VIKOR yöntemin matematiksel modeli aşağıda özetlenmiştir [3];

1. Karar matrisi normalleştirilir (Denklem 12);

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}}, j = 1,2,3 \dots m, i = 1,2,3, \dots n \quad (12)$$

2. Çözüm için, parametrelere en iyi ve en kötü durumları belirlenir.
3. Fayda ve zarar ölçütleri hesaplanır (Denklem 13-14);

$$S_j = \sum_{i=1}^n \frac{w_i(f_i^+ - f_{ij})}{f_i^+ - f_i^-} \quad (13)$$

$$R_j = \max_i \sum_{i=1}^n \frac{w_i(f_i^+ - f_{ij})}{f_i^+ - f_i^-} \quad (14)$$

4. İdeal pozitif ve ideal negatif değerler hesaplanır (Denklem 15);

$$Q_j = \frac{v(S_j - S^+)}{(S^- - S^+)} + (1 - v) \frac{(R_j - R^+)}{(R^- - R^+)} \quad (15)$$

5. Çözümler arasında sıralama yapılarak en ideal çözüm belirlenir.

V; kriterlerin çoğunluğunun ağırlıklı olarak toplam faydasıdır.  $0 < V < 1$  ve genellikle V'nin değeri 0,5 olarak kabul edilir [24].

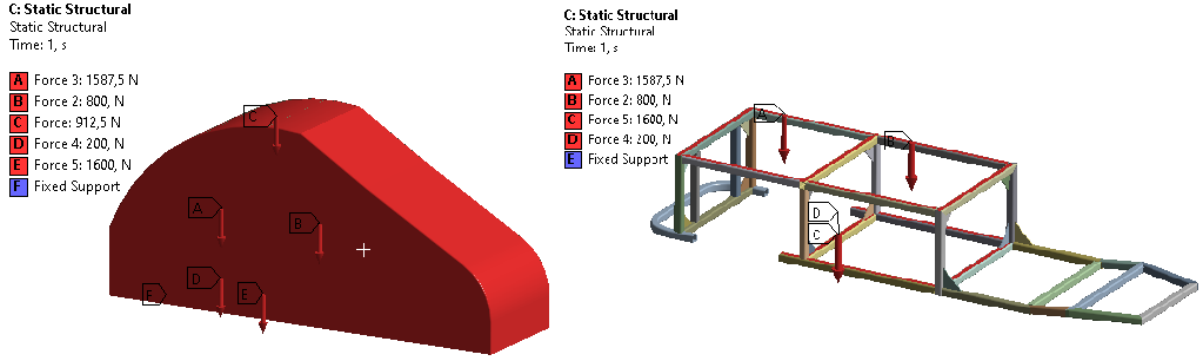
### 3. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Çok kriterli problemin oluşturulabilmesi için öncelikle emniyet faktörü hesabı yapılmıştır. Güvenlik katsayısının belirlenebilmesi için şaside meydana gelen gerilme dağılımlarının ve kullanılacak malzemelerin akma ve çekme dayanımlarının belirlenmesi gerekmektedir (Tablo 7).

**Tablo 7.** Kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri

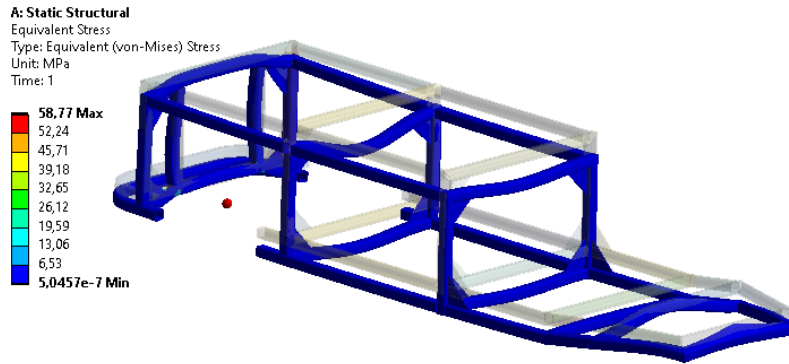
Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (%) (mm)
Ck45	500	590-735 MPa	14
St52	355	510-680 MPa	18
C4140	330	590-735 MPa	17

Şasinin statik analizinin gerçekleştirilebilmesi için tasarımı yapılan şasi, ANSYS sonlu elemanlar paket yazılımına aktarılmıştır. Analiz için sınır şartları belirlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Şasiye uygulanan sınır şartları

Analizin gerçekleştirilmesi için sonlu elemanlar ağ modeli oluşturulmuştur. Ağ, 130085 noktadan ve 57444 elementten meydana gelmektedir. Analiz işlemleri sonucunda şaside 58,77 MPa'lık gerilme oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 3). 3 farklı malzeme ve 3 farklı bölge için  $3^3$  farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda şaside meydana gelen akma gerilmesinin seçilen malzemelerin akma gerilmesinin çok altında olduğu görülmüş ve şasinin analize tabi tutulan her malzeme için güvenlik değerini karşıladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 3. Şaside oluşan gerilme değeri

Analizlere bağlı olarak şasi üretimine etki eden parametreler, çok kriterli karar verme problemine göre oluşturulmuştur (Tablo 8).

Elektrikli araç şasi malzeme seçiminde emniyet faktörü, maliyet unsuru, kaynak edilebilme ve işlenebilme parametreleri sayısallaştırılarak problem oluşturulmuştur. Kaynak edilebilme yeteneği Tablo 2'de, işlenebilme yeteneği ise Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir. Maliyet parametresi ise Tablo 5'te sunulmuştur.

Çok kriterli problemin çözümü için problemi oluşturan sorunların yüzde ağırlıkları; emniyet faktörü %5, maliyet unsuru %25, kaynak edilebilme %35, işlenebilme yeteneğini oluşturan alaşım element özelliği %15 ve mukavemet değeri %20 oranları belirlenmiştir (Tablo 8). Burada emniyet faktörünü %5 gibi düşük bir değer alamamızın sebebi bir önceki aşamada yapılan analizlerde her bir malzeme için şasinin yüksek mukavemetli olması ve her şekilde güvenli sınırlar içerisinde yer almasıdır.

Kaynak edilebilme ve işlenebilme yetenekleri, tasarımın üretimine doğrudan etki ettiği için en önemli parametrelerdir. Bu iki parametre aynı zamanda şasinin güvenlik katsayısı parametresinde de etkilidir. Şasi kaynaklı birleştirmelerinin iyi yapılamaması durumunda şasi yapısının mukavemeti, titreşimlere karşı tepkisi, frenleme ve keskin virajlardaki davranışı istenilen seviyede olamayacaktır. Kaynak bölgelerinde kırılma/çatlama/malzeme yapısında meydana gelen mikro değişimler şasinin yapısal bütünlüğüne olumsuz etki edecektir. Bunun yanı sıra işlenebilme yeteneği dikkate alınmadan üretime geçilmesi hem üretimde sorunlara yol açabileceği gibi hem de malzeme ve buna bağlı olarak şasi yapısının istenilen nitelikleri sağlayamamasına neden olacaktır. Mühendislik tasarımında oldukça önemli rol oynayan bu iki parametrede

%35'lik oranlarla en yüksek ağırlık verilmiştir. İkinci olarak mühendislik tasarımlarında aranan en önemli özellik maliyettir. Tasarımı yapılan ürünlerin güvenli ve aynı zamanda en uygun maliyetle üretilmesi tercih edilmektedir. Bu çalışmada tasarlanan şasinin her malzeme kombinasyonu durumda güvenli aralıkta olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden emniyet faktörü %5, maliyet faktörü ise %35 olarak ağırlıklandırılmıştır (Tablo 9).

**Tablo 8.** Sorun ağırlık oranları

<b>Sorun</b>		<b>Ağırlık Oranı</b>	<b>İstenilen Kriter</b>
Maliyet		%25	Minimum olmalı
Kaynak edilebilme		%35	Minimum olmalı
İşlenebilme yeteneği	Alaşım element özelliği	%15	Minimum olmalı
	Mukavemet değeri	%20	Minimum olmalı
Emniyet faktörü		%5	Maksimum olmalı

Malzemeler			Maliyet	Emniyet Faktörü	Kaynak Edilebilme Yetengi	İşlenebilme Yeteneği	
Yatay	Dikey	Federler				Mukavemet	Alaşım Element Özelliği
Ck45	Ck45	Ck45	899,1969	8,507	5446733,775	4157566,017	11602509,82
Ck45	Ck45	St52	893,38	8,507	5439733,775	4091066,017	11943409,82
Ck45	Ck45	C4140	906,7603	8,507	5411733,775	4140066,017	11497509,82
Ck45	St52	Ck45	872,1767	8,507	5414217,994	3848666,104	13186028,32
Ck45	St52	St52	866,3598	8,507	5407217,994	3782166,104	13526928,32
Ck45	St52	C4140	879,7401	8,507	5379217,994	3831166,104	13081028,32
Ck45	C4140	Ck45	934,3297	8,507	5284154,873	4076276,566	11114773,11
Ck45	C4140	St52	928,5128	8,507	5277154,873	4009776,566	11455673,11
Ck45	C4140	C4140	941,8931	8,507	5249154,873	4058776,566	11009773,11
St52	Ck45	Ck45	765,5247	6,0405	5292874,392	2695901,877	19095461,78
St52	Ck45	St52	765,5247	6,0405	5285874,392	2629401,877	19436361,78
St52	Ck45	C4140	778,905	6,0405	5257874,392	2678401,877	18990461,78
St52	St52	Ck45	744,3215	6,0405	5260358,611	2387001,963	20678980,28
St52	St52	St52	738,5046	6,0405	5253358,611	2320501,963	21019880,28
St52	St52	C4140	751,8849	6,0405	5225358,611	2369501,963	20573980,28
St52	C4140	Ck45	806,4745	6,0405	5130295,49	2614612,426	18607725,07
St52	C4140	St52	800,6576	6,0405	5123295,49	2548112,426	18948625,07
St52	C4140	C4140	814,0379	6,0405	5095295,49	2597112,426	18502725,07
C4140	Ck45	Ck45	1065,44	5,651	4677436,859	3772917,559	9294619,068
C4140	Ck45	St52	1059,623	5,651	4670436,859	3706417,559	9635519,068
C4140	Ck45	C4140	1073,004	5,651	4642436,859	3755417,559	9189619,068
C4140	St52	Ck45	1038,42	5,651	4644921,078	3464017,646	10878137,57
C4140	St52	St52	1032,603	5,651	4637921,078	3397517,646	11219037,57
C4140	St52	C4140	1045,983	5,651	4609921,078	3446517,646	10773137,57
C4140	C4140	Ck45	1100,573	5,651	4514857,957	3691628,108	8806882,362
C4140	C4140	St52	1094,756	5,651	4507857,957	3625128,108	9147782,362
C4140	C4140	C4140	1108,136	5,651	4479857,957	3674128,108	8701882,362

Tablo 9. Şasi üretimine etki eden çok kriterli problem

Problemin çözümünde ilk olarak çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. TOPSIS yönteminde Eşitlik 5-11 sırası ile takip edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda en iyi optimizasyonun dikey profil ve federlerinde St52 çeliği, yatay profilin ise 4140 çelik malzemeden olduğu görülmüştür (Tablo 10).

**Tablo 10. TOPSIS yöntemi sonuçları**

<i>Yatay</i>	<i>Dikey</i>	<i>Feder</i>	<i>Qi</i>	<i>Sıralama</i>
<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	0,457176	27
<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	0,457848	26
<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	0,459916	25
<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	<i>Ck45</i>	0,462346	24
<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	<i>St52</i>	0,464184	23
<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	<i>C4140</i>	0,465605	22
<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	<i>Ck45</i>	0,470901	21
<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	<i>St52</i>	0,472159	20
<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	<i>C4140C4140</i>	0,474139	19
<i>St52</i>	<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	0,505099	17
<i>St52</i>	<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	0,504782	18
<i>St52</i>	<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	0,505994	16
<i>St52</i>	<i>St52</i>	<i>Ck45</i>	0,510924	15
<i>St52</i>	<i>St52</i>	<i>St52</i>	0,512207	14
<i>St52</i>	<i>St52</i>	<i>C4140</i>	0,513759	13
<i>St52</i>	<i>C4140</i>	<i>Ck45</i>	0,519063	12
<i>St52</i>	<i>C4140</i>	<i>St52</i>	0,520641	10
<i>St52</i>	<i>C4140</i>	<i>C4140</i>	0,522848	8
<i>C4140</i>	<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	0,519967	11
<i>C4140</i>	<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	0,523149	7
<i>C4140</i>	<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	0,52256	9
<i>C4140</i>	<i>St52</i>	<i>Ck45</i>	0,536309	3
<b><i>C4140</i></b>	<b><i>St52</i></b>	<b><i>St52</i></b>	<b>0,540248</b>	<b>1</b>
<i>C4140</i>	<i>St52</i>	<i>C4140</i>	0,539125	2
<i>C4140</i>	<i>C4140</i>	<i>Ck45</i>	0,530911	6
<i>C4140</i>	<i>C4140</i>	<i>St52</i>	0,534284	4
<i>C4140</i>	<i>C4140</i>	<i>C4140</i>	0,532896	5

İkinci yöntem olarak uygulanan VIKOR yönteminde ise Eşitlik 12-15 sırasıyla uygulanmıştır. VIKOR yönteminde optimum malzeme sıralaması diğer yöntemlerden farklı olarak ters sıralanır. İşlemler sonucunda en düşük değeri veren malzeme optimizasyonu, en iyi çözüm olarak belirlenir. Yapılan hesaplamalar sonucunda en iyi çözümün TOPSIS yönteminde elde edilen sonuca benzer şekilde dikey profil ve federlerin St52 çeliği, yatay profilin ise 4140 çelik malzemede olduğu görülmüştür (Tablo 11).

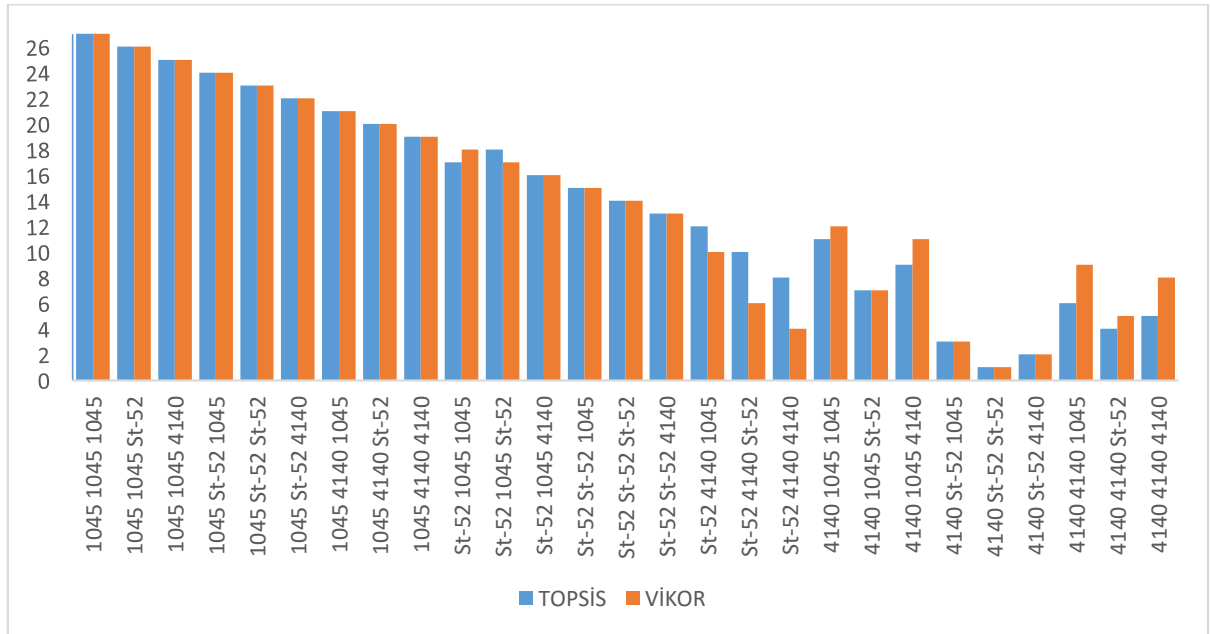
**Tablo 11. VIKOR yöntemi sonuçları**

<i>Yatay</i>	<i>Dikey</i>	<i>Feder</i>		<i>Sıralama</i>
<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	1	27
<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	0,97224	26
<i>Ck45</i>	<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	0,936303	25
<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	<i>Ck45</i>	0,871053	24
<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	<i>St52</i>	0,843293	23
<i>Ck45</i>	<i>St52</i>	<i>C4140</i>	0,807355	22
<i>Ck45</i>	<i>C4140</i>	<i>Ck45</i>	0,704119	21



Ck45	C4140	St52	0,676359	20
Ck45	C4140	C4140	0,640422	19
St52	Ck45	Ck45	0,469406	18
St52	Ck45	St52	0,449622	17
St52	Ck45	C4140	0,413684	16
St52	St52	Ck45	0,348434	15
St52	St52	St52	0,320674	14
St52	St52	C4140	0,284737	13
St52	C4140	Ck45	0,181501	10
St52	C4140	St52	0,153741	6
St52	C4140	C4140	0,117803	4
C4140	Ck45	Ck45	0,196386	12
C4140	Ck45	St52	0,163992	7
C4140	Ck45	C4140	0,191546	11
C4140	St52	Ck45	0,045912	3
<b>C4140</b>	<b>St52</b>	<b>St52</b>	<b>0,013518</b>	<b>1</b>
C4140	St52	C4140	0,041073	2
C4140	C4140	Ck45	0,173904	9
C4140	C4140	St52	0,14151	5
C4140	C4140	C4140	0,169065	8

Maliyet, güvenlik katsayısı, kaynak edilebilme ve işlenebilme kavramları ile çok kriterli oluşturulan problemin çözümünde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden TOPSIS ve VIKOR yöntemleri kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 4). TOPSIS ve VIKOR analizleri incelendiğinde ikinci ideal optimizasyon seçeneği olarak yatay profillerin ve federlerin C4140 çeliğinden, dikey profillerin St52 çeliğinden yapılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki yöntemde de benzer sonuçların çıkması sorun ve ağırlık matrisinin doğru bir şekilde oluşturulduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Sıralama sonuçları

Çalışmada şasi üretiminde etkili faktörler olan maliyet, emniyet, kaynak edilebilme ve işlenebilme yeteneği faktörlerinin karşılaştırmalı olarak çok kriterli karar verme yöntemleri ile incelenmesi ve buna bağlı olarak şasi parçaları için optimum malzeme kombinasyonu belirlenmiştir. Otomobil şasesi malzeme seçimi amacıyla Solidworks 3 boyutlu modelleme yazılımı ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak TOPSIS yöntemi ve VIKOR yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen şasi yapısı yatay elemanlar, dikey elemanlar ve federlerden oluşmaktadır. ÇKKV analizinden sonra ilk en iyi malzeme kombinasyonu seçeneği yatay profillerin C4140 çeliğinden ve maliyetin düşük olması için ise diğer şasi konstrüksiyon elemanlarının St52 çeliğinden yapılmasının her iki ÇKKV yöntemi açısından en ideal seçenek olduğu ortaya konmuştur. C4140 çeliğinin mekanik ve kimyasal özelliklerinin diğer iki çeliğin özelliklerine göre ortalama değerlere sahip olması, optimizasyon işleminde bu çeliği ön plana çıkarmıştır. TOPSIS ve VIKOR analizleri incelendiğinde ikinci ideal optimizasyon seçeneği olarak yatay profillerin ve federlerin C4140 çeliğinden, dikey profillerin St52 çeliğinden yapılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki yöntemde de benzer sonuçların çıkması sorun ve ağırlık matrisinin doğru bir şekilde oluşturulduğunu göstermektedir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Yurdakul M. ve İç YT. (2008). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerini Kullanan Makine-Ekipman Seçim Çalışmalarında Bulanıklığın Sonuçlara Etkisinin İncelenmesi. İşletme Fakültesi Dergisi 9 (1): 125-140.
- [2] Kumar R., Chodha V., Dubey R. vb. (2021). Selection of industrial arc welding robot with TOPSIS and Entropy MCDM techniques. Materialstoday: proceedings, Online Basım.
- [3] Yazdani M. ve Payam AF. (2015). A comparative study on material selection of microelectromechanical systems electrostatic actuators using Ashby, VIKOR and TOPSIS. Mater. Des. 65, 328–334.
- [4] Şubaşı RM. (2019). Pres Kalıpları İmalatında Malzeme Seçimi İçin Bir Karar Destek Sistem Tasarımı ve Uygulaması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.
- [5] Gök M. ve Yiğit AM. (2017). TOPSIS ve GİA Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Lastik Seçimi. Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi 7(3): 423-431.
- [6] Khorshidi R. ve Hassani A. (2013). Comparative analysis between TOPSIS and PSI methods of materials selection to achieve a desirable combination of strength and workability in Al/SiC composite. Materials and Design 52: 999–1010.
- [7] Chauhan A. ve Vaish R. (2013). Hard coating material selection using multi-criteria decision making. Materials and Design 44:240-245.
- [8] Shidpour H., Shahrokhi M. ve Bernard A. (2013). A multi-objective programming approach, integrated into the TOPSIS method. Computers & Industrial Engineering 64: 875–885.
- [9] Wang G. ve Duan Y. (2018). TOPSIS approach for multi-attribute decision making problems based on n-intuitionistic polygonal fuzzy sets description Computers & Industrial Engineering 124: 573–581.
- [10] Rafieyan E., Khorsand R. ve Ramezanzpour M. (2020). An adaptive scheduling approach based on integrated best-worst and VIKOR for cloud computing. Computers & Industrial Engineering 140. 106272.
- [11] Özcan A. ve Ömürbek N. (2020). Bir Demir Çelik İşletmesinin Performansının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi, IBAD Sosyal Bilimler Dergisi Sayı 8:77-98.

- [12] Yiğit ME. ve Akpınar ME. (2021). Rüzgâr Türbin Kulesi Alternatiflerinin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 23:386-393.
- [13] Kul Y., Şeke A. ve Yurdakul M. (2014). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Alışılmamış İmalat Yöntemlerinin Seçiminde Kullanılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 29 (3): 589-603.
- [14] Karaatlı M., Ömürbek N. ve Köse G. (2014). Analitik Hiyerarşi Süreci Temelli TOPSIS ve VIKOR Yöntemleri ile Futbolcu Performanslarının Değerlendirilmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 29 (1): 25-61.
- [15] Uçakcıoğlu B. ve Eren T. (2017). Analitik Hiyerarşi Prosesi ve VIKOR Yöntemleri ile Hava Savunma Sanayisinde Yatırım Projesi Seçimi, *Harran Mühendislik Dergisi* 2 (2): 35-53.
- [16] Tran QP., Nguyen VN. ve Huang SC. (2020). Drilling Process on CFRP: Multi-Criteria Decision-Making with Entropy Weight Using Grey-TOPSIS Method. *Applied Sciences* 10, 7207.
- [17] Wang Y. Zhang Y. Yang W. ve Ji Hu. (2015). Selection of Low-Temperature Phase-Change Materials for Thermal Energy Storage Based on the VIKOR Method. *Energy Technology* 3:84-89.
- [18] Ceyhan MB. (2020). L7 Tipi Elektrikli Bir Aracın Yüksek Şasili Olarak Tasarım, Alternatif Malzeme ve Birleştirme Teknikleri ile Prototip Üretimi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*.
- [19] Görener A. (2013). Tedarik Zinciri Stratejisi Seçimi: Bulanık VIKOR Yöntemiyle İmalat Sektöründe Bir Uygulama, *Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi* 5(3):47-62.
- [20] Anık S. Kaynak Tekniği El Kitabı Yöntemler ve Donanımlar. GEV Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü.
- [21] Net; <https://atgdemircelik.com/alasim-elementlerinin-celice-etkisi-s21.html>
- [22] Alvalı GT. (2019). Raylı Sistem Araç Teknolojisine Mühendislik ve Ekonomi Yaklaşımlarının Uygulanması: Yük Vagonu Bojisi Örneği. *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*.
- [23] Çetin MH. ve Alvalı GT. (2020). Yük Vagonu Bojisi Tasarımında Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Malzeme Seçimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(1): 91-104.
- [24] Vahdani B., Mousavi SM., Tavakkoli-Moghaddam R. ve Hashemi H. (2013). A New Design Of The Elimination And Choice Translating Reality Method For Multi-Criteria Group Decision-Making in An Intuitionistic Fuzzy Environment. *Applied Mathematical Modelling* 37:1781–1799.



## Prototype development of a solar-powered backpack for camping applications

Mustafa Engin BAŞOĞLU<sup>1\*</sup> Salihcan Muhammet ÜSTEK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gümüşhane University Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering0, 29100, GÜMÜŞHANE

### Article Info

Research article  
Received:10.08.2021  
Revision:25.09.2021  
Accepted:27.09.2021

### Keywords

Solar energy  
Solar powered backpack  
Photovoltaic  
Solar panel

### Abstract

Solar energy, the use and importance of which is increasing day by day, stands out among renewable energy sources with many applications. In this study, the application of solar powered orthopedic back support backpack has been presented with a special photovoltaic module structure. The 2x12W photovoltaic panel system has been mounted on the backpack with a rail arrangement and optional use is provided according to the user's preference. Since there will be additional equipment in the solar self-energized backpack compared to a normal bag, the sections where the items should be put in the bag according to their weight should be specified to the user. Considering the center of gravity of the backpack, pockets have been made in the parts where heavy components will be fixed, and a 12V 7Ah lead acid battery is mounted in this section. There is a 5V - 1A USB output at the system output and a modified sinus inverter for AC loads. In addition, prototype production was carried out for the realized design, and a backpack was produced, which can be used for charging mobile phones and feeding simple AC loads such as heaters, coolers and shavers. It is thought that this bag will be an attractive product for camping applications and travellers traveling by hitchhiking.

## 1. INTRODUCTION

Solar energy has been a beacon of hope for the world in the current period where energy and water resources are limited and threaten the future. The wind is no longer just a cool touch, and again the sun is not just the effect of those beautiful views watched but for the whole world. The inspiration for this study was the widespread use of renewable energy sources and the development of a wearable technology-based product.

Photovoltaic modules are manufactured in many different material structures, from power levels of a few watts to several hundred watts. Their use varies from application to application, depending on the material and power conversion efficiency [1]. In particular, energizing portable devices, lighting applications in open areas, traffic lighting, smart bus stops, robotic applications, backpacks, power banks, solar tree, feeding low power auxiliary equipment of electric vehicles, tent applications, calculator applications with very low power requirements and photovoltaic-based energy supply in wearable devices such as wristwatches become widespread. There are different studies in the literature that include such applications [2-14].

In [3], a photovoltaic energy based power generation system is designed in remote locations from the electricity grid. With the photovoltaic modules in the system, 12V DC voltage lead acid batteries are charged based on the maximum power point tracking principle. In order to obtain 5V DC and 24V DC levels, buck and boost converters have been used, respectively. In addition, USB outputs are utilized for charging electronic devices. A 120V AC modified sinus inverter is also available for AC loads in the system. Another study focuses on fast charging stations for electric vehicles. In this context, it is stated that the prevalence of electric vehicles and the load they will bring to the grid will increase in the coming years. For this reason, it is expected that solar charging stations work like fuel stations [4]. One of the mobile

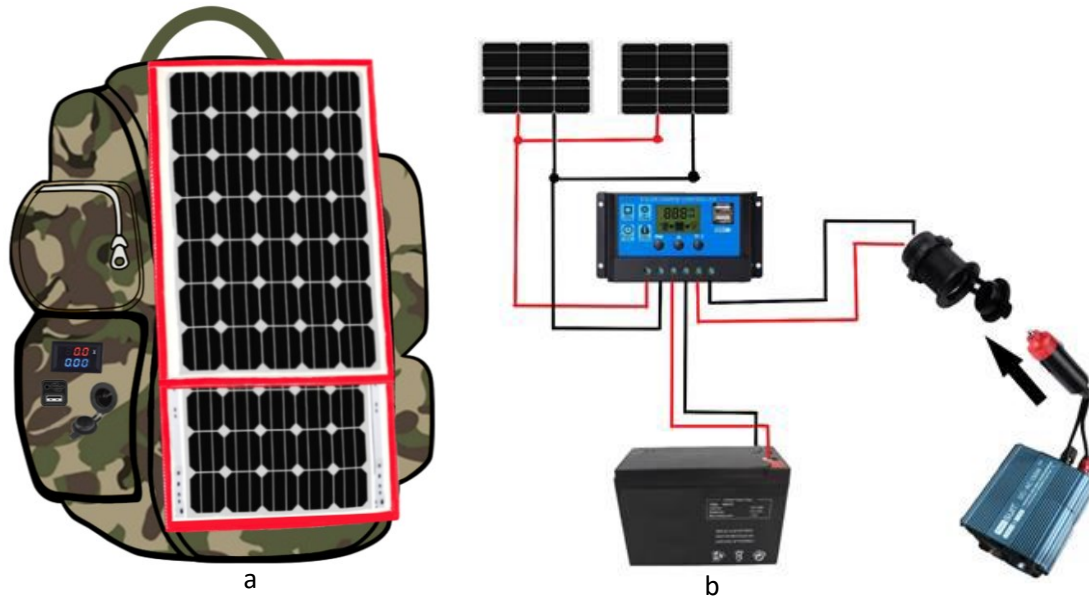
robot applications, mars rover is especially used in environmental applications where it is not possible for humans to access and works according to the self-energy strategy [5]. According to the PV-based solar tracking system principle, the energy produced was increased by 44% by controlling the azimuth and elevation angle in a 20W mobile robot application. The systematic design stages of the solar-powered charging backpack were examined in [6]. Five different commercial products were compared in terms of power, voltage level, size, weight and cost. In this study, it is aimed to produce a different prototype and to charge mobile phones with a reasonable efficiency. A linear regulator approach is used as the charging circuit. Although a backpack in which mobile phones can be charged has been developed with this technique, it is a negative situation that the efficiency is around 45%. With the use of photovoltaic-based energy sources in unmanned aerial vehicles, significant savings in battery capacity and weight can be achieved. In [7], a solar-powered design was proposed to increase the flight time in unmanned aerial vehicles. As a result, 22.5% of battery capacity has been saved. In developing countries, three-wheeled electric vehicles are the cheapest option for short distances used for taxi purposes. In [8], a photovoltaic energy-based energy management system has been proposed for such vehicles. In a study presented in [9] proposes an optimal energy harvester (OEH) using a flexible photovoltaic (FPV) module to extend battery life for a wearable body sensor node in indoor and outdoor conditions. A fuzzy logic based boost converter with MPPT is proposed for optimum energy harvesting. A modeling was carried out to determine the photovoltaic potential of bus stops at city scale. In the modeling using geographic information system data, it was determined that 54% of the bus stops for the city of Lisbon are suitable for PV-based solutions [10]. In another study [11], a photovoltaic-based charging system equipped with 30 technology, which enables fast charging of mobile phones, has been proposed. In a project named [12] "To Wait in a new way", which aims to transform the classic bus stops in Torino, Italy into smart features, it is aimed to equip the roofs of smart bus stops with photovoltaic modules. With this project presented in [12], photovoltaic modules are used for purposes such as USB charging, Wi-Fi internet, air quality control unit and public lighting. In this context, data such as solar potential map and traffic flow have been analyzed to determine smart bus stops. On the other study, it is focused on smart bracelet which fed by small PV cells. This bracelet used by patients have sensors that collect some information from the body. In [13], a body sensor prototype has been developed as an example of wearable photovoltaic applications for biomedical purposes. This device, which collects data such as the amount of oxygen in the blood, temperature and humidity, can produce a power of 16mW in the outdoor environment and around 0.21mW in the indoor environment. Solar tree applications have started to be used a lot, especially in public squares, for charging mobile phones in open air and to meet the simple lighting load [14]. The prototype application developed has 12V DC voltage, 180Ah battery capacity and 200W inverter. There are six USB outputs and two 110V - 200W output ports.

The two main points referred to in this study are the renewable energy source and the electrical energy that people have access to when they need it most. In this context, dozens of people who spend most of their time on the roads, outside the urban area, in places that have not yet met electrical energy or in places where they cannot reach electrical energy for a certain period have been taken into account. In addition, it is an important issue that energy has a portable feature. Therefore, it is thought that solar energy will be suitable for mobility. Solar energy plays an important role in this regard. The solar powered backpack developed in this study offers very attractive features especially in camping applications. This study focuses on an original solar powered backpack design. With the structure obtained with the sled system in the designed solar powered backpack, optional solar panel use is provided according to the battery charge status. In this way, a shaded area is formed for the person carrying the bag in the position where both solar panels are active. Remains of the paper is as follows. In the second part of the study is about the solar powered backpack and design steps of this backpack. Finally, important features of the study is summarized.

## **2.SOLAR-POWERED BACKPACK: COMPONENTS & DESIGN STEPS**

The solar powered backpack/camping bag has many functional features compared to an ordinary bag. In this section, the details of the selected bag, the components of the backpack and its features are mentioned. Image of the planned solar powered backpack is given in Figure 1.a. General block diagram of the photovoltaic system including charge regulator circuit, modified sinus inverter, battery and solar panels are presented in Figure 1.b. The working principle of the system can be understood from the block circuit given in Figure 1.b. The energy obtained from the solar panels is transferred to the batteries via the charge controller. The charge controller is designed for 12V and 24V batteries, and when the battery voltage is

around 10.7V in a 12V battery, the battery discharge is automatically cut off. On the other hand, when the battery voltage is 13.7V, the charging current is cut off. The charge controller also has overcurrent, short circuit and open circuit protections. The modified sinus inverter in the system is powered by a 12V battery and provides 220V modified sinus voltage at its output. Devices such as simple coolers or water heaters can be connected as a load to the inverter outputs on the backpack. With the solar panels used in the system, the battery with a capacity of 12V-7Ah under ideal conditions is filled in approximately 3.5 hours. ( $12V \times 7Ah / 24W = 3.5 \text{ hours}$ )



**Figure 1.** Solar powered backpack a) Image of the designed backpack b) Electrical diagram of the backpack

As a backpack, a bag with a volume of 75+10 liters and with lumbar and back support has been chosen. Then, in order to design a photovoltaic system suitable for the front surface of the backpack the dimensions of the area where the solar panels can be mounted on the bag surface were determined. According to the chosen backpack, a special solar panel is designed to fit on a 36cm x 65cm surface. On this surface, two specially designed frameless, approximately 4 mm thick tempered thin glass design flexible photovoltaic modules with 12W power are used. Since the solar panel has a thin design, it is aimed to benefit more from the same surface by choosing a double-layer structure.

### 2.1. Special Solar Panels and Use of Protection Diodes

The solar panels have a length of 34 cm and a width of 24 cm and weigh approximately 920 grams. Two 12W solar panels are used as a double layer on the surface of the backpack. Some features of these panels can be listed as being durable at  $-40^{\circ}\text{C}$  and  $+85^{\circ}\text{C}$ , being made of thin tempered glass, having a monocrystalline structure and having an open circuit voltage of 24V. Main specifications of the solar panels used in the backpack are listed in Table 1.

**Table 1.** Specifications of the solar panel

<i>Specifications</i>	<i>Value</i>
<i>Open circuit voltage</i>	<i>24V</i>
<i>Short circuit current</i>	<i>0.64A</i>
<i>Maximum power voltage</i>	<i>20.6V</i>
<i>Maximum power current</i>	<i>0.61A</i>
<i>Maximum power</i>	<i>12W</i>
<i>Efficiency</i>	<i>22%</i>
<i>P<sub>max</sub> temperature coefficient</i>	<i>-0.40%/K</i>

Placing the panels on the surface of the bag made it difficult to use the bag. In addition, the strength of the panel that can be placed on the bag surface has decreased considerably. For this reason, in order to increase the power capacity of the solar panel and to offer options to the user, the panels are integrated into the backpack in a structure that can be opened and closed as in Figure 2. With the rails placed on the panels, it was possible to open and close the panels on demand. In addition, the option of generating energy with a single or double panel is provided according to the battery capacity. 320kg/10cm<sup>2</sup> strength adhesive is used for mounting the rails without damaging the panels. The adhesive is not affected by water, sun and any external factors. The panels are covered with protection seals as in Figure 3 for protection against impacts.



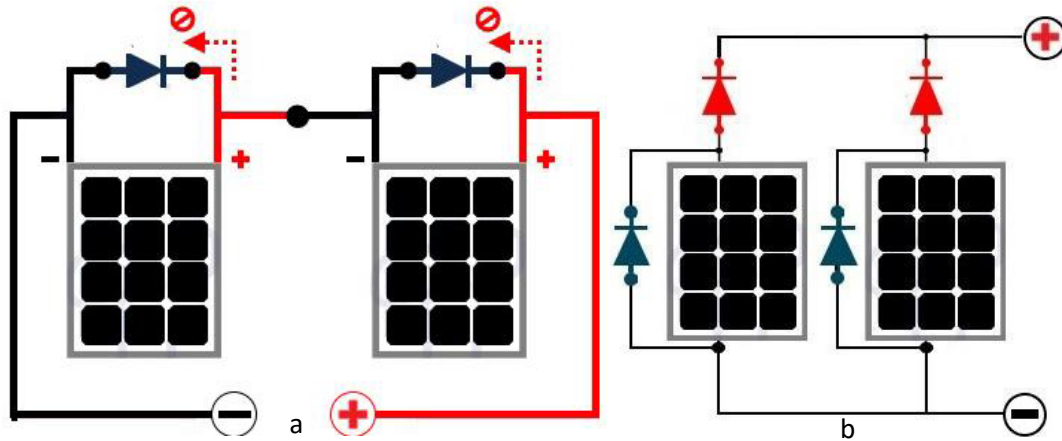
*Figure 2. Double layer solar panel*



*Figure 3. Solar panel wick application*

In solar panel structure, two panels are connected in parallel so that when one of the 12W panels is shaded, the other can continue to work and provide uninterrupted charging. Four diodes are used in parallel connection of solar panels. These diodes are by-pass and blocking diodes. The bypass diode is connected in reverse direction between the negative and positive outputs of the solar panel as in Figure 4.a. The bypass diodes have no effect on the energy to be supplied at the output. External factors such as bad weather conditions have an effect on the solar radiation falling on the solar panel. Due to this undesirable situation, imbalances may occur in the solar panels during electricity generation. In this case, cells that do not see enough light or that are cut off may act as energy-consuming loads. To prevent this situation, a bypass diode is used.

When solar panels are connected in parallel, a blocking diode must also be connected to each panel. One of the events that are likely to happen in the PV system is this: thanks to the blocking diodes, there is no flow between the panels and the possibility of reverse current flow from the battery to the panels is eliminated. The use of blocking diodes becomes essential, as the panel voltage will decrease a lot in low radiation and may occasionally take values below the battery voltage. Blocking diodes were used in series with the positive terminal of the panels, as indicated as red diodes in Figure 4.b.



**Figure 4.** Diode use for solar panel protection a) bypass diodes b) blocking diodes (red)

## 2.2. Arranging the Bag for the Solar Panel

In order to make the connection between the backpack and the solar panels and to strengthen this connection, some changes should be made on the surface of the bag. For this purpose, two strips of clips are sewn onto the front surface of the bag, as seen in Figure 5, in order to fix the solar panel system to the backpack and to separate it from the backpack when necessary.



**Figure 5.** Structure of the solar powered backpack.

With the clip-on structure placed between the backpack and the solar panels, it has been beneficial both in terms of adjusting the tightness of the panels and ensuring that the panel can be separated from the bag for any reason (such as bag cleaning, panel failure, using the panel outside the bag). As seen in Figure 6, these ropes were passed through six channels and fixed behind the solar panel below.

The center of gravity in the bag is very important. The weights in the bag should be designed for comfort as shown in Figure 7.a. Putting all the weight on the shoulders makes it difficult to carry the backpack, and as a result, problems that affect the comfort and health of the user may occur. For this reason, a pocket has been made for the battery, which is the heavy element of the system, on the upper part of the backpack, close to the back area and not giving weight to the shoulders. While the chest and waist support of the bag distribute the weight equally to the whole body, the use of the battery, which is an important burden, in the right place has increased the effect of these supports. This sensitivity is for the fixed weights of the bag. There is no restriction for the materials that the user will carry. Figure 7.b and Figure 7.c show the backpack in single-panel active and double-panel active states.





**Figure 6.** Structure of electrical connections.



**Figure 7.** a) Distribution of weights on the backpack b) Prototype of the backpack (one solar panel active) c) Prototype of the backpack (two solar panels active)

The backpack will be located in the user's back area. USB and AC outlets are positioned to face the user's side, as shown in Figure 7.b, for comfortable and easy use of the outlets to provide electrical energy in the backpack. The 12V car cigarette lighter and 5V USB output appealing to the user are shown on the side of the bag in Figure 7.b. On the side of the case, an external solar charge controller display (seen as rectangles in red) can be seen. This screen provides access to control keys and displays battery capacity, charging current, charging voltage, etc. information can be tracked. In this way, the user is provided with information on how to use the solar panel system. Figure 8 shows the cigarette lighter outlet and the charge controller screen. The voltage read from the screen in Figure 8 is the charging voltage, and the battery is charged with a voltage of 12.7V. For detailed information about the prototype realized, the link is presented in [15] can be checked.



*Figure 8. 12V DC output and display of the solar charge controller during charging*

### 3.CONCLUSIONS

In this study, a prototype application of a photovoltaic powered backpack has been carried out. A two-layer photovoltaic module design has been made in the bag, and the battery, charge controller and inverter have been placed in different compartments to prevent health problems for the person carrying the bag. This prototype is ideal for travelers who are camping, hitchhiking or needing energy after being outside for long periods. With the USB outputs used in the backpack, mobile phones are charged with 5V - 1A, and simple AC loads can be fed with the inverter outputs. The photovoltaic module design of the bag is unique and has a double layer rail structure. With the rail layout in the modules, an option is offered to the user's preference, with two modules or one module activated.

### REFERENCES

- [1] Başoğlu M.E., Kazdaloğlu A., Erfidan T., Bilgin M.Z., Çakır B., Performance analyzes of different photovoltaic module technologies under İzmit, Kocaeli climatic conditions, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52 (2015), 357-365.
- [2] Hashemi S.A., Ramakrishna, Aberle A.G., Recent progress in flexible-wearable solar cells for self-powered electronic devices, Energy& Environmental Science, 13, No.3 (2020), 685-743.
- [3] Brar A., Sanborn R., Radwan A., Jiang X., A mobile photovoltaic-battery system for off-grid applications, 2nd International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE), (2020), 1-5
- [4] Oruganti K.S.P., Vaithilingam C.A., Rajendran G., Ramasamy A., Design and sizing of mobile solar photovoltaic power plant to support rapid charging for electric vehicles, Energies, 12, (2019), 1-22.
- [5] Geng C., Schmidt K., Design and implementation of a photovoltaic system for self-sufficient energy supply of mobile robots. 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, (2021), 1-5.
- [6] Taverne J., Muhammed-Sukki F., Ayub A.S., Sellami N., Abu-Bakar S.H., Bani N.A., Mas A.A., Iyi D., Design of solar powered charging backpack, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 9, No. 2, (2018), 848-858.

- [7] Chu Y., Ho C., Lee Y. Li B., Development of a solar-powered unmanned aerial vehicle for extended flight endurance, *Drones*, 5, No. 44, (2021), 1-19.
- [8] Illangarathna S., Binduhewa P., Energy management system for neighbourhood EV based taxi parking station, 15th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems, (2020), 69-74.
- [9] Tran T.V., Chung W., High-efficient energy harvester with flexible solar panel for a wearable sensor device, *IEEE Sensors Journal*, 16, No. 24, (2016), 3021-9028.
- [10] Santos T., Lobato K., Rocha J., Tenedorio J.A., Modeling photovoltaic potential for bus shelters on a city-scale: A case study in Lisbon, *Applied Sciences*, 10, (2020), 1-16.
- [11] Encinas S. H., Castanon N. J. B., Mamani V. S., Mamani L. E. H., Paredes R. I. T., Mamani R. J. C., Molero M. R. R., Apaza A. P., Photovoltaic charger system for mobile devices using quick charge 3.0 technology, 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, (2020), 1-4.
- [12] Mutani G., Vodano A., Photovoltaic solar systems for smart bus shelters in the urban environment of turing (Italy), IEEE International Telecommunicatios in Energy Conference (INTELEC), (2017), 1-7.
- [13] Jokic P., Magno M., Powering smart wearable systems with flexible solar energy harvesting, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, (2017), 1-4.
- [14] Duque E., Isaza A., Ortiz P., Chica S., Lujan A., Molina J., Urban sets innovation: design of a solar tree PV system for charging mobile devices in Medellin-Colombia. 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, (2017), 495-498.
- [15] Prototype promotional video, <https://www.youtube.com/watch?v=XU5rB-7exVk>, (Access date: 11.09.2021)



## Use of PID control during Education in Reinforcement Learning on Two Wheel Balance Robot

Emrah ATAC<sup>1</sup>  Kazim YILDIZ<sup>2</sup>  E. Emre. ULKU<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Mechatronics Engineering, Istanbul/TURKEY

<sup>2</sup>Marmara University, Faculty of Technology, Computer Engineering, Istanbul/TURKEY

### Article Info

Research article  
Received: 21.06.2021  
Revision: 14.10.2021  
Accepted: 06.11.2021

### Keywords

Reinforcement  
Machine Learning  
Balancing Robot  
PID control

### Abstract

This study's primary objective was to try to shorten the training time of the Reinforcement Learning (RL) method, which is one of the Machine Learning methods, by using the proportional-integral-derivative (PID) control method during training. In this study, a balancing robot with two wheels that can be controlled independently on the same axis is used. While the robot is in balance, the RL software block follows how the PID block maintains the balance, and the RL block learned how to behave against disturbing factors without physical falling/rising. In the training of RL, it is necessary to create approximately 500 policy/reward/path equations between the current state and future state matrices. The number of equations will increase considerably when subjects such as old position and acceleration are added. Approximately 1000 trial/error is required for training purposes in alone RL. This means many falling/rising cycles. With the method we present, the RL block has learned to keep the robot in balance without falling and requiring human intervention in 900 trials. The time spent for a fall/stand-up with RL alone was measured to be about 30 seconds (approximately 9 hours for 1000 attempts). On the other hand, PID-assisted learning took less than 4 hours of training since falling did not occur in many trials. This shows that the training period is shortened by approximately 60%.

## 1. INTRODUCTION

Two-wheel self-balancing robots (TWSBR) are systems with controllable degrees of freedom lower than total degrees of freedom [1]. The balance of two-wheeled robots has been a demanding issue in the field of system control. In this context, TWSBR emerges as a very important research topic in self-learning smart systems. In comparison with traditional robots, the brain of such robots can constantly evolve according to external environments. This intelligence has been produced similar to the human brain by people who work in some area of science [9]. Some of the most famous of TWSBR are Boston Dynamic Handle [5], Ascento [6] and Segway [7].

The motion equations of wheeled balance robots are largely similar to inverted pendulum equations [23] and they can be used in the same way for TWSBRs. Many researchers have worked on stability analysis and control system design of TWSBR. However, less research has been devoted to the dynamic modeling problem [4]. Self-balancing of TWSBR is controlled by embedded software. This software is fed online by sensors and transducers [9] with the information they receive from the outside environment. Researchers have proposed several control approaches: Liangliang Cui horse et al. worked on the method of Support Vector Regression [10], Chia-Hong Chen et al. suggested Fuzzy Logic [2], and [4] Proportional Integral Derivative (PID), Linear Quadratic Regulator (LQR) and pole placement control methods were investigated. Ebin Philip, Sharath Golluri investigated cascade PID control systems for autonomous balanced driving robots [15]. Ren Hongge et al. represented a learning approaching named Bionic Learning [21]. Some of the above approaches of algorithms for TWSBRs are based on neural networks. One of its

biggest advantages is its high fault tolerance. Nevertheless, its deficits are poor learning ability and sensitivity to external noise. So it is difficult for the controller to reach a steady state [9]. PID and LQR require the correct derivation of the mathematical equations of the system established as a traditional approach. Farias and friends developed an algorithm to control the position of a wheeled mobile robot. The main advantage is learning procedure which is done automatically with recursive procedure [24]. Farias and friends proposed an 3D simulation environment for control the position of a wheeled mobile robot. They proposed an algorithm about two phases, which are learning and operational stage. So balancing the robot is performed with this two sage algorithm [25] Cui and friends proposed the adaptive optimal control problem for robot. The paper presents a solution for adaptive control which is learning based. Experiments were carried out to show the efficiency of the new adaptive suboptimal controller in balancing the wheel-legged robot [26].

In addition to traditional PID algorithms, existing Neural Networks (NN) have proven to be a good method in the field of control. Better adaptability to environmental and mass changes can be achieved, either by using basic NN alone or by using repetitive NN. Although various solutions give an appropriate responses in solving the balancing issue, it is frequently very difficult to compare distinct controllers, particularly those diverse NN algorithms, because of several models of the robot used for testing, dissimilar empirical circumstances, and value of parameters. All these differences make it difficult to analyze algorithms for achieving and controlling balance [3].

In real-time control, Reinforcement learning is widely used and is an unsupervised learning approach [9]. In the reinforcement learning of the robot world, according to the trial/error method, the controller connects with the external environment through sensors and provides the action with the actuators. The policy defines the way the robot behaves at a given time. In other words, it is the graded relationship between the current situation and the environment. The algorithm must work to find the maximum value of the generated policies. "Long Short Term Memory" (LSTM) was used in this study. While the LSTM uses the angle to make decisions about a particular action, it also uses the angle change rate and knowledge learned in past steps. This adds stability to the robot's behavior. The output value is generated according to the results. At the same time, the internal status is also updated. In this way, it is ensured that the experiences gained in the past situations affect future decisions [3].

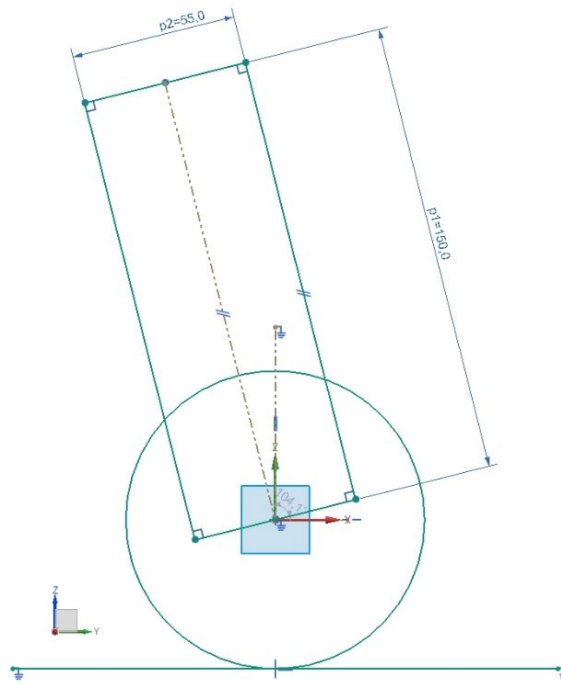
In this study, how to get help from traditional PID in RL training is discussed. Thus, it was hoped that the transition from the traditional field to RL would be easier for many fields. For this purpose, there are two blocks in the software of this study. First, the traditional PID block keeps the robot in balance. Raw Angle and acceleration information is obtained from the sensor at 100 samples per second. The data is filtered and reduced to 10 samples. thus providing resistance to noise. The robot stands by providing motor movement for each data. PWM is created by processing the motor movement with proportional (Kp), integral (Ki) and derivative (Kd) coefficients of the data. The motor driver is powered by PWM. Thus, the movement of the motor to keep the robot in balance is performed.

The coefficients of  $K_p = 0.23$   $K_i = 0.01$   $K_d = 0.1$  are found by trial/error method. First,  $K_i = 0.0$ ,  $K_d = 0.0$ , and an oscillatory movement was performed while the  $K_p$  value was 0.23. When  $K_p = 0.23$  and  $K_d = 0.0$ , oscillating motion is more balanced and short oscillating stance is obtained at  $K_i$  value 0.01. finally, an acceptable balance was achieved when  $K_d$  was 0.1. it took about 40 man/hour to obtain these values. It works even if the values are not completely satisfactory. The second block, the RL block, follows angle and wheel control to assign a reward value to the principles. It periodically sends a disturbing signal of varying intensities to the wheel control. So it captures more angle situations and gives reward value to its policies based on how PID controls the motor. This value is between -1 and 1.

## 2.MATERIALS AND METHODS

The general view of all physical components of the robot is described in this section. The system is inherently unstable. That's why it tends to tip over. The microcontroller needs to constantly monitor the robot's current angle and be fast to keep its balance. A little bit of math and a little patience is required to realize them.

Generally, the system of the robot is as Figure 1. Figure 1 is a simplified view of the balancing robot. CG is the center of gravity.

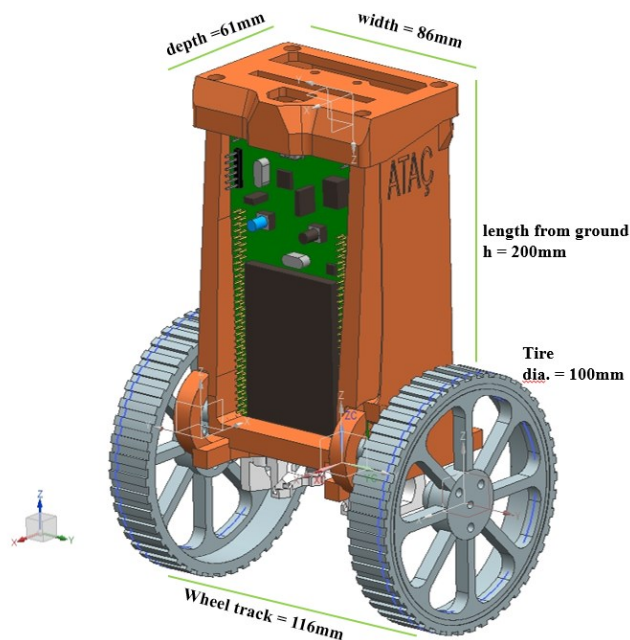


**Figure 1.** General dynamics of the system

The system can be written as equation 1:

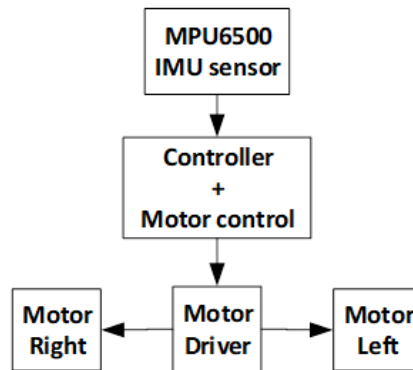
$$\ddot{\theta} = \frac{g}{l} \sin \theta + \frac{u}{l} \cos \theta \quad (1)$$

where:  $l$  is the span from the robot's center of mass to the axis of wheel rotation center,  $g$  represents the value of gravity acceleration and  $u$  ( $\ddot{x}$ ) represents the linear acceleration through the x-axis. While  $\theta$  represents the angle of inclination,  $\ddot{\theta}$  is the angular acceleration. Figure 2 shows the general dimensions of the robot and details.



**Figure 2.** General dimensions of the robot

400rpm 6v motors are used as actuators. The geared actuators drive the wheel which is 100mm in diameter. To measure the angle, the MPU-6500, which includes a MEMS-based accelerometer and gyroscope, was used on the top of the robot. In this module one “Digital Motion Processor” (DMP) is located. The accelerometer which evaluates acceleration in three “x, y, z” axes is also located. But it has a drawback: sensitivity to noise. The gyroscope, which is stable against noise. It measures the angular ratio around all x, y, z axes. As the battery, an external charging battery with 5000mah USB output for 5v microcontroller supply and a 7v lithium-ion battery pack is used for the motor. STM32F4 discovery board was used as a microcontroller. MX1508 module was used as a motor driver due to its small size. This module allows PWM driving. In Figure 3 the general block diagram of the system is shown.



**Figure 3.** General block diagram of the system

When the system is started, the angle information from the MPU6500 sensor starts to be read online by the STM32F4. This angle is the  $\theta$  value that can be seen in Figure 1. The control software (PID or RL) embedded in the microcontroller produces various values according to the  $\theta$  angle. Using these values, the motor control software manages the motors in the PWM method via the driver circuit.

PWM duty cycle is like the muscle power of the robot. When it's 100 (which means 100%), it means the motor is spinning at full speed 400rpm. When the duty cycle is 0 at 50 to 200 rpm, there is no energy to the motor. The important parameters of the system are voltage current and moment of inertia. In mathematical modeling, these must be obtained correctly. However, in these studies, the duty cycle was determined by trial and error so that the PID could keep it in balance. If the  $\theta$  angle is not close to the set value of 0 at the first startup of the robot, the system will not work. When the robot is brought into balance, the PID works to keep it in balance. RL training for the first about 4 hours is performed as in Figure 7. Subsequently, RL training is considered complete. RL continues the balance job.

In the software run on the STM32, the end of the training is determined simply: The training is terminated when all the positions in the state vector have values according to the movements in the action vector. After that, only the RL block manages the balancing process. It is clear that if the resolution of the position vector (number of elements) is increased, the training time will increase to a certain extent. This also means increased processing load for the processor and provides a more stable balance. An optimum point must be determined here.

Figure 4 shows the robot and its internal structure. It is important that each element and cable are firmly fixed. The robot body is printed by 3d printer.

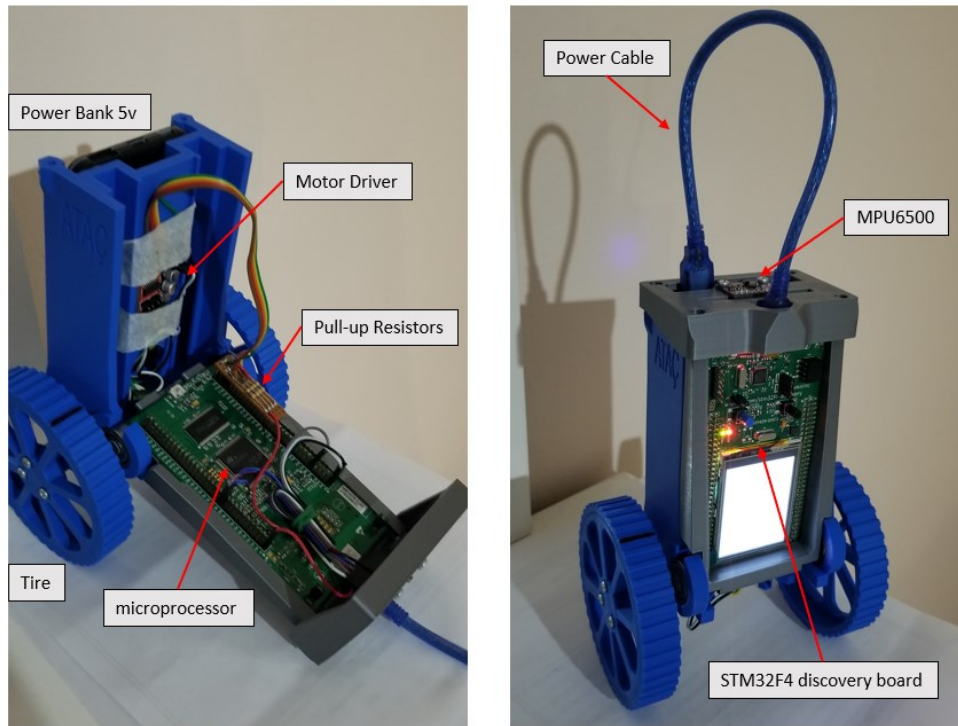


Figure 4. Designed robot

### 2.1. PID controller

Since TWSBR has highly unbalanced dynamics, it is absolutely necessary to use a control system to stabilize it around the set point (vertical position). In this context, the PID controller with basic PID block is shown in Figure 5 and equation (2) were applied to ensure the perpendicularity of the robot. The PID controller’s main purpose is to keep the robot's tilt angle close to the setpoint  $\theta = 0$ . In our case, the IMU is  $0^\circ$  as the robot is mounted horizontally at the top. The setpoint rate is given to the microcontroller (STM32F4) as a reference signal and error  $e(t)$  which is calculated from the angle is also given through minus feedback. The error is then used to calculate the adjustment signal or input signal  $u(t)$  as given below in equation (2).

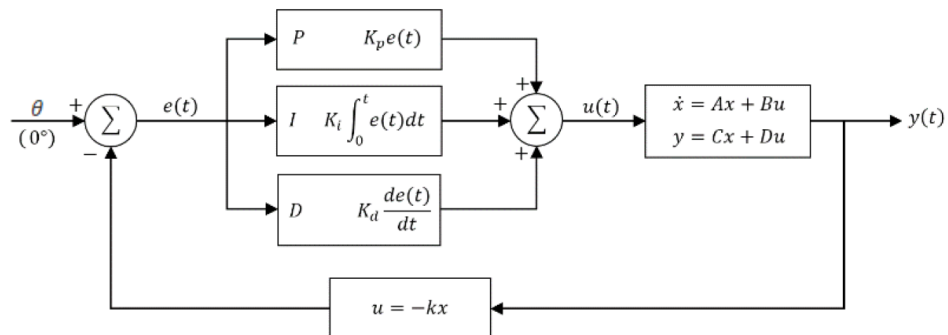


Figure 5. Basic PID block

The block can be written as equation 2

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{2}$$

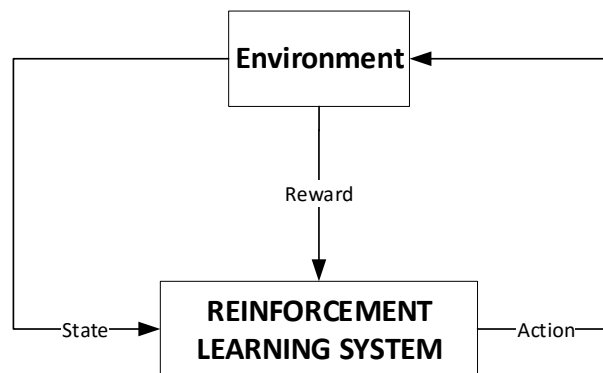


Figure 5 and equation (2) show the flow and mathematical equation of the PID block. Here,  $e(t)$  is an error,  $u$  is feedback, P I and D are mathematical correction blocks,  $u(t)$  is control signal. In our study,  $K_p$   $K_i$  and  $K_d$  values are 0.23, 0.01 and 0.1, respectively [14].

## 2.2.Reinforcement Q Learning

The Reinforcement learning includes a reward/punishment assessment. In this method, the action which gets the highest reward value in a given situation is found. One of the hallmarks of RL is that the agent performs the action and then receives a reward. In this reward system, it interacts with the environment to define the most appropriate policy (i.e. the highest rewarded action) through trial and error [11].

Figure 6 shows the interaction of agent / environment (in this case the environment is the robot's vertical angle theta) in reinforcement learning. "Agent" and "Environment" are two main elements of reinforcement learning. "Agent" is described as the learner responsible for decision making and the "environment" interacts with it. The learning process involves the setting that presents the agent with the current situation or situation in which the agent will choose appropriate action. After that environment will then generate a reward value based on the new situation and action taken.



**Figure 6.** Basic RL block diagram

Q learning is a model-independent reinforcement learning method, presented by And Watkins. The learning process is the embodied concept that intelligence is a process that is deeply dependent on the robot's interaction with the environment. An independent agent, usually formulated as a "Markov Decision Process" (MDP). A gyro sensor, actuator, and learning cycle are used in reinforcement learning. The agent gets input from the gyro sensor from the medium representing the current state (S). The most appropriate action (A) is selected based on the current situation, knowledge and goals. After receiving feedback from the environment by receiving reward values (R), the agent learns to receive positive rewards in the future [17] [20].

To find the most proper training tactics, investigators present the concept of quality function. Recently, the Q-function is a commonly used quality function. In Q-learning, the reward is based on the pair of status-action, and the update rule can be written as equation 3;

$$V(S) = \max_a Q(s, a)$$

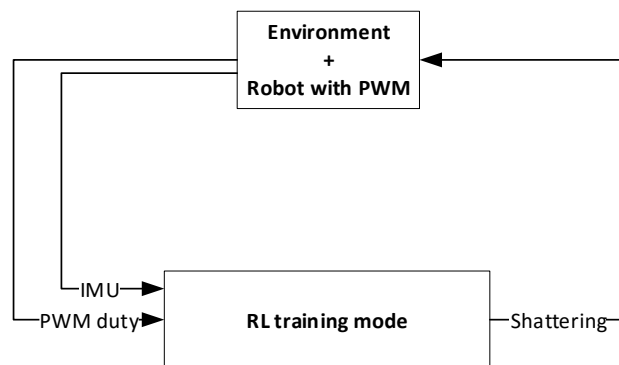
$$Q_{t+1}(s, a) = (1 - c)Q_t(s, a) + c(r + \gamma V(s')) \quad (3)$$

where  $c$  is learning coefficient,  $\gamma$  discount factor,  $r$  active reward ve  $s'$  future state [9]. State Vector = [-5.0 ; -4.9 ; ... -0.2 ; -0.1 ; 0 ; 0.1 ; 0.2 ; ... 4.9 ; 5.0 ]. These right angles are the values of  $\theta$ .

Action Vector = [-100 ; 95 ; ... ; -15 ; -10 ; -5 ; 0 ; 5 ; 10 ; 15 ; ... 95 ; 100 ]. This indicates the motor's PWM duty time. 100 means go in one direction at maximum speed. - values rotate the motor in the opposite direction. Simultaneous fixations of the two vectors' value to 0 indicate the static equilibrium position.

Training mode: Robot opens and balances on its own wheels with PID. Meanwhile, the RL block is in training mode. PID keeps the robot upright during this training period. The RL block which is in the training mode, reads the data from the sensor and the duty cycle produced by the PID. Since the robot stands upright with PID, the reward process is matched with high values and appropriate state-action. In this process, if the robot was not kept alive with PID, the training process with each reward cycle would have taken hours.

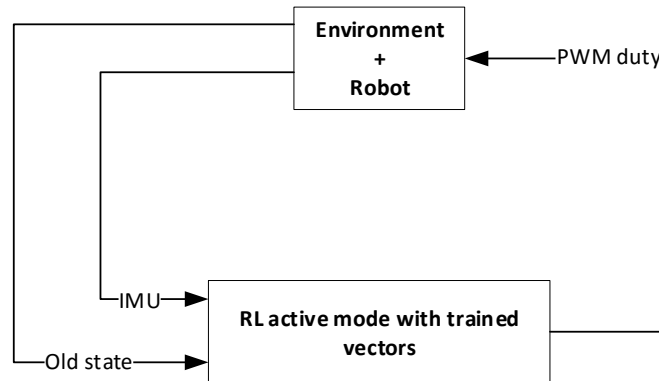
In the RL training phase, it sends a disruptive PWM duty cycle value to the robot, which is in balance with the PID. It keeps the maximum distortion value of the angle, here the relevant action vector element is valued by assigning a value to the current PWM duty cycle by taking the old state and state (current IMU value) while coming to the maximum angle and returning to the equilibrium state from the maximum angle. The same old state and states will appear in the correction of disruptors. In this case, whichever action vector element is evaluated most times will have the highest reward. Thus, while keeping the RL alone in balance, the PWM duty cycle is driven with the most valuable action vector element in the same old state and state, and the motor is moved. There is a flowchart of the training phase can be seen in Figure 7.



**Figure 7.** Training mode for RL block

In RL standard training, the path between the state vector and the action vector is determined and rewarded. The reward is given higher, the new situation after the action is closer to the set point. Award value set [-1; 1] has a resolution of 0.1 in the range. The RL block sends destabilizing signals to the motor of the robot that is in balance with the PID. Then it reads the angle change and monitors the balance by PWM duty changes. It also takes the previous value as input and saves them as the high reward path in its policy / agent. For example, even if the robot is in full equilibrium with the PID, the RL block sends a disturbing signal to the motor drivers. Measures and saves the new state (this maximum disturbed location) with the IMU. This value is 3 degrees. PID drives motors with PWM in contrast. The RL block software reads and saves the duty time of the PWM. It saves a high reward path between these two values. Thus, rewarded paths are assigned to all elements in the state vector.

Figure 8 shows the flowchart of the RL block after training. As shown here, when the training period is over, the “RL active” mode is turned on and the PID is turned off. The trained RL now stabilizes the robot: a PWM duty cycle is generated by selecting the robot, the environmental state, the state vector, and the action vector element evaluated according to the previous state. Thus, the motor is driven and balance is achieved.



**Figure 8.** Active mode for RL block

An example situation is that at time  $n$  the Robot is in equilibrium at 0 degrees. With the measurement from the IMU,  $State\_Vector[n] = 0$ . Let  $State\_Vector[n-1]$  be 0 at the previous instant (Old state). These values enter the RL block. As learned from the block trainings,  $Action\_Vector[n] = 0$  comes out as the highest reward (very close to -1) and PWM duty cycle time value is assigned to the motor driver so that the motor does not move. Small imbalance at time  $n+1$  When  $State\_Vector[n+1] = 0.9$ ; It enters the RL block with  $State\_Vector[n] = 0$ . The most rewarded  $Action\_Vector[n] = -80$  is the output. This gives energy to the engine in a way that the duty cycle will be 20 in the direction that will correct the balance. At the time of  $n+2$ ,  $State\_Vector[n+2] = -0.2$  and as old state  $State\_Vector[n+1] = 0.9$  when it feeds the RL block,  $Action\_Vector[n] = 5$  and the robot balance approaches 0. It enters the stable area around 0. When the state vector resolution is 0.1, the approximate oscillation is  $\pm 0.1$  degrees (fig 9). The higher the resolution of this vector, the smaller the oscillations. At very small resolutions, such as 0.001, although the sensor can measure it, the motor cannot respond to it. Gear gaps prevent the wheel from turning.

The transition from a balanced state to an unstable state and returning to a balanced state with action is defined as a full training cycle. The greater the number of training given, which is directly related to the action vector, the more stable the robot seems to be. One of the important criteria is action vector sensitivity. The motor as an actuator is fine-tuned to correspond to reaction time. High resolution will increase accuracy, but the microcontroller clock speed may not reach the appropriate hertz. Furthermore, due to motor inertia, there may not be enough time for action response.

### 3.RESULTS

For each In this article, reinforcement learning is used to provide control of TWSBR. First, the training process was carried out with the classical PWM method. Then RL performed the robot's balance stance.

The recommended control method has been classical Reinforcement Q Learning. Here, the state and action vectors are determined in the software at the appropriate resolution (0.1step). In this state, the RL block could be taken to training by hovering, or the mathematical model could be extracted and the training process could be carried out on the computer and transferred to the robot. Here, the PID parameters were determined to differ from the previous applications, and the RL part was trained with the robot standing in balance, by reducing the amount of falling.

The Q-Learning method was chosen using the angle of slope, angular velocity as state elements and clockwise-counterclockwise rotations with different PWM duty cycles as action elements. During the training, only PID training was tried to save time. It is clear that the standard RL training will pass 500 fall

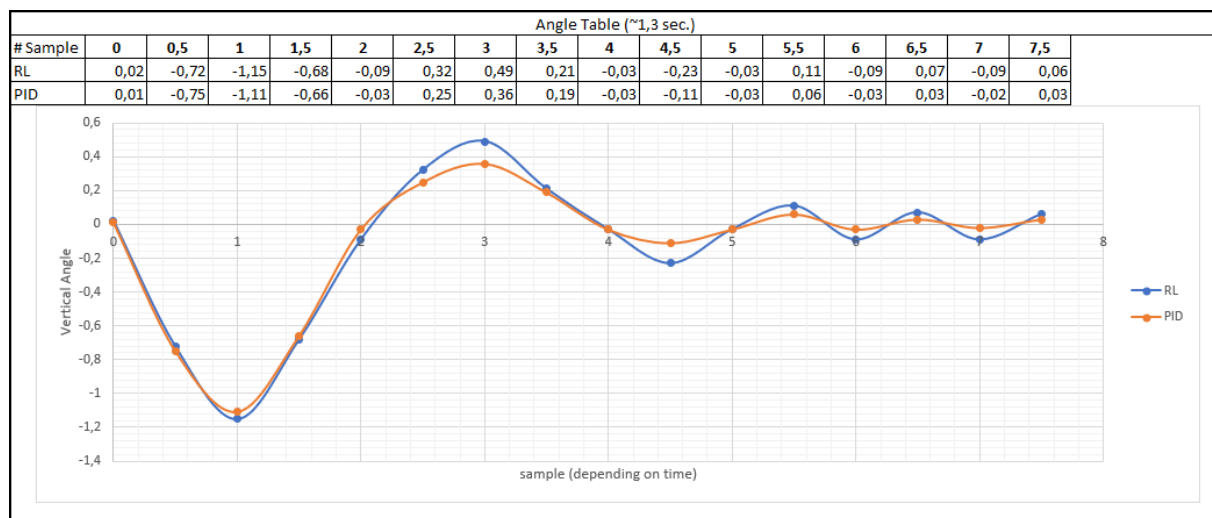
/ rise cycles. No more than 10 drops were observed in education supported by PID. Thus, the training was completed in a short time. Vectors with a resolution of 0.1 provided the appropriate solution. For better balance, the range of vectors can be expanded and resolution can be lowered. However, this will put a load on the processor. At a resolution of 0.001, it is unnecessary as the motor cannot give the necessary responses. At higher resolutions, the sensor cannot provide appropriate data.

One of the difficulties of PID is that it requires a model to determine its parameters. Or it must be proceeded with trial and error, which is a tiring job. Moreover, poorly determined parameters persistent error late sitting causes situations such as oscillation, because the RL block undergoes an incorrect training period and similarly correct oscillatory results. In order to overcome this, both PID parameters can be updated and the RL learning process can be operated by working together with the Autotune PID parameters and RL. Table 1 shows the values policy/agents which are taken.

**Table 1.** Policy/agent summary table and reward values

#Policy	1	2	3	4	5	6	7	8	9
State_old	-0.1	0	-3.3	0	4.6	2.7	1.2	4.1	-0.8
action	0	-5	-80	-70	90	-50	-40	65	-50
state	0	0.9	-0.9	1.1	0.1	-0.7	-0.3	-0.1	0.8
REWARD	0.95	0.80	0.75	-0.55	0.90	0.65	0.80	0.50	0.30

The demonstration of the robot returning to equilibrium with a small disturbing impact when the robot is in balance is shown in Figure 9. The samples are obtained by recording the angle values in each cycle of the software. The total time is about 1.3 seconds. Angle values of 15 moments (approximately equal) taken during this period are also shown. The red line is the angle values obtained during PID block operation. An attempt was made to deliver a similar blow to the robot under RL control. The blue line represents the RL block. Observe how RL fluctuates on the zero axis. This is related to the resolution of State and Action vectors. It is clear that education needs to be improved. It can be read from Figure 9, RL block which is not soft and agile enough like PID. Despite all this, the RL block manages to keep the robot standing on its own.



**Figure 9.** Sample/degree graph of robot

On the other hand, for a smoother operation for RL: The resolution of the state vector can be automatically increased and the resolution of the action vector can be adjusted automatically. This can be examined in future studies. According to the disturbance signal, its sign and its size (the robot in balance), the way and the amount of distortion of the angle can also be monitored and only if an RL training method can be developed from here is a good topic that can be examined in future studies. Finally, since a real application

is performed, the robot created must have a solid rigid body and well-fixed internal elements. Electronic cards that are not fixed tend to fail.

#### 4.CONCLUSIONS

In the present In this article, the training process of RL in optimum control of TWSBR with approximate PID parameter values with math model was discussed. Both the PID control method and RL control method designs were considered. The proposed control program, to realize optimum control of the robot, is an online feedback Q-Learning method which is used commonly. The Q-Learning training process is shortened by supporting the PID algorithm. While PID control partially requires the mathematical equations of the robot, Q-Learning control does not require a mathematical model by determining the state and action vectors at the appropriate resolution. While the Q-learning algorithm that is not need mathematical equation can start with a random policy of control and progress through a trial / error process, the PID algorithm has a better steady-state response. During the training process, an average PID control observer was helpful. In this way, when applying Q-learning control algorithms, the numerical difficulties caused by the large-volume matrices and instability caused by the system were overcome. As a result, the time spent for a fall/stand-up with RL alone was measured to be about 30 seconds (approximately 9 hours for 1000 attempts). On the other hand, PID-assisted learning took less than 4 hours of training, since falling did not occur in many trials. The study of PID use in RL training is thus accomplished by sending an unbalanced PWM duty cycle value. This shows that the training period is shortened by approximately 60%.

#### REFERENCES

- [1] Ali Ghaffari, Azadeh Shariati, Amir H. Shamekhi. "A modified dynamical formulation for two-wheeled self-balancing robots" (Article - DOI 10.1007/s11071-015-2321-9)
- [2] Chia-Hong Chen, Jong-Hann Jean, Dao-Xiang Xu. "Application Of Fuzzy Control For Self-Balancing Two-Wheel Vehicle" (Article - 978-1-4577-0308-9/11/\$26.00 ©2011 IEEE)
- [3] Raudys A, Subonien A. "A Review of Self-balancing Robot Reinforcement Learning Algorithms" (Article - ICIST 2020, CCIS 1283, pp. 159–170, 2020. )
- [4] Muhammad Atif Imtiaz, Mahum Naveed, Nimra Bibi, Sumair Aziz, Syed Zohaib Hassan Naqvi. "Control System Design, Analysis & Implementation of Two Wheeled Self Balancing Robot" (Article - 978-1-5386-7266-2/18/\$31.00 ©2018 IEEE)
- [5] Boston Dynamic (website) - <https://www.bostondynamics.com/handle>
- [6] Ascento (website) - <https://www.ascento.ethz.ch/>
- [7] Segway - "Segway Inc.: Reference manual, Segway personal transporter (PT)." Segway Inc., Bedford, NH (2006)
- [8] R.E. Parr, "Hierarchical Control and Learning for Markov Decision Processes." University of California: Berkeley, 1998.
- [9] Juan Yan, Huibin Yang. "Hierarchical Reinforcement Learning Based Self-balancing Algorithm for Two-wheeled Robots." (Article - DOI: 10.2174/1874129001610010069)
- [10] Liangliang Cui, Yongsheng Ou, Junbo Xin, Dawei Dai, Xiang Gao. "Control of a Two-Wheeled Self-Balancing Robot with Support Vector Regression Method." (Article - 978-1-4799-4808-6 /14/\$31.00 ©2014 IEEE)

- [11] Shih-Yu Chang, Ching-Lung Chang. "Using Reinforcement Learning to Achieve Two Wheeled Self Balancing Control" (Article - 978-1-5090-3438-3/16 \$31.00 © 2016 IEEE)
- [12] Guoping You, Wanghui Zeng. "Design of Two-Wheel Balance Car Based on STM32" (Article - 2474-3828/18/\$31.00 ©2018 IEEE)
- [13] Tao Zhao, Qian Yu, Songyi Dian, Rui Guo, Shengchuan Li. "Non-singleton General Type-2 Fuzzy Control for a Two-Wheeled Self-Balancing Robot" (Article - <https://doi.org/10.1007/s40815-019-00664-4>)
- [14] Chinmay Samak, Temo Samak. "Design of a Two-Wheel Self-Balancing Robot with the Implementation of a Novel State Feedback for PID Controller using On-Board State Estimation Algorithm" (Article - ISSN(P): 2250-1592; ISSN(E): 2278-9421)
- [15] Ebin Philip, Sharath Golluri. "Implementation of an Autonomous Self-Balancing Robot Using Cascaded PID Strategy" (Article - 978-1-7281-6139-6/20/\$31.00 ©2020 IEEE)
- [16] Linyuan Guo, Syed Ali Asad Rizvi, Zongli Lin. "Optimal control of a two-wheeled self-balancing robot by reinforcement learning." (Article - DOI: 10.1002/rnc.5058 )
- [17] The Anh Mai, D. N. Anisimov, Thai Son Dang, Van Nam Dinh. "Development of a microcontroller-based adaptive fuzzy controller for a two-wheeled self-balancing robot." (Article - 00542-018-3825-2)
- [18] MD Muhaimin Rahman , S. M. Hasanur Rashid, M. M. Hossain. "Implementation of Q learning and deep Q network for controlling a self balancing robot model." (Article - <https://doi.org/10.1186/s40638-018-0091-9>)
- [19] Penghui Xia, Yanjie Li. "The Control of Two-Wheeled Self-Balancing Vehicle based on Reinforcement Learning in a Continuous domain." (Article - 978-1-5386-2901-7/17/\$31.00 ©2017 IEEE)
- [20] Sun Liang, Feimei Gan. "Balance Control of two-wheeled Robot Based on Reinforcement Learning." (Article - 978-1-61284-088-8/11/\$26.00 ©2011 IEEE)
- [21] Ren Hongge, Wang Zhilong, Li Fujin ,Huo Meijie. "The Balance Control of Two-wheeled Robot Based on Bionic Learning Algorithm" (Article - 978-1-4799-3708-0/14/\$31.00c 2014 IEEE)
- [22] Pete Warden, Daniel Situnayake. "TinyML - Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers" (Book - Published by O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA 95472.)
- [23] Yunus Çelik, Mahit Güneş. "Designing an Object Tracker Self-Balancing Robot" (Article - Academic Platform Journal of Engineering and Science 6-1, 124-133, 2018)
- [24] Gonzalo Farias, Gonzalo Garcia, Guelis Montenegro, Ernesto Fabregas, Sebastian Dormido-Canto and Sebastian Dormido, "Reinforcement Learning for Position Control Problem of a Mobile Robot," (Article - IEEE Access, 8, 152941-152951, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.301802).
- [25] Gonzalo Farias, Gonzalo Garcia, Guelis Montenegro, Ernesto Fabregas, Sebastian Dormido-Canto and Sebastian Dormido, "Position control of a mobile robot using reinforcement learning." (Article- *IFAC-PapersOnLine* 53.2 (2020): 17393-17398.)
- [26] Leilei Cui, Shuai Wang, Jingfan Zhang, Dongsheng Zhang, Jie Lai, Yu Zheng, Zhengyou Zhang, Zhong-Ping Jiang, "Learning-Based Balance Control of Wheel-Legged Robots," (Article- IEEE Robotics and Automation Letters, 6, 4,7667-7674, Oct. 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3100269.)



# Measuring the Security Effectiveness of Machine Learning Methods Used Against Cyber Attacks in Web Applications

Mesut TOĞAÇAR<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Firat University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Computer Technologies, 23119, Center/ELAZIĞ

## Graphical/Tabular Abstract

In this study, an approach is proposed to measure the security of web applications. Five machine learning methods are used in the proposed approach.

### Article Info:

Research article  
 Received: 10.06.2021  
 Revision: 09.09.2021  
 Accepted: 08.11.2021

### Highlights

- Decision Support.
- Web Applications.
- AWUGP.

### Keywords

Web Security  
 Machine Learning  
 Cyber Attack  
 Cyber Security  
 Artificial Intelligence

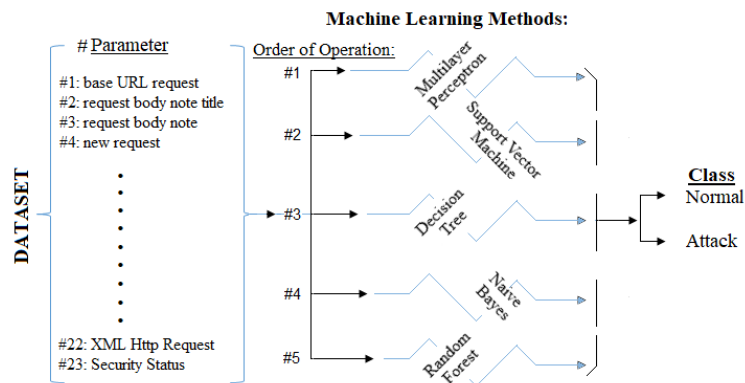


Figure A. The overall design of the proposed approach.

**Purpose:** The goal of this paper is to successfully detect malicious applications that cause security vulnerabilities in web applications. To do this, it is aimed to process the performance test using machine learning methods and determine the method that performs the best.

**Theory and Methods:** The proposed model consists of an approach that measures the effectiveness of artificial intelligence based methods of cyber attacks in web applications. The purpose of this approach is to detect attacks in web applications quickly and with the best performance. In this study, machine learning methods, a sub-branch of artificial intelligence, were used in an experimental analysis to determine whether web applications are secure or not.

**Results:** Multilayer Perceptron, Support Vector Machines, Decision Trees, Naive Bayesian and Random Forest methods were used in the experimental analysis of the study. The overall accuracy obtained by the machine learning methods are 74%, 74%, 100%, 69.5% and 100% respectively. The experimental analysis has shown that the machine learning methods are effective in detecting cyber attacks.

**Conclusion:** In this study, the parameters of 1000 websites were analyzed using machine learning methods to determine whether the web applications are secure or not. It was found that the Decision Tree and Random Forest methods provided more successful results in web security than other machine learning methods. The overall accuracy of the two successful methods was 100%.



## Measuring the Security Effectiveness of Machine Learning Methods Used Against Cyber Attacks in Web Applications

Mesut TOĞAÇAR<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, 23119, Merkez/ELAZIĞ

### Abstract

The rapid advancement of technological developments in the global world, the people who closely follow and share these developments have become the focus of cybercriminals. People realize their basic needs, requests, messages or works through smart devices using the internet infrastructure. While performing these actions, users can inevitably leave an open door through web applications. As a result, custom information can be easily shared with others. Recently, there has been a sharp increase in the number of activities performed on websites. One of the reasons for this increase - and the most important - is the pandemic that is having a global impact. Cybercriminals want to use such situations as an opportunity to enrich themselves financially. They look for vulnerabilities in websites that are in high demand by people and want to access their user and card data. In this study, an approach is proposed to measure the performance of machine learning methods with respect to the vulnerabilities of various websites. The dataset used in the study consists of the parameter properties of 1000 websites. Multilayer Perceptron, Support Vector Machines, Decision Trees, Naive Bayesian and Random Forest methods were used in the experimental analysis of the study. The overall accuracy obtained by the machine learning methods are 74%, 74%, 100%, 69.5% and 100% respectively. The experimental analysis has shown that the machine learning methods are effective in detecting cyber attacks.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 10.06.2021  
Düzeltilme: 09.09.2021  
Kabul: 08.11.2021

### Keywords

*Web Security*  
*Machine Learning*  
*Cyber Attack*  
*Cyber Security*  
*Artificial Intelligence*

### Anahtar Kelimeler

*Web Güvenliği*  
*Makine Öğrenme*  
*Siber Saldırı*  
*Siber Güvenlik*  
*Yapay Zekâ*

## Siber Saldırlara Karşı Kullanılan Makine Öğrenme Yöntemlerinin Web Uygulamalarında Güvenlik Etkinliğinin Ölçümü

### Öz

Küresel dünyadaki teknolojik gelişmelerin son zamanlarda hızlı ilerlemesi, kitlelerin hızlı bir şekilde bu gelişmeleri yakından takip etmesi ve paylaşımlarda bulunması siber suçluların odak noktası haline gelmiştir. İnsanlar temel ihtiyaçlarını, isteklerini, paylaşımlarını veya çalışmalarını akıllı cihazlar üzerinden internet alt yapısını kullanarak gerçekleştirmektedirler. Bu eylemleri kullanıcılar gerçekleştirirken web uygulamalar üzerinden ister istemez bir açık kapı bırakabilmektedir. Neticesinde kullanıcıya özel tanımlanmış bilgiler başkalarının eline kolayca geçebilmektedir. Son zamanlarda web siteleri üzerinden gerçekleştirilen faaliyetlerde ciddi artış olmuştur. Bu artışın sebeplerinden biri ve en önemlisi ise dünya genelinde etkisini göstermiş olan pandemi sürecidir. Siber suçlular bu gibi durumları fırsata çevirmek ve maddi kazanç sağlamak isterler. İnsanların yoğun talepte bulunduğu web sitelerine yönelik açıklar ararlar ve onların kullanıcı bilgilerine, kart bilgilerine erişmek isterler. Bu çalışma çeşitli web sitelerinin güvenlik açıklarına karşı makine öğrenme yöntemlerinin performansını ölçen bir yaklaşım önermektedir. Çalışmada kullanılan veri kümesi 1000 adet web sitesinin parametre özelliklerinden oluşmaktadır. Çalışmanın deneysel analizlerinde; Çok Katmanlı Algılayıcı, Destek Vektör Makineleri, Karar Ağaçları, Naif Bayes, Rastgele Orman yöntemleri kullanıldı. Makine öğrenme yöntemlerinden elde edilen genel doğruluk başarıları sırasıyla; %74, %74, %100, %69,5 ve %100'dü. Deneysel analizler siber saldırılarının tespitinde makine öğrenme yöntemlerinin etkin olduğunu göstermiştir.



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda yapay zekâ kavramı çeşitli alanlarda adını söz ettirmeyi başarmış ve alt dalları olan makine öğrenmesi ile derin öğrenme yaklaşımları birçok çalışmada uygulanmıştır [1]. Teknolojik gelişmelerin hızla ilerlemesi bu alandaki uygulamaların insanlar tarafından ilgi görmesi, kötü niyetli kullanıcılarında ilgi görülen alanlara yönelmesine sebep olmuştur [2]. İnsanlar birçok işini interneti kullanarak daha hızlı bir şekilde gerçekleştirmektedirler. Son zamanlarda Kovid-19 salgınının etkisiyle insanların internette geçirdikleri sürelerde belirgin bir artış gözlemlenmiştir [3,4]. Bu durum ister istemez web sitelerinde zafiyet doğurabilmektedir ve kötü kullanıcılar tarafından insanların kişisel bilgilerine, üyelik ve kredi kartı bilgilerine vb. verilerine, kullandıkları çeşitli yöntemlerle erişebilmektedirler [5].

Web uygulamaları ağlar üzerinde bilgi aktarımı sağladığı için genellikle güvenlik açıkları içerebilmektedir. Bu durum kötü amaçlı yazılımcılar veya kullanıcılar tarafından rahatlıkla hedef haline gelebilmektedir [6]. Web uygulamaların saldırılara hedef olunmasının bir diğer sebebi maddi kazançtır. Her ne kadar güvenlik duvarları, saldırı tespit sistemleri etkin bir şekilde kullanılsa da maalesef olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilmektedir [7]. Sahte web uygulamaları, spam içeren web bağlantıları, kısa mesaj gönderileri, sahte e-posta bağlantıları vb. durumları sıklıkla kullanırlar [8]. Kötü amaçlı kullanıcılar web saldırılarını gerçekleştirirken web uygulamaların üç bölümüne odaklanarak bu işlemleri gerçekleştirirler. Bunlar; ağ-sunucu bağlantıları, web tasarımı ve kodlama yapısı, kullanıcı boyutu. Bu üç kısımdan en az birinde buldukları açık ile kişisel saldırıları veya siber saldırıları gerçekleştirmektedirler [9–11].

### 1.1. Literatür İncelemesi (Literature Review)

Web uygulamalarındaki siber saldırıların tespitinde birçok yapay zekâ tabanlı çalışma literatürde yer almıştır. Bu çalışmalardan bazıları incelenirse; Yao Pan ve ark. [12] çalışmasında web uygulamalarındaki saldırıları tespit edebilmek için hem makine öğrenme yöntemlerini hem de derin öğrenme modelini ayrı ayrı kullanmıştır. Önerdikleri yaklaşımda, en iyi başarıyı otokodlayıcı model ile elde etmişlerdir ve %91,8 oranında bir başarı sağlamışlardır. Tianlong Liu ve ark. [13] web saldırılarının tespitinde kullandıkları veri kümesi için yük sınıflandırma ağı makine öğrenme yöntemini kullanmışlar. Onlar çalışmasında güvenilir web sitelerini güvenli olmayan web sitelerinin parametrelerinden ayırt etmişler. Onların yük sınıflandırma ağı ile elde ettikleri genel doğruluk başarıları %99,84'tü. Rafal Kozik ve ark. [14] çalışmasında web uygulamalarına gerçekleştirilen siber saldırıların tespitini gerçekleştirdiler. Onlar çalışmasında Naif Bayes, Adaboost ve J48 makine öğrenme yöntemlerini kullandılar. Deneysel analizlerde en iyi performansı J48 yöntemi ile sağladılar ve %95,97 oranında bir genel doğruluk başarıları elde ettiler. Dhika Rizki Anbiya ve ark. [15] çalışmasında PHP yazılım dilinde derlenmiş web uygulamaların güvenlik açıklarına yönelik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Onlar kullandıkları veri kümesinde verimli özellikleri Genişlik İlk Arama (GİA) algoritmasıyla çıkardılar. Ardından Naif Bayes, Destek Vektör Makinesi (DVM) ve Karar Ağacı yöntemlerini kullanarak sınıflandırma işlemini gerçekleştirdiler. Makine öğrenme yöntemleri arasında en iyi performansı Naif Bayes yöntemi verdi ve Naif Bayes yöntemi ile elde edilen geri çağırma performansı %92'di.

Bu çalışmalar web tabanlı siber saldırılarının tespitinde başarılı sonuçlar vermiştir. Makine öğrenme yöntemlerinin derin öğrenme modellerine göre daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Fakat bu çalışmaların bazıları tek bir yöntem kullanarak analizleri gerçekleştirmiştir, bazıları birkaç yöntemi belirli aralıklar ile kullanarak analizleri gerçekleştirmiştir. Bu durumda her bir yöntemin ayrı ayrı gerçekleştirilmesi saldırıların tespitinde zaman kaybına yol açabilmektedir. Önerilen yaklaşım uçtan uca bir mimari ile tasarlandığı için analiz sürecinde kullanılan makine öğrenme yöntemleri kesintiye uğramadan tek bir yaklaşım gibi hareket edebilmektedir. Ayrıca önerilen yaklaşımda kullanılan makine öğrenme yöntemleri literatürde sıklıkla tercih edilen, farklı veri kümelerinde başarılı sonuçlar elde etmiş yöntemlerden oluşmaktadır.

Bu makalenin amacı, web uygulamalarında güvenlik açıklarına yol açan kötü amaçlı uygulamaların tespitini başarılı bir şekilde gerçekleştirmektir. Bunun için makine öğrenme yöntemlerini kullanarak performans testinden geçirilmesi ve en iyi performansı veren yöntemin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada diğer bölümler ise şu şekildedir; veri kümesi ile ilgili bilgiler Bölüm 2'de verilmiştir. Çalışmanın analizinde kullanılan makine öğrenme yöntemleri hakkında bilgiler ve önerilen yaklaşım Bölüm 3'te verilmiştir.

DeneySEL analizler ve sonuçları Bölüm 4’te verilmiştir. Sırasıyla Bölüm 5 ve Bölüm 6’da Tartışma ve Sonuçlar yer almıştır.

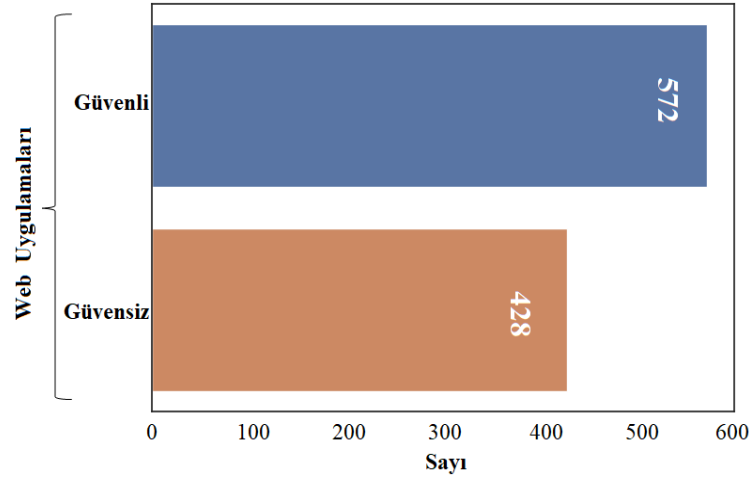
## 2. VERİ KÜMESİ (DATASET)

Veri kümesi, 1000 web uygulaması içeriğini barındıran, metin tabanlı ve "csv" uzantılı tek dosyadan oluşmaktadır. Veri kümesi, her bir web sitesinin 23 özellik parametresini içerir ve bu parametrelerin etiket grupları {metin}, {sayı}, {doğru, yanlış} değerlerinden birine sahiptir. Veri kümesinin parametre özellikleri ile detaylı bilgileri Tablo 1’de verildi. Veriler, ikili sınıflandırma modeli için tasarlanmıştır ve “is Safe” (güvenlik durumu) parametre özelliğine göre sınıflandırma gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, web uygulamaların iki güvenlik durumu söz konusudur; eğer web uygulaması “doğru” etiketine sahip ise güvenilir, “yanlış” etiketine sahipse güvenilir değildir. Veri kümesindeki “is Safe” (güvenlik durumu) etiket değeri belirlenirken Açık Web Uygulaması Güvenlik Projesi (AWUGP) kriterleri göz önüne alınmıştır ve bir web uygulamasında AWUGP kriterlerine uymayan en az 10 parametre değeri varsa ilgili web uygulamasının güvenlik durumu güvensiz / yanlış olarak belirlenmiştir. Veri kümesi, 2021 yılında GitHub web sitesi üzerinden erişime sunulmuştur [16].

**Tablo 1.** Veri kümesini oluşturan web uygulamalarının parametreleri ve etiket değeri

Özellik numarası	Veri kümesindeki orijinal parametreler	Orijinal parametrelerin Türkçe karşılıkları	Etiket Değer Türü
1	request base Url	Temel URL isteği	{metin}
2	request body note title	Gövde notu başlığı iste	{metin}
3	request body note desc	Gövde notu talep et	{metin}
4	request fresh	Yeni talep	{metin}
5	request headers host	Üstbilgi barındırıcısı iste	{metin}
6	request headers user-agent	Başlıkları isteme kullanıcı aracısı	{doğru, yanlış}
7	request headers content type	Başlık içerik türü isteme	{metin}
8	request headers org id	Üstbilgiler kuruluş kimliği iste	{metin}
9	request headers user session id	Üstbilgi isteme kullanıcı oturum kimliği	{metin}
10	request headers accept	Başlık isteme kabul etme	{metin}
11	request headers content-length	Başlık içerik uzunluğu isteği	{sayı}
12	request headers user name	Başlık kullanıcı adı isteği	{metin}
13	request headers user role	Üst bilgi istemede kullanıcı rolü	{metin}
14	request hostname	Ana bilgisayar adı isteği	{metin}
15	request IP	İnternet protokol isteği	{İP adres}
16	request original URL	Orijinal URL isteği	{metin}
17	request path	İstek yolu	{metin}
18	request protocol	İstek protokolü	{http, https}
19	request secure	Güvenli istek	{doğru, yanlış}
20	request stale	Eski istek	{doğru, yanlış}
21	request subdomains	Alt alan adı isteme	{metin}
22	request XHR (XML Http Request)	XHR isteği (XML Http İsteği)	{doğru, yanlış}
23	is Safe	Güvenlik durumu	{doğru, yanlış}

Bu çalışmada veri kümesinin %20'si test verisi, %80'i eğitim verisi olarak ayrıldı. Deneysel analizlerde kullanılan web uygulamaların istatistiksel bilgileri Şekil 1'de gösterildi.

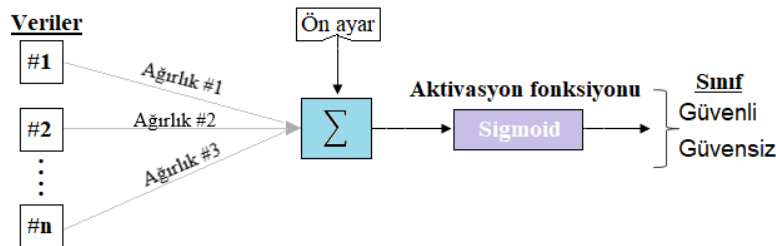


Şekil 1. Veri kümesindeki web uygulamalarının güvenlik durumu istatistiksel bilgileri

### 3. YÖNTEMLER VE ÖNERİLEN YAKLAŞIM (METHODS AND PROPOSED APPROACH)

#### 3.1. Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron)

Çok katmanlı algılayıcı (ÇKA), yapay sinir ağlarını temel almış, girdi verilerini işleyerek çıktı katmanına aktaran ve sınıflandırma işlemini gerçekleştiren makine öğrenme yöntemidir. ÇKA, yapay sinir ağlarını temel almış, girdi verilerini işleyerek çıktı katmanına aktaran ve sınıflandırma işlemini gerçekleştiren makine öğrenme yöntemidir. ÇKA, denetimli bir öğrenme yaklaşımı ile geliştirilmiş bir yöntemdir ve bu yöntemde en önemli faktör eşik değeridir. Eşik değerinin belirlenmesi veri kümesinin sayısı ve içeriği ile doğrudan bağlantılıdır ve bu değer değişkendir. ÇKA yönteminde iterasyon sayısı artırılarak öğrenme olayı artırılabilir. Girdi verileri ÇKA yönteminde işlenirken başlangıç ağırlık değerleri rastgele verilir ve öğrenme olayı ile ağırlık parametreleri sınıflandırma süreci tamamlayana kadar güncellenir. ÇKA yönteminin çıkışına doğru sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon sayesinde ikili bir sınıflandırma sürecinde çıktı değeri eşik değerinin üzerinde ise sınıf türü 1(bir) olarak çıkış yapar veya eşik değerinin altında bir değer ise sınıf türü 0 (sıfır) olarak çıkış yapar. Bu yöntemde öğrenme gerçekleştirilirken ileri doğru ve geriye doğru adımlar ile ağırlıklar güncellenir [17,18]. Basit bir ÇKA yönteminin tasarımı Şekil 2'de gösterildi. Bu çalışmanın deneysel analizinde kullanılan ÇKA yöntemi, Python yazılımında Sklearn kütüphanesindeki kod parametreleri kullanılarak derlendi. Analizler gerçekleştirilirken varsayılan parametre değerleri kullanıldı.



Şekil 2. ÇKA yönteminin işleyişini gösteren genel tasarım

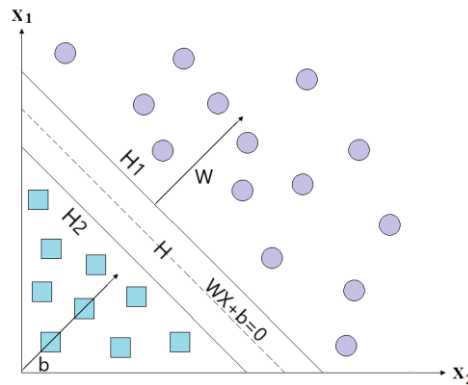
### 3.2. Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines)

DVM, birçok uygulama alanlarında tercih edilen, başarılı sonuçlar verebilen sınıflandırma ve regresyon işlemlerinde kullanılan bir makine öğrenme yöntemidir. DVM yöntemi çeşitli veri tiplerine göre (ikili, çoklu, büyük veri vs.) algoritma yapılarında farklı optimizasyon algoritmaları kullanarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. DVM sınıflandırma sürecinde ikili veya çok sınıf türü içerisindeki marjı en üst düzeyde ayırmayı amaçlar ve bunun içinde karar fonksiyonlarını kullanır. Karar fonksiyonları, karar sınır aralığının belirlenmesini sağlayan doğrudan eğitim verilerinden faydalanarak boyutlu bir alan çıkartan algoritmalarıdır. Diğer bir deyişle, eğitim veri kümesindeki ortalama karesel hatayı en aza indirmek yerine genelleme hatası üzerindeki bir sınırın en aza indirilmesini sağlar.

Veri kümesindeki örnek sayısını  $n$  olarak belirtelim. Her bir örnek giriş vektörü ( $X_i$ ) ve sınıf türü etiketinden ( $Y_i$ ) oluşmaktadır. Bu ilişki Denklem 1'de gösterildiği gibi ifade edilir. İki boyutlu bir girdi verisinin durumu doğrusal olarak ayrılabilir ve bunu gerçekleştirmek için hiper düzleme ihtiyaç vardır. Karar düzeyi ya da karar fonksiyonu hiper düzlem için kullanılan matematiksel denkleme göre hesaplanır. Bu hesaplama işlemi Denklem 2'ye göre gerçekleştirilir. Bu denklemde  $W$  değişkeni, hiper düzlemi tanımlar ve bu düzlemi uygun değer şeklinde ayırır. Ayrıca,  $b$  değişkeni ön ayar olarak tanımlanır [19]. Hiper düzlem belirlenirken iki adet  $H_1$  ve  $H_2$  alanları oluşur ve  $H_1$  ile  $H_2$  arasında hiç bir örnek girdisi yer almaz [19,20]. Bu durum Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu çalışmada DVM yöntemi Python dilinde Sklearn kütüphanesi kullanılarak derlendi. DVM yönteminde çekirdek, radyal temelli fonksiyon seçilerek sınıflandırma gerçekleştirildi ve diğer parametre değerleri Sklearn kütüphanesinde varsayılan değerler değiştirilmeden kullanıldı.

$$(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n) \quad (1)$$

$$W^T X_i + b = 0 \quad (2)$$



Şekil 3. DVM yöntemi ile ikili sınıflandırma süreci

### 3.3. Karar Ağacı (Decision Tree)

Karar ağaçları veri madenciliğinde sıklıkla kullanılan girdi verilerini sınıflandırma işlemi için genellikle tercih edilen makine öğrenme yöntemidir. Bu yöntem, kök-düğüm-yaprak-çocuk bağıntısı ile girdi verisinin özelliklerine ve özellik değerlerine göre sorgular gerçekleştirip sınıflandırma sürecini tamamlar. Basit bir ifade ile girdi değerlerine kök-düğüm-yaprak gibi birimlerde sorgulanan sorular ile “evet-hayır” gibi cevaplar alınır ve bu cevaplar ile ilgili verinin sınıflandırılması ağaç yapısında dallanarak belirlenir. Bazen girdi verisi özelliklerine göre yapraklara ulaşırken, her bir yaprak şartlı olasılıksal değerlere göre sınıflandırma sürecini gerçekleştirir [21,22]. Karar ağaçları için ölçeklendirme işleminde entropi ve Gini indeksleri kullanılarak gerçekleştirilir. Burada  $E$  örnek verisi içerisinde  $m$  sınıf türüne sahip bir küme şu şekilde ifade edilir;  $P_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ). Burada  $P_i$  değişkeni,  $E$  veri kümesi içerisinde  $i$ . sınıfa ait öğelerin değerini temsil eder. Olasılıksal değerlerin entropisinin hesaplanmasında kullanılan matematiksel formül

Denklem 3'te verildi. Entropi değerinin hesaplanmasında Denklem 4'daki formül kullanılır ve Gini indeks değerinin hesaplanmasında Denklem 5'teki matematiksel formül kullanılır [21]. Bu çalışmanın deneysel analizinde Karar ağaçları yöntemi Python yazılım dilinde Sklearn kütüphanesi kullanılarak derlendi. Karar ağaçları için maksimum derinlik oranı 33 olarak belirlendi ve diğer parametreler için varsayılan değerler tercih edildi.

$$(P_i)_{i=1}^m \quad (3)$$

$$- \sum_{i=1}^m P_i \log(P_i) \quad (4)$$

$$1 - \sum_{i=1}^m P_i^2 \quad (5)$$

### 3.4. Naif Bayes (Naive Bayes)

Naif Bayes, Bayes teoremine dayalı geliştirilen ve girdi verilerini olasılıksal tabanlı süreçlerden geçirerek sınıflandırma işlemini gerçekleştiren makine öğrenme yöntemidir. Bu yöntemin çalışma prensibinde bir girdi örneği için her sınıf türü için olasılık değerleri üretir ve olasılık değeri en yüksek olan sınıf türüne girdi örneği aktarılır. Bazen girdi örneklerinin olasılık değeri sıfır olabilir ve bu durum sıfır frekans olarak adlandırılır. Bu durumda girdi görüntüsü herhangi bir sınıfa aktarımı gerçekleştirilemez. Bu sebeple olasılık değeri sıfır olan örnek türleri Naif Bayes yönteminde düzeltme algoritmaları (örneğin; laplace dönüşümü) kullanılarak sıfırdan farklı bir olasılık değeri alır [23]. Naif Bayes yöntemi gerçek zamanlı sınıflandırma, metin tabanlı sınıflandırma, çok sınıflı tahmin ve spam filtreleme gibi alanlarda sıklıkla tercih edilir. Olasılık değerlerinin hesaplanmasında kullanılan Bayes formülü Denklem 6'da verilmiştir. Bu denklemde olasılık değerleri  $P$  ile temsil edilir ve  $A$  ile  $B$  değişkenleri örnek girdileri temsil eder. Denklem 6'da değişken durumları ile ilgili açıklamalar şu şekildedir;

- $P(A|B)$ :  $B$  durumunun gerçekleşmesi sırasında  $A$  durumunun gerçekleşme olasılığı,
- $P(B|A)$ :  $A$  durumunun gerçekleşmesi sırasında  $B$  durumunun gerçekleşme olasılığı,
- $P(A)$ :  $A$  durumunun gerçekleşme olasılığı,
- $P(B)$ :  $B$  durumunun gerçekleşme olasılığı [24],

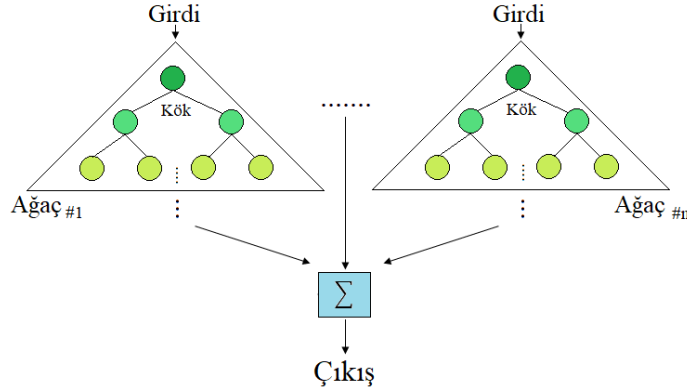
$$P(A|B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)} \quad (6)$$

Bu çalışmanın deneysel analizinde kullanılan Naif Bayes yöntemi, Python yazılımında Sklearn kütüphanesindeki kod parametreleri kullanılarak derlendi. Bu yöntem için tercih edilen parametreler varsayılan değerlerden oluşmaktadır.

### 3.5. Rastgele Orman (Random Forest)

Rastgele Orman, denetimli yaklaşımla sınıflandırma işlemini gerçekleştirebilen ve birden fazla karar ağacını bir araya getirerek (orman oluşumu) daha istikrarlı sonuçlar üretmeyi amaçlayan makine öğrenme yöntemidir. Bu yöntem ile hem regresyon hem de sınıflandırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Rastgele Orman yöntemi ile eğitim esnasında aşırı uyum gibi problemlerin önüne geçilir. Sınıflandırma sürecinde ağaç gurupları arasında olasılık değeri yüksek olan ağaç gurubu tarafından işlenerek, girdi verisi ilgili sınıfa aktarılır [25,26]. Rastgele Orman yönteminin işleyişini gösteren tasarım Şekil 4'te gösterildi. Bu çalışmanın deneysel analizinde Rastgele Orman yöntemi, Python yazılımında Sklearn kütüphanesindeki kod

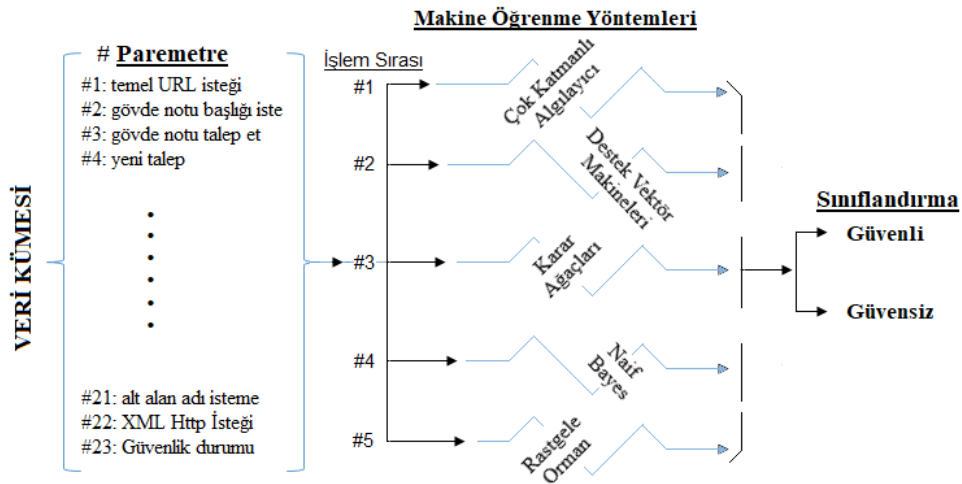
parametreleri kullanılarak derlendi. Bu yöntem için tercih edilen parametreler varsayılan değerlerden oluştu.



Şekil 4. Rastgele Orman yöntemi ile sınıflandırma süreci

### 3.6. Önerilen Yaklaşım (Proposed Approach)

Önerilen model, web uygulamalarında siber saldırıların yapay zekâ tabanlı yöntemlerinin etkinliğini ölçen bir yaklaşımdan oluşmaktadır. Bu yaklaşımdaki amaç web uygulamalarındaki saldırıların en iyi performans ile hızlı bir şekilde tespit edebilmesidir. İnternet ağında birçok kullanıcının işlemleri özel veriler girildikten sonra gerçekleşmektedir. Kullanıcıların bilgilerini sızdıran bir web uygulamasına gün içerisinde birçok kişi girebilmektedir. Web uygulamalarındaki güvenlik açıklarının tespiti anlık ve başarı oranı yüksek bir şekilde gerçekleşmesi gerekir. Bu tür durumlarda teknolojik gelişmeler yapay zekâ tabanlı sistemleri ön plana çıkarmaktadır. Bu çalışmada yapay zekâ yaklaşımının alt dalı olan makine öğrenme yöntemlerini deneysel analizlerde kullanarak web uygulamalarının güvenli olup olmadığını tespiti gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın genel tasarımı Şekil 5’te gösterildi.



Şekil 5. Önerilen yaklaşımın genel tasarımı

## 4. DENEYSSEL ANALİZ (EXPERIMENTAL ANALYSIS)

Deneysel analizler için Python yazılım dili kullanıldı ve açık erişimli kaynak kodlar [27] Jupyter Notebook arayüzü kullanılarak Google Colab sunucusu üzerinde derlendi [28]. Analizlerin sonuçlarını

değerlendirilirken ölçek olarak karmaşıklık matrisi kullanıldı. Karmaşıklık matrisinin hesaplanmasında kullanılan metrikler ise şunlardır; duyarlılık (Duy), özgülük (Özg), hassasiyet (Has), f-skoru (f-skr) ve doğruluk (Dğr). Metriklerin hesaplanmasında Denklem 7 ile Denklem 11 arasındaki formüller kullanıldı ve formüllerde kullanılan değişkenler şunlardır; doğru pozitif (DP), doğru negatif (DN), yanlış pozitif (YP), yanlış negatif (YN)'tir [29,30].

$$Duy = \frac{DP}{DP+YN} \quad (7)$$

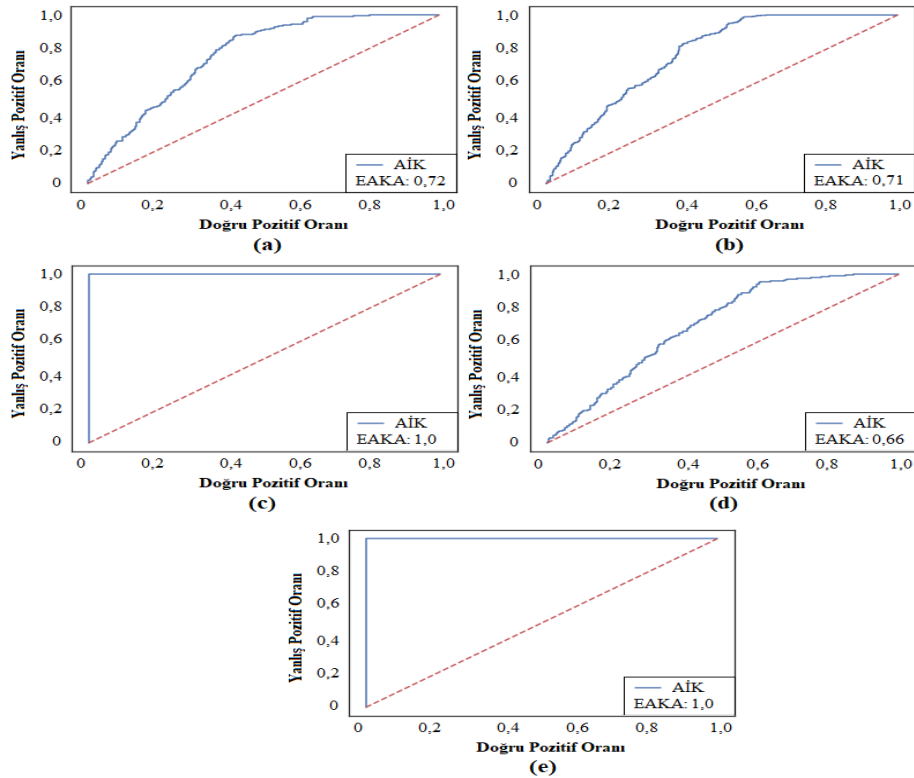
$$Özg = \frac{DN}{DN+YP} \quad (8)$$

$$Has = \frac{DP}{DP+YP} \quad (9)$$

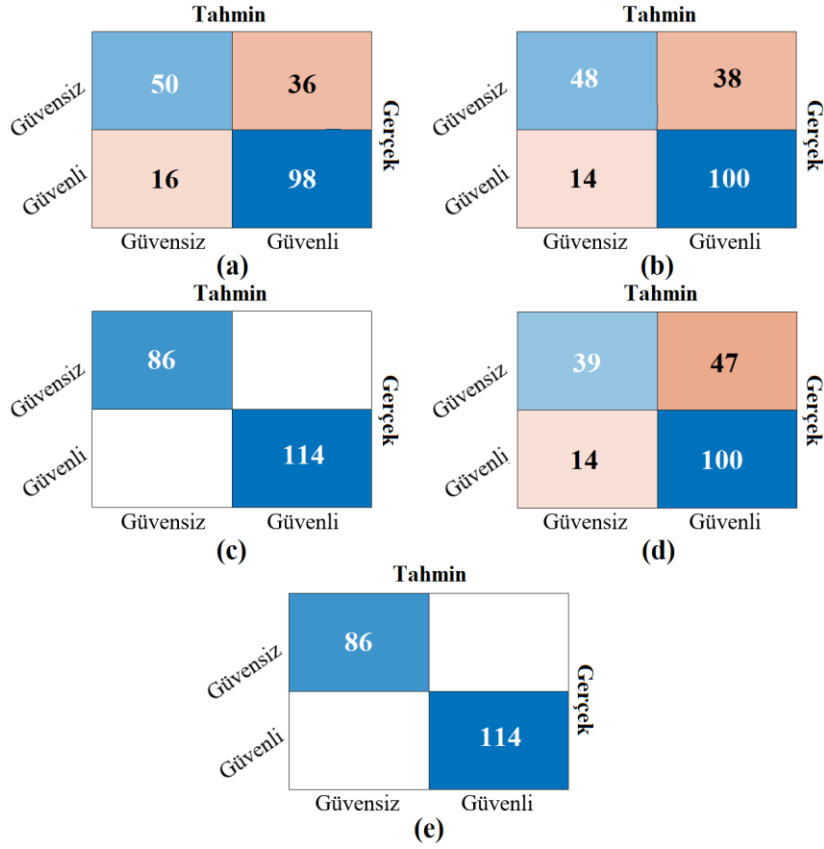
$$f-skr = \frac{2xDP}{2xDP+YP+YN} \quad (10)$$

$$Dğr = \frac{DP+DN}{DP+DN+YP+YN} \quad (11)$$

Çalışmanın analizlerinde veri kümesinin %80'i eğitim verisi olarak ayrıldı. Makine öğrenme yöntemlerinin analizlerinde elde edilen genel doğruluk başarıları şu şekildedir; ÇKA yöntemi ile %74, DVM yöntemi ile %74, Karar Ağacı yöntemi ile %100, Naif Bayes yöntemi ile %69,5 ve Rastgele Orman yöntemi ile %100'dü. Analizlerin makine öğrenme yöntemlerinden elde edilen alıcı işletim karakteristiği (AİK) ve eğri altında kalan alan (EAKA) grafikleri Şekil 6'da gösterildi. Makine öğrenme yöntemlerinden elde edilen karmaşıklık matrisleri Şekil 7'de gösterildi ve analiz sonuçları ile ilgili detaylı bilgiler Tablo 2'de verildi. Analiz sonuçları Karar Ağacı yönteminin ve bu yöntemeye dayalı oluşturulmuş Rastgele Orman yönteminin en iyi performansı verdiği gözlemlendi.



**Şekil 6.** Makine öğrenme yöntemlerinde elde edilen AİK grafikleri;  
a) ÇKA yöntemi, b) DVM yöntemi, c) Karar Ağacı, d) Naif Bayes, e) Rastgele Orman



Şekil 7. Makine öğrenme yöntemlerinde elde edilen karmaşıklık matrisleri; a) ÇKA yöntemi, b) DVM yöntemi, c) Karar Ağacı, d) Naif Bayes, e) Rastgele Orman

Tablo 2. Deneysel analizlerden elde edilen karmaşıklık matrislerinin metrik sonuçları (%)

Yöntem	Sınıf	Duy	Özg	Has	f-skr	Dğr
ÇKA	Güvensiz	58,14	85,96	75,76	65,79	74
	Güvenli	85,96	58,14	73,13	79,03	
DVM	Güvensiz	55,81	87,72	77,42	64,86	74
	Güvenli	87,72	55,81	72,46	79,37	
Karar Ağacı	Güvensiz	100	100	100	100	100
	Güvenli	100	100	100	100	
Naif Bayes	Güvensiz	45,35	87,72	73,58	56,11	69,50
	Güvenli	87,72	45,35	68,03	76,62	
Rastgele Orman	Güvensiz	100	100	100	100	100
	Güvenli	100	100	100	100	

## 5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Önerilen yaklaşımda en iyi performansları Karar Ağacı ve Rastgele Orman yöntemleri verdi. İki yöntemin mimari yapısı benzer özellikler gösterdiği için elde edilen başarıya da bu durum yansımıştır. Bu çalışmada



gerçekleştirilen analizlerde beş makine öğrenme yöntemi kullanıldı. Önerilen yaklaşımda ÇKA, DVM ve Naif Bayes yöntemleri istenilen başarıyı veremedi. Bu durumun sebepleri arasında;

- Makine öğrenme yöntemlerinin veri kümesi türüne ve büyüklüğüne bağlı olması,
- Makine öğrenme yöntemlerinin çekirdeğini doğrudan etkileyen parametre seçimleri,
- Makine öğrenme yöntemlerinin mimari yapısı,
- Kullanım amacı (sınıflandırma, regresyon, kümeleme vb.) ve gösterdiği performans [23-26].

Bu tür olası sebepler öngörüldüğünden çoklu makine öğrenme yaklaşımı kullanarak analizler gerçekleştirildi ve neticesinde iki makine öğrenme yöntemi (karar ağacı, rastgele orman) ile istenilen başarı sağlanmış oldu. Önerilen yaklaşımda dezavantaj olarak gördüğüm nokta, web uygulamalarında çıkartılan gereksiz parametrelerin özellik seçim yöntemi kullanarak elenmemesidir. Çünkü gereksiz özelliklerin önerilen yaklaşımın başarı performansını düşürmektedir ve en önemlisi zaman kaybına neden olmaktadır. Aynı veri kümesini kullanarak analizleri gerçekleştirilen çalışmalar Tablo 3'te verildi.

**Tablo 3.** Aynı veri kümesini kullanan çalışmaların karşılaştırılması

Çalışma	Yıl	Kullanılan Yöntemler	Başarılı Yöntemler	Dğr
Neha Hemane [31]	2021	Makine öğrenme yöntemleri	DVM (gauss fonksiyonlu)	%84
Bu çalışma	2021	ÇKA, DVM, Karar Ağacı, Naif Bayes, Rastgele Orman	Karar Ağacı, Rastgele Orman	%100

Neha Hemane [31]'nin analizinde makine öğrenme yöntemlerinin parametre ve fonksiyon değerleri ile performans ölçülmüştür. Dolayısıyla bu seçimler önerdiği yaklaşımın performansını istenilen düzeyde elde edilmesini sağlamıştır ve %84 oranında doğruluk başarısını DVM yönteminin gauss fonksiyonu parametresini seçerek elde etmiştir. Bu çalışmanın deneysel analizinde kullanılan DVM yöntemi için radyal temelli fonksiyon tercih edildi ve %74 oranında genel doğruluk başarısı elde edildi. Neha Hemane [31]'nin deneysel analizinde DVM yöntemi için tercih edilmiş çekirdek fonksiyonu gauss'tur. İki çalışmada DVM yöntemiyle elde edilmiş performans farkları doğrudan çekirdek fonksiyon türleri (gauss, radyal temelli) ile alakalıdır.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Son zamanlarda web uygulamaları popülerliğini artırmıştır. Dijital dönüşüm içerisinde olan birçok küçük, orta ve büyük işletmeler, kurumlar, kuruluşlar web uygulamaları üzerinde kullanıcılar ile iletişimlerini sağlamaktadır. Kötü amaçlı kullanıcılar tarafından web uygulamalarındaki işlemler, kullanıcı hesapları, şifreler, kart bilgileri vb. veriler ele geçirilmek istenmektedir ve bunun için internet üzerinden birçok sahte yollara başvurulabilmektedirler. Sonuç olarak, kişisel / kamu verilerin ele geçirilmesinde web uygulamaların güvenliği önemlidir. Anlık birçok insanın web uygulamalarını kullandığı ve bu etkileşimin güvenliğinin de yapay zekâ tabanlı bir savunma mekanizması ile başarılı sonuçlar verileceği öngörülmektedir. Bu çalışmada, 1000 adet web sitesine ait parametreler makine öğrenme yöntemleri tarafından analiz edilerek web uygulamaların güvenli olup olmadığının tespit ölçümü gerçekleştirildi. Karar Ağacı ve Rastgele Orman yöntemlerinin web güvenlik konusunda diğer makine öğrenme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlendi. İki başarılı yöntemlerden elde edilen genel doğruluk oranı %100'dü.

Gelecek çalışmada, farklı yöntem ve yaklaşım içeren yapay zekâ destekli derin öğrenme modelleri üzerinde analizler gerçekleştirilecektir.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Yin Z., Liu W., Chawla S., Adversarial Attack, Defense, and Applications with Deep Learning Frameworks, (2019) 1–25. doi:10.1007/978-3-030-13057-2\_1.
- [2] Jang-Jaccard J., Nepal S., A survey of emerging threats in cybersecurity, *J Comput Syst Sci*, (2014) 80:973–93. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcss.2014.02.005.
- [3] Nguyen M.H., Gruber J., Fuchs J., Marler W., Hunsaker A., Hargittai E., Changes in Digital Communication During the COVID-19 Global Pandemic: Implications for Digital Inequality and Future Research, *Soc Media + Soc*, (2020) 6:2056305120948255. doi:10.1177/2056305120948255.
- [4] Dunton G.F., Do B., Wang S.D., Early effects of the COVID-19 pandemic on physical activity and sedentary behavior in children living in the U.S., *BMC Public Health*, (2020) 20:1351. doi:10.1186/s12889-020-09429-3.
- [5] Buchanan R., What We Know about Identity Theft and Fraud Victims from Research-and Practice-Based Evidence center for victim Research Report, (2019) 34.
- [6] Hashizume K., Rosado D.G., Fernández-Medina E., Fernandez E.B., An analysis of security issues for cloud computing, *J Internet Serv Appl*, (2013) 4:5. doi:10.1186/1869-0238-4-5.
- [7] Marashdih A.W., Zaaba Z.F., Suwais K., Mohd N.A., Web application security: An investigation on static analysis with other algorithms to detect cross site scripting, *Procedia Comput Sci*, (2019) 161:1173–81. doi:10.1016/j.procs.2019.11.230.
- [8] Ferrara E., The history of digital spam, *Commun ACM*, (2019) 62:82–91. doi:10.1145/3299768.
- [9] Ingle D., Attacks on Web Based Software and Modelling Defence Mechanisms, *Int J UbiComp*, (2012) 3:11–30. doi:10.5121/iju.2012.3302.
- [10] Bhagwani H., Log based Dynamic Intrusion Detection of Web Applications. Master of Technology, (2019).
- [11] Liu Y., Wang Z., Tian S., Security Against Network Attacks on Web Application System BT - Cyber Security, In: Yun X, Wen W, Lang B, Yan H, Ding L, Li J, ve ark., editors., Singapore: Springer Singapore, (2019) 145–52.
- [12] Pan Y., Sun F., Teng Z., White J., Schmidt D.C., Staples J., ve ark., Detecting web attacks with end-to-end deep learning, *J Internet Serv Appl*, (2019) 10:16. doi:10.1186/s13174-019-0115-x.
- [13] Liu T., Qi Y., Shi L., Yan J., Locate-then-Detect: Real-time web attack detection via attention-based deep neural networks. *IJCAI Int Jt Conf Artif Intell*, (2019) 4725–31. doi:10.24963/ijcai.2019/656.
- [14] Kozik R., Choraś M., Renk R., Holubowicz W., Kozik R., Choraś M., ve ark., A Proposal of Algorithm for Web Applications Cyber Attack Detection, (2016) 1–8.
- [15] Anbiya D.R., Purwarianti A., Asnar Y., Vulnerability Detection in PHP Web Application Using Lexical Analysis Approach with Machine Learning 5th Int. Conf. Data Softw. Eng., (2018) 1–6. doi:10.1109/ICODSE.2018.8705809.
- [16] Hemane N., Cyber Security: Machine Learning Model to protects web and mobile applications from runtime attacks /(Dataset). Github, (2021) [https://github.com/nehahemane/Cyber\\_Security](https://github.com/nehahemane/Cyber_Security) (Erişim tarihi: 6 Haziran 2021).
- [17] Thomas P., Suhner M-C., A New Multilayer Perceptron Pruning Algorithm for Classification and Regression Applications, *Neural Process Lett*, (2015) 42:437–58. doi:10.1007/s11063-014-9366-5.

- [18] Castro W., Oblitas J., Santa-Cruz R., Avila-George H., Multilayer perceptron architecture optimization using parallel computing techniques, *PLoS One*, (2017) 12:e0189369. doi:10.1371/journal.pone.0189369.
- [19] Cervantes J., Garcia-Lamont F., Rodríguez-Mazahua L., Lopez A., A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends, *Neurocomputing*, (2020) 408:189–215. doi:https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.10.118.
- [20] Ma Y., Zhang Q., Li D., Tian Y., Linex Support Vector Machine for Large-Scale Classification, *IEEE Access*, (2019) 7:70319–31. doi:10.1109/access.2019.2919185.
- [21] Kingsford C., Salzberg S.L., What are decision trees? *Nat Biotechnol*, (2008) 26:1011–3. doi:10.1038/nbt0908-1011.
- [22] Gadekallu T.R., Khare N., Bhattacharya S., Singh S., Maddikunta P.K.R., Srivastava G., Deep neural networks to predict diabetic retinopathy, *J Ambient Intell Humaniz Comput*, (2020) doi:10.1007/s12652-020-01963-7.
- [23] Xu S., Bayesian Naïve Bayes classifiers to text classification, *J Inf Sci*, (2016) 44:48–59. doi:10.1177/0165551516677946.
- [24] Goh J.O.S., Hung H.-Y., Su Y.-S., Chapter Seven - A conceptual consideration of the free energy principle in cognitive maps: How cognitive maps help reduce surprise. In: Federmeier KDBT-P of L and M, 69, Academic Press, (2018) 205–40. doi:https://doi.org/10.1016/bs.plm.2018.09.005.
- [25] Zhang H., Zhou J., Jahed Armaghani D., Tahir M.M., Pham B.T., Huynh V. V., A Combination of Feature Selection and Random Forest Techniques to Solve a Problem Related to Blast-Induced Ground Vibration, *Appl Sci*, (2020) 10. doi:10.3390/app10030869.
- [26] Wang P., Hu J., A hybrid model for EEG-based gender recognition, *Cogn Neurodyn*, (2019) 13:541–54. doi:10.1007/s11571-019-09543-y.
- [27] Amudaakindele K., Telecommunication Churn Prediction, Github, (2020) [https://github.com/amudaakindele/Telecommunication-Churn-Prediction/blob/master/Telecom\\_churn.ipynb](https://github.com/amudaakindele/Telecommunication-Churn-Prediction/blob/master/Telecom_churn.ipynb) (Erişim tarihi: 9 Haziran 2021).
- [28] Carneiro T., Nóbrega R.V.M. D., Nepomuceno T., Bian G., Albuquerque V.H.C. D., Filho P.P.R., Performance Analysis of Google Colaboratory as a Tool for Accelerating Deep Learning Applications, *IEEE Access*, (2018), 6:61677–85. doi:10.1109/access.2018.2874767.
- [29] Hasnain M., Pasha M.F., Ghani I., Imran M., Alzahrani M.Y., Budiarto R., Evaluating Trust Prediction and Confusion Matrix Measures for Web Services Ranking, *IEEE Access*, (2020) 8:90847–61. doi:10.1109/access.2020.2994222.
- [30] Demir F., Ismael A.M., Sengur A., Classification of Lung Sounds With CNN Model Using Parallel Pooling Structure, *IEEE Access*, (2020) 8:105376–83. doi:10.1109/access.2020.3000111.
- [31] Hemane N. Cyber Security analysis results, Github, (2021) [https://github.com/nehahemane/Cyber\\_Security/blob/main/Cyber\\_Security.ipynb](https://github.com/nehahemane/Cyber_Security/blob/main/Cyber_Security.ipynb) (Erişim tarihi: 10 Haziran 2021).



## A New Integrated Approach for Determination of Turkey's Solar Energy Production Strategies: The Fuzzy Expanded SWOT

Buket KARATOP<sup>1</sup> Buşra TAŞKAN<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Istanbul University Cerrahpaşa Vocational School of Technical Sciences, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 34500, Buyukcekmece/ISTANBUL

<sup>2</sup>Muş Alparslan University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, 49250, Merkez/MUS

### Article Info

Research article  
Received: 27.07.2021  
Revision: 04.10.2021  
Accepted: 09.11.2021

### Keywords

Solar Energy  
Strategy  
SWOT  
Expanded SWOT  
Fuzzy AHP  
Renewable energy

### Abstract

Solar energy is one of the most important renewable energy types which are invested in Turkey because the country has high solar energy potential due to its geographical location and solar energy has apparent advantages. Due to the current importance of the issue, determining the strategies related to Turkey's solar energy production is aimed in this study. For this, a new integrated method called the Fuzzy Expanded SWOT which consists of the Fuzzy AHP and the Expanded SWOT methods has been proposed. The proposed method eliminates many disadvantages of the traditional SWOT analysis. First of all, factors and sub-factors related to solar energy were determined using the Expanded SWOT analysis. Subsequently, the local weights of these factors and sub-factors were determined using the Fuzzy AHP method. The sub-factors which are insignificant according to the weights found were eliminated and the global weights of the remaining sub-factors were found. Sub-factors were prioritized according to their global weights and strategies were determined according to the Expanded SWOT matrix considering these priorities. Finally, the sensitivity analysis has been performed to see the effect of the different weights given to the SWOT factors on the strategies created. As a result of the analyzes, a total of 9 strategies have been determined and it was observed that the strategies which should be dwelled on related to solar energy production in Turkey, are ones that concentrate on R&D studies in public institutions, private sector, and universities. According to the sensitivity analysis which is performed for 3 additional scenarios, it was seen that the weights of the SWOT factors changed the direction of the strategies.

## 1. INTRODUCTION

The increasing energy need in the world due to factors technological developments, industrialization, population growth, etc., and fossil resources' inability to meet this need due to the limited availability of them in nature, have accelerated the search for alternative energy resources. Although renewable energy was used before the first industrial revolution, it has become so popular today due to the growing concerns about the security of energy supply, being environmentally friendly, and its positive economic effects. Henrik Lund [1] defined renewable energy as "energy that is produced by natural resources - such as sunlight, wind, rain, waves, tides, and geothermal heat - that are naturally replenished within a period time of a few years". Types of renewable energy are hydropower, solar energy, wind energy, geothermal energy, bioenergy (biomass, biogas, biodiesel-bioethanol), and ocean energy.

Solar energy is used worldwide for electricity generation or heating and desalinating of water and is becoming more popular day by day. Energy can be obtained directly from the sun even in cloudy weather. Solar power is mainly produced in two ways: Photovoltaics (PV) and Concentrated Solar Power (CSP) [2]. Solar energy has features such as ease of installation and use, as well as not polluting the environment and not creating hazardous waste. Turkey has a high solar energy potential due to its geographical location. According to Turkey's Solar Energy Potential Atlas (GEPA), it was determined that the annual

total sunshine duration is 2,741 hours (daily average 7.5 hours), the annual total incoming solar energy is 1,527 kWh/m<sup>2</sup>.year (daily average 4.18 kWh / m<sup>2</sup>.day) [3].

256829 ktoe of the 13558111 ktoe total energy supply of the world in 2017 was met from wind, solar, etc. energy sources [4]. 67442 ktoe of the 1996569 ktoe total energy supply in 2017 of the European region which also contains Turkey, was met from wind, solar, etc. energy sources. In Turkey, 10170 ktoe of the 146847 ktoe total energy supply in 2017 was met from wind, solar, etc. energy sources [5]. Republic of Turkey Minister of Energy and Natural Resources expressed the current situation related to Turkey's solar energy with these words; Today, Turkey reached up to sixth row in Europe and thirteenth row in the world in terms of its installed capacity for renewable energy. Turkey has covered a very long distance about the solar energy. Until 10 years ago, while our installed solar power was zero, we have reached 6032 MW today. As of the end of January 2020, the share of solar energy got up to 6.6 percent in our total installed power and to 13.5 percent in our renewable energy installed power. Today, we are the sixth in Europe and the twelfth in the World at the installed solar power. I believe that Turkey's position will continue to grow with our new YEKA competitions [6].

In this study, it is aimed to determine the solar energy production strategies of Turkey because of the importance the country attaches to the subject and the high solar energy potential it has. The study which is structured based on this purpose consists of 5 sections, including the introduction. In the second part of the study, the literature related to the subject was mentioned. In the third part, Fuzzy AHP and Expanded SWOT methods, which constitute the new Fuzzy Expanded SWOT approach proposed in the study, were mentioned. In the fourth part, the proposed model was briefly mentioned and Turkey's solar energy production strategies were determined by making necessary analyses. In the final part, the results were interpreted and the study was completed.

## 2. LITERATURE REVIEW

An important tool to determine strategies at the strategic management process, SWOT analysis is applied to real-life problems. The most characteristic features of real-life problems are that they are uncertain and multi-criteria. For this reason, there are many studies that have used multi-criteria decision making (MCDM) methods and SWOT analysis together. Kajanus et. al [7] applied a combination of AHP, which is an MCDM technique, and SWOT analysis in their study. Later, Kangas et. al [8] integrated the AHP into SWOT, naming it A'WOT analysis. Apart from these, there are many articles ([9-24]) using SWOT analysis and MCDM methods in combination.

There are contradictions in the SWOT analysis. Depending on the perspective, a strength may also be a weakness, and an opportunity may also be a threat. Ghazinoory et. al [25] stated that it is necessary to use fuzzy sets in such uncertain situations. Therefore, in the related literature, there are also studies using Fuzzy MCDM techniques, as well as MCDM techniques along with SWOT analysis. Kheirkhah et. al [26] developed and applied a fuzzy SWOT approach to create strategies aimed at reducing the dangers related to the transport of hazardous substances in Iran. Hosseini-Nasab et. al [27] used fuzzy SWOT analysis to overcome the imprecisions in strategic planning. Sevkli et. al [28] proposed a fuzzy ANP based SWOT approach to determine the strategies related to domestic operations of Turkish airlines. The authors compared the results obtained by solving the same example with AHP, Fuzzy AHP, and ANP methods. Yapici Pehlivan et. al [29] proposed an integrated Fuzzy MCDM methodology consisting of Fuzzy AHP, WASPAS-F, EDAS-F, and ARAS-F methods, to develop organizational strategies. There are many other examples of fuzzy SWOT studies. The general opinion among researchers is that conventional SWOT analysis is inadequate in solving real-life problems. There are shortcomings in the strategy set created with the classic SWOT working according to Aristotelian logic, but good results are obtained with the fuzzy SWOT.

Since problems related to energy planning are complex, MCDM has proven to be an effective tool for solving such problems. Different MCDM techniques are applied in the renewable energy field [30]. Therefore, there are many articles employing SWOT and MCDM methods together to develop the strategies for renewable energy in the literature. Terrados et. al [31] designed a sustainable energy model focusing on renewable energy especially solar energy and biomass energy, for regional energy planning. The authors stated that the use of MCDM alone is not sufficient for strategies in energy planning, and it

gives more meaningful results together with SWOT. Catron et. al [32] used an integrated SWOT-ANP approach in the development of energy policies. In the study evaluating the development of bioenergy-based energy production, the ANP method was used because bioenergy factors are related to each other. Kabak and Dağdeviren [33] used the BOCR (Benefits, Opportunities, Costs, and Risks) method which is a similar analysis to SWOT, integrated with ANP at the evaluation of renewable energy in Turkey. In the study, 5 renewable energy sources (Hydropower, Geothermal, Solar, Wind, and Biomass) were evaluated according to 19 criteria. Adar et. al [34] have proposed an integrated model consisting of Fuzzy AHP and MCDM methods for sustainable energy management strategies in Turkey. The authors identified 4 main criteria and 20 sub-criteria and they ranked the main and sub-criteria according to their importance degrees. Kabak et. al [35] established the MCDM hierarchy between the SWOT main factors (4 criteria) and sub-factors (29 sub-criteria) to determine the renewable energy policies in Turkey. In this hierarchy, the relationships between factors were evaluated with the Fuzzy ANP. Sindhu et. al [36] prioritized the factors determined by Strength-Weakness-Opportunity-Challenges (SWOC) analysis with the AHP method to assist policy planners in their studies where they emphasized the importance of solar energy for a sustainable future. Ervural et. al [37] used the ANP and Fuzzy TOPSIS based SWOT analysis for the determination of policies related to the energy sector in Turkey. Khan [38] used an integrated SWOT-Fuzzy MCDM method to evaluate the strategies of the compressed natural gas (CNG) industry. A modified fuzzy goal programming was used as the fuzzy MCDM method. Solangi et. al [39] used AHP and fuzzy TOPSIS based SWOT analysis to determine energy strategies. They weighted the SWOT factors and sub-factors with the AHP and ranked energy strategies with the Fuzzy TOPSIS. Alizadeh et al. [40] proposed a framework for the formulation of policies regarding renewable energy. A hybrid MCDM method consisting of BOCR and ANP was used in the study. MCDM and SWOT (or similar analyzes) have been integrated into with the articles mentioned up to now. Strategies or policies were tried to be determined only through ranking and prioritization.

### 3. RESEARCH METHODOLOGY

In this study, a new approach which is called Fuzzy Expanded SWOT and eliminates some of the shortcomings of the SWOT analysis is proposed. Firstly, the Expanded SWOT method was developed by looking at the SWOT analysis from a wider perspective. Then, by integrating the Fuzzy AHP method into the Expanded SWOT method, the Fuzzy Expanded SWOT approach used in the study was obtained.

#### 3.1. The Fuzzy AHP Method

Although the AHP method is very popular and widely used in applications, it may not reflect the way people think exactly [41]. The fuzzy AHP method has been developed to overcome the mentioned deficiency of the AHP method. Although there are various fuzzy AHP methods in the literature such as Van Laarhoven and Pedrycz Fuzzy AHP method, Buckley Fuzzy AHP method, Chang’s Extended Analysis method [42], Chang’s Extended Analysis method was preferred in this study. Because this method has advantages such as requiring less computation, following the steps of traditional AHP, and not requiring additional processing [43]. The method was described in detail below [44];

Let  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  be a criterion set and  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$  be an objective set. In this method, each criterion is taken and an extent analysis is performed for each purpose. Thus,  $m$  extent analysis values are obtained for each criterion. These are shown as  $M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m$   $i = 1, 2, \dots, n$  and all the  $M_{g_i}^j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) values are triangular fuzzy numbers (TFNs).

Step 1: According to criterion  $i$ , fuzzy synthetic extent values ( $S_i$ ) are determined using Eq. (1);

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j * \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \tag{1}$$

The fuzzy addition operation is performed on  $M$  values by using Eq. (2) to obtain  $\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$  in the Eq. (1);

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = (\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j) \quad (2)$$

To obtain  $[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1}$  in the Eq. (1), Eq. (3) and Eq. (4) are used;

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = (\sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i) \quad (3)$$

$$[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (4)$$

Step 2: The possibility degree for  $M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$  is expressed as  $V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))]$ . If this equation is analyzed, the Eq. (5) is obtained;

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & \text{if } m_2 \geq m_1, \\ 0, & \text{if } l_1 \geq u_2, \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (5)$$

In Eq. (5), d is the ordinate of the highest intersection point between  $\mu_{M_1}$  and  $\mu_{M_2}$ . To compare  $M_1$  and  $M_2$  values, both  $V(M_2 \geq M_1)$  and  $V(M_1 \geq M_2)$  values must be known.

Step 3: The possibility degree of a convex number being greater than k convex fuzzy numbers ( $M_i$   $i = \{1, 2, \dots, k\}$ ) must also be considered.

$$V(M \geq M_1, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } \dots \text{ ve } (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_1) \quad (6)$$

In Eq. (6), if  $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$  for  $i = \{1, 2, \dots, k\}$ , weight vectors for  $k \neq i$  are calculated using Eq. (7) as the following;

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

Step 4: The weight vectors are normalized using Eq. (8);

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

In Eq. (8), the W weight vector isn't a fuzzy number. The final alternative weights are found by hierarchically synthesizing obtained these weights.

### 3.2. A New Approach to the SWOT Analysis: The Expanded SWOT Analysis

In general, the strategic direction or strategies of an individual, an event, and a company are determined based on its current situation. The current situation consists of the individual, the event, the company itself, and the environment in which it is located. The individual, event, or company has its advantages (strengths) and disadvantages (weaknesses) whilst its environment incorporates advantages (opportunities) and disadvantages (threats). These advantages and disadvantages of the individual, the event, or the company in itself and its environment, are determined by SWOT analysis. Strategies are important decisions in shaping the future of companies. The accuracy of these decisions is ensured with analytical methods and analyzes. SWOT analysis is an important analysis in the creation of strategies and it must be said that the strategies determined without considering the mission, vision, core values, and stakeholder views are missing. SWOT analysis was developed in the 1960s [45] and was popularized by Andrews (1965), who combined the ideas of Peter Drucker, Philip Selznick, and Alfred Chandler [28].

David [46] stated that the 4 group strategies created as a result of SWOT analysis are Strengths-Opportunities (SO) strategies, Weaknesses-Opportunities (WO) strategies, Strengths-Threats (ST) strategies, Weaknesses-Threats (WT) strategies. Sevkli et. al [28] described these strategies which are also seen in Figure 1, as follows: “SO strategies use a firm’s internal strengths to take advantage of external opportunities. WO strategies improve internal weaknesses by taking advantage of external opportunities. ST strategies use a firm’s strengths to avoid or reduce the impact of external threats. WT strategies are defensive tactics directed at reducing internal weaknesses and avoiding environmental threats”. According to Hill and Westbrook [47], some criticisms towards SWOT analysis are as follows; creating extremely long lists, not using weights to reflect priorities, using ambiguous words and expressions, conflicts have no solution, there is no obligation to verify thoughts by data or analysis, it requires only one level of analysis, there is no logical link to strategy implementation.

	<b>STRENGTHS-S</b>	<b>WEAKNESSES-W</b>
	1. 2. . <b>List of Strengths</b> . . n	1. 2. . <b>List of Weaknesses</b> . . n
<b>OPPORTUNITIES-O</b>	<b>SO STRATEGIES</b>	<b>WO STRATEGIES</b>
1. 2. . <b>List of Opportunities</b> . . n	1. 2. . Use strengths to take advantage of opportunities . . n	1. 2. . Overcome weaknesses by taking advantage of opportunities . . n
<b>THREATS-T</b>	<b>ST STRATEGIES</b>	<b>WT STRATEGIES</b>
1. 2. . <b>List of Threats</b> . . n	1. 2. . Use strengths to avoid threats . . n	1. 2. . Minimize weaknesses to avoid threats . . n

Figure 1. A generic presentation of the SWOT matrix [28]



In this study, by evaluating the SWOT matrix from a wider perspective, the matrix called Expanded SWOT in Figure 2 was developed. While there are 4 general groups of strategies in the SWOT matrix, there are 16 more detailed groups of strategies in the expanded SWOT matrix. Although some of these strategy groups obtained with the method seem very similar to each other, in this way there is no overlooked strategy.

	<b>STRENGTHS-S</b> 1. 2. . List of Strengths n	<b>WEAKNESSES-W</b> 1. 2. . List of Weaknesses n	<b>OPPORTUNITIES-O</b> 1. 2. . List of Opportunities n	<b>THREATS-T</b> 1. 2. . List of Threats n
<b>STRENGTHS-S</b> 1. 2. . List of Strengths n	SS STRATEGIES	SW STRATEGIES	<b>SO STRATEGIES</b>	<b>ST STRATEGIES</b>
<b>WEAKNESSES-W</b> 1. 2. . List of Weaknesses n	WS STRATEGIES	WW STRATEGIES	<b>WO STRATEGIES</b>	<b>WT STRATEGIES</b>
<b>OPPORTUNITIES-O</b> 1. 2. . List of Opportunities n	OS STRATEGIES	OW STRATEGIES	OO STRATEGIES	OT STRATEGIES
<b>THREATS-T</b> 1. 2. . List of Threats n	TS STRATEGIES	TW STRATEGIES	TO STRATEGIES	TT STRATEGIES

**Figure 2.** A generic presentation of the Expanded SWOT matrix

The 16 group strategies and explanations of them created with the Expanded SWOT matrix are as follows;

➤ Strategies created by using strengths

Strength-Strength (SS) Strategies: It is a group of strategies to increase strengths by using its other strengths.

Strength-Weakness (SW) Strategies: It is a group of strategies to strengthen weaknesses by using its strengths.

Strength-Opportunity (SO) Strategies: It is a group of strategies to take advantage of the opportunities and increase them by using its strengths.

Strength-Threat (ST) Strategies: It is a group of strategies to use its strengths to remove the threats or turn them into opportunities.

- Strategies created by using weaknesses

Weakness-Strength (WS) Strategies: It is a group of strategies to increase its strengths by knowing or using its weaknesses.

Weakness-Weakness (WW) Strategies: It is a group of strategies to strengthen its weaknesses by knowing or using its weaknesses.

Weakness-Opportunity (WO) Strategies: It is a group of strategies to increase and use the opportunities by knowing or using its weaknesses.

Weakness-Threat (WT) Strategies: It is a group of strategies to remove the threats or turn them into opportunities by knowing or using its weaknesses.

- Strategies created by using opportunities

Opportunity-Strength (OS) Strategies: It is a group of strategies to increase its strengths by using opportunities.

Opportunity-Weakness (OW) Strategies: It is a group of strategies to strengthen its weaknesses by using opportunities.

Opportunity-Opportunity (OO) Strategies: It is a group of strategies of increasing and using opportunities by using opportunities.

Opportunity-Threat (OT) Strategies: It is a group of strategies to remove threats or turn them into opportunities by using opportunities.

- Strategies created by using threats

Threat-Strength (TS) Strategies: It is a group of strategies to increase its strengths by being aware of and using the threats.

Threat-Weakness (TW) Strategies: It is a group of strategies to strengthen their weaknesses by being aware of and using threats.

Threat-Opportunity (TO) Strategies: It is a group of strategies to take advantage of opportunities and increase them by being aware of and using threats.

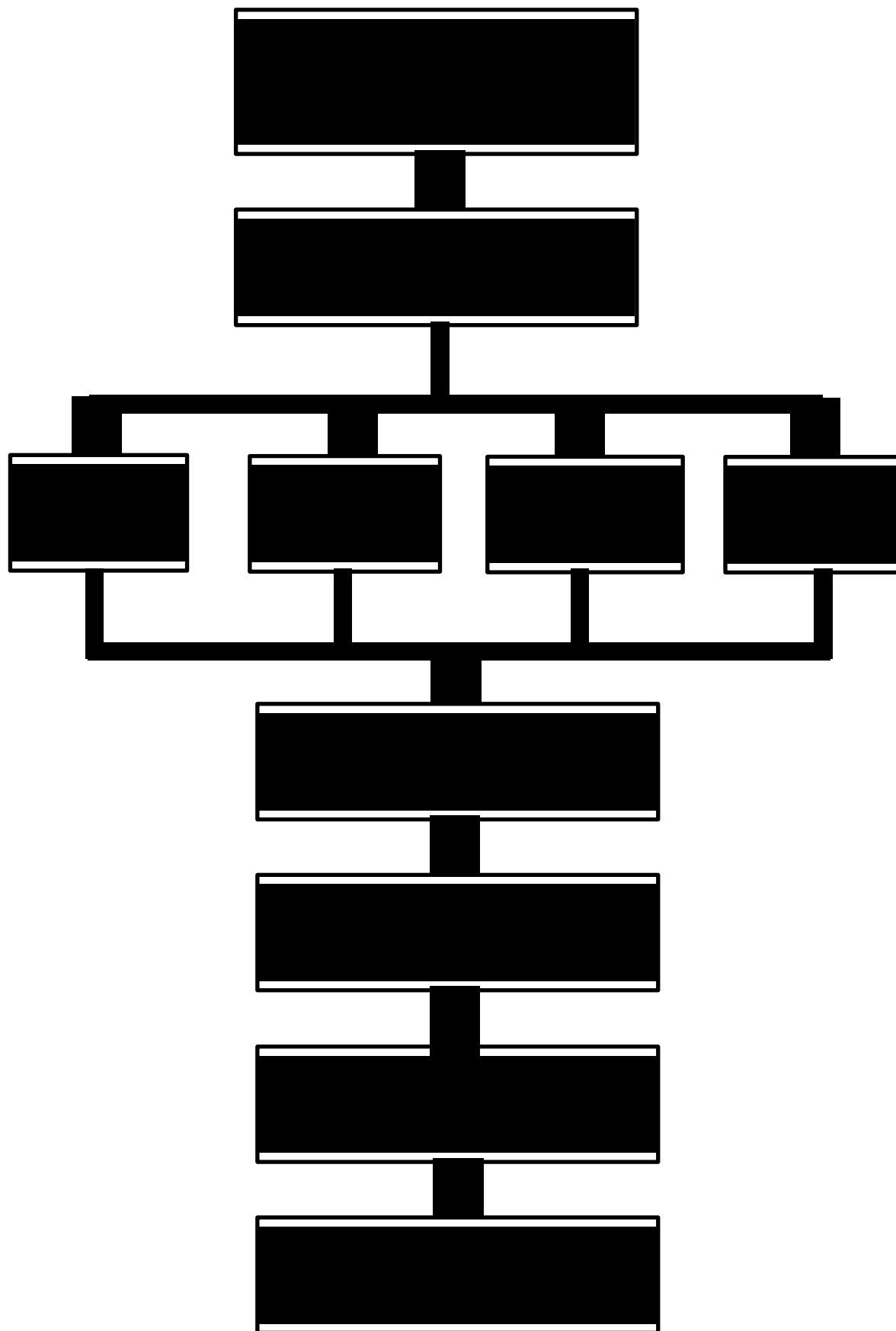
Threat-Threat (TT) Strategies: It is a group of strategies to remove threats or turn them into opportunities by being aware of and using threats.

#### **4. THE PROPOSED FUZZY EXPANDED SWOT APPROACH AND ITS APPLICATION**

The proposed model, in order to determine strategies related to the Turkey's solar energy production is as seen in Figure 3. As also mentioned in the previous section, there are some criticisms of traditional SWOT analysis. With the Fuzzy Expanded SWOT which is a new integrated approach proposed in this study, some shortcomings of the traditional SWOT analysis have been eliminated. The shortcomings mentioned and how they were eliminated were mentioned below;

- No using weights to reflect priorities; This disadvantage of the traditional SWOT analysis was eliminated by determining the weights of factors and sub-factors using the Fuzzy AHP method.
- Using ambiguous words and expressions; This disadvantage of the traditional SWOT analysis was eliminated by using fuzzy logic.
- Creating extremely long lists; This disadvantage of the traditional SWOT analysis was eliminated by removing the sub-factors which are insignificant according to weights found with the Fuzzy AHP method, from the list.
- There is no obligation to verify thoughts by data or analysis; This disadvantage of the traditional SWOT analysis was eliminated by using the Fuzzy AHP method.

- It requires only one level of analysis; This disadvantage of the traditional SWOT analysis was eliminated by increasing the number of analysis levels with the method used.
- Conflicts have no solution; Since the strategies were developed in more detail with the use of Expanded SWOT analysis, this disadvantage of the traditional SWOT analysis was eliminated.
- There is no logical link to strategy implementation; This disadvantage of the traditional SWOT analysis was eliminated by using the most important sub-factors in forming strategies thanks to giving weight to sub-factors.



*Figure 3. The general structure of the proposed model*

Application steps of the proposed method are explained below;

#### Step 1: Determination of the expert group

At this stage, the experts who are consulted to their opinions about the problem addressed were determined. The expert group consists of professionals working in the solar energy sector and specialized in this field.

#### Step 2: Application of the Expanded SWOT analysis

At this stage, Turkey's strengths and weaknesses, as well as opportunities and threats in its environment-related to solar energy generation were identified. For this purpose, firstly the scientific publications on solar energy production in Turkey and the strategic documents published by the Turkish government were reviewed. The first SWOT draft was formed. Then, the necessary information were obtained from the experts with the brainstorming technique and the second SWOT draft was formed. The experts were discussed again on the topic and they jointly proposed changes for the draft documents. The documents were simplified and the final version of Expanded SWOT analysis which is seen in Table 1 was created;

**Table 1.** Expanded SWOT analysis related to Turkey's solar energy

	<b>ADVANTAGES</b>	<b>DISADVANTAGES</b>
<b>INTERNAL FACTORS</b>	<p><b>Strengths (S)</b></p> <p><b>S<sub>1</sub>:</b> The abundant and inexhaustible resource  <b>S<sub>2</sub>:</b> Transforming the sun into energy is easy  <b>S<sub>3</sub>:</b> Accessing the raw material (sun) is easy  <b>S<sub>4</sub>:</b> No causing environmental pollution, in other words, being environmentally friendly  <b>S<sub>5</sub>:</b> Low maintenance cost of power plants  <b>S<sub>6</sub>:</b> It can be used in all areas where energy is needed  <b>S<sub>7</sub>:</b> It reduces dependence on foreign sources and ensures the security of supply  <b>S<sub>8</sub>:</b> It is possible to design solar energy production systems to meet energy needs on a small or large scale  <b>S<sub>9</sub>:</b> Solar panels increase production power and efficiency  <b>S<sub>10</sub>:</b> It is sustainable</p>	<p><b>Weaknesses (W)</b></p> <p><b>W<sub>1</sub>:</b> Its investment cost is high  <b>W<sub>2</sub>:</b> It is not possible to produce it at night  <b>W<sub>3</sub>:</b> It may cause the death of some animals such as birds etc.  <b>W<sub>4</sub>:</b> Depending on the use of solar panels used in energy production, the energy production efficiency decreases by years  <b>W<sub>5</sub>:</b> As solar energy cannot be produced continuously there is a need for storage and the storage opportunities are limited  <b>W<sub>6</sub>:</b> There should be no shade around production plants to allow them to fully capture the sun. Therefore, the plants should be installed in a full open area  <b>W<sub>7</sub>:</b> The amount of energy produced in solar power plants requires much more space compared to the same amount of energy produced in other types of power plants</p>
<b>EXTERNAL FACTORS</b>	<p><b>Opportunities (O)</b></p> <p><b>O<sub>1</sub>:</b> The number of sunny days is high  <b>O<sub>2</sub>:</b> There are suitable lands for power plant installation  <b>O<sub>3</sub>:</b> It can be used more widely with the rapid development of technology  <b>O<sub>4</sub>:</b> It offers financial gain to investors in the short-term  <b>O<sub>5</sub>:</b> Awareness about renewable energy has begun to occur  <b>O<sub>6</sub>:</b> There is an increase in the number of domestic engineering firms and investments made in the renewable energy sector</p>	<p><b>Threats (T)</b></p> <p><b>T<sub>1</sub>:</b> The quality of sun rays varies depending on the season  <b>T<sub>2</sub>:</b> It is difficult and expensive to obtain land in the regions where there are no suitable lands (empty).  <b>T<sub>3</sub>:</b> The incentives offered by the laws are not enough  <b>T<sub>4</sub>:</b> Limiting of power plant installation due to the capacity filling problem in transformer stations  <b>T<sub>5</sub>:</b> The power of transformer stations cannot be increased due to the lack of adequate capacity and thus the production is limited  <b>T<sub>6</sub>:</b> Realization of the legal process, permissions, and project approvals in the long term</p>

\*Corresponding author, e-mail: b.taskan@alparslan.edu.tr

### Step 3: Calculation of the weights of Expanded SWOT analysis factors and sub-factors

At this stage, weights of Expanded SWOT analysis factors (Strengths (S), Weaknesses (W), Opportunities (O), Threats (T)) and sub-factors (Sk, Wl, Om, Tn) were calculated using Chang's Extended Analysis method. When calculating weights for each of the Expanded SWOT factors and sub-factors, the geometrical means of expert opinions were obtained and one pairwise comparison matrix was obtained for each of the factors and sub-factors. For this purpose, firstly the pairwise comparisons were made for Expanded SWOT analysis factors and sub-factors by the experts according to values in Table 2;

**Table 2.** Values for expert evaluations [48]

Importance Degrees	Linguistic Expressions
1	Both factors are equally important
2	1st factor is less important than the 2nd factor.
3	1st factor being averagely important with respect to 2nd factor
4	1st factor is more important than the 2nd factor
5	1st factor is very important than the 2nd factor

The Expanded SWOT analysis has 4 factors as can also be seen from Table 1. To determine the weights of factors, a pairwise comparison matrix at 4\*4 dimension (SWOT4\*4) was created as a result of experts' evaluations as seen in Table 3;

**Table 3.** The pairwise comparison matrix for Expanded SWOT's factors

	S	W	O	T
S	1	1,189	1,189	1,189
W	0,841	1	1,074	1,414
O	0,841	0,931	1	1,224
T	0,841	0,707	0,816	1

The Strengths factor has 10 sub-factors as can also be seen from Table 1. To determine the weights of related sub-factors, a pairwise comparison matrix at 10\*10 dimensions (S10x10) was created as a result of experts' evaluations as seen in Table 4;

**Table 4.** The pairwise comparison matrix for Strengths' sub-factors

	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>
S <sub>1</sub>	1	0,5623	1	1	0,7953	0,5623	0,5373	0,5946	0,5946	0,5
S <sub>2</sub>	1,7783	1	2,3784	2,2134	1,1247	3,5566	1,8612	1,5651	1,6818	0,7186
S <sub>3</sub>	1	0,4204	1	1	0,5081	0,3976	0,7071	1,1067	0,8409	0,6687
S <sub>4</sub>	1	0,4518	1	1	0,4273	0,6389	0,5623	0,7953	0,8409	0,6687
S <sub>5</sub>	1,2574	0,8891	1,968	2,3403	1	1	1,0746	0,5946	0,4204	0,6223
S <sub>6</sub>	1,7783	0,2812	2,5149	1,5651	1	1	2,6321	2,8284	1,3161	1
S <sub>7</sub>	1,8612	0,5373	1,4142	1,7783	0,9306	0,3799	1	1,1892	0,5946	0,5373
S <sub>8</sub>	1,6818	0,6389	0,9036	1,2574	1,6818	0,3536	0,8409	1	0,9457	0,3593
S <sub>9</sub>	1,6818	0,5946	1,1892	1,1892	2,3784	0,7598	1,6818	1,0574	1	0,7186
S <sub>10</sub>	2	1,3916	1,4953	1,4953	1,6069	1	1,8612	2,7832	1,3916	1

The Weaknesses factor has 7 sub-factors as can also be seen from Table 1. To determine the weights of related sub-factors, a pairwise comparison matrix at 7\*7 dimension ( $W_{7 \times 7}$ ) was created as a result of experts' evaluations as seen in Table 5;

**Table 5.** The pairwise comparison matrix for Weaknesses' sub-factors

	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	W <sub>4</sub>	W <sub>5</sub>	W <sub>6</sub>	W <sub>7</sub>
W <sub>1</sub>	1	3,1623	4,7287	4,4006	1,6069	2,3403	2,1147
W <sub>2</sub>	0,3162	1	2,9428	0,7477	0,4273	0,3593	0,3593
W <sub>3</sub>	0,2115	0,3398	1	0,2541	0,2236	0,3593	0,2812
W <sub>4</sub>	0,2272	1,3375	3,936	1	0,5081	0,8801	1,4142
W <sub>5</sub>	0,6223	2,3403	4,4721	1,968	1	2,1147	1,6818
W <sub>6</sub>	0,4273	2,7832	2,7832	1,1362	0,4729	1	0,5946
W <sub>7</sub>	0,4729	2,7832	3,5566	0,7071	0,5946	1,6818	1

The Opportunities factor has 6 sub-factors as can also be seen from Table 1. To determine the weights of related sub-factors, a pairwise comparison matrix at 6\*6 dimension ( $O_{6 \times 6}$ ) was created as a result of experts' evaluations as seen in Table 6;

**Table 6.** The pairwise comparison matrix for Opportunities' sub-factors

	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	O <sub>4</sub>	O <sub>5</sub>	O <sub>6</sub>
O <sub>1</sub>	1	1,7783	0,7953	0,7186	0,6043	0,9306
O <sub>2</sub>	0,5623	1	0,273	0,5373	0,7186	0,6389
O <sub>3</sub>	1,2574	3,6628	1	1,968	1,1067	1,1892
O <sub>4</sub>	1,3916	1,8612	0,5081	1	1,3375	0,6043
O <sub>5</sub>	1,6549	1,3916	0,9036	0,7477	1	1,6549
O <sub>6</sub>	1,0746	1,5651	0,8409	1,6549	0,6043	1

The Threats factor has 6 sub-factors as can also be seen from Table 1. To determine the weights of related sub-factors, a pairwise comparison matrix at 6\*6 dimension ( $T_{6 \times 6}$ ) was created as a result of experts' evaluations as seen in Table 7;

**Table 7.** The pairwise comparison matrix for Threats' sub-factors

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
T <sub>1</sub>	1	0,3861	0,2115	0,3761	0,4472	0,2115
T <sub>2</sub>	2,59	1	0,7186	0,4273	0,4273	0,2515
T <sub>3</sub>	4,7287	1,3916	1	0,7071	0,7071	0,5373
T <sub>4</sub>	2,6591	2,3403	1,4142	1	1	0,6687
T <sub>5</sub>	2,2361	2,3403	1,4142	1	1	0,6687
T <sub>6</sub>	4,7287	3,9764	1,8612	1,4953	1,4953	1

At the current stage, weight values were found for each of the Expanded SWOT analysis factors and sub-factors, and then the accuracy of the results was tested with the consistency analysis. If the consistency rate (CR) obtained with consistency analysis is less than or equal to 0.10, the related result is consistent. Factors and sub-factors were prioritized by interpreting the obtained results. Firstly, the weight values of the factors seen in Table 8 were calculated and the consistency analysis was performed. Because  $CR = 0,00365 \leq 0,10$ , the obtained results are consistent. From the results, it was seen that the most important factor is Strengths (S).



**Table 8.** The local weights of the SWOT factors

	$W_i$	CR
<b>S</b>	0,340883	0,00365
<b>W</b>	0,300878	
<b>O</b>	0,253261	
<b>T</b>	0,104978	

The Strengths factor has 10 sub-factors and the local weights for each sub-factor were calculated as seen in Table 9. Because  $CR=0,033 \leq 0,10$ , the obtained results are consistent. Since the weights of S1 and S3 are small at a negligible level, the related weight values were taken as zero in accordance with the fuzzy AHP procedure.

**Table 9.** The local weights of the Strengths' sub-factors

	$W_i$	CR
<b>S<sub>1</sub></b>	0	0,033
<b>S<sub>2</sub></b>	0,22555	
<b>S<sub>3</sub></b>	0	
<b>S<sub>4</sub></b>	0,062974	
<b>S<sub>5</sub></b>	0,084346	
<b>S<sub>6</sub></b>	0,198926	
<b>S<sub>7</sub></b>	0,060601	
<b>S<sub>8</sub></b>	0,067426	
<b>S<sub>9</sub></b>	0,119442	
<b>S<sub>10</sub></b>	0,180736	

The Weaknesses factor has 7 sub-factors and the local weights for each sub-factor were calculated as seen in Table 10. Because  $CR = 0,035 \leq 0,10$ , the obtained results are consistent. Since the weights of W<sub>2</sub> and W<sub>3</sub> are small at a negligible level, the related weight values were taken as zero in accordance with the fuzzy AHP procedure.

**Table 10.** The local weights of the Weaknesses' sub-factors

	$W_i$	CR
<b>W<sub>1</sub></b>	0,55018	0,035
<b>W<sub>2</sub></b>	0	
<b>W<sub>3</sub></b>	0	
<b>W<sub>4</sub></b>	0,022722	
<b>W<sub>5</sub></b>	0,274003	
<b>W<sub>6</sub></b>	0,024384	
<b>W<sub>7</sub></b>	0,128711	

The Opportunities factor has 6 sub-factors and the local weights for each sub-factor were calculated as seen in Table 11. Because  $CR=0,03 \leq 0,10$ , the obtained results are consistent. Since the weight of O2 is small at a negligible level, the related weight value was taken as zero in accordance with the fuzzy AHP procedure.

**Table 11.** The local weights of the Opportunities' sub-factors

	<b>W<sub>i</sub></b>	<b>CR</b>
<b>O<sub>1</sub></b>	0,079308	0,03
<b>O<sub>2</sub></b>	0	
<b>O<sub>3</sub></b>	0,391602	
<b>O<sub>4</sub></b>	0,157812	
<b>O<sub>5</sub></b>	0,20649	
<b>O<sub>6</sub></b>	0,164788	

The Threats factor has 6 sub-factors and the local weights for each sub-factor were calculated as seen in Table 12. Because  $CR=0,029 \leq 0,10$ , the obtained results are consistent. Since the weights of T1 and T2 are small at a negligible level, the related weight values were taken as zero in accordance with the fuzzy AHP procedure.

**Table 12.** The local weights of the Threats' sub-factors

	<b>W<sub>i</sub></b>	<b>CR</b>
<b>T<sub>1</sub></b>	0	0,029
<b>T<sub>2</sub></b>	0	
<b>T<sub>3</sub></b>	0,214343	
<b>T<sub>4</sub></b>	0,122933	
<b>T<sub>5</sub></b>	0,114996	
<b>T<sub>6</sub></b>	0,547728	

At the current stage, firstly Expanded SWOT analysis sub-factors should be prioritized to determine the strategies related to solar energy production. Expanded SWOT analysis sub-factors whose weights are zero are not taken into consideration as also seen in Table 9-12, since they are not important in determining the strategies. Global weights of Expanded SWOT sub-factors were found by multiplying the local weights of the related sub-factors and the weights of the factors that the sub-factors belong to. Then, as seen in Table 13, the priority ranking of Expanded SWOT analysis sub-factors was made. According to this, W1 (Its investment cost is high) appears as the highest priority sub-factor with the 0.165537 weight value. W4 (Depending on the use of solar panels used in energy production, the energy production efficiency decreases by years) appears as the lowest priority sub-factor with the 0,006837 weight value.

Step 4: Determination of the strategies which should be focused

When the priority order in Table 13 is analyzed, the ranking of the top 10 sub-factors from the most important to the less important is as follows;

- W<sub>1</sub>: Its investment cost is high
- O<sub>3</sub>: It can be used more widely with the rapid development of technology
- W<sub>5</sub>: As solar energy cannot be produced continuously there is a need for storage and the storage opportunities are limited
- S<sub>2</sub>: Transforming the sun into energy is easy
- S<sub>6</sub>: It can be used in all areas where energy is needed
- S<sub>10</sub>: It is sustainable
- T<sub>6</sub>: Realization of the legal process, permissions, and project approvals in the long term
- O<sub>5</sub>: Awareness about renewable energy has begun to occur
- O<sub>6</sub>: There is an increase in the number of domestic engineering firms and investments made in the renewable energy sector
- S<sub>9</sub>: Solar panels increase production power and efficiency

**Table 13.** Prioritization of Expanded SWOT's sub-factors

	$W_{local}$	$W_{factor}$	$W_{global}$	Priority	
$S_2$	0,22555	0,340883	0,076886	4	
$S_4$	0,062974		0,021467	16	
$S_5$	0,084346		0,028752	13	
$S_6$	0,198926		0,06781	5	
$S_7$	0,060601		0,020658	17	
$S_8$	0,067426		0,022984	14	
$S_9$	0,119442		0,040716	10	
$S_{10}$	0,180736		0,06161	6	
$W_1$	0,55018		0,300878	0,165537	1
$W_4$	0,022722			0,006837	22
$W_5$	0,274003	0,082441		3	
$W_6$	0,024384	0,007337		21	
$W_7$	0,128711	0,038726		12	
$O_1$	0,079308	0,253261	0,020086	18	
$O_3$	0,391602		0,099177	2	
$O_4$	0,157812		0,039968	11	
$O_5$	0,20649		0,052296	8	
$O_6$	0,164788		0,041734	9	
$T_3$	0,214343	0,104978	0,022501	15	
$T_4$	0,122933		0,012905	19	
$T_5$	0,114996		0,012072	20	
$T_6$	0,547728		0,057499	7	

As can be seen from the order above, although there are two important weaknesses the dominance of strengths and opportunities attract the attention in the top 10. Only one threat could enter the top 10 and creating strategies related to threats may not make much sense. It is noteworthy that the two weaknesses are in the top 3 and are consecutive with opportunities and strengths in the ranking. In this study, these striking information were used while creating strategies that should be focused and the strategies created are mentioned below;

SS Strategies: Strategies were developed with a focus on the following strengths but all strengths can not be used at the same time;

- $S_2$ : Transforming the sun into energy is easy
- $S_6$ : It can be used in all areas where energy is needed
- $S_{10}$ : It is sustainable
- $S_9$ : Solar panels increase production power and efficiency

The SS strategy created using the two most important strengths ( $S_2$  and  $S_6$ ) in the top 10 is as below; "Making it obligatory that the energy need of society in common use areas was met with the solar energy".

WW Strategies: Strategies were developed with a focus on the following weaknesses;

- $W_1$ : Its investment cost is high

- W<sub>5</sub>: As solar energy can not be produced continuously there is a need for storage and the storage opportunities are limited

The WW strategy created using the two weaknesses (W<sub>1</sub> and W<sub>5</sub>) in the top 10 is as below;

“Supporting R&D studies which must be made to reduce investment costs and solve energy storage problems, of the universities”.

OO Strategies: Strategies were developed with a focus on the following opportunities;

- O<sub>3</sub>: It can be used more widely with the rapid development of technology
- O<sub>5</sub>: Awareness about renewable energy has begun to occur
- O<sub>6</sub>: There is an increase in the number of domestic engineering firms and investments made in the renewable energy sector

The OO strategy created using the three opportunities (O<sub>3</sub>, O<sub>5</sub>, and O<sub>6</sub>) in the top 10 is as below;

“Opening university-industry cooperation calls which contribute to local entrepreneurs within TÜBİTAK, providing more incentives and increasing visibility of these incentives”.

SO Strategies: These are the strategies that focus on strengths (S<sub>2</sub>, S<sub>6</sub>, S<sub>10</sub>, S<sub>9</sub>) to take advantage of opportunities (O<sub>3</sub>, O<sub>5</sub>, O<sub>6</sub>). But all strengths and opportunities can not be used at the same time. The SO strategy created using the one strength (S<sub>9</sub>: Solar panels increases production power and efficiency) and one opportunity (O<sub>6</sub>: There is an increase in the number of domestic engineering firms and investments made in the renewable energy sector) in the top 10 is as below;

“Encouraging domestic solar panel production and R&D activities by the related units of the state within the framework of university-industry cooperation”.

SW Strategies: These are the strategies that focus on strengths (S<sub>2</sub>, S<sub>6</sub>, S<sub>10</sub>, S<sub>9</sub>) to strengthen weaknesses (W<sub>1</sub>, W<sub>5</sub>). But all strengths and weaknesses can not be used at the same time. The SW strategy created using the two strengths (S<sub>6</sub>: It can be used in all areas where energy is needed, S<sub>9</sub>: Solar panels increases production power and efficiency) and one opportunity (W<sub>1</sub>: Its investment cost is high) in the top 10 is as below;

“Encouraging the installation of solar power panels in all state-owned buildings (schools, ministries, etc.) and supporting investment costs of the state”.

OW Strategies: These are the strategies that focus the opportunities (O<sub>3</sub>-O<sub>5</sub>-O<sub>6</sub>) to eliminate the weaknesses (W<sub>1</sub>-W<sub>5</sub>). But all opportunities and weaknesses can not be used at the same time. The OW strategy created using the one opportunity (O<sub>3</sub>: It can be used more widely with the rapid development of technology) and one weakness (W<sub>5</sub>: As the solar energy cannot be produced continuously there is a need for storage and the storage opportunities are limited) in the top 10 is as below;

“Encouraging university projects to develop batteries for the problem of energy storage of solar power plants”.

OS Strategies: These are the strategies that focus the opportunities (O<sub>3</sub>, O<sub>5</sub>, O<sub>6</sub>) to increase the strengths (S<sub>2</sub>, S<sub>6</sub>, S<sub>10</sub>, S<sub>9</sub>). But all opportunities and strengths can not be used at the same time. The OS strategy created using the one opportunity (O<sub>3</sub>: It can be used more widely with the rapid development of technology) and one strength (S<sub>6</sub>: It can be used in all areas where energy is needed) in the top 10 is as below;

“Using e-learning materials to raise the awareness on the use of solar energy in the society and to explain how to cooperate related to the subject”.

WS Strategies: These are the strategies that focus on the weaknesses ( $W_1, W_5$ ) to increase the strengths ( $S_2, S_6, S_{10}, S_9$ ). But all weaknesses and strengths can not be used at the same time. The WS strategy created using the one weakness ( $W_5$ : As the solar energy cannot be produced continuously there is a need for storage and the storage opportunities are limited) and one strength ( $S_9$ : Solar panels increases production power and efficiency) in the top 10 is as below;

“Opening of the project calls to meet the storage need for solar power and to increase the efficiency of solar panels”.

WO Strategies: These are the strategies focusing on the weaknesses ( $W_1, W_5$ ) to take advantage of the opportunities ( $O_3, O_5, O_6$ ). But all weaknesses and opportunities can not be used at the same time. The WO strategy created using the one weakness ( $W_5$ : As the solar energy cannot be produced continuously there is a need for storage and the storage opportunities are limited) and the two opportunities ( $O_3$ : It can be used more widely with the rapid development of technology,  $O_5$ : Awareness about renewable energy has begun to occur) in the top 10 is as below;

“Raising awareness on the subject by explaining the inadequacies and needs related to solar energy storage to relevant persons and institutions using e-learning materials”.

The factors and sub-factors prioritized by the fuzzy AHP method were transformed into strategies in the Expanded SWOT matrix. These strategies can be eliminated, improved, or increased according to the state's energy policies.

## 5. SENSITIVITY ANALYSIS

In this section, sensitivity analysis has been performed to see the effect of the different weights given to the SWOT factors on the strategies created. The different weights given for the SWOT factors are as in Table 14;

*Table 14. The different scenarios for SWOT factors weights*

	Scenario 1 (current)	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
<b>S</b>	0,34	0,25	0,20	0,15
<b>W</b>	0,30	0,25	0,30	0,35
<b>O</b>	0,25	0,25	0,20	0,15
<b>T</b>	0,11	0,25	0,30	0,35

Except for the current scenario, 3 scenarios were created. As seen in Table 14, all SWOT factors were given equal weight in the second scenario. In the later scenarios (3rd and 4th scenarios), the weights of the negative factors of the SWOT (W-T) were gradually increased. As a natural consequence of this situation, it is seen that the global weights (which are in the top 10 in prioritization) chosen to determine the strategies are gradually increasing for the T and W sub-factors as seen in Table 15. Despite all this, according to the current scenario (scenario 1), only OO, SO and WS strategies change in the other 3 scenarios as seen in Table 16. At the same time, the same strategy is used for SO and WS strategies in the other 3 scenarios. Only in scenario 4, since weights of the T and W sub-factors are much, S6 which is in the 11th place, was included in the analysis. In addition, strategies can be written related to the threats for scenarios 3 and 4. In the current scenario, threats were not included in the strategies since there is one threat at the top 10.

**Table 15.** The SWOT sub-factor weights according to different scenarios

	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4	
1	W1	0,165537	W1	0,137545	W1	0,165054	W1	0,192563
2	O3	0,099177	T6	0,136932	T6	0,164318	T6	0,191705
3	W5	0,082441	O3	0,0979	W5	0,082201	W5	0,095901
4	S2	0,076886	W5	0,068501	O3	0,07832	T3	0,07502
5	S6	0,06781	S2	0,056387	T3	0,064303	O3	0,05874
6	S10	0,06161	T3	0,053586	S2	0,04511	W8	0,045049
7	T6	0,057499	O5	0,051623	O5	0,041298	T4	0,043027
8	O5	0,052296	S6	0,049732	S6	0,039785	T5	0,040248
9	O6	0,041734	S10	0,045184	W8	0,038613	S2	0,033832
10	S9	0,040716	O6	0,041197	T4	0,03688	O5	0,030974
11	O4	0,039968	O4	0,039453	S10	0,036147	S6	0,029839
12	W8	0,038726	W8	0,032178	T5	0,034499	S10	0,02711
13	S5	0,028752	T4	0,030733	O6	0,032958	O6	0,024718
14	S8	0,022984	S9	0,02986	O4	0,031562	O4	0,023672
15	T3	0,022501	T5	0,028749	S9	0,023888	S9	0,017916
16	S11	0,021467	S5	0,021087	S5	0,016869	S5	0,012652
17	S7	0,020658	O1	0,019827	O1	0,015862	O1	0,011896
18	O1	0,020086	S8	0,016856	S8	0,013485	S8	0,010114
19	T4	0,012905	S11	0,015743	S11	0,012595	S11	0,009446
20	T5	0,012072	S7	0,01515	S7	0,01212	S7	0,00909
21	W7	0,007337	W7	0,006096	W7	0,007315	W7	0,008534
22	W4	0,006837	W4	0,005681	W4	0,006817	W4	0,007953

**Table 16.** Results obtained according to the sensitivity analysis

	Scenario 1 (current)	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
<b>SS Strategy</b>	S <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	S <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	S <sub>2</sub> S <sub>6</sub>	S <sub>2</sub> (S <sub>6</sub> )*
<b>WW Strategy</b>	W <sub>1</sub> W <sub>5</sub>	W <sub>1</sub> W <sub>5</sub>	W <sub>1</sub> W <sub>5</sub>	W <sub>1</sub> W <sub>5</sub>
<b>OO Strategy</b>	O <sub>3</sub> O <sub>5</sub> O <sub>6</sub>	O <sub>3</sub> O <sub>5</sub> O <sub>6</sub>	O <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	O <sub>3</sub> O <sub>5</sub>
<b>SO Strategy</b>	S <sub>9</sub> O <sub>6</sub>	S <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	S <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	(S <sub>6</sub> )*O <sub>5</sub>
<b>SW Strategy</b>	S <sub>6</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>6</sub> W <sub>1</sub>	S <sub>6</sub> W <sub>1</sub>	(S <sub>6</sub> )*W <sub>1</sub>
<b>OW Strategy</b>	O <sub>3</sub> W <sub>5</sub>	O <sub>3</sub> W <sub>5</sub>	O <sub>3</sub> W <sub>5</sub>	O <sub>3</sub> W <sub>5</sub>
<b>OS Strategy</b>	O <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	O <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	O <sub>3</sub> S <sub>6</sub>	O <sub>3</sub> (S <sub>6</sub> )*
<b>WS Strategy</b>	W <sub>5</sub> S <sub>9</sub>	W <sub>5</sub> S <sub>2</sub>	W <sub>5</sub> S <sub>2</sub>	W <sub>5</sub> S <sub>2</sub>
<b>WO Strategy</b>	W <sub>5</sub> O <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	W <sub>5</sub> O <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	W <sub>5</sub> O <sub>3</sub> O <sub>5</sub>	W <sub>5</sub> O <sub>3</sub> O <sub>5</sub>

## 6. CONCLUSIONS

The need for energy is constantly increasing for various reasons in the world, and existing fossil resources are insufficient to meet this need. Renewable energy that the world has focused on to close this energy need deficit, has become a very popular field today. Turkey also attaches great importance to renewable energy and creates its policies related to energy planning in this direction. Because Turkey has high solar energy potential due to its geographical location, it attaches great importance to solar energy. Therefore, it

is aimed to determine the strategies related to Turkey's solar energy production in this study. A new integrated approach called the Fuzzy Expanded SWOT consisting of Fuzzy AHP and Expanded SWOT methods, has been proposed to create the mentioned strategies. Many disadvantages of the classical SWOT analysis have been overcome with the developed method.

The strategies were created with the sub-factors that ranked in the top 10 after the prioritization made based on the weights of the sub-factors. Strategies were created based on Strengths, Weaknesses, and Opportunities with the thought that threats can be neglected since there is only one threat in the top 10. Therefore, strategies created according to the Expanded SWOT matrix are SS, WW, OO, SO, SW, OW, OS, WS, and WO strategies. Since the weights of threats were low, no strategies related to the threats (ST, WT, OT, TS, TW, TO, TT) in the Expanded SWOT matrix were created in this study. The issue which draws attention in the priority ranking of Expanded SWOT sub-factors is that the weaknesses come into prominence. Therefore, the strategies which come into prominence among the created strategies are related to the weaknesses and are as follows;

- WW Strategy: Supporting R&D studies which must be made to reduce investment costs and solve energy storage problems, of the universities.
- SW Strategy: Encouraging the installation of solar power panels in all state-owned buildings (schools, ministries, etc.) and supporting investment costs of the state.
- OW Strategy: Encouraging university projects to develop batteries for the problem of energy storage of solar power plants.
- WS Strategy: Opening of project calls to meet the storage need for solar power and to increase the efficiency of solar panels.
- WO Strategy: Raising awareness on the subject by explaining the inadequacies and needs related to solar energy storage to relevant persons and institutions using e-learning materials.

The strategies which should be dwelled on related to solar energy production in Turkey, are ones which concentrate on R&D studies in public institutions, the private sector, and universities. Of course, it is necessary to emphasize the importance of performance-based selecting and evaluating of R&D studies and projects.

As a result of the sensitivity analysis for the proposed model, it was seen that the weights of the SWOT factors changed the direction of the strategies. More clearly, the weights of the SWOT factors play an active role in determining the global weights and priority order. In this case, strategies are formed from the SWOT sub-factors which are in the first places (with higher priority). Accordingly, as seen in Table 14 in the analysis, when the weights of W and T factors are increased in scenarios 3 and 4, the weights of W and T sub-factors also increase in the ranking as seen in Table 15. For scenarios 3 and 4, appropriate strategies can be added related to the weaknesses (WW, WT&TW) and threats (TS&ST, TW&WT, TO&OT, TT).

As a result, in this study, the analysis values were obtained by taking the valuable information of the experts who worked as engineers and managers in solar energy projects for more than 10 years to determine the solar energy strategies for Turkey. Here, it is important work that has been put into practice to transform the qualified implicit knowledge of the experts into explicit knowledge, to include them in the analysis, and to draw conclusions. The limitation of the study is that the evaluations are made according to the expert opinions, this situation may create subjectivity in the study. In future study, the determination of strategies can be done by presenting alternative strategies with an artificial intelligence algorithm.

## REFERENCES

- [1] Lund, H. (2010). Renewable energy systems: The choice and modeling of 100% renewable solutions. USA: Academic Press,
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Solar Energy”, <https://www.irena.org/solar/>, Accessed: 30/03/2020.
- [3] Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources, “Solar Energy”, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes/>, Accessed: 30/03/2020.
- [4] International Energy Agency (IEA), “Total Primary Energy Supply for the World”, <https://www.iea.org/world/>, Accessed: 12/01/2020.
- [5] International Energy Agency (IEA), “Total Primary Energy Supply for the Europe”, <https://www.iea.org/regions/europe/>, Accessed: 12/01/2020.
- [6] Dönmez, F., 7. “Anadolu Güneşi Elektrik Üretiyor Kayseri Buluşması”, <https://www.aa.com.tr/tr/politika/enerji-ve-tabii-kaynaklar-bakani-donmez-turkiye-bugun-yenilenebilir-enerji-kurulu-gucunde-avrupada-altinci/1741509/>, Accessed: 13/03/2020.
- [7] Kajanus, M., Kurttila, M.,& Pesonen, M. (1996). Applying SWOT and AHP analysis when changing to eco-labeled forestry, Integrating Environmental Values into Forest Planning-Baltic and Nordic Perspectives. The Nordic-Baltic Research Course, Râpinä, Estonia.
- [8] Kangas, J., Pesonen, M., Kurttila, M.,& Kajanus, M. (2001). A'WOT: Integrating the AHP with SWOT Analysis. 6th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process (ISAHP), Berne, Switzerland.
- [9] Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J.,& Kajanus, M. (2000). Utilizing the Analytic Hierarchy Process (AHP) in SWOT analysis - A hybrid method and its application to a forest-certification case, Forest Policy and Economics, 1(1), 41-52.
- [10] Shrestha, R.K., Alavalapati, J.R.,& Kalmbacher, R.S. (2004). Exploring the potential for silvopasture adoption in south-central Florida: An application of SWOT–AHP method, Agricultural Systems, 81(3), 185-199.
- [11] Yüksel, İ.,& Dağdeviren, M. (2007). Using the Analytic Network Process (ANP) in a SWOT analysis – A case study for a textile firm, Information Sciences, 177(16), 3364-3382.
- [12] Kahraman, C., Demirel, N.C.,& Demirel, T. (2007). Prioritization of e-government strategies using a SWOT-AHP analysis: The case of Turkey, European Journal of Information Systems, 16(3), 284-298.
- [13] Arslan, O.,& Turan, O. (2009). Analytical investigation of marine casualties at the Strait of Istanbul with SWOT–AHP method, Maritime Policy & Management, 36(2), 145-131.
- [14] Taleai, M., Mansourian, A.,& Sharifi, A. (2009). Surveying general prospects and challenges of GIS implementation in developing countries: A SWOT–AHP approach, Journal of Geographical Systems, 11 (3), 291-310.
- [15] Wickramasinghe, V.,& Takano, S.E. (2010). Application of combined SWOT and Analytic Hierarchy Process (AHP) for tourism revival strategic marketing planning, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 8, 954-969.



- [16] Zavadskas, E.K., Turskis, Z.,& Tamosaitiene, J. (2011). Selection of construction enterprises management strategy based on the SWOT and multi-criteria analysis, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), 1063-1082.
- [17] Azimi, R., Yazdani-Chamzini, A., Fouladgar, M.M., Zavadskas, E.K.,& Basiri, M.H. (2011). Ranking the strategies of mining sector through anp and topsis in a swot framework, *Journal of Business Economics and Management*, 12(4), 689-670.
- [18] Gao, C.Y.,& Peng, D.H. (2011). Consolidating SWOT analysis with nonhomogeneous uncertain preference information, *Knowledge-Based Systems*, 24(6), 808-796.
- [19] Kajanus, M., Leskinen, P., Kurttila, M.,& Kangas, J. (2012). Making use of MCDS methods in SWOT analysis - Lessons learnt in strategic natural resources management, *Forest Policy and Economics*, 20, 1-9.
- [20] Stainback, G.A., Masozera, M., Mukuralinda, A.,& Dwivedi, P. (2012). Smallholder agroforestry in Rwanda: A SWOT-AHP analysis, *Small-Scale Forestry*, 11(3), 285-300.
- [21] Şeker, Ş.,& Özgürler, M. (2012). Analysis of the Turkish consumer electronics firm using SWOT-AHP method, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 58, 1544-1554.
- [22] Görener, A., Toker, K.,& Ulucay, K. (2012). Application of combined SWOT and AHP: A case study for a manufacturing firm, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 58, 1525-1534.
- [23] Eslamipoor, R.,& Sepehriar, A. (2014). Firm relocation as a potential solution for environment improvement using a SWOT-AHP hybrid method, *Process Safety and Environmental Protection*, 92(3), 276-269.
- [24] Abdel-Basset, M., Mohamed, M.,& Smarandache, F. (2018). An extension of neutrosophic AHP–SWOT analysis for strategic planning and decision-making, *Symmetry*, 10(4), 116-133.
- [25] Ghazinoory, S., Esmail Zadeh, A.,& Memariani, A. (2007). Fuzzy SWOT analysis, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 18(1), 99-108.
- [26] Kheirkhah, A.S., Esmailzadeh, A.,& Ghazinoory, S. (2009). Developing strategies to reduce the risk of hazardous materials transportation in Iran using the method of fuzzy SWOT analysis, *Transport*, 24(4), 325-332.
- [27] Hosseini-Nasab, H., Hosseini-Nasab, A.,& Milani, A.S. (2011). Coping with imprecision in strategic planning: A case study using fuzzy SWOT analysis, *IBusiness*, 3, 23-29.
- [28] Sevkli, M., Oztekin, A., Uysal, O., Torlak, G., Turkyilmaz, A.,& Delen, D. (2012). Development of a fuzzy ANP based SWOT analysis for the airline industry in Turkey, *Expert systems with Applications*, 39(1), 14-24.
- [29] Yapici Pehlivan, N., Şahin, A., Zavadskas, E.,& Turskis, Z. (2018). A comparative study of integrated FMCDM methods for evaluation of organizational strategy development, *Journal of Business Economics and Management*, 19(2), 360-381.
- [30] Kumar, A., Sah, B., Singh, A.R., Deng, Y., He, X., Kumar, P.,& Bansal, R.C. (2017). A review of multi-criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609.

- [31] Terrados, J., Almonacid, G.,& Hontoria, L. (2007). Regional energy planning through SWOT analysis and strategic planning tools: Impact on renewables development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1275-1287.
- [32] Catron, J., Stainback, G.A., Dwivedi, P.,& Lhotka, J.M. (2013). Bioenergy development in Kentucky: A SWOT-ANP analysis, *Forest Policy and Economics*, 28, 38-43.
- [33] Kabak, M.,& Dağdeviren, M. (2014). Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology, *Energy Conversion and Management*, 79, 25-33.
- [34] Adar, E., Karatop, B., İnce, M.,& Bilgili, M.S. (2016). Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 429-440.
- [35] Kabak, M., Dağdeviren, M.,& Burmaoğlu, S. (2016). A hybrid SWOT-FANP model for energy policy making in Turkey, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 11(6), 487-495.
- [36] Sindhu, S., Nehra, V.,& Luthra, S. (2017). Solar energy deployment for sustainable future of India: Hybrid SWOC-AHP analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1138-1151.
- [37] Ervural, B.C., Zaim, S., Demirel, O.F., Aydin, Z.,& Delen, D. (2018). An ANP and fuzzy TOPSIS-based SWOT analysis for Turkey's energy planning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1538-1550.
- [38] Khan, M.I. (2018). Evaluating the strategies of compressed natural gas industry using an integrated SWOT and MCDM approach, *Journal of Cleaner Production*, 172, 1035-1052.
- [39] Solangi, Y.A., Tan, Q., Mirjat, N.H.,& Ali, S. (2019). Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach, *Journal of Cleaner Production*, 236, 117655.
- [40] Alizadeh, R., Soltanisehat, L., Lund, P.D.,& Zamanisabzi, H. (2020). Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method, *Energy Policy*, 137, 111174.
- [41] Kuo-liang, L.,& Shu-chen, L. (2008). A fuzzy quantified SWOT procedure for environmental evaluation of an international distribution center, *Information Sciences*, 178(2), 531-549.
- [42] Kahraman, C., Cebeci, U.,& Ulukan, Z. (2003). Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP, *Logistics Information Management*, 16(6), 382-394.
- [43] Toksarı, M.,& Toksarı, M.D. (2011). Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yaklaşımı kullanılarak hedef pazarın belirlenmesi, *ODTÜ Gelişme Dergisi*, 38(1), 51-70.
- [44] Chang, D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655.
- [45] Learned, E.P., Christensen, C.R., Andrews, K.E.,& Guth, W.D. (1965). *Business policy: Text and cases*. Irwin: Homewood.
- [46] David, F.R. (2007). *Strategic management concepts and cases*. New York: Prentice Hall,.
- [47] Hill T.,& Westbrook, R. (1997). SWOT analysis: It's time for a product recall, *Long Range Planning*, 30(1), 46-52.

[48] Karatop, B., Kubat, C.,& Uygun, Ö. (2018). Determining the strategies on Turkish automotive sector using fuzzy AHP based on the SWOT analysis, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (5), 1314-1325.



## An Overview on Reliability Analysis and Evaluation Methods Applied to Smart Grids

Melih BİLGİN<sup>1</sup> Necmi ALTIN<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Smart Grids, 06560, Ankara/Turkey

<sup>2</sup> Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, 06560, Ankara/Turkey

### Article Info

Research article

Received: 11.08.2021

Revision: 09.11.2021

Accepted: 09.11.2021

### Keywords

Smart Grids

Reliability Analysis

Evaluation Methods

### Abstract

The reliability can be defined as to carry out predefined requirements in a predefined duration. The importance of reliability analysis increases day by day as the customers become more conscious about a product or service which they buy. The application area of reliability analysis is very wide. Any product or system or service including smart grids can be subject of the reliability analysis. As power system technology and computer science improving, the concept of smart grids begins to take part in our lives. Therefore, it is very essential to make reliability analysis for smart grids. In this paper, reliability analysis methods applied to smart grids are focused on and the classifications in reliability analysis have been explained. Besides, distribution networks reliability concept and different methods such as simulation and analytical approaches to assess the reliability have been introduced. The applications of these methods on smart grids are well explained. In addition to these, smart grids and conventional grid is compared. Different approaches such as tree analysis, failure mode effect analysis, Markov process and Monte Carlo simulation methods are carried out with wind turbines. The strengths and weaknesses of each method were evaluated.

## 1. INTRODUCTION

In engineering, design of a product targets to satisfy minimum level of service and safety throughout its lifetime. Since design process includes many uncertainties, it is a difficult task. These uncertainties may lead to under or over design solutions. Reliability is the ability to meet specific requirements under a specified period [1]. It is an extensive term that concentrate on the capability of a product to conduct its intended function. Reliability could be described as the possibility that an item will maintain to conduct its intended function without failure for a predetermined period of time under described conditions. The product can be any item such as electronics card or a mechanic device, a mobile application, a manufacturing operation etc.

The methods that used in reliability assessment create theoretical framework in order to evaluate uncertainties in a very detailed decision plan. The main goal of reliability analysis methods is to evaluate the capability of overall design or the design's any part to preserve its safety and to continue to operate in its lifetime [2].

The reasons that show the importance of reliability assessment on a product can be listed as follows [3]:

- Reputation: Prestige of a company is directly proportional to reliability of its product.
- Customer Satisfaction: Customers are not satisfied fully if they buy reliable product. On the other hand, they are absolutely disappointed if the product which they buy is unreliable. Thus, reliability plays major role in customer pleasure.
- Warranty Costs: If a device is broken while under warranty, the manufacturer has to spend money for its repair or replacement. Also, device and company may acquire bad reputation. Therefore, it is worth to note that investing on reliability analysis can save companies from unexpected cost and prevent from losing their prestige.
- Repeat Business: Spending more time and effort to improve reliability of product proves that the company trust their product, care client satisfaction and ensures future business potential.
- Cost Study: Companies could obtain reliability data and merge this with other cost items to indicate how their product has advantageous in terms of cost. Initially, the cost of the product or device would be increased due to additional cost of reliability analysis. However, it saves more than spent on, because of less repair and maintenance cost.
- Customer Requirements: Nowadays, huge amount of clients claim that manufacturers should put efficient reliability program into action because same clients had a chance to use reliability analyzed product.
- Competitive Advantage: Tremendous amount of manufacturers will announce its estimated reliability data to get acquire an advantage over its rivals who either may not announce their data or have lower data.

Nowadays, reliability analysis in smart grids is among the very popular studies [4] - [7]. Smart grids is a type of grid that is created by combining the traditional grid with communication technology which enables two-way communication between producers and consumers [8]. Transforming traditional grid into smart grid is a crucial and important step since smart grid contains modern technologies within itself. These technologies vary in wide range and they can solve a lot of problems that could not be solved in conventional grid and they can improve the performance of the subsystems of conventional grid. For example, situation awareness and the quality of the service and resiliency in case of malicious attacks can be improved with smart grids [9].

Reliability analysis is evaluated as one of the most essential attributes in smart grids [10]. Smart grid promises a well aware grid that connects every role player thanks to the implementation of modern technology into the grid. In addition to this, smart grids may have more renewable energy resources that strongly depend on weather conditions with respect to conventional grid and this leads to fluctuations on electricity generation that is unwanted by transmission system operator. These type of improvements make smart grids more valuable but also vulnerable at the same time. In order to prevent this, reliability analysis methods must be employed more frequently.

Thus, in this paper, the reliability analysis and reliability evaluation methods applied to smart grids is explained. Both simulation and analytical approaches to assess the reliability have been introduced and their applications on smart grids are discussed.

This paper is organized as follows. In Section 2, system classifications in reliability analysis is discussed in details. Section 3 explains reliability analysis approaches. Lastly, reliability evaluation methods applied to smart grids are given in Section 4.

## **2. SYSTEM CLASSIFICATIONS IN RELIABILITY ANALYSIS**

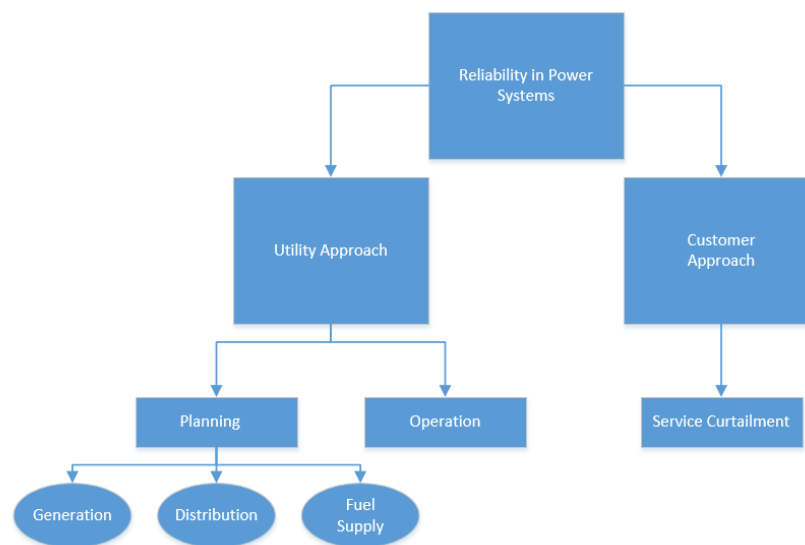
Classifying principal fields in reliability analysis is quite difficult since reliability analysis involves many different topics. Thus, to gather these topics under a single roof is burdensome. A topic of a discipline

may be seen as quite meaningless by another discipline. Therefore, a random discipline is selected to show system classification.

The concept of reliability analysis can be organized by three distinctive aspects in power systems. These are adequacy, security and quality.

- The adequacy may be defined as the capability of the power systems to supply the aggregate power and energy requirement of all clients in the grid and by doing this, transmission system operator has to consider possible outage of grid equipment such as transformer, transmission line or whole power system [11].
- The security can be defined as the capability of the power systems to cope unforeseen disturbances such as outage of electricity grid equipment or lightning that leads to short circuits on transmission lines [11].
- The quality can be defined as the measurement of grid frequency and grid voltage [12]. It is expected that the frequency should be 50 Hz and the line-to-neutral voltage at distribution level should be 230 V in Turkey.

Reliability in power systems could be split into two perspectives namely utility perspective and customer perspective. Figure 1 depicts that the classification of the reliability for power systems [13].



**Figure 1.** Perspective of on the reliability

Different perspectives can be defined by different interpretations. From customer side, the power system reliability is interested on customer end-use patterns. Indeed, what things are important for customers is related with the quality of the voltage and the grid frequency. In addition to these, another criterion for customers is duration and recurrence of electricity interruptions during a period. Thus, any interruption in electricity grid is abominable for them even if the duration of the interruption is quite short. On the other hand, utility perspective is differing from the customer perspective as specified previously. For utility perspective, the reliability is linked to both distribution side which overlaps with customer side and production side consisting of generation, transmission and distribution parts [14].

Utility perspective could be divided into two topics as the planning and operation. Additionally, the topic of planning can be sectionalized into three subtopics. These are generation, distribution and fuel supply. Generation is associated with the production of electricity and reserve margin. Reserve margin is

described as the percentage by which the installed capacity of a country's electricity power plants outpaces the peak load. Spare capacity is essential to provide that the supply of electricity is well enough to meet demand from customer side for any condition regardless of how weather is or unforeseen an outage of 400/154 kV transformer [15]. The quality of electricity distribution is related with lastingness of electricity supply. Supply continuousness is evaluated by the frequency and duration of the outages. Supply continuousness could be counted as reliability of delivery. Multiple factors can be used to assess the continuity of supply for transmission and distribution parts of the electricity grid. The last topic of planning section is the adequacy of energy supply capability. A system could be utilized to have not enough resource that will be used in electricity generation or energy supply ability as following situations exist and the forecasted energy shortage upon the demanded energy will equal or exceed 10 percent of the customer side then normal daily net energy for load, or will cause demand side to be unable to meet its energy requirements based upon use of all of the otherwise available resources and such energy deficiency will want the demand side to drop loads to end use clients [16]. Electricity grid operation from point of utility view includes quite different topics. The studies of these topics is quite time consuming because they are very technical problems and therefore reliability analyses of these are challenging. These topics are stability, security, equipment reliability, spinning and hot start reserves, zone control, harmonics, and load shedding in case of low frequency, automatic load and generation rejection.

On the other hand, customer perspective includes service curtailment. The service curtailment can also be split into many subcategories such as frequency, duration timing (day, week, month etc.), magnitude (partial or total), advance notice, persistence and coverage.

### **3.RELIABILITY ANALYSIS APPROACHES**

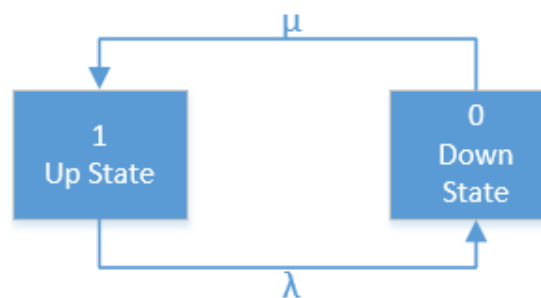
Reliability assessment methods could be split into two main categories. These are the simulation methods and the analytical methods. Analytical approaches found on mathematical models which are used to evaluate reliability of the system factors by employing direct mathematical solutions. The primary analytical approaches are the analysis of fault tree, failure mode effect and critically analysis and the Markov model methods. On the other hand, the simulation methods could be split into the subset and the line sampling approaches. Analytical approaches are applicable for simple systems, nonetheless, it is hard to evaluate the reliability of complicated systems. A mathematical model of the system reliability is created and reliability index is determined of the load point and the overall grid in analytical approach. In addition, simulation approaches approximate the complete system-reliability factors by imitating real progress of the system and arbitrary behavior. The most commonly employed simulation approach is the Monte Carlo approach [17].

#### **3.1. Monte Carlo simulation approach**

The Monte Carlo simulation method could be employed in order to predict the factors by simulating the actual progress and arbitrary behavior of the grid [18]. This approach could be split into two methods. These methods are the sequential simulation and the random sampling approaches. The sequential simulation could be conducted by forming a serial of events by employing arbitrary values, and its probability distribution variables define the time for every component state. The sequential simulation approach could be split into two subclasses, too. These subclasses are the fixed interval technique and the next event technique. For both methods time is advanced. The difference between them comes from the way they handle advancing the time. In the fixed interval technique, time is advanced according to fixed steps. On the other hand, time is advanced according to occurrence of the next event in the next event technique. Principally, the random sampling approach is faster than the sequential approach and is suitable as the component failure states and repair states are autonomous [19]. Arbitrarily produced failure examples and recovery times that strongly depend on the probability distribution of the supplied statistical data are used to determine numerical outputs for reliability factors. By replicating the progress with new arbitrary numbers that are taken from input probability distributions, new probable numbers for reliability factors

are determined. Once huge amount of iterations are made, the anticipated reliability of the system is determined, where the numbers determined for every reliability factor could be characterized via probability distribution for this factor [20].

The Monte Carlo simulation methods have also been divided into different groups by considering approaches that are employed for the sampling. Three widely used sampling approaches used in the Monte Carlo simulation can be listed as the state sampling approach, the system state transition sampling approach and the state duration sampling approach. The state sampling approach is in non-sequential form. In this approach, the status of each component is decided by considering an evenly distributed arbitrary variable that varies zero and one. In case of the arbitrary variable is bigger than the failure probability, the component is counted as up state, else it is in down state. The complete system state at every node in time is the merging of all component states. One of the major disadvantages of this approach is the approach does not take the time to repair of the system components into consideration. In the state transition sampling method, the changeover possibility from one of the state to other state is evaluated for sampling. The first step of this method is to assume that all components are in upstate in the beginning, the second step is calculation of system state duration of each component, and the third step is system state transition [21]. Lastly, the state duration sampling depends on the duration of up and down states. This approach can be evaluated as applicable to decide the duration of components states in a historical way [22]. In this method, there are two states that are success state denoting as “1” and failure state denoting as “0”. Figure 2 depicts two-state reliability model. Here,  $\lambda$  and  $\mu$  represent failure rate and repair time, respectively. The state duration distribution function of the state duration sampling approach is generally assumed as exponential [23].



*Figure 2. Two-State reliability model*

### 3.2. The fault tree analysis method

The fault tree analysis method is commonly employed in risk and reliability analyses. The fault tree analysis investigates possible root causes that lead to the failure. In other words, the fault tree analysis describes actions that may lead to an unwanted failure in a grid. It reflects the connection between component failure and product [24]. Thus, by acquiring the possibilities of the causing actions, one could finish up evaluating the comprehensive possibility of the fundamental failure action [25].

Fault trees are constructed by employing gates and events. Frequently, fault trees are consisted of “AND” and “OR” gates, associating the events towards the origin of the failure. In case of a group of actions plays role in the top failure to occur, these actions are tied by employing an “OR” gate. In case of all actions would have to become true so that the main failure occurs, these all actions are tied by an “AND” gate. The reasons that leads to these actions are evaluated separately. Nonetheless, the enlargement of the tree is tied on how much exhaustive data are accessible from the past of this component [26]. The fault tree analysis method is not preferred as more precise reliability assessment is desired [27].

### 3.3. The fault tree analysis method

Failure mode and effect analysis (FMEA) could be evaluated as a progress of ranking vital parts of a device or product. By applying FMEA, one can acquire information about how a component could be failed and the repair duration of this component [28]- [29]. FMEA shows that which component or components



are affected negatively if a component is removed deliberately. For example, all components are removed one by one of a power electronics board and other component's situations are observed. After that, a list that shows which components are critical is made. This progress has been used in very wide range of area such from power electronics boards to air planes [30].

After deciding failure stages the fundamental computation procedure includes 3 steps:

- The possibilities of the failure stages occurrences have to be decided. They could be acquired from the past data for the broken parts. After that those possibilities are classified and appointed an extended value with the minimum value for the least possible division.
- The rate of harshness of every failure stage is appointed and extended to the device thanks to the outcomes of the failure and destruction level.
- Another extended value is appointed to the fault detection probability with the minimum value to the most expected disclosure of the failure.

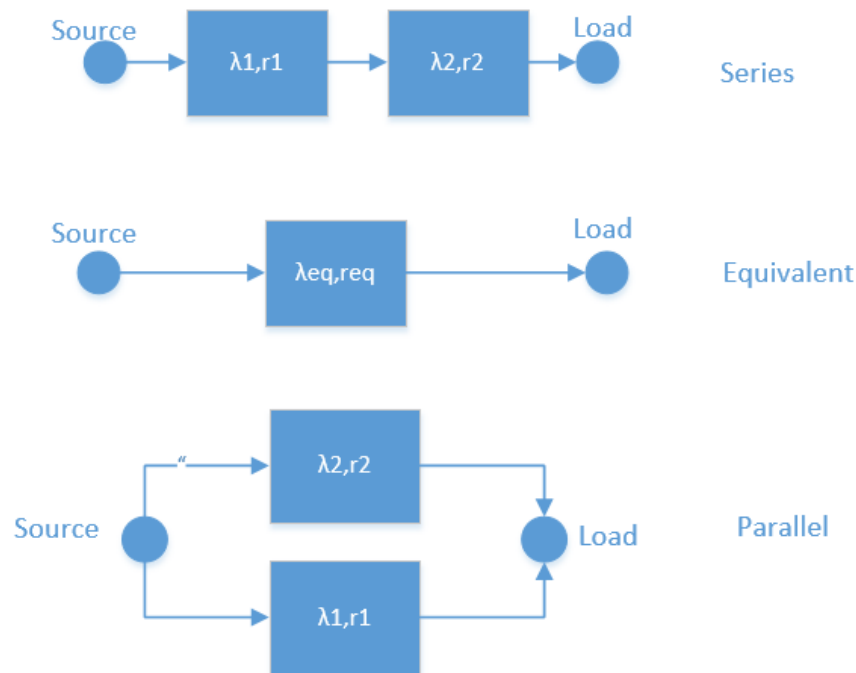
### 3.4. Markov process method

A Markov process is a stochastic progress. The prospect behavior is just dependent on the current situation and it does not depend on historical data. A Markov modelling is commonly described by a cluster of discrete stages. At each stage, some probable events exist and these characterize the shifting between the present and the next stage of the progress. On the other hand, it is considered that time interval that represents each stage is exponentially distributed. In addition to this, shifting between the states are described by employing a transition rate matrix for a continuous time Markov modelling [31]. Because the grid topology is changed dynamically, it is essential to form the matrix repeatedly. Therefore, the Markov Process is fit for the grid with simple topology [13].

Markov process method could be employed in order to assess power system reliability. For component stage, a state space depiction consists of 2 stages as up and down. Up means that it is working, on the other hand down means it is not working. This simple model is defined as binary-state model, and can be broaden to comprise certain state addictiveness. Extensive models of power systems are qualified to evaluate degradation states, analysis, and distinct kinds of overhaul and fixes for a more correct depiction of the components in a real system [32].

Markov processes could be employed as Markov Decision processes (MDP) to appoint optimum determinations at distinctive stages. Markov Decision processes could be employed to model an ambiguous dynamic system where a serial of determinations have to be done over time with ambiguous results. There is an accolade related to each stage and operation done for this stage. Every operation done can either become an accolade or resulted in a cost. Therefore, in MDP, the aim is to get an optimal serial of actions. Thus, the expected accolade becomes maximum for a specified time period.

In addition to fault tree analysis, FMEA and Markov process methods, many different analytical methods employed in reliability assessment i.e. Minimum Cut-set method, Network Reduction method. Those methods consist of cutting down the number of pieces, by gathering series or parallel components in a body. The essential analytical equations consist cutting down of two pieces in series or cutting down of two pieces in parallel into single equivalent pieces as depicted in Figure 3 where  $\lambda$  and  $\mu$  represent the failure rate and repair time respectively [33].



**Figure 3.** The equivalent system

For series,

$$\lambda_{eq} = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (1)$$

$$r_{eq} = \frac{\lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2 + \lambda_1 \lambda_2 r_1 r_2}{\lambda_{eq}} \quad (2)$$

For parallel,

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{1 + \lambda_1 r_1 + \lambda_2 r_2} \quad (3)$$

$$r_{eq} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (4)$$

The main disadvantage of an analytical method for reliability assessment is factors are mean values, and the failure and repair times are confined to be exponentially distributed.

#### 4.RELIABILITY EVOLUTION METHODS APPLIED TO SMART GRIDS

Smart Grids includes wide range of features such as monitoring electricity transmission and distributions, accomplishing customer electricity management, assuring electricity transmission and distribution reliabilities and comprising two legs of at electricity distribution level. This legs are metering and engineering. One of vital topics for the electricity utilities in all around the world is the development of electricity submission reliability and presentness. The recent top performance calculation and communications technologies have had delivered new occasions for smart grids and been progressing rapid electromagnetic transient assessment permit on-line reaction to the electricity grid faults and the avoidance of interruptions [34]. The vision of the smart grids is the agenda for the advancement of the adequate, reliable and protected electricity transmission grid [35].

To develop electricity grid reliability, it is essential to establish more reliable system equipment, develop system topologies, employ remote controlled grid stations, coordinate the protection in case of

facing over voltage and establish the equipment for rapid and reliable fault location and after fault period optimization. The number of faults is decreased considerably thanks to those precautions, and in the event of fault, they permit to decrease the time to detect the fault location, diminish the interruption costs for the clients and optimize the rebuilding of the electricity system activity.

With Smart Grids, recent technologies start to play role in electricity grid such as two-way communication. Two-way communication provides a connection between generation side and consumption side. This system could manage the client's electrical devices such as white goods to save energy, decrease electricity expense, develop quality of power. Also, this is valid for the transmission and distributions sides of the grid. By connecting distributed energy resource to smart grids the obstacles between electricity producers and consumers are eliminated thanks to flexibility and reliability [34]. Conventional electricity grid and smart grid is compared in Table 1 [36].

The main studies associated with reliability of smart grids concentrate on methods providing the reliability of the grid rather than estimating the prospect failures [37]. It makes sense when the overall topics of the reliability engineering and their precedence are evaluated. Additionally, smart grids could be accepted as a new technology if we compare it with conventional grid, and from the industrial perspective, it is logical to concentrate on improvement of methods developing the resilience and security of the smart grid.

Nonetheless, number of researchers have studies and suggested approaches for reliability assessment of smart grid. The authors of [38] suggested a method for reliability assessment of the protective systems in smart grid design. Continuous Time Markov process is employed for capturing the grid architecture and behavior specification. After that, probabilistic model checker is used to decide the possibility of these stages of the network which are evaluated as not reliable.

**Table 1.** Comparison of conventional grid and smart grid

<i>Conventional Grid</i>	<i>Smart Grid</i>
<i>Electromechanical structure</i>	<i>Digital structure</i>
<i>Directional communication</i>	<i>Bidirectional communication</i>
<i>Centralized generation</i>	<i>Distributed generation</i>
<i>Poor number of sensors</i>	<i>Sensors all around</i>
<i>Monitoring manually</i>	<i>Self-monitoring</i>
<i>Manual restoration</i>	<i>Self-healing</i>
<i>Failures and blackouts</i>	<i>Adaptive and island mode</i>
<i>Confined control</i>	<i>Common control</i>
<i>Confined options for clients</i>	<i>A lot of options for clients</i>

A reliability assessment of the smart grid wireless communications system within advanced metering infrastructure (AMI) is proposed in [39]. The system has a hierarchic architecture involves home-area network (HAN), neighborhood-area network (NAN), and wide-area network (WAN). A service area is split into numerous subareas. In any sub-area, there are numerous homes where white goods are used in it. A smart meter is established in every home to predict and plan the power-expenditure of devices. The reliability is described by the availability by employing the average time between failures and average time between fixes. It explicit the possibility that the smart meter could transmit power demand to the demand management system.

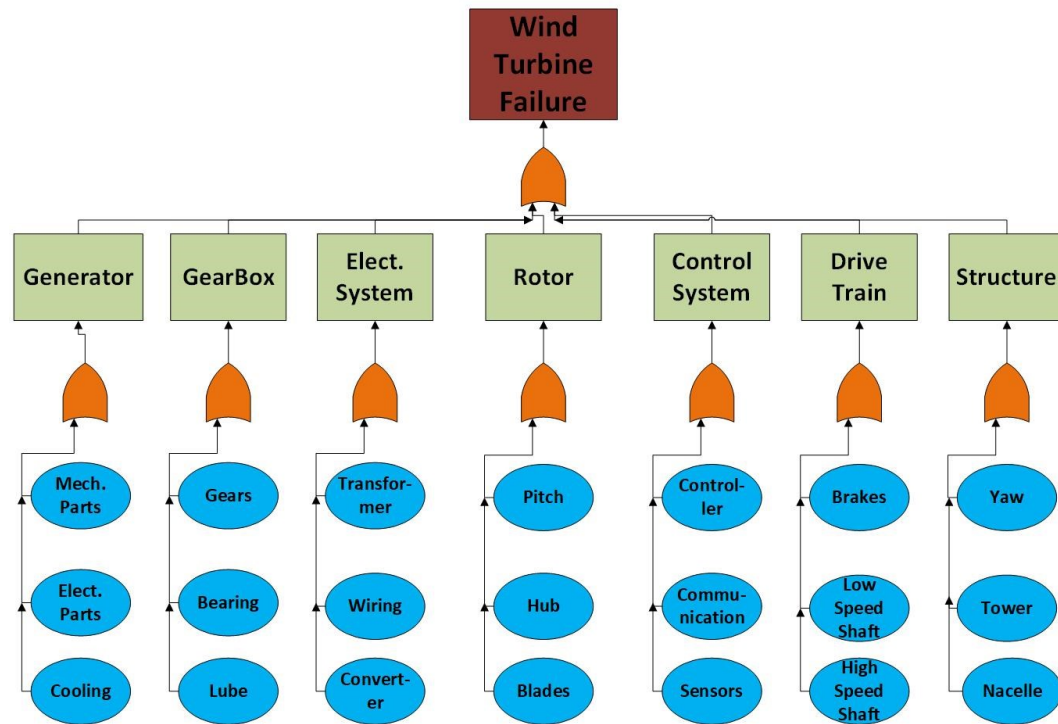
In [40], the reliability is described by the possibility of availability. Combination of the Markov chain and reliability block diagrams are employed to model the network. First one is employed in order to capture the dynamic behavior of the network and the second one captures the architecture of the network. Theoretically, their approach permits analysis of the all smart grid physical infrastructure. It is concentrated on AMI analysis. The advantage of this method is that it is less dependent on to model which has complicated interdependencies between its components.

Stochastic Petri Nets (SPN) is employed in order to assess availability and reliability of a control system networks in the smart grid in [41]. In the control center, SCADA devices and some other servers are connected with local area networks (LANs), which are preserved by the firewalls. In case of any device in this room is failed or affected by cyber-attacks, they could be fixed immediately through user interface. Furthermore, substitute servers could be employed in order to develop the reliability. Also, all control center all around the region or country are connected with secured WANs. Field employees could log into the other facilities' networks apart from control centers to repair broken devices.

Reliability and resiliency analysis method with one Static Synchronous Series Compensator is suggested and tested on a simple IEEE 9-bus test system in [42]. The model employs Markov Imbeddable Structure (MIS) model which fits for assessment of systems with the interdependent equipment. The MIS model needs description of "Functional" and "Failed" stages of the network, and calculates the network reliability as the possibility of being in one of the "Functional" stages.

A method of smart grid reliability assessment which employs the fault injection into the physical and control layer of the smart grid is suggested in [43]. A grid which includes flexible AC transmission systems (FACTS) equipment which controls the flow of the power on power lines is assessed in [43]. The authors of this paper analyze a case that a fault injected to a flow algorithm at the flexible AC transmission systems equipment spreads all over the system and leads to grid deficiency.

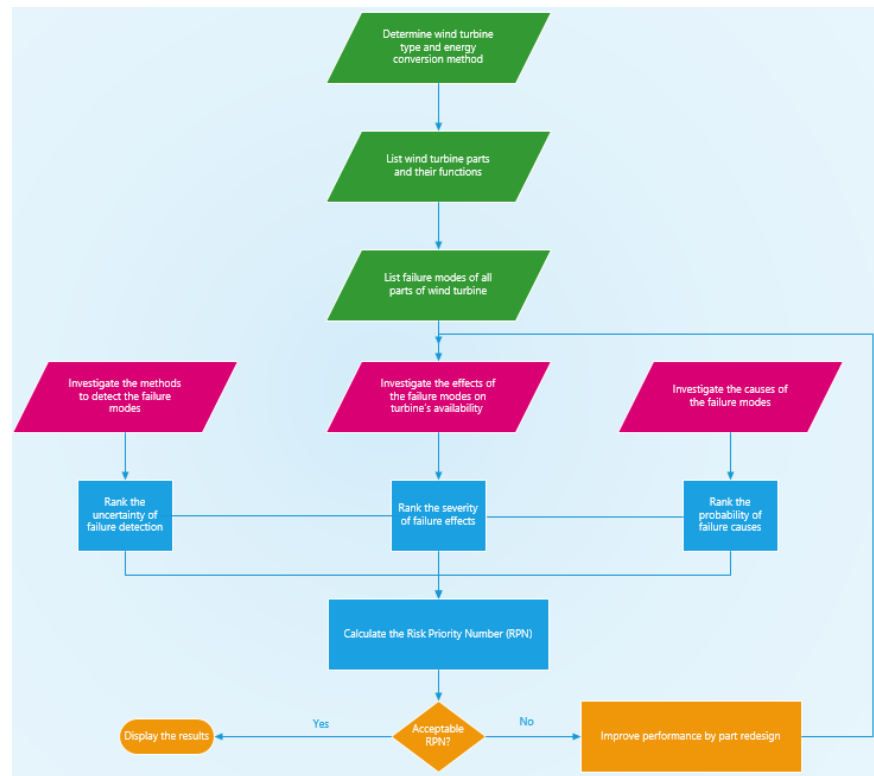
In [44], the reliability of smart grid is examined under different weather conditions at different locations. In this study, it is explained how varying weather conditions affects the reliability modelling and analysis in smart grids negatively. To overcome these negative effects a new approach which is called as Boolean logic driven Markov process is developed. According to this method, the reliability of subsystems such as distributed generation, system with energy storage device and solar PV plant and wind generator is assessed individually. The subsystems can be evaluated without the effect of weather, without smart grids components, with smart grid components, under normal weather influence, with the smart grid components and under stormy weather. For reliability, factors evaluated are availability and unavailability of the power supply to the specific customer – industrial, commercial, or residential. The consequences depict the development of the reliability factors with the smart grid technologies and the effect of the weather. The weather, as anticipated, affects smart grid's reliability negatively.



**Figure 4.** Standard wind turbine's fault tree

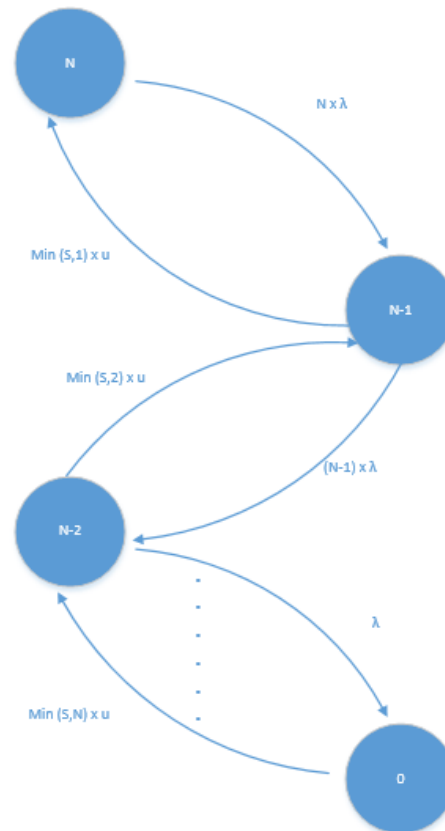
The reliability assessment analysis is made for wind turbines by employing different reliability approaches i.e. fault tree analysis, failure mode effect analysis, Markov process and Monte Carlo simulation in [45]. In this study, it is claimed that the reliability of a wind turbine could be decided by using past failure data of its parts employing Fault Tree analysis. Figure 4 depicts suggested fault tree for the wind turbine which includes reasons of main failure. The failures are so crucial that the failure of each part could prevent operation of the wind turbine. For this reason, these components are tied by “or” gates in the schema. Each of the failure leads to farther delve into to get the failure stages related to each failure. Nonetheless, the tree enlargement depends on the number of accessible past data regarding wind turbines. Wind turbines' failure data prerequisite for creating reliability model. These failure data then could be classified according to wind turbine types, so it could be get more accurate reliability model and have a chance to compare them. Another classification could be split failure data into months for the reliability analysis evaluation.

Figure 5 depicts the conventional FMEA study process of a wind turbine [46]. Nonetheless, employing FMEA on wind turbines could bring some defects. First of these defects is that particular rating scales for wind turbines have to be defined, otherwise other rating scales that belong to non-wind turbine devices have to be employed. Second defect is that huge amount of different wind turbine types and structures in the market. This makes appointing the same rating values for all of them impossible. For instance, let us assume a direct drive wind turbine's synchronous generator and a fixed speed wind turbine's induction generator are failed. The cost of repair of synchronous generator is usually more expansive than induction generator's. Also, the damage of synchronous generator is harsher. Another topic of the method is that the assessment risk priority number (RPN) could not segregate between a highly serious but low possible failure stage and a less serious with higher accruing possibility. To solve these problems, [45] suggested a modified progress for failure mode effect analysis which the prioritization of the failure stages is based on values representing the cost outcomes.



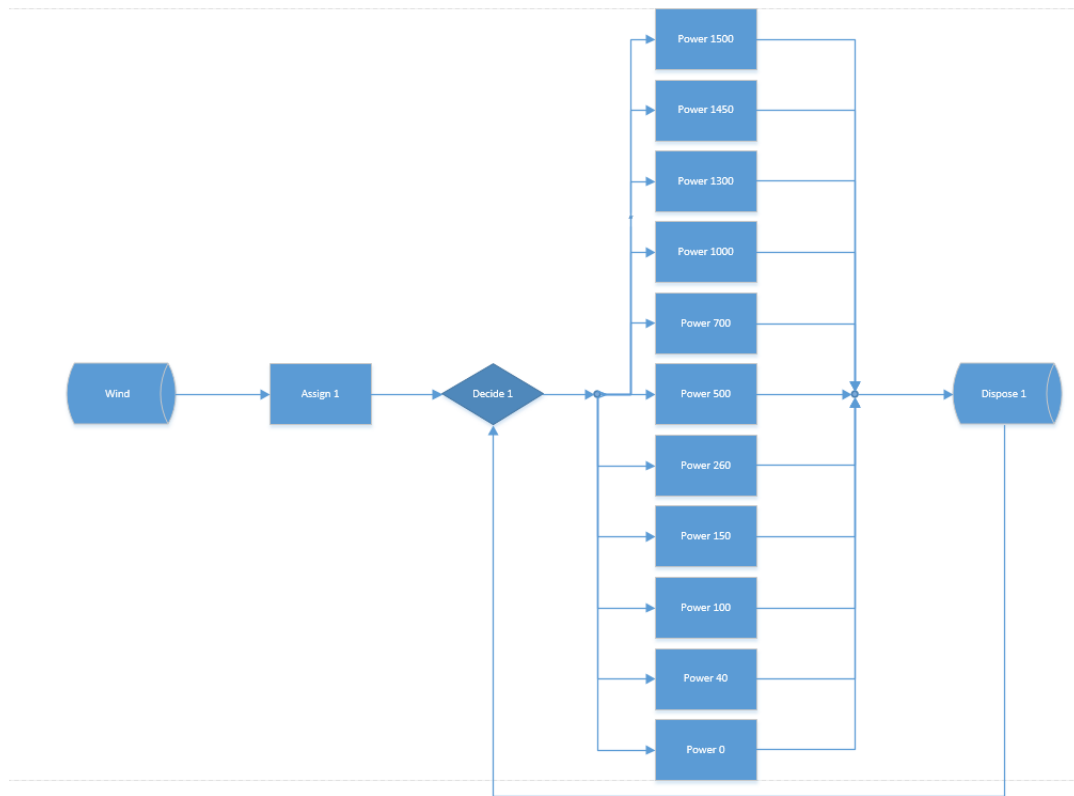
**Figure 5.** FMEA process for a typical wind turbine

Markov Process could be employed in wind turbine reliability in order to model the time domain operation of a set of wind turbines by paying regard to failure and fixing that wind turbines, fluctuating in wind velocity, and the load profile [45]. Calculating the reliability of a wind farm over time is useful for predicting long-term electricity generation in addition to short-term operations. It has to be done especially in the unregulated electricity market where wind farms exploit the cost advantage. 2-state Markov process is employed to present devices such as wind turbine in order to assess wind plants' reliability. These states are 'working' and "failure". If this model is employed in wind plant and if the number of wind turbines in this plant is  $k$ , then total states will be  $2k$ . As you guess a typical wind plant consists of multiple wind turbines, therefore the number of states are increased significantly. In this paper, a Markovian model is employed in order to work on availability and reliability of wind plant due to the fluctuations in wind velocity and load alteration for any time interval. This model is evolved by assuming that all turbines in a wind plant are same model. Wind plant modelling is made by employing Markov Chain with  $(k+1)$  number of states. These states symbolized the number of operating wind plants at any time. Kendall-Lee notation of this birth and death process is  $M/M/S/GD/N/N$ .  $M/M$  are used to indicate failure and repair. "S" is used to indicate the number of parallel repair crew. "GD" is used to indicate failed turbines waiting times are based on general queue discipline. The first of "N"s indicates that if wind turbines are failed, fixing progress has adequate capacity. Lastly, the second of "N"s indicates the number of similar wind turbines established in the wind plant. Figure 6 depicts the schema of this modeling. Here,  $\lambda$  represents failure and  $\mu$  represents are fixing rates. In order to clarify the fixing rates, by assuming that  $k$  number of failed wind turbines was fixed together. Thus, the fixing rate is  $k \times \mu$ .



**Figure 6.** Rate diagram for wind plant Markov model

In [45], it is discussed that, as well as analytical methods, Monte Carlo simulation method could be employed in wind turbine reliability analysis. Figure 7 depicts the diagram of a single wind turbine model which is employed to predict output power by considering wind velocity probability distribution. The advantage of the method is independency from the wind velocity or wind turbine type. No matter how wind velocity is and what type of wind turbine is, the system could be modelled via computer program by employing block diagrams. Actually, for any time period, a wind velocity is produced by changing the position of the block in the diagram. The decision block conducts according to the definitive power curve of the wind plant to decide the amount of power that will be produced by depending on wind velocity. The simulation is conducted for several iterations and the mean anticipated power produced by the plant is computed as well as its confidence span. The anticipated mean wind energy is computed by multiplying the anticipated produced power by the number of wind turbines.



*Figure 7. Wind turbine model for output power estimation*

#### 4.CONCLUSIONS

In this study, reliability analysis, system classifications in reliability analysis and evaluation methods applied to the smart grids are introduced. Since system classification in reliability analysis for each discipline can be very different from each other, the classification is made by considering the power system. The basic concept of distribution grids reliability and different simulation and analytical methods to assess the reliability have been explained. Analytical approaches often determine the system topology and input values, and then create a mathematical model of a system to evaluate the reliability. Simulation approaches such as Monte Carlo can determine the indices by simulating the probabilistic and arbitrary behavior of the systems. Therefore, the problem is treated as a series of experiments instead of considering the analytical models of the systems. The main weakness of simulation methods is that to obtain an acceptable level of the accuracy of the performance indices a huge amount of experiments need to run. Due to the long computational time, simulation approaches are not as popular as analytical approaches. Managing the smart grids are less difficult since the reliability of smart grids are higher and also they are more transparent with respect to conventional grid. The smart grid permits combining different electricity generation plants and guarantee reliable electric power supply for clients. Several reliability analysis methods are given for wide range of smart grid applications such as protective systems in smart grid infrastructure, smart grid wireless communications system to support demand side management within advanced metering infrastructure and control system networks in the smart grid. Also, a new method called Boolean logic driven Markov process is introduced. This method can be used for the situations like varying conditions in order to assess reliability analysis in smart grids. Four different approaches namely fault tree analysis, failure mode effect analysis, Markov process and Monte Carlo simulation methods are exemplified on wind turbines to improve the understanding of readers.



**REFERENCES**

- [1] A. Avizienis, J. Laprie, B. Randell and C. Landwehr, "Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 1, pp. 11-33, 2004.
- [2] E. Arteaga and A. Soubra, "Reliability Analysis Methods," University of Nantes-GeM Laboratory, Nantes, 2014.
- [3] "Weibull," [Online]. Available: <https://www.weibull.com/basics/reliability.htm>. [Accessed 5 7 2020].
- [4] J. Huan, Y. Xiao, X. Zhang, H. Liu, X. He and W. Lu, "Integrated Reliability Analysis of Power Distribution Network and Urban Road Network," in *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shanghai, 2021.
- [5] S. Hajeforosh, Z. Nazir and M. Bollen, "Reliability Aspects of Battery Energy Storage in the Power Grid," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, Hague, 2020.
- [6] S. S. Reka and T. Dragicevic, "Future effectual role of energy delivery: A comprehensive review of internet of things and smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 90-108, 2018.
- [7] K. Moslehi and R. Kumar, "A Reliability Perspective of the Smart Grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 57-64, 2010.
- [8] P. Hines, V. Jason and B. Tivnan, "Smart Grid: Reliability, Security, and Resiliency," University of Vermont, 2014.
- [9] "Glossary of Terms Used in NERC Reliability Standards," NERC, 2020.
- [10] E. Fuchs and M. Masoum, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*, Academic Press, 2015.
- [11] A. Heidari, "Reliability Analysis of Power Distribution System in Presence of Distributed Generation Units," The University of New South Wales, Sydney, 2015.
- [12] A. Sanghvi, *Cost-benefit analysis of power system reliability: Determination of interruption costs*, Academic Press, 1990.
- [13] "Estimating the Economically Optimal Planning Reserve Margin," El Paso Electric Co., 2015.
- [14] "Hearings Before the Subcommittee on Energy Regulation of the Committee on Energy and Natural Resources, United States Senate, Ninety-sixth Congress," Committee on Energy and Natural Resources. Subcommittee on Energy Regulation, 1979.
- [15] M. Wadi and M. Baysal, "Reliability Evaluation in Smart Grids via Modified Monte Carlo Simulation Method," in *ICRERA*, Paris, 2018.
- [16] R. Billinton and L. Gan, "Use of Monte Carlo simulation in teaching generating capacity adequacy assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 1571 - 1577, 1991.
- [17] C. Singh and J. Mitra, "Monte Carlo Simulation for Reliability Analysis of Emergency and Standby Power Systems," in *IEEE Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting*, Orlando, 1995.

- [18] "IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices," *IEEE Std 1366-2012 (Revision of IEEE Std 1366-2003)*, pp. 1-43, 2012.
- [19] A. M. Giacomoni, S. Y. Goldsmith, S. M. Amin and B. F. Wollenberg, "Analysis, modeling, and simulation of autonomous microgrids with a high penetration of renewables," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San diego, 2012.
- [20] R. Billinton and W. Li, *Reliability assessment of electric power system using Monte Carlo methods*, New York: Plenum Press, 1994.
- [21] Y. Hegazy, M. Salama and A. Chikhani, "Adequacy assessment of distributed generation systems using monte carlo simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 48-52, 2003.
- [22] W. S. Lee, D. L. Grosh, F. A. Tillman and C. H. Lie, "Fault tree analysis, methods, and applications-A Review," *IEEE Transactions on Reliability*, Vols. R-34, no. 3, pp. 194 - 203, 1985.
- [23] M. Stamatelatos, "Fault Tree Handbook with Aerospace Applications," NASA, Washington DC, 2002.
- [24] W. Vesely, F. Goldberg, N. Roberts and D. Haasl, "Fault Tree Handbook," U.S. Government Printing., Washington DC, 1981.
- [25] W. Li, *Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods, and Applications*, Wiley-IEEE Press, 2004.
- [26] S. Lee, "Probabilistic Reliability Assessment for transmission planning and operation including cascading outages," in *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, 2009.
- [27] C. W. Williams, "Weather Normalization of Power System Reliability Indices," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa, 2007.
- [28] D. Stamatis, "Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution," ASQ, Milwaukee, 2003.
- [29] O. Ibe, *Markov Processes for Stochastic Modeling*, Massachusetts: Academic Press, 2009.
- [30] R. Billinton and R. Allan, "Reliability Assessment of Large Electric Power Systems," Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [31] "Reliability of Electric Utility Distribution Systems: EPRI White Paper," EPRI, Palo Alto, 2000.
- [32] S. Gudzius, S. Gecys, L. Markevicius, R. Miliune and M. A, "The Model of Smart Grid Reliability Evaluation," *ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING*, Kaunas, 2011.
- [33] M. Hinchey and S. A. Bohner, "Innovations in Systems and Software Engineering," *Springer*, no. 11334, pp. 19-23, 2011.
- [34] H. Farhangi, "The Path of the SmartGrid," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, 2010.
- [35] S. Chren, "Multi-layered Reliability Analysis in Smart Grids," Masarykova univerzita Fakulta informatiky, Brno, 2017.
- [36] A. Mahmood, O. Hasan, H. R. Gillani and Y. Saleem, "Formal reliability analysis of protective systems in smart grids," *IEEE*, p. 198-202, 2016.

- [37] D. Niyato, P. Wang and E. Hossain, "Reliability analysis and redundancy design of smart grid wireless communications system for demand side management," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 38-46, 2012.
- [38] J. Wäfler and P. Heegaard, "A combined structural and dynamic modelling approach for dependability analysis in smart grid," *In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing, ACM*, pp. 660-665, 2013.
- [39] R. Zeng, Y. Jiang, C. Lin and X. Shen, "Dependability analysis of control center networks in smart grid using stochastic petri nets," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, no. 9, pp. 1721-1730, 2012.
- [40] M. Albasrawi, N. Jarus, K. Joshi and S. S. Sarvestani, "Analysis of reliability and resilience for smart grids," in *2014 IEEE 38th Annual Computer Software and Applications Conference, Vasteras*, 2014.
- [41] A. Faza, S. Sedigh and B. McMillin, "Integrated cyber-physical fault injection for reliability analysis of the smart grid," in *In International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, Vienna, 2010.
- [42] A. Islam, A. Domijan and A. Damnjanovic, "Assessment of the Reliability of a Dynamic Smart Grids System," *International Journal of Power and Energy Systems*, vol. 31, no. 4, 2011.
- [43] S. Kahrobaee, "RELIABILITY MODELING AND EVALUATION OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES AND SMART POWER DISTRIBUTION SYSTEMS," The Graduate College at the University of Nebraska, Nebraska, 2014.
- [44] R. Mikulak, R. McDermott and M. Beauregard, *The Basics of FMEA*, CRC Press, 2008.
- [45] O. Akinpelumi and K. Kopsidas, "Impact Analysis of Cyber-related Failures on Power System Reliability - A Review," in *IEEE Madrid PowerTech*, Madrid, 2021.
- [46] Y. Dai, Z. Chen, X. Zheng, X. Dong, Y. Du and X. Liu, "Smart Electricity Meter Reliability Analysis Based on In-service Data," in *4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, Chongqing, 2021.

## Regression Modeling of the Effect of Chip Slenderness Ratio and Cutting Parameters on Vibration

Oktaý ADIYAMAN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Batman University, Technology Faculty, Mechanical and Manufacturing Engineering, 72020, BATMAN

### Article Info

Research article  
Received: 05.05.2021  
Revision: 07.08.2021  
Accepted: 10.11.2021

### Highlights

Cutting parameters  
Stability  
Rijidity  
Feed rate

### Keywords

Chip slenderness ratio  
Vibration  
Regression  
Width-to-thickness  
AISI 1050 steel

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, different cutting parameters (feed rate, depth of cut) were selected together with chip slenderness ratio (CSR) by using tools with three different tool approach angles as  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  and  $45^{\circ}$  in turning AISI 1050 steel. As a result, a regression model was created to determine the effect of feed rate, depth of cut, tool approach angle and CSR on vibration in all three directions (X, Y and Z).

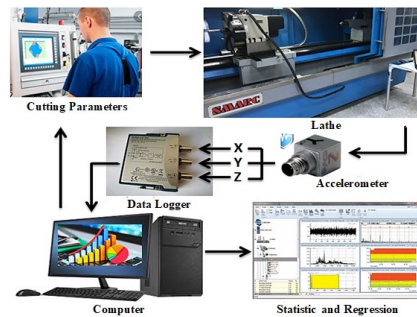


Figure A. Schematic figure of the experimental setup and process steps

**Purpose:** In this study, the effects of different cutting parameters (feed rate, depth of cut) and CSR on vibration were investigated by using 5 different CSR and cutters with three different approach angles in order to examine the vibration caused by CSR in turning machining of AISI 1050 steel.

**Theory and Methods:** In all experimental studies, feed rate, depth of cut were selected together with CSR and used tools with three different tool approach angles as  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  and  $45^{\circ}$ . AISI 1050 steel were selected as experimental turning materials. As a result, a regression model was created to determine the effect of feed rate, depth of cut, tool approach angle and CSR on vibration in all three directions. 5 different chip slenderness ratio were created (1, 3, 5, 10 and 15) and the vibrations in the turning were measured in three directions (X, Y, Z). Depending on the vibration, regression models were created for the CSR and cutting parameters. The SPSS program was used for statistical analysis.

**Results:** In the regression models, it was seen that the greatest effect in X, Y and Z directions was the feed rate, depth of cut and tool approach angle, respectively, and a significant model could not be created regarding the chip slenderness ratio. In addition, it was determined that the greatest vibration values occurred in the direction of feed rate. In cases where CSR is 1 and 10, minimum vibration values were measured in all directions and tool approach angles.

**Conclusion:** The minimum vibration occurs when the CSR is 1 and 10 in all three directions. The most stable vibrations values were obtained when the approach angle was  $30^{\circ}$  at all values of CSR. The greatest vibration values were obtained in the measurements in the direction Y. It has been observed that a more serrated structure is formed in the chips formed when the CSR is 5. In same CSR, it is seen that vibration intensity increases at CSR values with higher depth of cut.



## Talaş İncelme Oranı ve Kesme Parametrelerinin Titreşim Üzerine Etkisinin Regresyon Modellenmesi

Oktay ADIYAMAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği, 72020, BATMAN

### Article Info

Research article  
Received: 05.05.2021  
Revision: 07.08.2021  
Accepted: 10.11.2021

### Anahtar Kelimeler

Talaş İncelme Oranı  
Titreşim  
Regresyon  
Genişlik kalınlık oranı  
AISI 1050 çeliği

### Keywords

Chip slenderness ratio  
Vibration  
Regression  
Width-to-thickness  
AISI 1050 steel

### Öz

Tornalama işlemlerinde talaş derinliğinin ilerleme hızına oranı olarak tanımlanan talaş incelme oranı, üzerinde çalışılan bir konudur. Bu nedenle konunun farklı yönlerden ele alınarak incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada AISI 1050 çeliğinin tornalanmasında 15<sup>0</sup>, 30<sup>0</sup> ve 45<sup>0</sup> olacak şekilde üç farklı takım yaklaşma açısına sahip takım kullanılarak farklı kesme parametrelerinin (ilerleme değeri, talaş derinliği) talaş incelme oranı ile birlikte değerlendirilmesi yapılmıştır. Bunun sonucunda ilerleme değeri, talaş derinliği, yaklaşma açısı ve talaş incelme oranının her üç yöndeki titreşime etkisinin belirlenmesi için regresyon modeli oluşturulmuştur. Tüm deneysel çalışmalarda kesme parametreleri olarak talaş derinliği ve ilerleme değeri seçilmiştir. 5 farklı talaş incelme oranı oluşturulmuş (1, 3, 5, 10 ve 15) ve işlemedeki titreşimler üç doğrultuda (X, Y, Z) ölçülmüştür. Titreşime bağlı olarak talaş incelme oranı ve kesme parametrelerine ait her üç yönde regresyon modelleri oluşturulmuştur. Regresyon modelleri ve istatistiksel analizler için SPSS V24 programı kullanılmıştır. Uygulanan regresyon modellerinde her üç yönde de (X, Y ve Z) en büyük etkinin sırasıyla ilerleme değeri, talaş derinliği ve yaklaşma açısı olduğu görülmüş, talaş incelme oranı ile ilgili anlamlı bir model oluşturulamamıştır. Ayrıca en büyük titreşim değerlerinin ilerleme yönünde (Y yönü) meydana geldiği tespit edilmiştir. Talaş incelme oranının 1 ve 10 olduğu durumlarda tüm yönlerde (X, Y ve Z) ve yaklaşma açılarında minimum titreşim değerleri ölçülmüştür. Talaş yaklaşma açısının 30<sup>0</sup> olduğu durumlarda en stabil titreşim değerleri elde edilmiştir.

### Abstract

Chip slenderness ratio, which is defined as the ratio of depth of cut to feed rate in turning processes, is an subject that has been studied. For this reason, the chip slenderness ratio should be examined from different aspects. In this paper, different cutting parameters (feed rate, depth of cut) were selected together with chip slenderness ratio by using tools with three different tool approach angles as 15<sup>0</sup>, 30<sup>0</sup> and 45<sup>0</sup> in turning AISI 1050 steel. As a result, a regression model was created to determine the effect of feed rate, depth of cut, tool approach angle and chip slenderness ratio on vibration in all three directions. In all experimental studies, depth of cut and feed rate were selected as cutting parameters. 5 different chip slenderness ratio were created (1, 3, 5, 10 and 15) and the vibrations in the turning were measured in three directions (X, Y, Z). Depending on the vibration, regression models were created in all three directions for the chip slenderness ratio and cutting parameters. The SPSS V24 program was used for regression models and statistical analysis. In the regression models, it was seen that the greatest effect in all three directions (X, Y and Z) was the feed rate, depth of cut and tool approach angle, respectively, and a significant model could not be created regarding the chip slenderness ratio. In addition, it was determined that the greatest vibration values occurred in the direction of feed rate (Y direction). In cases where chip slenderness ratio is 1 and 10, minimum vibration values were measured in all directions (X, Y and Z) and tool approach angles. When the tool approach angle is 30<sup>0</sup>, the most stable vibration values were occurred.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gerek ortagonal kesmede ve gerekse oblik kesmede talaş formu ve kesme mekaniği incelendiğinde talaş derinliği olarak adlandırılan kesilmemiş talaş genişliği ile ilerleme olarak adlandırılan kesilmemiş talaş

kalınlığı arasındaki oran olarak tanımlayabileceğimiz talaş incelleme oranı (TİO) önemli ve çalışılabilir bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Talaş derinliğinin ilerleme oranı olarak ta kısaca tanımlayacağımız TİO, üzerinde çalışılan ancak kesin kaniye henüz varılmamış bir parametredir [1]. İlk olarak 1976 yılında Seculic S. tarafından dile getirilen [2] TİO tabiri sonrasında farklı çalışmalarda genişlik-kalınlık oranı, talaş narinlik oranı vb. adlarla anılmıştır. Kesme kuvvetlerinin ve talaş şekli dikkate alındığında Shaw [3], tornalamada kesilmemiş talaş kalınlığının (talaş derinliği), ilerleme miktarının en az beş katı olması gerektiğini tavsiye etmiştir. Sonrasında Oxley aynı oranının maksimum değerinin 10'a kadar çıkarılabileceğini belirtmiştir [4]. Yapmış olduğu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi elde ettiği model üzerinden Pednekar ve ark. bu oranın 20'ye kadar çıkarılabileceğini iddia etmiştir [5]. Ancak her türlü iş parçası malzemesi ve kesme koşulu için, anılan çalışmalarda herhangi bir kritik ve kesinleştirilmiş oran belirlenmemiştir [1]. Nakayama ve arkadaşları, sünek malzemelerde örneğin pirinç gibi malzemelerde bu oranlamının geçerli olmadığını savunmuştur. [6]. Bu nedenle, TİO'nun farklı kesme koşulları ve iş parçası malzemeleri için geçerli olan bu ve bundan sonraki çalışmalarla araştırılacak evrensel bir kriter olup olmadığı hala açık bir soru olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Diğer bir çalışmada Rui Liu ve arkadaşları alüminyum 6061 malzemeyi ortogonal kesme şartları ile farklı TİO kullanarak işlemiş ve yeni bir oran belirlemişlerdir. 5, 10, 12.5, 16.7, 20 TİO'ları seçilerek 3 farklı kesme hızında 5 farklı ilerleme değerinde tüm işlemler yapılmıştır. Sonuç olarak tüm şartlar için geçerli olacak bir oran elde edilememiştir [1].

Sudjatmiko ve arkadaşları, Al 6061 malzemenin tornalanmasında kesme parametrelerinin (ilerleme, takım uç yarıçapı, devir sayısı ve talaş derinliği) TİO oranı, yüzey pürüzlülüğü ve takım serbest yüzey aşınma miktarı üzerine etkisinin regresyon modellemesini yapmışlardır [7]. Elde edilen talaş genişliği üzerinden elde edilen TİO değerleri, yüzey pürüzlülüğü ve kesici uç serbest (yan) yüzey üzerindeki aşınma miktarları üzerinden değerlendirilmiştir. %94.45 yüksek belirtme katsayısı ( $R^2$ ) ile TİO için edilen modelde en büyük etkinin takım uç yarıçapı ve sonrasında ilerleme değeri olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü ve takım serbest yüzey aşınması için elde edilen regresyon modelinde de en büyük etkinin takım uç yarıçapı olduğu tespit edilmiştir. Sudjatmiko ve arkadaşları genel olarak tornalama işlemlerinde TİO'nı, 1 ve 5 arası seçme eğiliminde olduklarını ancak nadiren de olsa bu katsayının 50'ye kadar çıktığını belirtmişlerdir [7].

Titreşim işleme sırasında işlenen malzemenin plastik şekil değişimine uğraması ve buna karşın kesici takıma göstermiş olduğu direncin sonucu olarak kesici takımın ilk konumundan sapması ile oluşan bir olgudur [8]. Kesme parametrelerinin gerek metalik ve gerekse kompozit (Jute and NFR) [9] gibi farklı malzemelerin işlenmesi sırasında, titreşim üzerine etkisini inceleyen bir çok çalışma da yapılmıştır. Bu çalışmalar değişik analiz yöntemleri ile de analiz edilmiş ve bazı sonuçlar çıkarılmıştır. AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenmesinde ayna ve punta basıncının titreşim ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili etkisi araştırılmış [10] ve yüksek ayna basıncında (18 bar) en az titreşim elde edilmiştir. CuZn39Pb3 malzemenin işlenmesinde farklı ilerleme, talaş derinliği ve kesme hızı değerlerindeki oluşan titreşimlerin incelenmesinde [11] titreşim üzerine etkili parametrenin ilerleme olduğu sonucuna varılmıştır. AISI 5140 çelik malzemenin tornalanmasında yaklaşma açısının yükselmesinde titreşimin arttığı gözlenmiştir. Taguchi yöntemi ile yapılan analizlerde titreşim üzerinde en büyük etkinin ilerleme oranı olduğu görülmüştür [12]. Parçaların işlenmesinde gerek TİO ve gerekse işleme sırasında oluşan titreşimin değerlendirilmesi ve analizi için çok farklı yöntemler denenmiştir. Bu yöntemlerin en önemlileri arasında her bir parametrenin sonuç üzerinde etkisini elde etmeye yönelik regresyon modelleme sayılabilir. Regresyon analizi; bağımlı değişkendirdeki değişimi açıklayabilmek, diğer faktörlerin etkisi olmaksızın bağımlı değişkene etkilerinin tahminini yapabilmek, bağımlı değişkene ilişkin ortalama değerlerin bulunması amacıyla kullanılmaktadır [13]. Böyle bir regresyon modelinde bağımlı değişkendirdeki değişim, bağımsız değişkenler ile açıklanmaya çalışılır. AISI 4140 işlenmesinde titreşimin etkilendiği parametrelerin incelendiği çalışmada regresyon modeli elde edilmiş ve titreşim üzerinde en etkili parametrenin ilerleme değeri olduğu gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan modellerde en etkili modelin II.dereceden regresyon modeli olduğu tespit edilmiştir [14].

Kara ve ark. AISI 4140 ıslah çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin performanslarını ve optimum işleme şartlarını belirleyen bir çalışma da yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme (% 92,63), daha sonra sırasıyla kesme derinliği (% 2,08) ve kesme hızı (% 1,37) olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca titreşim üzerindeki en etkili parametrelerin ise ilerleme (% 88,96), daha sonra

sırasıyla kesme derinliği (%6,50) ve kesme hızının (% 4,54) olduğunu tespit etmişlerdir [15]. Rogov ve Siamak çalışmalarında diğerlerinden farklı olarak takım tutucu uzunluğunu da analizde etken parametre olarak ele almışlar ve alüminyum alaşımlı AA2024 malzemenin tornalanmasında titreşim ve yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonunda yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli parametrenin kesme hızı, titreşim üzerinde ise takım tutucu bağlama uzunluğunun olduğunu tespit etmişlerdir [16].

TİO ile ilgili yapılan çalışmada Demir ve arkadaşı, kesme parametrelerinin (talaş derinliği, ilerleme) farklı yaklaşma açılarında ve farklı TİO'larında yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemiş, talaş morfolojisi ile ilgili analizler yaparak titreşim ve TİO arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Keskin deformasyon kırılmaları ve tırtıklı yapıya sahip olmayan lamelli tip talaş yapısının  $30^0$  yaklaşma açısında 0,1-0,15 mm/dev ilerleme ile ve TİO'nun 10 ve 15 değerlerinde elde edildiğini tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak ta bu değerlerde yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığını tespit etmişlerdir [17]. Yine aynı yazarlar benzer bir çalışmayı aynı kesme parametrelerini kullanarak kesici takımdaki aşınmayı, titreşim ve TİO'nuna bağlı olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada da 150 lik yaklaşma açısında daha şiddetli ve düzensiz titreşimlerin elde edildiği, büyük derinlikte ve daha büyük adımlı ve bozuk yapıya sahip talaş şekilleri ile birlikte kesici takım üzerinde en büyük aşınma miktarlarının ve bölgelerinin olduğu gözlenmiştir. En büyük titreşim dalgalanmalarının talaş derinliği (X) yönünde olduğu sonucuna varılmıştır. Optimum sonuçların  $30^0$  yaklaşma açısında ve TİO'nun 15 olduğu durumda olduğu gözlenen çalışmada en sert (derin) deformasyon kırıklarının TİO'nun 1 olduğu durumda olduğu gözlenmiştir. Ek olarak kesici uç içinde bağlayıcı olan Co'nun az miktarda da olsa talaş formu içine karıştığı yapılan EDX analizlerinde tespit edilmiştir [18].

Yapılan tüm araştırmalarda talaş incelleme oranı ile titreşim arasındaki ilişkinin incelenmesine yönelik az sayıda çalışmanın bulunduğu ve yapılan az sayıdaki çalışmalarda da TİO ile ilgili kesin kaniye varılamadığı görülmüştür. Bu nedenle de konu halen değişik araştırmacılar tarafından incelenmeye değer bir alan olarak görülmektedir. Bu çalışmada yukarıdaki çalışmalara paralel olarak AISI 1050 çeliğinin tornalanarak işlenmesinde, TİO ile oluşan titreşimin incelenmesi amacıyla 5 farklı TİO kullanılarak ve üç farklı yaklaşma açısına sahip kesicilerle, farklı kesme parametrelerinin (ilerleme, talaş derinliği) ve TİO'nun titreşim üzerine etkisi incelenmiştir. Deneysel verilerin X, Y ve Z yönlerindeki elde edilen titreşim üzerindeki etkisi elde edilen regresyon modeliyle açıklanmaya çalışılmış ve her bir parametrenin etkisi araştırılmıştır. Bu yönüyle regresyon analizi ile elde edilebilecek bir formülasyonun ve ilkesel bir yaklaşımın geliştirilip geliştirilemeyeceği yönünde bilimsel bir katkı elde edilmesi hedeflenmiştir. İleriki çalışmalarda farklı tip malzemelerin işlenmesi ile de konunun daha da genişletilmesi planlanmaktadır.

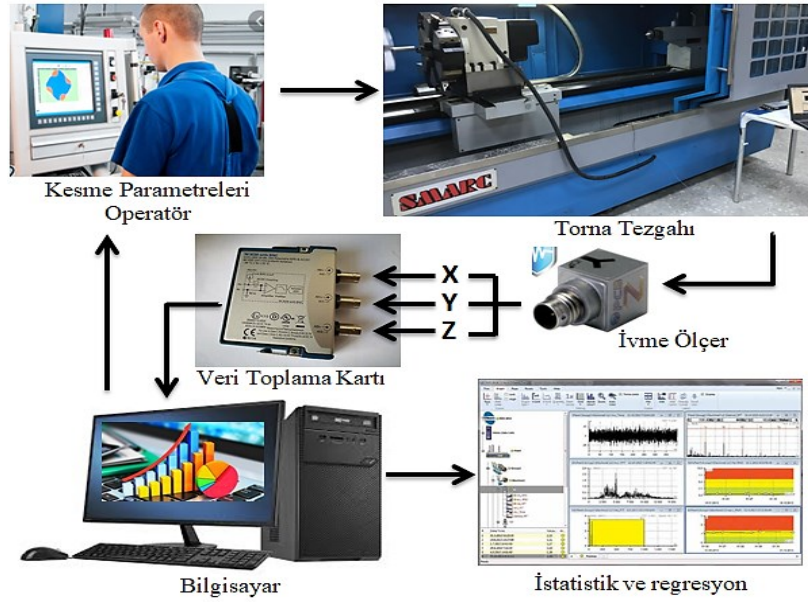
## 2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

### 2.1. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

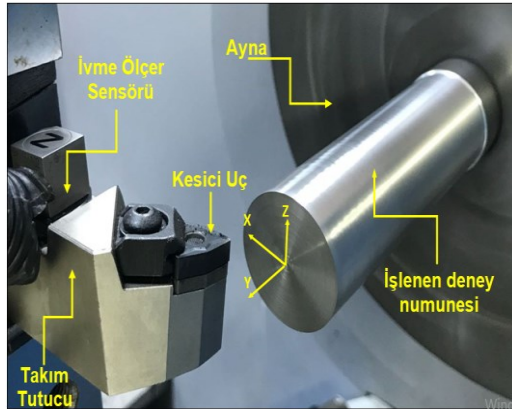
Tüm tornalama işlemlerinde SMARC marka CAK6166B X 200 modeli CNC torna tezgahı kullanılmış ve işleme sırasında elde edilen titreşimler NI-9230 C model ivmeölçer ile ölçülmüştür. Titreşim değerleri -30 g ve +30 g aralığında belirlenmiş, piezoelektrik ölçer bir prob ile titreşimler alınarak bir datalogger vasıtasıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Deneyselerde kullanılan tezgah ve ölçüm şekli ile işlem basamaklarını gösterir deney düzeneği Şekil 1'de görülmektedir.

Deneyselerin yapılışında 30 mm çapında ve 150 mm boyunda AISI 1050 imalat çeliği kullanılmış ve kullanılan bu milin boy olarak 100 mm'lik kısmı ayna ayakları dışında kalacak şekilde bağlanmıştır. Bağlanan iş parçasının 80 mm'lik boyu işlenmiştir (Şekil 2). Daha sonra ivmeölçer probu takım tutucu üzerine bağlanmıştır. Tüm tornalama işlemleri soğutma sıvısı kullanılmadan yapılmıştır. AISI 1050 imalat çeliğine ait kimyasal ve mekanik özellikler ile iş parçası ve prob bağlantısı Şekil 2'de görülmektedir.

Şekil 2'de görüldüğü üzere X yönü talaş derinliği (a) yönü (radyal kuvvet doğrultusu), Y yönü ilerleme (f) yönü ve Z yönü ise esas kesme kuvveti yönü şeklinde tanımlanabilir.



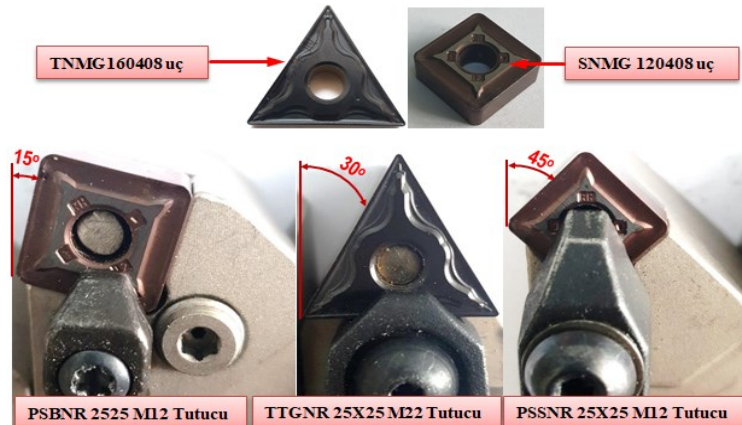
Şekil 1. Deney düzeneği ve işlem basamaklarının şematik gösterimi



Kimyasal içerik		Mekanik Özellikler	
Element	% Ağırlık		
C	0,47-0,55	Gerilme Dayanımı	690 MPa
Fe	0,60-0,90	Akma Dayanımı	0.47-0.55
Mn	98,46-98,92	Kayma Modülü	80 GPa
S	≤0,0	Elastik Modül	190-210 GPa
P	≤0,0	Poison Oranı	0.27-0.30
		Kopma Uzaması	0.27-0.30
		Sertlik, Brinell	197
		Isıl İletkenlik	49.8 W/mK

Şekil 2. İvmeölçerin takım tutucuya montajı ve işlenen malzemenin kimyasal-mekanik özellikleri

Tornalama için burun yarıçapı 0.8 mm ve üç farklı yaklaşma açısına sahip TNMG 160408 ve SNMG 120408 standardına sahip iki çeşit insert uç, PSBNR 2525 M12, TTG NR 25x25 M22 ve PSSNR 25X25 M12 standardına sahip üç farklı takım tutucuya bağlanarak talaş alma işlemleri yapılmıştır. Co bağlayıcılı, W, Ti karbür kesici insert uçlar, takım tutucu katerlere 15°, 30° ve 45° derecelik takım yaklaşma açalarına (Kr) sahip olacak şekilde bağlanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Takım tutucu ve kesici uçlar



Deney tasarımında toplamda 18 adet deney parçasının dış çapları pas ve yüzeydeki sert tabakanın alınması amacıyla eşit çapta tornalanmış ve daha sonra farklı talaş derinliklerinde tek pasoda işlenmiştir. Kullanılan kesme parametreleri ise Tablo 1’de gösterilmektedir. Tüm tornalama işlemlerinde kesme hızı sabit olacak şekilde 75 m/dk olarak seçilmiştir. Talaş incelme oranı (TİO) talaş derinliğinin ilerleme hızına oranı olarak açıklanmaktadır ve genellikle bu oran 5 ila 20 arasında alındığında kesme hızındaki değişim miktarının % 22 olduğu yapılan önceki çalışmalarda görülmektedir [19]. Yapılan deneylerde TİO değerleri 1, 3, 5, 10 ve 15 olarak seçilmiştir.

**Tablo 1.** Tornalama işlemlerinde kullanılan kesme parametreleri

Deney No	İlerleme Hızı (f) (mm/dev)	Talaş Derinliği (a) (mm)	Talaş İncelme Oranı (TİO-CSR=a/f)	Yaklaşma Açısı (Kr)
1	0.5	0.5	1	15
2	0.5	1.5	3	15
3	0.1	0.5	5	15
4	0.45	2.25	5	15
5	0.1	1	10	15
6	0.15	2.25	15	15
7	0.5	0.5	1	30
8	0.5	1.5	3	30
9	0.1	0.5	5	30
10	0.45	2.25	5	30
11	0.1	1	10	30
12	0.15	2.25	15	30
13	0.5	0.5	1	45
14	0.5	1.5	3	45
15	0.1	0.5	5	45
16	0.45	2.25	5	45
17	0.1	1	10	45
18	0.15	2.25	15	45

## 2.2. Regresyon Analizi (Regression Analysis)

Regresyon analizi genel olarak bir veya birden fazla bağımlı değişken üzerinde bağımsız olan değişkenlerin etkilerini sayısal (oransal) olarak veren ve bağımlı değişkene etkilerini tahmin etmekte kullanılır [12]. Regresyon denkleminin deney verilerine uygulanışında bağımlı ve bağımsız değişkenler olarak Tablo 1’de belirtilen parametreler uygulanmış ve toplam 18 deney yapılmıştır. Burada bağımsız değişken olarak talaş derinliği (a), ilerleme değeri (f), talaş incelme oranı (TİO) ve yanaşma açısı (Kr), bağımlı değişkenler ise X, Y ve Z yönündeki ölçülen genlik değeri (GXg, GYg, GZg) olarak belirlenmiştir. Çoklu regresyon modelinin elde edilmesinde 1 nolu formül kullanılmıştır.

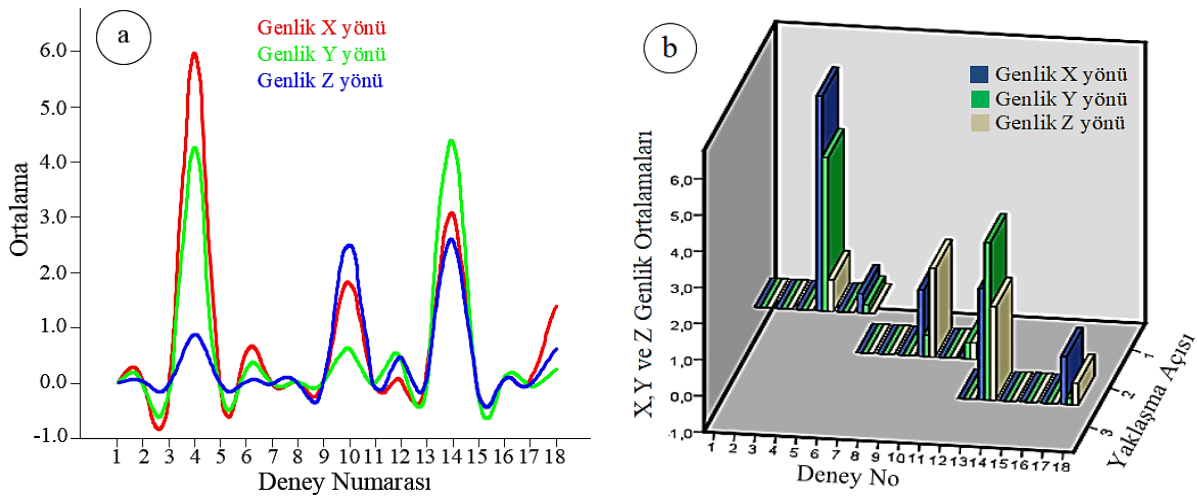
$$GXg, GYg, GZg = k_0 + k_1f + k_2a + k_4Kr$$

Tüm regresyon ve istatistik işlemleri SPSS V24 programında uygulanmıştır. İlk olarak bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı olarak tanımlanan korelasyon katsayısının karesi ( $R^2$ ) belirlenmiş ve modelin deneyi açıklama şiddeti ölçülmüştür. Korelasyon katsayısının 1'e yakın olması bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama yeteneğini göstermektedir. Yapılan regresyon analizlerinde %95 güven aralığı esas alınmıştır. Regresyon eşitliğinin elde edilmesinde ilk olarak tüm deney ölçümlerinin normal dağılım gösterip göstermediği araştırılmıştır. Sonrasında deney parametreleri arasında herhangi bir korelasyonun olup olmadığı araştırılmış ve en sonunda da regresyon denklemi elde edilmiştir.

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

#### 3.1. TİO ve Titreşim (Chip Slenderness Ratio and Vibration)

Elde edilen titreşim genlik değerlerinin yaklaşma açısına ( $K_r$ ) göre değerlendirilmesinde Şekil 4'teki grafikler elde edilmiştir.

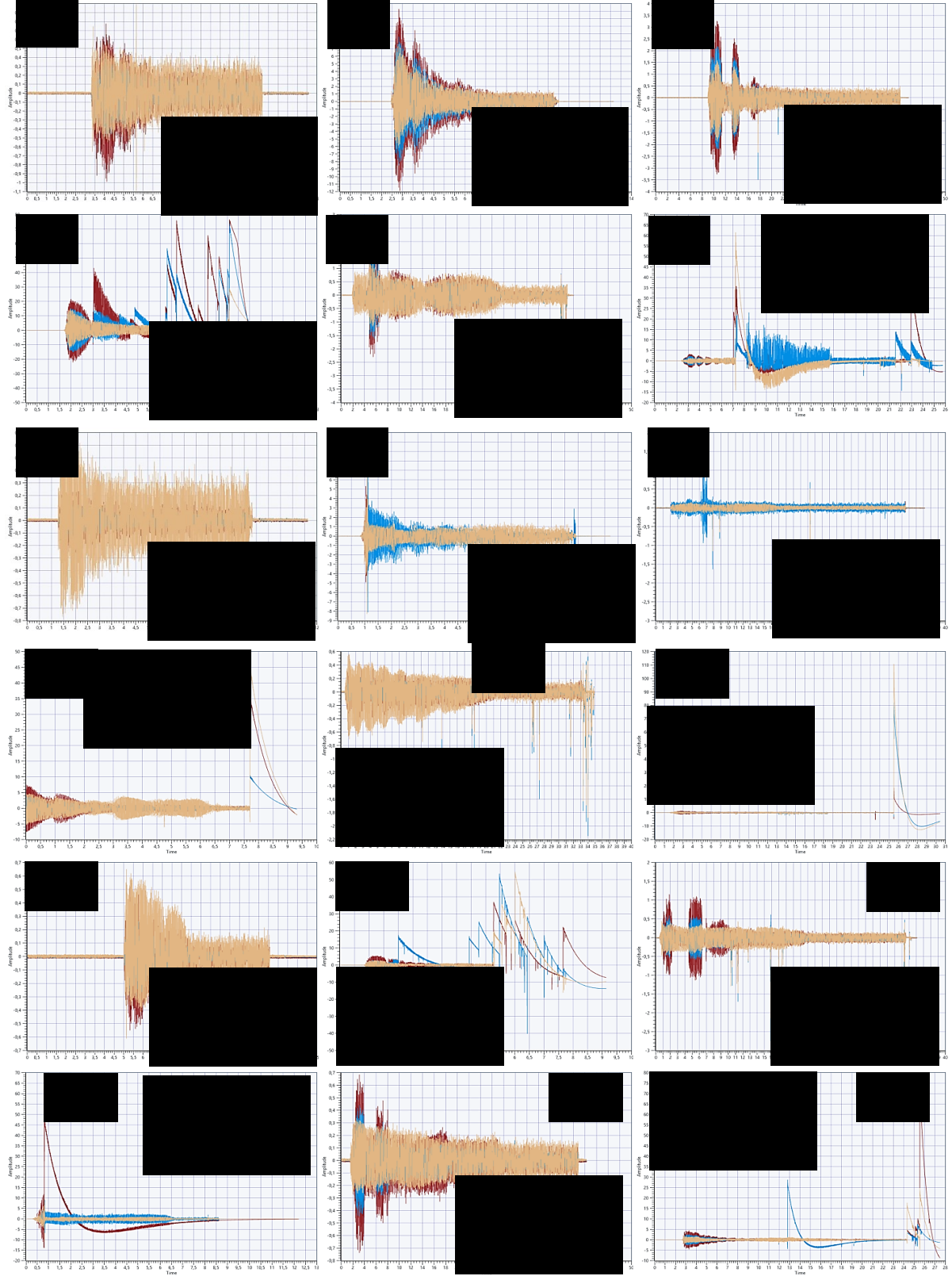


Şekil 4. X, Y ve Z doğrultularındaki genlik değerleri grafiği

Şekil 4 (a)'da görüldüğü üzere genlik şiddeti olarak 4, 10 ve 14 nolu deneylerde en yüksek titreşim genlik değerleri elde edilmiştir. Şekil 5 (a) ve (b) ve Şekil 5 grafikleri birlikte değerlendirildiğinde yüksek ilerleme ve talaş derinliği ile birlikte yaklaşma açısının küçük olduğu durumlarda ( $15^\circ$ ) en yüksek titreşimin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca  $45^\circ$  lik yaklaşma açısında da (Şekil 4 a ve b) görüldüğü üzere yüksek titreşim değerleri oluşmakta, yüksek ilerleme ve talaş derinliklerinde en düşük titreşim değerlerinin  $30^\circ$  lik yaklaşma açısında oluştuğu görülmektedir. Bu sonuçlar yüksek ilerleme ve talaş derinliklerinde, düşük ve yüksek yaklaşma açılarının iyi sonuç vermediğini göstermektedir. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda da titreşimin ilerleme hızı, kesme hızı ve talaş derinliğine bağlı olarak doğrusal bir etki yaptığını belirtmektedir. Ancak talaş derinliğinin etkisinin ihmal edilebilecek seviyede olduğunu söylemektedir [20]. Burda da talaş derinliğinden daha ziyade etkinin ilerleme ile elde edildiği kanaatindeyiz.

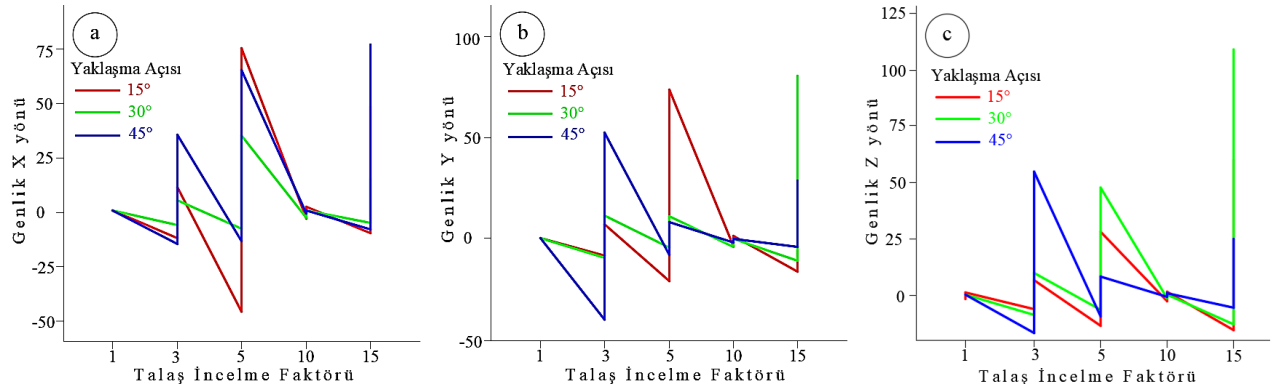
Tüm deneylerden elde edilen ve işlem sırasında elde edilen 18 deney numunesine ait titreşim grafikleri Şekil 5'te gösterilmektedir.

Şekil 5 incelendiğinde yaklaşma açısının  $15^\circ$  ve  $45^\circ$  değerlerinde çok daha yüksek kararsızlıklar görülmektedir. Bu açılardaki kararsız olmayan ve daha dengeli titreşim değerlerinin elde edildiği durumların ise, TİO'nun 1 (şekil 4 te 13, 7 ve 1 nolu grafikler) veya 10 (şekil 4 te 17, 11 ve 5 nolu grafikler) olduğu durumlar olduğu görülmektedir. Tüm durum ve şartlarda en dengeli durum ise  $30^\circ$  lik yaklaşma açılarında elde edilmiştir.



Şekil 5. Farklı TİO ve yaklaşma açlarına sahip tornalanan parçalara ait titreşim grafikleri

TİO olarak karşılaştırma yapıldığında ise X, Y ve Z yönlerindeki ölçülen genlik değerlerinin talaş incelleme faktörü bakımından grafikleri Şekil 6'da verilmektedir.

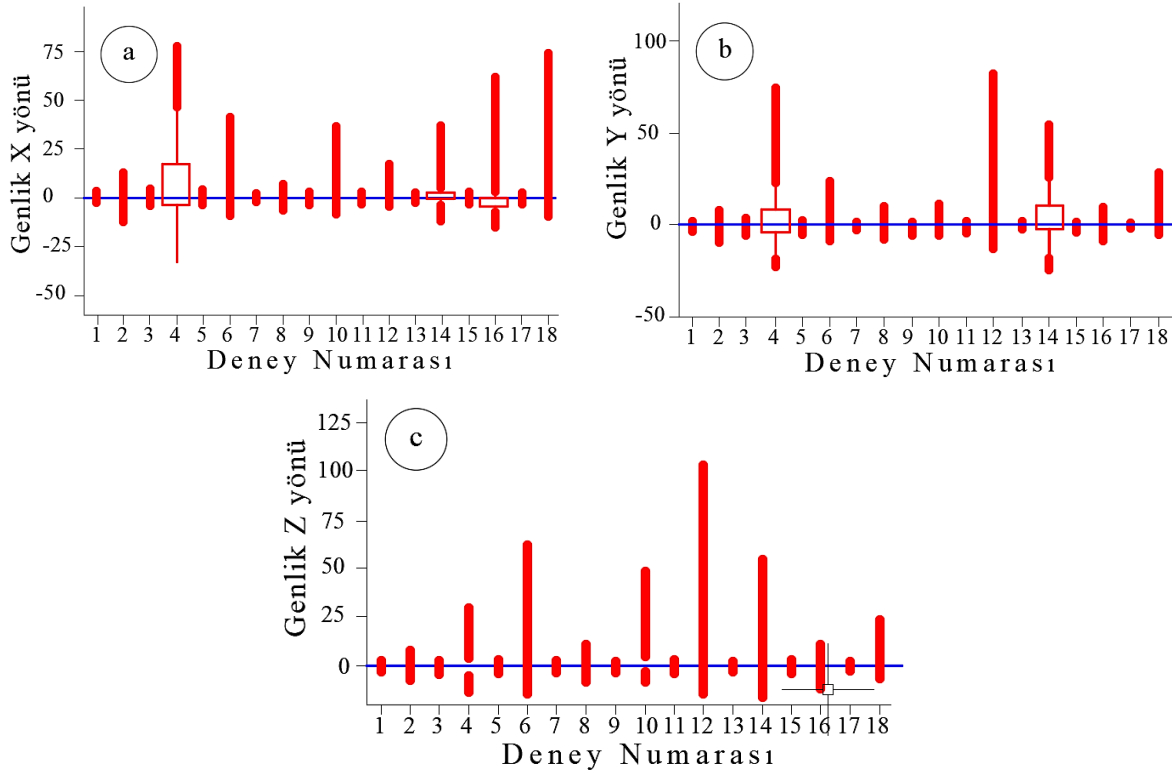


**Şekil 6.** Talaş incelme faktörlerinin yaklaşma açılarına göre titreşim grafikleri [17,18]

Şekil 6 a, b ve c incelendiğinde her üç yönde de TİO'nun 1 ve 10 olduğu durumlarda (1, 7, 3, 5, 11, 17 nolu deneyler) (Tablo 1) en düşük titreşimin olduğu görülmektedir. TİO'nun 1 ve 10 olduğu durumlarda yaklaşma açısının etkisiz olduğu da ayrıca görülmektedir. Ayrıca tüm talaş incelme oranının her değerinde (1,3,5,10 ve 15) yaklaşma açısının 30° olduğu durumlarda en kararlı ve dengeli genlik değerlerinin olduğu, 15° ve 45° derecelik yaklaşma açıları ise genlik değerleri arasında aşırı bir değişimin olduğu görülmektedir. Diğer taraftan genlik şiddetleri X, Y ve Z yönü bakımından TİO'nun her değeri diğer yönlerdeki (X,Y Z) değerleri bakımından karşılaştırıldığında, en düşük genlik şiddetinin Z yönünde (Şekil 6 c) en yüksek genlik şiddetlerinin ise Y yönünde olduğu görülmektedir (Şekil 6 b). Bu yön daha önce de ifade edildiği üzere ilerleme doğrultusudaki ölçülen genlikler olduğundan TİO'na en fazla ilerleme değerinin etki ettiği ve yüksek titreşimlere neden olduğu görülmüştür. Literatürdeki çalışmalara paralellik arzeden bu durum [7] ilerleme değeri ile TİO arasındaki ilişkiye odaklanılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Deney şartları incelendiğinde TİO oranının 10 olduğu durum en düşük ilerleme değerleridir. TİO nun 1 olduğu değerler ise ilerlemenin en yüksek olduğu ancak buna karşın talaş derinliğinin de en düşük olduğu işleme şartları olduğunu görmekteyiz. Bu durumda bizim kanaatimiz, TİO'nun 1 ve 10 olduğu durumlardaki işleme zamanları karşılaştırıldıktan sonra en kısa işleme zamanını sağlayan TİO'nun değeri seçilerek tornalama operasyonu yapılmalıdır. Daha önce titreşim üzerine talaş derinliğinin çok az bir etkiye sahip olduğu belirtilmiş ve bu yönde literatürdeki araştırmalar da [20] buna paralel sonuçlar elde edildiği ifade edilmişti. Burada uygulamada genel olarak ilerlemenin en yüksek değerlerinin TİO'da tercih edilmesi gerektiği kanaati oluşmaktadır. Ancak yüzey pürüzlülüğünün çok önemli olduğu durumlarda ise TİO'nun 10 olduğu kesme parametreleri seçilebilir. Zülküf ve arkadaşının yaptığı çalışmada da [17] TİO 10 olduğu durumda yüzey pürüzlülüğünde buna paralel olarak en düşük değerlerin elde edildiği görülmüştür ve bu iddiamızı destekler mahiyettedir.

Ayrıca, Şekil 6 incelendiğinde titreşim üzerine en büyük kararsızlıkların 3 farklı yaklaşma açısında da en kötü olarak, TİO'nun 5 olduğu ve en düşük kararsızlıkların ve en stabil durumların ise TİO'nun 1 ve 10 olduğu durumlarda olduğu görülmektedir. Yapılan bir çalışmada [17], TİO ile talaş morfolojisi arasındaki incelenmiş ve daha az tırtıklı, deformasyon çatlaklarının daha az ve lamelli tip düzgün bir talaş oluşumunun elde edildiği deney şartlarının yaklaşma açısının 30° olduğu durumda olduğu görülmüştür. 15° ve 45° lik yaklaşma açıları daha tırtıklı, ciddi deformasyon çatlaklarının olduğu talaş yapısı elde edilmiştir. Literatürdeki bu sonuçlara göre şekil 6'daki grafikler incelendiğinde, 30°'lik yaklaşma açıları en stabil durumun oluşmasının elde edilen talaş yapısından dolayı ve 30°'lik yaklaşma açısında daha düzgün, daha az tırtıklı ve deformasyon çatlaklarının en az olduğu talaş şekli elde edildiğinden dolayı olduğu kanaatindeyiz.

Titreşim şiddetlerinin, deney numarasına göre sıralanması ile elde edilen sonuçlar Şekil 7'de görülmektedir.



**Şekil 7.** Deney grupları arasındaki genlik farkları

Şekil 7 incelendiğinde en büyük titreşim genlik değerlerinin Y yönünde olduğu görülmektedir. Y yönü işlemede ilerleme yönü doğrultusu olduğundan dolayı en büyük titreşim değerlerinin Y yönünde olması doğaldır. Hem talaş kalınlığı hem de uzunluğu, sert tormalama işlemlerinde ilerleme hızı ile önemli ölçüde dalgalanır [21]. Radyal kuvvet doğrultusu olan X yönünde ve esas kesme kuvveti ( $F_c$ ) yönü olan Z yönündeki titreşim değerleri daha düşük çıkmaktadır.

Ayrıca en düşük ilerleme değeri olan 0,1 mm/dev değerine sahip 3, 5, 9, 11, 15 ve 17 nolu deneylerde (Tablo 1) X, Y ve Z yönündeki genlik değerlerinin tümünde talaş derinliği artmasına rağmen genlik değerlerinde çok büyük bir farklılığın oluşmadığı görülmektedir. Daha önceki çalışmalarda [20] da bu sonuç görülmüş ve talaş derinliğinin en az etkiye sahip olduğu belirtilmişti. Buradan titreşim üzerinde talaş derinliğine kıyasla ilerleme değerinin daha da etkin olduğu sonucu çıkarılabilir. Buna ek olarak ilerlemenin düşük olduğu bu deneylerde, yaklaşma açısının da etkin olmadığı görülmekte ve aynı yaklaşma açısına sahip deneylerde (3-5 nolu deneylerde  $15^\circ$ , 9-11 nolu deneylerde  $30^\circ$  ve 15-17 nolu deneylerde  $45^\circ$ ) titreşim genlik değerlerinde eşit düzeyde titreşimlerin her üç yönde de (X,Y ve Z) elde edildiği görülmektedir.

Tablo 1 değerlerinde, en yüksek ve aynı talaş incelleme faktörü değerlerine sahip ( $T\dot{I}O=15$  ve ilerleme 0,15 mm/dev, talaş derinliği 2,25 mm) deneyler 6, 12 ve 18 numaralı deneylerdir. Bu deneyler incelendiğinde (şekil 7) genlik X, Y ve Z değerlerinin yüksek değerlerde çıktığı gözlenmiştir. Bu da bize, düşük ilerleme değerlerinde ve yüksek talaş derinliklerinde talaş incelleme oranının yüksek çıkmasına bağlı olarak titreşimlerin şiddetinin arttığını göstermektedir. Ancak AISI 1050 malzemenin alüminyum malzemeye göre daha sert yapıda olması Sudjatmiko'nun çalışmasındaki gibi lineer bir eğrinin elde edilmesini zorlaştırmakta ve çok katı sonuçlara ulaşmamızı engellemektedir. Bu yönüyle de konu daha sert olan AISI 4140, impaks gibi çelik malzemelerde de araştırılma ihtiyacı doğurmaktadır. Bu durum talaş morfolojisinin incelenmesindeki önceki çalışmalarda da [17] sert malzemelerde görülmüştür ve  $T\dot{I}O$  ile diğer kesme parametreleri, titreşim vb çıktı değerlerinin değerlendirilmesinde kesin ve katı kuralların ifade edilmesini zorlaştırmıştır.

Belirli talaş derinliği ve ilerlemenin seçilmesinden dolayı elde edilen talaş incelleme oranı ( $T\dot{I}O$ ) değeri, özellikle sürekli talaş formuna sahip sünek çelik veya metalin kesilmesi işleminde talaşın şeklini etkileyecektir [22].

### 3.2. Regresyon Modeli (Regression Model)

Regresyon analizi öncesinde farklı değerlere sahip tüm parametrelerin uygulanmasındaki elde edilen titreşim değerleri şeklindeki sonuçların anlamlı bir şekilde birbirlerinden farklı olduğunun tespiti gerekmektedir. Bunun için yapılan değerlendirmelerde önem (Sig) değerlerinin güven katsayısı olan 0,05 değerinden küçük olması gerekmektedir. Tablo 2’de yapılan tüm deneylerden elde edilen her doğrultudaki (X, Y ve Z) önem (Sig) değerleri görülmektedir.

**Tablo 2.** Tüm deneylere ait “significant” değerleri

	Genlik Xg				Genlik Yg				Genlik Zg			
	Den.No	İstatistik	df	Önem (Sig)(P) değeri	Den.No	İstatistik	df	Önem (Sig)(P) değeri	Den.No	İstatistik	df	Önem (Sig)(P) değeri
	1	,197	93396	,000	1	,188	93396	,000	1	,173	93396	,000
	2	,218	84182	,000	2	,219	84182	,000	2	,233	84182	,000
	3	,217	279587	,000	3	,212	279587	,000	3	,138	279587	,000
	4	,123	77236	,000	4	,163	77236	,000	4	,209	77236	,000
	5	,123	256504	,000	5	,116	256504	,000	5	,065	256504	,000
	6	,360	165039	,000	6	,219	165039	,000	6	,381	165039	,000
	7	,125	74451	,000	7	,129	74451	,000	7	,146	74451	,000
	8	,154	65313	,000	8	,124	65313	,000	8	,115	65313	,000
	9	,073	237907	,000	9	,086	237907	,000	9	,083	237907	,000
	10	,342	59631	,000	10	,260	59631	,000	10	,340	59631	,000
	11	,075	223433	,000	11	,063	223433	,000	11	,125	223433	,000
	12	,329	194814	,000	12	,452	194814	,000	12	,449	194814	,000
	13	,249	95982	,000	13	,243	95982	,000	13	,243	95982	,000
	14	,301	58464	,000	14	,132	58464	,000	14	,329	58464	,000
	15	,136	231015	,000	15	,106	231015	,000	15	,070	231015	,000
	16	,371	78075	,000	16	,172	78075	,000	16	,187	78075	,000
	17	,095	270591	,000	17	,082	270591	,000	17	,058	270591	,000
	18	,412	175891	,000	18	,310	175891	,000	18	,392	175891	,000

Tablo 2’deki tüm deneylerde önem (Sig.) değerlerinin 0,05 değerinin altında olduğu görülmektedir. Bu da elde edilen tüm deneylerde seçilen parametrelere bağlı olarak elde edilen genlik değerleri için anlamlı bir farklılığın olduğu anlamına gelmektedir. Deneyler ile ilgili diğer bir husus elde edilen titreşim değerlerinin normal dağılım gösterip göstermediğinin tespit edilmesidir. Bu tespitin amacı; ölçülen titreşim değerlerinin parametrik veya nonparametrik olmasının tespit edilmesidir. Böylece elde edilecek sonraki istatistikî sonuçların analiz yöntemi belirlenip regresyon fonksiyonu elde edilecektir. Normal dağılımın tespit edilmesinde, ilk ve en önemli gösterge, elde edilen X,Y ve Z doğrultusundaki titreşim değerleri (Genlik Xg,Yg,Zg) analizinde çarpıklık ve basıklık değerleridir. SPSS programından örnek bir deneydeki, deneye ait değerler Tablo 3’te, yapılan bu çalışmadaki tüm deneylere ait basıklıklık ve çarpıklık değerlerinin toplu gösterimi Tablo 4’te görülmektedir.

**Tablo 3.** Genlik değerlerinin çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) değerleri tablosu

		<i>İstatistik</i>	<i>Std.Hata</i>	
<b>Genlik Xg</b>	<b>Ortalama</b>	-0,003720097	0,0003738872	
	<b>95% Ortalama için anlamlık değeri</b>	<b>Alt Sınır</b>	-0,004452912	
		<b>Üst Sınır</b>	-0,002987282	
	<b>Medyan</b>	-0,003513318		
	<b>Standart Sapma</b>	0,1142627582		
	<b>Çarpıklık</b>	-0,994	0,008	
	<b>Basıklık</b>	8,378	0,016	

**Tablo 4.** Tüm deneylere ait Genlik Xg için çarpıklık (Skewness) ve basıklık (Kurtosis) değerleri

<i>Deney No</i>	<i>Değerler</i>	<i>Deney No</i>	<i>Değerler</i>	<i>Deney No</i>	<i>Değerler</i>
<b>1</b>	<b>Çarpıklık</b> -0,994	<b>7</b>	<b>Çarpıklık</b> -0,331	<b>13</b>	<b>Çarpıklık</b> -0,457
	<b>Basıklık</b> 8,378		<b>Basıklık</b> 3,287		<b>Basıklık</b> 10,021
<b>2</b>	<b>Çarpıklık</b> -0,022	<b>8</b>	<b>Çarpıklık</b> 0,270	<b>14</b>	<b>Çarpıklık</b> 1,816
	<b>Basıklık</b> 12,812		<b>Basıklık</b> 70,242		<b>Basıklık</b> 2,593
<b>3</b>	<b>Çarpıklık</b> 0,017	<b>9</b>	<b>Çarpıklık</b> -2,850	<b>15</b>	<b>Çarpıklık</b> -0,112
	<b>Basıklık</b> 31,024		<b>Basıklık</b> 176,949		<b>Basıklık</b> 20,196
<b>4</b>	<b>Çarpıklık</b> 0,576	<b>10</b>	<b>Çarpıklık</b> 3,330	<b>16</b>	<b>Çarpıklık</b> 3,581
	<b>Basıklık</b> 0,470		<b>Basıklık</b> 11,683		<b>Basıklık</b> 14,267
<b>5</b>	<b>Çarpıklık</b> 0,004	<b>11</b>	<b>Çarpıklık</b> -0,556	<b>17</b>	<b>Çarpıklık</b> -0,492
	<b>Basıklık</b> 14,314		<b>Basıklık</b> 8,269		<b>Basıklık</b> 4,526
<b>6</b>	<b>Çarpıklık</b> 3,587	<b>12</b>	<b>Çarpıklık</b> 5,540	<b>18</b>	<b>Çarpıklık</b> 6,406
	<b>Basıklık</b> 14,568		<b>Basıklık</b> 39,143		<b>Basıklık</b> 45,178

Tablo 4'te sadece X yönündeki genlik ölçümlerine ait "çarpıklık" ve "basıklık" değerleri verilmiştir. Burada herhangi bir ölçüm verisinin normal dağılım göstermemesi tüm değerlerin nonparametrik olduğunu göstermektedir. Yapılan daha önceki çalışmalarda bu değerlerin -1,96 ve +1,96 değerleri arasında [24], +1 ve -1 değerleri arasında [25], +1,5 ve -1,5 değerleri arasında [25] ya da +2 ve -2 [26] değerleri arasında olması, elde edilen ölçüm değerlerinin normal dağıldığının göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Tablo 4'teki değerlerde çarpıklık ve basıklık değerlerinin bu aralıktaki değerlerin dışında olduğu görülmektedir. Ayrıca diğer analizler yöntemleri olan histogram eğrileri grafikleri ve normal Q-Q testlerinde ölçülen X,Y ve Z yönündeki elde edilen genlik değerleri bizlere titreşim genlik değerlerinin normal dağılım şeklinde gerçekleşmediğini göstermiştir.

Regresyon işlemi öncesinde normal dağılım göstermeyen ve non parametrik olduğu belirlenen gruplar arasındaki ilişkinin de incelenmesi ve deney numarası olarak gösterilen grupların birbiri ile ilişkili olup olmadığı, başka bir tanımla her grubun ayrı davranış sergileyip sergilemediklerinin incelenmesi gerekmektedir. SPSS programında yapılan analizde Tablo 5'te gösterilen değerler elde edilmiştir.

**Tablo 5.** X, Y ve Z yönlerindeki genlik ölçümlerinin ilişkisel analizi

<b>Hipotez Testi Özeti</b>				
	<b>Benzerlik hipotezleri</b>	<b>Test Cinsi</b>	<b>Önem (Sig.) değeri</b>	<b>Karar</b>
<b>1</b>	Genlik X yönü'nün dağılımı, Deney No kategorileri arasında aynıdır.	Kruskal-Wallis bağımsız örnek testi	,000	Benzerlik hipotezi red
<b>2</b>	Genlik Y yönü'nün dağılımı, Deney No kategorileri arasında aynıdır.	Kruskal-Wallis bağımsız örnek testi	,000	Benzerlik hipotezi red
<b>3</b>	Genlik Z yönü'nün dağılımı, Deney No kategorileri arasında aynıdır.	Kruskal-Wallis bağımsız örnek testi	,000	Benzerlik hipotezi red

Tablo 5'te görüldüğü üzere tüm ölçüm yönlerinde (X, Y ve Z) elde edilen değerlerin benzerlik hipotezlerinin red edildiği (sarı bölge-H<sub>0</sub> hipotezi red) ve önem (Sig.) değerlerinin 0,05 değerinden küçük olması nedeniyle tüm yönlerdeki ölçüm gruplarının (1-18) birbirinden farklı gruplar olduğu ve birbirinden farklı davranış sergilediği anlaşılmaktadır.

Belirtme katsayısı şekliyle tanımlanan R<sup>2</sup> sayısı, bir deney setinde seçilen bağımsız değişkenlerin ölçüm sonucu olan değerleri ifade eden bağımlı değişkeni açıklama oranı olarak tanımlanmaktadır. Yapılan analizlerde SPSS de elde edilen R<sup>2</sup> değerleri X yönüne bağlı olarak %88.7, Y yönüne bağlı olarak %89.6 ve Z yönüne bağlı olarak %89.3 olarak saptanmıştır. Bu değerler her üç yönde seçilen kesme parametrelerinin (bağımsız değişkenlerin) ölçülen her yöndeki (X, Y ve Z) titreşim genlik değerlerini (bağımlı değişken) bu değerlerde ifade edebildiklerini göstermektedir. Bu sonucun 1'e yakın olması da bu açıklama oranının güçlü olduğunu göstermektedir.

Elde edilen regresyon modelinin anlamlı olup olmadığının belirlenmesi amacıyla her üç yöndeki elde edilen genlik değerlerine yönelik ANOVA analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 6, 7 ve 8'de görülmektedir.

**Tablo 6.** X yönünde elde edilen titreşim değerleri (Genlik X) ANOVA analizi

<b>ANOVA<sup>a</sup></b>						
	<b>Model</b>	<b>Kareler Toplamı</b>	<b>df</b>	<b>Kareler Ortalaması</b>	<b>F</b>	<b>Önem değ.</b>
	<b>Regresyon</b>	976597,692	3	325532,564	11754,971	,000 <sup>b</sup>
<b>1</b>	<b>Hata</b>	75365807,777	2721457	27,693		
	<b>Toplam</b>	76342405,468	2721460			

a. Bağımlı değişken: Genlik X yönü

b. Değişkenler: (Sabit), Talaş Derinliği mm, Yaklaşma açısı, İlerleme mm/dev



**Tablo 7.** Y yönünde elde edilen titreşim değerleri (Genlik Y) ANOVA analizi

ANOVA <sup>a</sup>					
Model	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Önem değ.
1	<b>Regresyon</b>	3	172454,452	9893,538	,000 <sup>b</sup>
	<b>Hata</b>	2721458	17,431		
	<b>Toplam</b>	2721461			

a. Bağımlı değişken: Genlik Y yönü

b. Değişkenler: (Sabit), Talaş Derinliği mm, Yaklaşma açısı, İlerleme mm/dev

**Tablo 8.** Z yönünde elde edilen titreşim değerleri (Genlik Z) ANOVA analizi

ANOVA <sup>a</sup>					
Model	Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Önem değ.
1	<b>Regresyon</b>	3	80813,763	5180,902	,000 <sup>b</sup>
	<b>Hata</b>	2721481	15,598		
	<b>Toplam</b>	2721484			

a. Bağımlı değişken: Genlik Z yönü

b. Değişkenler: (Sabit), Talaş Derinliği mm, Yaklaşma açısı, İlerleme mm/dev

ANOVA analizine ait yukarıda verilen tablolarda belirtilen önem (Sig.) değerlerinin 0,05 değerinden küçük olması, elde edilen denklemin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle %95 güven aralığında olduğunu ifade etmektedir. Tüm yönlerdeki önem (Sig.) değerlerinin 0,000 olduğu görülmekte ve bu sonuç ta oluşturulmuş model denklemlerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Son olarak her üç yöndeki elde edilen regresyon denklemlerine ait her değişkenin katsayılarının tespiti yapılmış ve elde edilen tüm katsayılar Tablo 9, 10 ve 11’de verilmiştir.

**Tablo 9.** X yönü ile elde edilen regresyon modeli katsayılar tablosu

Katsayılar <sup>a</sup>						
Model	Standart olmayan Kat.		Standart Katsayılar		Önem değ.	
	B	Std. hata	Beta	t		
1	(Sabit)	-0,628	0,010		-60,993	0,000
	Yaklaşma açısı	-0,005	0,000	-0,011	-18,377	0,000
	İlerleme mm/dev	1,858	0,020	0,057	93,088	0,000
	Talaş Derinliği mm	0,649	0,005	0,087	141,884	0,000

a. Bağımlı değişken: Genlik X yönü

**Tablo 10.** Y yönü ile elde edilen regresyon modeli katsayılar tablosu

<b>Katsayılar<sup>a</sup></b>					
<b>Model</b>	<b>Standart olmayan Kat.</b>		<b>Standart Katsayılar</b>		<b>Önem değ.</b>
	<b>B</b>	<b>Std. hata</b>	<b>Beta</b>	<b>t</b>	
<b>(Sabit)</b>	-0,460	0,008		-56,328	0,000
<b>1</b> <b>Yaklaşma açısı</b>	-0,003	0,000	-0,008	-13,460	0,000
<b>İlerleme mm/dev</b>	1,827	0,016	0,071	115,421	0,000
<b>Talaş Derinliği mm</b>	0,375	0,004	0,063	103,327	0,000

a. Bağımlı değişken: Genlik Y yönü

**Tablo 11.** Z yönü ile elde edilen regresyon modeli katsayılar tablosu

<b>Katsayılar<sup>a</sup></b>					
<b>Model</b>	<b>Standart olmayan Kat.</b>		<b>Standart Katsayılar</b>		<b>Önem değ.</b>
	<b>B</b>	<b>Std. Hata</b>	<b>Beta</b>	<b>t</b>	
<b>(Sabit)</b>	-0,547	0,008		-70,813	0,000
<b>1</b> <b>Yaklaşma açısı</b>	0,007	0,000	0,021	34,825	0,000
<b>İlerleme mm/dev</b>	0,936	0,015	0,038	62,510	0,000
<b>Talaş Derinliği mm</b>	0,302	0,003	0,054	88,073	0,000

a. Bağımlı değişken: Genlik Z yönü

Tablo 9, 10 ve 11 incelendiğinde her üç yönde de titreşim üzerine en büyük etkinin sırasıyla ilerleme, talaş derinliği ve yanaşma açısı olduğu görülmektedir. Önem (Sig.) değerlerinin tüm yönlerde ve parametrelerde 0,05 değerinden küçük olması da her parametrenin denklem içinde anlamlı bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca ilerleme değerinin etkisi X ve Y yönlerinde daha çok etkisini göstermekte, Z yönünde bu etkinin en fazla olmasına rağmen biraz düştüğünü görmekteyiz. Talaş derinliği olarak X yönünde en büyük etki görülmekte, Y ve Z yönünde ise talaş derinliğinin titreşim üzerine benzer etki yaptığı görülmektedir. Yaklaşma açısının tüm yönlerde en düşük etkiye sahip olduğu ve her üç yönde de birbirine yakın etkiler oluşturduğu da ayrıca anlaşılmaktadır. Bu sıralamalar benzer çalışmalarda da benzer şekilde bulunmuştur [10, 13, 27]. Ancak Sudjatmiko ve arkadaşlarının çalışmasına paralel olarak [7] Uç radüsü ve yüzey pürüzlülüğü formülü beraber düşünüldüğünde burun radüsü ve ilerleme arasında birebir ilişki bulunduğu gözönüne alınırsa, TİO oranı ve ilerleme arasında da güçlü bir ilişki olduğu söylenebilir. Yine aynı çalışmada [7], 0.8 mm. burun radüsü, 1150 dev/dak. devir sayısı ve 0.5 mm talaş derinliğinde elde edilen regrasyon modeline göre en yüksek TİO oranı olarak 10.14 bulunmuştur. TİO'nun bu değerinde Ra=1.12 µm, ve 0.3 mm serbest (yan) kenar aşınma değeri elde edilmiştir. Bu değer Zülküf ve arkadaşının yaptığı çalışmada [17], 30°'lik yaklaşma açısında yan kenar aşınma miktarına (Vb=0.2658 mm) yakın olarak elde edilmiştir.

TİO oranı ve yaklaşma açısı beraber düşünüldüğünde oluşturulan regresyon analizinde her üç yönde de elde edilen R<sup>2</sup> değerleri çok küçük değerlerde çıkmıştır. Bu sonuç elde edilen modellerin genlik değerlerini açıklamada yetersiz olduğunu göstermiştir.

Tüm analizler sonucunda oluşturulan regresyon modellerinden X, Y ve Z yönündeki titreşim değerleri üzerine elde edilen denklemler sırasıyla 2, 3 ve 4 nolu denklemlerde görülmektedir.

$$GXg=-0,628+1,858*f+0,649*a-0,005*Kr \quad 2$$

$$GYg=-0,460+1,827*f+0,375*a-0,003*Kr \quad 3$$

$$GZg=-0,547+0,936*f+0,302*a+0,007*Kr \quad 4$$

#### 4. SONUÇ ve ÖNERİLER (CONCLUSION and SUGGESTIONS)

TİO, ilerleme, talaş derinliği ve yaklaşma açısının titreşim üzerine etkisi ve oluşturulan regresyon modeli ile ilgili elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Titreşim değerleri ile ilgili tüm deneylerde yaklaşma açısının  $15^0$  ve  $45^0$  değerlerinde çok daha yüksek kararsızlıklar görülmüştür. Bu açılardaki kararsız olmayan ve daha stabil titreşim değerleri talaş incelme oranının 1 ve 10 olduğu durumlardır. Titreşim değerlerinin en stabil şekli, TİO'nun tüm değerlerinde yaklaşma açısının  $30^0$  olduğu tornalama işlemleridir. Bu durumun elde edilen talaş morfolojisi ile ilgili olduğu,  $30^0$  lik yaklaşma açısında tırtıklı ve deformasyon çatlaklarının en az büyüklükte elde edilmesinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır.
- Yüksek ilerleme ve talaş derinliği olan durumlarda yaklaşma açısının küçük ( $15^0$ ) ve büyük ( $45^0$ ) olduğu durumlarda en yüksek titreşim değerleri elde edilmiştir. Düşük talaş derinliği ve ilerleme oranlarında ise yaklaşma açısının etkisinin çok azaldığı görülmüştür. Düşük ilerleme ve talaş derinliklerinde hem kesme kuvvetlerinin daha az hem de daha düzgün talaş yapısı elde edilmesi neticesinde titreşim değerlerinin düşük değerlerde oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Her üç yönde de talaş incelme faktörünün 1 ve 10 olduğu durumlarda en düşük titreşimin olduğu görülmektedir. TİO'nun 1 ve 10 olduğu durumlarda yaklaşma açısının etkisiz olduğu da ayrıca görülmüştür. Buradan hareketle işleme zamanı bakımından bu katsayılarla kullanılan kesme parametrelerine göre hesaplama yapılarak en az iş zamanını sağlayan kaysayı seçilmelidir.
- TİO'nun tüm değerlerinde yaklaşma açısının  $30^0$  olduğu durumlarda en kararlı ve stabil genlik değerleri elde edilmiştir ve buna paralel olarak  $15^0$  ve  $45^0$  derecelik yaklaşma açılarında ise genlik değerleri arasında aşırı bir değişimin olduğu görülmüştür. Bu durumun elde edilen ve literatürce de desteklenen düzgün talaş yapısının  $30^0$  lik yaklaşma açısında oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir.
- En yüksek titreşim değerleri ilerleme yönündeki (Genlik Y) ölçümlerde elde edilmiştir. Bu da regresyon modeli ve daha önce yapılmış çalışmalarla uyumludur.
- TİO'nun 5 olduğu durumlarda oluşan talaşlarda daha çok tırtıklı yapının olduğu gözlenmiştir. TİO ve yaklaşma açısı beraber değerlendirildiğinde ise talaş biçimiyle ilgili herhangi bir yargıya varılamamıştır.
- Aynı TİO'na sahip deneylerde, daha yüksek talaş derinliklerine sahip TİO değerlerinde titreşim şiddetinin arttığını görülmektedir. Bu durumun artan talaş kesiti ve buna bağlı olarak talaş hacminin artışının sonucu olduğu düşünülmektedir.
- Yapılan analizlerde  $R^2$  değerleri, X yönüne bağlı olarak %88.7, Y yönüne bağlı olarak %89.6 ve Z yönüne bağlı olarak %89.3 olarak saptanmıştır.
- Titreşim değerlerinin her üç yönde de elde edilen değerlerine bağlı olarak oluşturulan regresyon modelinde en büyük etkinin ilerleme, daha sonra talaş derinliği ve en az etkinin takım yaklaşma açısı olduğu görülmüştür. Bu durum literatür ile de uyumlu olarak elde edilmiştir.
- TİO ile oluşturulan regresyon modellerinde anlamlı bir modele ulaşılamamıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada kendisiyle beraber birçok kısmını beraber yürüttüğüm ve geçen yıl yakalandığı COVID hastalığı nedeniyle aramızdan ayrılan değerli çalışma arkadaşım Doç.Dr.Zülküf DEMİR'e minnettarlığımı bildirirken, kendisine Allah'tan rahmet, yakınlarına sabırlar diliyorum.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1]. Liu, R., Eaton, E., Yu, M., Kuang, J. (2017). An investigation of side flow during chip formation in orthogonal cutting. *Procedia Manufacturing*, 10, 568-577.
- [2]. Sekulic, S. (1979). Investigation of tangential forces in metal cutting by dimensional analysis. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 20 (2), 155-164.
- [3]. M. C. Shaw. (1997). *Metal Cutting Principles*. Oxford University Press
- [4]. P. L. B. Oxley. (1989). *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to assessing Machinability*. Ellis Horwood, Chichester, UK.
- [5]. V. Pednekar, V. Madhavan, A. H. Adibi-Sedeh. (2004). Investigation of the transition from plane strain to plane stress in orthogonal metal cutting. In *ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 513-528
- [6]. K. Nakayama, M. Arai. (1987). Burr formation in metal cutting. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 36(1), 33-36
- [7]. Sudjatmiko, S., Rudy, S., Agus, S., Moch, A. C. (2019). Correlation of surface roughness, tool wear, and chip slenderness ratio in the lathe process of aluminum alloy-6061. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, (4 (1)), 54-60.
- [8]. Prasad, B. S., Babu, M. P. (2017). Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 197-211.
- [9]. Çelik, Y. H., Alp, M. S. (2020). Determination of milling performance of jute and flax fiber reinforced composites. *Journal of Natural Fibers*, 1-15.
- [10]. Gürbüz, H., Baday, Ş. (2019). CNC Torna Tezgâhlarında ayna ve punta basıncının yüzey pürüzlülüğü ve titreşim üzerine etkisinin taguchi metodu ile optimizasyonu. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 119-134.
- [11]. Şahinoğlu, A., Güllü, A. (2015). CuZn39Pb3 malzemenin torna tezgâhında işlenmesinde oluşan akım, ses şiddeti, titreşim ve yüzey pürüzlülük değeri arasındaki ilişkinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(3), 615-624.
- [12]. Kuntoğlu, M., Aslan, A. (2021). AISI 5140 Çeliğinin tornalanması esnasında yaklaşma açısı ve kesme parametrelerinin işlenebilirliğe etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1, DOI: 10.2339/politeknik.710376
- [13]. Şıklar, E., (2000). *Regresyon Analizine Giriş*, Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir.
- [14]. Asiltürk İ, Akkuş H. (2012). AISI 4140 çeliğinin sert tornalama işleminde kesici takım aşınmasının regresyon yöntemi ile istatistiksel olarak modellenmesi. 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi- 29-30. 258-268.
- [15]. Kara, F., Özbek, O., Kam, M. (2017). Saruhan, H. Optimization by Taguchi method of surface roughness and vibration in turning of AISI 4140 steel. In *II. International Academic Research Congress*. 1132-1140.
- [16]. Rogov, V. A., Siamak, G. (2013). Optimization of surface roughness and vibration in turning of aluminum alloy AA2024 using taguchi technique. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 7(11), 2330-2339

- [17]. Demir, Z., Adiyaman, O. (2019). Investigation of the effect of Chip Slenderness Ratio and Cutting Tool Approach Angle on Vibration Amplitudes and Chip Morphology. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 15(4), 423-431.
- [18]. Demir, Z., Adiyaman, O. (2019). Investigation of influence of approach angle and chip slenderness ratio on vibration, chip formation and surface quality in turning of AISI 1050 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(10), 1-15.
- [19]. Kronenberg M., (1996) *Machining science and application theory and practice for operation and development of machining processes*, Arrowsmit Ltd. UK, 170-182.
- [20]. Zhang G, Guo C. (2015). Modeling of cutting force distribution on tool edge in turning process. *Procedia Manuf* 1: 454–465
- [21]. Bordin A, Bruschi S, Ghiotti A. (2014). The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in dry turning of CoCrMo alloy. *Procedia CIRP* 13: 219–224
- [22]. Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., & Yamane, Y, Tool damage. (2000). *Metal Machining*, 118-135
- [23]. Kim, H.-Y. (2013). Statistical notes for clinical researchers: assessing normal distribution (2) using skewness and kurtosis. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 38(1), 52–54.
- [24]. Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L. (2013). *Multivariate Data Analysis*. Essex, England.
- [25]. Tabachnick, B. G., Fidell, L. S. (2013). *Using multivariate statistics: International edition*. Pearson 2012.
- [26]. George, D. (2011). *SPSS for windows step by step: A simple study guide and reference*, 17.0 update, 10/e. Pearson Education India
- [27]. Okan, O. R. A. L., Çolak, O., Bayhan, M. (2020). Ti6Al4V Malzemesinin Frezelenmesinde Takım Titreşiminin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 381-390.



## Biologically Inspired Design: A Case Study on Furniture Design Experiences of Interior Architecture Students

Gülçin Cankız ELİBOL<sup>1</sup> Vildan DÜNDAR TÜRKKAN<sup>1,\*</sup> İsmail BEZCİ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hacettepe University of Faculty of Fine Arts, Department of Interior Architecture and Environmental Design, Çankaya/ ANKARA

### Article Info

Research article  
Received: 05.10.2021  
Revision: 12.11.2021  
Accepted: 15.11.2021

### Keywords

Biomimicry  
Design  
Furniture  
Inspiration  
Nature

### Abstract

This study represents the furniture design course outputs of a group of Interior Architecture and Environmental Design Bachelor's Degree students, working on biologically inspired designs. The aim of the study is to put forward an alternative inspiration-transformation-design process by briefly touching the notion of biomimicry; and by this means to raise the awareness of biological inspiration sources in furniture design. Study reveals the conceptual and final product design suggestions of 38 senior class students. Two essential processes were followed in the study; solution-driven design process and problem-driven design process. Findings showed that there have been some common features and differences between these two processes, in terms of finding the starting point and approaching the final design decisions. In both processes, it was seen that the last steps -principle application- involved a particular process, compared to the other steps in each process. Research and analysis based actions, seen in initial steps, gave place to sketching, design development and the usage of professional notions in the final steps. It can also be said that in both processes, the first steps involved the preparation stages regarding the design inputs, whereas in final steps a transform of information regarding the design output can be observed. These two linear processes were thought to be connected with two essential methods; inductive method and deductive method. Within this scope, 38 design ideas were put forward and suggestions were made regarding the processes.

## 1. INTRODUCTION

Notion of biomimicry, which constitutes the main focus of this study, was approached and defined in many studies in several disciplines. Maglic (2012) basically specifies that the question is, can we take the philosophy behind the living organisms and use them in the development of mankind? Accordingly, he gives the answer as yes, we can, and it is called Biomimicry [1].

Yet, Biomimicry does not usually mean the direct transfer of an observation in nature to the development of a product, but rather the creative implementation of biological concepts into products [2]. Actually, the practice of borrowing ideas from other domains for solving technical challenges corresponds to a close act; design by analogy. It is a technique widely applied by innovators or designers. Analogous solutions are sourced from other industries, but designers by analogy look to a more distant domain for solutions – biology [3].

While designers have used biology as an inspiration for thousands of years, no normative process was existing specific to the practice of biologically inspired design for years [4]. While, in the last few decades, some extensive studies (for instance Helms et al. (2009)) have been conducted on the methodology of this approach in design. Researches on developing biomimetic systems, involving a detailed understanding of biological phenomena with the goal of developing technologies that mimic such phenomena, has steadily been increasing. Notable attempts such as the development of bulletproof jackets by mimicking spider webs; robots that mimic various forms of natural movement such as those by fishes, leeches, and earthworms; and materials that mimic various properties of natural materials are just a few examples of such works [5]. Utilizing trees, flowers, leaves and human skeleton system in roof structures, animal bodies and movement mechanisms in transportation vehicles are such additional examples. Vipers were also

known to inspire defense industry, as their nervous system was utilized in rocket detectors [6]. Likewise, when robots used in space researches are investigated, it can be seen that many nature inspired studies do exist. Nature inspired robotics technology has been developing by exploring the mechanisms of living organisms. The movement mechanisms of living organisms, their balance, their attitude and the communication between them have been investigated by engineers and researchers from the fields of social sciences, since decades [7].

Design by analogy to biology, often called biomimicry, can simply be defined as the innovation gained through the emulation of biological forms, processes, patterns, and systems [3]. The core concept and the starting point of Biomimicry is that nature develops highly effective, sustainable ways of performing functions, which could benefit designers when tackling comparable challenges [8]. The field of biomimicry, where flora, fauna or entire ecosystems are considered as a basis for design, has attracted worldwide interest in the fields of architecture and engineering. The widespread and practical application of biomimicry as a design method remains, however, largely unrealized; interior architecture commonly use biology as a library of shapes or decoration, but imitating or being inspired solely by natural-looking forms, textures and colors is not biomimetic; it has to involve some biology. Thus, to be truly biomimetic, a design should, in some way, get inspired by the nature's science, not just by the appearances. Nature is a good teacher in this regard, but as it is mentioned above, imitating or being inspired by natural-looking forms, textures and colors alone is not biomimetic [9].

According to Benyus, the quest of biomimicry is to explore nature's masterpieces such as photosynthesis, self-assembly, natural selection, self-sustaining ecosystems, eyes and ears and skin and shells, talking neurons, natural medicines, and more; and then copying these systems and manufacturing processes to solve our own problems; in other words, the conscious emulation of life's genius [10].

Many of the simple structured inventions, facilitating our lives, observed to be nature inspired. Simple and practical solutions actually play essential roles in our lives and observation is the significant way to explore them. Designing activity is generally accepted to be an action based on a problem solving process. Thus, the problem should clearly be defined before this complicated task. Nature is needed to be observed while working on this solutions, and how it strives with it, remains as another question. This route, shall lead a nature friendly design process [6].

Many sustainable approaches have developed for over decades and these approaches found to be generally promoted human well-being by encouraging an efficient use of resources and energy, and by reducing waste or developing techniques for recycling. The approaches used various terminologies that include green design, environmental design, eco-design, sustainable design, bio-climatic design, climate sensitive design, low-energy design etc., all based on environmental principles, striving for efficiencies [11]. The transformation of the notion of Biomimicry into a term indicates to the systematization process regarding the designing activities inspired by nature. As Biomimicry has gained a conceptual volume and deepened its scope since the mid of the last century, it has started to get integrated in the design processes day by day. By this means, it becomes a significant component of the scientific design processes including research and development activities, instead of being a random aspect of individual design processes [12].

Making innovations using Biomimicry is generally based in two methods: from biology to design and from design to biology. In the first approach, the design limitation is tried to be solved by using a biological phenomenon, whereas in the other method, the design problem is gathered in a specific function, and various organisms and the ecosystem are observed in order to understand the way they solve the said function [13].

Following this information, the categories of biomimicry that can be considered in relation to design was basically divided into the following groups by Volstad and Boks (2012):

- Materials (in material science)
- Mechanics/dynamics (in general engineering and locomotion)
- Structure (in structural engineering and architecture)
- Form (in architecture and art)

It is important to note that the groups above do not refer to the general categorization of areas in which designers specialize, as, for instance, industrial design incorporates much more than can be put into the four

groups above [2]. Field of interior architecture may also use some of these categories together in this means, as it involves several service areas, such as the design of interiors, furniture design, material selection, repurposing, design of structural elements etc.

Biomimicry based space design criteria, within this scope, need to be approached in a wholistic way and the components of a structured system should not be considered individually. The aim in this approach is not only inspiring from a form in nature, instead, particularly in architectural design, the rules and functions leading and controlling these forms need to be investigated and reflected to the design steps [14].

In the past, interior design profession has not formally incorporated the biomimicry process into its standard practice. The biomimetic approach was offered as an optional method by only a few in the industry. However, biological discoveries are multiplying exponentially, and designers should take advantage of these cutting edge solutions [15]. Understanding how the biological systems effectively get adapted to limited sources and hard conditions seems quite important for biomimicry [13].

This design process extended further through using: mimicking or taking creative inspiration from natural mechanisms such as camouflaging, defense techniques, locomotion, attraction of the opposite, forces of gravity, least energy systems, use of local resources and behavioral patterns as mechanisms of integration and adaptation [11]. These approaches, which are in great respect to the future generations and other forms of living organisms, indicate a nature friendly discipline and a responsible human attitude [12]. Nature is reliable, compatible and sustainable; it uses energy only in its requirement limits, it piles no wastes and is a great recycler. Thus, biomimicry is considered as a pathfinder particularly in designs in engineering sciences. Biological systems are characterized according to their dimensions, sensitivity and strength. These features enable designers to use these principles in developing human made systems. As the things that living organisms do, form the nature's process and characteristics, it becomes a substantial issue for a designer to know these features and to connect them with designs [16].

Within this scope, this study represents an experimental and comparative approach to furniture design inspired by nature. The aim is to bring in a different point of view to furniture design by providing a timeless inspiring agent; and to raise the awareness in terms of biomimicry. The method used in the study, the process and findings are given in the following titles.

## 2. METHOD

This study offers a biology based inspiration for the furniture design activities of interior architecture students. Within this purpose, this study represents a group of senior class students' Furniture Design course outputs -supervised by the authors-, in Hacettepe University (Ankara, Turkey), Department of Interior Architecture and Environmental Design, in this respect.

According to Helms et al. (2009) the biologically inspired design process can be considered in two main processes:

### 1: Problem-driven biologically inspired design process [4]

- Step 1: problem definition
- Step 2: reframe the problem
- Step 3: biological solution search
- Step 4: define the biological solution
- Step 5: principle extraction
- Step 6: principle application

### 2: Solution-driven biologically inspired design process [4]

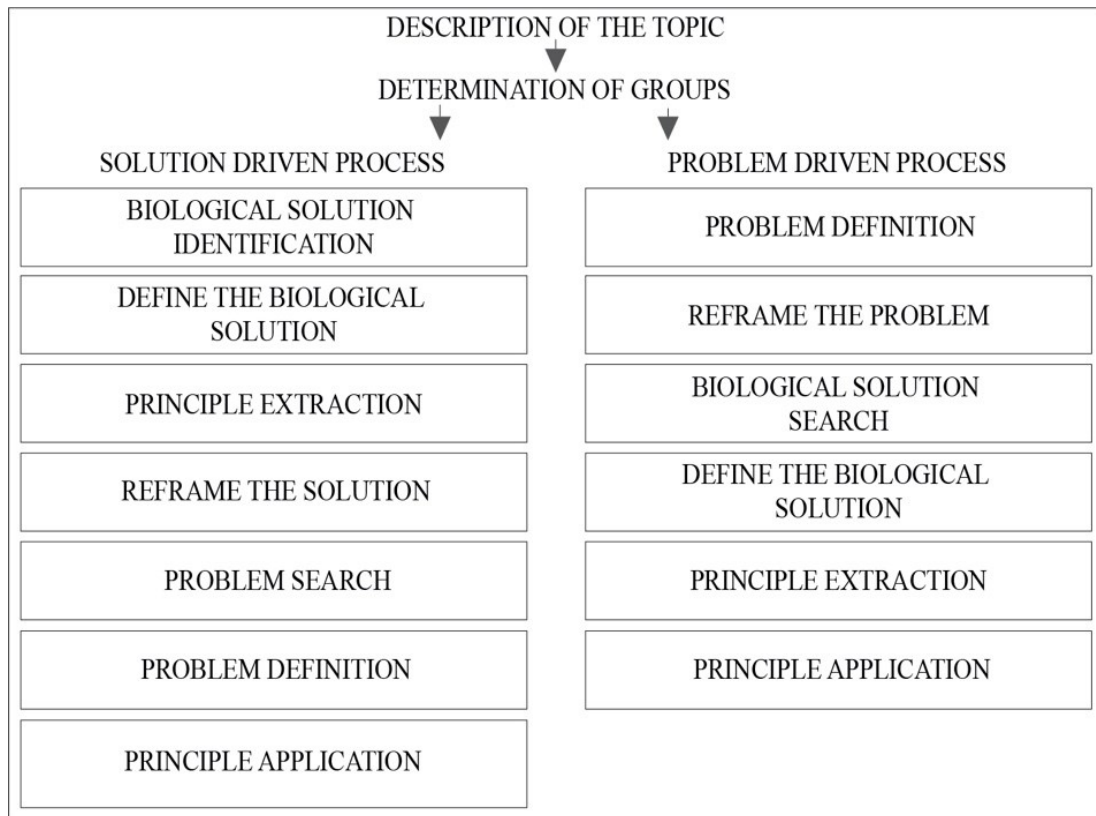
- Step 1: biological solution identification
- Step 2: define the biological solution
- Step 3: principle extraction



- Step 4: reframe the solution
- Step 5: problem search
- Step 6: problem definition
- Step 7: principle application

El-Zeiny (2012) also states that biomimicry, as a design process, typically falls into two categories: Problem-based approach (Top –Down Approach) and Solution-based approach (Bottom-Top Approach) [9].

Within this framework, the scope of the process conducted in this study was planned in accordance with the stages defined by Helms et al. (2009); and the students were organized in two main groups – solution-driven and problem-driven design processes. The backbone of the whole process is given in Figure 1, in which the substages can also be followed.



**Figure 1.** Basic stages and substages of the process.

As it can be seen in Figure 1, firstly the students were informed regarding the scope of the study (description of the topic). In this stage, students were informed about the notion of biomimicry; and they were encouraged to make essential researches on the topic. Secondly, two main groups for working through solution-driven and problem-driven design processes were organized (determination of groups). Figure 1 also shows the substages under these processes. The first group (solution-driven) consisted of 20 students, and the second group (problem-driven) consisted of 18 students. Participants were planned to work individually instead of group works.

Students worked for 14 weeks and followed all the estimated substages. At the end of the term, 38 designs were put forward in terms of biologically inspired design with 38 different inspiration points. The findings were then assessed and evaluated comparatively, regarding the drivers.

### 3. STUDY: BIOLOGICALLY INSPIRED FURNITURE DESIGNS

As the study involves many substages, it was found useful to present the processes through exemplary works from both groups. Within this scope, solution-driven and problem-driven design processes are to be

handled respectively under this title. Figure 2, Figure 3 and Figure 4 involve three exemplary works selected among 20 designs put forward in solution-driven group.

BIOLOGICAL SOLUTION IDENTIFICATION 1	DEFINE THE BIOLOGICAL SOLUTION 2	PRINCIPLE EXTRACTION 3
REFRAME THE SOLUTION 4	PROBLEM SEARCH 5	PROBLEM DEFINITION 6
PRINCIPLE APPLICATION 7		

Figure 2. First exemplary work (by Cansu Çamur) from the solution-driven group.


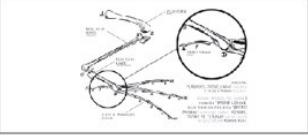
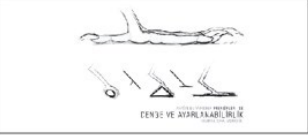
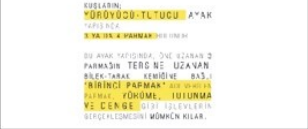



As it can be seen in Figure 2, the first substage to be followed for this group was the biological solution identification. In this stage, students were asked to search for a biological solution from nature. The students were free in selecting animals or plants. For instance, in this exemplary study, the lock-in system of the dogs jaw was taken as the inspiration point for the design to be developed. In the second substage, the biological solution was defined broadly; and in the third substage (principle extraction), the working principles of the selected solution were investigated and analyzed in detail. The fourth step was to reframe the solution, in which the main point was figured out. In the fifth step, the problems that may be solved by the selected solution, were specified. For instance, in this example, the outputs of the fifth step were specified as transportation and unlocking. Then, in the fourth step, the problem was defined and the first drafts of the design was put forward. In the last and seventh step, the principle was integrated to the solution, and the design sketches were developed to put forward a new furniture design.

BIOLOGICAL SOLUTION IDENTIFICATION 1	DEFINE THE BIOLOGICAL SOLUTION 2	PRINCIPLE EXTRACTION 3
REFRAME THE SOLUTION 4	PROBLEM SEARCH 5	PROBLEM DEFINITION 6
PRINCIPLE APPLICATION 7		

Figure 3. Second exemplary work (by İpek Şahin) from the solution-driven group.

Figure 3 shows another example, in which the biological solutions of kangaroo was handled. Carrying and balance, were taken into consideration as the main biological solutions. The solution was analyzed in a detailed way, and in the third step, the principle was extracted clearly. After reframing the solution,

problems were searched and defined as the unbalanced structures of furniture, and the weaknesses in terms of load bearing. In the last and the seventh step, a whole new design can be seen, in which the structural problems are solved by these means; and an open storage unit was provided by getting inspired from the systems initially given in step 1 and 2.

BIOLOGICAL SOLUTION IDENTIFICATION	1	DEFINE THE BIOLOGICAL SOLUTION	2	PRINCIPLE EXTRACTION	3
					
REFRAME THE SOLUTION	4	PROBLEM SEARCH	5	PROBLEM DEFINITION	6
					
PRINCIPLE APPLICATION	7				
					

**Figure 4.** Third exemplary work (by Yusuf Çakar) from the solution-driven group.

Figure 4 shows another exemplary work involving a solution from the birds leg. In step 2, the solution was defined and in step 3 it was extracted as balance and adjustability. In step 4, 5, and 6, the solution was integrated to a problem, as well as done in the previous examples. The last step, involving the principle application, indicates another whole new design, solved through this solution-driven process.

The outputs of the first approach are given in Figure 5. All the designs partaking in the figure were developed according to the solution-driven process; and it can be seen that they offer more of a systematic solution, instead of solely visual innovations.

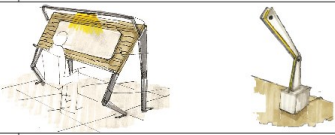


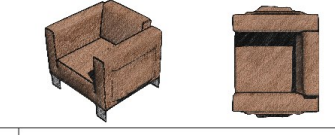

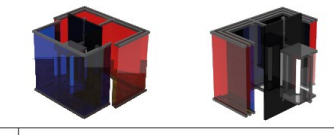












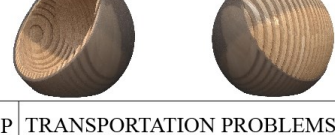

S	GRASSHOPPER	S	CROCODILE JAWS	S	BIRDS BALANCE
					
P	FIXEDNESS	P	OVERTURNING	P	SUN FLOWER AND ITS SEEDS
S	HAMSTER	S	SNAKE SKIN	S	CHAMELEON
					
P	STORAGE	P	ADJUSTABILITY PROBLEMS IN DIMENSIONS	P	COLOUR CHANGES
S	PINE CONE	S	ZEBRAS	S	HOUSE FLY LEGS
					
P	DIFFICULTY IN STORAGE AND ASSEMBLY	P	UNTIDINESS	P	DIFFICULTY IN ADJUSTABILITY
S	SPINE DISCS	S	TORTOISE SHELL	S	METAMORPHOSIS OF BUTTERFLY
					
P	FLEXIBILITY PROBLEMS	P	AGGREGATION PROBLEMS	P	DIFFICULTY IN TRANSFORMATION
S	GOLIATHUS	S	KANGAROO	S	SEA SHELL
					
P	ADJUSTABILITY PROBLEMS IN DIMENSIONS	P	BALANCE CONTROL	P	ADJUSTABILITY PROBLEMS IN LIGHTING
S	POMEGRANATE	S	BIRDS LEGS	S	SPIDER WEB
					
P	ORGANISATION PROBLEMS	P	BALANCE CONTROL AND ADJUSTABILITY PROBLEMS	P	GRIP PROBLEMS
S	ARMADILLO	S	DOGS JAWS		
					
P	TRANSPORTATION PROBLEMS	P	ASSEMBLY PROBLEMS		

Figure 5. Designs developed in the solution-driven process.

The second approach was the problem-driven design process and 18 students were included in this group. As well as the previously handled process, three exemplary works were selected and presented below in order for explaining the outputs of the substages.

PROBLEM DEFINITION	1	REFRAME THE PROBLEM	2	BIOLOGICAL SOLUTION SEARCH	3
DEFINE THE BIOLOGICAL SOLUTION	4	PRINCIPLE EXTRACTION	5	PRINCIPLE APPLICATION	6

**Figure 6.** First exemplary work (by Huriye Yıldız) from the problem-driven group.

Figure 6 indicates the 6 step process, as this approach involves a 6 step progress different from the solution-driven design process. Besides, it can be seen that in this process, the steps are reversely sequenced contrary to the first approach. In the first step, the problem was found and defined by the student. For instance, in this example, the problems were determined as storage, structural strength and immobility/fixedness, and reframed in step 2. For this problem, nature was observed and analyzed in step 3 (biological solution search). In step 4, the biological solutions were defined and explained in detail; and in step 5, it was extracted as the spider legs system. In the last step (principle application), a new design, an adjustable stool-involving the biologically inspired solutions such as adjustable legs and with fine and strong structure-was developed.

PROBLEM DEFINITION	1	REFRAME THE PROBLEM	2	BIOLOGICAL SOLUTION SEARCH	3
DEFINE THE BIOLOGICAL SOLUTION	4	PRINCIPLE EXTRACTION	5	PRINCIPLE APPLICATION	6

**Figure 7.** Second exemplary work (by Kübra Keleş) from the problem-driven group.

Figure 7 shows another exemplary work from the problem-driven group, in which the problem was defined as discomfort. The problem was reframed in step 2 as wrong material selection. In step 3, biological solutions for this problem were searched, and the solution was found in hippopotamus skin. In step 4, the solution system was specified as the sun protection mechanism existing in the skin of hippopotamus. Following a deep research and observation process, the principle was extracted into the skin's micro structure. The skin emits a pigmented liquid to protect the animal from the UV rays of sun. This system indicates an action-reaction mechanism, which gives inspiration to the designer. In step 6, a new design was put forward, which has a changeable surface, in terms of softness, according to the weight it meets.

PROBLEM DEFINITION	1	REFRAME THE PROBLEM	2	BIOLOGICAL SOLUTION SEARCH	3
DEFINE THE BIOLOGICAL SOLUTION	4	PRINCIPLE EXTRACTION	5	PRINCIPLE APPLICATION	6

**Figure 8.** Third exemplary work (by Nur Yağmur Oğullar) from the problem-driven group.

Figure 8 shows a process driven by problem of being unfirm. The problem was reframed into constructional systems in step 2. In step 3, the solution was searched and defined as the ants' neck anatomy, in step 4. The principle was analyzed and extracted in step 5, and the neck anatomy was adapted to the construction system

as a bearing element. In step 6, the principle was applied in a new design as a table/stool construction system.

All the designs put forward by this means (problem-driven process) were represented in Figure 9.

P	FIXEDNESS	P	BEING UNBALANCED	P	DIFFICULTY IN DISASSEMBLY FOR RECYCLE
					
S	FLOWERS	S	MOUNTAIN GOAT	S	SUN FLOWER AND ITS SEEDS
P	WEIGHTINESS	P	UNCOMFORTABLENESS	P	DIFFICULTY IN DISASSEMBLY
					
S	BIRD BONES	S	HIPPOPOTAMUS SKIN	S	PANGOLIN AND SEA HORSES
P	DIFFICULTY IN ASSEMBLY	P	UNFIRMNESS	P	DIFFICULTY IN ADJUSTABILITY
					
S	MUSSEL SHELL	S	ANTS NECK	S	EARTH WORMS
P	DIFFICULTY IN MULTI-FUNCTIONALITY	P	DIFFICULTY IN TRANSPORT	P	SENSIBILITY TO TEMPERATURE
					
S	CELL ADAPTATION	S	MOTHER CATS AND KITTENS	S	SAHARAN SILVER ANT
P	BEING UNBALANCED	P	DIFFICULTY IN GRIP AND ASSEMBLAGE	P	STORAGE OF FURNITURE
					
S	BIRDS SPINAL CORD	S	ACARID	S	JAW BONES OF LAMANTINE
P	DIFFICULTY IN CLEANSING	P	DIFFICULTY IN STUFFING	P	DIFFICULTY IN DISPLACEMENT
					
S	CATS TONGUE	S	VACUOLE	S	GOLDEN ORB SPIDER

Figure 9. Designs developed in the problem-driven process.

In either Figure 5 or Figure 9, the biological inspiration points and solutions were written together above the designs, in order the impacts to be observed.

#### 4.CONCLUSIONS

When the processes are analyzed, it was observed that searching and finding a solution from nature was found easier than defining a problem as an initial point. In other words, giving a start to the solution-driven process was found to be a more flowing act.

In the solution-driven process, nature was taken either as a formal or a functional inspiration point; whereas in the problem-driven process, the functional aspects were taken into account in the first place.

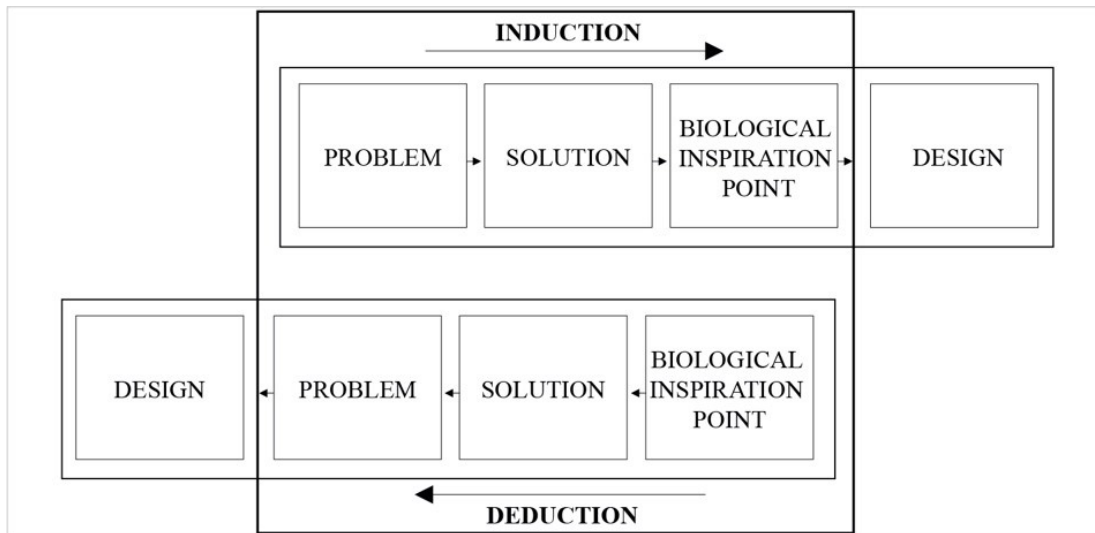
Functional integration can help to identify hierarchical connections and the synergy between technology, materials, structure and form [11].

However, the integration of chemical or micro scale solutions -such as shiny bacteria- to the design process were found to be a more complicated act in both processes; and it was observed that students might have desisted from using such aspects.

Besides, in the solution-driven process, students considered the two sequential steps together; step 3-principle extraction and step 4-reframe the solution. While, in problem-driven process, it can be said that steps were more definite.

In both processes, it would not be wrong to say that the last steps-principle application involved a particular process, compared to the other steps in each process. Research and analysis based actions, seen in several steps, gave place to sketching, design development and the usage of professional notions in the final steps.

Thus, it can be said that in both processes, the first steps involved the preparation stages regarding the design inputs, whereas in final steps a transform of information regarding the design output can be observed. It can also be said that these two linear processes may relate to two essential methods; inductive method and deductive method. In problem-driven process, the originating point is defined as a problem and in order to achieve the goal, the designer follows a progressive and accretionary task, just as in the inductive method. However in the solution-driven process, the final point is taken as a starting point, in other words a reverse action is made. Thus, a narrowing and customizing procedure comes forward similar to the deductive method.



**Figure 10.** Biologically inspired design activity.

In conclusion, both processes provided high potency conceptual and final product designs. As the aim of the study was not to reveal the more accomplished method, no such determination shall be made. Hence, the different experiences gained in both processes were tried to be introduced; and an alternative design inspiration system was suggested for further studies since the nature is considered as a timeless inspiration source for the whole design field.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to extend their sincere thanks to Anıl Tunçez, Atiye Yağmur Özcan, Ayşe Hande Çakır, Ayşe Meryem Gürel, Begüm Zülal Çelik, Beren Alp, Betül Gökdemir, Bilge Akalın, Billur Zeynep

Şengül, Buse Kul, Büşra Çobanoğlu, Büşra İnal, Cansu Çamur, Cemre Kaplan, Ebrar Kuruçay, Ecem Karagedikli, Esin Keçeli, Esra Taban, Gülsu Merve Öcal, Hamed Ahmadzadeh, Hatice Tül Kübra Çerez, Hilal Özcan, Huriye Yıldız, İlknur Soykan, İpek Şahin, İrem Gizem Öztürk, Kardelen Berfin Acar, Kübra Keleş, Nevzat Erkmen Dönmez, Nur Yağmur Oğullar, Özge Külünk, Rana Karaömer, Saynur Turhan, Serdar Çoban, Sümeyye Teke, Şeymanur Tunay, Yasemin Mülazım, Yusuf Çakar.

## REFERENCES

- [1] Maglic, M. J. (2021). Biomimicry: Using Nature as A Model for Design. Master's Thesis. Massachusetts: Architecture, University of Massachusetts Amherst.
- [2] Volstad, N. and Boks, C. (2012). On the use of Biomimicry as a Useful Tool for the Industrial Designer. *Sustainable Development*, 20(3), 189-199. <https://doi.org/10.1002/sd.1535>
- [3] Kennedy, E. B. (2017). Biomimicry: Design by Analogy to Biology. *Research-Technology Management*, 60(6), 51-56. <https://doi.org/10.1080/08956308.2017.1373052>
- [4] Helms, M., Vattam, S. and Goel, A. (2009). Biologically Inspired Design: Process and Products. *Design Studies*, 30, 606-622.
- [5] Chakrabarti, A. and Shu, L.H. (2010). Biologically inspired design. *Edam Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing – AIEDAM*, 24(4), 453-454. <https://doi.org/10.1017/S0890060410000326>
- [6] İner, S. (2019). Biyomimikri ve Parametrik Tasarım İlişkisinin Mimari Alanında Kullanımı ve Gelişimi. *Tasarım Enformatiği*, 1 (1), 15-29.
- [7] Yazıcı, A. M. and Kınay, M. (2021). Biyomimikri, Uzay Araştırmaları İçin Robotiklere Nasıl İlham Veriyor?. *Türk Hava Kurumu Üniversitesi Havacılık ve Uzay Çalışmaları Dergisi*, 1 (2), 64-77.
- [8] de Pauw, I. C., Karana, E., Kandachar, P. and Poppelaars, F. (2014). Comparing Biomimicry and Cradle to Cradle with Ecodesign: a case study of student design projects. *Journal of Cleaner Production*, 78, 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.077>
- [9] El-Zeiny, R. M. A. (2012). Biomimicry as a Problem Solving Methodology in Interior Architecture. *ASEAN Conference on Environment-Behaviour Studies, Bangkok, Thailand*. 502 – 512.
- [10] Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Perennial: An Imprint of Harper Collins Publishers.
- [11] Gamage, A. and Hyde, R. (2012). A model based on Biomimicry to enhance ecologically sustainable design. *Architectural Science Review*, 55, 224-235. <https://doi.org/10.1080/00038628.2012.709406>
- [12] Çelikel, S.B. ve Uçar, S. (2020). Biyomimikri: Doğayla Uyumlu Yeni Bir Tasarım Modeli, *Humanities Sciences (NWSAHS)*, 15 (2), 51-60.
- [13] Eryılmaz, H. (2015). Biyomimikri ve Ergonomi: Tasarımda Doğadan Yenilikçi İlham. *Süleyman Demirel University Journal of Engineering Sciences and Design*, 3 (3), 469 – 474.
- [14] Keskin, S. N. and Özen Yavuz, A. (2019). Biyomimikri Yöntemiyle Tasarlanmış Bir Yaşam Alanı: Salyangoz Barınağı. *ISAS 2019 3<sup>rd</sup> International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, SETSCI Conference Proceedings*, 4 (3), 88-93.
- [15] Rossin, K. J. (2010). Biomimicry: nature's design process versus the designer's process. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 138, 1743-3541. Doi: 10.2495/DN100501
- [16] Karabetça, A. R. (2018). Biyomimikri Destekli Tasarım Ölçütleri İle Yenilikçi Mekanlar Yaratılması. *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication – TOJDAC*, 8 (1), 104-111.





## Computer-Aided Interface Design for Real-Time Pupil Motion Detection and an Application for Physically Disabled Persons

Ahmet Reşit KAVSAOĞLU<sup>1</sup> , İsmail MERSİNKAYA<sup>2\*</sup> , Ömer Faruk YILDIZ<sup>1</sup> , Hasan GÜDEK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Biomedical Engineering, 78050, Center/KARABÜK

<sup>2</sup>Aydın Adnan Menderes University, Söke Vocational School, Department of Electronics and Automation, 09200, Söke/AYDIN

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 01.07.2021  
Revision: 24.10.2021  
Accepted: 16.11.2021

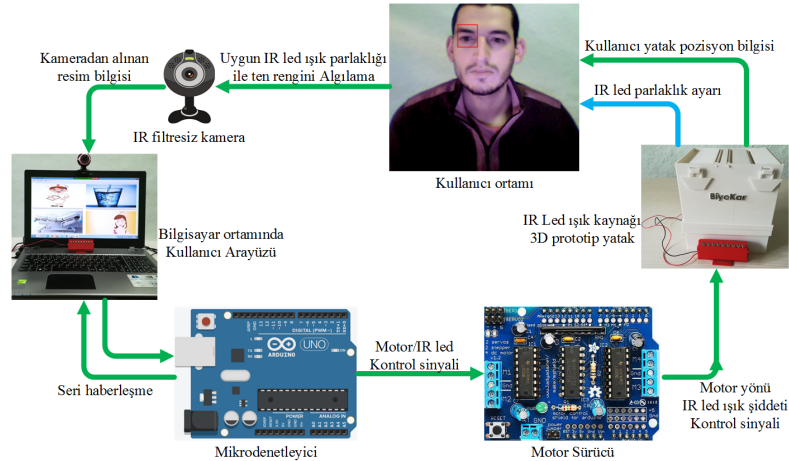
#### Highlights

- Pupil movements detection.
- C# Control Interface for disabled person.
- Adaptive IR-LED for pupil detection

#### Keywords

Pupil motion detection  
Adaptive IR-LED light  
Image processing  
Disabled person

In this study, a system is proposed to provide a human-computer interface was created in C# language so that individuals with physical mobility disabilities such as ALS can express their wishes. In the system created, pupil movements were analyzed, and the patient was enabled to express his wishes both visually and audibly.



**Figure A.** Real-time pupil tracking system with adaptive IR LED light brightness

**Purpose:** The aim of this study is to enable individuals with physical movement disabilities, such as ALS, to express their wishes without the need for any movement other than pupillary movement. It is to introduce a more practical and improved algorithm that can be used in pupil motion tracking systems by creating a unique algorithm for pupil motion detection.

**Theory and Methods:** In the system created for pupil movement tracking, the face of the patient, which was detected by the camera, was selected using the skin color filter. After the patient's face was selected, the eye frame was detected autonomously by the system. An adaptive IR LED light source has been designed to illuminate the eye area of the user. Pupil detection was performed with the developed image processing algorithms. According to the movements of the detected pupil, commands were created on the user interface by which the patient can express their wishes by using the position information that the patient is looking at. An application study was carried out by creating the prototype of the controlled patient bed with a 3D printer.

**Results:** The basis of the proposed system is, a control algorithm has been developed for individuals with physical movement disability who cannot express their needs, allowing them to express their wishes using only pupillary movements.

**Conclusion:** In the usage tests of the developed system, it has been seen that through the adaptive light source developed using an adaptively adjustable IR LED light source, pupil movement could be detected with an accuracy of 95%.



## Computer-Aided Interface Design for Real-Time Pupil Motion Detection and an Application for Physically Disabled Persons

Ahmet Reşit KAVSAOĞLU<sup>1</sup> , İsmail MERSİNKAYA<sup>2,\*</sup> , Ömer Faruk YILDIZ<sup>1</sup> , Hasan GÜDEK<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 78050, KARABÜK

<sup>2</sup>Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Söke Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 09200, Söke/AYDIN

### Abstract

In this study, a human-computer interface was created in C# so that individuals with physical mobility disabilities such as ALS can express their wishes. In this system created, pupil movements were analyzed and the patient's wishes were expressed both visually and audibly. In the system created for the tracking of the pupil, the face of the patient, which was detected by the camera, was detected autonomously by the system. An adaptive IR LED light source has been designed to illuminate the eye area of the user. Pupil motion detection was performed with the developed image processing algorithms. According to the movements of the detected pupil, commands were created on the user interface to express the wishes of the patient by using the location information of the patient. An application study was carried out by creating the prototype of the controlled patient bed with a 3D printer.

At the end of this study, pupil motion detection was carried out using a camera without any contact with the user. With the algorithm created for pupil motion detection, it is ensured that the patient can express his wishes without the need for any movement other than eye movement. With this study, a uniquely developed algorithm that can be used in pupil tracking systems of individuals with physical movement disabilities such as ALS has been acquired.

### Gerçek Zamanlı Göz Bebeği Hareket Tespiti için Bilgisayar Destekli Arayüz Tasarımı ve Fiziksel Engelli Bireyler için Bir Uygulama

### Öz

Bu çalışmada, ALS hastalığı gibi fiziksel hareket engeline sahip bireylerin isteklerini ifade edebilmeleri için C# dilinde bir insan-bilgisayar arayüzü oluşturulmuştur. Oluşturulan bu sistemde göz bebeği hareketleri analiz edilerek hasta bireyin isteklerini hem görsel hem de sesli olarak ifade etmesi sağlanmıştır. Göz bebeği hareket takibi için oluşturulan sistemde kamera ile algılanan hasta bireyin yüzü, ten rengi filtresi kullanılarak seçilmiştir. Hasta bireyin yüzü seçildikten sonra göz çerçevesi, sistem tarafından otonom olarak tespit edilmiştir. Kullanıcının göz çevresinin aydınlatılması için adaptif IR led ışık kaynağı tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile göz bebeği tespiti yapılmıştır. Tespit edilen göz bebeğinin hareketlerine göre, kullanıcı arayüzü üzerinde hasta bireyin baktığı konum bilgisi kullanılarak isteklerini ifade edebilecekleri komutlar oluşturulmuştur. Kontrol edilen hasta yatağının prototipi 3D yazıcı ile oluşturularak bir uygulama çalışması yapılmıştır.

Yapılan bu çalışma sonucunda göz bebeği hareket tespiti kamera kullanılarak kullanıcıya herhangi bir temas olmadan gerçekleştirilmiştir. Göz bebeği hareket tespiti için oluşturulan algoritma ile hasta bireyin, isteklerini göz bebeği hareketi dışında herhangi bir harekete ihtiyaç duymadan ifade edebilmesi sağlanmıştır. Bu çalışma ile ALS hastalığı gibi fiziksel hareket engeli olan bireylerin göz bebeği hareketi takip sistemlerinde kullanılabilecek özgün olarak geliştirilmiş bir algoritma kazandırılmıştır.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 01.07.2021  
Düzeltilme: 24.10.2021  
Kabul: 16.11.2021

### Keywords

Pupil motion detection  
Adaptive IR-LED light  
Image processing  
Disabled person.

### Anahtar Kelimeler

Göz bebeği hareket tespiti  
Adaptif IR-LED ışık  
Görüntü işleme  
Engelli birey.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Videolardan elde edilen görüntülerden insan gözünün hangi noktaya baktığı bilgisi kullanılarak göz takip sistemleri oluşturulmaktadır. Gözün hangi noktaya baktığı  $i(x, y)$  koordinat bilgisi veya bulunan göz bebeğinin yarıçapı olarak tutulmaktadır. Elde edilen bu bilgiler nöropsikolojik çalışmalarda, insan-bilgisayar etkileşimlerinde, biyomedikal alanında, güvenlik sistemlerinde ve birçok araştırma alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Göz hareketleri incelenerek donanımsal sistemler için komutlar üretilebilir veya yazılımsal olarak bu hareketlerden bilgiler çıkarılabilir.

Yapılan araştırmalarda göz takibinin üç farklı yöntemle yapıldığı görülmüştür. Bu yöntemler manyetik lens kullanımı, elektro-okulografi kullanımı ve videodan alınan görüntülerin görüntü işleme teknikleri kullanılarak göz takibinin yapılması şeklindedir [2].

Manyetik lens kullanımı yönteminde Şekil 1'deki gibi göze yerleştirilen bir lens yardımıyla göz hareketleri incelenmektedir. Göze yerleştirilen bu lensler manyetik lensler olarak adlandırılır. Manyetik lenslerin içerisinde küçük bir bobin bulunmaktadır. Bu bobinde, yapay bir manyetik alan içerisinde göz hareketlerine bağlı olarak akım oluşur. Oluşan bu akım bilgisi işlenerek göz hareketleri işlenir [3].



*Şekil 1. Manyetik lens kullanımı*

Elektro-okulografi yönteminde göz çevresindeki kaslardan faydalanılır. Gözün etrafındaki hareketi sağlayan kasların üzerine yerleştirilen Şekil 2'deki elektrotlar yardımıyla ölçülen sinyaller işlenerek göz hareketleri incelenir [4] [5].



*Şekil 2. Elektro-okulografi yöntemi*

Video görüntüleme yöntemleri ile göz hareketi takip sistemleri, görüntü işleme algoritmaları kullanılarak göz hareketlerini takip etmekte ve incelemektedir. Bu yöntemin uygulanmasında farklı teknikler kullanılır. Bu tekniklerin çoğunda Şekil 3'te gösterildiği gibi gözlük üzerine yerleştirilmiş bir kamera, kafaya yerleştirilen bir aparat veya kafanın sabit tutulduğu sistemler tasarlanmaktadır [1] [6].

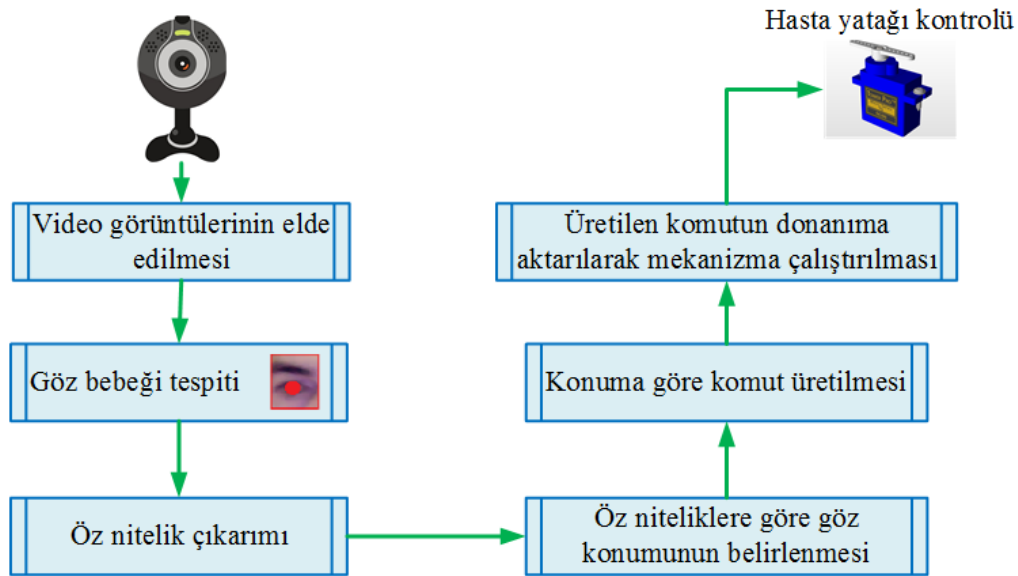


**Şekil 3.** Video görüntüleme yöntemleri

Özel manyetik lensler ve elektro-okulografi yöntemleri maliyeti fazla olması ve bu sistemlerin invaziv veya temas gerektirmesi kullanımı zorlaştırmakta ve kullanıcıyı rahatsız etmektedir. Gözlük üzerine yerleştirilen kamera ve ışık kaynakları hastaya doğrudan temas ettiği için kullanışlı olmamaktadır.

Görüntü işleme yöntemleri ile felçli, konuşma yetisini kaybetmiş kişiler ve ihtiyaçları başka kişiler tarafından karşılanması zorunlu fiziksel engelli bireylerin göz hareketlerini algılayan yazılım ve bu hareketler sonucunda üretilen komutlar ile hasta ihtiyaçlarının sesli veya görsel olarak anlatılması sayesinde hastanın kendi ihtiyaçlarını giderebilmesi amaçlanmaktadır [7].

Görüntü işleme yöntemlerinin non-invaziv olması ve diğer yöntemlere göre daha az maliyetli olması bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Şekil 4'te blok şeması verilen görüntü işleme algoritmaları ile yeni bir göz takip sistemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu sistem kamera görüntülerinin elde edilmesi, elde edilen görüntülerden göz bebeğinin bulunması, bulunan göz bebeği ve yüzdeki diğer özellikler kullanılarak öz nitelik çıkarımı, çıkarılan öz niteliklere göre gözün konumunun belirlenmesi, belirlenen konuma göre oluşturulan arayüz aracılığıyla istenen komutun üretilmesi ve üretilen komutun donanıma aktarılması işlemlerinden oluşmaktadır.



**Şekil 4.** Görüntü işleme algoritmaları ile göz bebeği takibi blok şeması

Göz bebeği tespiti ile ilgili yapılan bir çalışmada, göz takip sistemleri ile nöropsikolojik testler eş zamanlı kullanılarak bipolar bozukluğu olan kişiler analiz edilmiştir. Önceden seçilen bazı kelimeler ekranda gösterilmiş ve kişinin hangi kelimedeyi ne kadar vakit harcadığı ve kelimenin neresine odaklandığı bilgileri göz takip sistemleri yardımı ile elde edilip nöropsikolojik testler gerçekleştirilmiştir [1].

Mobil cihazların güvenlik düzeyini araştıran bir çalışmada ise göz bebeği takibi algoritmalarını kullanarak kullanıcının göz hareketleri ile sisteme güvenli bir şekilde girmesi amaçlanmaktadır [8]. Kısıtlı hareket becerilerine sahip bireyleri içeren bir çalışmada ise beyin sinyallerini algılayarak fare imlecini kontrol eden bir sistemin alt yapısı ile aynı sistemin hem göz hareketleri hem de beyin sinyalleri ile kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanıcının göz hareketleri incelenmiş ve göz kırpmaya hareketi bir fare imlecini tıklama görevinde kullanılmıştır [9].

Uzaktan eğitim döneminde sınav anında öğrencilerin kopya çekmesini engellemek amacıyla öğrencinin kullandığı kamera yardımıyla görüntünün alınıp görüntü işleme algoritmalarıyla öncelikle yüz tespiti yapıldığı daha sonra göz bebeğinin hangi noktalara baktığı ile ilgili bilgiler alınarak kopya çekimi engellenmeye çalışılmıştır [10] [11].

Göz takibi yapılabilen yöntemlerden manyetik lens kullanımı, vücuda temas ettiğinden ve pahalı bir sistem olduğundan dolayı tercih edilmemektedir. Elektro-okulografi yönteminde ise yine vücuda elektrotlar yardımıyla temas ettiğinden ve uzun süreli kullanımında kullanıcıyı rahatsızlık vermesinden dolayı tercih edilmemektedir. Bu çalışmada bahsedilen yöntemlere alternatif ve daha pratik bir sistem olarak tasarlanan, hasta bireye uzak mesafedeki kameradan alınan görüntüler ve sisteme bütünleşik çalışan adaptif IR led ışık kaynağı ile göz bebeği hareketi tespit algoritması tasarlanarak gerçek zamanlı ve her ortamda pratik kullanıma sahip bir uygulama geliştirilmiştir.

## **2. GÖZ BEBEĞİ HAREKETİ TESPİT ALGORİTMASI (PUPIL MOVEMENT DETECTION ALGORITHM)**

Göz bebeği tespit algoritmaları için öncelikli olarak yapılması gereken yüz bölgesinin bulunmasıdır. Daha sonra bulunan yüz çerçevesi içerisinde göz çukurlarının tespit edilmesi ve göz bebeğinin bulunması gerekmektedir. Göz bebeği bulduktan sonra konumlara göre hareketler analiz edilerek, arayüz üzerinde komutların üretilmesi sağlanmaktadır. Üretilen komutlar mikrodenetleyici üzerinden motor sürücüyü gönderilerek IR led ışık kaynağının parlaklığı adaptif olarak ayarlanmakta ve gerçek zamanlı bir uygulama için oluşturulmuş 3D prototip hasta yatağının kontrolü sağlanmaktadır.

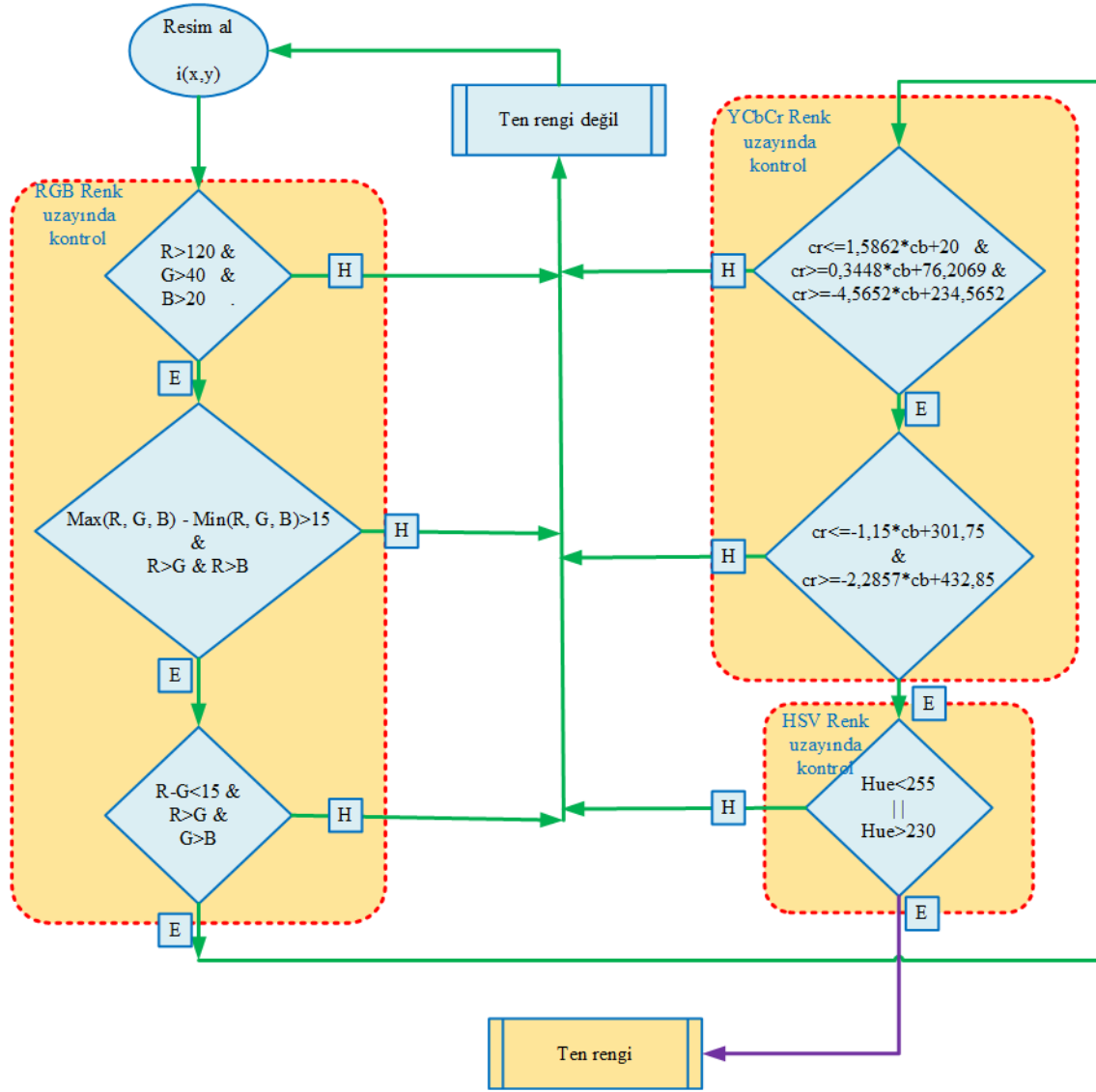
### **2.1. Arayüz yazılımı (Interface software)**

#### **2.1.1. Ten rengi filtresi (Skin color filter)**

Kamera görüntüleri üzerinde yüz bölgesinin tespiti için farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Viola-Jones yüz bulma algoritmaları gibi makine öğrenmesi temelli algoritmaların yanında, ten rengi filtresi gibi hızlı ve basit algoritmalar da yüz bölgesinin bulunması için oldukça sık kullanılmaktadır. Bu çalışmada da yüz bölgesinin tespit edilmesi için ten rengi filtresi kullanılmıştır [12] [13].

Ten rengi filtresini güvenilir bir şekilde uygulayabilmek için renk uzayları kullanılmaktadır. Renk uzayları renkler hakkında matematiksel bilgiler veren değerlerdir. Renk uzayları oluşturulurken bütün renkleri temsil edecek şekilde oluşturulur. Bu oluşturulan renk uzayları arasında matematiksel formüller kullanılarak dönüşümler sağlanabilir. En bilinen ve yaygın olarak kullanılan bazı renk uzaylarına RGB, CMYK, HSV ve YCbCr renk uzayları örnek olarak verilebilir. Ten rengi tespit edilirken kırmızı, yeşil ve maviden oluşan RGB renk uzayı tek başına yeterli olmayabilir. Çünkü RGB renk uzayında parlaklık değeri renklerle birlikte tutulur bu da farklı parlaklık seviyelerinde farklı sonuçlar alınabileceği anlamına gelmektedir. Bu sorunu aşmak için farklı renk uzaylarının bir arada değerlendirildiği bir sistem kullanılabilir. Örneğin RGB renk uzayı ile YCbCr renk uzayı da kullanılarak daha doğru ve farklı ışık seviyelerinde daha kararlı bir çıktı alınması sağlanabilmektedir. YCbCr renk uzayında parlaklık değeri ayrı olarak tutulmaktadır. Bu parlaklık değeri Y ile ifade edilmektedir. Bu renk uzayında Cb ile Cr bileşenleri ise renk bilgilerini ifade etmektedirler. Cb bileşeni referans ile mavi bileşen arasındaki farkı içerirken, Cr bileşeni referans ile kırmızı bileşenin farkını içermektedir [14].

Ten rengi filtresinin etkili bir şekilde sonuçlandırılması için Şekil 5'te verilen algoritmanın [15] uygulanması gerekmektedir. Alınan görüntüye ait her piksel değeri bu algoritma ile RGB, YCbCr ve HSV renk uzaylarına ait belirli filtrelerden geçirilerek pikselin ten rengi olup olmadığı bulunabilir [16].



Şekil 5. Ten rengi filtre algoritması [15]

Ten rengi algoritmasının uygulanabilmesi için aşağıda verilen dönüşüm formüllerinin uygulanması gerekmektedir. Eşitlik 1'de RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüşüm için sırasıyla yapılan işlemler gösterilmektedir [17].

$$V = \max(R, G, B)$$

$$S = \begin{cases} \left( V - \min(R, G, B) * \frac{255}{V}, V \neq 0 \right) \\ 0, V = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$H = \begin{cases} (G-B) * \frac{60}{S}, V=R \\ 180 + (B-R) * \frac{60}{S}, V=G \\ 240 + (R-G) * \frac{60}{S}, V=B \\ H=H+360, H<0 \end{cases}$$

Eşitlik 2’de RGB renk uzayından YCbCr renk uzayına yapılması gereken dönüşüm işlemi verilmiştir [17].

$$\begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 65.481 & 128.553 & 24.996 \\ -37.797 & -74.203 & 112 \\ 112 & -93.786 & -18.214 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (2)$$

Yapılan çalışmada, renk uzayları arasında gerekli dönüşüm işlemlerinden sonra filtreler ana resme uygulandığında ten rengi olan pikseller aynı bırakılır, ten rengi dışındaki pikseller Şekil 6’da gösterildiği gibi siyaha boyanır.



Şekil 6. Filtresiz görüntü (solda), Ten rengi filtresi uygulanan görüntü (sağda)

### 2.1.2. Ortalama gri algoritması (Mean gray algorithm )

Görüntü işleme algoritmalarında temel işlemlerden biri alınan resmi gri formata dönüştürme işlemidir. Bir resmi gri yapmak için birçok yöntem vardır. Bunlardan biri de ortalama almaktır. Görüntüleri oluşturan pikseller kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere 3 rengin birleşimi ile oluşmaktadır. Bu algoritmada, resmin piksellerinden renk değerleri alınır ve 3 rengin ortalaması bulunur. Daha sonra bulunan değer her rengin değerine eşitlenerek yeni piksel oluşturulur ve yeni görüntüye bu piksel yerleştirilir. Bu algoritmanın matematiksel ifadesi Eşitlik 3’te ifade edilmektedir [18]. Ortalama gri algoritması giriş resmine uygulandığında Şekil 7’deki gri görüntü elde edilmiştir.

$$GriDeğer = \frac{R+G+B}{3}$$

$$R=GriDeğer, G=GriDeğer, B=GriDeğer \quad (3)$$

Ortalama gri algoritması gerçek zamanlı olarak çalıştırıldığında videonun oldukça yavaş ilerlediği belirlenmiştir. Bunun nedeni algoritmanın yavaş çalışmasıdır. Bu amaçla, bu algoritmanın, işaretçiler (pointer) ile ön bellekte işlemlerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 7. Normal görüntü (solda) ve ortalama gri algoritması uygulanmış görüntü (sağda)

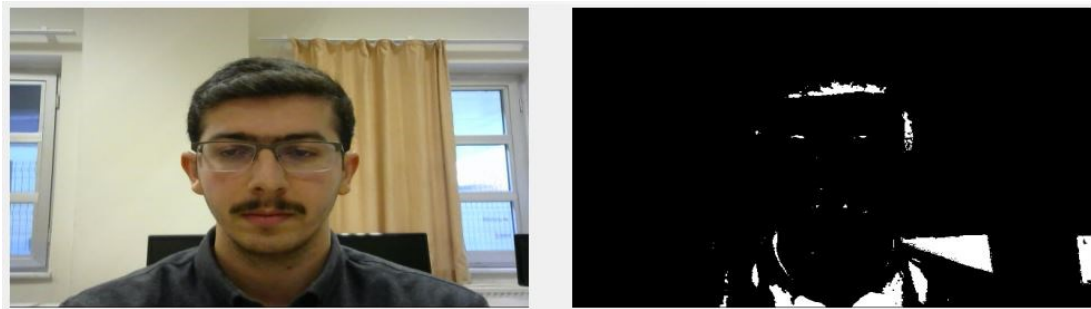
### 2.1.3. Hızlı frekans arayıcı (Fast frequency seeker)

Geliştirilen göz bebeği takip sisteminin ana fonksiyonlarından biri hızlı frekans arayıcı algoritmasıdır. Özgün olarak geliştirilen bu algoritmanın esası göz bebeğinin siyah renginin korelasyon kullanarak eşleme işlemi ile bulunmasına dayanmaktadır.

Bir görüntü ile boyut maskesinin korelasyonu  $w(x, y) m * n, f(x, y)$ , Eşitlik 4'te verilen biçimde ifade edilebilmektedir. Denklemde  $w$  ve  $f$  tarafından paylaşılan bölge üzerinden toplama limitleri alınır. Eşitlik 4'te verilen bu denklem,  $x$  ve  $y$  yer değiştirme değişkenlerinin tüm değerleri için değerlendirilir, böylece  $w$ 'nin tüm öğeleri,  $w$ 'den daha büyük olduğu varsayılan  $f$ 'nin her pikselini ziyaret eder [19].

$$c(x, y) = \sum_s \sum_t \omega(s, t) f(x + s, y + t) \quad (4)$$

Hızlı Frekans Arayıcı fonksiyonunda ilk olarak, işlem yapılırken başka işlemler tarafından etkilenmemesi için görüntü kilitlenmelidir. Görüntü kilitlendikten sonra ilk piksel değeri bir değişkende tutulur. Bu değişkende tutulan pikselin R, G, B değerleri alınır ve bir ortalama değer elde edilir. Daha sonra aranan frekans aralığı kontrol edilir. Eğer istenen frekans aralığında ise o piksel değeri beyaz yapılır. Eğer istenmeyen değer aralığında ise piksel değerleri siyah yapılır. Her pikselde ilk başta tutulan, başlangıç pikselinin yerini tutan değişkene her pikselin renk bileşenleri adedince ekleme yapılır ve kilitlenen görüntü serbest bırakılarak yeni oluşmuş görüntü Şekil 8'deki gibi gösterilir.

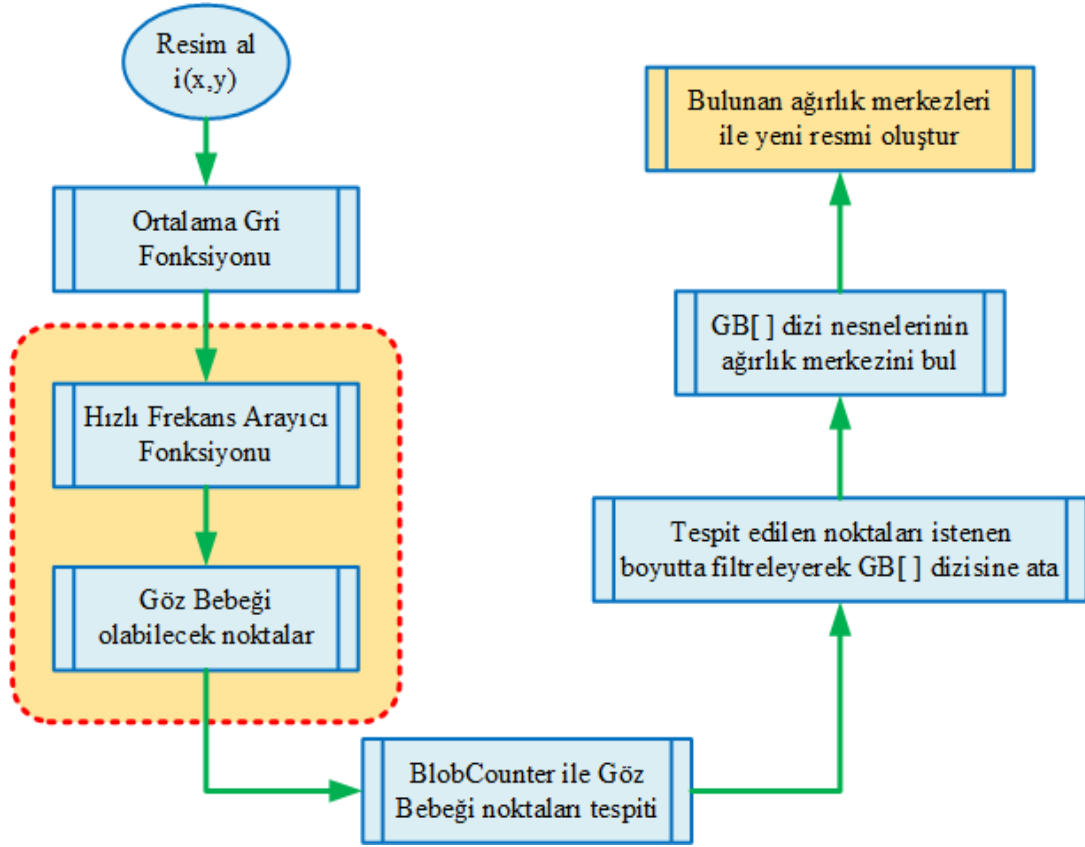


Şekil 8. Fonksiyonun giriş ve çıkış görüntüleri

### 2.1.4. Ağırlık merkezi bulucu (Mean finder)

Bu çalışmada göz bebeğinin tespiti için kullanılan temel fonksiyonlardan biri de ağırlık merkezi bulucu fonksiyonudur. Program yüz bölgesine odaklandıktan sonra yüz içerisindeki kısımları bir nesne olarak algılamalı ve bu nesnelere arasında gözü bulabilmelidir. Ağırlık Merkezi Bulucu fonksiyonuna ait algoritma Şekil 9'da gösterilmektedir [20].



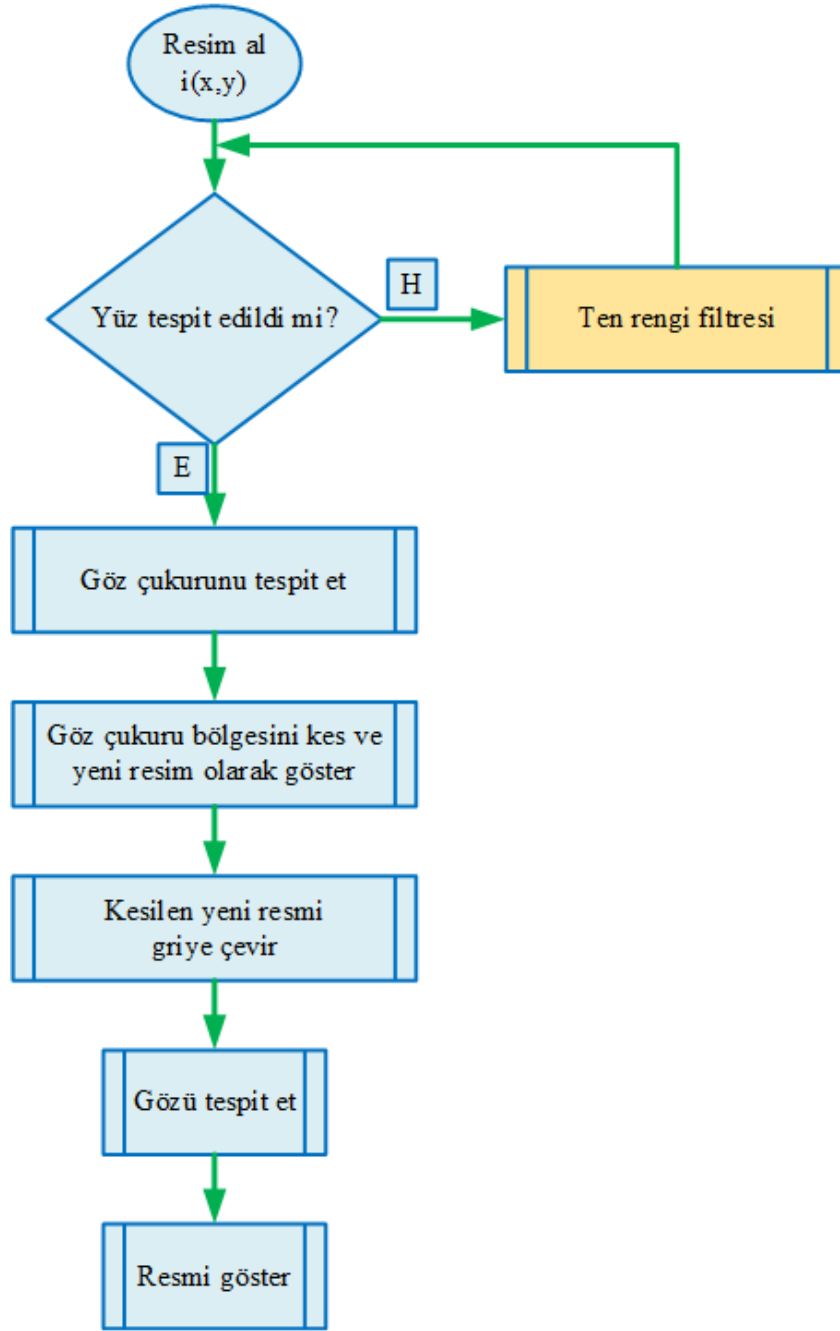


Şekil 9. Ağırlık Merkezi Bulucu fonksiyonu

Verilen algoritmaya göre göz bebeğinin tespit edilmesi istenen görüntü alındıktan sonra Ortalama Gri Fonksiyonuna giriş değeri olarak verilir. Bu fonksiyonda işlemler yapıldıktan sonra çıkış resmi Hızlı Frekans Arayıcı fonksiyonuna giriş değeri olarak aktarılır. Bu fonksiyonda giriş resmi üzerinde göz bebeği olabilecek kısımlar işaretlenir ve resmin geri kalanı siyaha renge dönüştürülür. Ağırlık Merkezi Bulucu fonksiyonunda ise sadece göz konumu olabilecek noktaların bulunduğu ve geriye kalan piksellerin siyah olduğu görüntü giriş değerini oluşturur. Bu giriş değerinde istenen noktalar işaretlenmiş fakat hala bir nesne olarak tanımlı değildir. Bu yüzden işaretli noktalar *Aforge* kütüphanesi içinde bulunan *BlobCounter* fonksiyonu ile nesnelere dönüştürülür ve bu nesnelere istenen boyut aralığına göre filtrelenerek bir diziyeye aktarılır. Oluşturulan bu dizideki elemanlar bir döngü içerisine alınarak her bir nesnenin ağırlık merkezi bulunur. Bulunan bu ağırlık merkezleri görüntü üzerindeki ilişkili koordinatlara atanır ve yeni görüntü oluşturulur.

### 2.1.5. Yüze göre kare çizme fonksiyonu (Function of drawing the square by face)

Bu fonksiyonun amacı daha önceden göz çukurunun tespiti yapılmamış ise yapmak, yapılmış ise tespit edilen bu alanın gelen görüntüden kesilmesi ve bu kare alan içinde göz bebeğinin tespitini yapmaktır. Oluşturulan algoritma Şekil 10'da verilmiştir.



**Şekil 10.** Yüze göre kare çizme fonksiyonu

### 2.1.6. Görüntü kesit fonksiyonu (Image section function)

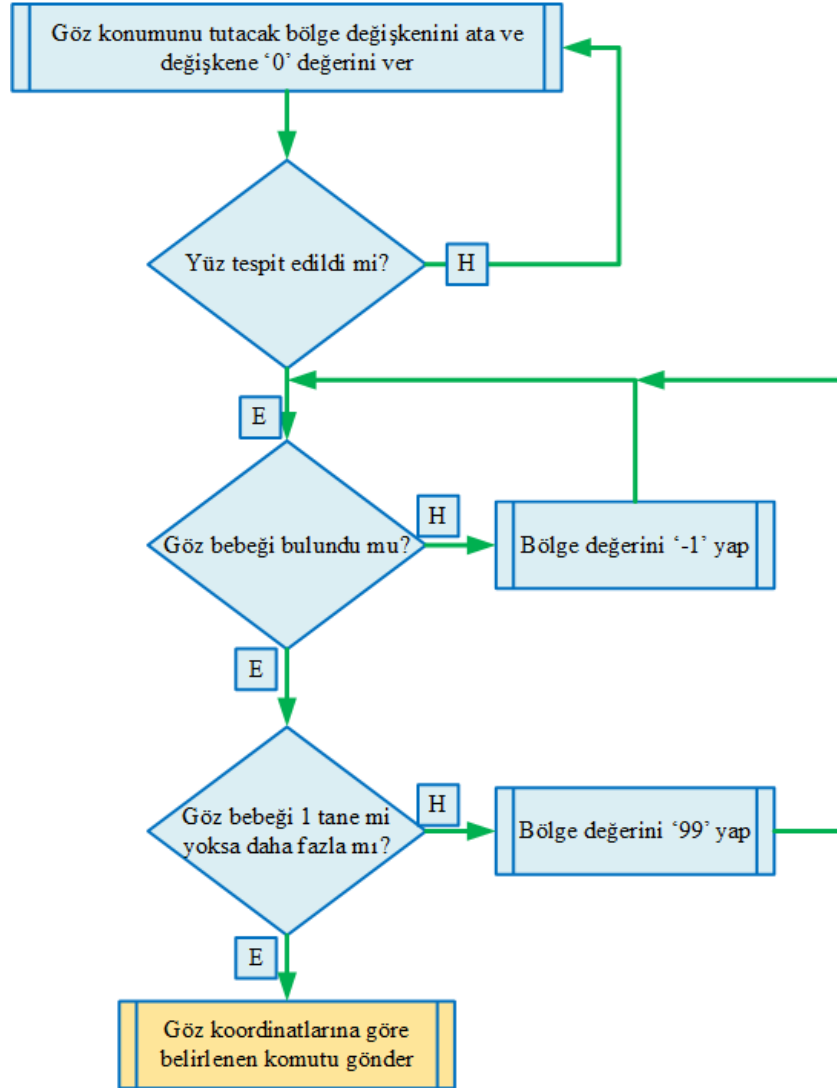
Geliştirilen bu fonksiyon, göz çukuru belirlenmiş ve kesilmiş görüntüdeki cisimlerin yani gözün ağırlık merkezini bulan algoritmadır. Algoritma çalışmaya başlarken yüz tespitinin yapıp yapılmadığı kontrol eder. Eğer yüz tespiti yapılmamışsa gelen görüntüyü değişiklik yapılmadan gönderir, eğer yüz tespiti daha önceden yapılmışsa daha önceden belirlenen göz çukuru alanı kesilir. Kesilen görüntü griye çevrilir. Bu görüntü Hızlı Frekans Arayıcı fonksiyonuna gönderilir ve gelen görüntü saklanır.

Görüntü iyileştirme, bir görüntüde oluşabilen bozulmaları azaltma veya tamamen yok etme ya da görüntünün mevcut halinden belirli bir amaca yönelik olarak daha iyi bir duruma getirilmesi çalışmalarını kapsayan önemli konulardan biridir. Görüntüler üzerinde birçok farklı sebepten dolayı bozulmalar meydana gelebilir [21]. Görüntüdeki gürültüleri azaltabilmek için görüntü üzerinde ön işlemler yapılır. *BlobCounterBase* algoritması ile görüntüdeki cisimlerde filtreleme işlemleri yapılır ve cisimlerin ağırlık

merkezleri bulunur. İşlemlerin yapıldığı görüntü boyutunda, görüntü sınıfından bir görüntü oluşturulur. Oluşturulan bu görüntünün bütün pikselleri beyaz yapılır ve işlemlerin yapıldığı ilk görüntüden bulunan cisimlerin ağırlık merkezlerinin bulunduğu piksel değerleri yeni görüntüde siyah olarak işaretlenir.

### 2.1.7. Referans algoritması (Reference algorithm)

Geliştirilen bu algoritmada kullanıcıya sunulan komut sayısının kullanıcı tarafından seçmesinin ardından gözün hangi koordinat bölgesine odaklandığı tespit edilmektedir. Bu algoritmaya ait akış şeması Şekil 11'de belirtilmektedir:



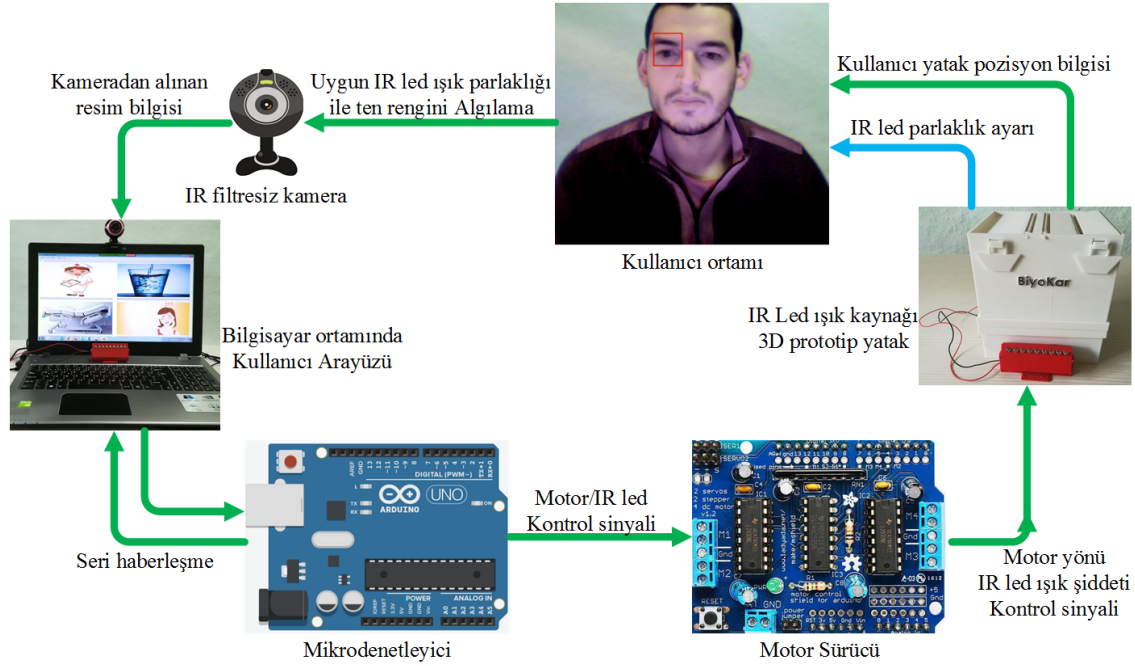
Şekil 11. Referans algoritması

## 3. GERÇEK ZAMANLI GÖZ BEBEĞİ TAKİP SİSTEMİ VE FİZİKSEL ENGELLİ BİREYLER İÇİN BİR UYGULAMASI (REAL-TIME PUPIL TRACKING SYSTEM AND PRACTICE)

Geliştirilen göz bebeği tespit algoritmasının gerçek zamanlı bir uygulaması tasarlanarak, fiziksel hareket engelli felç veya ALS gibi hastalıkları olan bireylerin hayat kalitelerinin artırılması amaçlanmaktadır. Sadece göz hareketlerini sayesinde sosyal iletişim kurabilmelerini sağlayacak bir arayüz yazılımı üzerinden yatak pozisyonlarını değiştirebilmeleri, gıda ihtiyaçları ve acil durum ifadelerini sağlık personeli veya

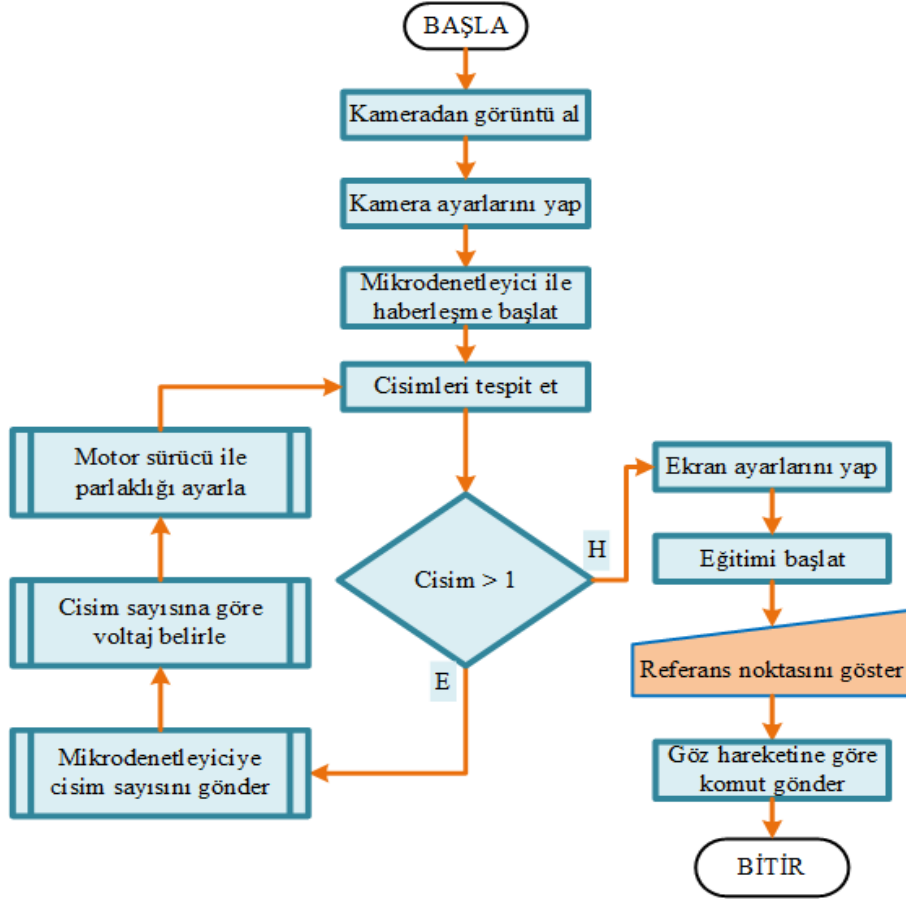
bakım personeline iletebilmelerini sağlamak için kamera ile gerçek zamanlı göz bebeği takip sistemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır.

Gerçek zamanlı göz bebeği takip sistemi blok şeması Şekil 12’de gösterilmektedir. Bu sistemde öncelikle kamera ile ortamdaki yüz görüntüsü alınır. Bu görüntünün alınması için kullanılan kameranın kızılötesi filtresinin çıkarılması gerekmektedir. Çünkü yapılan bu çalışmada kızılötesi ışıklardan yararlanılmıştır.



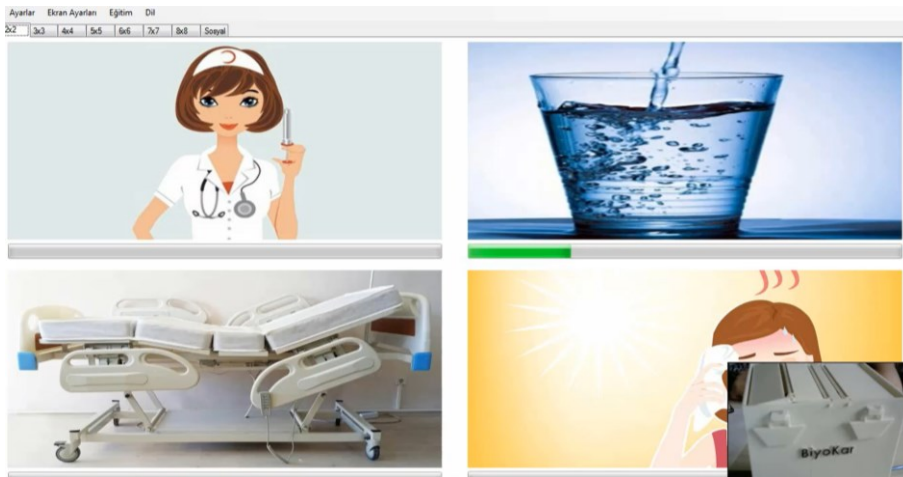
**Şekil 12.** Adaptif IR led ışık parlaklığı ile gerçek zamanlı göz bebeği takip sistemi

Kameradan alınan görüntü C# programlama dili ile yazılmış programda işlenerek yüz tespit algoritması ve göz çukuru tespit algoritması çalıştırılır. Göz çukurunun tespiti yapıldıktan sonra oluşturulan algoritma ile ortamın ışık seviyesi ölçülür ve ölçülen değer seri haberleşme protokolleri kullanılarak mikrodenetleyiciye gönderilir. Mikrodenetleyici, aldığı verilere göre L293D motor sürücü kontrolü ile adaptif olarak IR led ışık kaynağı şiddetini değiştirerek yüzün parlaklığını uyumlaştırmaktadır. Uyumlaştırma işleminde algoritma gözü merkeze alarak adaptif ışık değişimi ile göz parlamasının en uygun olduğu zaman göz bebeği bulunur. Daha sonra algoritma tekrar göz çukurunda gözün tespit edilip edilmediğine bakar ve eğer tespit edilmiş ise bu parlaklık seviyesinde sabit kalır. Eğer tespit edilememiş ise parlaklığı azaltıp arttırarak göz bebeği tespit edilir ve kullanıcının arayüzde baktığı konuma göre komutlar üretilir. Sistemin algoritma akış şeması Şekil 13’te gösterilmiştir.



Şekil 13. Gerçek zamanlı göz bebeği takip sistemi arayüz yazılımı algoritma akış şeması

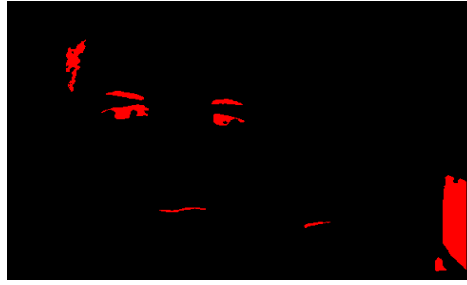
2x2, 3x3, 4x4, 5x5, 6x6, 7x7 ve 8x8 matrisler halinde seçilebilen ve Şekil 14’te gösterildiği gibi kolay ve basit kullanıma sahip arayüz aracılığıyla arayüz komut görselleri oluşturulabilmektedir. Yapılan uygulamada 2x2 matrisli arayüz komut görseli kullanılmıştır. Bu arayüz komut görseli üzerinden üretilen 4 farklı komut ile, geliştirilen donanım kontrol edilmiştir. Elde edilen bu komutlar yardımıyla kullanıcı sadece gözleri ile istediği görsele bakarak verilen komutların sesli geri bildirimini gerçekleştirmiş ve hasta yatağını istediği konuma ayarlayabilmiştir.



Şekil 14. Kullanıcı arayüzü ile hasta yatak kontrolü

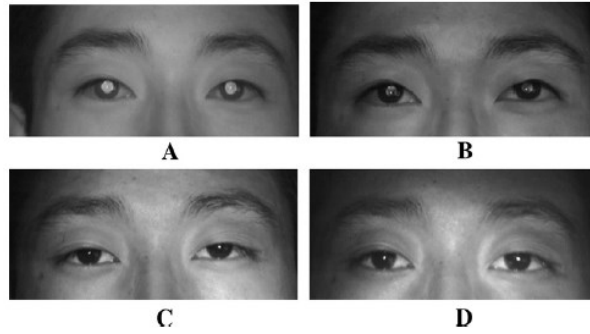
Görüntü işleme algoritmalarında sistemin çalıştırıldığı ışık parlaklığı ve ışık seviyesi gibi etkenler algoritmaların farklı ortamlara göre farklı tepkiler üretmesine neden olmaktadır. Bu yüzden bu tip algoritmaların çalıştırıldığı birçok sistem aynı ortamda ve aynı ışık seviyesi altında çalıştırılmaktadır [22].

Göz bebeğini tespit algoritmasının oluşturulmasında 1.purkinje yansıması olarak adlandırılan göz bebeğinin siyah renginden yararlanılmaktadır. Bu nedenle gözdeki siyah kısmı tespit eden bir algoritma tasarlanmıştır. Yazılan algoritmanın, ortam ışık parlaklığının farklı olmasından dolayı her ortamda aynı sonucu vermediği görülmüştür. Ortama ait ışık kaynağının konumuna ve parlaklığına bağlı oluşan gürültüden etkilenen sistem, Şekil 15'te gösterilen bu gürültüyü göz olarak algılamakta ve yanlış komutlar üretmektedir. Bu nedenle yüzün her ortamda aynı derecede aydınlatılmasını sağlayan bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistemin her ortamda doğru komutlar üretebilmesi ve göz bebeğini doğru tespit etmesi, gerçek zamanlı olarak yüksek doğrulukta çalışabilmesi için oldukça önemlidir.



**Şekil 15.** Gürültülü görüntü

Işık dalga boyunun parlak göz bebeği üzerindeki etkisi Şekil 16'da gösterilmektedir. Bu şekilden, parlak göz bebeği etkisinin, diğer faktörler eşit olduğunda kızılötesi aydınlatma (850 nm dalga boyu) altında en belirgin olduğu sonucuna varılabilmektedir. Parlak göz bebeği efekti sadece algılama başlangıç referansı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda farklı ortam aydınlatma koşullarının etkisini en aza indirerek, zayıf aydınlatma, gündüz ve gece dahil olmak üzere değişen gerçek dünya koşullarında görüntü kalitesini sağlar. Aynı zamanda, kızılötesi aydınlatma görünmezdir, bu nedenle kullanıcıların çalışmalarını engellemez [23].

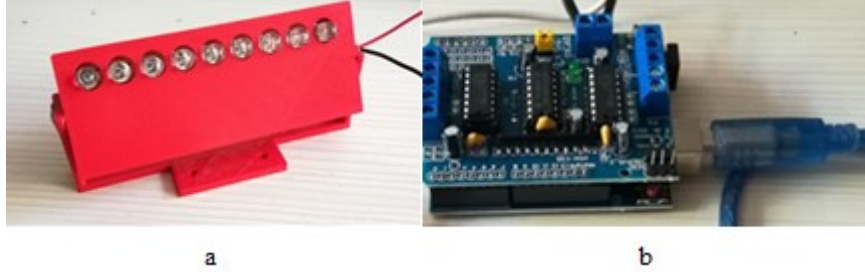


**Şekil 16.** Farklı aydınlatmalar altında parlak göz bebeği efektleri; (A) 850 nm kızılötesi aydınlatma, (B) 620-645 nm kırmızı ışık, (C) 515-530 nm yeşil ışık, (D) 465-475 nm mavi ışık [23]

Geliştirilen sisteme, görüntü işlemede yüzün daha aydınlık olması ve yüzde oluşan çok yönlü gölgelerin kaldırılması için hastanın yüzünü aydınlatacak 9 adet led ile bir ışık sistemi tasarlanmıştır ve öncelikle görünür ışık seviyesindeki ledler kullanılmıştır. Fakat ışık kaynağı test edildiğinde ışık kaynağının görünür ışık olması, görüntüde gürültünün devam etmesi nedeniyle IR (Infrared-Kızılötesi) ışık kaynağı ile bu problemin çözülmesi amaçlanmıştır. IR ışığın algılanması için kamerada bulunan IR filtre sökülmüş ve deney uygulaması tekrar edilmiştir.

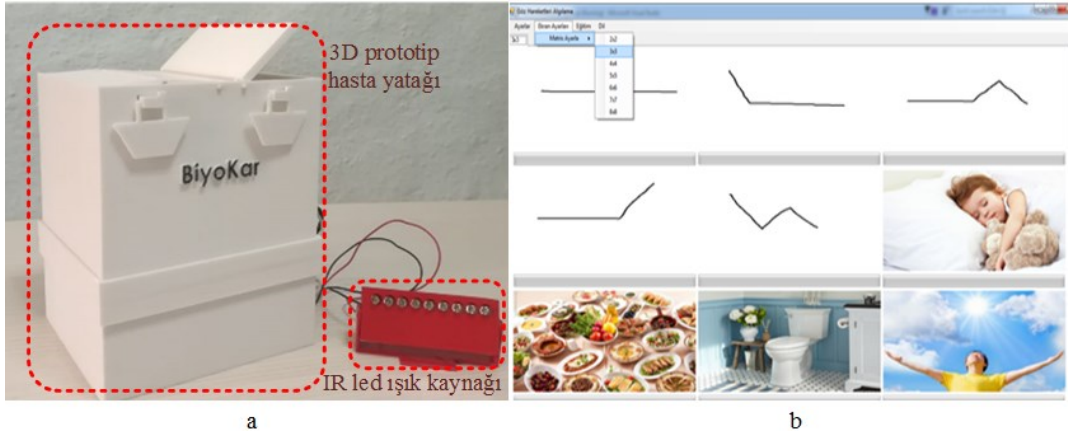
Durna [6] ve Boyraz [24] çalışmalarında kullandıkları 850nm dalga boyundaki IR ledlerin, damar ve göz bebeği tespitinde olumlu sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlara dayanılarak, tasarlanan sistemde 850 nm dalga boyunda 9 adet IR led kullanılmıştır. Bu IR ledler, SolidWork programında led paneli çizilip 3D

yazıcı ile basılarak Şekil 17.a'da gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. İlk olarak ışık parlaklığı, manuel olarak güç kaynağından ayarlanmıştır. Ancak bunun sürekli olarak elle ayarlanması sorun oluşturduğundan dolayı bunu otomatik yapacak sistem Şekil 17.b'de gösterilen L293D motor sürücü ile oluşturulmuştur. Göz bebeği hareketi tespitinde kullanılan algoritmanın yeterli ışık seviyesini otomatik olarak kontrol etmesi sonucunda yetersiz ışık algılandığında, motor sürücünün IR led parlaklığını arttırmasını denetleyen adaptif IR led ışık kaynağı tasarlanmıştır.



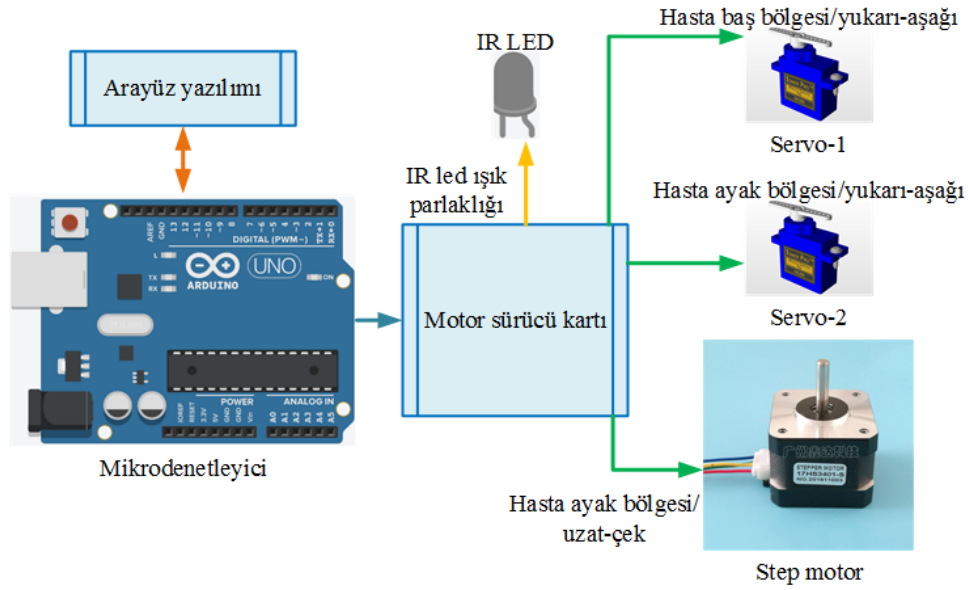
**Şekil 17.** a) 3D IR led panel, b) L293D Motor sürücü kartı

Sistemin donanım kısmına ek olarak SolidWorks çizim programı aracılığıyla Şekil 18.a'da gösterilen prototip hasta yatağı tasarlanmış ve bu yatak 3D yazıcı aracılığıyla basılmıştır. Prototip hasta yatak sistemi fiziksel hareket engeli olan bireylerin, göz bebekleri ile Şekil 18.b'de belirtilen yazılım arayüzü üzerinde istedikleri yatış pozisyonunu kendi kontrolü ile ayarlayabilmesini sağlamaktadır. Böylece fiziksel engelli bireylerin yaşam kaliteleri daha da iyileştirilmiş, sadece göz bebeklerinin hareketi sayesinde yaşadıkları dünyaya adaptasyonlarının arttırılması sağlanmıştır.



**Şekil 18.** a) 3D hasta yatağı prototipi ve adaptif IR led ışık kaynağı, b) Kullanıcı arayüzü üzerinde yatak pozisyonu kontrol penceresi

Geliştirilen yatak sisteminde iki adet servo motor ve bir adet step motor bulunmaktadır. Bu motorlar Şekil 19'daki mikrodenetleyici ve motor sürücü yardımı ile yatağın pozisyonunu kullanıcının seçimine göre değiştirmektedir. Servo motorlardan Servo-1, hasta yatağının baş bölgesinin aşağı yukarı kaldırırken Servo-2 ile hasta yatağının ayak bölgesinin aşağı yukarı kaldırılması sağlanmaktadır. Step motor ise hasta yatağındaki ayak bölgesinin uzatıp çekerek üçgen şekilde olmasını sağlamaktadır. Motorların konumu ve ışık şiddeti, bilgisayar ile mikrodenetleyiciye seri haberleşme protokolü ile gönderilmektedir. Mikrodenetleyici, aldığı veriler ile sistemin kontrol edilmesini sağlamaktadır. Hasta birey, kullanıcı arayüzü aracılığıyla 4 farklı şekilde komut üreterek yatağın pozisyonunu sadece göz hareketleri ile seçebilmektedir.



Şekil 19. Mikrodenetleyici ile yatağa ait motor ve IR led ışık bağlantıları

### 3.1. Performans değerlendirmesi (Performance evaluation)

Görüntü sınıflandırma yöntemlerinin doğruluğu ve geçerliliği, performans değerlendirme metrikleri gibi değerlendirmelerle kanıtlanmalıdır. Literatürde görüntü sınıflandırma problemleri için çok sayıda iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan performans değerlendirme ölçütleri bulunmaktadır. Bu metrikler, sınıflandırma modellerinin performansını tanımlamak için kullanılan bir tablo olan karışıklık matrisinden (Confusion Matrix) türetilmiştir. Doğruluk, özgüllük, duyarlılık ve kesinlik en popüler performans değerlendirme ölçütleri olarak kabul edilir [25].

Bu çalışmada sınıflandırma sonuçlarını özetlemek ve doğrulamak için karışıklık matrisi kullanılmıştır. Esas olarak Doğru Pozitif (TP), Yanlış Pozitif (FP), Yanlış Negatif (FN) ve Doğru Negatif (TN) olmak üzere dört parametreden oluşur. TP, doğru tanımlanmış koşullar anlamına gelir. FP, yanlış tanımlanmış koşullar anlamına gelir. FN, yanlış reddedilen koşullar anlamına gelir. TN, doğru şekilde reddedilen koşullar anlamına gelir. Doğruluk, duyarlılık, özgüllük ve Matthew korelasyon katsayısının (MCC) matematiksel açıklamaları Eşitlik 5-8 [26, 27]'de verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (5)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (7)$$

$$\text{MCC} = \frac{(TP \times TN) - (FP \times FN)}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}} \quad (8)$$

Sistemin performans değerlendirmesi için arayüz yazılımında bulunan 2x2 boyutundaki komut arayüzü test edilmiştir. Tablo 1'de gösterilen karışıklık matrisi ve performans değerlendirmesi 5 farklı kişi üzerinde ikişer kez deneme ile yapılan testler sonucunda elde edilmiştir. Kullanıcıdan öncelikle ekran üzerindeki 4 farklı komut bölgesine sırayla bakması istenmiştir. Daha sonra kullanıcının 4 komut bölgesinden rastgele



birine bakması istenerek 4 ayrı bölgeye baktırılmıştır. Tasarlanan sistemin doğruluğu, elde edilen sonuçlar Eşitlik 5 ile hesaplandığında %95 olarak bulunmuştur.

**Tablo 1.** Tasarlanan sistem için karışıklık matrisi ve performans değerlendirmesi.

TN	FP	FN	TP	Doğruluk (%)	Duyarlık (%)	Özgüllük (%)	MCC
116	4	4	36	95,0	90,0	96,7	0,87

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Makale çalışmasında, ihtiyaçlarını ifade edemeyen fiziksel hareket engeline sahip bireyler için geliştirilen algoritma ile kullanıcının sadece göz bebeği hareketlerini kullanarak isteklerini ifade edebilmeleri sağlanmıştır. Göz bebeği hareket tespiti için hazır kütüphane kullanılmadan geliştirilen bu algoritma ile kullanıcının seçebileceği 9 adet komut üretilmiştir. Üretilen bu komutlar kullanıcılar tarafından %95 doğruluk performansı ile kullanılabilmesi, sistemin adaptif olarak ayarlanabilen bir IR ışık kaynağı ile desteklenmesi ile sağlanmıştır. Geliştirilen adaptif ışık kaynağı aracılığıyla göz bebeği hareketi daha yüksek doğrulukta tespit edilebilmiştir. Böylece sistemin farklı ortamlarda ve farklı sistemlerde çalışabilmesi sağlanmıştır.

İleride yapılacak çalışmalarda, kullanılacak olan kameranın daha yüksek çözünürlüğe sahip olarak seçilmesi önerilmektedir. Böylece oluşabilecek gürültüler engellenebilecek ve daha fazla komut üretilebilmesi sağlanacaktır. Bu sistemin gözlüklü bireylerde doğru sonuçlar vermemesinden dolayı, çalışmanın diğer aşamalarında sistemin gözlüklü bireylerde de çalışması için yeni bir yöntem geliştirilmesi önerilmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akıncı, G. (2011). Video görüntülerine dayalı nöropsikolojik testler için pupil (göz bebeği) hareketleri izleme sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] Nilay Yıldırım, A. V. (2016). Göz Takibi Ve Göz Takip Sistemleri Üzerine Bir Araştırma. INESEC, 897-206.
- [3] Joseph M.Furman, F. L. (2012). Vestibular Laboratory Testing. M. J. Aminoff içinde, Aminoff's Electrodiagnosis in Clinical Neurology (s. 699-723). Saunders.
- [4] Yıldız, H. Ö. (2015). Eog'nin Kodlanmasına Dayanan Bilgisayar Tabanlı Gözle Yazı Yazma Sistemi. Tıptekno'15, (S. 296-299). Muğla
- [5] Yavuz, O. İ. (2017). EOG (Elektrookülografi) Kullanarak Göz Hareketleri ile Robot Kontrolü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] Durna, Y., & Arı, F. (2015). Real time pupil-corneal reflection following with Labview. In 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 2286-2289). IEEE.
- [7] Cihan Topal, A. D. (2008). An eye-glasses-like wearable eye gaze tracking system. 2008 IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference. Aydın: IEEE.
- [8] İren, M. (2018). Akıllı Telefonlarda Kullanıcıların Tercih Ettikleri Kimlik Doğrulama Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [9] Bozkurt, F. (2019). Göz Kırpma Hareketleri İle Tarayıcı Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü.

- [10] Fatimah A. Alrubaish, G. A. (2019). Automated Detection for Student Cheating During Written Exams: An Updated Algorithm Supported by Biometric of Intent. International Conference on Computing (s. 303-311). Riyadh: Springer Link
- [11] Çolak, M. E. (2020). Uzaktan Eğitim Sınavlarında Bakış Algılaması İle Kopya Tespitinin Modellenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] Yuan-Pao Hsu, H.-C. M.-C. (2010). FPGA implementation of a real-time image tracking system. SICE Annual Conference (s. 2778-2884). Taipei: IEEE
- [13] Paul Viola, M. J. (2001). Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. Computer Vision And Pattern Recognition, (s. 1-9).
- [14] Kısa, M. (2019). Grafik Tasarım ve Baskı Ortamında Kullanılan Görsellerin RGB Renk Uzayından CMYK Renk Uzayına Dönüşümü Esnasında Oluşan Renk ve Ton Kayıplarının Önlenmesi. Humanities Sciences, 25-30. (Kısa, 2019).
- [15] Çavdaroğlu, G. Ç. (2013). Sanal gerçeklikte ilinti operatörleri geliştirilerek yüz tanıma analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [16] Shaika, K. B. (2015). Comparative Study of Skin Color Detection and Segmentation in HSV and YCbCr Color Space. ELSEVIER, 41-48.
- [17] Amit Kumar, S. M. (2015). Real-time Human Skin Color Detection Algorithm using Skin Color Map. Computing for Sustainable Global Development. New Delhi: INDIACOM.
- [18] Yılmaz, H. (2017). İnsan kromozom preparatlarının bilgisayar destekli sitogenetik analizleri ve düşük maliyetli sistem tasarımı, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. YÖK tez.
- [19] Gonzalez, R. C. (2008). PD and Woods, RE. Digital Image Processing, Third Edition], Prentice Hall International,
- [20] Muhammet Üsâme Öziç, N. Ç. (2020). Görüntü İşlemede Nesne Koordinat Özelliklerini Kullanarak Bakliyat Sayma İşlemine Bir Yaklaşım. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28-37.
- [21] Öztürk, S., & Öztürk, N. (2016). Yapay Ari Koloni Algoritması Kullanılarak Görüntü İyileştirme Yönteminin Geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 4(4), 173-183.
- [22] Dipova, N. (2018). Görüntü Analizi Yöntemlerinin Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 33-44.
- [23] Z. Zhu, Q. Ji (2005). Robust real-time eye detection and tracking under variable lighting conditions and various face orientations, Computer Vision and Image Understanding 98 124–154.
- [24] Boyraz, Ö. F., M. Z. (2016). Mobil Damar Görüntüleme Cihazı Tasarımı. Innovative Technologies (s. 159-168). Antalya: Akademik Platform.
- [25] Irmak, E. (2021). COVID-19 disease severity assessment using CNN model. IET Image Processing, 15(8), 1814-1824.
- [26] Stehman, S. V. (1997). Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. Remote sensing of Environment, 62(1), 77-89.
- [27] Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. Pattern recognition letters, 27(8), 861-874.

## Extraction of Photovoltaic Cell and Photovoltaic Module Parameters Using African Vultures Optimization Algorithm

Mehmet YEŞİLBUDAK 

Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 50300, Nevşehir, Turkey.

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 20.09.2021  
Revision: 31.10.2021  
Accepted: 17.11.2021

#### Highlights

- Photovoltaic systems.
- Diode circuit models.
- Stochastic optimization.

#### Keywords

Photovoltaic cell  
Photovoltaic module  
Metaheuristic optimization  
Parameter extraction

The power generation from photovoltaic systems has come to the forefront as one of the most important alternatives to fossil fuels. However, the performance of photovoltaic systems depends on the equivalent diode circuits constructed and the accurate electrical parameters extracted. To this end, in this study, the single diode- and double diode-based photovoltaic cell modeling and the single diode-based photovoltaic module modeling were realized, effectively.

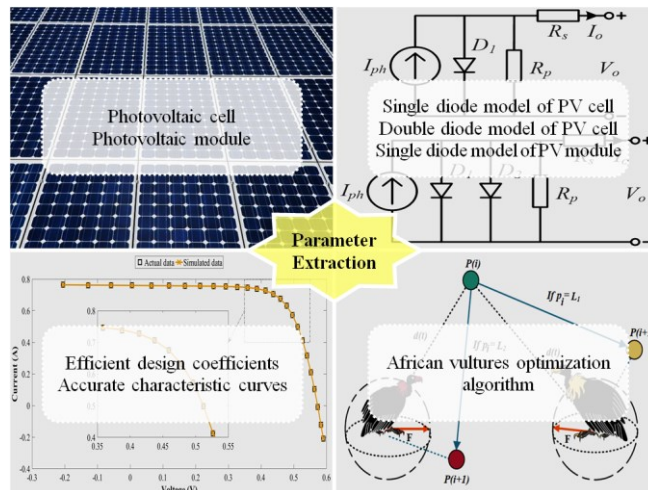


Figure A. The graphical abstract of the study

**Purpose:** The main objective of this study is to apply the African vultures optimization algorithm to the parameter extraction problem of photovoltaic cells and photovoltaic modules. The parameter extraction performance was evaluated in terms of the sum of individual absolute errors, and the root mean squared error. The physical current-voltage and power-voltage characteristics were represented, accurately.

**Theory and Methods:** The African vultures optimization algorithm, which is a powerful population-based metaheuristics, was employed in the optimization phase. Since, its parameter extraction performance has not been evaluated for the photovoltaic models, yet. For a fair evaluation, its parameter extraction accuracy was compared with several well-established parameter extraction algorithms in the literature.

**Results:** The root mean squared errors for the single diode- and double diode-based photovoltaic cell modeling were achieved as  $9.860659 \times 10^{-4}$  and  $9.837632 \times 10^{-4}$ , respectively. In addition, the root mean squared error for the single diode-based photovoltaic module modeling was obtained as  $2.425094 \times 10^{-3}$ . Accordingly, the design coefficients of photovoltaic models were identified, efficiently.

**Conclusion:** The African vultures optimization algorithm identified more accurate parameter values than the majority of benchmark algorithms for the single diode-based photovoltaic cell modeling. Besides, it achieved the most accurate parameter values against the benchmark algorithms for the double diode-based photovoltaic cell modeling and the single diode-based photovoltaic module modeling.



## Afrika Akbaları Optimizasyon Algoritması Kullanılarak Fotovoltaik Hücre ve Fotovoltaik Modül Parametrelerinin Çıkarımı

Mehmet YEŞİLBUDAK

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye.

### Öz

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
 Başvuru: 20.09.2021  
 Düzeltilme: 31.10.2021  
 Kabul: 17.11.2021

#### Anahtar Kelimeler

Fotovoltaik hücre  
 Fotovoltaik modül  
 Metasezgisel optimizasyon  
 Parametre çıkarımı

#### Keywords

Photovoltaic cell  
 Photovoltaic module  
 Metaheuristic optimization  
 Parameter extraction

Fotovoltaik hücrelerin ve fotovoltaik modüllerin gerçek elektriksel davranışlarını karakterize etmek için eşdeğer devre modellerinin etkin bir şekilde oluşturulması ve bilinmeyen model parametrelerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekir. Bu sayede, fotovoltaik sistemlerin tasarımı, kontrolü ve performansı iyileştirilir. Bu çalışmada, tek diyot ve çift diyot tabanlı fotovoltaik hücre modelleri ile tek diyot tabanlı fotovoltaik modül modellemesinde karşılaşılan parametre çıkarım problemini çözmek için Afrika akbaları optimizasyonu uygulanmıştır. Afrika akbaları optimizasyon algoritması keşif aşamasında iki farklı strateji ve sömürü aşamasında dört farklı strateji kullanarak optimizasyon sürecini verimli bir şekilde dengeler. Parametre çıkarım performansını değerlendirmek için simüle edilmiş ve ölçülen çıkış akımları arasındaki karekök ortalama hata hesaplanmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar literatürde yaygın olarak kullanılan farklı parametre çıkarım metodlarıyla karşılaştırılmıştır. Afrika akbaları optimizasyon algoritmasının fotovoltaik hücre ve modül parametrelerinin çıkarımı için kararlı ve güvenilir bir teknik olduğu gösterilmiştir.

### Extraction of Photovoltaic Cell and Photovoltaic Module Parameters Using African Vultures Optimization Algorithm

#### Abstract

In order to characterize the actual electrical behavior of photovoltaic cells and photovoltaic modules, it is required to construct the equivalent circuit models effectively, and to identify the unknown model parameters properly. This improves the design, control and performance of photovoltaic systems. In this study, African vultures optimization was applied to solve the parameter extraction problem encountered in single diode- and double diode-based photovoltaic cell modeling and single diode-based photovoltaic module modeling. African vultures optimization algorithm efficiently balances the optimization process by using two different strategies in the exploration phase and four different strategies in the exploitation phase. The root mean squared error between simulated and measured output current was computed to evaluate the parameter extraction performance. In addition, the obtained results were compared with different parameter extraction methods commonly-used in the literature. It has been shown that the African vultures optimization algorithm is a stable and reliable technique for the extraction of photovoltaic cell and module parameters.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fosil yakıtların yoğun kullanımının yol açtığı küresel ısınma, iklim değişikliği ve çevre kirliliğinden dolayı yenilenebilir enerji kullanımı giderek artmaktadır [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisi temiz olma, yaygın olarak bulunma ve fotovoltaik sistemler aracılığıyla doğrudan elektriğe dönüştürülebilir özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, fosil yakıtlara en önemli alternatiflerden biri olarak fotovoltaik sistemlerden güç üretimi ön plana çıkmıştır [2]. Ancak, fotovoltaik sistemlerin performansı gerçek akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristiklerinin modellenmesinde kullanılan eşdeğer diyot devreleri ve bu devrelerdeki elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde çıkarımına bağlıdır [3]. Bu amaçla, literatürde farklı fotovoltaik hücreler ve farklı fotovoltaik modüller için pek çok analitik, deterministik ve metasezgisel yöntemler kullanılmıştır.

Kyocera KC120-1 fotovoltaik modülünün tek diyot modellemesindeki 5 parametrenin tahmini için geliştirilmiş elektromanyetizma benzeri algoritma [4], çift diyot modellemesindeki 7 parametrenin tahmini için hibrit mutasyona dayanan diferansiyel evrim algoritması [5] ve hem tek diyot hem de çift diyot modellemeleri için Lambert W fonksiyonu tabanlı deniz yırtıcıları algoritması [6] kullanılmıştır. Kyocera KC200GT, SM55 ve ST40 fotovoltaik modüllerinin tek diyot modellemeleri için şönt dirence dayalı basit bir iteratif metottan yararlanılmıştır [7]. Kyocera KC200GT fotovoltaik modülünün tek diyot ve çift diyot modellemeleri için radyal hareket optimizasyonu uygulanmıştır [8]. Kyocera KC200GT, SQ80 ve ST40 fotovoltaik modüllerinin tek diyot modellemeleri için Gauss-Seidel iteratif metodu kullanılırken, çift diyot modellemeleri için analitik bir metottan yararlanılmıştır [9].

R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot modellemesi için ışığın kırılma prensibini içeren balina optimizasyon algoritması geliştirilmiştir [10]. R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri için denge optimizasyon algoritması [11], genelleştirilmiş karşıtlığa dayanan öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon [12] ve modifiye edilmiş yapay arı koloni algoritması [13] tasarlanmıştır. R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri ile Photowatt-PWP201 fotovoltaik modülünün tek diyot modellemesi için Laplacian Nelder-Mead küresel evrimi [14], geliştirilmiş guguk kuşu arama algoritması [15], performans yönlendirmeli JAYA algoritması [16], modifiye edilmiş Rao-1 optimizasyon algoritması [17], modifiye edilmiş öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon [18], geliştirilmiş uyarlanabilir kelebek optimizasyon algoritması [19], ortogonal olarak uyarlanmış Harris şahinleri optimizasyonu [20], rekabetçi öğrenmeye dayanan geri izleme arama algoritması [21], diferansiyel vektörleri yeniden kullanan geri izleme arama algoritması [22], deneyime dayanan uyarlanabilir öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon [23] ve ortogonal Nelder-Mead güve-alevi optimizasyonu [24] önerilmiştir.

R.T.C. France ve PVM 752 GaAs fotovoltaik hücrelerinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri için Nelder-Mead stratejisine ve kaotik haritalara dayanan cıvık mantar algoritması kullanılmıştır [25]. R.T.C. France ve PVM 752 GaAs fotovoltaik hücreleri ile STM6-40 fotovoltaik modülünün tek diyot ve çift diyot modellemeleri için Lévy uçuş stratejisine dayanan yarasa algoritması uygulanmıştır [26]. PVM 752 GaAs fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri ile Photowatt-PWP201 fotovoltaik modülünün tek diyot modellemesi için lojistik kaotik Rao-1 optimizasyon algoritmasından yararlanılmıştır [27]. R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri ile STP6-120/36 ve STM6-40/36 fotovoltaik modüllerinin tek diyot modellemeleri için geliştirilmiş kaotik JAYA algoritması [28] ve biyocoğrafya optimizasyonu tabanlı heterojen guguk kuşu arama algoritması [29] kullanılmıştır.

R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri ile Photowatt-PWP201 ve STM6-40/36 fotovoltaik modüllerinin tek diyot modellemeleri için gri kurt optimizasyon algoritması ve guguk kuşu arama algoritmasını içeren yeni bir hibrit yaklaşım tasarlanmıştır [30]. R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri ile Photowatt-PWP201, SM55 ve ST40 fotovoltaik modüllerinin tek diyot modellemeleri için karşıtlık tabanlı sinüs kosinüs optimizasyon algoritması geliştirilmiştir [31]. R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri ile Photowatt-PWP201, STP6-120/36 ve STM6-40/36 fotovoltaik modüllerinin tek diyot modellemeleri için bilgi edinme-paylaşma algoritması [32], geliştirilmiş deniz yırtıcıları algoritması [33], geliştirilmiş uyarlanabilir diferansiyel evrim algoritması [34], yönlü permütasyona dayanan diferansiyel evrim algoritması [35], pekiştirmeli öğrenmeye dayanan diferansiyel evrim algoritması [36] ve sınıflandırılmış mutasyona dayanan parçacık sürü optimizasyonu [37] sunulmuştur.

Literatürde kullanılan yaklaşımlar genel olarak değerlendirildiğinde, analitik metotlar standart test koşulları altında elde edilen temel veri noktalarına bağımlı iken, deterministik metotlar başlangıç koşuluna duyarlılıklarından dolayı yerel optimumu aramada iyidirler [23]. Diğer taraftan, metasezgisel yaklaşımlar analitik ve deterministik metotlardan daha iyi sonuçlar vermektedir fakat çözüm kalitesini etkileyen kendilerine özgü kontrol parametrelerine sahiptirler [38]. Bu nedenlerden ötürü, fotovoltaik hücre ve fotovoltaik modül parametrelerinin etkin bir şekilde çıkarımına halen ihtiyaç duyulmaktadır. 2021 yılında önerilen Afrika akbaları optimizasyonu [39], Afrika kıtasındaki çeşitli akbaların yaşam tarzını taklit eden güçlü bir popülasyon tabanlı metasezgisel algoritmadır. Bilindiği kadarıyla, Afrika akbaları optimizasyon algoritmasının fotovoltaik hücre ve fotovoltaik modül parametrelerinin çıkarımındaki performansı henüz değerlendirilmemiştir. Bu amaçla, bu çalışmada, literatürde yaygın

olarak kullanılan R.T.C. France fotovoltaik hücresinin tek diyot ve çift diyot modellemeleri ile Photowatt-PWP201 fotovoltaik modülünün tek diyot modellemesi için Afrika akbabaları optimizasyon algoritması uygulanmıştır. Elde edilen karekök ortalama hata sonuçlarına göre doğru ve güvenilir parametre değerleri tanımlanmıştır.

## 2. AFRİKA AKBABALARI OPTİMİZASYONU (AFRICAN VULTURES OPTIMIZATION)

*Abdollahzadeh ve ark.* tarafından geliştirilen Afrika Akbabaları Optimizasyonu (AAO) [39], Afrika akbabalarının yaşam tarzından ilham alır; gezinme, yiyecek arama ve yiyecek için rekabet etme davranışlarını simüle eder. Üretilen çözümlerin çeşitliliğini arttırmak için keşif aşamasında iki farklı strateji kullanma, potansiyel çözümlere daha fazla odaklanmak için sömürü aşamasında dört farklı stratejiden yararlanma, keşif ve sömürü aşamaları arasında denge sağlamak, yerel optimumdan kaçmak ve erken yakınsamayı önlemek için keşif ve sömürü aşamaları arasında farklı geçiş stratejilerini uygulama üstünlükleri vardır. Ayrıca, büyük ölçekli optimizasyon problemlerini çözme yeteneğine ve  $O(P \times (M + Mb))$  olarak düşük hesaplama karmaşıklığına sahiptir.  $P$  popülasyon büyüklüğünü,  $M$  maksimum iterasyon sayısını ve  $b$  problemin boyutlarını temsil eder.

Afrika akbabaları optimizasyon algoritmasında başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra tüm çözümlerin uygunluk değerleri hesaplanır. Birinci en iyi çözüm birinci grubun en iyi akbabası olarak atanırken, ikinci en iyi çözüm ikinci grubun en iyi akbabası olarak atanır. Denklem 1 ve Denklem 2 kullanılarak, diğer akbabalar birinci ve ikinci gruptaki en iyi çözümlere doğru hareket eder. Her iterasyonda tüm akbabaların uygunluk değerleri yeniden hesaplanır.  $E(i)$  geçerli iterasyonda seçilen en iyi iki akbabadan birinin konum vektörünü,  $K_{EniyiAkbaba_1}$  geçerli iterasyonda birinci gruptaki en iyi akbabanın konum vektörünü ve  $K_{EniyiAkbaba_2}$  geçerli iterasyonda ikinci gruptaki en iyi akbabanın konum vektörünü temsil eder.  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  parametreleri, toplamaları 1 olacak şekilde 0 ile 1 arasında değerler alırlar.

$$E(i) = \begin{cases} K_{EniyiAkbaba_1}, k_i = \lambda_1 \\ K_{EniyiAkbaba_2}, k_i = \lambda_2 \end{cases} \quad 1$$

$$k_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad 2$$

Akbabalar tok olduklarında yüksek enerjiye sahiptirler ve yiyecek aramak için daha uzun mesafelere giderler. Aç olduklarında ise, daha güçlü akbabanın yanında uzun süre uçmak ve yiyecek aramak için yeterli enerjiye sahip değildirler. Bu davranışın matematiksel modellemesi için Denklem 3 ve Denklem 4 kullanılır.  $m_i$  geçerli iterasyon sayısını ve  $M$  maksimum iterasyon sayısını temsil eder.  $rast_1$ ,  $\rho_1$  ve  $\rho_2$  parametreleri, sırasıyla,  $[0,1]$ ,  $[-1,1]$  ve  $[-2,2]$  aralıklarında rastlantısal değerler alırlar.  $\rho_3$  parametresi sabit bir sayıdır ve  $\rho_3$  değerinin artırılması, optimizasyon işleminin sonlarında keşif aşamasına girme olasılığını artırır.

$$F = (2 \times rast_1 + 1) \times \rho_1 \times \left(1 - \frac{m_i}{M}\right) + t \quad 3$$

$$t = \rho_2 \times \left(\sin^{\rho_3} \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{m_i}{M}\right) + \cos \left(\frac{\pi}{2} \times \frac{m_i}{M}\right) - 1\right) \quad 4$$

$|F|$  değeri 1'e eşit veya büyükse, keşif aşamasına geçilir ve akbabalar en iyi çözümlerden birine rastlantısal mesafelerde yiyecek ararlar. Değişik keşif stratejilerinden yararlanmak için  $[0,1]$  aralığında rastlantısal değerler alan  $K_1$  ile  $rast_{K_1}$  parametreleri karşılaştırılır.  $K_1$ ,  $rast_{K_1}$ 'e eşit veya büyükse Denklem 5 ve Denklem 6 kullanılır.  $K_1$ ,  $rast_{K_1}$ 'den küçükse Denklem 7 kullanılır.  $K(i+1)$  bir sonraki iterasyonda akbabanın konum vektörünü,  $F$  geçerli iterasyonda akbabanın doyma oranını,  $K(i)$  akbabanın geçerli konum vektörünü,  $s_1$  ve  $s_2$  değişken değerleri için alt ve üst sınırları temsil eder.  $rast$ ,  $rast_2$  ve  $rast_3$  parametreleri 0 ile 1 aralığında rastlantısal değerler alırlar.

$$K(i+1) = E(i) - D(i) \times F \quad 5$$

$$D(i) = |2 \times rast \times E(i) - K(i)| \quad 6$$

$$K(i+1) = E(i) - F + rast_2 \times ((s_2 - s_1) \times rast_3 + s_1) \quad 7$$

$|F|$  değeri 1'den küçükse sömürü aşamasına geçilir ve akbabalar en iyi çözümlerden birinin komşuluğunda yiyecek ararlar. Değişik sömürü stratejilerinden yararlanmak için  $[0,1]$  aralığında rastlantısal değerler alan  $K_2$  ile  $rast_{K_2}$  ve  $K_3$  ile  $rast_{K_3}$  parametreleri karşılaştırılır.  $|F|$  değeri 0,5 ile 1 arasında iken,  $K_2$ ,  $rast_{K_2}$ 'e eşit veya büyükse ise Denklem 8 ve Denklem 9 kullanılırken;  $K_2$ ,  $rast_{K_2}$ 'den küçükse Denklem 10 ve Denklem 11 kullanılır. Böylece, akbabaların yiyecek kaynağı üzerinde dönen uçuşları ve kuşatmaları modellenir.  $rast_4$ ,  $rast_5$  ve  $rast_6$  parametreleri  $[0,1]$  aralığında rastlantısal değerler alırlar.

$$K(i + 1) = D(i) \times (F + rast_4) - d(t) \quad 8$$

$$d(t) = E(i) - K(i) \quad 9$$

$$K(i + 1) = E(i) - (U_1 + U_2) \quad 10$$

$$U_1 = E(i) \times \left( \frac{rast_5 \times K(i)}{2\pi} \right) \times \cos(K(i)) \quad 11$$

$$U_2 = E(i) \times \left( \frac{rast_6 \times K(i)}{2\pi} \right) \times \sin(K(i))$$

$|F|$  değeri 0,5'ten küçük iken,  $K_3$ ,  $rast_{K_3}$ 'e eşit veya büyükse ise Denklem 12 ve Denklem 13 kullanılırken;  $K_3$ ,  $rast_{K_3}$ 'den küçükse Denklem 14 ve Denklem 15 kullanılır. Böylece, akbabaların yiyecek kaynağı etrafında birikmesi ve agresif çekişmesi modellenir.  $\lambda$  sabit bir sayıdır,  $b$  problemin boyutlarını temsil eder,  $\rho_4$  ve  $\rho_5$  parametreleri 0 ile 1 aralığında rastlantısal değerler alırlar.  $\Gamma(z) = (z - 1)!$ 'dir. Ayrıca, bu çalışmada  $\lambda_1=0,8$ ,  $\lambda_2=0,2$ ,  $\rho_3=2,5$ ,  $K_1=0,6$ ,  $K_2=0,4$  ve  $K_3=0,6$  değerleri kullanılmıştır [39]. Afrika akbabaları optimizasyon algoritmasının sözde kodu Algoritma 1'de verilirken, parametre çıkarım sürecindeki akış şeması Şekil 1'de sunulmuştur.

$$K(i + 1) = \frac{B_1 + B_2}{2} \quad 12$$

$$B_1 = K_{EnlyiAkbaba_1}(i) - \frac{K_{EnlyiAkbaba_1}(i) \times K(i)}{K_{EnlyiAkbaba_1}(i) - K(i)^2} \times F \quad 13$$

$$B_2 = K_{EnlyiAkbaba_2}(i) - \frac{K_{EnlyiAkbaba_2}(i) \times K(i)}{K_{EnlyiAkbaba_2}(i) - K(i)^2} \times F$$

$$K(i + 1) = E(i) - |d(t)| \times F \times L(b) \quad 14$$

$$L(z) = 0,01 \times \frac{\rho_4 \times \sigma}{|\rho_5|^\lambda}, \sigma = \left( \frac{\Gamma(1 + \lambda) \times \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1 + \lambda}{2}\right) \times \lambda \times 2^{\left(\frac{\lambda-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad 15$$

---

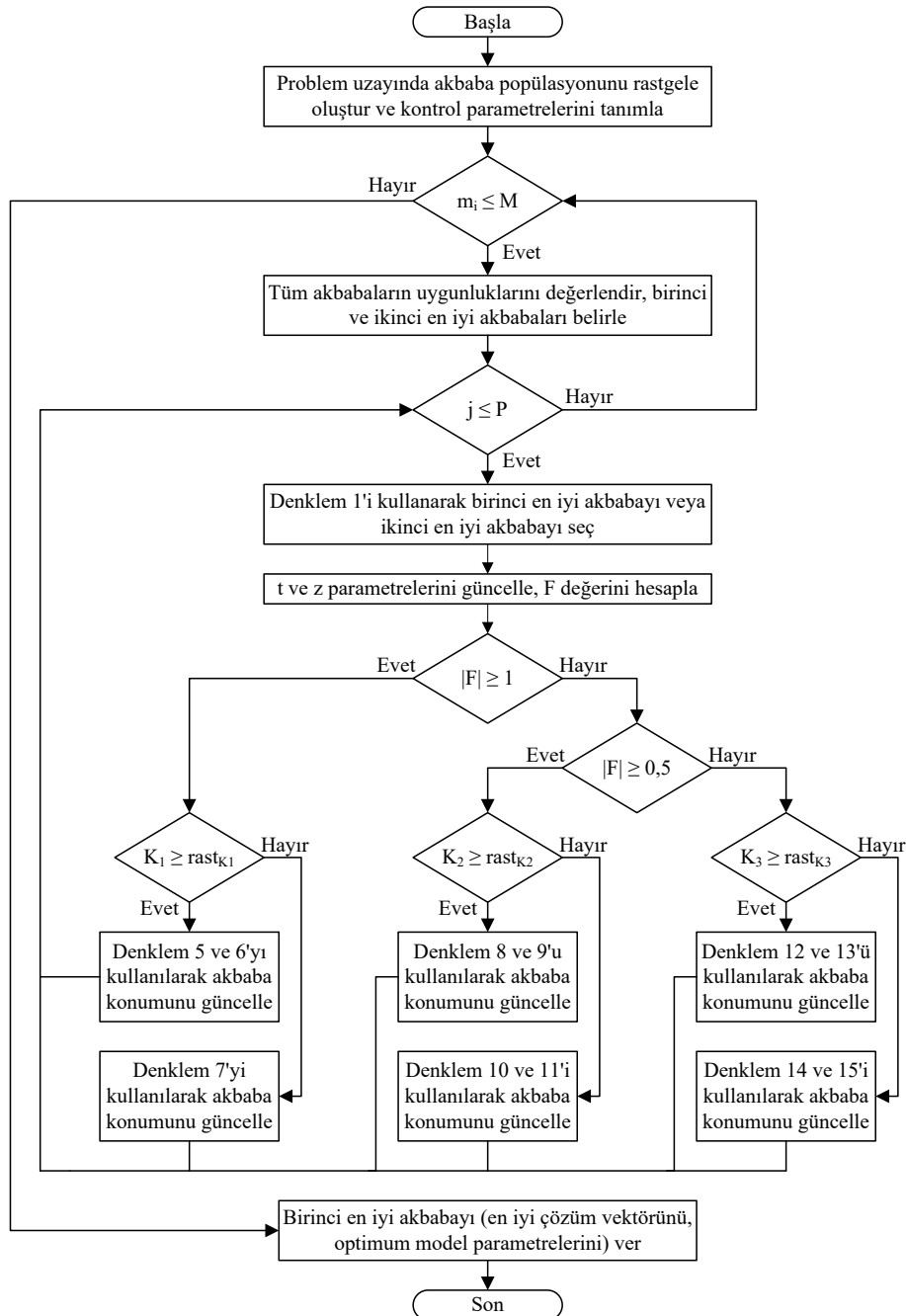
#### Algoritma 1. AAO algoritmasının sözde kodu

- 1: Akbaba popülasyonunu rastgele üret
- 2: **while** (sonlandırma şartı sağlanmadı) **do**
- 3: Akbabaların uygunluk değerlerini hesapla
- 4:  $K_{EnlyiAkbaba_1}$ 'i birinci gruptaki en iyi akbabanın konumu olarak ayarla
- 5:  $K_{EnlyiAkbaba_2}$ 'yi ikinci gruptaki en iyi akbabanın konumu olarak ayarla
- 6: **for** (her bir akbaba) **do**
- 7: Denklem 1'i kullanarak  $E(i)$ 'yi seç
- 8: Denklem 3'ü kullanarak  $F$ 'yi güncelle
- 9: **if** ( $|F| \geq 1$ ) **then**
- 10: **if** ( $K_1 \geq rast_{K_1}$ ) **then**
- 11: Denklem 5 ve 6'yı kullanılarak akbaba konumunu güncelle
- 12: **else**
- 13: Denklem 7'yi kullanılarak akbaba konumunu güncelle

```

14: else
15:   if ( $|F| \geq 0,5$ ) then
16:     if ( $K_2 \geq rast_{K2}$ ) then
17:       Denklem 8 ve 9'u kullanılarak akbaba konumunu güncelle
18:     else
19:       Denklem 10 ve 11'i kullanılarak akbaba konumunu güncelle
20:   else
21:     if ( $K_3 \geq rast_{K3}$ ) then
22:       Denklem 12 ve 13'ü kullanılarak akbaba konumunu güncelle
23:     else
24:       Denklem 14 ve 15'i kullanılarak akbaba konumunu güncelle
25:  $K_{EniyiAkbaba_1}$ 'i döndür

```



Şekil 1. AAO algoritmasının parametre çıkarım sürecindeki akış şeması



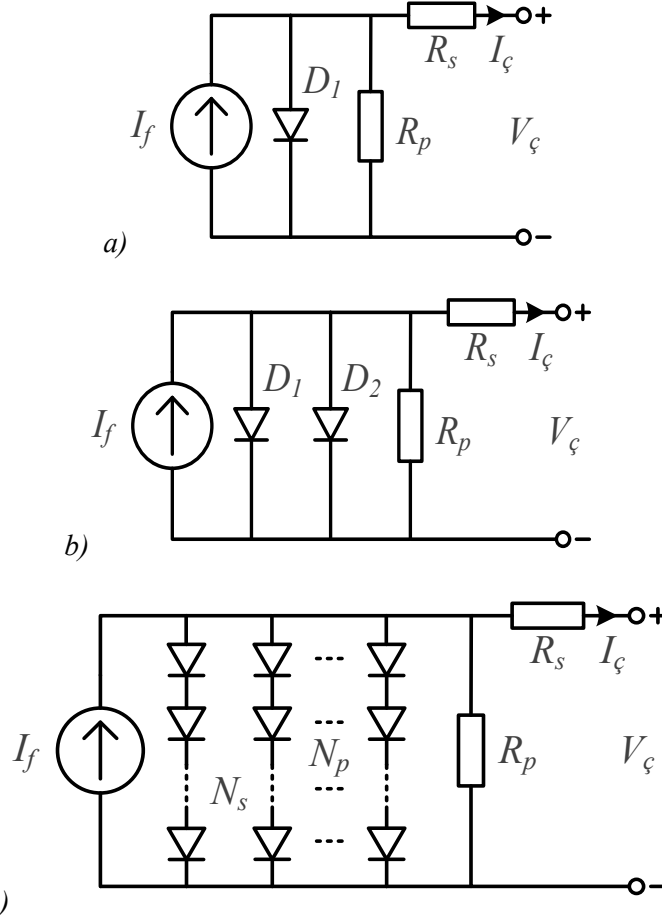
### 3. FOTOVOLTAİK HÜCRE VE FOTOVOLTAİK MODÜL PARAMETRELERİNİN ÇIKARIMI (EXTRACTION OF PHOTOVOLTAIC CELL AND PHOTOVOLTAIC MODULE PARAMETERS)

Fotovoltaik sistemlerin  $I$ - $V$  karakteristiklerini tanımlamak için fotovoltaik hücrelerinin tek diyot ve çift diyot modelleri ile fotovoltaik modüllerinin tek diyot modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik hücrenin tek diyot modelinde çıkış akımı Denklem 16 kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde  $I_{\zeta}$  çıkış akımını,  $I_f$  foton akımını,  $I_{td}$  diyotun ters doyum akımını,  $V_{\zeta}$  çıkış gerilimini,  $V_t$  diyot üzerindeki termal gerilimi ( $V_t = k \cdot T/q$ ),  $a$  diyotun idealite faktörünü,  $R_s$  seri direnci ve  $R_p$  paralel direnci belirtir. Ayrıca,  $k$  Boltzmann sabitini ( $1,3806503 \times 10^{-23}$  J/K),  $q$  elektron yükünü ( $1,60217646 \times 10^{-19}$  C) ve  $T$  hücre sıcaklığını (K) ifade eder. Fotovoltaik hücrenin çift diyot modelinde çıkış akımı Denklem 17 aracılığıyla bulunur.  $I_{td1}$  ve  $I_{td2}$  diyotların ters doyum akımlarını,  $a_1$  ve  $a_2$  diyotların idealite faktörlerini temsil eder. Fotovoltaik modülün tek diyot modelinde çıkış akımını hesaplamak için Denklem 18'den yararlanır. Bu denklemde  $N_p$  paralel kol sayısını ve  $N_s$  her bir paralel koldaki seri bağlı hücre sayısını temsil eder. Tek diyot, çift diyot ve fotovoltaik modül modellerine ait eşdeğer devreler Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$I_{\zeta} = I_f - I_{td} \left( e^{\frac{V_{\zeta} + I_{\zeta} \cdot R_s}{a \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{\zeta} + I_{\zeta} \cdot R_s}{R_p} \quad 16$$

$$I_{\zeta} = I_f - I_{td1} \left( e^{\frac{V_{\zeta} + I_{\zeta} \cdot R_s}{a_1 \cdot V_t}} - 1 \right) - I_{td2} \left( e^{\frac{V_{\zeta} + I_{\zeta} \cdot R_s}{a_2 \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{\zeta} + I_{\zeta} \cdot R_s}{R_p} \quad 17$$

$$I_{\zeta} = I_f \cdot N_p - I_{td} \cdot N_p \left( e^{\frac{V_{\zeta} + I_{\zeta} \cdot R_s}{\frac{N_s}{N_p} \cdot a \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{\zeta} \cdot N_p + I_{\zeta} \cdot R_s}{R_p} \quad 18$$



Şekil 2. Eşdeğer devreler a) Tek diyot modeli b) Çift diyot modeli c) Fotovoltaik modül modeli

Fotovoltaik hücre modellemesinde *R.T.C. France* güneş hücresine ait deneysel veriler kullanılmıştır [40]. Optimizasyon sürecinde bilinmeyen elektriksel parametrelere ait alt ve üst sınırlar  $I_f$  için [0,1] A,  $I_{td}$ ,  $I_{td1}$  ve  $I_{td2}$  için [0,1]  $\mu$ A,  $R_s$  için [0,0,5]  $\Omega$ ,  $R_p$  için [0,100]  $\Omega$  ve  $a$ ,  $a_1$  ve  $a_2$  için [1,2] olarak atanmıştır. Makul bir kıyaslama için şu parametre çıkarım yöntemleri ile karşılaştırma yapılmıştır: Öğretme-Öğrenme Tabanlı Yapay Arı Kolonisi (ÖÖYAK) [41], Diferansiyel Gelişim Tabanlı Benzerlik Yönlendirmeli Evrimsel Optimizasyon (DGBYEO) [42], Gruplandırma Tabanlı Global Harmoni Arama (GGHA) [43], Geliştirilmiş Balina Optimizasyonu (GBO) [44], Yapay Arı Kolonisi (YAK) [45], Yenileme Tabanlı Global Harmoni Arama (YGHA) [43], Benzetiilmiş Tavlama (BT) [46], Örüntü Arama (ÖA) [47] ve Bakteriyel Besin Arama (BBA) [48].

Fotovoltaik modül modellemesinde *Photowatt-PWP201* güneş modülüne ait deneysel veriler kullanılmıştır [40]. Optimizasyon sürecinde belirsiz elektriksel parametrelere ait alt ve üst sınırlar  $I_f$  için [0,2] A,  $I_{td}$  için [0,50]  $\mu$ A,  $R_s$  için [0,2]  $\Omega$ ,  $R_p$  için [0,2000]  $\Omega$  ve  $a$  için [1,50] olarak ayarlanmıştır. Makul bir kıyaslama için şu parametre çıkarım yöntemleri ile karşılaştırma yapılmıştır: Geliştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (GÖÖO) [49], Geliştirilmiş Balina Optimizasyonu (GBO) [44], Öğrenmeye Dayalı Geri İzleme Arama (ÖGİA) [50], Çiçek Tozlaşma Optimizasyonu (ÇTO) [51], Diferansiyel Gelişim Tabanlı Yapay Arı Kolonisi (DGYAK) [52], Benzetiilmiş Tavlama (BT) [46], Kaos Tabanlı Parçacık Sürü Optimizasyonu (KPSO) [53], Örüntü Arama (ÖA) [47] ve Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (ÖÖO) [54].

Afrika akbaları optimizasyon algoritmasında arama ajanlarının sayısı 250 olarak atanırken, maksimum iterasyon sayısı 75000 olarak ayarlanmıştır. Deneysel çalışmalar 12 GB RAM'e sahip 2,71 GHz Intel(R) Core(TM) i5-7200U kişisel bilgisayarda MATLAB R2016a kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak, Denklem 19'da verilen tahmin edilmiş çıkış akımı ile gerçek çıkış akımı arasındaki karekök ortalama hata (*KOH*) ölçüğünden yararlanılmıştır [55]. Çünkü, *KOH* literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır ve diğerlerinden çok daha kötü olan birkaç tahminden büyük ölçüde etkilenme özelliğine sahiptir. Ayrıca, rastlantısal durumları ortadan kaldırmak amacıyla 30 defa bağımsız çalıştırma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en düşük sonuç  $Min(KOH)$ , tüm sonuçların ortalaması  $Ort(KOH)$  ve tüm sonuçların standart sapması  $Ss(KOH)$  olarak sunulmuştur. Fotovoltaik hücre ve fotovoltaik modül modellemelerinde  $Min(KOH)$ 'a karşılık gelen tasarım katsayıları belirtilmiştir.

$$KOH(t) = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (I_{\zeta-Tahmin}^i(t) - I_{\zeta-Gercek}^i)^2} \quad 19$$

Aşağıdaki alt bölümlerde,  $V_{\zeta-Gercek}$  ölçülen çıkış gerilimini,  $I_{\zeta-Gercek}$  ölçülen çıkış akımını,  $I_{\zeta-Tahmin}$  simüle edilmiş çıkış akımını,  $BMH_{I_{\zeta}}$  çıkış akımı için bireysel mutlak hatayı,  $P_{\zeta-Gercek}$  ölçülen çıkış gücünü,  $P_{\zeta-Tahmin}$  simüle edilmiş çıkış gücünü ve  $BMH_{P_{\zeta}}$  çıkış gücü için bireysel mutlak hatayı temsil etmektedir. Ayrıca,  $BMHT$  bireysel mutlak hataların toplamını ifade etmektedir.

### 3.1. Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyot Modellemesi (Single Diode Modeling of Photovoltaic Cell)

Fotovoltaik hücrenin tek diyot modellemesinde Afrika akbaları optimizasyon algoritması tarafından  $I_f$  için 0,76076777 A,  $I_{td}$  için 0,32443458  $\mu$ A,  $R_s$  için 0,03636111  $\Omega$ ,  $R_p$  için 53,91771907  $\Omega$  ve  $a$  için 1,48162183 değerleri optimal olarak bulunmuştur. Bu tasarım katsayılarına göre çıkış akımı ve çıkış gücü için hesaplanan bireysel mutlak hatalar Tablo 1'de verilmiştir. Bu tabloya göre; çıkış akımı için elde edilen bireysel mutlak hatalar 0,00250706 A değerinden küçükken, çıkış gücü için elde edilen bireysel mutlak hatalar 0,00146237 W değerinden büyük değildir. Bireysel mutlak hataların toplamı ise, çıkış akımı için 0,02150077 A ve çıkış gücü için 0,00873101 W olarak bulunmuştur. Afrika akbaları optimizasyon algoritması tarafından belirlenen tasarım katsayılarının karşılaştırması Tablo 2'de yapılmıştır. Bu tablodan görüldüğü gibi; AAO için minimum karekök ortalama hata değeri  $9,860659 \times 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır. GGHA, GBO, YAK, YGHA, BT, ÖA ve BBA'dan daha düşük bir karekök ortalama hata değerini sağlarken, ÖÖYAK ve DGBYEO'dan daha yüksek bir karekök ortalama hata değerini vermiştir. Fotovoltaik hücrenin tek diyot modellemesine ait gerçek ve tahmini  $I-V$  ve  $P-V$  karakteristik eğrileri Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere; AAO tarafından simüle edilmiş akım ve güç verileri, ölçülen verilerle büyük ölçüde örtüşmektedir. Dolayısıyla, AAO'nun,

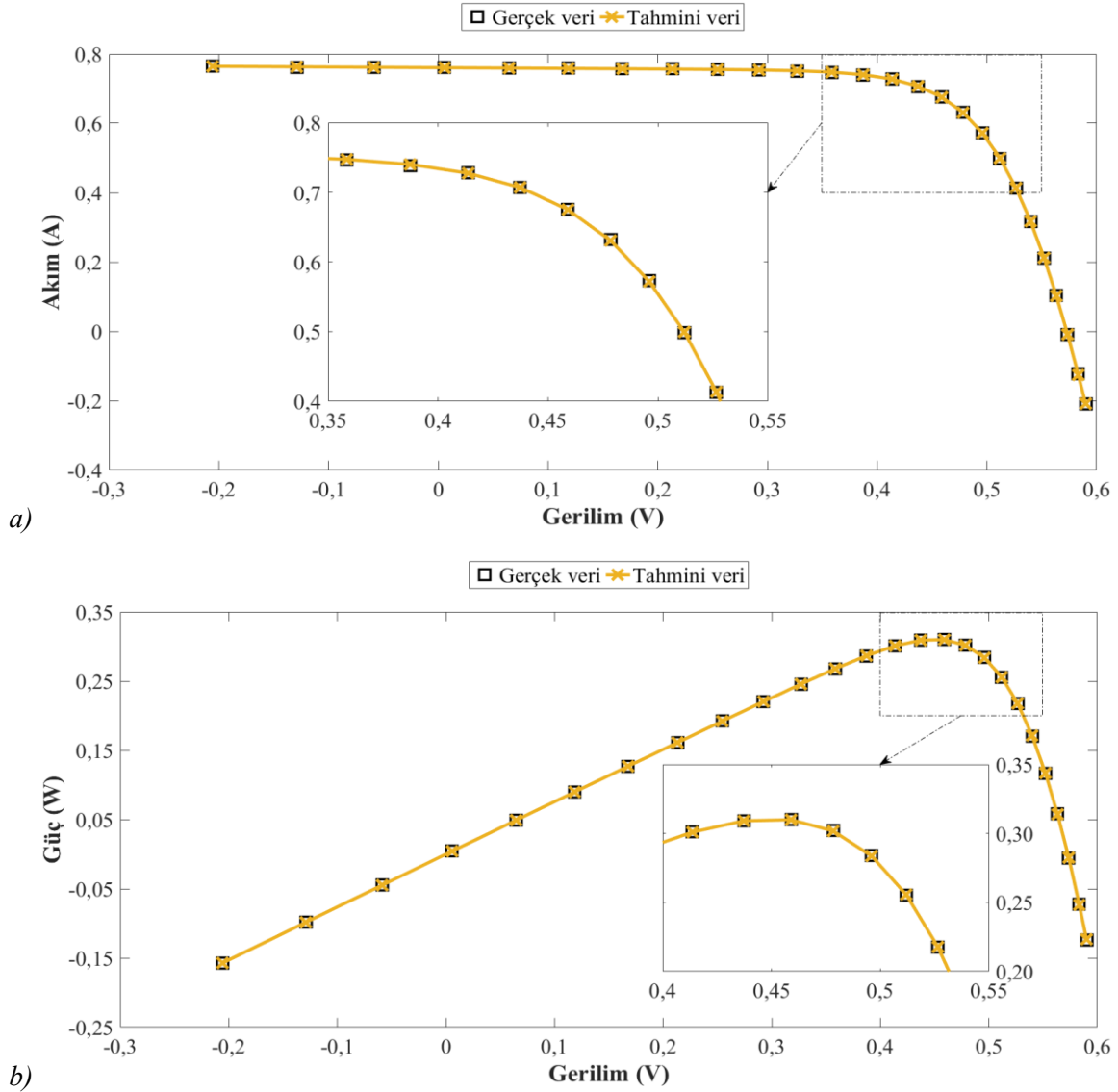
fotovoltaik hücrenin tek diyot modeli için gerçek fotovoltaik hücre özelliklerini temsil etmede güçlü bir yeteneğe sahip olduğu gözlenmiştir.

**Tablo 1.** Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyot Modellemesinde Elde Edilen Bireysel Mutlak Hatalar

$V_C$ -Gerçek (V)	$I_C$ -Gerçek (A)	$I_C$ -Tahmin (A)	$BMH_{I_C}$ (A)	$P_C$ -Gerçek (W)	$P_C$ -Tahmin (W)	$BMH_{P_C}$ (W)
-0,2057	0,7640	0,76406793	0,00006793	-0,15715480	-0,15716877	0,00001397
-0,1291	0,7620	0,76264858	0,00064858	-0,09837420	-0,09845793	0,00008373
-0,0588	0,7605	0,76134563	0,00084563	-0,04471740	-0,04476712	0,00004972
0,0057	0,7605	0,76014874	0,00035126	0,00433485	0,00433285	0,00000200
0,0646	0,7600	0,75905400	0,00094600	0,04909600	0,04903489	0,00006111
0,1185	0,7590	0,75804482	0,00095518	0,08994150	0,08982831	0,00011319
0,1678	0,7570	0,75709743	0,00009743	0,12702460	0,12704095	0,00001635
0,2132	0,7570	0,75615004	0,00084996	0,16139240	0,16121119	0,00018121
0,2545	0,7555	0,75509788	0,00040212	0,19227475	0,19217241	0,00010234
0,2924	0,7540	0,75367644	0,00032356	0,22046960	0,22037499	0,00009461
0,3269	0,7505	0,75140393	0,00090393	0,24533845	0,24563395	0,00029550
0,3585	0,7465	0,74736569	0,00086569	0,26762025	0,26793060	0,00031035
0,3873	0,7385	0,74012611	0,00162611	0,28602105	0,28665084	0,00062979
0,4137	0,7280	0,72738636	0,00061364	0,30117360	0,30091974	0,00025386
0,4373	0,7065	0,70697101	0,00047101	0,30895245	0,30915842	0,00020597
0,4590	0,6755	0,67527289	0,00022711	0,31005450	0,30995026	0,00010424
0,4784	0,6320	0,63074733	0,00125267	0,30234880	0,30174952	0,00059928
0,4960	0,5730	0,57191674	0,00108326	0,28420800	0,28367070	0,00053730
0,5119	0,4990	0,49959790	0,00059790	0,25543810	0,25574417	0,00030607
0,5265	0,4130	0,41364490	0,00064490	0,21744450	0,21778404	0,00033954
0,5398	0,3165	0,31751234	0,00101234	0,17084670	0,17139316	0,00054646
0,5521	0,2120	0,21216254	0,00016254	0,11704520	0,11713494	0,00008974
0,5633	0,1035	0,10226148	0,00123852	0,05830155	0,05760389	0,00069766
0,5736	-0,0100	-0,00871036	0,00128964	-0,00573600	-0,00499626	0,00073974
0,5833	-0,1230	-0,12550706	0,00250706	-0,07174590	-0,07320827	0,00146237
0,5900	-0,2100	-0,20848319	0,00151681	-0,12390000	-0,12300508	0,00089492
<b>BMHT</b>	-	-	<b>0,02150077</b>	-	-	<b>0,00873101</b>

**Tablo 2.** Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyot Modellemesi İçin Tasarım Katsayılarının Karşılaştırması

Parametre	ÖÖYAK	DGBYEO	AAO	GGHA	GBO
$a$	1,48118	1,481184	1,48162183	1,48217	1,4812
$R_p$ ( $\Omega$ )	53,71636	53,71853	53,91771907	53,0647	53,7317
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,03638	0,036377	0,03636111	0,03631	0,0364
$I_{id}$ ( $\mu A$ )	0,32302	0,32302	0,32443458	0,3262	0,3232
$I_f$ (A)	0,76078	0,76078	0,76076777	0,76092	0,7608
Min(KOH)	$9,8602 \times 10^{-4}$	$9,8602 \times 10^{-4}$	$9,860659 \times 10^{-4}$	$9,9089 \times 10^{-4}$	$9,9487 \times 10^{-4}$
Ort(KOH)	$9,98523 \times 10^{-4}$	$9,86022 \times 10^{-4}$	$9,862225 \times 10^{-4}$	-	$9,9524 \times 10^{-4}$
$S_s$ (KOH)	$1,86022 \times 10^{-5}$	$2,47465 \times 10^{-9}$	$7,563068 \times 10^{-8}$	-	$1,1267 \times 10^{-5}$
	YAK	YGHA	BT	ÖA	BBA
$a$	1,4817	1,4874	1,5172	1,6	1,6951
$R_p$ ( $\Omega$ )	53,6433	53,2845	43,1035	64,1026	50,8691
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,0364	0,03613	0,0345	0,0313	0,0325
$I_{id}$ ( $\mu A$ )	0,3251	0,34351	0,4798	0,998	0,8
$I_f$ (A)	0,7608	0,76077	0,762	0,7617	0,7602
Min(KOH)	$10,967 \times 10^{-4}$	$1,0335 \times 10^{-3}$	$1,71 \times 10^{-3}$	$1,4936 \times 10^{-2}$	$2,1887 \times 10^{-1}$
Ort(KOH)	$1 \times 10^{-3}$	-	-	-	-
$S_s$ (KOH)	$1,497 \times 10^{-5}$	-	-	-	-



**Şekil 3.** Fotovoltaik hücrenin tek diyot modellemesi için gerçek ve tahmini sonuçların karşılaştırması  
a)  $I$ - $V$  karakteristik eğrisi b)  $P$ - $V$  karakteristik eğrisi

### 3.2. Fotovoltaik Hücrenin Çift Diyot Modellemesi (Double Diode Modeling of Photovoltaic Cell)

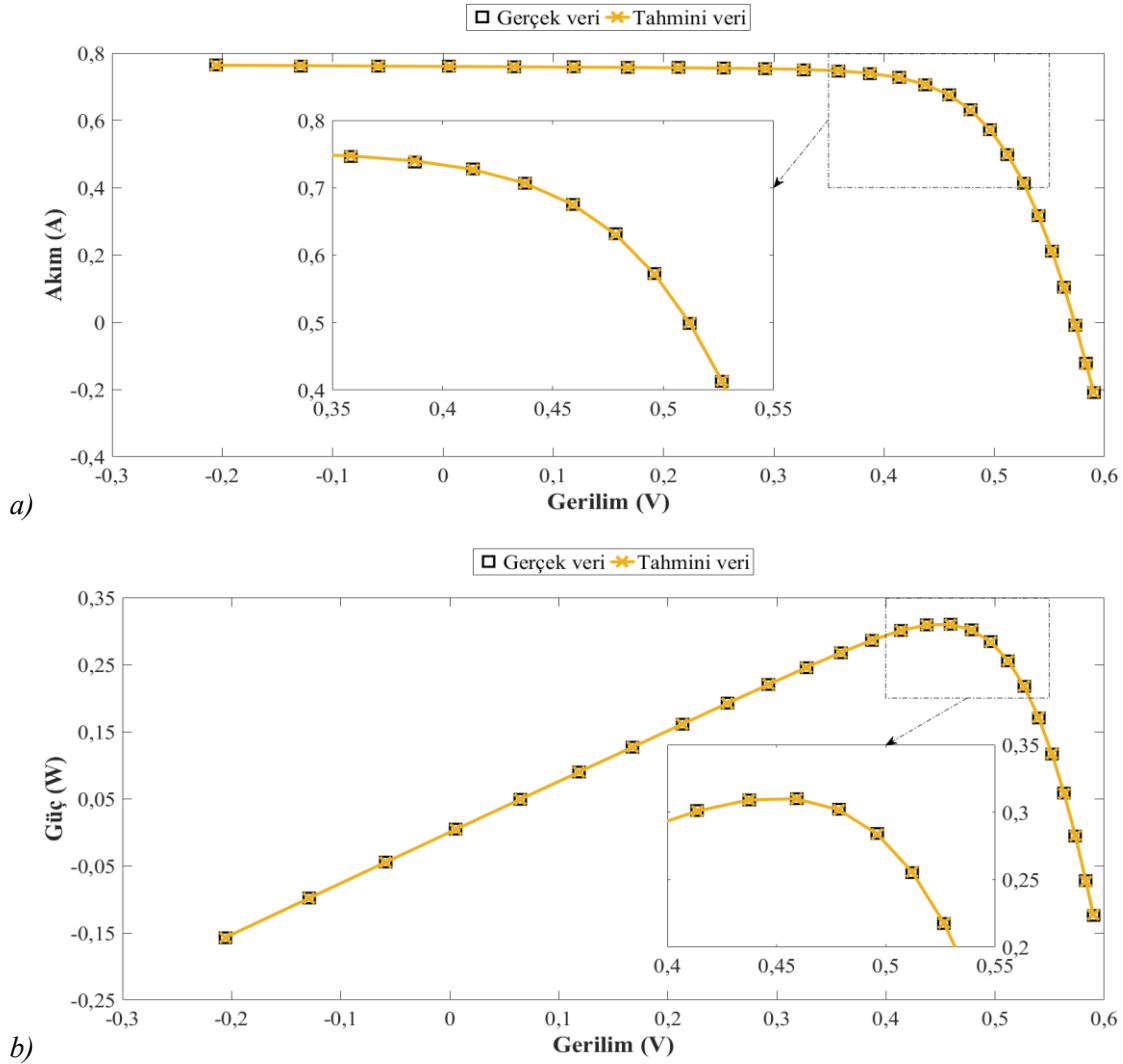
Fotovoltaik hücrenin çift diyot modellemesinde Afrika akbaları optimizasyon algoritması tarafından  $I_f$  için 0,76078351 A,  $I_{d1}$  için 0,85439459  $\mu$ A,  $I_{d2}$  için 0,1901739  $\mu$ A,  $R_s$  için 0,03688254  $\Omega$ ,  $R_p$  için 55,9368243  $\Omega$ ,  $a_1$  için 1,94417508 ve  $a_2$  için 1,43739663 değerleri optimal olarak bulunmuştur. Bu tasarım katsayılarına göre çıkış akımı ve çıkış gücü için hesaplanan bireysel mutlak hatalar Tablo 3'te verilmiştir. Bu tabloya göre; çıkış akımı için elde edilen bireysel mutlak hatalar 0,00255664 A değerinden küçükken, çıkış gücü için elde edilen bireysel mutlak hatalar 0,00149129 W değerinden büyük değildir. Bireysel mutlak hataların toplamları ise, çıkış akımı için 0,02126602 A olarak ve çıkış gücü için 0,00880645 W olarak bulunmuştur. Afrika akbaları optimizasyon algoritması tarafından belirlenen tasarım katsayılarının karşılaştırması Tablo 4'de yapılmıştır. Bu tablodan görüldüğü gibi; AAO için minimum karekök ortalama hata değeri  $9,837632 \times 10^{-4}$  olarak hesaplanmıştır. ÖÖYAK, DGBYEO, GBO, YGHA, GGHA, YAK, ÖA, BT ve BBA'dan daha düşük karekök ortalama hata değerini sağlamıştır. Fotovoltaik hücrenin çift diyot modellemesine ait gerçek ve tahmini  $I$ - $V$  ve  $P$ - $V$  karakteristik eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere; AAO tarafından tahmin edilmiş akım ve güç verileri, gerçek verilerle çok iyi bir uyum içerisindedir. Dolayısıyla, AAO'nun, fotovoltaik hücrenin çift diyot modeli için fiziksel fotovoltaik hücre davranışını yansıtmada yüksek bir kapasiteye sahip olduğu gözlenmiştir.

**Tablo 3.** Fotovoltaik Hücrenin Çift Diyot Modellemesinde Elde Edilen Bireysel Mutlak Hatalar

$V_C$ -Gerçek (V)	$I_C$ -Gerçek (A)	$I_C$ -Tahmin (A)	$BMH_{I_C}$ (A)	$P_C$ -Gerçek (W)	$P_C$ -Tahmin (W)	$BMH_{P_C}$ (W)
-0,2057	0,7640	0,76395814	0,00004186	-0,15715480	-0,15714619	0,00000861
-0,1291	0,7620	0,76258995	0,00058995	-0,09837420	-0,09845036	0,00007616
-0,0588	0,7605	0,76133374	0,00083374	-0,04471740	-0,04476642	0,00004902
0,0057	0,7605	0,76017910	0,00032090	0,00433485	0,00433302	0,00000183
0,0646	0,7600	0,75912118	0,00087882	0,04909600	0,04903923	0,00005677
0,1185	0,7590	0,75814172	0,00085828	0,08994150	0,08983979	0,00010171
0,1678	0,7570	0,75721364	0,00021364	0,12702460	0,12706045	0,00003585
0,2132	0,7570	0,75627015	0,00072985	0,16139240	0,16123680	0,00015560
0,2545	0,7555	0,75520071	0,00029929	0,19227475	0,19219858	0,00007617
0,2924	0,7540	0,75373680	0,00026320	0,22046960	0,22039264	0,00007696
0,3269	0,7505	0,75139899	0,00089899	0,24533845	0,24563233	0,00029388
0,3585	0,7465	0,74728333	0,00078333	0,26762025	0,26790107	0,00028082
0,3873	0,7385	0,73997639	0,00147639	0,28602105	0,28659286	0,00057181
0,4137	0,7280	0,72720463	0,00079537	0,30117360	0,30084455	0,00032905
0,4373	0,7065	0,70681365	0,00031365	0,30895245	0,30908961	0,00013716
0,4590	0,6755	0,67519284	0,00030716	0,31005450	0,30991351	0,00014099
0,4784	0,6320	0,63076815	0,00123185	0,30234880	0,30175948	0,00058932
0,4960	0,5730	0,57202364	0,00097636	0,28420800	0,28372373	0,00048427
0,5119	0,4990	0,49974491	0,00074491	0,25543810	0,25581942	0,00038132
0,5265	0,4130	0,41376484	0,00076484	0,21744450	0,21784719	0,00040269
0,5398	0,3165	0,31755731	0,00105731	0,17084670	0,17141744	0,00057074
0,5521	0,2120	0,21210746	0,00010746	0,11704520	0,11710453	0,00005933
0,5633	0,1035	0,10212653	0,00137347	0,05830155	0,05752788	0,00077367
0,5736	-0,0100	-0,00882167	0,00117833	-0,00573600	-0,00506011	0,00067589
0,5833	-0,1230	-0,12555664	0,00255664	-0,07174590	-0,07323719	0,00149129
0,5900	-0,2100	-0,20832957	0,00167043	-0,12390000	-0,12291445	0,00098555
<b>BMHT</b>	-	-	<b>0,02126602</b>	-	-	<b>0,00880645</b>

**Tablo 4.** Fotovoltaik Hücrenin Çift Diyot Modellemesi İçin Tasarım Katsayılarının Karşılaştırması

Parametre	AAO	ÖÖYAK	DGBYEO	GBO	YGHA
$a_1$	1,94417508	1,9075	1,469655	2	1,92126
$a_2$	1,43739663	1,45671	1,93228	1,4545	1,42814
$R_p$ ( $\Omega$ )	55,9368243	54,66797	54,3667	55,4082	56,8368
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,03688254	0,03667	0,03648	0,0367	0,0369
$I_{d1}$ ( $\mu A$ )	0,85439459	0,42394	0,2807	0,6771	0,9731
$I_{d2}$ ( $\mu A$ )	0,1901739	0,24011	0,24996	0,2355	0,16791
$I_f$ (A)	0,76078351	0,76081	0,76079	0,7608	0,76079
Min(KOH)	$9,837632 \times 10^{-4}$	$9,8414 \times 10^{-4}$	$9,8441 \times 10^{-4}$	$9,858 \times 10^{-4}$	$9,8657 \times 10^{-4}$
Ort(KOH)	$9,852212 \times 10^{-4}$	$1,05553 \times 10^{-3}$	$9,85774 \times 10^{-4}$	$9,9693 \times 10^{-4}$	-
$S_s$ (KOH)	$1,469722 \times 10^{-6}$	$1,55034 \times 10^{-4}$	$4,01504 \times 10^{-7}$	$1,9297 \times 10^{-5}$	-
	GGHA	YAK	ÖA	BT	BBA
$a_1$	1,49638	1,4495	1,6	1,5172	1,3809
$a_2$	1,92998	1,4885	1,192	2	1,5255
$R_p$ ( $\Omega$ )	62,7899	53,7804	81,3008	43,1035	60
$R_s$ ( $\Omega$ )	0,03562	0,0364	0,032	0,0345	0,0351
$I_{d1}$ ( $\mu A$ )	0,37014	0,0407	0,9889	0,4767	0,0094
$I_{d2}$ ( $\mu A$ )	0,13504	0,2874	0,0001	0,01	0,0453
$I_f$ (A)	0,76056	0,7608	0,7602	0,7623	0,7609
Min(KOH)	$10,684 \times 10^{-4}$	$11,146 \times 10^{-4}$	$15,176 \times 10^{-3}$	$1,6644 \times 10^{-2}$	$2,9827 \times 10^{-1}$
Ort(KOH)	-	$1 \times 10^{-3}$	-	-	-
$S_s$ (KOH)	-	$3,285 \times 10^{-5}$	-	-	-



**Şekil 4.** Fotovoltaik hücrenin çift diyot modellemesi için gerçek ve tahmini sonuçların karşılaştırması  
a) I-V karakteristik eğrisi b) P-V karakteristik eğrisi

### 3.3. Fotovoltaik Modülün Tek Diyot Modellemesi (Single Diode Modeling of Photovoltaic Module)

Fotovoltaik modülün tek diyot modellemesinde Afrika akbaları optimizasyon algoritması tarafından  $I_f$  için 1,03048056 A,  $I_{id}$  için 3,49223284  $\mu$ A,  $R_s$  için 1,20101553  $\Omega$ ,  $R_p$  için 987,15837492  $\Omega$  ve  $a$  için 48,65369836 değerleri optimal olarak bulunmuştur. Bu tasarım katsayılarına göre çıkış akımı ve çıkış gücü için hesaplanan bireysel mutlak hatalar Tablo 5'te verilmiştir. Bu tabloya göre; çıkış akımı için elde edilen bireysel mutlak hatalar 0,00482600 A değerinden küçükken, çıkış gücü için elde edilen bireysel mutlak hatalar 0,07974538 W değerinden büyük değildir. Bireysel mutlak hataların toplamları ise, çıkış akımı için 0,04894638 A olarak ve çıkış gücü için 0,51635262 W olarak bulunmuştur. Afrika akbaları optimizasyon algoritması tarafından belirlenen tasarım katsayılarının karşılaştırması Tablo 6'da yapılmıştır. Bu tablodan görüldüğü gibi; AAO için minimum karekök ortalama hata değeri  $2,425094 \times 10^{-3}$  olarak hesaplanmıştır. GÖÖO, GBO, ÖGİA, ÇTO, DGYAK, BT, KPSO, ÖA ve ÖÖO'dan daha düşük karekök ortalama hata değerini sağlamıştır. Fotovoltaik modülün tek diyot modellemesine ait gerçek ve tahmini I-V ve P-V karakteristik eğrileri Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere; AAO tarafından hesaplanmış akım ve güç verileri, deneysel verilerle önemli ölçüde çakışmaktadır. Dolayısıyla, AAO'nun, fotovoltaik modülün tek diyot modeli için gerçek fotovoltaik modül karakteristiğini temsil etmede verimli olduğu gözlenmiştir.

Fotovoltaik hücrenin tek ve çift diyot modellemeleri ile fotovoltaik modülün tek diyot modellemesi için AAO'nun parametre çıkarım sürecindeki yakınsama eğrileri ise Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde; Afrika akbaları optimizasyon algoritmasının, hem fotovoltaik hücrenin tek ve çift diyot modellemelerinde hem de fotovoltaik modülün tek diyot modellemesinde yerel minimumdan kaçınma ve

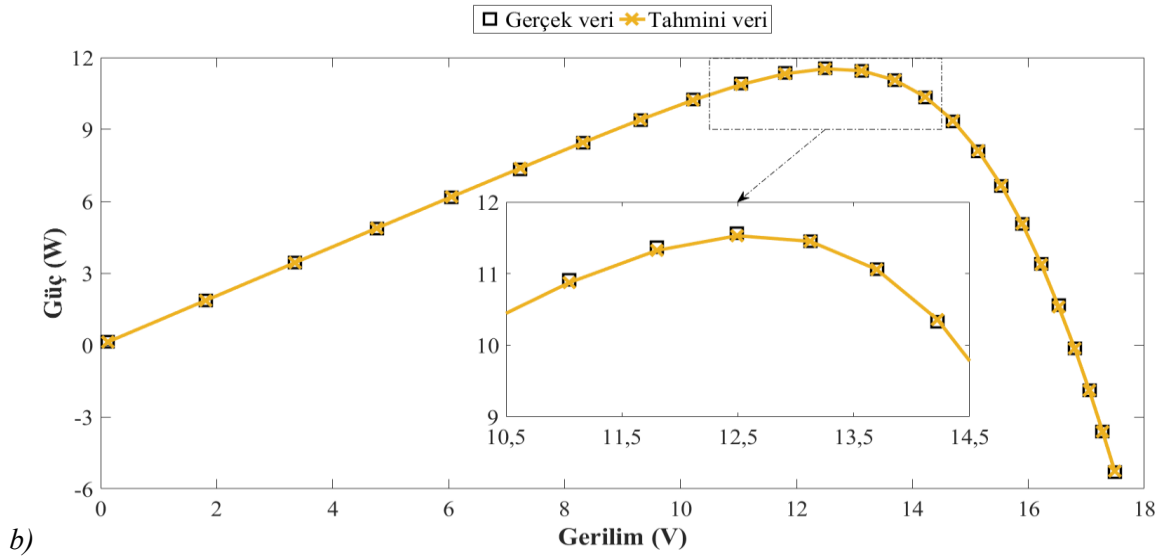
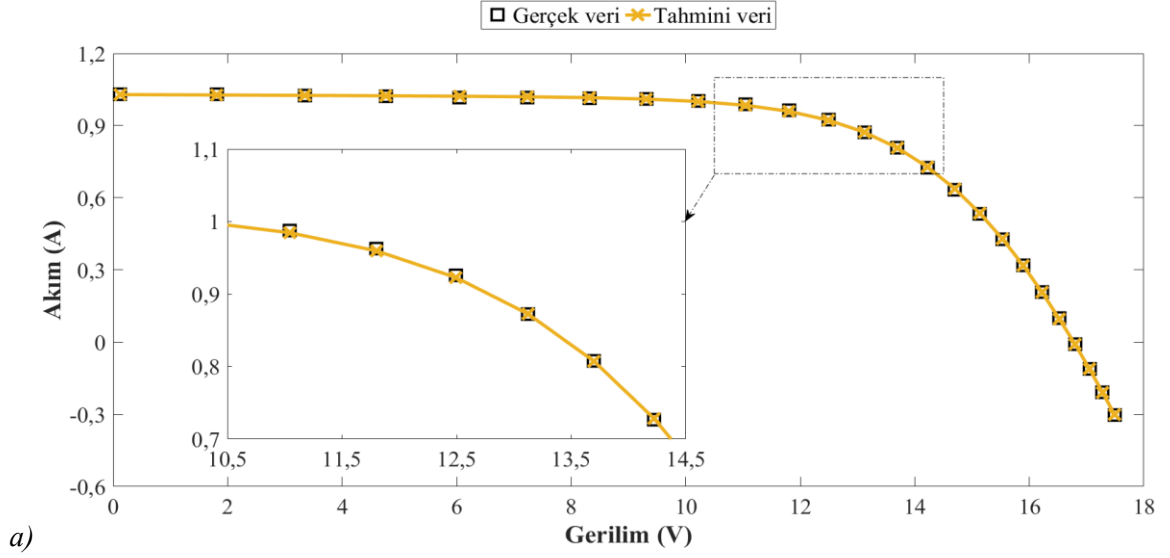
global optimumu bulma açısından etkin bir arama yeteneğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, yakınsama hızı açısından tek diyot tabanlı fotovoltaik hücre modellemesi daha az çalışma süresine sahiptir. Ardından, tek diyot tabanlı fotovoltaik modül modellemesi gelmektedir. Çift diyot tabanlı fotovoltaik hücre modellemesi ise daha fazla hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır.

**Tablo 5.** Fotovoltaik Modülün Tek Diyot Modellemesinde Elde Edilen Bireysel Mutlak Hatalar

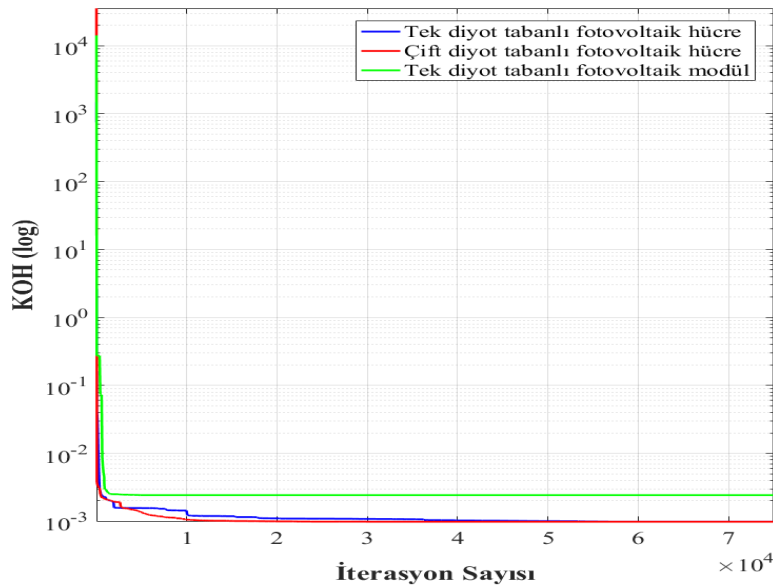
$V_C$ -Gerçek (V)	$I_C$ -Gerçek (A)	$I_C$ -Tahmin (A)	$BMH_{I_C}$ (A)	$P_C$ -Gerçek (W)	$P_C$ -Tahmin (W)	$BMH_{P_C}$ (W)
0,1248	1,0315	1,02909296	0,00240704	0,12873120	0,12843080	0,00030040
1,8093	1,0300	1,02736380	0,00263620	1,86357900	1,85880933	0,00476967
3,3511	1,0260	1,02573260	0,00026740	3,43822860	3,43733252	0,00089608
4,7622	1,0220	1,02410516	0,00210516	4,86696840	4,87699357	0,01002517
6,0538	1,0180	1,02229601	0,00429601	6,16276840	6,18877559	0,02600719
7,2364	1,0155	1,01993990	0,00443990	7,34856420	7,38069307	0,03212887
8,3189	1,0140	1,01637581	0,00237581	8,43536460	8,45512876	0,01976416
9,3097	1,0100	1,01051046	0,00051046	9,40279700	9,40754921	0,00475221
10,2163	1,0035	1,00064271	0,00285729	10,25205705	10,22286609	0,02919096
11,0449	0,9880	0,98455937	0,00344063	10,91236120	10,87435980	0,03800140
11,8018	0,9630	0,95952820	0,00347180	11,36513340	11,32415990	0,04097350
12,4929	0,9255	0,92284007	0,00265993	11,56217895	11,52894867	0,03323028
13,1231	0,8725	0,87259602	0,00009602	11,44990475	11,45116482	0,00126007
13,6983	0,8075	0,80726731	0,00023269	11,06137725	11,05818983	0,00318742
14,2221	0,7265	0,72832831	0,00182831	10,33235565	10,35835812	0,02600247
14,6995	0,6345	0,63713083	0,00263083	9,32683275	9,36550464	0,03867189
15,1346	0,5345	0,53620865	0,00170865	8,08944370	8,11530343	0,02585973
15,5311	0,4275	0,42951031	0,00201031	6,63954525	6,67076759	0,03122234
15,8929	0,3185	0,31877700	0,00027700	5,06188865	5,06629102	0,00440237
16,2229	0,2085	0,20739466	0,00110534	3,38247465	3,36454290	0,01793175
16,5241	0,1010	0,09617400	0,00482600	1,66893410	1,58918872	0,07974538
16,7987	-0,0080	-0,00832008	0,00032008	-0,13438960	-0,13976649	0,00537689
17,0499	-0,1110	-0,11093378	0,00006622	-1,89253890	-1,89140988	0,00112902
17,2793	-0,2090	-0,20924879	0,00024879	-3,61137370	-3,61567257	0,00429887
17,4885	-0,3030	-0,30087149	0,00212851	-5,29901550	-5,26179097	0,03722453
<b>BMHT</b>	-	-	<b>0,04894638</b>	-	-	<b>0,51635262</b>

**Tablo 6.** Fotovoltaik Modülün Tek Diyot Modellemesi İçin Tasarım Katsayılarının Karşılaştırması

Parametre	AAO	GÖÖO	GBO	ÖĞİA	ÇTO
$a$	48,65369836	48,6428	48,6313	48,6866	48,13128
$R_p$ ( $\Omega$ )	987,15837492	981,9823	978,6771	1020,4	811,3721
$R_s$ ( $\Omega$ )	1,20101553	1,2013	1,2016	1,2014	1,217583
$I_{id}$ ( $\mu A$ )	3,49223284	3,4823	3,4717	3,5233	3,047538
$I_f$ (A)	1,03048056	1,0305	1,0305	1,0304	1,032091
Min(KOH)	$2,425094 \times 10^{-3}$	$2,425194 \times 10^{-3}$	$2,425233 \times 10^{-3}$	$2,4305 \times 10^{-3}$	$2,742457 \times 10^{-3}$
Ort(KOH)	$2,425108 \times 10^{-3}$	$2,4251 \times 10^{-3}$	$2,4269 \times 10^{-3}$	$2,493072 \times 10^{-3}$	-
$S_s$ (KOH)	$1,18617 \times 10^{-8}$	$1,27 \times 10^{-17}$	$2,2364 \times 10^{-6}$	$4,652857 \times 10^{-5}$	-
	DGYAK	BT	KPSO	ÖA	ÖÖO
$a$	48,3948	48,8211	52,243	48,2889	48,44228
$R_p$ ( $\Omega$ )	845,2495	833,3333	1850,1	714,2857	548,666
$R_s$ ( $\Omega$ )	1,2062	1,1989	1,0755	1,2053	1,206
$I_{id}$ ( $\mu A$ )	3,2774	3,6642	8,301	3,1756	3,280945
$I_f$ (A)	1,0318	1,0331	1,0286	1,0313	1,031805
Min(KOH)	$3,88551 \times 10^{-3}$	$4,169322 \times 10^{-3}$	$4,212772 \times 10^{-3}$	$4,507511 \times 10^{-3}$	$6,567087 \times 10^{-3}$
Ort(KOH)	-	-	-	-	-
$S_s$ (KOH)	-	-	-	-	-



**Şekil 5.** Fotovoltaik modülün tek diyot modellemesi için gerçek ve tahmini sonuçların karşılaştırması  
a) I-V karakteristik eğrisi b) P-V karakteristik eğrisi



**Şekil 6.** Fotovoltaik modül ve fotovoltaik hücre modellemeleri için yakınsama eğrileri



#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı fotovoltaik modellerin bilinmeyen parametrelerini doğru bir şekilde tanımlamak için Afrika akbabaları optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Fotovoltaik hücre modellemelerinde elde edilen çıktılar değerlendirildiğinde; minimum karekök ortalama hata değeri tek diyot devre modeli için  $9,860659 \times 10^{-4}$  olarak hesaplanırken, çift diyot devre modeli için  $9,837632 \times 10^{-4}$  olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, çift diyot modeli tabanlı AAO algoritması tek diyot modeli tabanlı AAO algoritmasından daha iyi parametre çıkarım performansı sergilemiştir. Ayrıca, çift diyot modeli tabanlı AAO algoritması literatürde yaygın olarak kullanılan ÖÖYAK, DGBYEO, GBO, YGHA, GGHA, YAK, ÖA, BT ve BBA algoritmalarından daha düşük karekök ortalama hata değeri sağlamıştır. Fotovoltaik modül modellemesinde elde edilen çıktılar değerlendirildiğinde, minimum karekök ortalama hata değeri tek diyot devre modeli için  $2,425094 \times 10^{-3}$  olarak bulunmuştur. Tek diyot modeli tabanlı AAO algoritması literatürde sıklıkla kullanılan GÖÖO, GBO, ÖGİA, ÇTO, DGYAK, BT, KPSO, ÖA ve ÖÖ algoritmalarından daha iyi parametre çıkarım performansı göstermiştir. Sonuç olarak, AAO algoritması fotovoltaik hücrelerin ve fotovoltaik modüllerin gerçek akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde güçlü bir potansiyele sahiptir. Gelecek çalışmalarda, daha kararlı parametre değerleri tanımlamak için AAO algoritmasının yeni varyantları geliştirilmeli ve uygulanmalıdır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ismaeel, A.A.K., Houssein, E.H., Oliva, D., & Said, M. (2021). Gradient-based optimizer for parameter extraction in photovoltaic models. *IEEE Access*, 9, 13403-13416.
- [2] Khursheed, M.U.N., Alghamdi, M.A., Khan, M.F.N., Khan, A.K., Khan, I., Ahmed, A., Kiani, A.T., & Khan, M.A. (2021). PV model parameter estimation using modified FPA with dynamic switch probability and step size function. *IEEE Access*, 9, 42027-42044.
- [3] Ibrahim, I.A., Hossain, M.J., Duck, B.C., & Fell, C.J. (2020). An adaptive wind-driven optimization algorithm for extracting the parameters of a single-diode PV cell model. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(2), 1054-1066.
- [4] Ridha, H.M., Gomes, C., & Hizam, H. (2020). Estimation of photovoltaic module model's parameters using an improved electromagnetic-like algorithm. *Neural Computing and Applications*, 32(16), 12627-12642.
- [5] Muhsen, D.H., Ghazali, A.B., Khatib, T., & Abed, I.A. (2015). Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid evolutionary algorithm. *Energy Conversion and Management*, 105, 552-561.
- [6] Ridha, H.M. (2020). Parameters extraction of single and double diodes photovoltaic models using Marine Predators Algorithm and Lambert W function. *Solar Energy*, 209, 674-693.
- [7] Chaibi, Y., Allouhi, A., & Salhi, M. (2020). A simple iterative method to determine the electrical parameters of photovoltaic cell. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122363.
- [8] Ganesh Pardhu, B.S.S. & Kota, V. R. (2021). Radial movement optimization based parameter extraction of double diode model of solar photovoltaic cell. *Solar Energy*, 213, 312-327.
- [9] Et-torabi, K., Nassar-eddine, I., Obbadi, A., Errami, Y., Rmaily, R., Sahnoun, S., El fajri, A., & Agunaou, M. (2017). Parameters estimation of the single and double diode photovoltaic models using a Gauss-Seidel algorithm and analytical method: A comparative study. *Energy Conversion and Management*, 148, 1041-1054.
- [10] Long, W., Wu, T., Jiao, J., Tang, M., & Xu, M. (2020). Refraction-learning-based whale optimization algorithm for high-dimensional problems and parameter estimation of PV model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 89, 103457.
- [11] Ndi, F.E., Perabi, S.N., Ndjakomo, S.E., Abessolo, G.O., & Mengata, G.M. (2021). Estimation of single-diode and two diode solar cell parameters by equilibrium optimizer method. *Energy Reports*, 7, 4761-4768.

- [12] Chen, X., Yu, K., Du, W., Zhao, W., & Liu, G. (2016). Parameters identification of solar cell models using generalized oppositional teaching learning based optimization. *Energy*, 99, 170-180.
- [13] Jamadi, M., Merrikh-Bayat, F., & Bigdeli, M. (2015). Very accurate parameter estimation of single- and double-diode solar cell models using a modified artificial bee colony algorithm. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 7(1), 13-25.
- [14] Weng, X., Heidari, A.A., Liang, G., Chen, H., Ma, X., Mafarja, M., & Turabieh, H. (2021). Laplacian Nelder-Mead spherical evolution for parameter estimation of photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 243, 114223.
- [15] Gude, S. & Jana, K.C. (2020). Parameter extraction of photovoltaic cell using an improved cuckoo search optimization. *Solar Energy*, 204, 280-293.
- [16] Yu, K., Qu, B., Yue, C., Ge, S., Chen, X., & Liang, J. (2019). A performance-guided JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module. *Applied Energy*, 237, 241-257.
- [17] Jian, X. & Zhu, Y. (2021). Parameters identification of photovoltaic models using modified Rao-1 optimization algorithm. *Optik*, 231, 166439.
- [18] Basset, M.A., Mohamed, R., Chakraborty, R.K., Sallam, K., & Ryan, M.J. (2021). An efficient teaching-learning-based optimization algorithm for parameters identification of photovoltaic models: Analysis and validations. *Energy Conversion and Management*, 227, 113614.
- [19] Long, W., Wu, T., Xu, M., Tang, M., & Cai, S. (2021). Parameters identification of photovoltaic models by using an enhanced adaptive butterfly optimization algorithm. *Energy*, 229, 120750.
- [20] Jiao, S., Chong, G., Huang, C., Hu, H., Wang, M., Heidari, A.A., Chen, H., & Zhao, X. (2020). Orthogonally adapted Harris hawks optimization for parameter estimation of photovoltaic models. *Energy*, 203, 117804.
- [21] Zhang, Y., Ma, M., & Jin, Z. (2020). Backtracking search algorithm with competitive learning for identification of unknown parameters of photovoltaic systems. *Expert Systems with Applications*, 160, 113750.
- [22] Zhang, Y., Huang, C., & Jin, Z. (2020). Backtracking search algorithm with reusing differential vectors for parameter identification of photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 223, 113266.
- [23] Mi, X., Liao, Z., Li, S., & Gu, Q. (2021). Adaptive teaching-learning-based optimization with experience learning to identify photovoltaic cell parameters. *Energy Reports*, 7, 4114-4125.
- [24] Zhang, H., Heidari, A.A., Wang, M., Zhang, L., Chen, H., & Li, C. (2020). Orthogonal Nelder-Mead moth flame method for parameters identification of photovoltaic modules. *Energy Conversion and Management*, 211, 112764.
- [25] Liu, Y., Heidari, A.A., Ye, X., Liang, G., Chen, H., & He, C. (2021). Boosting slime mould algorithm for parameter identification of photovoltaic models. *Energy*, 234, 121164.
- [26] Deotti, L.M.P., Pereira, J.L.R., & Júnior, I.C.S. (2020). Parameter extraction of photovoltaic models using an enhanced Lévy flight bat algorithm. *Energy Conversion and Management*, 221, 113114.
- [27] Lekouaghet, B., Boukabou, A., & Boubakir, C. (2021). Estimation of the photovoltaic cells/modules parameters using an improved Rao-based chaotic optimization technique. *Energy Conversion and Management*, 229, 113722.
- [28] Premkumar, M., Jangir, P., Sowmya, R., Elavarasan, R.M., & Kumar, B.S. (2021). Enhanced chaotic JAYA algorithm for parameter estimation of photovoltaic cell/modules. *ISA Transactions*, 116, 139-166.
- [29] Chen, X. & Yu, K. (2019). Hybridizing cuckoo search algorithm with biogeography-based optimization for estimating photovoltaic model parameters. *Solar Energy*, 180, 192-206.

- [30] Long, W., Cai, S., Jiao, J., Xu, M., & Wu, T. (2020). A new hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and cuckoo search for parameter extraction of solar photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 203, 112243.
- [31] Chen, H., Jiao, S., Heidari, A.A., Wang, M., Chen, X., & Zhao, X. (2019). An opposition-based sine cosine approach with local search for parameter estimation of photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 195, 927-942.
- [32] Xiong, G. , Li, L., Mohamed, A.W., Yuan, X., & Zhang, J. (2021). A new method for parameter extraction of solar photovoltaic models using gaining-sharing knowledge based algorithm. *Energy Reports*, 7, 3286-3301.
- [33] Abdel-Basset, M., El-Shahat, D., Chakraborty, R.K., & Ryan, M. (2021). Parameter estimation of photovoltaic models using an improved marine predators algorithm. *Energy Conversion and Management*, 227, 113491.
- [34] Li, S., Gu, Q., Gong, W., & Ning, B. (2020). An enhanced adaptive differential evolution algorithm for parameter extraction of photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 205, 112443.
- [35] Gao, S., Wang, K., Tao, S., Jin, T., Dai, H., & Cheng, J. (2021). A state-of-the-art differential evolution algorithm for parameter estimation of solar photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 230, 113784.
- [36] Hu, Z., Gong, W., & Li, S. (2021). Reinforcement learning-based differential evolution for parameters extraction of photovoltaic models. *Energy Reports*, 7, 916-928.
- [37] Liang, J., Ge, S., Qu, B., Yu, K., Liu, F., Yang, H., Wei, P., & Li, Z. (2020). Classified perturbation mutation based particle swarm optimization algorithm for parameters extraction of photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 203, 112138.
- [38] Çelik, E., Öztürk, N. & Arya, Y. (2021). Advancement of the search process of salp swarm algorithm for global optimization problems. *Expert Systems with Applications*, 182, 115292.
- [39] Abdollahzadeh, B., Gharehchopogh F.S., & Mirjalili, S. (2021). African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107408.
- [40] Easwarakhanthan, T., Bottin, J., Bouhouch, I., & Boutrit, C. (1986). Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers. *International Journal of Solar Energy*, 4, 1-12.
- [41] Chen, X., Xu, B., Mei, C., Ding, Y., & Lia, K. (2018). Teaching-learning-based artificial bee colony for solar photovoltaic parameter estimation. *Applied Energy*, 212, 1578-1588.
- [42] Liang, J., Qiao, K., Yuan, M., Yu, K., Qu, B., Ge, S., Li, Y., & Chen, G. (2020). Evolutionary multi-task optimization for parameters extraction of photovoltaic models. *Energy Conversion and Management*, 207, 112509.
- [43] Askarzadeh, A. & Rezaazadeh, A. (2012). Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms. *Solar Energy*, 86(11), 3241-3249.
- [44] Xiong, G., Zhang, J., Shi, D., & He, Y. (2018). Parameter extraction of solar photovoltaic models using an improved whale optimization algorithm. *Energy Conversion and Management*, 174, 388-405.
- [45] Oliva, D., Cuevas, E., & Pajares, G. (2014). Parameter identification of solar cells using artificial bee colony optimization. *Energy*, 72, 93-102.
- [46] El-Naggar, K.M., AlRashidi, M.R., AlHajri, M.F., & Al-Othman, A.K. (2012). Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification. *Solar Energy*, 86(1), 266-274.
- [47] AlHajri, M.F., El-Naggar, K.M., AlRashidi, M.R., & Al-Othman, A.K. (2012). Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search. *Renewable Energy*, 44, 238-245.

- [48] Rajasekar, N., Kumar, N.K., & Venugopalan, R. (2013). Bacterial foraging algorithm based solar PV parameter estimation. *Solar Energy*, 97, 255-265.
- [49] Li, S., Gong, W., Yan, X., Hu, C., Bai, D., Wang, L., & Gao, L. (2019). Parameter extraction of photovoltaic models using an improved teaching-learning-based optimization. *Energy Conversion and Management*, 186, 293-305.
- [50] Yu, K., Liang, J.J., Qu, B.Y., Cheng, Z., & Wang, H. (2018). Multiple learning backtracking search algorithm for estimating parameters of photovoltaic models. *Applied Energy*, 226, 408-422.
- [51] Alam, D.F., Yousri, D.A., & Eteiba, M.B. (2015). Flower pollination algorithm based solar PV parameter estimation. *Energy Conversion and Management*, 101, 410-422.
- [52] Hachana, O., Hemsas, K.E., Tina, G.M., & Ventura, C. (2013). Comparison of different metaheuristic algorithms for parameter identification of photovoltaic cell/module. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*, 5, 053122.
- [53] Wei, H., Cong, J., Lingyun, X., & Deyun, S. (2011). Extracting solar cell model parameters based on chaos particle swarm algorithm. *IEEE International Conference on Electric Information & Control Engineering*, 398-402, 15-17 April 2011, Wuhan, China.
- [54] Patel, S.J., Panchal, A.K., & Kheraj, V. (2014). Extraction of solar cell parameters from a single current-voltage characteristic using teaching learning based optimization algorithm. *Applied Energy*, 119, 384-393.
- [55] Yeşilbudak, M., Çolak, M., ve Bayındır, R. (2018). Ankara ilinin uzun dönem global güneş ışınım şiddeti, güneşlenme süresi ve hava sıcaklığı verilerinin analizi ve eğri uydurma metotlarıyla modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 189-203.

## Investigation of the Potential of Using Lakes and Dams as Solar Power Plants: The Case of Yamula Dam

Ali Rıza DAL\* 

Ministry of Transport and Infrastructure, Çankaya/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 30.09.2021  
Revision: 16.11.2021  
Accepted: 22.11.2021

#### Highlights

- Electricity generation with solar panels in dams.
- GSA and RETScreen.
- Yamula DAM.

#### Keywords

Floating SPP  
Floating SPP potential  
RETScreen program  
GSA

In this study, the Global Solar Atlas (GSA) simulation program was used to determine the potential power of the floating Solar Power Plants (SPP) and the electricity production, and the RETScreen program was used for the greenhouse gas emission analysis.

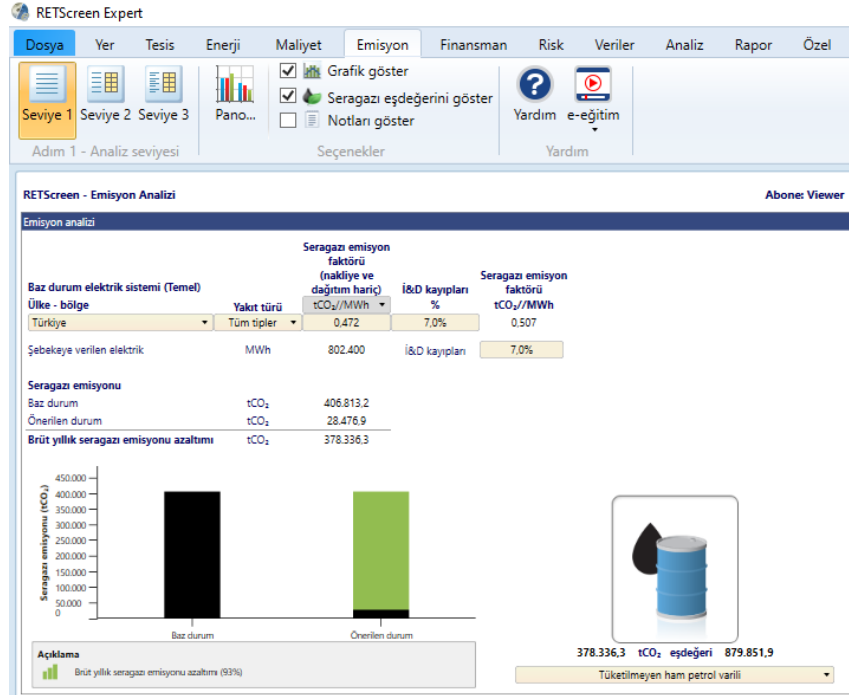


Figure A. RETScreen emission analysis program interface

**Purpose:** In Turkey, electricity generation is not yet made with floating SPP. The aim of this study is to determine the floating SPP potential that can be installed on the water surface of Yamula Dam. In addition, the positive contribution of the floating SPP to the atmosphere has been calculated.

**Theory and Methods:** Yamula Dam is a hydroelectric power plant built on the Kızılırmak river. The minimum operating level of the dam in question is the lake area of 51.67 km<sup>2</sup>. The case of installing floating solar power plants in 10% of the minimum water level area of Yamula Dam has been investigated.

**Results:** In the simulation, it has been determined that the total installed power potential of the floating SPP to be installed on Yamula Dam will be 576.4 MW. With this power, it has been determined that it will produce 802.4 GWh of electricity per year.

**Conclusion:** In addition, it is estimated that the electricity produced by floating SPP will be 2.28 times more than the hydroelectric power plant. It has been determined that with this electricity generation, 378,336.3 tCO<sub>2</sub> emissions per year will be prevented.



## Investigation of the Potential of Using Lakes and Dams as Solar Power Plants: The Case of Yamula Dam

Ali Rıza DAL\*

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Çankaya/ANKARA

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 30.09.2021  
Düzeltilme: 16.11.2021  
Kabul: 22.11.2021

### Keywords

Floating SPP  
Floating SPP potential  
RETScreen program  
GSA

### Anahtar Kelimeler

Yüzer GES  
Yüzer GES potansiyeli  
RETScreen programı  
GSA

### Abstract

The increase in energy consumption causes a negative impact on the environment. The most important factor in sustainable development is the widespread use of renewable energy. The transition to renewable energy sources in the energy sector has started to be implemented in different fields. Electricity is produced by installing floating solar power plants (SPP) on the water surfaces of seas, lakes and dams. There is no floating SPP installation in our country yet, and it has been seen that there is a need for experimental and scientific studies in this field. With this study, it is aimed to determine the floating SPP potential that can be installed on the water surface of the Yamula Dam, which produces hydroelectricity in the industrial city of Kayseri. The Global Solar Atlas (GSA) simulation program was used to determine the potential power of floating SPP and the electricity production, and the RETScreen Program was used for the greenhouse gas emission analysis. The case of installing floating solar power plants in 10% of the minimum water level area of Yamula Dam has been investigated. In the simulation, it has been determined that the total installed power potential of the floating SPP to be installed on Yamula Dam will be 576.4 MW. In addition, it has been determined that the floating SPP will produce a total of 802.4 GWh of electricity per year with this power. It has been determined that with this electricity generation, 378,336.3 tCO<sub>2</sub> emissions per year will be prevented.

## Göl ve Barajların Güneş Enerji Santrali Olarak Kullanım Potansiyelinin İncelenmesi: Yamula Barajı Örneği

### Öz

Enerji tüketimindeki artış çevre açısından olumsuz etkiye sebep olmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmada en önemli unsur yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşmasıdır. Enerji sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş farklı sahalarda uygulanmaya başlamıştır. Deniz, göl ve barajların su yüzeyleri üzerine yüzer güneş enerji santralleri (GES) kurularak elektrik enerjisi üretilmektedir. Ülkemizde yüzer GES kurulumu henüz bulunmayıp, bu alanda deneysel ve bilimsel çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile sanayi şehri olan Kayseri’de hidroelektrik üretimi yapan Yamula Barajının su yüzeyine kurulabilecek yüzer GES potansiyelinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yüzer GES potansiyel gücü ile elektrik üretiminin belirlenmesinde Küresel Güneş Atlası (GSA) simülasyon programı ve sera gazı emisyon analizinde ise RETScreen Programı kullanılmıştır. Yamula Barajının minimum su seviyesindeki alanının %10’u kadar kısmında yüzer GES kurulması durumu incelenmiştir. Yapılan simülasyonda Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES’in toplam kurulu güç potansiyelinin 576,4 MW olacağı tespit edilmiştir. Ayrıca, yüzer GES’in bu güç ile yılda toplam 802,4 GWh elektrik üretimi yapacağı saptanmıştır. Bu elektrik üretimi ile yılda 378.336,3 tCO<sub>2</sub> emisyonunun önleneyeceği belirlenmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde enerji kullanımına bağlı olarak oluşan karbondioksit emisyonlarındaki artış iklim değişikliğine neden olmaktadır. Enerji üretiminde karbondioksit emisyonunun sebebi olan fosil yakıtların kullanımının

azalımı yenilenebilir enerjiye geçilmesi ile mümkün olabilmektedir. Günümüzde ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretmek için yatırımlarına hız vermektedir.

Enerji sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş farklı sahalara yayılmış durumdadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan ırmaklar üzerine kurulan barajlar hidroelektrik üretimi yapmaktadır. Ayrıca, Baraj ve göller tarım üretiminde sulama, baraj içerisinde balık üretimi, teknelerle yolcu taşımacılığının yanı sıra su sporu festivalleri ile ekonomiye katkı sunmaktadır. Bunun yanı sıra dünyada açık deniz (offshore) göl ve barajların su yüzeyleri üzerine yüzer GES'ler kurularak elektrik enerjisi üretilmektedir.

Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından yapılan bir araştırmaya göre, küresel olarak göl ve barajların su yüzeyleri üzerine toplam 7,6 TW'lık yüzer GES kurulabileceği ifade edilmektedir [1]. Bu ise 2018 yılındaki toplam küresel elektrik tüketiminin %50'sini karşılayacak olan yaklaşık 10.600 TWh'lık bir elektrik üretimine karşılık gelmektedir [2]. 2020 Ağustos itibarıyla yüzer GES'ler 35 ülkede, 350 adet santral ve 2,6 GW kurulu kapasite ile faaliyetini sürdürmektedir [3].

Literatür incelendiğinde dünyada kanallar, nehirler, baraj, göl ve denizlerin yüzeyinde GES'lerin kurulumuna ilişkin deneysel ve sayısal modeller kullanılarak birçok çalışma yapılmıştır. Trapani ve Millar, (2013) mevcut bir fosil yakıt santrali ile entegreli yüzen bir PV santralin fizibilitesine ilişkin değerlendirme yapmışlardır [4]. Ferrer-Gisbert ve ark., (2013) su yüzeyindeki GES'ler için elastik bağlantı elemanlarının kullanılmasıyla dalgalı su seviyelerine uygun polietilen yüzer modül oluşturmuşlardır [5]. Trapani ve ark., (2013) doğrudan su hattı üzerinde yüzen esnek, ince bir PV panelin analizini yapmışlardır [6]. Golroodbari ve Sark, (2020) tarafından deniz suyunun soğutma etkisi nedeniyle yüzer PV'lerin performansını %18 oranına kadar artırdığı belirtilmiştir [7]. GES'lerin su üzerine kurulması, tarımsal faaliyetlerde kullanılan arazide tasarruf sağlandığı gibi su kütesinin doğal soğutması ve yüksek rüzgâr hızları nedeniyle PV performansını artırmakta olup, karasal alanda kurulan GES'lere kıyasla avantajlı hale gelmektedir [8]. Singapur'daki bir çalışmada deniz üstü GES'lerin çatılardaki GES'lere göre modül sıcaklığının 5-10 °C az olması nedeniyle performansın yaklaşık %10 daha fazla olduğu belirtilmiştir [9]. Güney Kore'deki bir araştırma projesinde, güneş ışınımı ve sıcaklığın aynı olduğu 100 kW'lık bir deniz üstü GES ile yakın konumda olan 1 MW'lık karasal bir GES'in verileri karşılaştırılmıştır. Deniz üstü GES'in karasal GES'e göre %11 daha yüksek verimliliğe sahip olduğu belirtilmiştir [10]. Ryu ve Lee, (2019) PV panel üzerindeki rüzgâr yükü etkisini hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak PV panelin eğim açısının artmasıyla rüzgâr yükünün arttığını hesaplamışlardır [11]. Yıldız ve Akgül, (2020) yaptıkları çalışmada, Akdeniz Bölgesinde 3 lokal bölge seçerek deniz yüzeyinde rüzgâr ve yüzer GES kurulumuna ilişkin karşılaştırmalar yapmışlardır [12]. Yıldız (2020) açık deniz santralleri ile ilgili yaptığı çalışmada, açık deniz PV enerjinin rüzgâr enerjisi ile rekabet edebileceğini, ayrıca açık denizler için yüksek güneş potansiyeli olan ama yeterli rüzgâr yoğunluğuna sahip olmayan kıyı şeritleri için uygulanabilir bir çözüm olduğunu belirtmiştir [13]. Yüzer GES'ler nehir ve barajlarda güneş panellerinin suyu gölgelemesi nedeniyle, buharlaşmayı ve sudaki yosun oluşumunu engellemektedir. Ayrıca, suyun soğutma özelliği nedeniyle güneş panellerinin verimini artırması ile yüzer GES çevresinde ağaç ve binaların olmaması nedeniyle de daha fazla güneş ışınımından faydalanılarak verimin artmaktadır [14]. Tarım ve Orman Bakanlığınca Burdur Gölü'nde Buharlaşmanın Azaltılması ARGE Projesi ile yapılan model havuzdaki çalışma sonucu yüzer GES panellerin yüzde 54,76 oranında buharlaşmayı engellendiği belirtilmiştir [15]. Rosa-Clot ve Tina, (2017) arazi tedarikinde yaşanan sorunlar nedeniyle deniz üstü GES kurulumu yapılmasını önermişlerdir [16]. Shama ve Kothari, (2016) tarafından dünyadaki yüzer GES uygulamalarında, su yüzeyine kurulan PV'lerin göl alanını kapsama oranının ~%43'e kadar çıktığını belirtmişlerdir [17]. Hollanda hükümeti tarafından büyük GES yatırımlarının açık denizlerde yapılması hakkında kararı olduğu ifade edilmiştir [18]. Ayrıca, GES kurulumunda araziye olan ihtiyaç diğer elektrik üreten santrallerinden daha fazla olmaktadır. Bu durumda GES ile elektrik üretiminde alan kısıtlaması olan tarımsal üretim yapan veya turizm bölgeleri için yüksek maliyetli arazilerin yerine barajlardaki su yüzeylerinin kullanılması bir avantaj olarak değerlendirilmelidir. Hidroelektrik santral bulunan barajlara yüzer GES için gerekli olan elektrik iletim hatlarının yakın olması barajları ön plana çıkarmaktadır. Yüzer GES'lerin dezavantajı ise dalga ve fırtınalara maruz kalmasıdır. Ayrıca, sualtı elektrik kabloları su ortamı biyoçeşitliliğini etkileyebilmektedir [19].

Diğer taraftan, GES kurulumunda en önemli parametrelerden biri de güneş ışınımıdır. Uygulamada PV panellerle toplanan güneş ışınımı miktarı; her ne kadar panelin teknik özelliğine ve konulduğu yöne bağlı olsa da PV panellerinden maksimum performans elde etmek için maksimum güneş ışınımı alan bölgelerin

seçilmesi önemlidir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan Güneş Enerji Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre Kayseri'nin güneş enerji potansiyeli bakımından enerji yatırımları için uygun olan iller arasında yer aldığı anlaşılmaktadır [20].

Dünyada birçok ülke GES için uygun bir arazinin olmayışı nedeniyle farklı çözümler üretmeye başlamıştır. GES'ler için geniş çatıların üzerine kurulması bir çözüm olmasına rağmen büyük kapasiteli üretimler için çatı alanları yeterli olmamaktadır. Bu yüzden birçok ülkede göl, baraj ve açık deniz sahalarında yüzer GES'lerle ilgili yatırımlar yapılmaya başlanmıştır [17, 21]. Ülkemizde yüzer GES yatırımları henüz bulunmamaktadır. Ülkemizde güneş enerji potansiyeli yüksek olan illerde arazi kıtlığı ile ilgili sorunlar kendini göstermeye başlamıştır. Bunun temel nedenleri arasında; Akdeniz ve Ege Bölgelerinde denize kıyısı olan illerimizin orman, turizm, ekilebilir tarımsal üretim gibi alanların oranının oldukça fazla olmasıdır. İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde ise göl ve barajların çevresinde tarımsal üretimin yapıyor olması GES için uygun arazi bulmayı zorlaştırmaktadır. Diğer taraftan, elektrik üretimi için barajlar yağışlı mevsimlerde, yüzer GES'ler ise yazın kurak mevsimlerde maksimum seviye de elektrik üreterek bir denge oluşabilmektedir. Bu durum hidroelektrik santralleri ile yüzer GES'lerin aynı iletim hattını kullanılarak elektrik üretilmesine imkân sunmaktadır [22]. Bu çerçevede, arazi kıtlığı ve su yüzeyindeki GES'lerin veriminin yüksek olması açık deniz, göl ve barajlarda yüzer GES'leri ön plana çıkarmaktadır. Ülkemizde açık deniz, göl ve barajlarda yüzer GES'lerle ilgili deneysel ve bilimsel çalışmaların yeterli düzeyde olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada Yamula Barajı su yüzeyine kurulacak yüzer GES potansiyeli ve üretilen elektrik enerjisinin atmosfere sağlayacağı sera gazı emisyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır.

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

### 2.1. Yamula Barajı (Yamula DAM)

Son yıllarda ülkemizde hidroelektrik santrallerine olan yatırımlarda artış görülmektedir. Ülkemizin elektrik kurulu gücü 95.964 MW'a ulaşmıştır. Bu gücün %32,29'unu yenilenebilir enerji kaynağı olan ırmak ve barajlar üzerine kurulan hidroelektrik santralleri oluşturmaktadır [23]. Bu santrallerden birisi de Kayseri ili Kocasinan ilçesinden geçen ve Kızılırmak üzerine kurulan Yamula Barajı ve hidroelektrik santralidir. Söz konusu santral 100 MW kurulu güce sahip olup 2020 yılı içerisinde toplam 352.435 MWh elektrik üretimi yapmıştır [24].

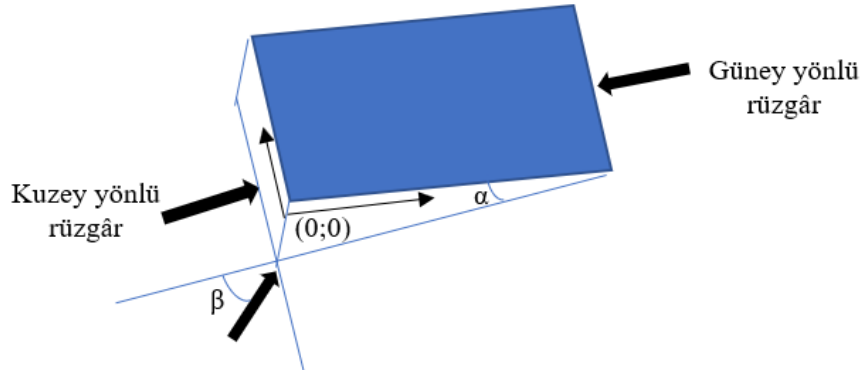
Çalışma kapsamında yapılan saha ve literatür incelemesinde, ülkemizde özel çevre koruma bölgeleri, tarımsal üretim alanları, orman alanları ve turizm bölgeleri içerisinde yer alan çoğu araziler GES kurulumu içinde uygundur. Ancak sulama ve elektrik üretim amacıyla inşa edilen barajların çevresindeki alanlarda GES yapımında problemler yaşanmaktadır. Yamula Barajının bulunduğu bölge 31 Mart 2018 tarihli Resmî Gazete ile çevresel öncelikli sürdürülebilir kalkınma ilkesine uygun olarak arazilerin planlı kullanımını sağlamak amacıyla "büyük ova koruma alanı" olarak belirlenmiştir. Bu nedenle söz konusu koruma alanı içerisine giren bölgede tarımsal faaliyetlerin dışında herhangi bir çalışma yapılamamaktadır. Bu öngörü ile yıllık elektrik tüketimi 2.353 GWh [25] olan sanayi kenti Kayseri'de bulunan Yamula Barajının su yüzeyi üzerine yüzer GES kurulumu incelenmiştir.

### 2.2. GSA Programı (GSA program)

Bilimsel çalışmalarda deneysel uygulamaların yanında bilgisayar teknolojileri de kullanılmaktadır. Güneş ışınımı ve PV panellerle üretilen elektrik enerjisinin tahmininde simülasyon programları araştırmacıların tercihleri arasındadır. Dünya Bankası GES enerjisini desteklemek amacıyla kullanıcılara açık erişimli CBS tabanlı Global Solar Atlas 2.0 (GSA) simülasyon programını sunmaktadır. GSA, SOLARGIS algoritması ve veri tabanını kullanan bir programdır. Bu program belirlenen konumun güneş ışınım değeri, meteorolojik veriler ile PV sistem gücüne bağlı olarak aylık, yıllık elektrik üretim miktarını ve optimum eğim açısını tahmin edebilmektedir. GSA programının diğer bir özelliği yüzer GES'ler için simülasyon yapabilme opsiyonudur. Bu opsiyon; PV paneller arasındaki dalga ve kirlilik gibi uyumsuzlukları da dikkate almaktadır [26]. Yamula Barajına kurulacak yüzer GES'in üreteceği elektrik enerjisi hesaplanmasında GSA programının yüzer PV opsiyonu kullanılmıştır.



Güneş ışınımları güneş panelleri üzerine dik açıyla geldiği zaman bir panelin elektrik üretimi artmaktadır [27]. Ayrıca Asya’da yapılan çalışmada yüzer GES’ler PV panellerin  $10^\circ$ ’lik eğim açısının karadaki GES kurulumlarındaki  $30^\circ$ ’ye karşılık geldiğini belirtmişlerdir [28,29]. Diğer taraftan, Oh ve Jang, (2018)  $20^\circ$ ’lik bir panel eğim açısındaki bir yüzer GES’in karada kurulan  $30^\circ$ – $36^\circ$  eğimdeki panelden daha fazla güç ürettiğini belirtmişlerdir [30]. Yüzer GES’lerde dalga ve rüzgâr yükünden dolayı PV panellerin eğim açısının yüksek olması arzu edilmemektedir. Rüzgâr yönüne karşı PV panelin  $0^\circ$  eğimli konumundaki sürüklenme kuvveti  $90^\circ$  eğimli konumundakinden çok daha küçüktür [31]. Chou ve ark. (2019), Şekil 1’de görülen PV panelin eğim açısı ( $\alpha=10^\circ$ -  $80^\circ$ ), rüzgâr yön açısı ( $\beta =0^\circ$ -  $180^\circ$ ) ve rüzgâr hızı 14,5 m/s için deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında  $\alpha =10^\circ$ ’de rüzgâr yüklerinin en düşük seviyede olduğu,  $\alpha=30^\circ$ ’den büyük olması durumunda ise panelde oluşan kritik rüzgâr yüklerin  $\beta$  açısının düşük değerlerinde bile oluştuğunu göstermişlerdir. Aynı çalışmada, yüzer GES’lerde kullanılacak PV panellerin  $30^\circ$ ’den düşük açılarda projelendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [32].



Şekil 1. Bir panelin eğimi ve rüzgâr yönleri

Bu çalışmada, öncelikle Yamula Barajında ( $39,094^\circ$ ;  $35,274^\circ$ ) uygun konum seçilmiştir. Ayrıca, yüzer GES kullanılacak panellerin güneye yönlendirilmesi ve plastik yüzer dubalar üzerine monte edilmesi öngörülmektedir. Kayseri’de 2004–2013 yılları arasındaki ortalama rüzgâr hızı 0,6 ila 2,7 m/s arasında değişmektedir. 1975 – 2011 yılları arasındaki meteorolojik ölçümler neticesinde Kayseri’nin hâkim rüzgâr yönü güneyli rüzgarlardır [33]. Bu yöndeki rüzgarlar panelin üst yüzeyinde basınç yükü oluşturacaktır [11, 32]. Bu ise panelin sürüklenmesine neden olacaktır. Bu durum yüzer GES panel setlerinin çapa ile zemine sabitlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada Yamula Barajında yüzer GES’te kullanılacak PV panellerin optimum eğim açısı GSA programı ile simüle edilerek bulunmuştur. GSA programında belirlenen; modül verimi %16, inventer euro verimi %96,4, kirlenme %6 (DC), kablo %2,5(DC), uyumsuzluk %6,5 (DC), trafo %1 (AC) ve kablo %2 (AC) kayıp değerleri kabul edilerek büyük ölçekli yüzer PV yapısı seçilmiştir. Yamula Barajına kurulumu yapılacak olan yüzer GES için kullanılacak olan PV panellerin optimum eğim açısı ile bir yılda üreteceği elektrik enerjisi miktarı potansiyeli GSA simülasyon programı ile belirlenmiştir.

Yamula Barajı için yüzer GES’de kullanılan PV panelin teknik özellikleri Tablo (1)’de verilmiştir.

Tablo 1. Yüzer GES’de kullanılan PV panelin özellikleri

PV Panel	Teknik özellik
Modeli	Polikristal
Güç (P)	280 W/panel
Hücre boyutu	157x157 mm
Panel alanı	$b =1,652 \text{ m}$ , $L=1 \text{ m}$ ( $b \times L$ )
Panel ağırlığı	20 kg
Mekanik dayanım	5400 Pa
Çalışma sıcaklığı	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$ - $+85 \text{ }^\circ\text{C}$

### 2.3. RETScreen Programı (RETScreen Program)

RETScreen; Kanada Doğal Kaynaklar Bakanlığının desteklediği temiz enerji projesi kapsamında CANMET Enerji Çeşitlendirme Araştırma Laboratuvarı tarafından geliştirilen simülasyon programıdır [34]. Ayrıca, bu program bilgisayar ortamında yapılan fizibilite ile hem zaman açısından hem de mali açıdan kullanıcılara önemli avantajlar sağlamaktadır [35]. Söz konusu program açık erişimli olup enerji ve sera gazı emisyon analizleri yapmaktadır. Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES'in sera gazı emisyonu salımı hesaplanmasında RETScreen programı kullanılmıştır.

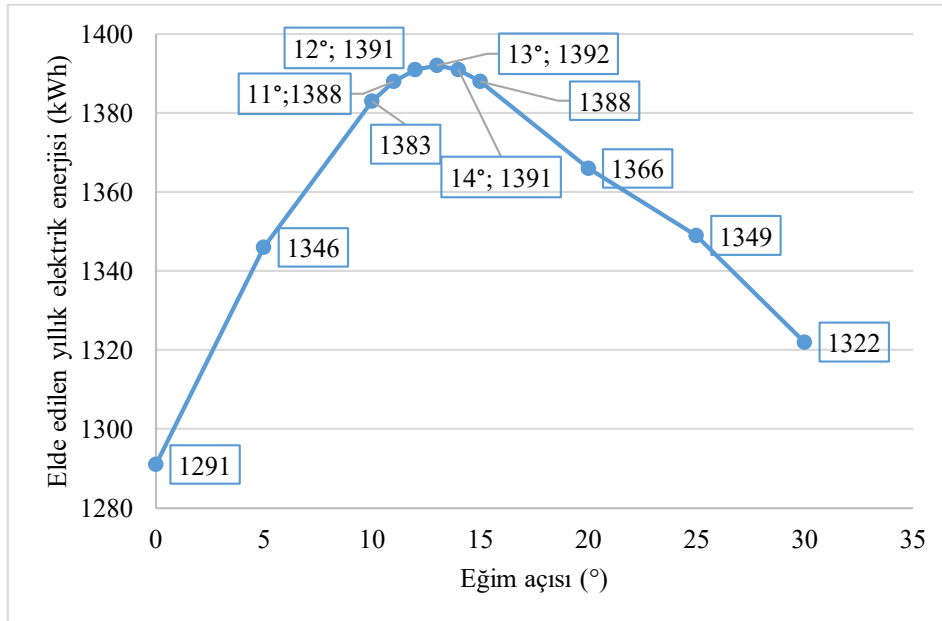
## 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

### 3.1. Yamula Barajında Kurulacak Olan Yüzer GES'in Optimum Eğim Açısı (Optimum Tilt Angle of Floating SPP to be Established at Yamula Dam)

Bir PV panelin konumlandırıldığı enlem açısı ve panelin yüzey ile yaptığı eğim açısı panelin üreteceği elektrik enerjisi miktarını etkilemektedir. Araştırmacılar açık deniz, göl ve barajlarda farklı açılarda rüzgâr yüklerine maruz kalan bir PV panelin eğim açısının  $30^\circ$ 'den büyük olmasını önermemektedirler. Ayrıca yapılan çalışmalarda yüzer GES için  $10^\circ$  eğim açılı PV panelin veriminin karadaki  $30^\circ$  eğim açılı panele karşılık geldiğini belirtmişlerdir [28, 29].

Bu kapsamda, GSA simülasyon programı ile 1 kW gücündeki bir PV panelin farklı eğim açılarda üreteceği yıllık elektrik enerjisi Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2 incelendiğinde, Yamula Barajına kurulacak olan 1 kW kurulu gücündeki yüzer GES'den bir yılda elde edilecek olan elektrik enerjisi miktarının  $13^\circ$ 'de maksimum seviyeye ulaşacağı görülmüştür. Bu eğim açısı ile PV panele gelen güneş ışınımı değeri yılda 1890,5 kWh olarak tespit edilmiştir. GSA ile bulunan bu açı değerinin literatürde ve uygulamadaki yüzer GES'lerde kullanılan eğim açısı ile uyumlu olduğunu göstermiştir [28, 29].



Şekil 2. Yamula Barajında 1 kW kurulu gücündeki yüzer GES'in yılda üreteceği elektrik enerjisi

Diğer taraftan, GSA programında aynı enlem ve boylamın karasal PV durumu seçilmiştir. Yapılan simülasyonda optimum panel eğim açısının  $31^\circ$  ve bu eğim açısında elde edilecek olan güneş ışınımı değerinin yılda 1963,8 kWh olduğu belirlenmiştir. Eğim açısının artması elektrik enerjisi artışını beraberinde getirmesine rağmen PV panele gelecek olan rüzgâr yüklerini de artırmaktadır. Bu durum panelde dayanım ve panel sürüklenme sorununu oluşturacaktır [32]. Ayrıca, eğim açısının  $31^\circ$  olması

durumunda paneller arası mesafe büyüyecektir. Bu durum PV panellerin su yüzeyinde kaplayacağı alanının büyümesine neden olacaktır. PV panellerin su yüzeyinde oluşturduğu alan artışı barajda daha az panelin kullanılmasına ve dolayısıyla barajda kurulacak olan yüzer GES'in kurulu gücünün azalmasına neden olacaktır. Güçteki azalma ise daha az elektrik enerjisi üretmek anlamına gelmektedir.

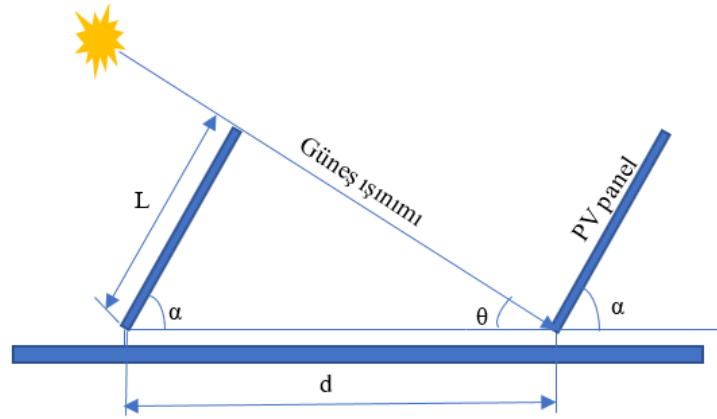
### 3.2. Yamula Barajında Kullanılabilecek Yüzey Alanın Tespiti (Determination of Surface Area That Can Be Used in Yamula Dam)

Çalışmada, Yamula Barajının minimum seviyede su bulundurması ile kurulacak yüzer GES'lerden üretilecek olan elektriğin hidroelektrik santralin bağlı olduğu iletim hattının da kullanması öngörülmüştür. Bu kapsamda, yüzer GES'in konumlandırılacağı yerin kıyıya yakın, gölge oluşturmayan ve iletim hattına 5 km mesafede olması planlanmıştır. Söz konusu barajın minimum işletme kotu göl alanı 51,67 km<sup>2</sup>'dir [36]. Ayrıca, barajda balık çiftlikleri, turizm amaçlı tekne seyahatleri, plaj ve diğer aktivitelerinde olumsuz engellenmemesi gerekir. Bu yüzden yüzer GES kurulumu için minimum göl alanının %10'u kadar bir alan belirlenmiştir. [37] Bu alan Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır.

$$A_{GES} = \frac{A_B}{10} \quad 1$$

Burada,  $A_{GES}$  baraja kurulacak olan yüzer GES alanını,  $A_B$  ise barajın minimum işletme kotundaki göl alanını ifade etmekte olup,  $A_{GES} = 5,167$  km<sup>2</sup> olarak bulunmuştur.

GES'lerde kullanılan PV panellerden maksimum derecede güneş ışınımından fayda sağlanması önemlidir. PV panellerin dizi halinde birbirini ardışık şekilde takip etmektedir. Bu nedenle Şekil 3'de görüldüğü gibi iki ardışık panel arasındaki mesafe panelin eğim açısının değeri ile ilgilidir. PV paneller üzerinde gölge oluşmaması güneş ışınımından daha fazla faydalanma anlamı taşımaktadır. PV panellerinin üzerine daha fazla düşen güneş ışınımı o panel diziliminin verimini artırmaktadır. Bu yüzden panel eğimine bağlı olarak iki ardışık panel arasındaki mesafe Eşitlik 2 ile bulunmaktadır.



Şekil 3. İki ardışık PV panel arası mesafenin tespiti

$$d = L. (\cos \alpha + \sin \alpha / \tan \theta) \quad 2$$

Burada,  $L$  PV panelin boyunu (m),  $d$  iki panel arası mesafeyi (m),  $\alpha$  panel eğim açısını ve  $\theta$  dizi halinde sıralanmış PV panellerin birbirlerine gölge oluşturmadan güneşi görmeye başladıkları güneş yükseklik açısını ifade etmektedir.

Ayrıca, yüzer PV santralde kullanılan panelin tam güneşe baktığı kabul edilmiştir. Güneş yükseklik açısının en yüksek olduğu ve saat 12 olarak belirlendiği zamana güneş saati (yerel saat) denir. Ülkemize güneş ışınları 21 Aralık tarihinde en düşük açı ile gelmektedir [38]. Bu yüzden güneş yükseklik açısı PV panelin bulunduğu bölgeye göre değişim göstermektedir. GEPA verilerine göre Yamula Barajının bulunduğu ilçenin Aralık ayındaki ortalama güneşlenme süresi 3:49≈4 saattir [18]. Birçok araştırmacı tarafından bu

sürenin en uygun sabah 10:00 ila öğleden sonra 14:00 saatleri arasında olduğu belirtilmektedir. Bu süre dikkate alınarak güneş yükseklik açısı Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\sin\theta = [\cos\delta\cos\varphi\cos\omega + \sin\delta\sin\varphi] \quad 3$$

Burada,  $\varphi$  panelin bulunduğu konumun enlemini ( $38,094^\circ$ ),  $\delta$  deklinasyon açısını ve  $\omega$  saat açısını ifade etmektedir.

Güneş ışınlarının dünyaya geliş doğrultusunun ekvator düzlemi ile yaptığı açıya deklinasyon açısı denir. Deklinasyon açısı  $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$  arasında değişmektedir. Cooper eşitliği olarak bilinen deklinasyon açısı Eşitlik 4 ile saat açısı ise Eşitlik 5 kullanılarak bulunmuştur.

$$\delta = 23.45 \sin[360(284 + n)/365] \quad 4$$

$$\omega = 15(GS - 12) \quad 5$$

Burada,  $n$  gün sayısı ifade etmekte olup, hesaplama yapılan günün yılbaşından itibaren kaçınıcı gün olduğunu,  $GS$  güneş saati olarak ifade edilmektedir.

Eşitlik 3, Eşitlik 4 ve Eşitlik 5 kullanılarak  $\delta = 23,4498^\circ$ ,  $\omega = -30^\circ$ ,  $\theta = 22,32^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Akabinde Eşitlik 2 ile yüzer GES dizilimindeki iki ardışık panel arasındaki mesafe  $d = 1,52$  m olarak tespit edilmiştir.

### 3.3. Yüzer GES Kurulu Güç Potansiyelinin Belirlenmesi (Determination of the Installed Power Potential of Floating SPP)

Bir yüzer GES’de iki ardışık PV panel arasındaki mesafeye bağlı olarak panel alanı belirlenmiştir. PV panelin (gölgeleme dahil) kapladığı alan  $A_{HPV}$  ( $m^2$ ) Eşitlik 6 ile yüzer GES’te kullanılacak olan PV panel sayısı ( $N$ ) Eşitlik 7 ile yüzer GES’in toplam kurulu gücü  $P_{GES}$  (kW) ise Eşitlik 8 ile hesaplanmıştır.

$$A_{HPV} = d \cdot b \quad 6$$

$$N = \frac{A_{GES}}{A_{HPV}} \quad 7$$

$$P_{GES} = P \cdot N \quad 8$$

Bir panelin kaplamış olduğu alan  $A_{HPV} = 2,51$   $m^2$ , yüzer GES’te kullanılacak olan toplam panel sayısı 2.058.566 adet ve Yamula Barajında kurulacak olan yüzer GES’in toplam kurulu güç potansiyeli ise 576,4 MW olacağı tespit edilmiştir. Yamula Barajı üzerine 576,4 MW kurulu gücünde kurulacak olan bir yüzer GES’in bu potansiyel ile aylık ve yıllık üreteceği elektrik enerjisi miktarı GSA programında simüle edilerek bulunmuş olup Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Yamula barajına kurulacak yüzer GES’in aylık/yıllık elektrik üretimi (GWh)

<i>Aylar</i>	<i>Elektrik üretimi</i>
<i>Ocak</i>	32,9
<i>Şubat</i>	43,7
<i>Mart</i>	62,1
<i>Nisan</i>	72,4
<i>Mayıs</i>	86,3
<i>Haziran</i>	92,8
<i>Temmuz</i>	101,9
<i>Ağustos</i>	97,1
<i>Eylül</i>	80
<i>Ekim</i>	61,2

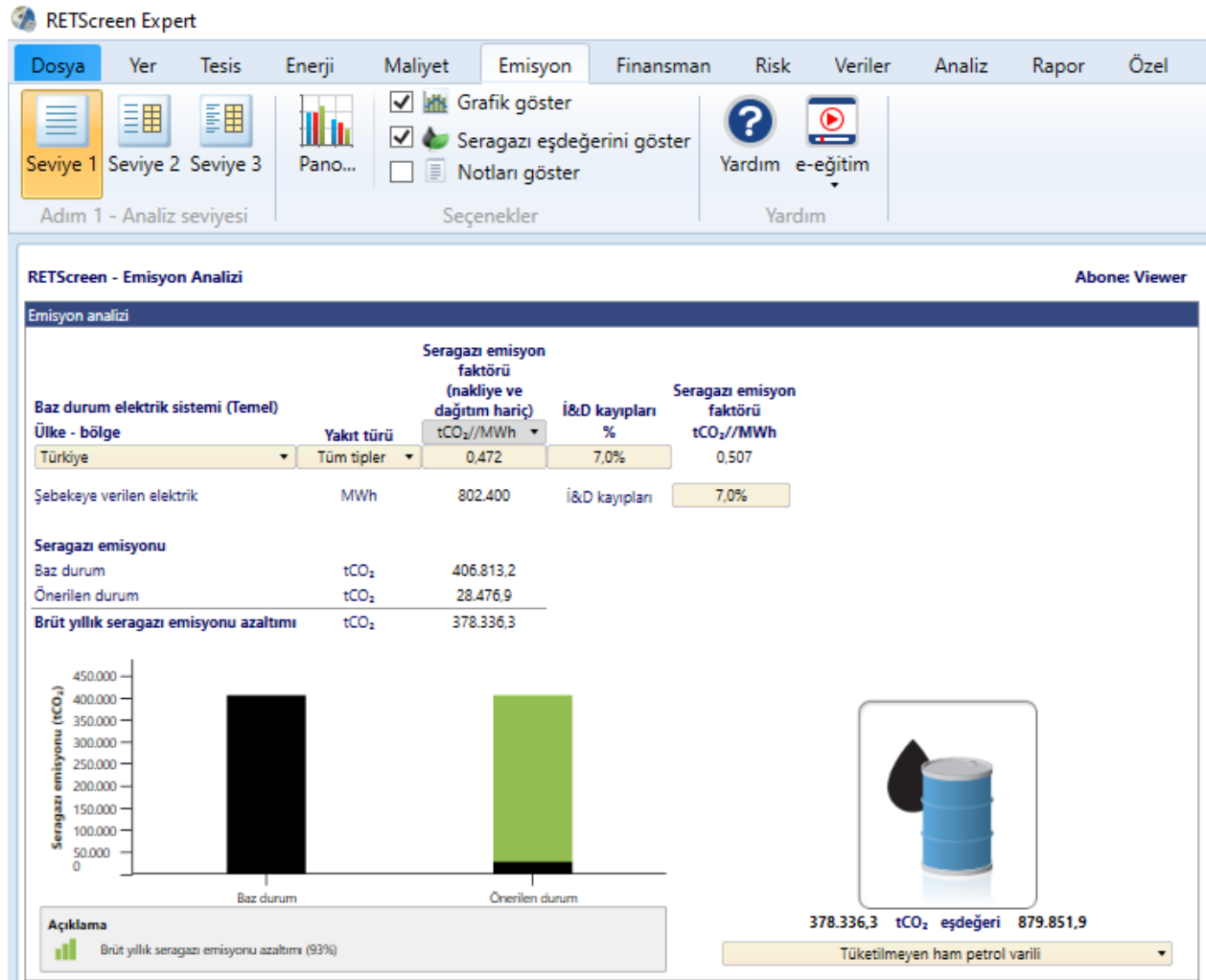
Kasım	42,9
Aralık	29
<b>Toplam</b>	<b>802,4</b>

Tablo 2 incelendiğinde; yüzer GES'in 29 GWh ile en düşük Aralık ayında, 101,9 GWh ile en yüksek Temmuz ayında ve 802,4 GWh ile yıllık toplam elektrik üretimi yapacağı öngörülmektedir.

Yamula Barajındaki mevcut hidroelektrik santrali 2020 yılı içerisinde toplam 352.435 MWh elektrik üretimi yapmıştır [24]. Söz konusu barajın minimum su seviyesi alanının sadece %10'u kadar bir yüzer GES kurulması durumunda 2,28 kat daha fazla elektrik üretimi gerçekleşeceği saptanmıştır. Ayrıca, Yamula Barajına yüzer GES kurulması durumunda Kayseri civarında tüketilen yıllık 2.353 GWh elektriğin %34,1'i yüzer GES tarafından üretilecek olan elektrik enerjisinden karşılanabilecektir.

### 3.4. RETScreen Programı ile Sera Gazı Emisyonu Hesabı (Calculation of Greenhouse Gas Emissions with RETScreen Program)

Enerji üretiminde geleneksel fosil yakıt yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla sera gazı salımı azalmaktadır. Bu çalışmadaki sera gazı emisyonu salımı RETScreen programı ile yapılmıştır. Sera gazı salımındaki azalmayı hesaplamak için, iletim ve dağıtım kayıpları %7 ve sera gazı emisyon faktörü 0.507 t/MWh CO<sub>2</sub> olarak alınmıştır. Resim 1'de görüldüğü üzere sera gazı emisyonu azalım miktarı hesaplanarak verilmiştir.



Resim 1. Yamula Barajına kurulacak yüzer GES'in sera gazı emisyonuna katkısı [34]

Resim 1 incelendiğinde; Yamula Barajına kurulacak yüzer GES ile yılda 378.336,3 tCO<sup>2</sup> emisyonu önlenecektir. Bu sayede 879.851,9 varil ham petrol kullanılmayarak döviz tasarrufu sağlanacaktır. Yüzer GES kaynaklı sera gazı emisyonunun etkisinin ise yılda 28.476,9 tCO<sup>2</sup> olacağı belirlenmiştir.

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

Bu çalışma ile Kayseri ili Kocasinan ilçesinde bulunan Yamula Barajı hidroelektrik santraline ek olarak baraj üzerinde kurulabilecek yüzer GES potansiyeli ve üretim miktarı incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda; yüzer GES'in 13°'lik panel eğim açısında maksimum elektrik enerjisi üreteceği, bu açı ile barajın %10'luk alanının kullanılması ile 576,4 MW PV sistemi kurulabileceği ve bu gücün yılda 802,4 GWh elektrik üretimi yapacağı tespit edilmiştir.

Yüzer GES'lerin elektriğin yoğun olarak kullanıldığı saatlerde enerji ihtiyaçlarını karşılamak, ayrıca hidroelektrik enerjisinden tasarruf sağlamak bir fırsat olarak değerlendirilmelidir. Yamula Barajında kurulması öngörülen yüzer GES ile en düşük Aralık ayında en yüksek Temmuz ayında üretimin gerçekleşebileceği anlaşılmaktadır (Bkz. Tablo 2). Bu ise Yamula barajı elektrik üretiminin kışın yağışların fazla olması nedeniyle artacağı, yazın ise kurak ve buharlaşma olması nedeniyle düşeceği, bu durum ise yüzer GES için elektrik arzında alternatif bir dengeleme unsuru olarak ortaya çıkacaktır.

Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES'in barajın minimum su seviyesi alanının sadece %10'unun kullanılması halinde hidroelektrik santralden 2,28 kat daha fazla elektrik üretimi gerçekleşeceği öngörülmektedir.

Yamula Barajına kurulacak olan yüzer GES ile yılda 378.336,3 tCO<sup>2</sup> emisyonu önlenecektir.

Hidroelektrik santral olan barajlarda yüzer GES'in iletim hattına yakınlığı sistemin kurulumuna olumlu yönde etki edecektir.

Sonuç itibariyle; yüzer GES'lerin genel olarak elektrik üretimi ile beraber sera gazı emisyonuna olumlu etkisinin olduğu ve dolayısıyla ülkemizdeki barajlarda kullanımının teşvik edilmesine yönelik düzenlemelerin yapılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

Ülkemiz barajlarında GES sistemi ile elektrik üretimi ve kullanımının henüz bulunmayışı ve sadece hidrolik santralin, tarım üretiminde sulama, balık üretimi ve teknelerle yolcu taşımacılığı amacıyla faydalandığı düşünüldüğünde, bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Ayrıca, barajlarla ilgili GES sistemi konusunda bilimsel çalışma yapılmasına gereksinim olduğu görülmüştür.

#### SEMBOLLER VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

$A_B$	Barajın minimum işletme kotundaki göl alanı [m <sup>2</sup> ]	$N$	PV panel sayısı
$A_{GES}$	Baraja kurulacak yüzer GES alanı [m <sup>2</sup> ]	$P$	PV panel gücü (W)
$A_{HPV}$	PV panelin kapladığı alan [m <sup>2</sup> ]	$P_{GES}$	Toplam kurulu güç (W)
$b$	PV panel genişliği [m]	$PV$	Fotovoltaik
$d$	İki PV panel arası mesafe [m]	$\alpha$	PV panelin eğim açısı [°]
$GEPA$	Güneş Enerji Potansiyeli Atlası	$\beta$	Panele gelen rüzgâr yön açısı [°]
$GES$	Güneş enerji santralleri	$\theta$	Güneş yükseklik açısı [°]
$GS$	Güneş saati [h]	$\delta$	Deklinasyon açısı [°]
$GSA$	Küresel Güneş Atlası	$\varphi$	PV panelin bulunduğu konumun enlem açısı [°]
$L$	PV panel boyu [m]	$\omega$	Saat açısı [°]
$n$	Yılbaşından itibaren gün sayısı		

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İnternet: “International Renewable Energy Agency”, <https://www.irena.org/publications/2021/Jul/Offshore-Renewables-An-Action-Agenda-for-Deployment>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [2] İnternet: Hopson, C, “Floating Solar Going Global With 10GW More by 2025: Fitch. Recharge”, [www.rechargenews.com/transition/floating-solar-going-globalwith-10gw-more-by-2025-fitch/2-1-894336](http://www.rechargenews.com/transition/floating-solar-going-globalwith-10gw-more-by-2025-fitch/2-1-894336), Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [3] İnternet: Haugwitz, F, “Floating Solar PV Gains Global Momentum. PV Magazine”, [www.pv-magazine.com/2020/09/22/floating-solar-pv-gains-global-momentum](http://www.pv-magazine.com/2020/09/22/floating-solar-pv-gains-global-momentum), Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [4] Trapani, K., and Millar, D.L. (2013). Proposing Offshore Photovoltaic (PV) Technology to The Energy Mix of The Maltese Islands. *Energy Conversion Management*, 67, 18–26.
- [5] Ferrer-Gisbert, C., Ferrán-Gozálvez, J.J., Redón-Santafé, M., Ferrer-Gisbert, P., Sánchez-Romero, F.J. and Torregrosa-Soler, J.B. (2013). A New Photovoltaic Floating Cover System for Water Reservoirs. *Renewable Energy*, 60 (C), 63-70.
- [6] Trapani, K., Millar, D.L. and Smith, H.C.M. (2013). Novel Offshore Application of Photovoltaics in Comparison to Conventional Marine Renewable Energy Technologies. *Renewable Energy*, 50, 878-879.
- [7] Golroodbari, S.Z. and van Sark, W. (2020). Simulation of Performance Differences Between Offshore and Land-Based Photovoltaic Systems Progress in Photovoltaics Research Applications, 28, 873-886.
- [8] Tina, G.M., Scavo, F.B., Merlo, L. and Bizzarri, F. (2021). Comparative Analysis of Monofacial And Bifacial Photovoltaic Modules for Floating Power Plants. *Applied Energy*, 281, 116084. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116084>
- [9] Liu H., Krishna V., Leung J.L., Reindl T. and Zhao L. (2018). Field Experience and Performance Analysis of Floating PV Technologies in The Tropics. *Progress in Photovoltaics*, 26(12): 957- 967. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3039>
- [10] Choi Y-K. (2014). A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact. *International Journal Software Engineering Applied*, 8, 75- 84.
- [11] Ryu, D.G. and Lee, K.B. (2019). Flow Characteristics and Wind Loads on The Solar Panel and Floating System of Floating Solar Generato. *Journal Korea Academia Industrial Cooperation Society*, 20, 229–235.
- [12] Yıldız, C. ve Akgül M.A. (2020). PV Açık Deniz Santralleri: Güney Türkiye Denizleri için Üretim Kapasitelerinin İncelenmesi. Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi, Şanlıurfa, 102–105.
- [13] Yıldız, C., “PV Açık Deniz Santralleri: Tasarım çalışması”, Yüksek Lisans Tezi, Yeditepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [14] Cazzaniga, R., Cicu, M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G.M. and Ventura, C. (2018). Floating photovoltaic plants: Performance Analysis and Design Solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1730–1741.
- [15] İnternet: “Yeraltı Haber”, <https://www.yeraltihaber.com/haber/yuzer-gunes-panelleri-barajlarda-kurakligi-onleyecek-1249>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [16] Rosa-Clot, M. and Tina, G.M. (2017). *Submerged and Floating Photovoltaic Systems: Modelling Design and Case Studies*, London, Academic Press.

- [17] Sharma, A.K. and Kothari, D.P. (2016). Floating Solar PV Potential in Large Reservoirs in India, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2 (11), 2349-6010.
- [18] Folkers, W., van Sark, W., de Keizer, C., van Hooff, W., van den Donker, M. (2017). Roadmap PV Systems and Applications, TKI Urban Energy.
- [19] Melvin G.K.X. (2015). Experimental Study of The Effect of Floating Solar Panels on Reducing Evaporation in Singapore Reservoirs., Engineering Department of Civil and Environmental Engineering of University of Singapore, A Thesis Submitted for the Degree of Bachelor of Engineering.
- [20] İnternet: “Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı”, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [21] İnternet: “Ciel & Terre International, Floating Solar Plants References”, <https://www.ciel-terre.net/our-references/>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [22] Lee, N., Grunwald, U., Rosenlieb, E., Mirletz, H., Aznar, A., Spencer, R. and Cox, S. (2020). Hybrid Floating Solar Photovoltaics-Hydropower Systems: Benefits and Global Assessment of Technical Potential. *Renewable Energy*, 162, 1415-1427.
- [23] İnternet: “Elektrik Üretim A.Ş., EÜAŞ Yıllık Raporu 2020”, <https://www.euas.gov.tr/tr-TR/yillik-raporlar>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [24] İnternet: “Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.”, <https://seffaflik.epias.com.tr>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [25] İnternet: “Kayseri ve Civarı Elektrik Türk A.Ş.”, <https://www.kcetas.com.tr/bolgemizde-tuketilen-enerji-miktarlari/>, Son Erişim Tarihi: 16.09.2021.
- [26] İnternet: “World Bank Group”, <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.609193,8.261719,3>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [27] Vasarevicius, D., & Martavicius, R. (2011). Solar İrradiance Model for Solar Electric Panels and Solar Thermal Collectors in Lithuania. *Electronics and Electrical Engineering*, 108, (2), 3-6.
- [28] Joo, H.J., Lee, N.H. and Lee, S.W. (2013). Floating Photovoltaic Power Generation System. *The magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 4, 31–39.
- [29] Trapani, K. and Millar, D.L. (2013). Proposing Offshore Photovoltaic (PV) Technology to The Energy Mix of The Maltese Islands. *Energy Conversion Management*, 67, 18–26.
- [30] Oh, J.S. and Jang, J.H. (2018). A Study on The Installation Angle of The Marine Solar Power Generation System. *Journal of Navigation Port Research*, 42, 167–176.
- [31] Durković V, Đurišić Ž. (2017). Analysis of The Potential for Use of Floating PV Power Plant on The Skadar Lake for Electricity Supply of Aluminium Plant in Montenegro. *Energies*, 10(10), 1505.
- [32] Chou, C-C., Chung, P-H. and Yang, R-Y. (2019). Wind Loads on a Solar Panel at High Tilt Angles. *Applied Sciences*, 9(8), 1594, <https://doi.org/10.3390/app9081594>
- [33] İnternet: “Çevre ve Şehircilik Bakanlığı”, <https://webdosya.csb.gov.tr/db/kayseri/webmenu/webmenu13251.pdf>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [34] İnternet: “The RETScreen Clean Energy Management Software”, <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/tools/data-analysis-software-modelling/retscreen/7465>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.



- [35] Martin, K. (2021). Environmental and Financial Analysis of Solar Swimming Pool Heating System for 3 Different Regions of Turkey Using RETScreen Clean Energy Management Software. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 9 (3), 505-515. doi: 10.29109/gujsc.982564
- [36] İnternet: “Tarım ve Orman Bakanlığı”, <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/767/1115/DosyaGaleri/yamula-baraj-golu-limnolojisi.pdf>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.
- [37] Kumar A., Purohit I. and Kandpal T.C. (2021). Assessment of Floating Solar Photovoltaic (FSPV) Potential in India. Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Energy Research. Springer Proceedings in Energy, Singapore, 973-982. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5955-6\\_93](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5955-6_93)
- [38] İnternet: “Abuşka, M. Güneş Enerjisi ve Uygulamaları Ders Notları”, <https://docplayer.biz.tr/2698177-Yrd-doc-dr-mesut-abuska.html>, Son Erişim Tarihi: 03.08.2021.

## Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump

Rıza BÜYÜKZEREN<sup>1,\*</sup>  Ali KAHRAMAN<sup>2</sup>  Mehmet Numan KAYA<sup>2,\*</sup>  Halil İbrahim DAĞ<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Energy Systems Engineering, 42005, Meram/KONYA

<sup>2</sup>Necmettin Erbakan University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 42000, Meram/KONYA

<sup>3</sup>Solimpeks Energy Industry and Trade INC., 42050, Selçuklu/KONYA

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, domestic hot water system with an air source heat pump system model in TRNSYS was validated by experimental data.

### Article Info:

Research article  
Received: 27.10.2021  
Revision: 18.11.2021  
Accepted: 23.11.2021

### Highlights

- Air source heat pump model validation
- Domestic hot water system

### Keywords

Air Source Heat Pump  
TRNSYS  
Renewable Energy  
COP  
Model Validation

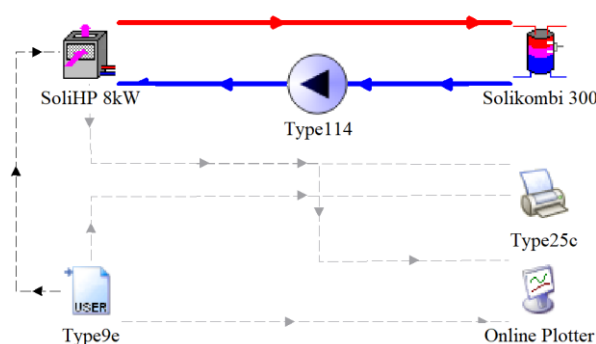


Figure A. System Model

**Purpose:** Recently, there has been renewed interest in water heating with renewable sources due to high price of energy. Air source heat pump is one of the way to heat water with supporting of the renewable energy such as solar. Some analysis programs and tools have been developed to identify potential of heat pumps and other components. In this study, air source heat pump model for domestic hot water system was developed and validated with experimental works.

**Theory and Methods:** A system was established for experimental validation of solar assisted heat pumps and the same system was modelled in TRNSYS software to validate the system. The capacity of the heat pump is 8 kW and the volume of the water tank is 270 litres. The temperature of the test chamber was reduced from 15°C to 0°C. The tank water temperature is heated from 30°C to 50°C to meet the lowest temperature that can be encountered in domestic hot water systems.

**Results:** In this study, the average maximum percentage deviation was calculated as 3.5%, indicating that the deviation rate of the model is quite low. With solar collectors to be added to the system, it allows simulations of solar or renewable sources supported heat pumps with high accuracy rates.

**Conclusion:** The selected ambient temperature and the temperature range for water heating can be used in autumn and winter seasons for many regions in the temperate climate zone, and the model developed in the study is a guide for many future studies.



## Experimental Validation of Performance Parameters of An Air Source Heat Pump

Rıza BÜYÜKZEREN<sup>1,\*</sup> Ali KAHRAMAN<sup>2</sup> Mehmet Numan KAYA<sup>2,\*</sup> Halil İbrahim DAĞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 42005, Meram/KONYA

<sup>2</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42000, Meram/KONYA

<sup>3</sup>Solimpex Enerji Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, 42050, Selçuklu/KONYA

### Abstract

Meeting the DHW (domestic hot water) requirement and the energy used for DHW has an important share in the energy sector today. Air-source heat pumps, one of the systems used to meet this requirement, can also be supported by various renewable energy sources. In such hybrid systems, it is extremely important to model the system and validate this model, since the tests in laboratory conditions are quite difficult. In this study, a system was established for the experimental validation of air source heat pumps used to meet the domestic hot water demand, and the same system was modelled using TRNSYS software to validate the system. The developed model is capable of being supported by renewable energy sources and is a guide for such studies. The heat pump capacity used in the study is 8 kW, and the experimental tests were carried out for temperatures between 0°C and 15°C. In this study, domestic hot water was continuously heated through a tank and its temperature was increased from 30°C to 45°C. For air source heat pumps, a model with the highest average percentage deviation of 3.5% was developed and validated with experimental data. The model is designed to be supported by renewable energy sources, and it is a source study for such hybrid models.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 27.10.2021  
Düzeltilme: 18.11.2021  
Kabul: 23.11.2021

### Keywords

Air Source Heat Pump  
TRNSYS  
Renewable Energy  
COP  
Model Validation

### Anahtar Kelimeler

Hava Kaynaklı Isı  
Pompası  
TRNSYS  
Yenilenebilir Enerji  
COP  
Model Doğrulama

## Hava Kaynaklı Bir Isı Pompası Modelinin Performans Parametrelerinin Deneysel Validasyonu

### Öz

Evsel sıcak su ihtiyacının karşılanması ve bunun için kullanılan enerji, günümüzde enerji sektöründe önemli bir paya sahiptir. Bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan sistemlerden bir tanesi olan hava destekli ısı pompaları çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarıyla da desteklenebilmektedir. Bu tarz hibrit sistemlerde, laboratuvar şartlarında testler oldukça zor olduğu için sistemlerin modellenmesi ve bu modelin doğrulanmasının yapılması son derece önemlidir. Bu çalışmada, evsel sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan hava kaynaklı ısı pompalarının deneysel doğrulanması için bir sistem kurulmuş ve sistemin doğrulanması için TRNSYS programında aynı sistem modellenmiştir. Geliştirilen model, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenebilecek nitelikte olup, bu tarz çalışmalar için bir rehberdir. Çalışmada kullanılan ısı pompası kapasitesi 8 kW olup, deneysel testler 0°C ila 15°C arasındaki sıcaklıklar için yapılmıştır. Çalışmada evsel sıcak su, bir tank aracılığıyla devamlı surette ısıtılmış ve sıcaklığı 30°C'den 45°C'ye kadar yükseltilmiştir. Hava kaynaklı ısı pompaları için, en yüksek %3,5 ortalama sapma yüzdesiyle bir modelleme yapılmış ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Model, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla da desteklenebilecek şekilde tasarlanmış olup, bu tarz hibrit modeller için bir kaynak çalışma niteliğindedir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçtiğimiz yüzyılda, enerji ihtiyacı ve bu ihtiyacı karşılamak için kullanılan kömür, yağ ve gaz gibi fosil yakıtların kullanımında önemli derecede bir artış görülmektedir. Günlük sıcak su ihtiyacının karşılanması ve bunun için kullanılan enerji, bahsedilen sektörde önemli bir hacme sahiptir. Günlük enerji ihtiyacının

büyük bir bölümünü endüstri ve insanların yaşam alanları olan binalardaki tüketimleri oluşturmaktadır. Binalardaki evsel sıcak su ihtiyacı için kullanılan enerji, binaların ısınması, havalandırılması ve aydınlatmasından sonra gelen dördüncü en yüksek enerji tüketim kalemidir.

Avrupa'da ısı üretiminin, önemli bir bölümü sera gazı salınımını arttıran fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Tersine Carnot çevrimini kullanan Isı Pompası cihazları, yenilenebilir enerji kaynaklarını da kullanarak karbon salınımını azaltmaya yardım eden, evsel ve ticari ısı ihtiyaçlarını karşılayabilen makinelerdir. Son yıllarda, hava, güneş, toprak gibi kombinasyonlarla kullanılan ısı pompalarının, ısıtma ve soğutmada kullanımının artmaya başladığı görülmektedir [1-3].

Isı pompası sistemlerinin modellenmesinde, doğrulama yapılması son derece önemlidir. Özellikle, ısı pompası sistemlerinin yenilenebilir enerji kaynakları ile desteklediği durumların laboratuvar ortamında simülasyonu oldukça zordur. Örneğin güneş, toprak ve jeotermal gibi kaynaklarla desteklenen sistemlerde ciddi verim artışları gözlemlenir fakat deneysel olarak sistemin oluşturulması ve sonuçlarını almak oldukça fazla zaman alır. Bu durumu, doğrulanmış bir modelle aşmak hem zaman hem de ekonomik olarak tasarruf anlamına gelir. Konuyla ilgili literatürde yer alan başlıca ve güncel çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Janusevic ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [4], güneş destekli bir hava kaynaklı ısı pompasının doğrulaması yapılmıştır. Çalışmada, yazılım olarak TRNSYS ve Matlab programları kullanılmıştır. Oluşturulan model ile alınan sonuçlar ve deneysel veriler karşılaştırıldığında %11'lik kabul edilebilir bir sapma ile karşılaşılmıştır. Calvo ve arkadaşları, toprak kaynaklı bir ısı pompasının deneysel doğrulamalı bir modelini oluşturmuşlardır [5]. Oluşturulan modelde, bir binanın iklimlendirilmesi belirtilen model ile yıllık bazda TRNSYS'de simüle edilmiştir. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları arasında %10-13 arasında değişen sapmalar tespit edilmiştir. Huang ve arkadaşlarının çalışmasında [6], direkt genleşmeli güneş destekli bir ısı pompasının nümerik bir modelinin deneysel doğrulaması yapılmıştır. Çalışmada ısı pompası, kış şartlarında bir iklim için mahal ısıtmasında kullanılmıştır. Oluşturulan nümerik model, deneysel verilerle karşılaştırıldığında, RMSD değeri %6'dan daha düşük olarak hesaplanmıştır ve oldukça kabul edilebilir bir değerdir. Rasheed ve arkadaşlarının geliştirdikleri hava kaynaklı ısı pompası modeli [7], bir seranın ısıtılması için kullanılmıştır. Sistem modeli TRNSYS programında kurgulanmış olup, sistem sonuçları farklı parametrelerle doğrulanmış ve kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiştir.

Del Amo ve arkadaşlarının çalışmaları [8], deneysel doğrulama yöntemi ile bir ısı pompasının performans analizini içermektedir. Sistem, fotovoltaiik-termal kolektörlerle desteklenmiştir. Doğrulama için, yılın dört günü seçilmiş ve bu günlerde elde edilen deneysel sonuçlar ve TRNSYS'de oluşturulan modelin simülasyon sonuçları irdelenmiştir. Çalışma sonucunda, modelin kabul edilebilir bir doğrulamaya sahip olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışma [9] Dannemand ve arkadaşları tarafından ele alınmıştır. Bu çalışmada sistem, camsız bir hibrit fotovoltaiik-termal güneş kolektöründen ve çift depolama tankıyla desteklenmiş bir ısı pompasından oluşmaktadır. Deneysel olarak ölçülen ve simülasyon ile hesaplanan değerler arasında %4'ün altında sapma miktarları bulunmaktadır. Korichi ve arkadaşlarının sunduğu çalışmada ise [10], dikey toprak kaynaklı bir ısı pompasının Saharan iklimindeki bir binanın soğutulması için termo-ekonomik modellenmesi ve optimizasyonu konu alınmıştır. Çalışmada sistemin performans analizi yapılmış olup, simülasyon ve deneysel verilerin doğrulanmasında en yüksek %4,9 hata yüzdesiyle karşılaşılmıştır ve modelin doğruluğu oldukça yüksektir.

Literatürde yer alan çalışmalarda görüldüğü üzere, ısı pompası modellemede yaygın olarak kullanılan ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, kabul edilebilir sapma miktarlarına sahip olan program TRNSYS'dir. Bu çalışmada, güneş destekli ısı pompalarının modellenmesine yardımcı olmak üzere, hava kaynaklı bir ısı pompası modelinin, deneysel verilerle yapılan doğrulaması ele alınmıştır.

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

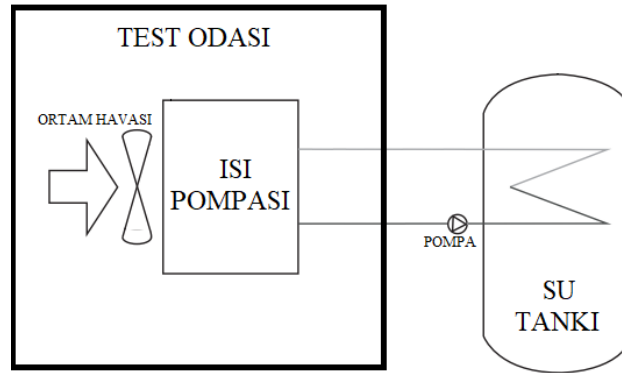
Isı pompaları ve güneş enerjisi sistemlerinin birlikte kullanılmalrı, günümüzde sıcak su elde etmek için kullanılan yaygın yöntemlerdendir. Bu metot ile çalışan sistemlerin temel problemi, kombine güneş enerjili sistemler için standart bir test metodunun olmayışdır. Diğer yandan, hem ısı pompası sistemleri için hem de güneş kolektörleri için birbirinden ayrı test standartları bulunmaktadır. Bu standartlar ele alındığında, ısı pompası standartları güneş kolektörlerini bileşen olarak kapsamamaktadır ve güneş kolektör standartları da

ısı pompalarını ek bir ısı kaynağı olarak içermemektedir. Güneş destekli ısı pompası sistemlerinin, bağımsız ısı pompası ve bağımsız güneş enerjisi ile su ısıtma sistemlerinden belli başlı farklılıkları vardır. Güneş destekli ısı pompası sistemleri, bağımsız su ısıtma sistemlerine göre daha karmaşıktır. Buna ek olarak, güneş destekli ısı pompası sistemleri ısı kaynağı olarak birden fazla kaynağı kullandığı için, daha karışık kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulur [11].

Güneş destekli ısı pompalarının testlerinin yapılabilmesi için iki ana yöntem önerilmektedir. Bunlardan birincisi, tüm sistem testi yöntemidir. Bu yöntemde, güneş kolektörleri, ısı pompası, borular, pompa gibi bileşenlerin tümü tek bir sistemmiş gibi düşünülür ve testler bu şekilde yapılır. İkinci yöntem ise, bileşen testi yöntemi olup, bu yöntemde ise, her bir bileşene ait testler birbirinden bağımsız yapılarak tüm sistem modellenir [12]. Eğer güneş destekli ısı pompasının, kolektörleri birden fazla ise ve kolektör montajı laboratuvar şartları için zor ise bu durumda; güneş kolektörleri haricindeki sistem bir bütün sistemmiş gibi düşünülerek, kolektörler model üzerinde sisteme dâhil edilir.

Bu çalışmada, güneş destekli ısı pompalarına yönelik deneysel doğrulama için bir sistem kurulmuş ve sistemin doğrulanması için TRNSYS programında aynı sistem modellenmiştir. Çalışma, yukarıda bahsedilen kolektör montajı zor olan güneş destekli ısı pompalarına yönelik yapılmıştır. Yani sistemde, kolektör haricindeki bütün bileşenler tek bir sistemmiş gibi düşünülmüştür.

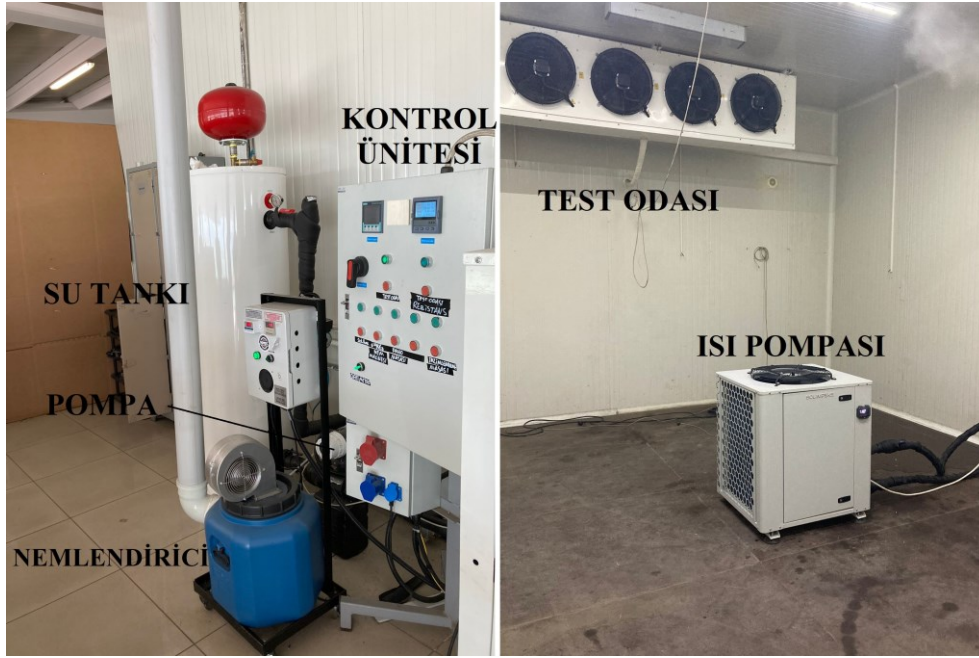
Çalışmada kullanılan deneysel sistem, sistem modeli ve performans doğrulama ayrı başlıklar altında aşağıda verilmiştir.



**Şekil 1.** Deneysel sistemin hidrolik şeması

## 2.1. Deneysel Sistem (Experimental System)

Deneysel sistem iklimlendirme odası, ısı pompası, su tankı ve pompadan oluşmaktadır ve sistemin hidrolik şeması Şekil 1’de verilmiştir. Kontrol ünitesi, bağlantı boruları, nemlendirici ve sıcaklık sensörleri gibi yardımcı elemanlar Şekil 2’de gösterilmiştir.

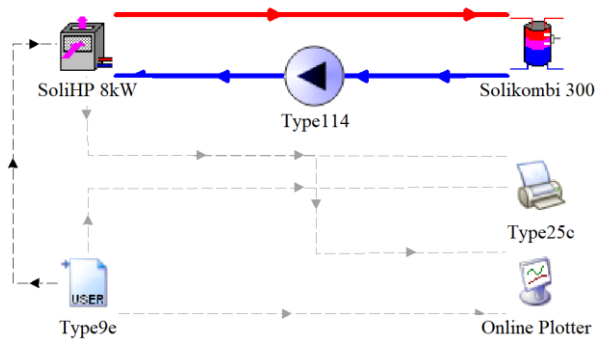


Şekil 2. Deneysel Sistem

Isı pompasının kapasitesi 8kW olup, bu değer standart şartlar olan ortam 7°C ve su 30°C'den 35°C'ye ısıtılırken geçerlidir. Su tankının hacmi 270 litre olup, iki farklı ısı kaynağından ve iki farklı ek ısıtıcı eklenebilecek şekilde tasarlanmıştır. Test odası -15°C ile 40°C arasında ve maksimum %5 nem oranı sapması ile ortamı iklimlendirebilmektedir. Testler boyunca ortam nemi %70-80 arasında sabit tutulmuştur. Sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı sensörlerin hassasiyeti 0,1'dir. Her bir test verisi 15sn aralıklarla alınmıştır. Performans doğrulama testleri için gerekli olan parametreler performans katsayısı ve dönüş suyu sıcaklığıdır. Performans katsayısı ısı pompası üzerinden, dönüş suyu sıcaklığı ise su tankı girişinden ölçülmüştür. Sisteme ait tüm borular cam yünü ile yalıtılmıştır.

## 2.2. Sistem Modeli (System Model)

Sistem modeli TRNSYS'de oluşturulmuştur ve Şekil 3'te verilmiştir. Kullanılan ısı pompası ve su tankının tüm parametreleri model üzerine girilmiştir. Su tankındaki sıcaklık, aşağıdan yukarıya doğru artış gösterir. Oluşturulan sistemde, pompa yardımı ile tankın aşağı kısmından su çekilmektedir ve ısı pompasına iletilmek üzere pompalanmaktadır. Isı pompası, ortamdaki havanın ısı ve kompresörün akışkana kazandırdığı enerjiyi de kullanarak akışkanın enerjisini yükseltmektedir.



Şekil 3. Sistem Modeli

Oluşturulan modelde kullanılan bileşenler Tablo 1’de verilmiştir. Isı pompası, nem etkisinin ihmal edildiği bir hava kaynaklı ısı pompasıdır. Ortam nemi sabit tutulduğu için modele de aynı değer tanımlanmıştır. Su tankı, bağımsız iki farklı ısıtıcı ve iki farklı ısı kaynağı da eklenebilen bir modeldir. Bu sayede istenilen kolektör tipi kolaylıkla sisteme eklenebilir. Seçilen hava verisi, deneysel şartların modele aktarılabilirdiği bir veri girişidir. Simülasyon şartları tanımlanırken, deneysel sistemde olduğu gibi modelde de 15 saniye veri aralığı seçilmiştir.

**Tablo 1.** Modelde kullanılan TRNSYS bileşenleri

Bileşen	Tip
Isı Pompası	Type941
Su Tankı	Type60c
Pompa	Type114
Hava Verisi	Type9e
Online Çizici	Type65d
Veri Çıktısı	Type25c

### 2.3. Performans Parametrelerinin Doğrulanması (Validation of Performance Parameters)

Sistem doğrulamasının ısı pompasının performans katsayısı ve tanka dönüş sıcaklığı üzerinden yapılacağı belirtilmişti. Hâlihazırda ısı pompasına ait performans katsayısının doğrulanması ile sisteme ait giren ısı, akışkana transfer edilen ısı, harcanan güç gibi birçok veri doğrulanmaktadır ve sistemin mevsimsel performans faktörü gibi tüm sistemle ilgili katsayıların doğru bir şekilde hesaplanmasının da önünü açmaktadır. Sistem dönüş sıcaklığının doğrulanması ise, su tankı içindeki sıcaklık dağılımının doğru bir şekilde sisteme tanımlandığının göstergesi niteliğindedir. Bu performans katsayılarını hesaplamak için, model tarafından kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

Yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcıdaki enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir [13].

$$\dot{q}_{yoğ} = \dot{q}_{buh} + \dot{p}_{komp} \quad 2.1$$

Havadaki nemin değişmediği kabul edildiğinden, buharlaştırıcıdan çıkan havanın entalpisi aşağıdaki gibi olur [13].

$$h_{hava,ç,ilk} = h_{hava,g} - \frac{\dot{q}_{buh}}{\dot{m}_{hava}} \quad 2.2$$

Buharlaştırıcıdaki fanın enerjisini de çıkan havanın entalpisine eklersek, havanın entalpisi aşağıdaki şekilde yazılabilir [13].

$$h_{hava,ç,ık} = h_{hava,ç,ık,ilk} + \frac{\dot{p}_{fan}}{\dot{m}_{hava}} \quad 2.3$$

Toplam enerji transferini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

$$\dot{q}_{top,hava} = \dot{m}_{hava}(h_{hava,ç,ık} - h_{hava,gir}) \quad 2.4$$

$$\dot{q}_{duy,hava} = \dot{m}_{hava}C_{p,hava}(T_{hava,ç} - h_{hava,g}) \quad 2.5$$

$$\dot{q}_{giz,hava} = \dot{q}_{top,hava} - \dot{q}_{duy,hava} \quad 2.6$$

$$\dot{q}_{sıvı,akışkan} = \dot{q}_{yoğ} \quad 2.7$$

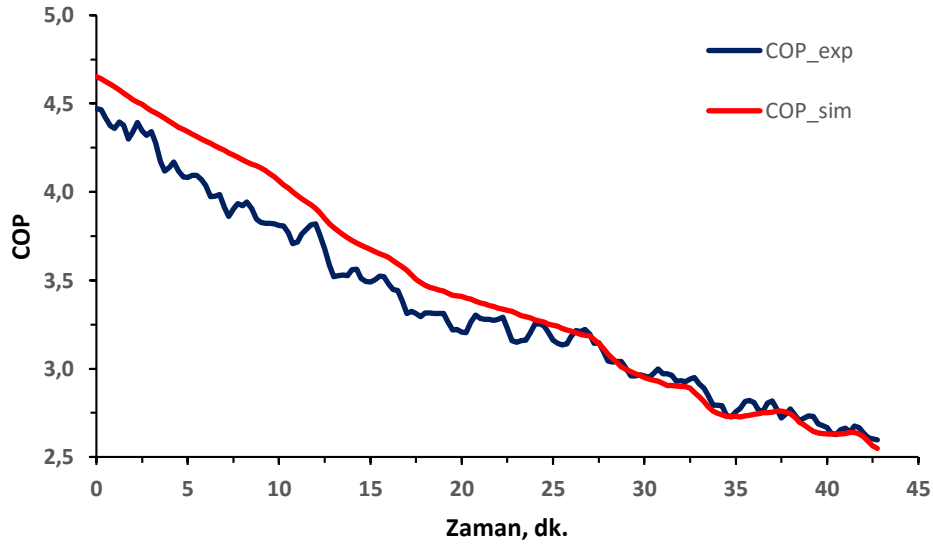
Isı pompasının ısıtma modu için performans katsayısı aşağıdaki gibi yazılabilir [14].

$$COP = \frac{\dot{q}_{yoğ}}{\dot{p}_{komp} + \dot{p}_{fan}} \quad 2.8$$

Performans katsayısını kısaca, sistemden elde etmek istediğimiz ısının sistemin harcadığı enerjiye oranı olarak tanımlayabiliriz. Soğutma sistemleri için ise, sistemin çekmesini amaçladığı ısı oranının sistemin harcadığı enerjiye oranı olarak tanımlanır.

### 3. BULGULAR (RESULTS)

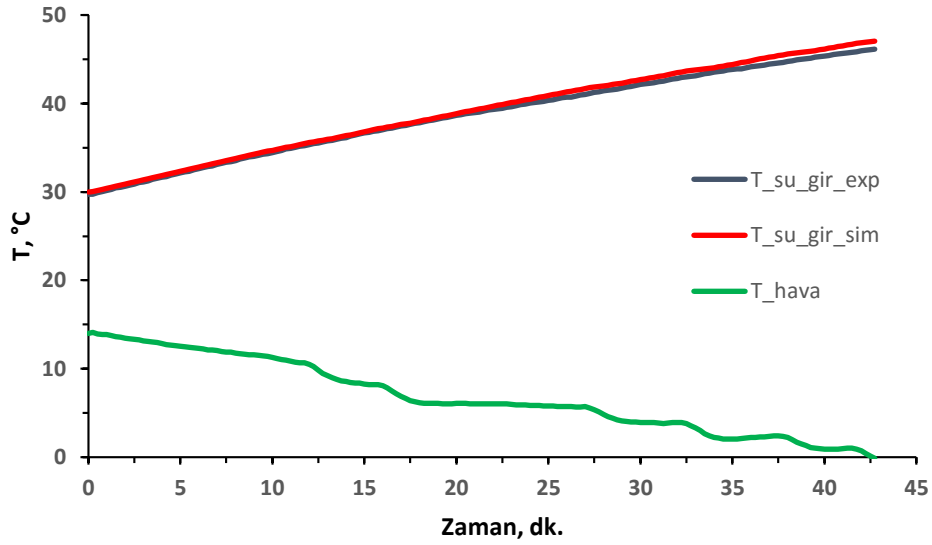
Test odasının sıcaklığı, ılıman iklim kuşağı için sonbahar ve kış mevsimlerindeki karşılaşılabilecek tüm sıcaklıkları simüle etmeye yönelik olarak 15°C'den başlatılarak, 0°C'ye kadar düşürülmüştür. Şekil 5'te hava sıcaklığının değişimi verilmiştir. Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere testler boyunca ortamdaki nem oranı, %70-80 arasında sabit tutulmuştur. Tank suyu sıcaklığı ise, evsel sıcak su sistemlerinde karşılaşılabilecek en düşük sıcaklığı karşılaması için 30°C'den 50°C'ye kadar ısıtılmıştır.



Şekil 4. COP\_exp (deneysel) ve COP\_sim (simülasyon) değerlerinin zaman göre değişimi

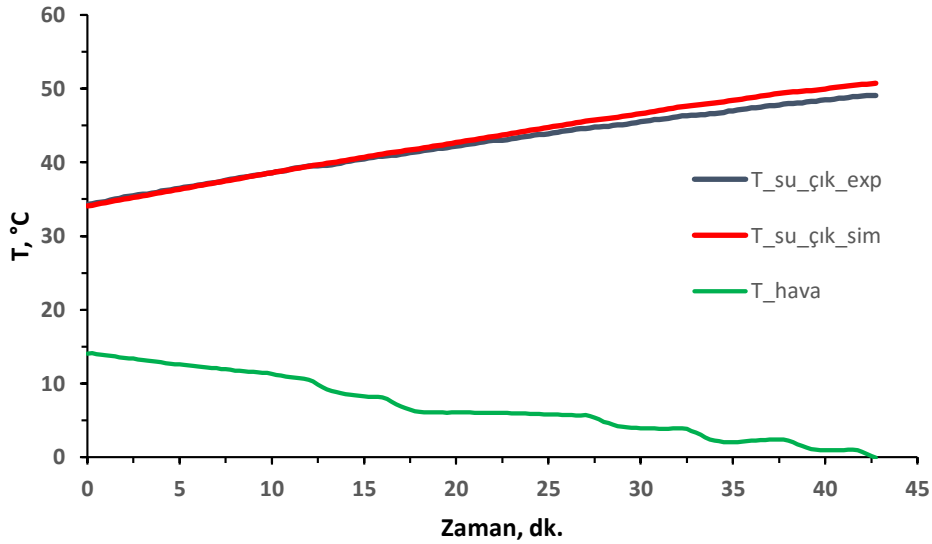
Deneysel toplamda 42 dk. sürmüş olup, 15'er sn. aralıklarla 172 veri alınmıştır. TRNSYS programında da aynı şekilde simüle edilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere performans katsayısı, deneysel sonuçlarda 4,5'lerden başlayarak 2,5 değerine kadar düşmüştür. Simülasyonda da benzer sonuçların elde edildiği ve eğilimlerin benzerlikleri görülmektedir. Performans katsayısı için ortalama hata yüzdesi %3,5 olarak hesaplanmıştır.





**Şekil 5.**  $T_{su\_gir\_exp}$  (deneysel) ve  $T_{su\_gir\_sim}$  (simülasyon) su girişi, ve  $T_{hava}$  (ortam sıcaklığı) değerlerinin zamana göre değişimi

Isı pompasına giriş sıcaklıklarının deneysel ve simülasyon değerleri karşılaştırıldığında, benzer eğilimler gösterdiği Şekil 5'te görülmektedir. Sıcaklıklar ısı pompasına girmeden hemen önce ölçülmüştür ve sıcaklığın 30°C'den 45°C'ye kadar çıktığı görülmektedir. Ortam hava sıcaklığı da 15°C'den 0°C'ye kadar düşürülmüştür ve bu değerler TRNSYS'e veri olarak girilmiştir. Isı pompası giriş sıcaklığı için ortalama hata yüzdesi %1,0 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 6.**  $T_{su\_cık\_exp}$  (deneysel) ve  $T_{su\_cık\_sim}$  (simülasyon) su çıkışı, ve  $T_{hava}$  (ortam sıcaklığı) değerlerinin zamana göre değişimi

Isı pompasından çıkış sıcaklıklarının deneysel ve simülasyon değerleri karşılaştırıldığında, giriş sıcaklıklarında olduğu gibi benzer eğilimler gösterdiği Şekil 6'da görülmektedir. Sıcaklıklar ısı pompasından çıktıktan hemen sonra ölçülmüştür ve sıcaklığın 34°C'den 49°C'ye kadar çıktığı görülmektedir. Ortam hava sıcaklığı da aynı şekilde simülasyon programına veri olarak girilmiştir. Isı pompası çıkış sıcaklığı için ortalama hata yüzdesi %1,5 olarak hesaplanmıştır.

#### 4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Yapılan bu çalışmada güneş destekli ısı pompalarının modellenmesine yardımcı olmak üzere, hava kaynaklı bir ısı pompası modelinin, deneysel verilerle yapılan doğrulaması ele alınmıştır. Çalışmada oldukça yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir. Çalışmanın giriş kısmında yer alan çalışmalar incelendiğinde, en yüksek oran %4,9 olarak görülmektedir. Bu çalışmadaki, ortalama en yüksek hata yüzdesi değeri ise %3,5 olarak hesaplanmıştır ve modelin sapma oranının oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Sisteme eklenecek güneş kolektörleriyle, güneş veya yenilenebilir kaynaklarla destekli ısı pompalarının simülasyonlarının yüksek doğruluk oranlarıyla yapılmasına fırsat verir.

Isı pompalarının ısıtma performans katsayısının, ortam hava sıcaklığı ile doğru orantılı, ısıtılan suyun sıcaklığı ile ters orantılı olması beklenir [14]. Çalışma, bu kapsamda değerlendirildiğinde performans katsayısı ve ilgili değerler tutarlılık göstermektedir.

Literatürdeki deneysel çalışmalarda veriler en düşük 1 dk. aralıklarla kaydedilmiştir. Bu çalışmada deneysel sonuçlar 15 sn. aralıklarla kaydedilmiştir ve bu da çalışmanın doğruluğuna olumlu yönde katkı yapmaktadır. Hata oranının belirgin şekilde düşük olmasının bir başka sebebi ise, sistemde yer alan boruların iyi bir şekilde yalıtılmış olmasıdır. Sıcaklık sensörlerinin de, deneylerden hemen önce kalibre edilmiş olması sonuçları olumlu etkilemiştir. Kayıpların daha fazla olması ve 1 dk. veri aralığı ile deneyler yapılıyor olsaydı, %5-8 arası bir hata payı ile karşılaşılabilirdi.

Seçilen hava sıcaklık aralığı ve suyun ısıtılmasındaki sıcaklık aralığı ılıman iklim kuşağındaki birçok bölge için sonbahar ve kış mevsimlerinde kullanılacak aralıklar olup, çalışmada geliştirilen model gelecekte yapılacak birçok çalışma için rehber niteliğindedir.

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Geliştirilen model ile COP (performans katsayısı),  $T_{su\_gir}$  (ısı pompası su giriş sıcaklığı) ve  $T_{su\_çık}$  (ısı pompası su çıkış sıcaklığı) değerleri sırasıyla %3,5, %1,0 ve %1,5 ortalama hata oranlarıyla ve 172 veri ile doğrulanmıştır.
- Deneysel çalışmalar için ortam sıcaklığı 0 ile 15°C arasında, ısıtma suyu sıcaklığı ise 30°C ile 45°C arasında yapılmıştır. Model, ılıman iklim kuşağında yer alan birçok bölgede sonbahar ve kış mevsimleri için kullanılacak niteliktedir.
- Model, 15 sn. aralıklarla doğrulandığı için oldukça hassas bir doğrulamaya sahiptir.
- Hava kaynaklı ısı pompaları için, en yüksek %3,5 ortalama sapma yüzdesiyle bir model oluşturulmuş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. Çalışmanın özgünlüğü, yüksek doğrulama oranı ve yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenebilecek nitelikte olmasıdır. Bu tarz çalışmalar için bir rehberdir. Örneğin sistem hem jeotermal, hem de güneşle aynı anda desteklenebilecek şekilde tasarlanmıştır.
- Gelecekte, testlerin yapıldığı sıcaklık aralığı genişletilerek ısı pompasının daha geniş ölçekte çalışan bir modeli oluşturulabilir. Ayrıca, modele farklı tipte güneş kolektörleri eklenerek, ısıtma suyu için fotovoltaik ve termal güneş panelleri için bir optimizasyon çalışması yapılması önerilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Solimpeks Enerji Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma, ilk yazarın doktora çalışmasının bir bölümünden oluşmaktadır.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, B. Cai, ve J. Huang, “Experimental research of an air-source heat pump water heater using water- PCM for heat storage”, *Appl. Energy*, c. 206, sayı January, ss. 784–792, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.209.
- [2] M. S. Buker ve S. B. Riffat, “Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications : A systematic review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 55, ss. 399–413, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.157.
- [3] S. Poppi, N. Sommerfeldt, C. Bales, H. Madani, ve P. Lundqvist, “Techno-economic review of solar heat pump systems for residential heating applications”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, c. 81, sayı July 2017, ss. 22–32, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.041.
- [4] V. M. Karolis Janusevicius, Giedre Streckiene, Juozas Bielskus, “Validation of unglazed transpired solar collector assisted air source heat pump simulation model”, c. 95, ss. 167–174, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.039.
- [5] F. Ruiz-calvo, C. Montagud, ve A. Cazorla-mar, “Development and Experimental Validation of a TRNSYS Dynamic Tool for Design and Energy Optimization of Ground Source Heat Pump Systems”, *Energies*, 2017, doi: 10.3390/en10101510.
- [6] W. Huang, T. Zhang, J. Ji, ve N. Xu, “Numerical study and experimental validation of a direct-expansion solar-assisted heat pump for space heating under frosting conditions”, *Energy Build.*, c. 185, ss. 224–238, Şub. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.12.033.
- [7] A. Rasheed, W. H. Na, J. W. Lee, H. T. Kim, ve H. W. Lee, “Development and validation of air-to- water heat pump model for greenhouse heating”, *Energies*, c. 14, sayı 15, ss. 1–22, 2021, doi: 10.3390/en14154714.
- [8] A. Del Amo, A. Martínez-Gracia, A. A. Bayod-Rújula, ve M. Cañada, “Performance analysis and experimental validation of a solar-assisted heat pump fed by photovoltaic-thermal collectors”, *Energy*, c. 169, ss. 1214–1223, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.117.
- [9] M. Dannemand, I. Sifnaios, Z. Tian, ve S. Furbo, “Simulation and optimization of a hybrid unglazed solar photovoltaic-thermal collector and heat pump system with two storage tanks”, *Energy Convers. Manag.*, c. 206, sayı October 2019, s. 112429, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112429.
- [10] S. Korichi, B. Bouchekima, N. Naili, ve M. Azzouzi, “Performance analysis of horizontal ground source heat pump for building cooling in arid Saharan climate: thermal-economic modeling and optimization on TRNSYS”, *Renew. Energy Environ. Sustain.*, c. 6, s. 1, 2021, doi: 10.1051/rees/2020008.
- [11] I. Malenković, P. Pärish, J. B. Sara Eicher, ve M. Hartl, “Definition of Main System Boundaries and Performance Figures for Reporting on SHP Systems”, *IEA SHC Task 44 - Subtask B*, sayı Aralık, ss. 1–26, 2012.
- [12] M. Y. Haller *vd.*, “Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems – The current state of the art”, *Energy Build.*, c. 66, ss. 667–677, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.052.
- [13] TESS, “TESSLibs 17 Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment”, 2014.
- [14] M. Çengel, Yunus A. Boles, Michael A. Kanoğlu, *Thermodynamics\_ an Engineering Approach. Ninth Edition.2019.* 2019.



## Design And Application Of Multi-Axis Solar Tracking System To Increase The Efficiency Of Solar Cell

İlhan GARİP<sup>1\*</sup> <sup>1</sup>Nişantaşı University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 02230, Sarıyer/İSTANBUL

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, a multi-axis solar tracking system has been designed and implemented in order to increase the efficiency of electrical energy obtained from solar energy, which is one of the renewable energy sources. The solar tracking unit can monitor the sun on both horizontal and vertical axes.

### Article Info:

Research article

Received: 20.09.2021

Revision: 31.10.2021

Accepted: 17.11.2021

### Highlights

- solar energy
- multi-axis solar tracking system
- the renewable energy sources

### Keywords

Two-axis solar tracking system, PV (photovoltaic), boost converter, half wave inverter, arduino, control system, switching, battery, linear motor, step motor

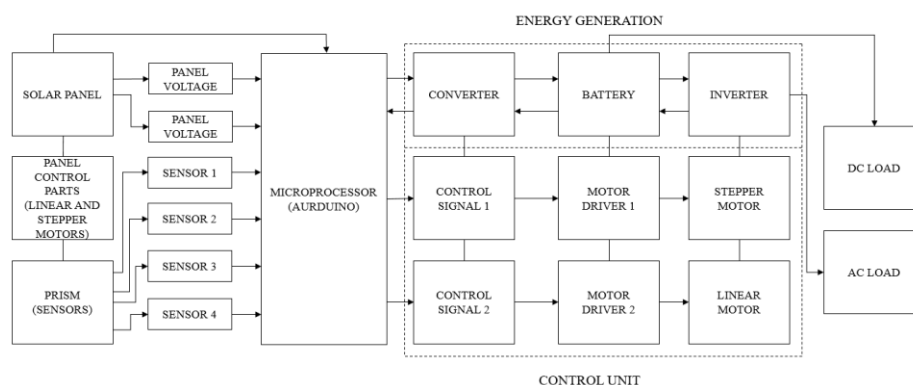


Figure A .. Block Diagram for Solar Energy System

**Purpose:** It has been aimed to benefit from solar energy more intensively. So that a photovoltaic-based system has been developed. In order to increase the energy production efficiency of PV panels, a solar tracking system has been designed and implemented. With the help of the tracking system, the sun comes perpendicular to the panel at all hours of the day, providing the highest efficiency.

**Theory and Methods:** The designed systems were realized separately and later assembled together. Solar tracking system consists of a control unit, DC/DC boost converter, a DC/AA inverter and a battery group. The created systems are explained in details.

**Results:** The basis of the proposed system is to keep the efficiency of the electrical energy produced from solar energy at the highest level. The implemented system is to ensure that the PV panels follow the sun on the horizontal and vertical axes at a right angle to the panel surface, where the highest efficiency is obtained while generating electricity. It produces arduino output in line with the information coming from the solar tracking system, and provides the tracking of the sun by controlling the stepper motors moving the panel in horizontal axis and the linear motor moving the panel in vertical axis.

**Conclusion:** In this study, the optimization of the electrical energy obtained from solar energy was achieved with the dual-axis solar tracking system. The stability of the implemented system was realized with the control algorithms used by the microcontroller. With the solar tracking system, the stability of the system has been improved and the produced energy has been increased compared to the fixed-position models. The system kept the energy efficiency at the highest level by continuously monitoring the sun on a daily and annual basis. In addition, the visibility of the system was increased and it was made available as a training set model.



## Design And Application Of Multi-Axis Solar Tracking System To Increase The Efficiency Of Solar Cell

 İlhan GARİP<sup>1,\*</sup>
<sup>1</sup>Nişantaşı University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, 34485, Sarıyer/İSTANBUL

### Abstract

In this study, a multi-axis solar tracking system was designed and implemented in order to increase the efficiency of electrical energy obtained from solar energy, which is one of the renewable energy sources. The solar tracking unit can monitor the sun on both the horizontal axis and the vertical axis. Using the solar tracking system, it is possible to increase the efficiency by approximately % 25-35. In the biaxial control system implemented in this study, the panel was placed on the north-south line and its movement was made in the east-west axis. If it is vertical movement, the lower part (south end) of the panel is rotated and the upper part (north) is moved up and down. Optimization of the system has been achieved with this mechanism. In the implemented system, horizontal movement is provided with the help of stepper motor controlled by arduino in line with the information coming from LDRs. Vertical axis movement is provided with the help of linear motor controlled by arduino in line with the information coming from LDRs. LDRs that provide sun tracking are placed on the top of the panel.

The electrical energy produced by the system can be used as DC and AC current sources with the help of the converter and inverter circuits. In addition, this energy DC can be stored in a battery group connected to the system.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
 Başvuru: 5.10.2021  
 Düzeltilme: 16.11.2021  
 Kabul: 23.11.2021

### Keywords

*Two-axis solar tracking system, PV (photovoltaic), boost converter, half wave inverter, arduino, control system, switching, battery, linear motor, step motor*

### Anahtar Kelimeler

*İki eksenli güneş takip sistemi, PV (fotovoltaik), boost converter, yarım dalga inverter, Arduino, kontrol sistemi, anahtarlama, batarya, lineer motor, step motor.*

## Güneş Hücresinin Verimini Artırmak İçin Çok Eksenli Takip Sisteminin Tasarımı Ve Uygulaması

### Öz

Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisinden sağlanan elektrik enerjisinin verimliliğini artırmak üzere çok eksenli bir güneş takip sistemi tasarlanarak uygulaması yapıldı. Bilindiği gibi güneş hücrelerinden üretilen elektrik enerjisinin verimliliğini artırmak için güneş ışınlarının günün her saatinde güneş paneline dik doğrultuda gelmesi gerekir. Bunu sağlamak için güneş paneline her doğrultuda hareket ettirmek için çok eksenli bir güneş takip sistemi tasarlandı ve uygulaması yapıldı. Güneş takip ünitesi, güneşi hem yatay ekseninde hem de dikey ekseninde takip edebilmektedir. Güneş takip sistemi sayesinde güneş hücrelerinin verimliliğini yaklaşık %25-35 oranlarında arttırmak mümkündür. Bu çalışmada gerçekleştirilen çift eksenli kontrol sisteminde, yatay hareket panel kuzey-güney doğrultusunda yerleştirildi ve hareketi doğu-batı ekseninde yapıldı. Dikey hareket ise, panelin alt kısmı (Güney ucu) döner hareketli, üst kısmı (kuzey) ise aşağı yukarı hareket ettirildi. Sistemin optimizasyonu gerçekleştirilen bu düzenekle sağlandı. Güneş hareketinin takibini sağlayan LDR' ler güneş panelinin üst kısmına yerleştirildi. Gerçekleştirilen bu sistemde panelin yatay açısal hareketi ve dikey yöndeki düşey hareketi LDR lerden gelen pozisyon bilgileri doğrultusunda arduino tarafından kontrol edilmektedir. Arduino'nun LDR lerden aldığı bilgiler doğrultusunda çıkışında yatay hareket için step motoru, dikey hareket içinse lineer motoru kontrol eden sinyalleri motor sürücülerine gönderir. Sistemde üretilen elektrik enerjisi tasarlanan konvertör ve invertör devreleri yardımı ile DA ve AA akım kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sisteme bağlı bir akü grubunda üretilen elektrik enerjisi DA olarak depolanmaktadır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın artması sonucu alternatif enerji kaynağı arayışı başlamıştır. Bu kaynak arayışında ise önemli ölçüde çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarına önemli

bir yönelim olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş ve rüzgar enerjisi gelmektedir. Dünyadaki enerjilerin temel kaynağı güneştir. Güneşten yayılıp gelen ışınların atmosferi geçip dünyamıza ulaşan miktarı bu ışınların %70 kadar olduğu tahmin edilmektedir. [1]. Bilindiği gibi güneş çekirdeğinde oluşan füzyon ile ortaya çıkan ışıma güneş enerjisi denir. Atmosfer dışı güneş enerjisi şiddeti, 1370 W/m<sup>2</sup> değerinde olmasına rağmen Dünyamıza gelen ışın miktarı dünya atmosferinden dolayı 0-1100 W/m<sup>2</sup> değerleri arasında değişmektedir. Güneş enerjisinin dünya yüzeyine doksan dakikada gelen miktarı ile tüm dünyanın bir yıllık enerji ihtiyacı karşılanabilecektir. Coğrafik olarak Türkiye, güneş bandının kuzey enlemleri olarak 36°-42°'de ve doğu meridyenleri olarak ise 26°-45°'de yer almaktadır. Ülkemizin güneş ışımasını 1303 kWh/m<sup>2</sup>-yıl olup ortalama 2623 saat güneş almaktadır. Bu günlük 3,6 kWh/m<sup>2</sup> (m<sup>2</sup> başına) güneş, günde yaklaşık 7,2 saat, toplamda ise bir yılda 792 saatlik güneşlenme süresine sahip olduğunu göstermektedir. Ülkemiz yılda ortalama 110 gün boyunca güneş enerjisinden elektrik üretecek kapasitedir. [2]. Güneş enerjisinden elektrik üretimine yönelik bilimsel faaliyetler 1970'li yıllardan hızlanmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğinin düşük olması yeni teknolojik çalışmalara neden olmuş, verimliliğin artırılması ve maliyetin düşürülmesine gibi sonuçlara ulaşılmıştır. Bilimsel faaliyetler PV verimliliğinin artırılması ve güneş takip sistemlerinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme sonucunda rüzgâr enerjisinden, ülkemizde tüketilen enerjinin %8'ini, güneş enerjisinden ise %7,5 karşılanmaktadır [3]. GEPA verilerinde görüldüğü gibi güneş enerjisi sonsuz enerji kaynağıdır. Güneş enerjisinden elektrik üretiminde verim artırılırsa hem ülkemizin hem de dünyanın enerji problemini çözebilecek bir potansiyel ortaya çıkacaktır. Yapılan araştırmalara göre dünyaya doksan dakika süresince gelen güneş ışıkları dünyanın bir yıllık elektrik enerjisini karşılayabilecek elektrik enerjisi potansiyeline sahiptir[4]. Bu nedenle güneş enerjisinden elde edilecek enerjiyi uygun şartlarda elektrik enerjisine çevirip depolayabilecek sistemleri geliştirmek gün geçtikçe daha büyük önem kazanmaya başlamıştır. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde iki farklı teknoloji kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi odaklanmış güneş enerjisi (CSP-Concentrated solar energy systems sistemleridir.) sistemleridir [4].

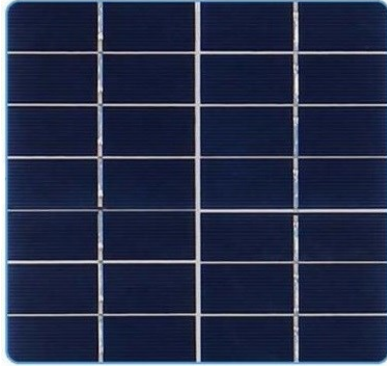
CSP (Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemi) sistemleri güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde kullanılan büyük kapasiteli bir teknolojidir. CSP güneş enerjisi santralleri ayna konumlarını kullanarak güneşin enerjisini yüksek sıcaklıklı ısıya dönüştürerek elektrik üretme yöntemidir. Elde edilen yüksek değerli ısı bir buhar türbini yardımıyla hareket enerjisine dönüştürür. Türbin miline bağlı jeneratör dönmesi sonucu elektrik üretir. Bu elektrik santralleri iki parçadan oluşur; birincisi güneş enerjisini toplayıp ısıya dönüştürür, ikinci kısım ise elde edilen bu yüksek ısıdan buhar elde edilip buhar türbini yardımıyla jeneratör üzerinden elektriğe dönüştüren sistemdir. CSP sistemleri, İspanya, Portekiz, Yunanistan, Fransa ve İsrail gibi ülkelere yaygın olarak kullanılan sistemdir[5]. Fresnel aynalar değişik yönlerde gelen ışınları, tek bir doğrultuda geçirerek ışık şiddetini artırmaktadırlar. Yüksek ışık şiddeti, PV' de üretilen elektrik enerjisinin verimi yükseltir. Güneş takip sistemleri ise güneşin günlük yörünge hareketini takip ederek güneş ışınının PV yüzeyine sürekli dik açıda gelmesini sağlayarak elektrik enerjisi üretiminin verimini artırmaktadır. [6].

Güneş enerjisinden elektrik üretiminin ikinci yöntemi ise güneş hücreleridir. Fotovoltaik (PV) sistemlerde denilen güneş hücreleri fotovoltaik efekt kullanarak güneşten gelen ışını direk DA elektrik enerjisine çevirmektedirler.[7] PV'ler yarı iletken malzemelerden yapılmışlardır. Fotovoltaik kelimesi, ışık ve voltaj anlamına gelen iki kelimenin birleşiminden oluşmuştur. Güneş pilleri; PV piller, PV hücreler ve güneş hücreleri olarak çeşitli kaynaklarda isimlendirilmektedir[8]. Son yıllarda dünyada ve ülkemizde güneş enerjisinden daha fazla faydalanma yoluna gidilerek güneş pili tarlaları kurulumu yaygınlaşmaya başlamıştır. Bununla birlikte güneş enerjisinden üretilen elektrik enerjisinin verimini artırmak için PV'lerin ve güneş takip sistemlerinin geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birisinde, tam köprü inverter paylaşan çoklu entegre dönüştürücü modüllerinin mimarisi önerilmiştir. Bu konfigürasyon ile maksimum güç noktası izlemesi yapılmıştır. Güç noktası izlemesi ile güç dönüşümü, kontrol devresi karmaşıklığı ve maliyet unsuru iyileştirilmiştir[9]. PV'ler AA modül inverterlerle birlikte son zamanlarda başarılı bir şekilde çalışmaya başlamışlardır[10].

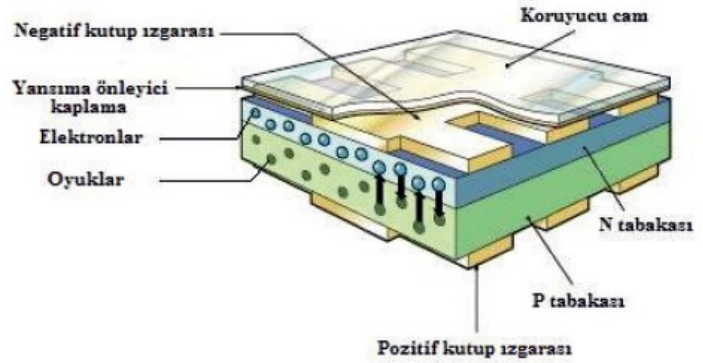
Yapılan bu çalışmada güneş enerjisinden daha yoğun faydalanabilmek için Fotovoltaik tabanlı bir sistem geliştirmek üzere, iki eksenli, yatay ve dikey olarak güneş takip sistemli bir güneş enerjisi santral modeli tasarlanarak uygulaması gerçekleştirilmiştir.

## 2.GÜNEŞ ENERJİSİNDEN FOTOVOLTAİK İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ (ELECTRICITY GENERATION FROM SOLAR ENERGY WITH PHOTOVOLTAIC)

Güneş hücreleri, yarıiletken teknolojisinden faydalanılarak fotovoltaik temelli olarak çalışırlar, üzerlerine ışık geldiğinde başlayan elektron akışı sonucu PV uçlarında bir gerilim oluşur. Fotovoltaik malzemeler, bant genişliklerine bağlı olarak yüzeye gelen güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür. **Bant genişlikleri** atoma bağlıdır. Bant genişliği, dolu değerlik bandından, elektronların serbest hareket ettiği boş iletim bandına bir elektron göndermek için gereken enerji miktarıdır. Birimi elektron-volt (eV)'tur. Yarı iletken N-tipi (negatif ) bir malzeme oluşturmak için katkı atomlarına bağlanırsa, iletim bandında birkaç tane elektronu olur, P-tipi (pozitif) bir malzeme ise elektronları veya boşlukları bırakmak için bağlanır. N ve P tipi malzemelerin birbirleri ile bağlantısından dolayı, bir voltaj oluşur. Bu oluşumda gelen ışınlardan dolayı elektronlar eklemeye pozitif tarafına, oyuklar ise negatif tarafına harekete geçerler. Bu hareket elektrik akımını oluşturur. Çıkış gücünü artırmak amacıyla çok sayıda PV hücresi birbiri ile seri ve paralel guruplar halinde bağlanarak PV modülleri oluşturmaktadırlar. Bu şekilde PV modül gücü birkaç watt'tan megawatt'lara değerine ulaşabilmektedir[11]. Şekil 1.a ve 1.b' de kullanılan güneş panelinin hücrelerin iç yapısına ait görüntü verilmiştir [12].



Şekil 1.a



Şekil 1.b

Şekil 1. Güneş paneli hücresi ve hücrelerin iç yapısı

Güneş panelinin eşdeğer devresi çıkartılmak suretiyle üretilen elektrik enerjisi miktarını matematiksel olarak ifade etmek mümkün olacaktır. Şekilde eşdeğeri çıkartılan devre değerlerine bağlı olarak elde edilen formüller incelendiğinde, güneş enerjisi panelinin enerji verimi ve üretimi ile ilgili somut sonuçlar elde edilecektir. Şekil 2'de güneş paneline ait elektriksel eşdeğer devre verilmiştir[13]. Elektrikli eşdeğer devrede  $R_{SH}$  direnci, akım kaynağının paralel direncini,  $D$  diyotu ters akımları bloke eden tıkama diyotunu,  $R_L$  direnci ise panele bağlı yük direncini göstermektedir. Elektrik enerjisi üretilen bir PV hücreye ait devre akımının matematiksel ifadesi, eşitlik 1'de verilmiştir.

$$I = I_{LG} - I_{OS} \left\{ \exp \left[ \frac{q}{AKT} (V + I_{RS}) \right] - 1 \right\} - \frac{V + I_{RS}}{R_{SH}} \quad (1)$$

Ters doyum akım değeri ise eşitlik 2' de verilmiştir.

$$I_{OS} = I_{OR} \left[ \frac{T}{T_R} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_{GO}}{Bk} \left( \frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

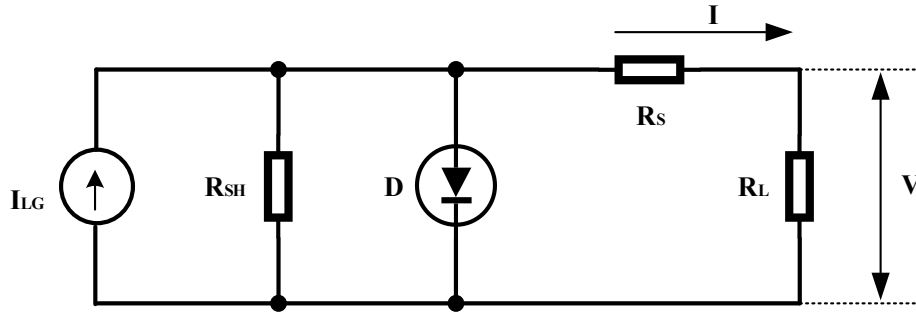
Üretilen elektrik akımının değeri ise eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$I_{LG} = [I_{SCR} + K_I(T - 25)] \frac{\lambda}{100} \quad (3)$$

Burada;

$I$  Panel çıkış akımını ( $A$ ) ve  $V$  gerilimini ( $V$ ),  $I_{OS}$  Panelde oluşan ters doyum akımını ( $A$ ),  $T$  Panel gövde sıcaklığını ( $C^0$ ).  $k$  : Boltzmann sabitini  $q$  Elektronik şarjı miktarını ( $C$ ),  $\lambda$  Solar aydınlanmayı ( $W/m^2$ ).  $K_I I_{SCR}$  için kısa devre sıcaklık katsayısını ( $A/C^0$ ),  $I_{SCR}$   $25C^0$  ve  $1000 W/m^2$  kısa devre akımını ( $A$ ),  $I_{LG}$  Işık tarafından üretilen akımı ( $A$ ),  $E_{GO}$  Silikon için bant genişliğini ( $eV$ ),  $B = A$  İdealleştirme faktörünü,  $T_R$  Referans sıcaklık değerini ( $^0C$ ),  $I_{OR}$   $T_R$  referans sıcaklığında panel doyum akımını ( $A$ ),

$R_{SH}$  Şönt direnci ( $\Omega$ ),  $R_S$  Seri direnci ( $\Omega$ ) ve  $R_L$  ise yük direncini ( $\Omega$ ) göstermektedir. Fotovoltaik güneş panellerinin akım, gerilim, güç ve verimleri, ışınım şiddeti ve çalışma sıcaklığı gibi ısıl parametrelerle direkt ilişkilidir.

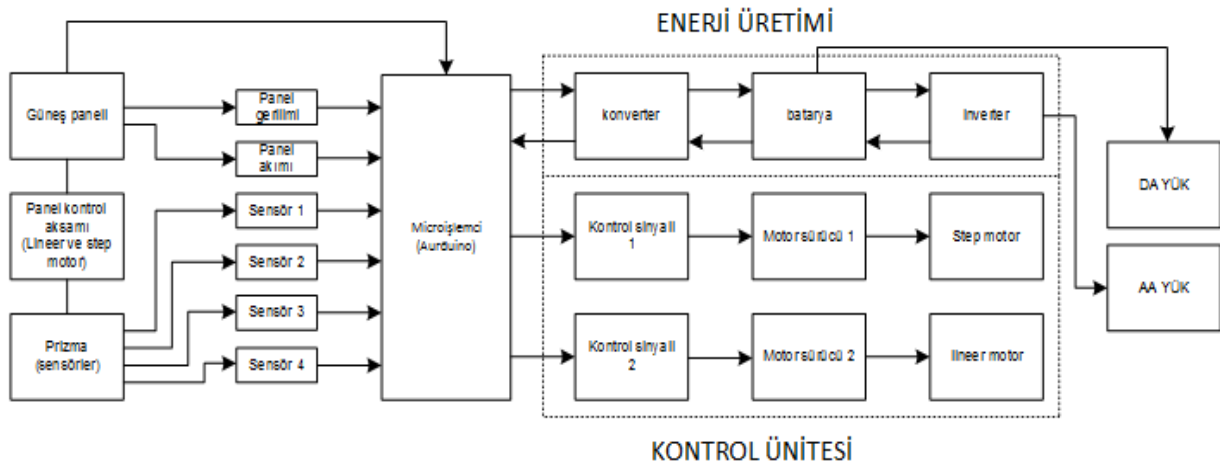


Şekil 2. Güneş paneli elektriksel eşdeğer devresi

### 3. SİSTEMİN KURULUMU (CONSTRUCTION OF THE SYSTEM)

Bilindiği gibi dünyamızın iki türlü hareketi vardır. Günlük hareketi (kendi eksenini etrafında dönmesi). Yıllık hareketi (güneşin etrafında dönmesi). Dünyanın günlük hareketi batı doğu yönünde olmakta ve bu hareketi 24 saatte tamamlamaktadır. Güneşin bu hareketi sonucunda; Gece gündüz meydana gelir. Yerel saat farkları oluşur. Gölge boyu gün içerisinde değişir. Güneş ışınlarının dünyaya geliş açısı gün içerisinde değişir. Bu değişim sonucunda ise; Gün içerisinde sıcaklıklar değişerek günlük sıcaklık farkları oluşur. Bunun sonucunda doğa olayları meydana gelir. Dünyanın yıllık hareketi sonucunda güneş ışınlarının dünyaya geliş açısı değiştiğinden mevsimler meydana gelmektedir.

Bu çalışmada güneş enerjisinden verimli bir şekilde elektrik enerjisi üretebilmek için güneşin günlük ve yıllık hareketlerini takip edebilmek için çift eksenli güneş takip sistemi tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Sistem dikey ekseninde güneşin yıllık hareketini takip ederek dünyaya olan açısını izlerken, yatay ekseninde güneşin günlük hareketini takip etmektedir.



Şekil 3. Güneş enerjisi seti için tasarlanan sistemin blok diyagramı

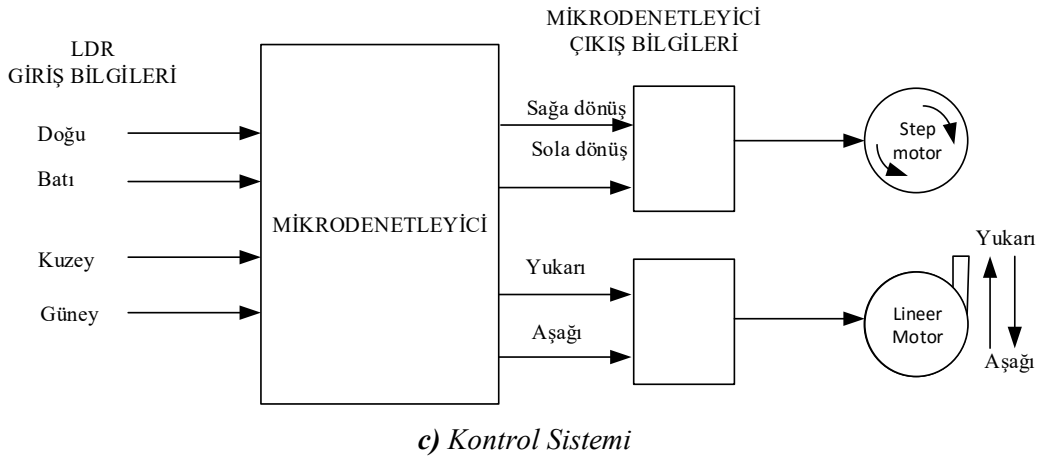
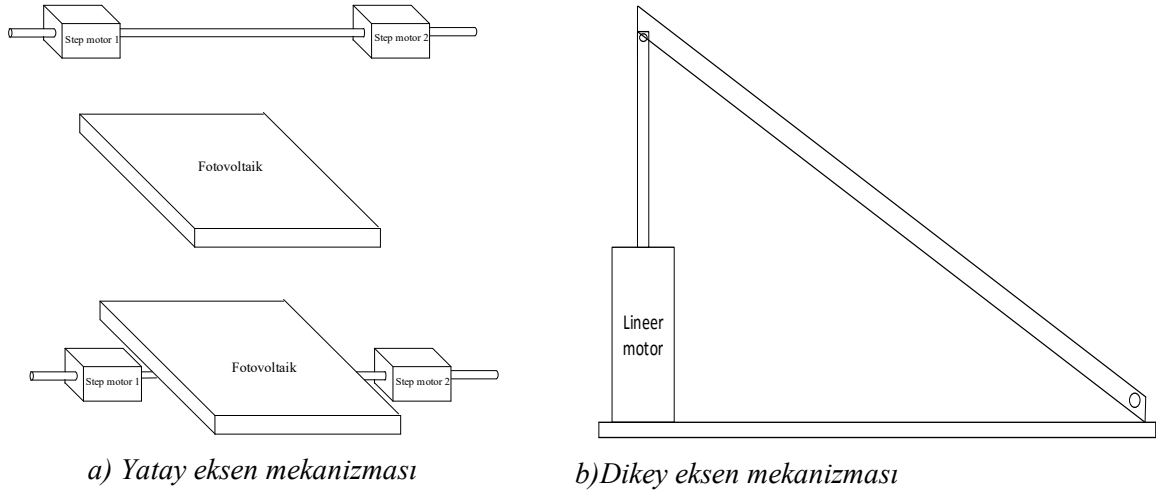
Gerçekleştirilen sistem yatay ve dikey olmak üzere iki temel eksen üzerinde çalışmaktadır. Yatay eksen hareketi, güneş paneli step motor miline akupule bağlı bir mil üzerine monte edilerek güneşin günlük hareketi izlenmektedir. Dikey eksen hareketi ise güneş paneline dikey olarak monte edilen lineer motor tarafından sağlanmaktadır. Bu işlemler hazırlanan yazılım ile arduino mikroişlemci ile gerçekleştirilmektedir. Güneş takip sisteminin algılayıcıları olarak LDR ler kullanılmış ve doğu-batı yönünden alınan bilgilerle arduino step motorları kontrol ederek günlük güneş takibini yapmaktadır. Kuzey –güney yönünden gelen bilgilerle arduino lineer motoru kontrol ederek güneşin mevsimsel olarak dünyayla yaptığı açığı takip ederek panelin aşağı yukarı hareketini sağlamaktadır.



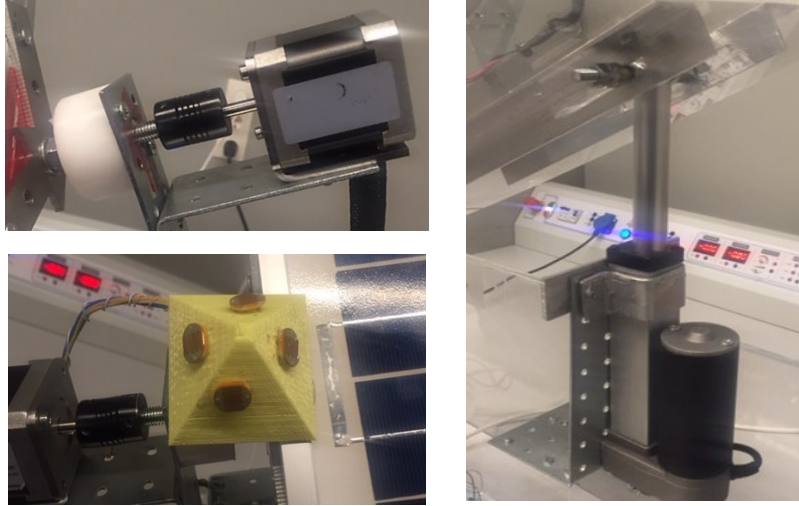
Bu işlem sayesinde güneş panelinden yıllık %33 daha fazla verim elde edilmektedir [14]. Aynı zamanda kullanılan bir LCD ekran ile de elde edilen açısal değerler ekran üzerinde yazılı olarak gösterilmektedir. Hazırlanan sisteme ait blok şema Şekil 3’de verilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde, kararlı bir DA seviye için buck-boost konverter ve batarya gurubu, elde edilen DA’ı AA seviyeye dönüştürmek içinde bir evirici (inverter) kullanılmıştır. Evirici çıkışında 220V 50Hz AA elde edilmektedir.

### 3.1.Güneş Takip Sistemi (Solar Tracking System)

Güneş enerjisinden elektrik üretmek için kullandığımız panelin günün her saatinde ve yılın her gününde maksimum elektrik enerjisi üretmesini sağlamak için yatay ekseninde doğu-batı yönünde (sağa-sola) dikey ekseninde ise Kuzey-güney yönünde (aşağı yukarı) hareketini sağlayacak bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistemde yatay hareket, LDR lerden gelen bilgiler doğrultusunda arduino tarafından kontrol edilen step motor yardımı ile sağlanmaktadır. Dikey eksen hareketi ise yine LDR’lerden gelen bilgi doğrultusunda arduino tarafından kontrol edilen lineer motor yardımı ile sağlanmaktadır. Böylece güneş panelinin güneşi 90<sup>0</sup> derece açıda takip etmesi sağlanmaktadır. Güneş takibini sağlayan LDR ler panelin üst kısmına yerleştirilmiştir. Güneş takip sistemine ait çizim ve resimler Şekil 4’ de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi mikrodenetleyici LDR’den aldığı bilgiler doğrultusunda step motor ve lineer motoru kontrol etmektedir. LDR’ler doğu veya batı bilgisi gönderdiğinde mikrodenetleyici step motor sürücüsünü kontrol ederek motorun sağa veya sola dönüşünü sağlamaktadır. LDR’ler kuzey veya güney bilgisi gönderdiğinde mikrodenetleyici lineer motor sürücüsünü kontrol ederek lineer motorun yukarı veya aşağı hareketini sağlamaktadır.



Şekil 4 Güneş Takip Sistemi



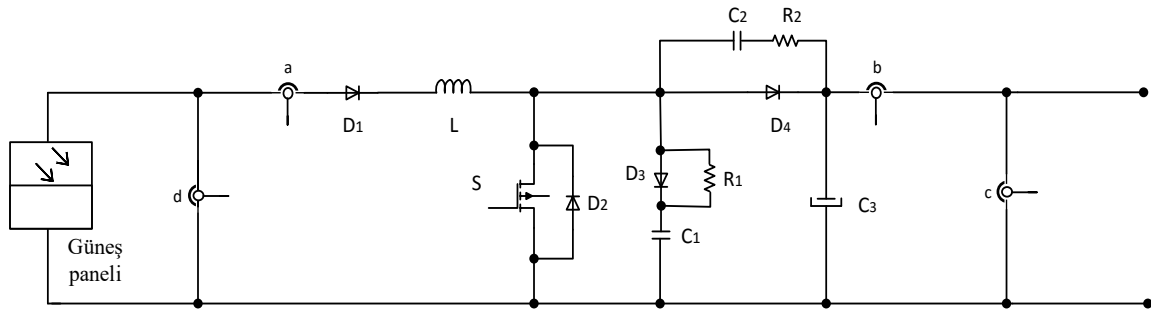
**Şekil 5.** Sisteme ait mekanizma parçaları

Böylece güneş panelinden en yüksek verimi sağlamak mümkün olmaktadır. Şekil 5’de görüldüğü gibi güneş takip sistemini oluşturan step motor, lineer motor ve LDR’ den oluşan mekanizma parçalarının resimleri verilmiştir.

### 3.2.DA/DA Yükselten Dönüştürücü (Boost Converter)

DA/DA dönüştürücüler, girişine uygulanan DA gerilimi düşürerek veya yükselterek çıkışa aktarmaya yararlar. Alçaltan, Yükselten, alçaltan-yükselten dönüştürücü gibi türleri vardır. DA/DA dönüştürücüler, yarı iletken malzemelerin akım ve gerilim düzeylerinin artmasından sonra güç devrelerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kullanım alanlarının başlıcaları; Kesintisiz güç kaynakları, Akü şarj üniteleri, Motorların kontrolü gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Bu Çalışmada, DA/DA dönüştürücü güneş panellerinde üretilen DA seviyedeki gerilimdeki dalgalanmaları engellemek ve kararlı bir DA gerilim elde etmek için kullanılmıştır. Panelden gelen gerilimi 0-14 volt arasında değişmesinden dolayı 12 voltluk akünün şarj dolumunun yükselten dönüştürücü kullanılarak yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada kullanılan ve Şekil 4’deki yükselten dönüştürücü uygulamasında sistemden elde edilen akım ve gerilim bilgileri arduino’ya gönderilmektedir. Bilgiler doğrultusunda Arduino yükselten dönüştürücüyü kontrol ederek çıkış gerilimini istenilen seviyede sabit tutarak DA çıkış sinyalinin ve inverter giriş sinyalinin kararlı olmasını sağlayarak sistemin verimli çalışmasını sağlamaktadır. Şekil 6’da a ve b’ noktalarında görülen giriş ve çıkış akım algılayıcıları, c ve d noktalarında görülen giriş ve çıkış gerilim algılayıcılarıdır.



**Şekil 6.** Yapılan çalışmada kullanılan Yükselten dönüştürücü

Kullanılan yükseltici konverterde anahtar elemanı olarak mosfet kullanılmıştır. Konverterin gerilim yükseltme oranı ise Eşitlik 4’de verilmiştir[15].

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{1}{1 - D}$$

4

Burada;

$V_0$ = Çıkış gerilimi,  $V_i$ = Giriş gerilimi,  $D$ = Darbeleme oranı' dır.

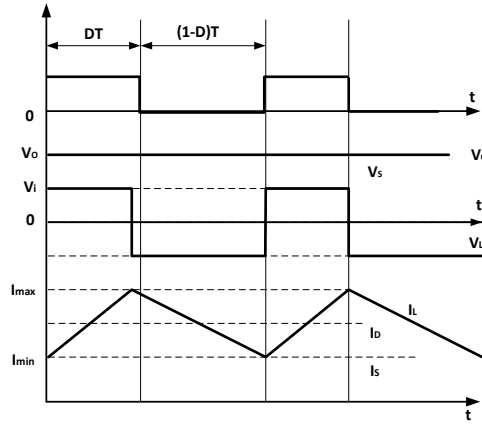
Yükselten devrede doluluk boşluk durumuna göre akım ve gerilim grafiği şekil 7.'de verilmiştir. Kapasite, Endüktans parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda görüldüğü gibi eşitlik 5 ve 6'da verildiği gibidir.

$$L \geq \frac{D \cdot (1 - D)^2 \cdot R}{2f} \quad 5$$

$$C \geq \frac{D \cdot V_0}{\Delta V_0 \cdot R \cdot f} \quad 6$$

Burada;

$L$ = Endüktans,  $C$ = Kapasitans,  $R$ = Direnç,  $D$ = darbeleme oranı  $f$ = frekans  $\Delta V_0$  =Değişken çıkış gerilimi değerini vermektedir.

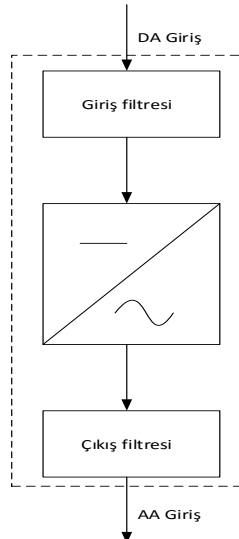


**Şekil 7.** Yükselten devrede doluluk boşluk durumuna göre akım ve gerilim

Bu çalışmada, Şekil 6.'da görülen yükselten dönüştürücü kullanılmıştır. Yükselten dönüştürücünün çıkışı akülerin sarj edilmesinde ve İnverter (Evirici) girişini besleyerek çıkışta kararlı AA üretilmesini sağlamaktadır.

### 3.3 DA/AA Evirici (Inverter)

Yükselten konverter devresinde kararlı hale getirilen DA sinyali, bir DA/AA evirici yardımı ile çıkışta kullanılmak üzere AA sinyaline dönüştürülmektedir.



**Şekil 8.** Evirici Blok Şema

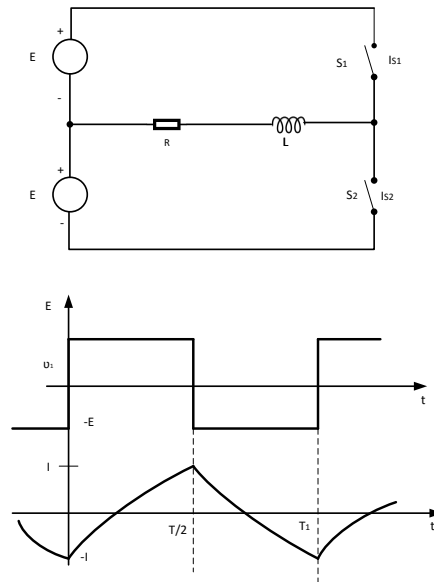
Şekil 8’ deki blok şeması verilen inverterin çalışma prensibi şekil 9’ görüldüğü gibi, DA giriş geriliminin ilk yarı periyotta pozitif ve ikinci yarı periyotta negatif yönde yük uygulanması prensibine dayalıdır. Bu iki yarı periyodun toplamı, devrenin çalışma periyodu veya frekansını belirler.

Kaynağı pozitif ve negatif anahtarlayarak kare dalga üretmek oldukça kolaydır. Devrenin kullanım amacına bağlı olarak kare dalga, pwm ve filtreleme yöntemleri ile sinüs dalga sinyaline dönüştürülür. Dalga formu ideal sinüs sinyali olması için çıkış filtresi kullanılır. Kullanılacak invertörün gücü seçilirken, şebekeye bağlı (on-grid) sistemler için invertörü besleyen PV santralin gücünün %10’ undan az olmayacak şekilde, şebekeden bağımsız (off-grid) sistemler içinse beslenecek yükün talep değerini karşılayacak şekilde seçilmesi çoğu zaman daha uygun olarak tercih edilir.

### 3.3.1 İnverter Çalışma Prensibi (Inverter Working Principle)

Şekil 9’da yarı köprü bir eviricinin devre şeması görülmektedir. Şekil 9’daki devrede görülen anahtarlar sırası ile açılıp kapanarak çalışırlar. Zamanın  $T/2$ ’sinde  $S_1$ ,  $T/2$  sinde  $S_2$  devreye girer. Bu anahtarlar Transistör mosfet SCR ya da IGBT olabilir.

$S_1$  Kapalı iken  $S_2$  açık konumdadır. Bu döngüde Kirşof gerilim kanununa göre  $v_L = E$  olur. Belli bir süre sonunda  $S_1$  açılır ve  $S_2$  anahtarı devreye girer ve Kirşof gerilim kanununa göre  $v_L = -E$  olur. Sonuç şekil 9’da görüldüğü gibi kare dalgalı alternatif akım şeklinde oluşur. Akımın dalga şekli ise altaki akım dalga şeklinde görülmektedir. Gerilimin dalga şeklini tam sinüse çevirmek için değişik inverter bağlantı şekilleri (Köprü inverter vs.) ve filtre devrelerinden faydalanılır.



Şekil 9. İnverter ve inverter dalga şekilleri

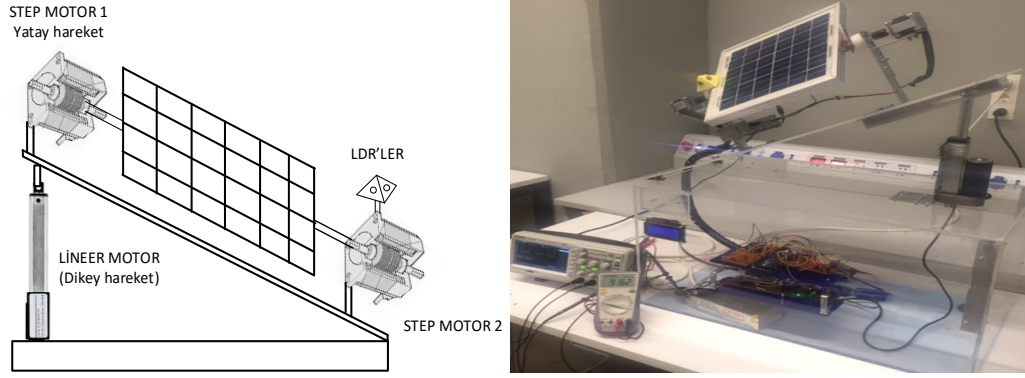
## 4.UYGULAMA ÇALIŞMALARI (APPLICATION STUDIES)

Tasarlanan sistemler ayrı ayrı gerçekleştirilerek sonradan bir araya getirilmiştir. Güneş takip sistemi, Kontrol ünitesi, DA/DA yükselten konvertör, DA/AA Evirici ve Batarya gurbundan oluşan sistemin genel görüntüsü Şekil 10’ de verilmiştir. Sistemde kullanılan elemanlara ait açıklamalar aşağıdaki gibidir.

**Step Motor:** Gerçekleştirilen bu sistemde güneşin günlük hareketini doğu batı yönünde takip ederek güneş pillerini güneşe yönlendirme mekanizmasının hareketini sağlayan iki step motor kullanıldı. Step motorlar paneli taşıyan mil uçlarına bağlanmak suretiyle, sistemin torku artırılmıştır. Bu step motorlar tek kontrol algoritması ile çalıştırılarak senkronize olmaları gerçekleştirilmiştir.

**Lineer motor:** Güneş takip sisteminin aşağı yukarı hareketi bir lineer motor yardımı ile sağlandı. Lineer motor kontrol parametrelerine uygun olarak aşağı yukarı hareket ederek güneş panelinin güneş ışınlarının yüzeye dik olarak gelmesini sağlayarak PV panelin daima en yüksek verimde çalışması sağlandı..

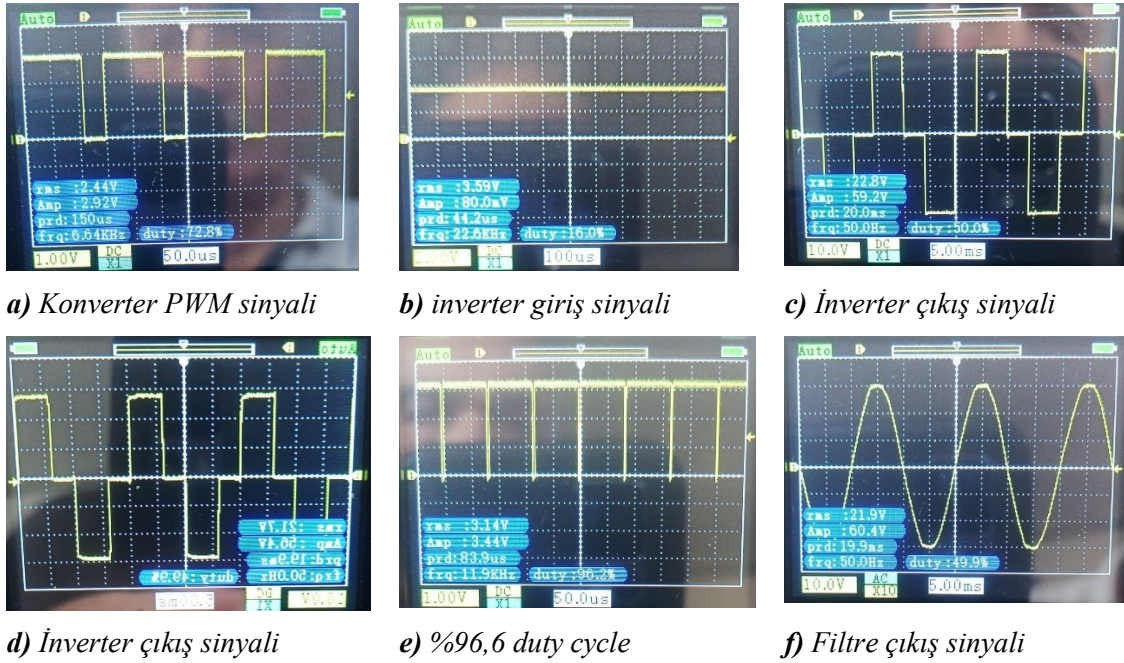
**Boost konvertör:** Sistemin ürettiği elektrik enerjisinin karalılığı boost konverter yardımıyla sağlandı. Boost konverterde kararlı hale getirilen elektrik enerjisi batarya gurubunda depolandığı gibi aynı zamanda inverter yardımı ile de AA sinyale dönüştürülmektedir.



Şekil 10. Sistem Genel görüntüsü

**İnverter:** AA Sinyale dönüştürülen bu elektrik enerjisi günlük kullanıma uygun olarak 220V 50Hz olarak çıkışa verilmiştir.

Sistem, Şekil 10'da görüldüğü gibi saydam bir kutulama ile görünür hale getirilerek öğrencilerinin eğitimine katkı sağlaması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen bu sistemin kontrol sinyalleri, sürme sinyalleri ve yük durumlarını gösteren bilgiler osiloskop yardımı ile ölçülerek görsel hale getirilmiştir. Şekil 11'de sinyaller görülmektedir.



Şekil 11 Sistem giriş ve çıkış sinyalleri

Şekil 11 a'da Panelden gelen 12V DA seviyesindeki gerilim boost konverterde istenilen seviyeye çıkarmak için yapılan duty cycle ayarı görülmektedir. Şekil 11 b'de güneş panelinde üretilen DA sinyalinin konverter girişine uygulanıp istenilen seviyeye yükselttikten sonar inverter girişine uygulanmasına ait sinyal şekli görülmektedir. 11 c'de İnverterde AA sinyale dönüştürülmüş sinyalin şekli görülmektedir. Şekil 11 d'de inverterde üretilen sinyalin yüke uygulanması ve 11 f'de ise yük üzerinde oluşan sinyalin sinüse benzemiş hali görülmektedir. Şekil 11 e'de ise %96,6 darbeleme oranı görülmektedir.

## 5.SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada çift eksenli güneş takip sistemi ile güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin optimizasyonu sağlandı. Gerçekleştirilen sistemin kararlılığı mikrodenetleyici tarafından kullanılan kontrol algoritmaları ile gerçekleştirildi. Güneş takip sistemi ile, sabit konumlu olarak çalışan modellere göre daha kararlı ve fazla elektrik enerjisi üretimi sağlandı. Sistem, güneşi günlük ve yıllık olarak sürekli takip ederek enerji verimliliğini sürekli olarak en üst düzeyde tutmayı sağladı. Yaptığımız çalışmadaki ölçümler

sonucunda takip sistemli mekanizmanın sabit panelli sisteme göre % 25 ila %35 arası daha verimli olduğu belirlendi. Güneş takip sisteminde yatay eksen kontrolü step motorlar ile dikey eksen kontrolü lineer motor ile gerçekleştirildi. Özellikle lineer motorun kontrol algoritmalarının kararlılığı sistemi diğerlerine göre daha güvenilir hale getirdi. Bunun yanı sıra sistemin görselliği yükseltilerek bir eğitim seti modeli olarak kullanıma sunuldu.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Altın, V., Güneş Enerjisinden Yararlanılarak Elektrik Üretimi, Mimar ve Mühendis Dergisi, 33 (2004) 28-31.
- [2] Altın, V., Güneş Pillerinin Yapısı ve Çalışması, Bilim ve Teknik Dergisi, 464 (2006) 41.
- [3] Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı internet sitesi “Enerji.gov.tr.”
- [4] Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)
- [5] Perdahçı, C., Güneş Pili Verimleri ve Ekonomik Analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 1996.
- [6] Çağlar A., Sarıkaya A., Eyyupoğlu Ö. F., “Fresnel aynası ve güneş takip sisteminin güneş paneli güç verimliliğine etkisi” Akdeniz Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Antalya, 07070
- [7] TV Thang, NM Thao, Jong Ho Jang, Joung-Hu Parkı “Analysis and Design of Grid-Connected Photovoltaic Systems with Multiple-Integrated Converters and a Pseudo DC-Link Inverter” Eylül 2013 Sf. 3377 – 3386 09 INSPEC Erişim Numarası: 14064555 DOI: 10.1109/TIE.2013.2281153 Yayımcı: IEEE
- [8] John J. Bzura “The AC Module: An Overview and Update on Self-contained Modular PV Systems – Summary of a Panel Session Presentation” Konferans Tarihi 25-29 Temmuz 2010 Minneapolis, MN, ABD INSPEC Erişim Numarası: 11570841DOI: 10.1109/PES.2010.5589833Yayımcı: IEEE
- [9] Markvat, T., Castaner, L. 2006. “Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications” DOI: 10.1016/B978-185617390-2/50007-6
- [10] Haouari-Merbah, M., Belhamel, M., Tobias, I., Ruiz, J. M. 2005. “Extraction and Analysis of Solar Cell Parameters From the Illuminated Current–voltageCurve”, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 87, Mayıs 2005, pp. 225-233.
- [11] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., Voulgaris, N. C. 2001. “Development of a Microcontroller-Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System”, IEEE Transactions on Power.
- [12] Sözen, A., Arcaklıoğlu, E., Özalp, M., Kanit, E.G. 2005. “Solar-Energy Potential in Turkey”, Applied Energy, 2005, 80, pp. 367-381.
- [13] Boztepe, Mutlu “ Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Verimliliği Etkileyen Parametreler” Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Bornova, İzmir E-posta: mutlu.boztepe@ege.edu.tr
- [14] Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. 1995. “Power Electronics: Converters, Applications and Desing”, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc.
- [15] Shugar, D. S., Hickman, T., Lepley, T. 1996. “Commercialization of A Value-Engineered Photovoltaic Tracking System”, 25 th IEEE PVSC Proceedings, May 1996, pp. 1537-1540.



## Result Weighting-Based Resnet Feature Pyramid Network Architecture for Surface Defect Detection

Hüseyin ÜZEN<sup>1,\*</sup> , Muammer TÜRKOĞLU<sup>2</sup>  Davut HANBAY<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 12000, Merkez, BİNGÖL

<sup>2</sup>Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 55000, İlkadım, SAMSUN

<sup>3</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 44280, Merkez, MALATYA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 10.11.2021  
Revision: 25.11.2021  
Accepted: 01.12.2021

#### Highlights

- Result Weighting
- Encoder-Decoder
- Defect Detection

#### Keywords

Surface Defect Detection  
Pyramid Feature Network  
Convolutional Neural  
Network,  
Segmentation

Automatic surface defect detection in manufacturing systems is very important in terms of providing high-quality products. In this study, a new architecture for pixel-level surface defect detection based on deep learning is proposed. The proposed architecture consists of Encoder, Decoder, and Result Weighting modules. The architecture of the proposed model is presented in Figure A.

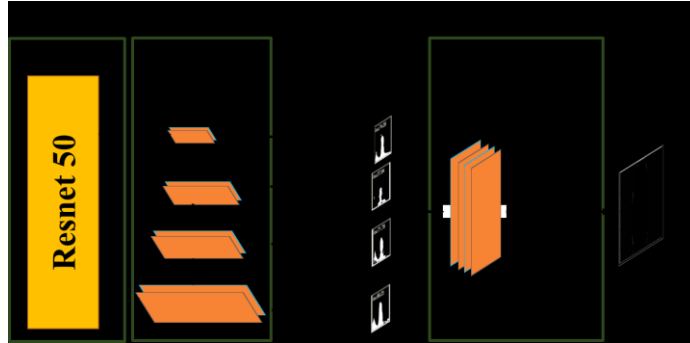


Figure A. Schema of the Proposed Architecture

**Purpose:** Surface defect inspection is one of the most important components of quality control. Since manual inspections have weaknesses such as time-consuming, inefficient, and subjective results, there is a need for automatic surface defect detection systems based on computer vision and machine learning. For this purpose, a deep learning-based method was developed that works with high accuracy for automatic surface defect detection.

**Theory and Methods:** In this study, Result Weighting-based Resnet Feature Pyramid Network (SA-ROPA) architecture was developed for surface defect detection. The proposed model, pre-trained Resnet50 network architecture based on a transfer learning approach was used to deal with the problem of insufficient samples. In addition, a new approach called Result Weighting (SA), instead of directly combining features from different levels of the FPN architecture, was used. In this approach, four different defect detection results were obtained simultaneously using different levels of feature from the Resnet50 network. Then, the different detection results were combined in the depth dimension and the point convolution process was applied to obtain the final result prediction.

**Results:** MT, MVTEC-Texture and AITEX surface defect detection datasets were used to test the proposed SA-ROPA architecture. In experimental studies, the mIoU value obtained for the MT, MVTEC-Texture and AITEX datasets using the proposed model was calculated as 79.92%, 76.37%, and 82.72%, respectively. As a result, the proposed model was achieved higher success than the state-of-the-art methods and previous studies.

**Conclusion:** In the experimental results, it was observed that the surface defects were detected with high performance using the proposed SA-ROPA model. These results showed that the proposed model can be used for automatic surface defect detection in manufacturing systems. In addition, it was envisaged that this study in which extensive experimental studies were carried out, will lead to further work in the field of automatic surface defect detection.



## Result Weighting-Based Resnet Feature Pyramid Network Architecture for Surface Defect Detection

Hüseyin ÜZEN<sup>1,\*</sup> , Muammer TÜRKOĞLU<sup>2</sup> , Davut HANBAY<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 12000, Merkez, BİNGÖL

<sup>2</sup>Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 55000, İlkadım, SAMSUN

<sup>3</sup>İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü 44280, Merkez, MALATYA

### Abstract

Surface defect detection is very important in manufacturing systems to ensure high quality products. Unlike manual inspections under human supervision, automatic surface defect detection is both efficient and highly accurate. In this study, a Result Weighting-based Resnet Feature Pyramid Network (SA-ROPA) model has been developed for automatic pixel-level surface defect detection. In the first stage of the proposed model, the pre-trained Resnet50 network was used, and feature maps were extracted from the different levels of this network. In the second stage, Feature Pyramid Model was applied to these feature maps in order to hierarchically share important information in defect detection. In the third stage, 4 different defect detection results were obtained by using these feature maps. In the last stage, four different results obtained using the developed Result Weighting (SA) module were effectively combined. The proposed SA-ROPA model has been tested with MT, MVTEC-Texture and AITEX datasets, which are widely used in defect detection studies. In experimental studies, the mIoU value obtained for the MT, MVTEC-Texture and AITEX datasets using the proposed model was calculated as 79.92%, 76.37%, and 82.72%, respectively. These results have shown that the proposed SA-ROPA model is more successful than other state-of-the-art models.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 10.11.2021  
Düzeltilme: 25.11.2021  
Kabul: 01.12.2021

### Keywords

Surface Defect Detection  
Pyramid Feature Network  
Convolutional Neural  
Network  
Segmentation

### Anahtar Kelimeler

Yüzey Hata Tespiti  
Öznitelik Piramit Ağı  
Evrişimsel Sinir Ağı  
Bölütleme

## Yüzey Hata Tespiti için Sonuç Ağırlıklandırma Tabanlı Resnet Öznitelik Piramit Ağ Mimarisi

### Öz

Yüzey hata tespiti, imalat sistemlerinde yüksek kalitede ürün sağlanması açısından oldukça önemlidir. İnsan gözetimi altında yapılan manuel denetimlerin aksine, otomatik yüzey hatası tespiti hem verimli hem de yüksek doğruluktur. Bu çalışmada piksel seviyesinde otomatik yüzey hata tespiti için Sonuç Ağırlıklandırma tabanlı Resnet Öznitelik Piramit Ağ (SA-RÖPA) modeli geliştirilmiştir. Önerilen modelin ilk aşamasında, önceden eğitilmiş Resnet50 ağı kullanılmış ve bu ağın farklı seviyelerinden öznitelik haritaları çıkartılmıştır. İkinci aşamada, hata tespitinde önemli bilgileri hiyerarşik olarak paylaşmak için bu öznitelik haritalarına Öznitelik Piramit Modeli uygulanmıştır. Üçüncü aşamada, bu öznitelik haritaları kullanılarak 4 farklı hata tespit sonucu elde edilmiştir. Son aşamada, geliştirilen Sonuç Ağırlıklandırma (SA) modülü kullanılarak elde edilen 4 farklı sonuç etkili bir şekilde birleştirilmiştir. Önerilen SA-RÖPA modeli, hata tespit çalışmalarında yaygın olarak kullanılan MT, MVTEC-Doku ve AITEX veri kümeleri ile test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda, önerilen model kullanılarak MT, MVTEC-Doku ve AITEX veri kümeleri için elde edilen mIoU değeri, sırayla %79,92, %76,37 ve %82,72 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, önerilen SA-RÖPA modelinin diğer son teknoloji modellerine göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

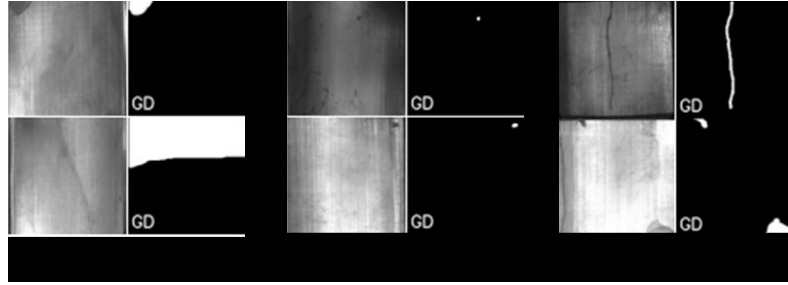
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İmalat sistemlerinde artan üretim talebini karşılamak için, üretim verimliliğini artırırken aynı zamanda ürünlerin kalitesinin korunması gerekmektedir [1], [2]. Yüzey hata denetimi, kalite kontrolün en önemli bileşenlerinden birisidir. Geleneksel yüzey hata denetimi insan gözetiminde manuel olarak yapılmaktadır [3], [4]. Bu yöntem, fazla zaman harcanması, verimliliğin düşük olması ve öznel sonuçların elde edilmesi gibi dezavantajlara sahiptir [3]. Bu nedenle, imalat sistemlerinde pratik çözümler için gelişen teknolojiyi



kullanılan otomatik yüzey hata denetimi, başlıca araştırma konularından biri olmuştur [1], [4], [5]. Günümüzde bilgisayarlı görme, görüntü işleme ve makine öğrenme teknolojisi, otomatik yüzey hata tespit sistemlerine uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır [4], [5]. Fakat otomatik yüzey denetimi, yüzey hata tespitinde karşılaşılan problemlerden dolayı hala araştırmalara konu olmaktadır [3], [6], [7]. Şekil 1’de verildiği gibi, otomatik yüzey hata tespitinde karşılaşılan yaygın problemler şu şekildedir [5], [8]:

1. Aşırı uyum: Yüzeyde bulunan hatalı bölge ile arka plan arasında güçlü benzerlik olması.
2. Değişen hata boyutu: Yüzeyde oluşan hataların boyutlarının belirgin olmaması ve bazı hataların çok küçük boyutta olması.
3. Değişen ortam şartları: Görüntüdeki lekeler, gölgeler ve eşit olmayan aydınlatma gibi dış faktörlerin oluşması.



**Şekil 1.** Otomatik yüzey hata tespitinde karşılaşılan problemler: a) Aşırı uyum, a,b,c) Değişen hata boyutu, c)Değişen ortam şartları

Otomatik yüzey hata tespit yöntemleri, geleneksel hata tespit yöntemi ve derin öğrenme tabanlı hata tespit yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır [4], [5]. Geleneksel hata tespit yöntemleri istatistiksel, spektral ve model tabanlı yaklaşımlardır [3]–[5]. Bu yöntemlerde yüzeyde oluşan hatalı bölgelerin tespiti için eşikleme, morfolojik işlemler, Yerel İkili Örüntü (YİÖ) ve Ölçekten Bağımsız Öznitelik Dönüşümü (ÖBÖD) gibi manuel olarak elde edilen öznitelikler kullanılmıştır [3], [6], [9]. Bu yöntemler aydınlatma, arka plan ve kamera açısı değiştiğinde, hata tespit performansı büyük ölçüde etkilenmektedir [5]. Ayrıca, bu yüzey hata tespit problemleri karşısında geleneksel yöntemler oldukça zayıftır. Tüm bu nedenlerden dolayı, bu yöntemlerin başka yüzeylere uygulanması sınırlıdır ve gerçek dünya uygulamaları için kullanışlı değildir [4], [5], [8].

Son zamanlarda, yüzey hata tespiti için derin öğrenme tabanlı Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) kullanılarak yüksek performanslar elde edilmiştir [6], [9]. Evrişim, havuzlama ve doğrusal olmayan aktivasyon katmanlarından oluşan ESA, hata tespiti için etkili ve güçlü öznitelikleri otomatik bir şekilde elde etmektedir[1], [10]–[12]. ESA tabanlı yüzey hata tespit yöntemleri, Görüntü-seviyesinde, Bölge-seviyesinde ve Piksel-seviyesinde olmak üzere 3 yöntemden oluşmaktadır [1], [4]. Görüntü-seviyesinde hata tespiti yapan yöntemler, yüzey görüntüsünde hata olup olmama durumuna göre görüntüleri sınıflandırır. Bölge seviyesinde hata tespiti yapan yöntemler, görüntülerdeki hata konumunu dikdörtgen bir bölge ile tespit etmektedir. Bu yöntemlerde, genellikle R-CNN [13], Faster R-CNN [14], SSD [15] ve YOLO [16] gibi yöntemlerin temelleri kullanılmıştır. Son olarak, piksel seviyesinde hata tespiti yapan yöntemler, görüntüdeki hata konumu piksel seviyesinde (segmentasyon) tespit etmektedir. Bu yöntemler hata konumunu net olarak ortaya çıkardığı için popüler bir hale gelmiştir. [1], [4], [5].

Piksel seviyesinde hata tespiti yapan çalışmalar ikiye ayrılmıştır [5]. Bunlardan biri görüntüyü küçük parçalara ayırarak her bir parçanın hatalı olup olmama durumunu kontrol etmektedir. Fakat görüntünün parçalanması ve her bir görüntü parçasının ESA mimarisinden geçirilmesi, zaman alıcı ve maliyetli işlem olarak görülmüştür [5]. Piksel seviyesinde hata tespiti için geliştirilen diğer yöntemler ise Tam Bağlı Evrişim (TBE) modeli kullanarak görüntüyü bir bütün olarak ele almaktadır [4], [5]. Bu yöntemlerin ağ çıktıları, görüntü ile aynı boyutta olan bir hata tespit tahmin haritasıdır. Bunun yanı sıra, geliştirilen modellerde, LinkNet [17], Öznitelik Piramit Ağı (ÖPA, Feature Pyramid Networks) [18] ve U-net [19] gibi Kodlayıcı-Kod çözücü (Encoder-Decoder) modelleri kullanılmıştır. Özellikle ara bağlantılar ile şekil, kenar, renk ve doku gibi mekânsal bilgileri, son katmanlarda bulunan yüksek seviyeli öznitelikler ile birleştiren

U-net [19] ve ÖPA [18] mimarileri hata tespiti için güçlü modeller olmuştur. He ve ark. [20], hata tespiti için U-net mimarisi kullanmışlardır. Ayrıca önerilen modelde hata tespit başarısını artırmak için giriş görüntüsüne görüntü işleme teknikleri uygulanmıştır. Lu ve ark. [21], ray yüzeyindeki kusurların tespiti için U-net tabanlı SCueU-Net mimarisi önermişlerdir. Önerilen modelde SCue yapısı, giriş görüntüsünün hata konumlarını kabaca belirlemek için kullanılmıştır. Dong ve ark. [22], hatalı görüntüleri sınıflandırmak için DVM (Destek Vektör Makineleri) sınıflandırıcısına dayalı UNet modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelde U-net son katmanlarından alınan özneliklere DVM sınıflandırıcısı uygulanmıştır. Dong ve ark. [4] ÖPA mimarisinden esinlenerek hata tespiti için piramit özellikli füzyon modülü önermişlerdir. Benzer bir çalışmada [5] ise ÖPA mimarisine dikkat kapıları ekleyerek hata tespiti yapılmıştır.

Bu çalışmada, yüzey hata tespiti için Sonuç Ağırlıklandırma tabanlı Resnet Öznelik Piramit Ağ (SA-RÖPA) mimarisi geliştirilmiştir. Önerilen bu mimaride, yetersiz örnek problemi ile başa çıkmak için transfer öğrenme yaklaşımına dayalı önceden eğitilmiş Resnet50 ağ mimarisi kullanılmıştır. Buna ek olarak, ÖPA mimarisinin farklı seviyelerinden alınan öznelikleri doğrudan birleştirmek yerine Sonuç Ağırlıklandırma (SA) olarak adlandırılan yeni bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, temel olarak Resnet50 [23] ağ mimarisinden alınan farklı seviyelerdeki öznelikleri kullanarak eş zamanlı 4 farklı hata tespit sonucu elde edilmiştir. Daha sonra,  $W$  ağırlık matrisi kullanılarak hata tespit sonuçlarının toplamı alınmıştır. Önerilen modelde, eğitim boyunca  $W$  ağırlık matrisindeki değerler, SA-RÖPA mimarisinin parametreleri ile eş zamanlı olarak güncellenmektedir. Bu sayede  $W$  ağırlık matrisi için ayrı bir eğitim şemasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Önerilen SA-RÖPA modelinin performansını ölçmek için hata tespiti ile ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılan MT, MVTec-Doku ve AITEX veri kümeleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, önerilen model, son teknoloji yöntemlere göre daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

Çalışmanın devamı şu şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2’de, önerilen SA-RÖPA ağı mimarisi ve teorik alt yapısı detaylandırılmıştır. Bölüm 3’te, kullanılan veri kümesi ve uygulama sonuçları sunulmuştur. Son olarak Bölüm 4’te sonuçlar verilmiştir.

## 2. ÖNERİLEN YÖNTEM (PROPOSED METHOD)

Önerilen SA-RÖPA mimarisi, Kodlayıcı, Kod çözücü ve Sonuç Ağırlıklandırma (SA) olmak üzere 3 modülden oluşmaktadır (Şekil 2). İlk olarak, kodlayıcı biriminde, ResNet50 omurga ağı kullanılarak giriş görüntüsünden düşük ve yüksek seviyeli öznelik haritaları çıkartılmıştır. Düşük seviyeli öznelik haritaları renk, kenar, şekil ve doku gibi mekânsal (spatial) bilgilerini taşıyan öznelikleri barındırırken, yüksek seviyeli öznelik haritaları ise anlamsal (semantic) bilgileri içermektedir [4]. Daha sonra, kod çözücü bölümünde, Öznelik Piramit Ağ (ÖPA) [18] modeli kullanılarak farklı seviyelerden alınan öznelik haritaları arasında bilgi aktarımı yapılmıştır. Önerilen SA-RÖPA ağının son birimi olan SA modülünde, kod çözücü bölümünden elde edilen 4 farklı hata tespit sonucu,  $W$  ağırlık matrisi ile çarpılarak ağırlıklandırılmıştır. Son olarak ağırlıklandırılan sonuçlar toplanarak nihai hata tespit sonucu elde edilmiştir.

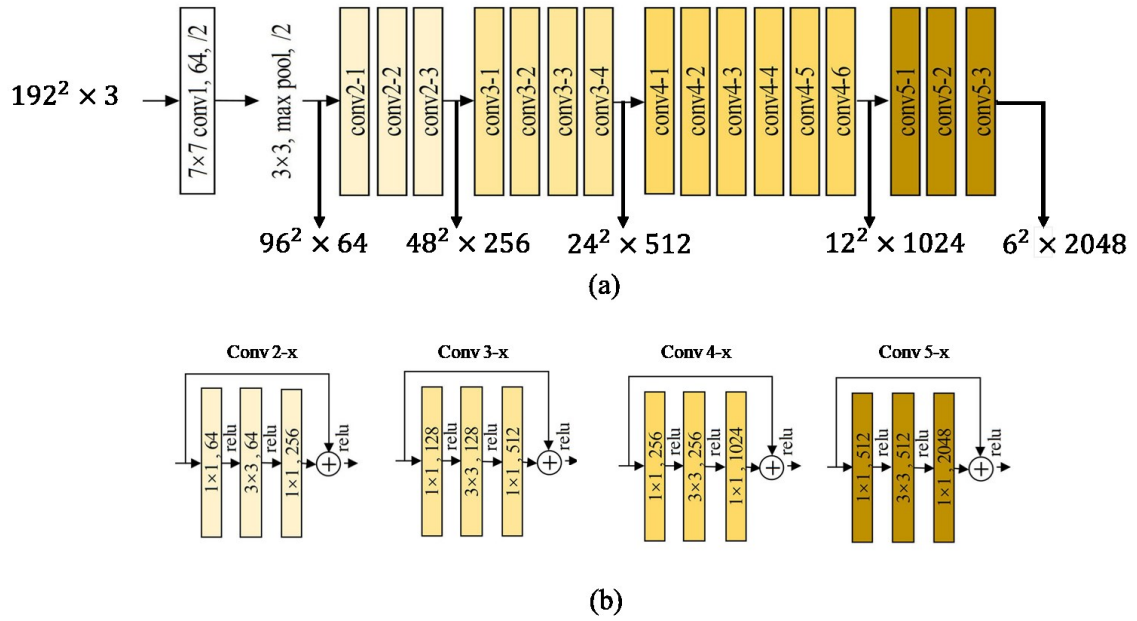


Şekil 2. Önerilen SA-RÖPA mimarisi

## 2.1. Kodlayıcı (Encoder)

Önerilen SA-RÖPA ağ mimarisinin kodlayıcı bölümünde, omurga ağı olarak önceden eğitilmiş ResNet50 (Şekil 3.a) ağ mimarisi kullanılmıştır. ResNet50 ağ mimarisi artık (residual) bağlantılar (Şekil 3.b) kullanılarak geliştirilmiş bir modeldir [24]. Bu yapı sayesinde, AlexNet, VGGNet gibi ağ mimarilerinden farklı olarak Resnet50 ağ mimarisi, kaybolan gradyan problemine (vanishing gradient problem) takılmadan 50 katmanlı bir yapı olarak geliştirilmiştir [23].

ESA mimarilerinde derin katmanlarına inilmesi ve bu katmanlar arasında bulunan havuzlama katmanlarından dolayı kenar, renk ve doku gibi mekânsal bilgilerinin kaybolmasına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, doku bilgilerini taşıyan öznetelikler piksel seviyesinde hata tespiti için oldukça önemlidir. Bundan dolayı önerilen SA-RÖPA ağının kodlayıcı bölümünde düşük ve yüksek seviyeli olarak 5 farklı öznetelik haritası ( $F_{1-5}$ ) çıkartılmıştır. Daha sonra, hata tespiti için elde edilen bu öznetelik haritaları kod çözücü bölümüne aktarılmıştır. Bu çıkartılan öznetelikler Şekil 3.a gösterilmiştir.



Şekil 3. Resnet50 ağ mimarisi (a) ve artık bağlantı modeli (b)

## 2.2. Kod çözücü (Decoder)

Önerilen SA-RÖPA mimarisinin kodlayıcı bölümünde elde edilen 5 farklı öznetelik haritasının ( $F_{1-5}$ ) her biri hata tespiti için önemli bilgiler içermektedir. Bu öznetelik haritalarının ilk seviyeleri kenar, renk ve doku bilgileri içerirken, son seviyelerdeki öznetelik haritaları ise anlamsal bilgileri taşıyan zengin özneteliklerden oluşur. Fakat son seviyelerde alınan öznetelik haritalarında ağ mimarisi boyunca uygulanan havuzlama (Max-pooling) ve evrişim katmanları nedeniyle doku bilgileri kaybolmaktadır. SA-RÖPA mimarisinin kod çözücü biriminde bu öznetelikler arasında bilgi aktarımı yapılması için Öznetelik Piramit Ağ (ÖPA) [18] modeli kullanılmıştır. Öznetelik piramit modülünde, hiyerarşik olarak kendinden önceki öznetelik haritasını yeniden boyutlandırılarak eleman bazlı toplama işlemi uygulanır. Bu işlem Denklem 1'de verilmiştir.

$$G_l = \sum_{l=4}^{l=1} E_{cb=1 \times 1}^{fs=256}(F_l) + YÖ(E_{cb=3 \times 3}^{fs=256}(F_{l+1})) \quad (1)$$

Burada  $G_l$ ,  $l$ 'ninci seviyesindeki öznetelik haritalarını ve E evrişim katmanını gösterir. YÖ ise boyut yükseltme (Upsampling) işlemi ifade etmektedir.

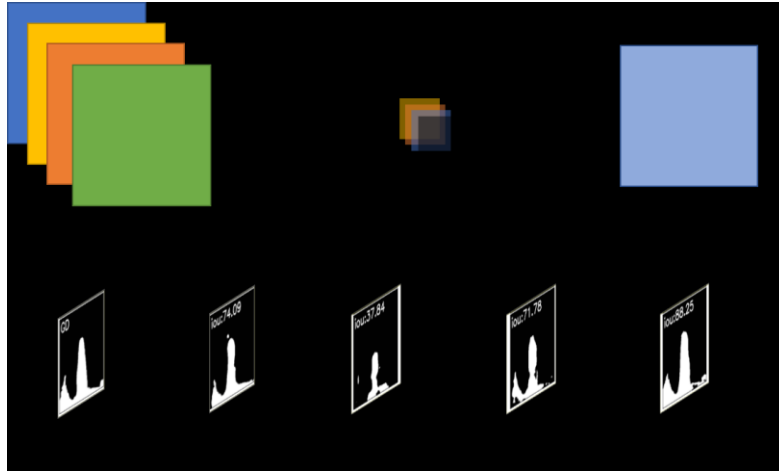
Denklem 1'den anlaşılacağı üzere, farklı seviyelerdeki öznitelik haritalarına bir evrişim işlemi ( $E_{cb=3 \times 3}^{fs=256}$ , filtre sayısı 256 ve çekirdek boyutu  $3 \times 3$ ) uygulanmıştır. Daha sonra öznitelik haritaları boyut yükseltme katmanı ile yeniden boyutlandırılarak eleman bazlı toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda elde edilen 4 farklı öznitelik haritası ( $G_{1-4}$ ) SA modeline aktarılmıştır.

### 2.3. Sonuç Ağırlıklandırma Modülü (Result Weighting Module)

Kod çözücü bölümünden elde edilen 4 farklı öznitelik haritalarının her biri, farklı doku ve anlamsal derin özniteliklere sahiptir. Bu öznitelik haritalarını doğrudan birleştirmek bazı önemli verilerin kaybolmasına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada bu problemi ele alarak  $G_{1-4}$  öznitelik haritasının her biri için ayrı ayrı sonuç üretilmiştir. Daha sonra, bu sonuçlar önerilen Sonuç Ağırlıklandırma (SA) modülü ile birleştirilmiştir. SA modelinin ilk aşamasında,  $G_{1-4}$  öznitelik haritaları kullanılarak her bir öznitelik haritası için hata tespit sonucu ( $p_k$ ) hesaplanmıştır (Denklem 2).

$$p_k = \sigma(E_{3 \times 3}^1(G_k)) \quad (2)$$

Burada  $p_k$ ,  $G_k$  öznitelik haritası kullanılarak elde edilen hata tespit tahmin haritasıdır.  $E_{3 \times 3}^1(\cdot)$ , 1 filtre ve  $3 \times 3$  çekirdek boyutuna sahip evrişim katmanıdır.  $\sigma(\cdot)$  ise sigmoid aktivasyon fonksiyonunu temsil etmektedir.



Şekil 4. SA modelinde uygulanan noktasal evrişim (a) ve detaylı gösterimi (b)

SA modülünün ikinci aşamasında, sonuçlar birleştirilerek noktasal evrişim (point-wise convolution, şekil 4.a) işlemi uygulanır. Bu işlem, temel olarak şekil 4.b'de gösterildiği gibi farklı tahmin sonuçlarını  $W = [w_1, w_2, w_3, w_4]$  ağırlık matrisleri ile ağırlıklandırılır. Daha sonra, elde edilen sonuçlar eleman bazlı toplama işlemi yapılır (Denklem 3).

$$P = \sum_{k=0}^4 w_k \cdot p_k \quad (3)$$

Burada  $\cdot$  işareti,  $w_k$  ile  $p_k$  değerlerinin noktasal çarpımını temsil etmektedir. P ise nihai sonuç haritasını gösterir. Yukarıdaki bahsedilen işlemlere dayalı SA modelinin yapısı Şekil 4'te verilmiştir.

SA-RÖPA mimarisinin eğitiminde The Binary Cross-Entropy loss function kullanılmıştır (Denklem 4).

$$L = - \sum_{i,j} y_{i \times j} \log(P_{i \times j}) + (1 - y_{i \times j}) \log(1 - P_{i \times j}) \quad (4)$$

Burada  $L$ , ortalama hata değerini;  $y_{i \times j}$  ve  $P_{i \times j}$ , sırasıyla sonuç haritasındaki  $i \times j$  konumundaki pikselin gerçek ile tahmin değerlerini temsil etmektedir.

### 3. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Önerilen SA-RÖPA modelinin performansını test etmek için hata tespit görüntülerini içeren MT [20], MVTEC-Doku [25] ve AITEX [26] veri kümeleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, önerilen model, literatürde var olan çalışmaların performansları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, nesne tespiti ve segmentasyon için geliştirilmiş ve yüksek başarımlara sahip olan ÖPA [18], LinkNet [17], PSPNet [27] ve Unet [19] mimarileri, hata tespit görüntülerini için uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda tüm ağ modelleri aynı parametreler ile eğitilmiş ve test edilmiştir.

#### 3.1. Veri Setleri (Datasets)

Bu çalışmada, yüzey hata tespiti için MT (Magnetic Tile, Manyetik Karo), MVTEC-Doku ve AITEX veri kümeleri kullanılmıştır. MT veri kümesi, motor içinde bulunun mıknatıs yüzeyindeki çatlak, kırılma ve sıyırma gibi yüzey hata görüntülerini içermektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan AITEX, kumaş yüzeyinde oluşan farklı doku hatalarını içeren bir veri kümesidir. MVTEC-Doku veri kümesi halı, tel levha, deri, fayans ve odun gibi 5 farklı yüzeyden alınmış görüntülerden oluşur. Bu görüntülerde farklı boyutta ve biçimde oluşan yüzey hataları vardır.

Deneysel çalışmalarda, MT, MVTEC-Doku ve AITEX veri setleri için %50'si eğitim seti ve geri kalan ise test seti olarak kullanılmıştır. Eğitim ve test veri kümelerindeki kullanılan hatalı ve hatasız görüntü sayıları Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir. Deneysel çalışmalarda eğitim için yansıma, döndürme ve kırpma gibi veri çoğaltma yöntemleri kullanılarak örnek sayısı 8 katına çıkartılmıştır.

**Tablo 1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan veri kümeleri ve örnek sayıları

Veri Kümesi	Eğitim Örnek Sayısı			Test Örnek Sayısı		
	Hatalı	Hatasız	Toplam	Hatalı	Hatasız	Toplam
MT	193	479	672	193	479	672
MVTEC-Doku	190	700	890	190	700	890
AITEX	81	163	244	81	163	244

#### 3.2. Uygulama Detayları (Implementation Details)

Önerilen ESA tabanlı mimarinin eğitimi için adım (epoch) sayısı 100, öğrenme oranı 0.0001, yığın boyutu (batch size) 16 ve Adam optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Tüm deneysel çalışmalar, i9-9900KF işlemci, 32 GB Ram ve 11 GB RTX 2080 Ti GPU donanımına sahip Ubuntu 20.04 işletim sistemi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, performans metrikleri için F1-Skor ve mIoU (kesişimlerinin tüm alana oranının ortalaması, Mean intersection over union) metrikleri kullanılmıştır. F1-Skor ve mIoU metrikleri Denklem 5'e göre hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 \text{Precision} &= \frac{TP}{TP + FP} \\
 \text{Recall} &= \frac{TP}{TP + FN} \\
 \text{F1 - score} &= \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{\text{precision} + \text{recall}} \\
 \text{mIoU} &= \frac{pr \cap GT}{pr \cup GT}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Burada  $TP$ ,  $TN$ ,  $FP$  ve  $FN$  sırasıyla doğru tespit edilen kusurlu piksel, doğru tespit edilen hatasız piksel, yanlış tespit edilen kusurlu piksel, yanlış tespit edilen hatasız piksel sayısını gösterir.  $GT$  Temel doğruluk;  $pr$  ise yüzey hata tespit tahmin haritasıdır.

### 3.3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Önerilen SA-RÖPA modeli ile önceden geliştirilmiş derin mimarilerinin sayısal sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. MT veri kümesi, aşırı uyum, küçük boyut ve değişen ortam şartları gibi problemleri içeren zor bir veri kümesidir. Önerilen SA-RÖPA modeli, bu problem karşısında üstün performans sağlamış ve bu veri seti için %79,92 mIoU ve %88,84 F1-skor olarak en yüksek skor elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, ÖPA ağ mimarisi %75,52 mIoU başarımları sağlamıştır. Ayrıca, PSPNet ve Unet ağları ise yaklaşık olarak %71 mIoU skoru üretmişlerdir. MT veri kümesinde en düşük sonucu LinkNet ağ mimarisi vermiştir.

AITEX, kumaş yüzeyinde oluşan doku hatalarını içeren bir veri kümesidir. Bu veri kümesinde, arka plan ile aşırı uyum gösteren yüzey hatalarının tespit edilmesi oldukça zor olan görüntüler bulunmaktadır. Tablo 2’de verilen sonuçlara göre, bu veri kümesi için en yüksek performans önerilen SA-RÖPA modeli ile %79,92 mIoU olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan diğer ÖPA, UNet, LinkNet ve PSPNet ağları ise %80,11-80,78 mIoU arasında yakın sonuçlar vermiştir. En düşük sonuç, PSPNet ağ modeli ile %80,11 olarak hesaplanmıştır.

MVTec-Doku veri kümesi aşırı uyum, küçük boyut ve değişen ortam şartları gibi yüzey hata tespit problemleri içermektedir. Bu veri kümesinin sonuçlarında, MT ve AITEX veri kümesinde olduğu gibi SA-RÖPA modeli %76,37 mIoU ile en yüksek performansı sağlamıştır. ÖPA modeli %75,36 mIoU ile ikinci yüksek performansı elde etmiştir. LinkNet ve PSPNet ağları sırası ile %62,61 ve 66.18 skorları sağlarken Unet ağı ise %73,26 performans sağlamıştır.

**Tablo 2.** Performans sonuçları (%)

Method	MT		AITEX		MVTec-Doku	
	MIoU	F1-skor	MIoU	F1-skor	MIoU	F1-skor
LinkNet	59,49	74,6	80,31	89,08	62,61	77,00
PSPNet	71,41	83,32	80,11	88,96	66,18	79,65
Unet	71,85	83,62	80,78	89,36	73,26	84,57
ÖPA	75,52	86,05	80,38	89,12	75,36	85,95
<b>Önerilen SA-RÖPA</b>	<b>79,92</b>	<b>88,84</b>	<b>82,72</b>	<b>90,54</b>	<b>76,37</b>	<b>86,60</b>

MT veri kümesine ait örnek görüntüler için elde edilen görsel sonuçlar Şekil 5’te verilmiştir. Şekil 5’te yer alan Ör: 3 ve 5’te verilen yüzey hataları diğer örneklere göre daha belirgindir. Bundan dolayı, bu örnek görüntüler için tüm yöntemler başarılı olmuşlardır. Fakat Ör: 1, 2 ve 4’te küçük boyuta sahip yüzey hatalarını içeren ve farklı ışık ortamında alınmış görüntüler bulunmaktadır. Bu tür problemler karşısında, LinkNet, PSPNet, ÖPA ve Unet yöntemleri düşük sonuçlar vermiştir. Diğer yandan, SA-RÖPA modelinin güçlü ve etkili yapısı sayesinde en yüksek başarı elde edilmiştir. Ör: 6’da verilen görüntüde, arka plan ile aşırı uyum gösteren bir yüzey hatası bulunmaktadır. Bu tip yüzey hatalarında, yüzey hatasını ve arka planı ayıracak önemli özelliklerin çıkartılması gerekmektedir. Önerilen SA-RÖPA modelinin içerdiği önceden eğitilmiş Resnet50 mimarisi ve SA modeli sayesinde bu görüntülerde en yüksek başarıyı sağlamıştır.

	Görüntü	Gerçek Değer (GD)	LinkNet	PSPNet	Unet	ÖPA	SA-RÖPA
Ör: 1		GD	iou:70.96	iou:0.0	iou:70.0	iou:37.77	iou:77.77
Ör: 2		GD	iou:52.0	iou:0.0	iou:9.61	iou:2.55	iou:64.19
Ör: 3		GD	iou:57.59	iou:49.4	iou:55.61	iou:57.63	iou:69.56
Ör: 4		GD	iou:82.64	iou:57.06	iou:18.5	iou:36.56	iou:88.09
Ör: 5		GD	iou:84.07	iou:59.31	iou:89.81	iou:89.01	iou:92.91
Ör: 6		GD	iou:3.78	iou:0.0	iou:6.94	iou:84.94	iou:87.47

Şekil 5. MT veri kümesi için elde edilen görsel sonuçlar

AITEX veri kümesine ait örnek görüntüler için elde edilen görsel sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. MT veri kümesinden olduğu gibi AITEX veri kümesine ait tüm örnek görüntüler için en iyi sonuç, önerilen SA-RÖPA modeli ile elde edilmiştir. Verilen örneklerde Unet ve ÖPA mimarileri, LinkNet ve PSPNet ağlarına göre daha yüksek performans sağlamıştır. Ayrıca, Ör: 2'de PSPnet ve LinkNet ağları hatayı tam olarak tespit edemezken Unet ve ÖPA mimarileri PSPnet ve LinkNet ağlarına göre daha başarılı olarak tespit etmiştir. Ör: 2'deki hatayı en iyi tespit eden SA-RÖPA ağı olmuştur.

	Görüntü	Gerçek Değer (GD)	LinkNet	PSPNet	Unet	ÖPA	SA-RÖPA
Ör: 1		GD	iou:55.46	iou:52.5	iou:56.84	iou:58.34	iou:63.31
Ör: 2		GD	iou:9.05	iou:12.27	iou:43.36	iou:57.47	iou:68.02
Ör: 3		GD	iou:52.52	iou:26.54	iou:61.71	iou:71.7	iou:77.32
Ör: 4		GD	iou:97.85	iou:98.64	iou:96.52	iou:97.26	iou:99.77
Ör: 5		GD	iou:40.58	iou:44.71	iou:62.44	iou:47.77	iou:69.99

Şekil 6. AITEX veri kümesi için elde edilen görsel sonuçlar

MVTec-Doku veri kümesinden alınan örnek görüntüler ve yöntemlerin tahmin sonuçları Şekil 7'de sunulmuştur. Burada görüleceği üzere yüzey hatalarını en iyi şekilde SA-RÖPA modeli tespit etmiştir. Özellikle örnek 3'te bulunan yüzey hatasını LinkNet, PSPNet, Unet ve ÖPA modelleri tespit edememişken

SA-RÖPA modeli yüksek doğrula yüzey hatasını tespit etmiştir. Benzer şekilde diğer örneklerde SA-RÖPA modeli diğer yöntemlere göre %10-66 mIoU arasında daha yüksek başarıyla yüzey hatasını tespit etmiştir.

	Görüntü	Gerçek Değer (GD)	LinkNet	PSPNet	Unet	ÖPA	SA-RÖPA
Örnek 1			iou:69.25	iou:58.56	iou:69.7	iou:44.74	iou:83.39
Örnek 2			iou:0.0	iou:77.52	iou:77.88	iou:22.37	iou:86.1
Örnek 3			iou:0.0	iou:0.0	iou:0.0	iou:0.0	iou:74.55
Örnek 4			iou:63.63	iou:46.87	iou:68.18	iou:63.82	iou:74.35
Örnek 5			iou:0.0	iou:0.0	iou:27.52	iou:13.2	iou:50.85

Şekil 7. MVTEc-Doku veri kümesi için elde edilen görsel sonuçlar

## TARTIŞMA (DISCUSSION)

Önerilen SA-RÖPA mimarisinin performansı, mevcut çalışmada kullanılan veri kümelerine dayalı yapılmış çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Bu karşılaştırmalı performans sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Önerilen model ile var olan çalışmaların karşılaştırılması

Veri Kümesi	Model	Metot	mIoU	F1-Score
MT	PGA-Net [4]	VGG16, Feature Fusion and Attention	71,31	-
	DFF [5]	ResNet50, Feature Fusion and Attention	73,70	82,20
	DPAE [28]	Semi-supervised Auto-Encoder	-	78,80
	<b>SA-RÖPA</b>	<b>Resnet50, ÖPA ve Sonuç Ağırlıklandırma Modülü</b>	<b>79,92</b>	<b>88,84</b>
AITEK	VGS [29]	Variational auto-encoder and gaussian mixture	-	81,00
	DCSNet [30]	GAN and Unet	34,20	-
	<b>SA-RÖPA</b>	<b>Resnet50, ÖPA ve Sonuç Ağırlıklandırma Modülü</b>	<b>82,72</b>	<b>90,54</b>

Tablo 3'te görüleceği üzere, MT ve AITEK veri kümeleri için önerilen model kullanılarak diğer çalışmalara kıyasla yaklaşık %7-9 başarımlı (F1-Skor) artışı sağlamıştır. Ayrıca, MT veri kümesi için en iyi ikinci F1-Skor değeri, DFF [24] çalışması ile elde edilirken, AITEK veri kümesi için ise VGS [25] çalışması ile %81,00 F1-Skor değeri elde edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen SA-RÖPA model kullanılarak yüzey hata tespitine yönelik yapılan çalışmalara göre üstün performans elde ettiği açıkça gözlenmiştir.



## SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yüzey hata tespiti için Sonuç Ağırlıklandırma tabanlı Resnet Öznitelik Piramit Ağ (SA-RÖPA) mimarisi geliştirilmiştir. Önerilen ağ mimarisinin kodlayıcı bölümünde, Resnet50 omurga ağından farklı seviyelerde öznitelikler çıkartılmıştır. ResNet50 ağ mimarisinin ilk katmanlarından alınan düşük seviyeli öznitelik haritaları renk, kenar ve şekil gibi doku bilgileri içerirken, son katmanlardan alınan yüksek seviyeli öznitelik haritaları ise anlamsal bilgilerden oluşmaktadır. Önerilen SA modeli ile bu öznitelik haritalarından ayrı ayrı sonuçlar almış ve bu sonuçları ağırlıklandırarak birleştirmiştir. Bu sayede, farklı seviyelerdeki öznitelik haritalarındaki önemli detaylar etkili bir şekilde kullanmıştır. Önerilen SA-RÖPA mimarisini test etmek için yüzey hata görüntülerini kapsayan MT, MVTec-Doku ve AITEX veri kümeleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, MT, MVTec-Doku ve AITEX veri kümeleri için önerilen mimari kullanılarak sırasıyla %88,84, %86,60 ve %90,54 F1-Skor değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, önerilen SA-RÖPA mimarisi, son teknoloji yöntemler ve önceki çalışmalara göre daha başarılı olduğu gözlenmiştir. Gelecek çalışmalarda SA-RÖPA mimarisinin SA modelinde, dikkat kapıları (Attention Gate) kullanarak hata tespiti için daha etkili bir yapı oluşturulması hedeflenmiştir.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] D. Zhang, K. Song, J. Xu, Y. He, M. Niu, and Y. Yan, "MCnet: Multiple Context Information Segmentation Network of No-Service Rail Surface Defects," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3040890.
- [2] H. Uzen, M. Turkoglu, and D. Hanbay, "Texture defect classification with multiple pooling and filter ensemble based on deep neural network," *Expert Systems with Applications*, vol. 175, p. 114838, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.114838.
- [3] K. Hanbay, M. F. Talu, and Ö. F. Özgüven, "Fabric defect detection systems and methods—A systematic literature review," *Optik*, vol. 127, no. 24, pp. 11960–11973, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijleo.2016.09.110.
- [4] H. Dong, K. Song, Y. He, J. Xu, Y. Yan, and Q. Meng, "PGA-Net: Pyramid Feature Fusion and Global Context Attention Network for Automated Surface Defect Detection," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 12, pp. 7448–7458, Dec. 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2958826.
- [5] J. Cao, G. Yang, and X. Yang, "A Pixel-Level Segmentation Convolutional Neural Network Based on Deep Feature Fusion for Surface Defect Detection," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3033726.
- [6] H. Y. T. Ngan, G. K. H. Pang, and N. H. C. Yung, "Automated fabric defect detection-A review," *Image and Vision Computing*, vol. 29, no. 7. Elsevier Ltd, pp. 442–458, Jun. 01, 2011. doi: 10.1016/j.imavis.2011.02.002.
- [7] X. Xie, A Review of Recent Advances in Surface Defect Detection using Texture analysis Techniques Figure 1: Example defects on different types of surfaces-from left: Steel, vol. 7, no. 3. 2008, pp. 1–22. Accessed: Jan. 08, 2021. [Online]. Available: <https://www.raco.cat/index.php/ELCVIA/article/view/150223>
- [8] G. Song, K. Song, and Y. Yan, "EDRNet: Encoder-Decoder Residual Network for Salient Object Detection of Strip Steel Surface Defects," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 12, pp. 9709–9719, Dec. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.3002277.
- [9] P. M. Bhatt et al., "Image-Based Surface Defect Detection Using Deep Learning: A Review," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 21, no. 4. American Society of Mechanical Engineers (ASME), Aug. 01, 2021. doi: 10.1115/1.4049535.

- [10] H. Firat, "3B ESA Tabanlı ResNet50 Kullanılarak Hiperspektral Görüntülerin Sınıflandırılması Classification of Hyperspectral Images Using 3D CNN Based ResNet50," 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 6–9, 2021, doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477899.
- [11] H. Firat and D. Hanbay, "Classification of Hyperspectral Images Using 3D CNN Based ResNet50," 2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), pp. 1–4, Jun. 2021, doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477899.
- [12] H. Uzen, H. Firat, A. Karci, and D. Hanbay, "Automatic Thresholding Method Developed with Entropy for Fabric Defect Detection," Sep. 2019. doi: 10.1109/IDAP.2019.8875890.
- [13] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell, "Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 4, pp. 640–651, Nov. 2014.
- [14] S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, Jun. 2017, doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [15] W. Liu et al., "SSD: Single Shot MultiBox Detector," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9905 LNCS, pp. 21–37, Dec. 2015, doi: 10.1007/978-3-319-46448-0\_2.
- [16] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 2016-December, pp. 779–788, Jun. 2015.
- [17] A. Chaurasia and E. Culurciello, "LinkNet: Exploiting encoder representations for efficient semantic segmentation," 2017 IEEE Visual Communications and Image Processing, VCIP 2017, vol. 2018-January, pp. 1–4, Feb. 2018, doi: 10.1109/VCIP.2017.8305148.
- [18] T.-Y. Lin, P. Dollár, R. Girshick, K. He, B. Hariharan, and S. Belongie, "Feature Pyramid Networks for Object Detection," Dec. 2016, Accessed: May 05, 2021. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1612.03144>
- [19] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 9351, Springer Verlag, 2015, pp. 234–241. doi: 10.1007/978-3-319-24574-4\_28.
- [20] Y. Huang, C. Qiu, and K. Yuan, "Surface defect saliency of magnetic tile," *The Visual Computer*, vol. 36, no. 1, pp. 85–96, Jan. 2020, doi: 10.1007/s00371-018-1588-5.
- [21] J. Lu et al., "SCueU-Net: Efficient Damage Detection Method for Railway Rail," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125109–125120, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007603.
- [22] X. Dong, C. J. Taylor, and T. F. Cootes, "Defect Detection and Classification by Training a Generic Convolutional Neural Network Encoder," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 6055–6069, 2020, doi: 10.1109/TSP.2020.3031188.
- [23] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition," in 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Jun. 2016, vol. 2016-Decem, pp. 770–778. doi: 10.1109/CVPR.2016.90.

- [24] W. Fang et al., “Recognizing Global Reservoirs From Landsat 8 Images: A Deep Learning Approach,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 12, no. 9, pp. 3168–3177, Aug. 2019, doi: 10.1109/JSTARS.2019.2929601.
- [25] P. Bergmann, M. Fauser, D. Sattlegger, and C. Steger, “MVTEC ad-A comprehensive real-world dataset for unsupervised anomaly detection,” in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Jun. 2019, vol. 2019-June, pp. 9584–9592. doi: 10.1109/CVPR.2019.00982.
- [26] J. Silvestre-Blanes, T. Albero-Albero, I. Miralles, R. Pérez-Llorens, and J. Moreno, “A Public Fabric Database for Defect Detection Methods and Results,” *Autex Research Journal*, vol. Vol. 19, no. 4, 2019, doi: 10.2478/aut-2019-0035.
- [27] H. Zhao, J. Shi, X. Qi, X. Wang, and J. Jia, “Pyramid scene parsing network,” *Proceedings - 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-January, pp. 6230–6239, Nov. 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.660.
- [28] J. Liu, K. Song, M. Feng, Y. Yan, Z. Tu, and L. Zhu, “Semi-supervised anomaly detection with dual prototypes autoencoder for industrial surface inspection,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 136, p. 106324, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106324.
- [29] Q. Zhou, J. Mei, Q. Zhang, S. Wang, and G. Chen, “Semi-supervised fabric defect detection based on image reconstruction and density estimation,” *Textile Research Journal*, vol. 91, no. 9–10, pp. 962–972, May 2021, doi: 10.1177/0040517520966733.
- [30] W. Yuxiang, M. Shiyi, X. Xiang, and H. Shanshan, “DCSNet: A Surface Defect Classification and Segmentation Model by One-Class Learning,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1914, no. 1, p. 012037, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1914/1/012037.



## s-to-z Transformation Tool for Discretization

Fahri VATANSEVER<sup>1\*</sup>  Metin HATUN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Bursa Uludağ University, Faculty of Engineering, Electrical-Electronics Eng. Dept. 16059 Bursa/Turkey

### Article Info

Research article

Received: 01.10.2021

Revision: 05.12.2021

Accepted: 05.12.2021

### Keywords

s-to-z transform  
s-to-z transformation  
s-to-z mapping  
s-z transform  
discretization

### Abstract

The signals/systems in nature are analog in terms of their sources. These continuous-time signals/systems need to be discretized in order to be used in digital systems (processing, storage etc.). For this purpose, different methods have been developed and continue to be developed. In the work carried out; a software tool with a user-friendly interface has been designed that performs discretization of continuous-time systems with different methods in a fast, accurate and effective manner, presents single or comparative results (parameters, responses, etc.) both numerically and graphically.

## 1. INTRODUCTION

Because of the physical systems are naturally analog, the signals related to these systems are represented in continuous-time. By developments of digital systems in parallel with progress of technology, various discrete-time techniques have been developed for analysis and design of continuous-time systems. In order to integrate classical analog systems into digital systems, discrete models or discrete equivalents must be obtained by discretization. Transformation of continuous-time to discrete-time is the fundamental operation in discrete signal processing and discrete circuit design. This process, which is expressed with concepts such as "s – to – z transform", "s – to – z transformation", "s – z transform", "s – to – z mapping" provides a transition from s-domain to z-domain.

There are many methods in the literature for s – to – z transformation: backward or forward difference, bilinear (Tustin) transform, impulse/step/ramp invariance/invariant methods, magnitude/phase invariance methods, matched z transform etc. [1-10]. The main purpose of all these methods developed using different approaches is to obtain the discrete-time equivalent that best describes the transfer function of the continuous-time system. However, as the order of the systems increases, it becomes more difficult to perform the relevant transformations manually or to use higher order s – z transformations.

As a result of the development in the computers, computer-aided technologies (CAx) concepts (such as computer-aided analysis (CAA), computer-aided design (CAD), computer-aided engineering (CAE), computer-aided instruction (CAI), computer-aided learning (CAL), computer-aided manufacturing (CAM), computer-aided software, computer-aided software engineering (CASE), etc.) have currently gained a significant place. Simulators, applications, web pages, etc. are developed in many areas using computer software. There are many studies in the field of system analysis with software in the literature [11-21]. However, there are not many software with a user-friendly interface that is specially designed for discretization and can perform these operations quickly, accurately and effectively with many different methods. For example, the "c2d" discretization command in MATLAB does this in just six different methods and provides numerical results [22].

In this study, a software tool has been developed that discretizes the continuous-time transfer functions with different methods. With this developed software, very high order transfer functions in the s-domain are transferred to the z-domain easily, effectively and quickly with the selected method or methods (comparative analysis). In addition, the software provides detailed numerical and graphical results of continuous and discrete time transfer functions.

This paper is organized as follows: In Section 2, s – to – z mapping functions are summarized. In Section 3, designed software tool is explained and sample applications are given. Finally, Section 4 contains conclusions.

**2. s-to-z MAPPING FUNCTIONS**

Different s – to – z mapping functions are available for obtaining discrete equivalents/models of continuous time functions. From the similarities in discrete expressions of the unilateral Laplace transform and z-transform of a continuous-time function  $f(t)$  (Table 1),

$$F(s) = F(z)|_{z=e^{sT}} \Rightarrow \begin{cases} z = e^{sT} \\ s = \frac{1}{T} \text{Ln}(z) \end{cases} \tag{1}$$

is obtained, where  $T$  is the sampling period. Some fundamental mapping functions can be obtained from the Taylor series of  $s$  ve  $z$  [23] using first terms are given in Table 2.

$$\begin{cases} z = e^{sT} = 1 + \frac{sT}{1!} + \frac{(sT)^2}{2!} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(sT)^k}{k!} \\ s = \frac{1}{T} \text{Ln}(z) = \frac{2}{T} \left\{ \frac{z-1}{z+1} + \frac{1}{3} \left( \frac{z-1}{z+1} \right)^3 + \dots \right\} = \frac{2}{T} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \left( \frac{z-1}{z+1} \right)^{2k-1} \end{cases} \tag{2}$$

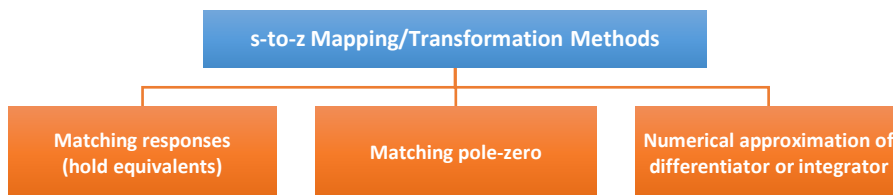
**Table 1.** Unilateral Laplace and z-transforms

Transform	Discrete-time expression
Unilateral Laplace transform	$F(s) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n]e^{-snT}$
Unilateral z-transform	$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n]z^{-n}$

**Table 2.** Popular s – to – z mapping methods

Method/Rule	s	z
Forward difference / Forward rectangular	$s = \frac{z-1}{T}$	$z = 1 + sT$
Backward difference / Backward rectangular	$s = \frac{z-1}{Tz}$	$z = \frac{1}{1-sT}$
Bilinear / Trapezoidal / Tustin	$s = \frac{2z-1}{Tz+1}$	$z = \frac{1+sT/2}{1-sT/2}$

The general classification of s – to – z mapping methods is given in Figure 1 [2]. Matching responses methods are based on matching system responses (impulse, step etc.) (Table 3).



**Figure 1.** The general classification of s-to-z mapping methods

For example, the impulse-invariant discrete-time system equivalent of the continuous-time system with the transfer function  $H(s)$  is obtained as follows:

- Obtain the impulse response of continuous-time system:  $h(t) = \mathcal{L}^{-1}\{H(s)\}$
- Derive samples  $h(k)$  from  $h(t)$  with suitable sampling interval:  $h(k) = h(t)|_{t=kT}$

- Obtain z-transform of  $h(k)$ :  $H(z) = \mathcal{Z}\{h(k)\}$

This process can be represented by

$$H(z) = \mathcal{Z} \left\{ \mathcal{L}^{-1} \{H(s)\} \Big|_{t=kT} \right\} \tag{3}$$

and this operation commonly indicated as

$$H(z) = \mathcal{Z}\{H(s)\} \tag{4}$$

**Table 3.** The some methods based on matching step and other responses

Method	Definition $[H(z)]$
Impulse invariance	$\mathcal{Z}\{H(s)\}$
Step invariance (ZOH)	$\mathcal{Z} \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} H(s) \right\} = \left( \frac{z - 1}{z} \right) \mathcal{Z} \left\{ \frac{H(s)}{s} \right\}$
Ramp invariance (FOH)	$\mathcal{Z} \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s^2} H(s) \right\} = \frac{(z - 1)^2}{Tz} \mathcal{Z} \left\{ \frac{H(s)}{s^2} \right\}$

**Table 4.** Some matched pole-zero models

	Integrator: $\frac{1}{s}$	Real poles/zeros: $s + a$	Complex poles/zeros: $(s + a)^2 + b^2$
Matched pole-zero model: impulse hold	$\frac{z - 1}{Tz}$	$\frac{z - e^{-aT}}{Tz}$	$\frac{z^2 - 2ze^{-aT} \cos(bT) - e^{-2aT}}{(Tz)^2}$
Matched pole-zero model: zero-order hold	$\frac{z - 1}{T}$	$\frac{z - e^{-aT}}{T}$	$\frac{z^2 - 2ze^{-aT} \cos(bT) - e^{-2aT}}{T^2}$
Matched pole-zero model: triangular hold	$\frac{2z - 1}{Tz + 1}$	$\frac{a^2}{a - \frac{1 - e^{-aT}}{T}} \frac{z - e^{-aT}}{z - \frac{(ae^{-aT} - 1 - e^{-aT})}{(a - \frac{1 - e^{-aT}}{T})}}$	$\frac{(a^2 + b^2)Tz^2 - 2ze^{-aT} \cos(bT) - e^{-2aT}}{\alpha \left( z^2 - \frac{\gamma}{\alpha}z + \frac{\beta}{\alpha} \right)}$ $\alpha = e^{-2aT} + (a^2 + b^2)T - 2aT - 2e^{-2aT} \cos(bT) + 2e^{-aT} \{ a \cos(bT) - b \sin(bT) \}$ $\beta = e^{-2aT} + 2aTe^{-2aT} + (a^2 + b^2)T^2 e^{-2aT} - 2e^{-aT} \cos(bT) - 2Te^{-aT} \{ a \cos(bT) + b \sin(bT) \}$ $\gamma = 2 \left\{ \begin{aligned} &e^{-2aT} + aTe^{-2aT} + 1 + (a^2 + b^2)T^2 e^{-aT} \cos(bT) \\ &- a - 2e^{-aT} \cos(bT) - 2bTe^{-aT} \sin(bT) \end{aligned} \right\}$

Matching pole-zero (pole-zero matching, pole-zero mapping, matched z-transform method) is a method based on mapping all poles and zeros of continuous-time system in s-plane to z-plane locations ( $z = e^{sT}$ ) for a sample interval (Table 4) [24]. This procedure is summarized as follow:

- Map all poles and zeros of system according to  $z = e^{sT}$ .
- If order of the numerator is lower than the denominator, add powers of  $(z + 1)$  to the numerator until the orders are equal.
- Set equivalent DC or low-frequency gain.

Numerical approximations of differentiator or integrator methods are based on the use of numerical approaches instead of derivatives or integrals in the continuous-time system equation. For example, using the finite differences for the derivative and the rectangular and trapezoidal rules for the integral, the

results in Table 2 are given in Table 5 and Table 6, respectively. In many transformation methods, the discrete-time transfer function is obtained by using the substitution method:  $Z\{(s^{\pm 1})^k\} = [Z\{s^{\pm 1}\}]^k$ . But, it should be noted that in some substitution methods, the terms may change depending on the degree of derivative and integrator, namely:  $Z\{(s^{\pm 1})^k\} \neq [Z\{s^{\pm 1}\}]^k$ , as seen at Table 7. In Table 8, many methods based on numerical approximation are given [1-5, 10, 25-54].

**Table 5.** Obtaining the methods in Table 2 with finite difference approximation of derivatives

1st order differential equation		Laplace transform		Transfer function (s-domain)	
$y'(t) + y(t) = x(t)$		$sY(s) + Y(s) = X(s)$		$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s + 1}$	
Forward difference	$y'(t) = \left. \frac{dy(t)}{dt} \right _{t=kT} = \frac{y(k+1) - y(k)}{T}$	Substituting	$\frac{y(k+1) - y(k)}{T} + y(k) = x(k)$		
		z-transform	$\frac{zY(z) - Y(z)}{T} + Y(z) = X(z)$		
		Transfer function	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{\frac{z-1}{T} + 1}$		
Backward difference	$y'(t) = \left. \frac{dy(t)}{dt} \right _{t=kT} = \frac{y(k) - y(k-1)}{T}$	Substituting	$\frac{y(k) - y(k-1)}{T} + y(k) = x(k)$		
		z-transform	$\frac{Y(z) - z^{-1}Y(z)}{T} + Y(z) = X(z)$		
		Transfer function	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{\frac{1-z^{-1}}{T} + 1}$		

**Table 6.** Obtaining the methods in Table 2 with rectangular and trapezoidal rules for integration

1st order differential equation		Integration		Transfer function (s-domain)	
$y'(t) + y(t) = x(t)$		$y(t) = y(0) - \int_0^t y(\tau) d\tau + \int_0^t x(\tau) d\tau$		$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s + 1}$	
Forward rectangular	$\int_{(k-1)T}^{kT} y(t) dt \cong y(k-1)T$	Substituting	$y(k) = y(k-1) - y(k-1)T + x(k-1)T$		
		z-transform	$Y(z) = z^{-1}Y(z) - z^{-1}Y(z)T + z^{-1}X(z)T$		
		Transfer function	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{\frac{z-1}{T} + 1}$		
Backward rectangular	$\int_{(k-1)T}^{kT} y(t) dt \cong y(k)T$	Substituting	$y(k) = y(k-1) - y(k)T + x(k)T$		
		z-transform	$Y(z) = z^{-1}Y(z) - Y(z)T + X(z)T$		
		Transfer function	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{\frac{1-z^{-1}}{T} + 1}$		
Trapezoidal	$\int_{(k-1)T}^{kT} y(t) dt \cong \frac{y(k) + y(k-1)}{2}T$	Substituting	$y(k) = y(k-1) - \frac{y(k) + y(k-1)}{2}T + \frac{x(k) + x(k-1)}{2}T$		
		z-transform	$Y(z) = z^{-1}Y(z) - Y(z)(1+z^{-1})\frac{T}{2} + X(z)(1+z^{-1})\frac{T}{2}$		
		Transfer function	$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{\frac{2(z-1)}{T(z+1)} + 1}$		

**Table 7. Common substitution methods[25]**

Method	$s^{-1}$	$s^{-2}$	$s^{-3}$	$s^{-4}$
Backward rectangular	$\frac{Tz}{z-1}$	$\frac{T^2 z^2}{(z-1)^2}$	$\frac{T^3 z^3}{(z-1)^3}$	$\frac{T^4 z^4}{(z-1)^4}$
Bilinear (Tustin) transform	$\frac{Tz+1}{2z-1}$	$\frac{T^2(z+1)^2}{4(z-1)^2}$	$\frac{T^3(z+1)^3}{8(z-1)^3}$	$\frac{T^4(z+1)^4}{16(z-1)^4}$
z-transform	$\frac{z}{z-1}$	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$	$\frac{T^2(z^2+z)}{2(z-1)^3}$	$\frac{T^3(z^3+4z^2+z)}{6(z-1)^4}$
Haliyak	$\frac{Tz}{z-1}$	$\frac{T^2 z}{(z-1)^2}$	$\frac{T^3(z^2+z)}{2(z-1)^3}$	$\frac{T^4(z^3+2z^2+z)}{4(z-1)^4}$
Boxer-Thaler	$\frac{Tz+1}{2z-1}$	$\frac{T^2(z^2+10z+1)}{12(z-1)^2}$	$\frac{T^3(z^2+z)}{2(z-1)^3}$	$\frac{T^4(z^3+4z^2+z)}{6(z-1)^4} - \frac{T^4}{720}$
Madwed	$\frac{Tz+1}{2z-1}$	$\frac{T^2(z^2+4z+1)}{6(z-1)^2}$	$\frac{T^3(z^3+11z^2+11z+1)}{24(z-1)^3}$	$\frac{T^4(z^4+26z^3+66z^2+26z+1)}{120(z-1)^4}$

**Table 8. The some methods based on numerical approximation**

Method	Differentiator (s)	Integrator (1/s)
Forward rectangular integration (Euler approximation of first order)	$\frac{z-1}{T}$	$\frac{Tz^{-1}}{1-z^{-1}}$
Backward rectangular integration (Euler approximation of second order)	$\frac{z-1}{Tz}$	$\frac{T}{1-z^{-1}}$
Trapezoidal integration (Bilinear / Tustin method)	$\frac{2z-1}{Tz+1}$	$\frac{T(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})}$
Trapezoidal integration with prewarping (Bilinear / Tustin method with prewarping)	$\frac{\omega_0}{\tan(\frac{\omega_0 T}{2})} \frac{z-1}{z+1}$	$\frac{\tan(\frac{\omega_0 T}{2})}{\omega_0} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Compensated trapezoidal integration	$\frac{2}{T} \frac{n(z-1)}{(n+2)z+(n-2)}$	$\frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{T}{n}$
Upward parabolic integration	$\frac{3z-1}{T(2z+1)}$	$\frac{T}{3} \frac{2+z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Downward parabolic integration	$\frac{3z-1}{Tz+2}$	$\frac{T}{3} \frac{1+2z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Al-Alaoui minimum phase integrator-1 (for $a=3/4$ ). (Stabilized version of Al-Alaoui nonminimum phase integrator-1)	$\frac{8}{7T} \frac{z-1}{z+(1/7)}$	$\frac{7T}{8} \frac{1+(1/7)z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Al-Alaoui minimum phase integrator-2 (for $a=3/4$ ) (combined backward rectangular and trapezoidal integration rules) $H_{BT}(z) = aH_B(z) + (1-a)H_T(z)$	$\frac{8}{7T} \frac{z-1}{z+(1/7)}$	$\frac{7T}{8} \frac{1+(1/7)z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Al-Alaoui minimum phase integrator-3 (Stabilized version of Al-Alaoui nonminimum phase integrator-3)	$\frac{6(z^2-1)}{Tr_1(3-a)(z+r_2)}, (0 \leq a \leq 1)$ $r_2 = \frac{3+a-2\sqrt{3a}}{3-a}$	$\frac{Tr_1(3-a)(z+r_2)}{6(z^2-1)}, (0 \leq a \leq 1)$ $r_2 = \frac{3+a-2\sqrt{3a}}{3-a}$
Al-Alaoui nonminimum phase integrator-1 for $a=3/4$ . (combined forward rectangular and trapezoidal integration rules) $H_{FT}(z) = aH_F(z) + (1-a)H_T(z)$	$\frac{8z-1}{Tz+7}$	$\frac{T}{8} \frac{1+7z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Al-Alaoui nonminimum phase integrator-2 (combined Simpson 1/3 and trapezoidal integration rules) $H_{ST}(z) = aH_S(z) + (1-a)H_T(z)$	$\frac{6(z^2-1)}{T(3-a)[(z+r_1)(z+r_2)]}$ $r_1 = \frac{3+a+2\sqrt{3a}}{3-a}, r_2 = \frac{3+a-2\sqrt{3a}}{3-a}$ $r_1 = 1/r_2, (0 \leq a \leq 1)$	$\frac{T(3-a)[(z+r_1)(z+r_2)]}{6(z^2-1)}$ $r_1 = \frac{3+a+2\sqrt{3a}}{3-a}, r_2 = \frac{3+a-2\sqrt{3a}}{3-a}$ $r_1 = 1/r_2, (0 \leq a \leq 1)$
Le Bihan nonminimum phase integrator for $\chi = 0,793$ . $H_{FT}(z) = \chi H_F(z) + (1-\chi)H_T(z)$	$\frac{2}{T} \frac{z-1}{(1-\chi)z+(1+\chi)}$	$\frac{T}{2} \frac{(1-\chi)+(1+\chi)z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Le Bihan minimum phase integrator (for $\chi = 0,793$ ). (Stabilized version of Le Bihan nonminimum phase integrator)	$\frac{2}{T} \frac{z-1}{(1+\chi)z+(1-\chi)}$	$\frac{T}{2} \frac{(1+\chi)+(1-\chi)z^{-1}}{1-z^{-1}}$
Tick integration rule	$\frac{2,7902}{T} \frac{z^2-1}{z^2+3,5804z+1}$	$\frac{T}{2,7902} \frac{1+3,5804z^{-1}+z^{-2}}{1-z^{-2}}$



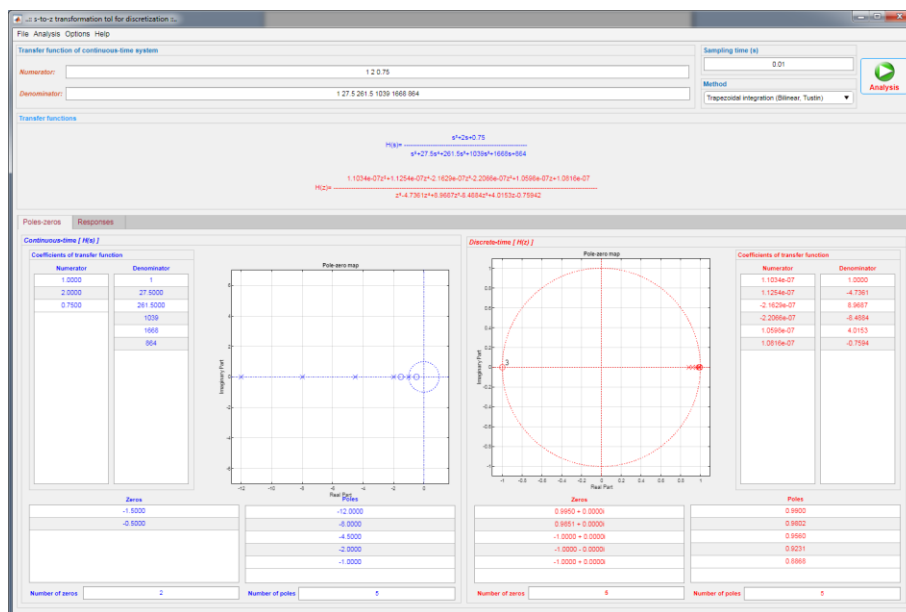
Al-Alaoui – Tick integrator (Stabilized Tick integrator)	$\frac{0,852}{T} \frac{z^2 - 1}{z^2 + 0,611z + 0,0932}$	$\frac{T}{0,852} \frac{1 + 0,611z^{-1} + 0,0932z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Simpson 1/3 integrator	$\frac{3}{T} \frac{z^2 - 1}{z^2 + 4z + 1}$	$\frac{T}{3} \frac{1 + 4z^{-1} + z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Al-Alaoui – Simpson method (Stabilized Simpson 1/3 integrator)	$\frac{0,8039}{T} \frac{z^2 - 1}{z^2 + 0,5358z + 0,0718}$	$\frac{T}{0,8039} \frac{1 + 0,5358z^{-1} + 0,0718z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Parametric BD-BL transform - Dostal parametric transform (combined backward difference and bilinear integration rules) $H_{BT}(z) = \alpha H_B(z) + (1 - \alpha)H_T(z)$	$\frac{1 + r}{T} \frac{z - 1}{z + r}, (0 < r < 1)$	$\frac{T}{1 + r} \frac{1 + rz^{-1}}{1 - z^{-1}}, (0 < r < 1)$
Papamarkos–Chamzas integrator	$\frac{z^2 - 1}{T(0,476337z^2 + 1,076644z + 0,476337)}$	$\frac{T(0,476337 + 1,076644z^{-1} + 0,476337z^{-2})}{1 - z^{-2}}$
Gurova-Georgiev transformation	$\frac{2,9382}{T} \frac{z^2 - 1}{z^2 + 3,8765z + 1}$	$\frac{T}{2,9382} \frac{1 + 3,8765z^{-1} + z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Simpson 3/8 integrator	$\frac{8}{3T} \frac{z^3 - 1}{z^3 + 3z^2 + 3z + 1}$	$\frac{3T}{8} \frac{1 + 3z^{-1} + 3z^{-2} + z^{-3}}{1 - z^{-3}}$
Boole integration	$\frac{45}{2T} \frac{z^4 - 1}{7z^4 + 32z^3 + 12z^2 + 32z + 7}$	$\frac{2T}{45} \frac{7 + 32z^{-1} + 12z^{-2} + 32z^{-3} + 7z^{-4}}{1 - z^{-4}}$
Adams-Moulton 3rd order integration (Schneider method)	$\frac{12}{T} \frac{z(z - 1)}{5z^2 + 8z - 1}$	$\frac{T}{12} \frac{5 + 8z^{-1} - z^{-2}}{1 - z^{-1}}$
Adams-Moulton 4th order integration (SKG method)	$\frac{24}{T} \frac{z^2(z - 1)}{9z^3 + 19z^2 - 5z + 1}$	$\frac{T}{24} \frac{9 + 19z^{-1} - 5z^{-2} + z^{-3}}{1 - z^{-1}}$
Adams-Moulton 5th order integration	$\frac{720}{T} \frac{z^3(z - 1)}{251z^4 + 64z^3 - 264z^2 + 106z - 19}$	$\frac{T}{720} \frac{251 + 64z^{-1} - 264z^{-2} + 106z^{-3} - 19z^{-4}}{1 - z^{-1}}$
Al-Alaoui – Alpha, $\alpha = 0,1$ (Stabilized version of combined trapezoidal and Simpson rules)	$\frac{1,4301224}{T} \frac{z^2 - 1}{z^2 + 1,38245z + 0,47779}$	$\frac{T}{1,4301224} \frac{1 + 1,38245z^{-1} + 0,47779z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Al-Alaoui – Schneider (Stabilized Adams-Moulton 3rd order integration rule)	$\frac{1,39818}{T} \frac{z^2 - 1}{z^2 + 0,46607z - 0,06788}$	$\frac{T}{1,39818} \frac{1 + 0,46607z^{-1} - 0,06788z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Al-Alaoui – SKG (Stabilized Adams-Moulton 4th order integration rule)	$\frac{1,1272}{T} \frac{z^2(z - 1)}{z^3 + 0,168z^2 - 0,0607z + 0,0199}$	$\frac{T}{1,1272} \frac{1 + 0,168z^{-1} - 0,0607z^{-2} + 0,0199z^{-3}}{1 - z^{-1}}$
Al-Alaoui – Two segment rule (combined Simpson 1/3 and trapezoidal integration rules) $H_2(z) = \alpha H_{S1/3}(z) + (1 - \alpha)H_T(z)$	$\frac{15}{T} \frac{z^2 - 1}{7z^2 + 16z + 7}, \alpha = 0,2$	$\frac{T}{15} \frac{7 + 16z^{-1} + 7z^{-2}}{1 - z^{-2}}, \alpha = 0,2$
Al-Alaoui – Three segment rule (combined Simpson 3/8 and trapezoidal integration rules) $H_3(z) = \alpha H_{S3/8}(z) + (1 - \alpha)H_T(z)$	$\frac{80}{3T} \frac{z^3 - 1}{13z^3 + 27z^2 + 27z + 13}, \alpha = 0,1$	$\frac{3T}{80} \frac{13 + 27z^{-1} + 27z^{-2} + 13z^{-3}}{1 - z^{-3}}, \alpha = 0,1$
Al-Alaoui – Reduced four segment rule (combined backward rectangular and Two segment integration rules) $H_4(z) = \alpha H_B(z) + (1 - \alpha)H_2(z)$	$\frac{945}{2T} \frac{z^2 - 1}{217z^2 + 512,8463z + 217}$ $\alpha = 1/20$	$\frac{2T}{945} \frac{217 + 512,8463z^{-1} + 217z^{-2}}{1 - z^{-2}}$ $\alpha = 1/20$
Al-Alaoui – Stabilized two segment rule	$\frac{8,8438}{T} \frac{z^2 - 1}{7z^2 + 8,2543z + 2,4333}$	$\frac{T}{8,8438} \frac{7 + 8,2543z^{-1} + 2,4333z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Al-Alaoui – Stabilized reduced four segment rule	$\frac{945}{2T} \frac{z^2 - 1}{393,0387z^2 + 434z + 119,8075}$	$\frac{2T}{945} \frac{393,0387 + 434z^{-1} + 119,8075z^{-2}}{1 - z^{-2}}$
Hamming integrator-1	$\frac{24}{T} \frac{z(2z^2 - z - 1)}{17z^3 + 51z^2 + 3z + 1}$	$\frac{T}{24} \frac{17 + 51z^{-1} + 3z^{-2} + z^{-3}}{2 - z^{-1} - z^{-2}}$
Hamming integrator-2	$\frac{24}{T} \frac{z(3z^2 - 2z - 1)}{25z^3 + 91z^2 + 43z + 9}$	$\frac{T}{24} \frac{25 + 91z^{-1} + 43z^{-2} + 9z^{-3}}{3 - 2z^{-1} - z^{-2}}$
Hamming integrator-3	$\frac{24}{T} \frac{3z^3 - z^2 - z - 1}{26z^3 + 73z^2 + 30z + 10}$	$\frac{T}{24} \frac{26 + 73z^{-1} + 30z^{-2} + 10z^{-3}}{3 - z^{-1} - z^{-2} - z^{-3}}$
Graham-Lindquist integrator-1	$\frac{1}{T} \frac{5z^2 - 4z - 1}{z(2z + 4)}$	$T \frac{2 + 4z^{-1}}{5 - 4z^{-1} - z^{-2}}$
Graham-Lindquist integrator-2	$\frac{1}{T} \frac{17z^3 - 9z^2 - 9z + 1}{z^2(6z + 18)}$	$T \frac{6 + 18z^{-1}}{17 - 9z^{-1} - 9z^{-2} + z^{-3}}$
Graham-Lindquist integrator-3	$\frac{1}{T} \frac{37z^4 - 8z^3 - 36z^2 + 8z - 1}{z^3(12z + 48)}$	$T \frac{12 + 48z^{-1}}{37 - 8z^{-1} - 36z^{-2} + 8z^{-3} - z^{-4}}$
NGO integrator	$\left(\frac{T}{2,7925}\right) \frac{(z + 2,3658)(z - 0,2167e^{j0,9427})}{z^2(z - 1)}$	$\frac{(z - 0,2167e^{-j0,9427})}{z^2(z - 1)}$
NGO differentiator	$\left(\frac{1}{T}\right) \left(\frac{2,7925}{2,3658}\right) \frac{z^2(z - 1)}{(z + 1/2,3658)(z - 0,2167e^{j0,9427})(z - 0,2167e^{-j0,9427})}$	

### 3. DESIGNED TOOL and APPLICATIONS

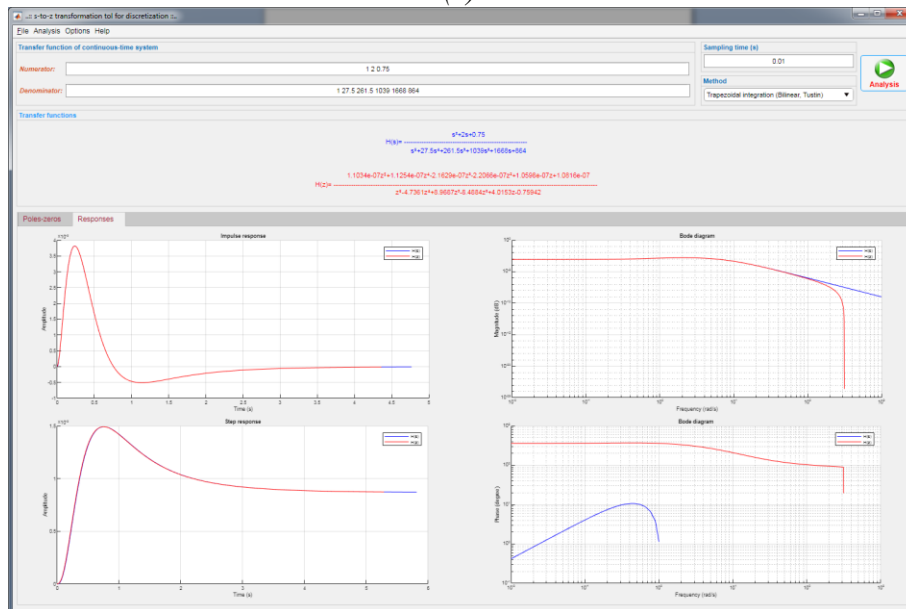
In this study, an application/simulator was designed using MATLAB App Designer [22] for  $s - to - z$  transformation/mapping, which is one of the most important application areas of signal processing. With this application, discretization operations can be performed with numerous different methods easily, quickly and effectively. In addition, the effectiveness of the methods can be clearly observed by performing single or comparative analyzes, because the application produces many numerical and graphical results (transfer functions of systems, zeros, poles, responses, etc.). Besides, it supports a better understanding of  $s - to - z$  transformation/mapping methods with its use in the field of education.

The first application is a fifth order filter with real poles, two real zeros and a dc gain of 1/1152 (sampling time is 0.01 s) [55] which is given with following transfer function:

$$H(s) = \frac{s^2+2s+0.75}{s^5+27.5s^4+261.5s^3+1039s^2+1668s+864} \tag{5}$$



(a)



(b)

Figure 2. The screenshots for first application

The results of discretization using bilinear (Tustin) method are given in Figure 2. As seen in Figure 2, in the designed application, the numerator and denominator coefficients of the transfer function of the continuous-time system are entered, the sampling time is determined, and the method to be used is selected. As a result of the analysis performed, the transfer functions of both continuous-time model and its discrete-time equivalent are shown and the pole-zero maps of these transfer functions are plotted, and also the pole-zero numbers are given (Figure 2a). In addition, the impulse and step responses and Bode diagrams of both continuous time model and its discrete-time equivalent are plotted (Figure 2b).

The second application is a sixth order Butterworth filter (sampling time is 0.01 s) [3] which is given with following transfer function:

$$H(s) = \frac{1}{(s^2 + 2\cos(5\pi/12)s + 1)(s^2 + 2\cos(\pi/12)s + 1)(s^2 + \sqrt{2}s + 1)} \quad (6)$$

The results of comparative discretization using Schneider transform, trapezoidal integration (bilinear, Tustin) method and Al-Alaoui-Schneider transform are given in Figure 3. In the comparison screen, the transfer function of the continuous time system is discretized with 3 different methods selected; the numerator and denominator coefficients of the discrete time transfer functions and their zeros and poles are listed. In addition, the unit impulse and step responses of discrete-time systems obtained by both continuous-time and comparative methods are plotted comparatively. Thus, the discretization efficiency of each method on the relevant system can be clearly observed.

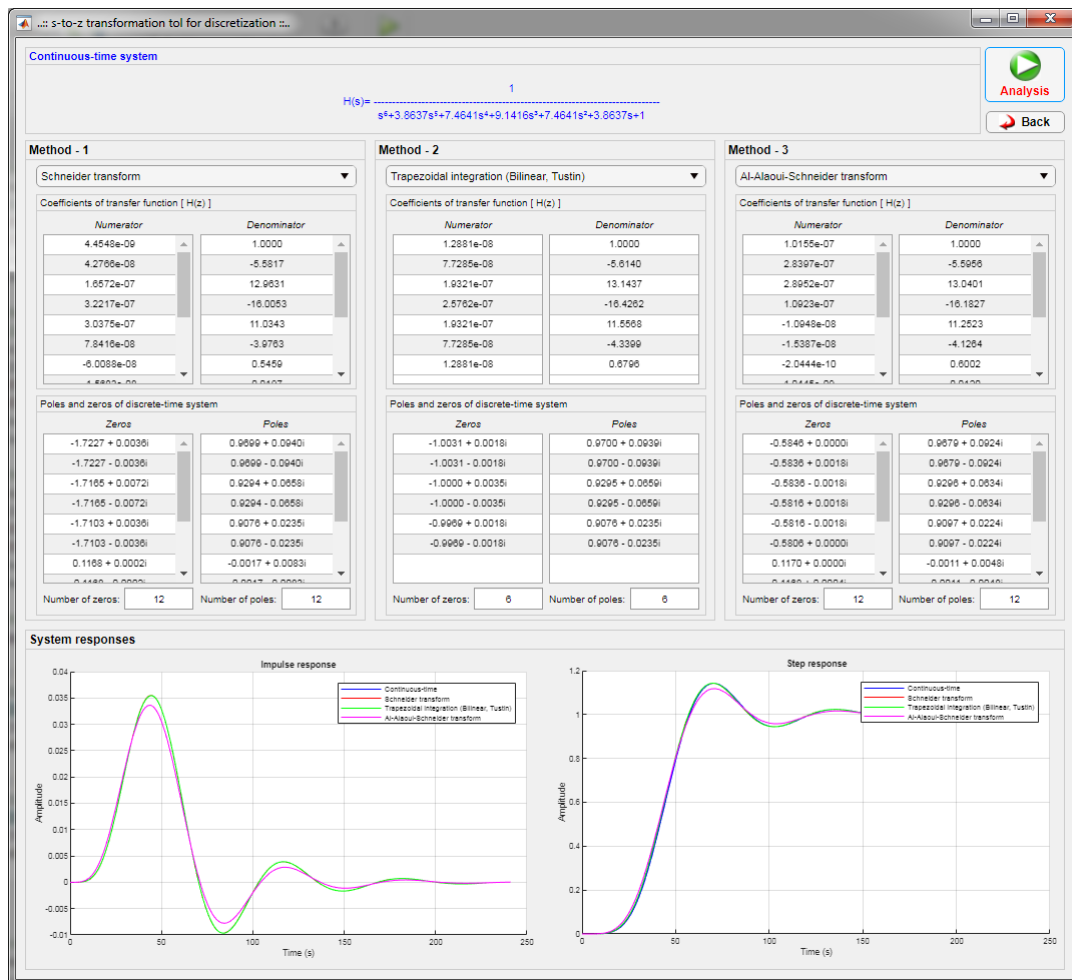


Figure 3. The screenshots for second application

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, an application/simulator was designed out for discretization, which is one of the most important application areas of signal processing. Continuous-time systems need to be discretized in order to be used with discrete time systems (microprocessor, computer, etc.). However, discrete-time equivalents of higher order continuous-time systems are extremely difficult to obtain manually. Complex mathematical operations are performed especially for obtaining of discrete models with high accuracy (equivalence). With the software tool designed in this study - regardless of the degree of the system - discretization can be done easily, quickly and effectively with many different methods. In addition, the most suitable models can be determined with comparative numerical and graphical results.

#### REFERENCES

- [1] Katz P., (1981). Digital Control using Microprocessors. New Jersey: Prentice Hall.
- [2] Franklin G.F., Powell J.D., Workman M.L., (1998). Digital Control of Dynamic Systems. 3rd ed. California: Addison-Wesley Longman.
- [3] Al-Alaoui M.A., Novel stable higher order s-to-z transforms, IEEE Transactions on Circuits and Systems–I: Fundamental Theory and Applications, 48 No. 11 (2001) 1326-1329. doi: 10.1109/81.964421
- [4] Al-Alaoui M.A., Linear phase low pass IIR digital differentiators, IEEE Transactions on Signal Processing, 55 No. 2 (2007) 697-706. doi: 10.1109/TSP.2006.885741
- [5] Al-Alaoui M.A., Novel approach to analog-to-digital transforms, IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 54 No. 2 (2007) 338-350. doi:10.1109/TCSI.2006.885982
- [6] Ádám T., Dadvandipour S., Futás, J., Influence of discretization method on the digital control system performance, Acta Montanistica Slovaca, 8 No. 4 (2003) 197-200.
- [7] Mirković D., Petković P., Litovski V., A second order s-to-z transform and its implementation to IIR filter design, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 33 No. 5 (2014) 1831-1843. doi: 10.1108/COMPEL-03-2014-0058
- [8] Paarmann L.D., Mapping from the s-domain to the z-domain via the magnitude-invariance method, Signal Processing, 69 No. 3 (1998) 219-228. doi: 10.1016/S0165-1684(98)00104-2
- [9] Paarmann L.D., Atris Y.H., Mapping from the s-domain to the z-domain via the phase-invariance method, Signal Processing, 86 No. 2 (2006) 223-229. doi: 10.1016/j.sigpro.2005.05.007
- [10] Schneider A.M., Kaneshige J.T., Groutage F.D., Higher order s-to-z mapping functions and their application in digitizing continuous-time filters, Proceedings of the IEEE, 79 No. 11 (1991) 1661-1674. doi: 10.1109/5.118990
- [11] James J.R., A survey of knowledge-based systems for computer-aided control system design, 1987 American Control Conference, Minneapolis (1987) 2156-2161. doi: 10.23919/ACC.1987.4789669
- [12] Kessler P., Schaufelberger W., Minitools for education in control system analysis and design, IFAC Proceedings Volumes, 24 No. 4 (1991) 441-446. doi: 10.1016/S1474-6670(17)54312-8
- [13] Prendergast D.P., Eydgahi A.M., 'EDCON': an educational control system analysis and design program, IEEE Transactions on Education, 36 No. 1 (1993) 42-44. doi: 10.1109/13.204814
- [14] Palopoli L., Abeni L., Buttazzo G., Conticelli F., Di Natale M., Real-time control system analysis: an integrated approach, Proceedings 21st IEEE Real-Time Systems Symposium, Orlando (2000) 131-140. doi: 10.1109/REAL.2000.896003

- [15] Lincoln B., Cervin A., JITTERBUG: a tool for analysis of real-time control performance, Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas (2002) 1319-1324. doi: 10.1109/CDC.2002.1184698
- [16] Ang K.H., Chong G., Li Y., PID control system analysis, design, and technology, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 13 No. 4 (2005) 559-576. doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [17] Vatansever F., Hatun M., Sistem analizi eğitim simülatörü tasarımı, 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2014), Karabuk (2014) 546-550.
- [18] Hatun M., Vatansever F., Discrete time system simulator, 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2015), Valencia (2015) 1807-1814.
- [19] Vatansever F., The design of transform simulator, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2017), Baku (2017) 289-293.
- [20] Díaz J.M., Costa-Castelló R., Muñoz R., Dormido S., An interactive and comprehensive software tool to promote active learning in the loop shaping control system design, IEEE Access, 5 (2017) 10533-10546. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2712520
- [21] Vatansever F., Yalcin N.A., e-Signals & Systems: A web-based educational tool for signals and systems, Computer Applications in Engineering Education, 25 No. 4 (2017) 625-641. doi: 10.1002/cae.21826
- [22] The MathWorks Inc. (2018). MATLAB , App Designer.
- [23] Vatansever F., (2018). Sayısal Hesaplama ve Programlama. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- [24] Hori N., Cormier R., Kanai K., On matched pole-zero discrete-time models, IEE Proceedings D: Control Theory and Applications, 139 No. 3 (1992) 273-278. doi: 10.1049/ip-d.1992.0036
- [25] Hartley T.T., Comments on “On the nature of the Boxer-Thaler and Madwed integrators and their applications in digitizing a continuous-time system”, IEEE Transactions on Automatic Control, 37 No. 5 (1992) 702-704. doi: 10.1109/9.135524
- [26] Al-Alaoui M.A., Novel approach to designing digital differentiators, Electronics Letters, 28 No. 15 (1992) 1376-1378. doi: 10.1049/el:19920875
- [27] Al-Alaoui M.A., Novel digital integrator and differentiator, Electronics Letters, 29 No. 4 (1993) 376-378. doi: 10.1049/el:19930253
- [28] Al-Alaoui M.A., Novel IIR differentiator from the Simpson integration rule, IEEE Transactions on Circuits and Systems–I: Fundamental Theory and Applications, 41 No. 2 (1994) 186-187. doi: 10.1109/81.269060
- [29] Al-Alaoui M.A., A class of second-order integrators and low-pass differentiators, IEEE Transactions on Circuits and Systems–I: Fundamental Theory and Applications, 42(4) (1995) 220-223. doi: 10.1109/81.382477
- [30] Al-Alaoui M.A., A class of numerical integration rules with first order derivatives, ACM Signum Newsletter, 31 No. 2 (1996) 25-44. doi: 10.1145/230922.230930
- [31] Al-Alaoui M.A., Filling the gap between the bilinear and the backward-difference transforms: an interactive design approach, International Journal of Electrical Engineering & Education, 34 No. 4 (1997) 331-337. doi: 10.1177/002072099703400405
- [32] Al-Alaoui M.A., Al-Alaoui operator and the  $\alpha$ -approximation for discretization of analog systems, Facta Universitatis, Ser.: Elec. and Energ., 19 No. 1 (2006) 143-146. doi: 10.2298/FUEE0601143A

- [33] Al-Alaoui M.A., Al-Alaoui operator and the new transformation polynomials for discretization of analogue systems, *Electrical Engineering*, 90 No. 6 (2008) 455-467. doi: 10.1007/s00202-007-0092-0
- [34] Al-Alaoui M.A., Class of digital integrators and differentiators, *IET Signal Processing*, 5 No. 2 (2011) 251-260. doi: 10.1049/iet-spr.2010.0107
- [35] Al-Alaoui M.A., Baydoun M., Yaacoub E., Confluence of pattern recognition and signal processing: application of Al-Alaoui pattern recognition algorithm to digital filters design, *IET Signal Processing*, 9 No. 6 (2015) 498-505. doi: 10.1049/iet-spr.2014.0377
- [36] Auger F., Some new developments on the Al-Alaoui and the Pei and Hsu s-to-z transforms, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57 No. 6 (2010) 471-475. doi: 10.1109/TCSII.2010.2048350
- [37] Chen C.M., Liu F.H., The discrete-time equivalent of an analogue controller by a compensated approach, *International Journal of Systems Science*, 32 No. 3 (2001) 287-294. doi: 10.1080/002077201300029566
- [38] Chen C.M., Liu F.H., The discrete-time equivalent of an analogue controller by the parabolic approach, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 215 No. 1 (2001) 29-36. doi:10.1243/0959651011539178
- [39] Georgiev V., Some applied aspects of rational higher order s-z transformations, *Radioengineering*, 7 No. 1 (1998) 19-26.
- [40] Gupta M., Jain M., Kumar B., Novel class of stable wideband recursive digital integrators and differentiators, *IET Signal Processing*, 4 No. 5 (2010) 560-566. doi: 10.1049/iet-spr.2009.0030
- [41] Gupta M., Jain M., Kumar B., Recursive wideband digital integrator and differentiator, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 39 No. 7 (2011) 775-782. doi: 10.1002/cta.658
- [42] Gupta M., Jain M., Kumar B., Wideband digital integrator and differentiator, *IETE Journal of Research*, 58 No. 2 (2012) 166-170. doi: 10.4103/0377-2063.96175
- [43] Hamming R.W., (1989). *Digital Filters*. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- [44] Kowalczyk Z., Discrete approximation of continuous-time systems: a survey, *IEE Proceedings—G (Circuits, Devices and Systems)*, 140 No. 4 (1993) 264-278. doi: 10.1049/ip-g-2.1993.0045
- [45] Le Bihan J., Novel class of digital integrators and differentiators, *Electronics Letters*, 29 No. 11 (1993) 971-973. doi: 10.1049/el:19930647
- [46] Ngo N.Q., A new approach for the design of wideband digital integrator and differentiator, *IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs*, 53 No. 9 (2006) 936-940. doi: 10.1109/TCSII.2006.881806
- [47] Papamarkos N., Chamzas C., A new approach for the design of digital integrators, *IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications*, 43 No. 9 (1996) 785-791. doi: 10.1109/81.536749
- [48] Šekara T.B., Stojić M.R., Application of the  $\alpha$ -approximation for discretization of analogue systems, *Facta Universitatis, Ser.: Elec. and Energ.*, 18 No. 3 (2005) 571-586. doi: 10.2298/FUEE0503571S
- [49] Šekara T.B., New transformation polynomials for discretization of analogue systems, *Electrical Engineering*, 89 No. 2 (2006) 137-147. doi: 10.1007/s00202-005-0322-2
- [50] Tseng C.-C., Digital integrator design using Simpson rule and fractional delay filter, *IEE Proceedings of Vision, Image and Signal Processing*, 153 No. 1 (2006) 79-85. doi: 10.1049/ip-vis:20045208

- [51] Upadhyay D.K., Recursive wideband digital differentiators, *Electronics Letters*, 46 No. 25 (2010) 1661-1662. doi: 10.1049/el.2010.2113
- [52] Upadhyay D.K., Class of recursive wideband digital differentiators and integrators, *Radioengineering*, 21 No. 3 (2012) 904-910.
- [53] Upadhyay D.K., Recursive wideband linear phase digital differentiators and integrators, 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation, Pune (2015) 927-931. doi: 10.1109/ICCUBEA.2015.184
- [54] Upadhyay D.K., Singh R.K., Recursive wideband digital differentiator and integrator, *Electronics Letters*, 47 No. 11 (2011) 647-648. doi: 10.1049/el.2011.0420
- [55] Wang C.-H., Lin M.-Y., Teng C.-C., On the nature of the Boxer-Thaler and Madwed integrators and their applications in digitizing a continuous-time system, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35 No. 10 (1990) 1163-1167. doi: 10.1109/9.58563



## Comparison of the shape, depth and $N_\gamma$ factors used in the bearing capacity equation

Mustafa ÖZER<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 01.11.2021  
Revision: 11.12.2021  
Accepted: 13.12.2021

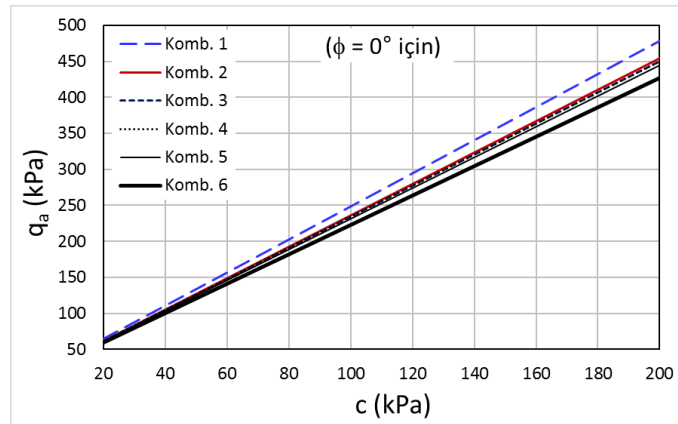
#### Highlights

- Terzaghi equation
- Bearing capacity factors
- Correction factors

#### Keywords

Shallow foundation  
Bearing capacity  
Shape factor  
Depth factor  
TBEC-2018

In this study, using different equations generally accepted in the literature for the shape, depth and  $N_\gamma$  coefficients in the general bearing capacity equation used in the calculation of the bearing capacity of shallow foundations, safe bearing capacity values were calculated for varying soil conditions from  $c=20$  to 200 kPa and from  $\phi=0$  to  $40^\circ$  and the results were compared with each other.



**Figure A.** Comparison of the allowable bearing capacity values calculated with different combination equations for  $\phi=0^\circ$ ,  $B/L=0.625$  and  $D/B=0.3$

**Purpose:** There are different equations suggested by different researchers in the literature for the correction factor used in the general bearing capacity equation. In addition, although there is a general agreement in the literature for  $N_c$  and  $N_q$ , there are many different equations for  $N_\gamma$  in the literature. In order to decide which of these factors to use while designing the foundation, it is important to know how these factors affect the foundation design and which factors will be used to obtain safer results.

**Theory and Methods:** In this study, safe bearing capacity values were calculated for different ground conditions ranging from  $c=20$  to 200 kPa and from  $\phi=0$  to  $40^\circ$  using different equations generally accepted in the literature, and the results were compared with each other.

**Results:** In the  $\phi=0^\circ$  analyses, the lowest (safest) bearing capacity values were obtained by Meyerhof [10]'s shape and depth factors, and the highest bearing capacity values were obtained by De Beer [12]'s shape and Hansen [13]'s depth factors. In the “c- $\phi$ ” analyses, the lowest (safest) bearing capacity values for soils with approximately  $\phi < 20^\circ$  were obtained by Meyerhof [10]'s shape, depth and  $N_\gamma$  factors. As for the soils with approximately  $\phi > 20^\circ$ , the lowest (safest) bearing capacity values were obtained using the shape factors with  $\sin\phi$  proposed by De Beer [12],  $d_c$  factors suggested by Vesic [15] and  $d_q$  and  $d_\gamma$  factors proposed by Hansen [13] and  $N_\gamma$  factor suggested in TBEC [18].

**Conclusion:** It has been observed that there is a significant difference between the bearing capacity values calculated with the different relations suggested in the literature for shape, depth and  $N_\gamma$  coefficients, and this difference is not constant, but changes depending on the cohesion value in  $\phi=0^\circ$  analyzes and the internal friction angle in “c- $\phi$ ” analyzes.





## Comparison of the shape, depth and $N_\gamma$ factors used in the bearing capacity equation

Mustafa ÖZER<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Abstract

In this study, allowable bearing capacity values using different equations generally accepted in the literature for shape, depth and  $N_\gamma$  factors in the general bearing capacity equation used in bearing capacity calculation of shallow foundations were calculated for different soil conditions varying from  $c=20$  kPa to 200 kPa and from  $\phi=0^\circ$  to  $40^\circ$  and the results obtained were compared with each other. In the bearing capacity calculations, a residential type building resting on a mat foundation has been taken into account, and it has been assumed that the resultant of column loads from the building to the foundation are perpendicular to the foundation and at the center of the foundation, ground surface are level, and foundation base are horizontal. Earthquake and moment effects were not taken into account in the calculations, and static loading conditions were assumed to be valid. According to the results obtained; In the  $\phi=0^\circ$  analyses, the lowest (safest) bearing capacity values were obtained by Meyerhof [10]'s shape and depth factors, and the highest bearing capacity values were obtained by De Beer [12]'s shape and Hansen [13]'s depth factors. In the “c- $\phi$ ” analyses, the lowest (safest) bearing capacity values for soils with approximately  $\phi<20^\circ$  were obtained by Meyerhof [10]'s shape, depth and  $N_\gamma$  factors. As for the soils with approximately  $\phi>20^\circ$ , the lowest (safest) bearing capacity values were obtained using the shape factors with  $\sin\phi$  proposed by De Beer [12],  $d_c$  factors suggested by Vesić [15] and  $d_q$  and  $d_\gamma$  factors proposed by Hansen [13] and  $N_\gamma$  factor suggested in TBEC [18].

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 01.11.2021  
Düzeltilme: 11.12.2021  
Kabul: 13.12.2021

### Keywords

*Shallow foundation*  
*Bearing capacity*  
*Shape factor*  
*Depth factor*  
*TBEC-2018*

### Anahtar Kelimeler

*Sığ temel*  
*Taşıma gücü*  
*Şekil katsayısı*  
*Derinlik katsayısı*  
*TBDY-2018*

### Taşıma gücü bağıntısında kullanılan şekil, derinlik ve $N_\gamma$ katsayılarının karşılaştırılması

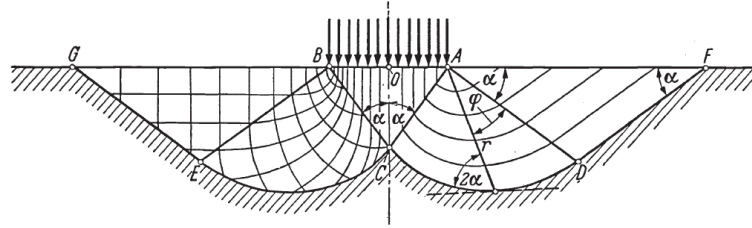
### Öz

Bu çalışmada, sığ temellerin taşıma gücünün hesaplanmasında kullanılan genel taşıma gücü bağıntısındaki şekil, derinlik ve  $N_\gamma$  katsayıları için literatürde genel kabul görmüş farklı bağıntılar kullanılarak  $c=20$  kPa'dan 200 kPa'ya ve  $\phi=0^\circ$ 'den  $40^\circ$ 'ye kadar değişen farklı zemin koşulları için emniyetli taşıma gücü değerleri hesaplanmış ve sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Taşıma gücü hesaplamalarında, radye temel üzerine oturan konut tipi bir bina dikkate alınmış olup, yapıdan temele gelen kolon yüklerinin temelin merkezine ve temele dik, zemin yüzeyinin ve temel tabanının düz olduğu kabul edilmiştir. Hesaplamalarda statik yükleme koşullarının geçerli olduğu kabul edilmiş olup deprem etkisi ve moment etkileri dikkate alınmamıştır. Elde edilen sonuçlara göre;  $\phi=0^\circ$  analizlerinde, en düşük (en emniyetli) taşıma gücü değerlerinin Meyerhof'un [10] şekil ve derinlik katsayıları, en yüksek taşıma gücü değerlerinin ise De Beer'in [12] şekil katsayıları ve Hansen'in [13] derinlik katsayıları kullanılarak elde edilmiştir. “c- $\phi$ ” analizlerinde ise; yaklaşık  $\phi<20^\circ$  olan zeminlerde en düşük (en emniyetli) taşıma gücü değerleri Meyerhof'un [10] şekil, derinlik ve  $N_\gamma$  katsayıları kullanılarak elde edilmiştir. Yaklaşık  $\phi>20^\circ$  olan zeminlerde ise en düşük (en emniyetli) taşıma gücü değerleri, şekil katsayıları için De Beer'in [12]  $\sin\phi$ 'li bağıntıları, derinlik katsayılarından  $d_c$  için Vesić'in [15],  $d_q$  ve  $d_\gamma$  için Hansen'in [13] bağıntıları ve  $N_\gamma$  katsayısı için TBDY-2018'de [18] önerilen bağıntı kullanılarak elde edilmiştir.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Temellerin, yapıdan gelen tasarım yüklerini emniyetli bir şekilde zemine aktarabilmesi için hem taşıma gücü hem de oturma bakımından yeterli olması gerekmektedir. Sığ temellerin taşıma gücünün hesaplanması için günümüzde halen yaygın olarak kullanılan taşıma gücü bağıntısı ilk kez 1943’de Terzaghi [1] tarafından önerilmiştir. Ancak, Terzaghi [1] tarafından önerilen taşıma gücü bağıntısının kökleri 1920’lere Prandtl [2] ve Reissner’in [3] çalışmalarına kadar uzanmaktadır [4].

Prandtl [2], inşaat mühendisliğinden ziyade makine mühendisliği amaçlarına yönelik olarak gerçekleştirdiği çalışmasında [4] plastik bir malzemenin yüzeyine oturan metal bir plakanın, plastik malzemede meydana getirdiği etkileri iki boyutlu bir düzlemde ele alarak aşağıdaki gibi çözümlenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Prandtl'in yenilme mekanizması [2]

Prandtl [2] tarafından gerçekleştirilen çözümlenmelerin sonucunda elde edilen bağıntılar günümüzdeki güncel geoteknik simgelerine ve kavramlarına dönüştürüldüğünde Eş.1’de verilen bağıntı elde edilmektedir.

$$q_u = c \left[ \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} - 1 \right] \cot \phi \quad (1)$$

Eş. 1’de,  $c$ ’nin yanındaki terim  $N_c$  ile ifade edilecek olursa, Eş. 1.1 ve 1.2 elde edilmektedir [2, 5].

$$q_u = c N_c \quad (1.1)$$

$$N_c = \left[ \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} - 1 \right] \cot \phi \quad (1.2)$$

Prandtl [2] tarafından elde edilmiş olan  $N_c$  terimi (Eş. 1.2) sonraki yıllarda “taşıma gücü katsayısı” olarak adlandırılmış olup [5], günümüzde sığ temellerin taşıma gücünün hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Prandtl [2] tarafından geliştirilen yenilme mekanizmasını inşaat mühendisliği amaçlarına yönelik olarak ele alan Reissner [3], Şekil 1’de görülen yenilme mekanizmasında yüklü alanın kenarlarına gömülü temelleri temsilen sürşarj yükü ekleyerek yeni çözümlenmeler gerçekleştirmiş ve sürşarj yükünün etkisini hesaba katan bir bağıntı geliştirmiştir [3, 4]. Reissner’in [3] çözümlenmeleri sonucunda elde ettiği bağıntılar günümüzdeki geoteknik simgelerine ve kavramlarına dönüştürüldüğünde Eş.2’de verilen bağıntı elde edilmektedir.

$$q_u = q \left[ \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \right] \quad (2)$$

Eş. 2’de köşeli parantez içindeki terim  $N_q$  ile ifade edilecek olursa, Eş. 2.1 ve 2.2 elde edilmektedir [5].

$$q_u = q N_q \quad (2.1)$$

$$N_q = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \quad (2.2)$$

Eş. 2.2’de görülen  $N_q$  terimi sürşarj yükünün etkisini hesaba katan taşıma gücü katsayısı olarak günümüzde sığ temellerin taşıma gücünün hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.  $N_c$  ve  $N_q$  bağıntılarının ortak terimler içermesi nedeniyle birçok kaynakta  $N_c$  terimi Eş. 2.3’te verildiği gibi de ifade edilmektedir [5].

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (2.3)$$

Hesaplamalarda kolaylık olması bakımından Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından gerçekleştirilen çözümlerinde malzemenin (zeminin) kendi ağırlığı ihmal edilmiştir [4].

Terzaghi [1], Prandtl [2] tarafından geliştirilen yenilme mekanizmasını dikkate alarak zeminin kendi ağırlığını da hesaba katan bir bağıntı ( $N_\gamma$  katsayısını içeren bir bağıntı) geliştirmiştir. Terzaghi [1], kendi geliştirdiği bağıntı ile birlikte Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından geliştirilen bağıntıları süperpozisyon ilkesine göre toplayarak derinliği genişliğinden az veya eşit olan ( $D_f \leq B$ ) şerit temellerin taşıma gücünün hesaplanması için Eş.3’te verilen bağıntıyı önermiştir.

$$q_u = c N_c + \gamma'_1 D_f N_q + 0.5 \gamma'_2 B N_\gamma \quad (3)$$

Terzaghi [1], homojen zeminler üzerine oturan şerit temeller için önermiş olduğu bu bağıntıya kuramsal ve deneysel sonuçlara dayanan bazı katsayılar ekleyerek bağıntıyı kare ve dairesel temelleri de kapsayacak şekilde genişletmiş ve kare temeller için Eş. 3.1, dairesel temeller için Eş. 3.2’de verilen bağıntıları önermiştir.

$$q_u = 1.3 c N_c + \gamma'_1 D_f N_q + 0.4 \gamma'_2 B N_\gamma \quad (3.1)$$

$$q_u = 1.3 c N_c + \gamma'_1 D_f N_q + 0.3 \gamma'_2 B N_\gamma \quad (3.2)$$

Terzaghi’nin önerdiği taşıma gücü bağıntısında temel tabanı seviyesinin üstündeki zeminin kesme dayanımı ihmal edilmiş ve bu bölgedeki zeminin etkisi temel tabanı seviyesine etkiyen sürşarj yükü olarak hesaba katılmıştır (tasarımcıyı güvenli tarafta bırakan bir varsayım) [1]. Bununla birlikte, kolon yüklerinin temele dik olarak geldiği, temelin düz bir zemine oturduğu ve temel tabanının düz (yani zemin yüzeyine paralel) olduğu kabul edilmiştir [1]. Terzaghi [1] tarafından dikdörtgen temellerin taşıma gücünün hesaplanması için herhangi bir bağıntı veya katsayı önerilmemiştir. Terzaghi [1]’nin önerdiği taşıma gücü bağıntısındaki bu varsayımlardan dolayı, sonraki yıllarda birçok araştırmacının katkısıyla [Ör. 6-15] taşıma gücü bağıntısına dikdörtgen temelleri de kapsayacak şekilde temel şeklini, temel derinliğini, temele gelen yükün eğimini, zemin yüzeyinin eğimini ve temel tabanının eğimini hesaba katan bazı düzeltme katsayıları eklenmiş ve bağıntı daha da genişletilerek Eş. 4’te verilen nihai şeklini almıştır.

$$q_u = c N_c s_c d_c i_c g_c b_c + \gamma'_1 D_f N_q s_q d_q i_q g_q b_q + 0.5 \gamma'_2 B' N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma g_\gamma b_\gamma \quad (4)$$

Eş. 4’te verilen genişletilmiş taşıma gücü bağıntısında, Terzaghi [1] tarafından önerilen üç terimli temel biçiminin muhafaza edildiği görülmektedir.

Eş. 4’te verilen bağıntının geliştirilmesinde başta Terzaghi [1] olmak üzere birçok araştırmacının katkısı olduğu için [Ör. 6-15], bu çalışmada bu bağıntı tek bir araştırmacının ismiyle anılmayıp “*genel taşıma gücü bağıntısı*” olarak adlandırılmıştır (Ör. [16-18]’de olduğu gibi).

Genel taşıma gücü bağıntısında bulunan düzeltme katsayıları için literatürde farklı araştırmacılar tarafından önerilen farklı bağıntılar bulunmaktadır. Ayrıca,  $N_c$  ve  $N_q$  taşıma gücü katsayıları için literatürde genel bir mutabakat sağlanmış olsa da,  $N_\gamma$  taşıma gücü katsayısı için literatürde çok sayıda farklı bağıntı bulunmaktadır. Temel tasarımı yapılırken bu bağıntılardan hangisinin kullanılacağına karar verebilmek için, bu bağıntıların temel tasarımını ne yönde etkilediğinin ve hangi bağıntılar kullanıldığında daha

emniyetli sonuçlar elde edileceğinin bilinmesi önemlidir. Bununla birlikte, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018)'de [19], sığ temellerin taşıma gücü karakteristik dayanımının hesaplanması için Eş. 4'te verilen genel taşıma gücü bağıntısı önerilmiş olup, düzeltme katsayıları için literatüre dayanan ve genel kabul görmüş bağıntıların kullanılabilmesi belirtilmiştir. Bu nedenle sığ temel tasarımı yapılırken bu düzeltme katsayılarının bilinçli ve doğru bir şekilde seçilmesinin önemi daha da artmıştır.

Bu çalışmada, literatürde genel kabul görmüş farklı araştırmacılar tarafından önerilen şekil, derinlik ve  $N_\gamma$  katsayılarının taşıma gücü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, genel taşıma gücü bağıntısında şekil ve derinlik düzeltme katsayıları ve  $N_\gamma$  taşıma gücü katsayısı için literatürde genel kabul görmüş farklı bağıntılar kullanılarak  $c=20$  kPa'dan 200 kPa'ya,  $\phi=0^\circ$ 'den  $40^\circ$ 'ye kadar değişen farklı zemin koşulları için emniyetli taşıma gücü değerleri hesaplanmış ve sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Taşıma gücü hesaplamalarında, radye temel üzerine oturan konut tipi bir bina dikkate alınmış olup, yapıdan gelen kolon yüklerinin bileşkesinin temelin merkezine ve temele dik etkidiği ve zemin yüzeyinin ve temel tabanının düz olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda genel taşıma gücü bağıntısındaki  $i_c$ ,  $i_q$ ,  $i_\gamma$ ,  $g_c$ ,  $g_q$ ,  $g_\gamma$  ve  $b_c$ ,  $b_q$ ,  $b_\gamma$  katsayıları 1'e eşit olmaktadır. Hesaplamalarda statik yükleme koşullarının geçerli olduğu kabul edilmiş olup, deprem etkisi ve moment etkileri dikkate alınmamıştır.

## 2. GENEL TAŞIMA GÜCÜ BAĞINTISINDA KULLANILAN TAŞIMA GÜCÜ KATSAYILARI (BEARING CAPACITY FACTORS USED IN GENERAL BEARING CAPACITY EQUATION)

Geoteknik camiasında  $N_c$  ve  $N_q$  taşıma gücü katsayıları için sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntılar (sırasıyla Eş. 1.2 ve 2.2) üzerinde genel bir mutabakat sağlandığı görülmektedir. Nitekim hem Terzaghi [1] hem de genel taşıma gücü bağıntısında  $N_c$  ve  $N_q$  taşıma gücü katsayıları için sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntılar kullanılmaktadır. Ancak Terzaghi [1] tarafından önerilen  $N_\gamma$  katsayı üzerinde genel bir mutabakat sağlanmış gibi görünmemektedir. Zira  $N_\gamma$  katsayısının belirlenmesi üzerine Terzaghi [1]'den sonra çok sayıda çalışma yapılmış olup, birçok araştırmacı tarafından farklı  $N_\gamma$  bağıntıları önerilmiştir. Bunlardan literatürde genel kabul görmüş olanları Çizelge 1'de verilmiştir.

*Çizelge 1. Literatürde önerilen bazı  $N_\gamma$  bağıntıları*

Kaynak	$N_\gamma$ bağıntıları	Eş. No
Hansen [9]	$N_\gamma = 1.8 (N_q - 1) \tan\phi$	(5.1)
Meyerhof [10]	$N_\gamma = (N_q - 1) \tan (1.4\phi)$	(5.2)
Hansen [13]	$N_\gamma = 1.5 (N_q - 1) \tan\phi$	(5.3)
Vesic [14]	$N_\gamma = 2 (N_q + 1) \tan\phi$	(5.4)
TBDY-2018 [19]	$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan\phi$	(5.5)

TBDY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısı Eurocode-7 (EC-7)'de [20] önerilen bağıntı ile aynı olup (Eş. 5.5), Çizelge 1'de bu bağıntıya da yer verilmiştir.

## 3. GENEL TAŞIMA GÜCÜ BAĞINTISINDA KULLANILAN DÜZELTME KATSAYILARI (CORRECTION FACTORS USED IN GENERAL BEARING CAPACITY EQUATION)

Genel taşıma gücü bağıntısında kullanılan ve literatürde genel kabul görmüş düzeltme katsayılarının önerildiği başlıca çalışmalar kronolojik sırayla aşağıda verilmiştir.

### 3.1. Skempton [6] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by Skempton [6])

Skempton [6], Terzaghi [1] tarafından önerilen taşıma gücü bağıntısını bazı düzeltme katsayılarıyla çarparak genişletme fikrini “muhtemelen” ilk ortaya atan ve uygulayan araştırmacı olmuştur. Skempton [6], killi zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesi üzerine yapmış olduğu çalışmada, Terzaghi [1] tarafından önerilen taşıma gücü bağıntısını temel şeklini ve temel derinliğini hesaba katacak şekilde genişletmek için  $N_c$  katsayısını  $s_c$  ve  $d_c$  katsayılarıyla çarpmıştır. Skempton [6] tarafından önerilen  $s_c$  ve  $d_c$  katsayıları sırasıyla Eş. 6.1 ve 6.2’de verilmiştir.

$$s_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L} \quad (6.1)$$

$$d_c = 1 + 0.2 \frac{D_f}{B} \quad (D_f/B < 2.5 \text{ için}) \quad (6.2)$$

$$d_c = 1.5 \quad (D_f/B > 2.5 \text{ için}) \quad (6.3)$$

Skempton [6]’ın çalışması killi zeminleri kapsadığı için Eş. 6.1 ila 6.3’te verilen bağıntılar  $\phi = 0^\circ$  için geçerlidir.

### 3.2. Meyerhof [7, 8] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by Meyerhof [7, 8])

Meyerhof [7], sıg temellerin taşıma gücünün hesaplamasında eksantrik ve eğimli yüklerin etkisini belirlemek için killi ve kumlu zeminler üzerinde laboratuvar ortamında küçük ölçekli model deneyler gerçekleştirmiş ve elde ettiği sonuçları grafikler halinde yayımlamıştır. Meyerhof [8], Meyerhof [7] tarafından elde edilen deneysel sonuçlara ve kuramsal çözümlere dayanarak eğimli yüklerin etkisini hesaba katmak için aşağıda verilen yük eğim katsayılarını önermiştir.

$$i_c = i_q = (1 - \delta/90^\circ)^2 \quad (7.1)$$

$$i_\gamma = (1 - \delta/\phi)^2 \quad (7.2)$$

Eş. 7.1 ve 7.2’deki  $\delta$  açısı derece cinsinden ifade edilmiştir.

### 3.3. Hansen [9] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by Hansen [9])

Hansen [9], Skempton [6] tarafından ortaya atılan taşıma gücü bağıntısını düzeltme katsayılarıyla çarparak genişletme fikrini benimsemiş ve taşıma gücü bağıntısına temel şeklini, temel derinliğini ve temele gelen yüklerin eğimini hesaba katan düzeltme katsayıları ekleyerek Eş. 8’de verilen bağıntıyı önermiştir.

$$q_u = cN_c s_c d_c i_c + \gamma_1 D_f N_q s_q d_q i_q + 0,5 \gamma_2 B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (8)$$

Hansen [9],  $N_c$  ve  $N_q$  için sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntıları (sırasıyla Eş. 1.2 ve 2.2) dikkate almış olup,  $N_\gamma$  için ise deneysel gözlemlerine dayanarak Eş. 5.1’de verilen bağıntıyı önermiştir (Çizelge 1).

Hansen [9], küçük ve tam ölçekli deney sonuçlarına dayanarak şekil katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$s_c = 1 + (0.2 + \tan^6 \phi) \frac{B}{L} \quad (8.1)$$

$$s_q = s_c - \frac{s_c - 1}{N_q} \quad (8.2)$$

$$s_\gamma = 1 - \frac{1}{2}(0.2 + \tan^6 \phi) \frac{B}{L} \quad (8.3)$$

Hansen [9],  $D_f \leq B$  için geçerli olmak üzere derinlik katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$d_c = 1 + 0.35 \frac{D_f}{B} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (8.4)$$

$$d_q = d_c - \frac{d_c - 1}{N_q} \quad (8.5)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (8.6)$$

Hansen [9], kuramsal çözümlere dayanarak yük eğim katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \quad (8.7)$$

$$i_q = \left[ 1 - \frac{H}{V + c A \cot \phi} \right]^2 \quad (8.8)$$

$$i_\gamma = (i_q)^2 = \left[ 1 - \frac{H}{V + c A \cot \phi} \right]^4 \quad (8.9)$$

### 3.4. Meyerhof [10] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by Meyerhof [10])

Meyerhof [11] Terzaghi [1]'den sonra taşıma gücü problemini kısmen teorik kısmen yarı-görgül çözümlerle ele alan ve Terzaghi [1]'ye alternatif olarak yeni bağıntılar/abaklar öneren bilinen ilk araştırmacıdır. Ancak Meyerhof [11] tarafından önerilen yöntemler oldukça karmaşık ve pratikte uygulaması zor olduğundan yaygınlaşmamıştır. Nitekim Meyerhof [10] sonraki yıllarda Skempton [6] ve Hansen [9] gibi Terzaghi [1] tarafından önerilen taşıma gücü bağıntısına çeşitli katsayılar ekleyerek genişletme fikrine katılmış ve Terzaghi [1] tarafından önerilen taşıma gücü bağıntısına şekil, derinlik ve yük eğim katsayıları ekleyerek Eş. 9'da verilen bağıntıyı önermiştir.

$$q_u = c N_c s_c d_c i_c + \gamma_1 D_f N_q s_q d_q i_q + 0.5 \gamma_2 B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (9)$$

Meyerhof [10], Hansen [9] gibi,  $N_c$  ve  $N_q$  için sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntıları (sırasıyla Eş. 1.2 ve 2.2) dikkate almış olup,  $N_\gamma$  için ise deneysel gözlemlerine dayanarak Eş. 5.2'de verilen bağıntıyı önermiştir (Çizelge 1). Meyerhof [10], şekil katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$s_c = 1 + 0.2 (B/L) \tan^2 (45 + \phi/2) \quad (9.1)$$

$$s_q = s_\gamma = 1 \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (9.2)$$

$$s_q = s_\gamma = 1 + 0.1 (B/L) \tan^2 (45 + \phi/2) \quad (\phi > 10^\circ \text{ için}) \quad (9.3)$$

Meyerhof [10], çeşitli deney sonuçlarına dayanarak  $D_f \leq B$  için geçerli olmak üzere derinlik katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$d_c = 1 + 0.2 (D_f/B) \tan (45+\phi/2) \quad (9.4)$$

$$d_q = d_\gamma = 1 \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (9.5)$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + 0.1 (D_f/B) \tan (45+\phi/2) \quad (\phi > 10^\circ \text{ için}) \quad (9.6)$$

Meyerhof [10], yük eğim katsayıları için Eş.7.1 ve 7.2’de verilen bağıntıları kullanmıştır.

Eş. 9.3 ve 9.6’da verilen bağıntıların  $\phi > 10^\circ$  olan zeminler için geçerli olduğu görülmektedir. Ancak Meyerhof’da [10] bunun nedeni ve  $\phi < 10^\circ$  olan zeminler için nasıl bir yol izlenmesi gerektiği hakkında herhangi bir açıklama yapılmamıştır.

### 3.5. De Beer [12] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by De Beer [12])

De Beer [12], üniform derecelenmiş ince kumlu zeminler üzerinde küçük boyutlu model temeller ( $B=36$  ve  $156$  mm) kullanarak laboratuvar ortamında gerçekleştirdiği deney sonuçlarına dayanarak içsel sürtünme açısının elde edilme yöntemine göre değişen iki farklı yaklaşımla çeşitli şekil katsayıları önermiştir. De Beer [12], içsel sürtünme açısının geleneksel üç eksenli basınç deneyi ile bulunması durumunda Eş.10.1 ile 10.3’te verilen şekil katsayılarının kullanılmasını önermiştir.

$$s_c = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_q - 1} \sin\phi \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (10.1)$$

$$s_c = 1,2 \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (10.2)$$

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \sin\phi \quad (10.3)$$

De Beer [12], içsel sürtünme açısının eğrisel yenilme zarfı üzerinden normal gerilme düzeyine bağlı olarak sekant açısıyla bulunması durumunda ise Eş.10.4 ile 10.6’da verilen bağıntıları önermiştir.

$$s_c = 1 + \frac{B}{L} \frac{N_q}{N_q - 1} \tan\phi \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (10.4)$$

$$s_c = 1,2 \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (10.5)$$

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan\phi \quad (10.6)$$

De Beer [12]’de,  $\phi > 0^\circ$  için  $s_c$  bağıntısı farklı bir biçimde Eş. 10.7’de verildiği gibi de sunulmuştur.

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1} \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (10.7)$$

Eş. 10.7’de  $s_q$  yerine Eş. 10.3 konulup gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Eş. 10.1 elde edilmektedir. Benzer şekilde Eş. 10.7’de  $s_q$  yerine Eş. 10.6 konulup yine gerekli sadeleştirmeler yapıldığında ise Eş. 10.4 elde edilmektedir. Ayrıca, Eş. 3.1’de verilen  $N_c$  bağıntısı Eş. 10.4’te yerine yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Eş 10.8 elde edilmektedir.

$$s_c = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{N_q}{N_c}\right) \quad (10.8)$$

Eş. 10.4 ve 10.8’de verilen  $s_c$  bağıntıları  $\phi > 0^\circ$  için aynı sonucu verse de  $\phi=0^\circ$  için farklı sonuçlar vermektedir. Zira  $\phi=0^\circ$  ve  $B/L=1$  için Eş. 10.4 ile  $s_c=1$  olarak hesaplanırken Eş. 10.8 ile  $s_c=1.2$  olarak hesaplanmaktadır.

De Beer [12]  $s_c$  bağıntılarında kullandığı  $N_c$  ve  $N_q$  katsayıları için sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntıları (sırasıyla Eş. 1.2 ve 2.2) dikkate almıştır. De Beer [12],  $s_\gamma$  için içsel sürtünme açısından bağımsız olarak Eş.10.9’da verilen bağıntıyı önermiştir.

$$s_\gamma = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad (10.9)$$

### 3.6. Hansen [13] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by Hansen [13])

Hansen [13]’in “A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity” başlıklı çalışması, vefatından bir yıl sonra Hansen’in adıyla Danimarka Geoteknik Enstitüsü tarafından, Hansen’in 1968’de Japonya’da verdiği ders notlarından derlenerek oluşturulmuş ve yayımlanmıştır [13].

Hansen [13], 1961 [9]’de önerdiği taşıma gücü bağıntısına temel tabanı eğimini ve temelin oturduğu zemin yüzeyinin eğimini de (şev açısını) hesaba katan yeni katsayılar ekleyerek Eş. 11’de verilen bağıntıyı önermiştir.

$$q_u = c N_c s_c d_c i_c b_c g_c + \gamma'_1 D_f N_q s_q d_q i_q b_q g_q + 0.5 \gamma'_2 B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma b_\gamma g_\gamma \quad (11)$$

Hansen [13],  $N_c$  ve  $N_q$  için ise sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntıları dikkate almış olup (sırasıyla Eş. 1.2 ve 2.2),  $N_\gamma$  için ise Eş. 5.3’te verilen bağıntıyı önermiştir (Çizelge 1). Hansen [13], yük eğim katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$i_c = 0.5 - 0.5 \sqrt{1 - \frac{H}{cA}} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.1)$$

$$i_q = \left[1 - \frac{0.5H}{V + c A \cot\phi}\right]^5 \quad (11.2)$$

$$i_\gamma = \left[1 - \frac{0.7H}{V + c A \cot\phi}\right]^5 \quad (11.3)$$

Hansen [13] temel tabanı eğim katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$b_c = \frac{\alpha}{147} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.4)$$

$$b_q = e^{-2\alpha \tan\phi} \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (11.5)$$

$$b_\gamma = e^{-2.7\alpha \tan\phi} \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (11.6)$$

$\alpha$  açısı Eş. 11.4’te derece, Eş. 11.5 ve 11.6’da ise radyan cinsinden alınmalıdır. Hansen [13] zemin yüzeyi eğim katsayıları için aşağıda verilen bağıntılar önermiştir.



$$g_c = \frac{\beta}{147} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.7)$$

$$g_q = g_\gamma = (1 - 0.5 \tan\beta)^5 \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (11.8)$$

Eş. 11.7 ve 11.8'de  $\beta$  açısı derece cinsinden alınmalıdır. Hansen [13]'da  $\phi > 0^\circ$  için  $i_c$ ,  $b_c$  ve  $g_c$  katsayısı verilmediği görülmektedir.

Eş. 11.4 ve 11.7'de verilen  $b_c$  ve  $g_c$  bağıntıları irdelenecek olursa, temel tabanındaki veya zemin yüzeyindeki küçük bir eğimin (şev açısının) temelin taşıma gücünü önemli ölçüde azaltacağı görülmektedir. Örneğin temel tabanı  $\alpha = 5^\circ$ 'lik bir eğimle tasarlanacak olursa, Eş. 11.4 ile  $b_c$  katsayısı 0.034 olarak hesaplanmaktadır. Bu da, taşıma gücü bağıntısının birinci teriminin 0.034 ile çarpılması demektir ki bunun da taşıma gücünü beklenmedik bir biçimde ve önemli ölçüde azaltacağı aşikârdır. Aynı durum  $g_c$  bağıntısı için de geçerlidir. Belki de bu yüzden olsa gerek, bazı kaynaklarda (Ör. [21]) Eş. 11.4 ve 11.7'de verilen  $b_c$  ve  $g_c$  bağıntıları Hansen'a [13] atıf yapılmak suretiyle aşağıdaki gibi düzeltilerek verilmiştir.

$$b_c = 1 - \frac{\alpha}{147} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.9)$$

$$g_c = 1 - \frac{\beta}{147} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.10)$$

Hansen [13], De Beer [12] tarafından önerilen  $s_q$  ve  $s_\gamma$  katsayılarının ve Skempton [6] tarafından önerilen  $s_c$  katsayısının düşey yükler için geçerli olduğunu belirtmiş ve bu katsayıları yük eğim katsayıları eklemek suretiyle şekil katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$s_c = 0,2 \frac{B}{L} i_c \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.11)$$

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \sin\phi i_q \quad (11.12)$$

$$s_\gamma = 1 - 0,4 \frac{B}{L} i_\gamma \quad (11.13)$$

Eş. 11.11 – 11.13'te verilen bağıntılar eğimli yükün yatay bileşeni ( $H$ ) temelin kısa kenarına ( $B$ ) paralel olduğu durumlar için geçerli olup, eğimli yükün yatay bileşeni ( $H$ ) temelin uzun kenarına ( $L$ ) paralel olduğunda bu bağıntılarda  $B/L$  yerine  $L/B$  yazılması gerekmektedir [13].

Eş. 11.11'de verilen  $s_c$  bağıntısında da tıpkı  $b_c$  ve  $g_c$  bağıntılarında olduğu gibi bir eksiklik olduğu görülmektedir. Zira Eş. 11.11'e göre  $s_c$  katsayısı düşey yüklü kare temeller için 0.2, şerit temeller için ise çok daha düşük değerler almaktadır ki, bunun da taşıma gücünün beklenmedik bir biçimde düşüreceği aşikârdır. Hansen [13] tarafından  $s_c$  katsayısı için atıf yapılan orijinal kaynağa [6] bakıldığında şekil katsayısının  $1+0.2(B/L)$  şeklinde verildiği görülmektedir (Eş. 6.1). Ayrıca Hansen'ın 1961'deki [9] çalışmasında da  $s_c$  katsayısı Skempton [6]'a atıf yapılarak verilirken bağıntının  $s_c=1+0.2(B/L)$  şeklinde verildiği görülmektedir. Bu durumda, Hansen'da [13]  $s_c$  bağıntısı verilirken +1 teriminin "sehven" unutulduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle Hansen [13] tarafından önerilen  $s_c$  bağıntısının aşağıdaki gibi düzeltilerek verilmesinin daha doğru olacağı değerlendirilmiştir.

$$s_c = 1 + 0,2 \frac{B}{L} i_c \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.14)$$

Hansen [13] tarafından önerilen bağıntılarda, yük eğim katsayılarının ( $i_c$ ,  $i_q$ ,  $i_\gamma$ ) hem taşıma gücü bağıntısında (Eş. 11) hem de şekil katsayıları ile birlikte (Eş. 11.11 – 11.14) olmak üzere iki kere kullanıldığı görülmektedir. Ancak, Hansen'da [13] bu konuyla ilgili herhangi bir açıklama bulunmamaktadır.

Hansen'da [13],  $D_f \leq B$  için geçerli olmak üzere derinlik katsayıları için aşağıda verilen bağıntılar önerilmiştir.

$$d_c = 0.4 (D_f/B) \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.15)$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 (D_f/B) \quad (11.16)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (11.17)$$

Hansen'da [13],  $D_f > B$  için aşağıda verilen derinlik katsayısı bağıntıları önerilmiştir.

$$d_c = 0.4 \arctan (D_f/B) \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (11.18)$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \phi (1 - \sin \phi)^2 \arctan (D_f/B) \quad (11.19)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (11.20)$$

Eş.11.18 ve 11.19'daki arctanlı terimler radyan olarak hesaplanmalıdır. Hansen'da [13],  $\phi > 0$  için  $d_c$  katsayısı verilmediği görülmektedir. Hansen [13], derinliğin fazla olması durumunda derinlik katsayısı hesaplamının zor olduğunu ve  $D_f > B$  için geçerli olan bağıntıları "tereddütlü" bir şekilde önerdiğini ifade etmiştir [13].

Eş. 11.15 ve 11.18'de verilen  $d_c$  bağıntıları irdelenecek olursa bu bağıntıların da tıpkı  $s_c$ ,  $b_c$  ve  $g_c$  bağıntıları gibi "sehven" eksik verildiği ve bu nedenle taşıma gücünü beklenmedik bir şekilde azaltacağı görülmektedir. Örneğin 10 m genişliğindeki bir temelin 3 m derinliğe inşa edileceği düşünülecek olursa, Eş. 11.15 ile  $d_c$  katsayısı 0,12 olarak hesaplanmaktadır. Bunun da, taşıma gücünü önemli ölçüde azaltacağı aşikârdır. Hâlbuki derinlik katsayıları temel tabanı seviyesinin üstündeki zeminin kesme dayanımını hesaba katmak için taşıma gücü bağıntısına ilave edilmiştir. Dolayısıyla taşıma gücünü bir miktar arttırması beklenir. Bu nedenle tıpkı  $s_c$ , bağıntısında olduğu gibi  $d_c$  bağıntılarında da +1 teriminin Danimarka Geoteknik Enstitüsü tarafından "sehven" unutulduğu düşünülmektedir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, Hansen [13] tarafından önerilen  $d_c$  bağıntılarının aşağıdaki gibi düzeltilerek kullanılmasının daha doğru olacağı değerlendirilmiştir.

$$d_c = 1 + 0.4 (D_f/B) \quad (\phi = 0^\circ \text{ ve } D_f \leq B \text{ için}) \quad (11.21)$$

$$d_c = 1 + 0.4 \arctan (D_f/B) \quad (\phi = 0^\circ \text{ ve } D_f > B \text{ için}) \quad (11.22)$$

Nitekim bazı kaynaklarda da (Ör. [14, 16-18, 21])  $d_c$  bağıntıları Hansen'a [13] atf yapılarak verilirken Eş. 11.21 ve 11.22'deki gibi bağıntılara +1 eklenerek verildiği görülmektedir.

### 3.7. Vesić [14] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by Vesić [14])

Vesić [14],  $N_c$  ve  $N_q$  taşıma gücü katsayıları için sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntıları dikkate almış olup (sırasıyla Eş. 1.2 ve 2.2),  $N_\gamma$  için ise Eş. 5.4'de verilen bağıntıyı önermiştir (Çizelge 1). Vesić [14], şekil katsayıları için De Beer [12] tarafından önerilen  $\tan \phi$ 'li bağıntıları (Eş. 10.6, 10.8 ve 10.9), derinlik katsayıları için ise Hansen [13] tarafından önerilen bağıntıları dikkate almıştır. Vesić [14],  $\phi > 0^\circ$  ve  $D_f \leq B$  için Hansen'da [13] verilmeyen  $d_c$  katsayısı için Eş. 12.1'de verilen bağıntıyı önermiştir.

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_q \tan \phi} \quad (\phi > 0^\circ \text{ ve } D_f \leq B \text{ için}) \quad (12.1)$$

Vesić [14], her ne kadar çalışmasında derinlik katsayılarına yer vermiş olsa da sığ temel tasarımı yapılırken taşıma gücü hesaplamalarında derinlik düzeltme katsayılarının kullanılmasını önermemiştir.

### 3.8. Vesić [15] Tarafından Önerilen Düzeltme Katsayıları (Correction Factors Proposed by Vesić [15])

Vesić [15], 1973'deki çalışmasında [14] olduğu gibi  $N_c$  ve  $N_q$  için sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntıları,  $N_\gamma$  için ise Vesić [14] tarafından önerilen bağıntıyı dikkate almıştır (Eş. 5.4; Çizelge 1).

Vesić [15], şekil katsayıları için De Beer [12] tarafından önerilen  $\tan\phi$ 'li bağıntıları (Eş. 10.6, 10.8 ve 10.9), derinlik katsayıları için ise Hansen [13] tarafından önerilen bağıntıları dikkate almış, ancak  $d_c$  için  $\phi > 0^\circ$  ve  $D_f \leq B$  için geçerli olmak üzere Eş. 13.1'de verilen bağıntıyı önermiştir.

$$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \tan \phi} \quad (\phi > 0^\circ \text{ ve } D_f \leq B \text{ için}) \quad (13.1)$$

Vesić [15] çalışmasında her ne kadar 1973'deki çalışmasında [14] olduğu gibi derinlik katsayılarına yer vermiş olsa da sığ temel tasarımı yapılırken taşıma gücü hesaplamalarında derinlik düzeltme katsayılarının kullanılmasını önermemiştir.

Vesić [15], yük eğim katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$i_c = 1 - \frac{mH}{cAN_c} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (13.2)$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \phi} \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (13.3)$$

$$i_q = \left[ 1 - \frac{H}{V + cA \cot \phi} \right]^m \quad (13.4)$$

$$i_\gamma = \left[ 1 - \frac{H}{V + cA \cot \phi} \right]^{m+1} \quad (13.5)$$

Vesić [15], Eş. 13.2 ve 13.3'de kullandığı  $N_c$  katsayısı için Prandtl [2] tarafından geliştirilen bağıntıyı (Eş. 1.2) dikkate almıştır. Eş. 13.2-13.5'te görülen  $m$  katsayısı eğik yükün yönüne göre aşağıda verilen bağıntılarla hesaplanabilmektedir.

$$m = m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L} \quad (\text{Yükün eğim yönü temelin kısa kenarına doğru ise}) \quad (13.6)$$

$$m = m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B} \quad (\text{Yükün eğim yönü temelin uzun kenarına doğru ise}) \quad (13.7)$$

Vesić [15], temel tabanı eğim katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$b_c = 1 - \frac{2\alpha}{\pi + 2} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (13.8)$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \phi} \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (13.9)$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \phi)^2 \quad (13.10)$$

Hesaplamalarda, Eş. 13.8 ve 13.10'da görülen  $\alpha$  açısı radyan cinsinden alınmalıdır.  $\alpha$  açısı derece cinsinden ifade edildiğinde bu bağıntılar aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$b_c = 1 - \frac{\alpha}{147.3} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (13.11)$$

$$b_q = b_\gamma = \left(1 - \frac{\alpha}{57.3} \tan \phi\right)^2 \quad (13.12)$$

Vesić [15], zemin yüzeyi (şev) eğim katsayıları için aşağıda verilen bağıntıları önermiştir.

$$g_c = 1 - \frac{2\beta}{\pi + 2} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (13.13)$$

$$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \tan \phi} \quad (\phi > 0^\circ \text{ için}) \quad (13.14)$$

$$g_q = g_\gamma = (1 - \tan \beta)^2 \quad (13.15)$$

Hesaplamalarda,  $\beta$  açısı Eş. 13.13'te radyan, Eş. 13.15'de ise derece cinsinden alınmalıdır. Eş. 13.13'te  $\beta$  açısı derece cinsinden ifade edildiğinde  $g_c$  bağıntısı aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$g_c = 1 - \frac{\beta}{147.3} \quad (\phi = 0^\circ \text{ için}) \quad (13.16)$$

Vesić [15], önerdiği temel tabanı eğim katsayılarının  $\alpha < 45^\circ$  için, zemin yüzeyi eğim katsayılarının ise  $\beta < 45^\circ$  için geçerli olduğunu, ayrıca bu bağıntıların geçerli olabilmesi için  $\beta < \phi$  olması gerektiğini belirtmiştir.

#### 4. ŞEKİL, DERİNLİK VE $N_\gamma$ KATSAYILARININ KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF THE SHAPE, DEPTH AND $N_\gamma$ FACTORS)

Literatürde önerilen farklı bağıntılar kullanılarak hesaplanan şekil, derinlik ve  $N_\gamma$  katsayılarının temel tasarımını ne düzeyde etkilediğini ortaya koyabilmek için öncelikle bu düzeltme katsayıları kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

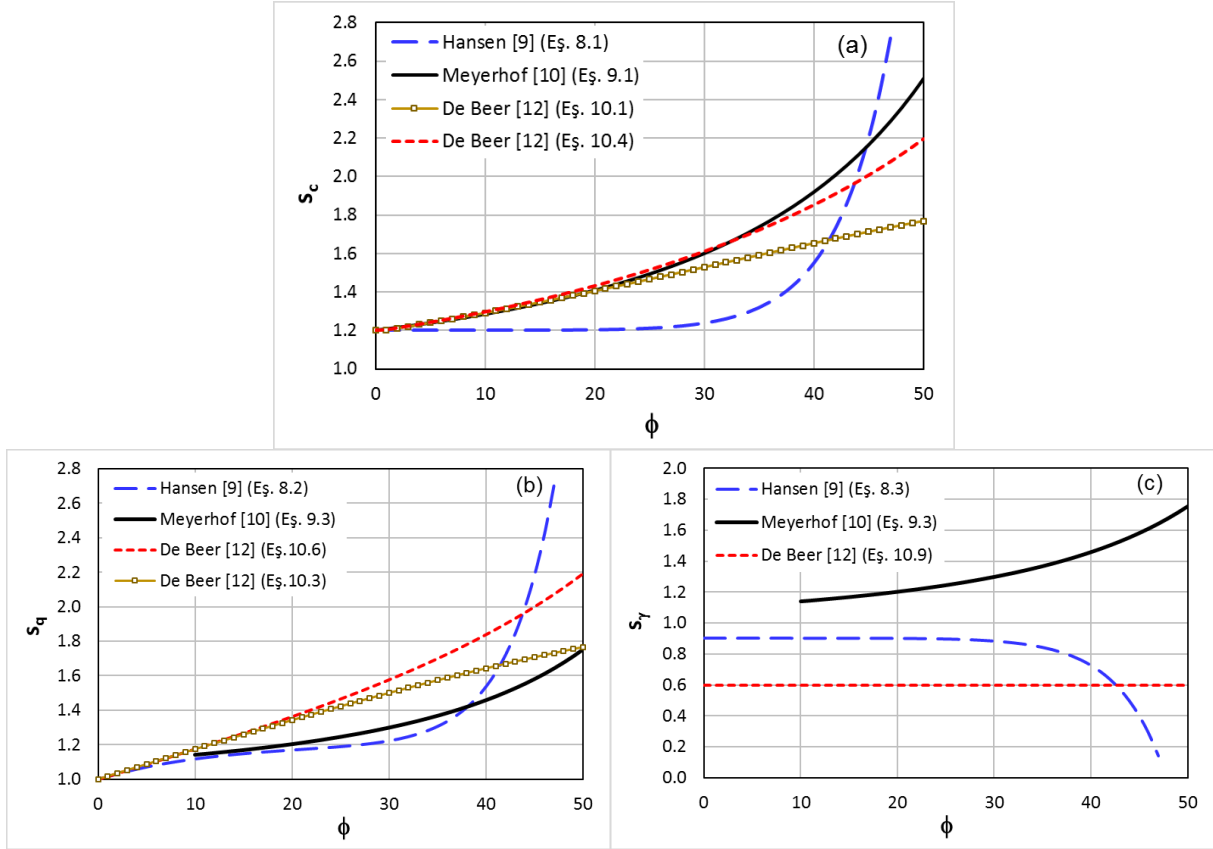
##### 4.1. Şekil Katsayılarının Karşılaştırılması (Comparison of the Shape Factors)

Şekil katsayıları için Skempton [6], Meyerhof [10], Hansen [9], Hansen [13] ve De Beer [12] tarafından çeşitli bağıntılar önerildiği görülmektedir. Skempton [6] sadece  $s_c$  katsayısı için bir bağıntı önermiş olup bu bağıntı da sadece  $\phi=0^\circ$  için geçerlidir. Hansen [13] ise Skempton [6] ve De Beer [12] tarafından önerilen bağıntılara yük eğim katsayısı ekleyerek kısmen modifiye etmiş olup, yükün temele dik gelmesi durumunda bu bağıntılar Skempton [6] ve De Beer'in [12] bağıntılarıyla aynı olmaktadır. Bu nedenle şekil katsayıları karşılaştırılırken Skempton [6] ve Hansen [13] tarafından önerilen bağıntılar dikkate alınmamıştır.

Hansen [13], Meyerhof [10] ve De Beer [12] tarafından önerilen bağıntılarla  $\phi = 0^\circ$ 'den  $50^\circ$ 'ye kadar hesaplanan  $s_c$ ,  $s_q$  ve  $s_\gamma$  katsayılarının içsel sürtünme açısı ile değişimini gösteren grafikler Şekil 2'de sunulmuştur. Meyerhof [10] tarafından önerilen  $s_q$  ve  $s_\gamma$  bağıntısı  $\phi > 10^\circ$  için geçerli olduğundan Şekil 2b ve 2c'de Meyerhof [10]'un bağıntısıyla sadece  $\phi > 10^\circ$  için hesaplanan  $s_q$  ve  $s_\gamma$  değerleri verilmiştir.

$s_c$  değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 2a); Meyerhof'un [10] ve De Beer'in [12] bağıntılarıyla hesaplanan  $s_c$  değerlerinin yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'ye kadar hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Meyerhof'un [10] ve De Beer'in [12]  $\tan \phi$ 'li bağıntısıyla hesaplanan  $s_c$  değerlerinin ise yaklaşık  $\phi=35^\circ$ 'ye kadar hemen hemen aynı olduğu,  $\phi=35^\circ$ 'den sonra ise Meyerhof'un [10]  $s_c$  değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. De Beer'in [12]  $\sin \phi$ 'li ve  $\tan \phi$ 'li bağıntılarıyla hesaplanan  $s_c$  değerlerinin ise yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'ye kadar hemen hemen aynı olduğu,  $\phi=20^\circ$ 'den sonra ise  $\tan \phi$ 'li bağıntılarla hesaplanan  $s_c$  değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Hansen'in [9] bağıntısı ile hesaplanan  $s_c$  değerlerinin ise Meyerhof [10] ve De Beer'in [12]

bağıntılarıyla hesaplanan  $s_c$  değerlerine kıyasla farklı bir eğilim sergilediği görülmektedir. Hansen'ın [9] bağıntısı ile hesaplanan  $s_c$  değerleri  $\phi=30^\circ$ 'ye kadar önemli bir değişim göstermezken,  $\phi=30^\circ$ 'den sonra ise hızlı artmaktadır (Şekil 2a).



Şekil 2. Kare temeller için farklı bağıntılarla hesaplanan; **a)**  $s_c$ , **b)**  $s_q$  ve **c)**  $s_\gamma$  değerlerinin içsel sürtünme açısı ile değişimi

$s_q$  değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 2b); Meyerhof [10]'un  $s_q$  değerlerinin De Beer [12]'in  $\sin\phi$ 'li ve  $\tan\phi$ 'li  $s_q$  değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. De Beer [12]'in  $\sin\phi$ 'li ve  $\tan\phi$ 'li bağıntılarıyla hesaplanan  $s_q$  değerlerinin ise yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'ye kadar hemen hemen aynı olduğu,  $\phi=20^\circ$ 'den sonra ise  $\tan\phi$ 'li bağıntılarla hesaplanan  $s_q$  değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Hansen [9]'ın  $s_q$  değerlerinin ise yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'ye kadar Meyerhof [10]'un  $s_q$  değerlerine yakın olduğu, De Beer [12]'in  $\sin\phi$ 'li ve  $\tan\phi$ 'li  $s_q$  değerlerinden ise daha düşük olduğu görülmektedir. Hansen [9]'ın  $s_q$  değerlerinin yaklaşık  $\phi=30^\circ$ 'den sonra hızlı arttığı görülmektedir (Şekil 2b).

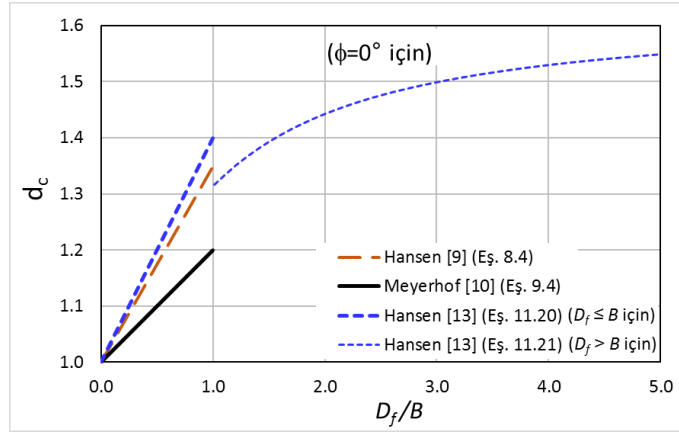
$s_\gamma$  değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 2c); Meyerhof [10]'un bağıntısıyla hesaplanan  $s_\gamma$  değerleri içsel sürtünme açısı ile birlikte artarken, De Beer [12]'in bağıntısıyla hesaplanan  $s_\gamma$  değerlerinin sabit kaldığı, Hansen [9]'ın bağıntısıyla hesaplanan  $s_\gamma$  değerlerinin ise yaklaşık  $\phi=30^\circ$ 'ye kadar önemli bir değişim göstermediği,  $\phi=30^\circ$ 'den sonra ise hızla azaldığı görülmektedir (Şekil 2c).

#### 4.2. Derinlik Katsayılarının Karşılaştırılması (Comparison of the Depth Factors)

Sığ temeller genellikle derinliği genişliğinden küçük veya ona eşit ( $D_f \leq B$ ) temel olarak tanımlanmaktadır [1]. Bu nedenle literatürde derinlik düzeltmesi için önerilen bağıntılar genellikle  $D_f \leq B$  için geçerlidir.  $D_f > B$  için sadece Hansen [13] tarafından bir bağıntı önerilmiş olup bu bağıntı da  $\phi=0^\circ$  için geçerlidir.  $D_f \leq B$  için Hansen [9, 13] ve Meyerhof [10] tarafından  $\phi=0^\circ$  ve  $\phi>0^\circ$  için önerilen bağıntılarla hesaplanan derinlik katsayıları ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

#### 4.2.1. $\phi=0^\circ$ için önerilen derinlik katsayılarının karşılaştırılması (Comparison of the depth factors proposed for $\phi=0^\circ$ )

$\phi=0^\circ$  için Hansen [9, 13] ve Meyerhof [10] tarafından önerilen bağıntılarla hesaplanan  $d_c$  değerlerinin  $D_f/B$  oranıyla değişimini gösteren grafikler Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te, Hansen'ın [13]  $D_f > B$  için önerdiği bağıntıyla hesaplanan  $d_c$  değerleri de verilmiştir.  $\phi=0^\circ$  için Hansen [9, 13] ve Meyerhof [10] tarafından  $d_q=d_\gamma=1$  alınabileceği belirtildiğinden bu katsayılar için herhangi bir karşılaştırma yapılmamıştır.



Şekil 3.  $\phi=0^\circ$  için farklı bağıntılarla hesaplanan  $d_c$  değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3 incelendiğinde  $D_f/B$  oranı arttıkça beklenildiği gibi  $d_c$  değerlerinin de arttığı görülmektedir.  $D_f \leq B$  için hesaplanan  $d_c$  değerleri karşılaştırıldığında Meyerhof [10] ile hesaplanan  $d_c$  değerlerinin Hansen'ın [9, 13] bağıntılarıyla hesaplanan  $d_c$  değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Hansen'ın [13]  $D_f \leq B$  ve için  $D_f > B$  için önerdiği bağıntılarla hesaplanan  $d_c$  değerlerinin  $D_f/B=1$  noktasında süreksizlik gösterdiği de Şekil 3'ten görülmektedir.

#### 4.2.2. $\phi>0^\circ$ için önerilen derinlik katsayılarının karşılaştırılması (Comparison of the depth factors proposed for $\phi>0^\circ$ )

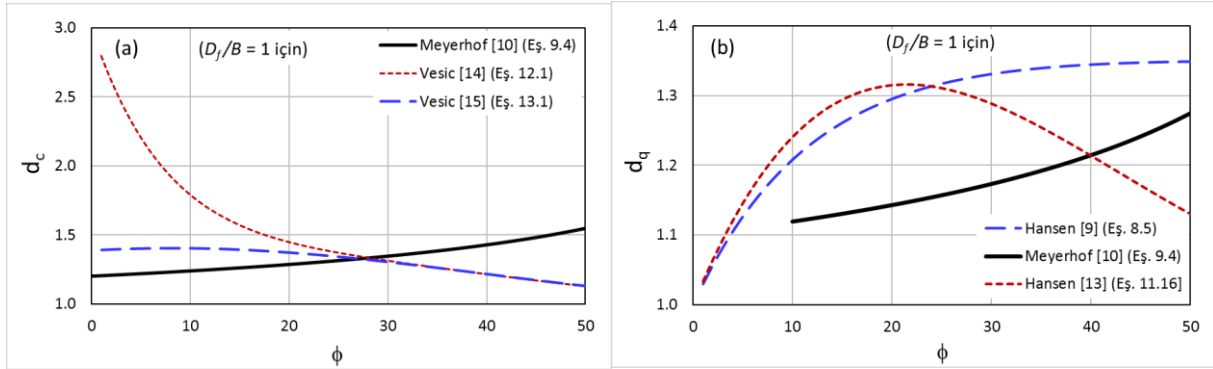
$d_c$  katsayısı için Meyerhof [10] ve Vesic [14, 15] tarafından,  $d_q$  katsayısı için ise Meyerhof [10] ve Hansen [9, 13] tarafından önerilen bağıntılarla  $\phi>0^\circ$  ve  $D_f/B=1$  için hesaplanan  $d_c$  ve  $d_q$  değerleri Şekil 4'te karşılaştırılmıştır.

Şekil 4a incelendiğinde, Meyerhof [10] ile hesaplanan  $d_c$  değerlerinin  $\phi$  ile birlikte arttığı, Vesic [14, 15] ile hesaplanan  $d_c$  değerlerinin ise azaldığı görülmektedir. Özellikle Vesic [14] ile hesaplanan  $d_c$  değerlerinin  $\phi$  ile birlikte hızla azaldığı görülmektedir. Meyerhof [10] ve Vesic [15] ile hesaplanan  $d_c$  değerleri karşılaştırıldığında, yaklaşık  $\phi=28^\circ$ 'ye kadar Vesic [15] ile hesaplanan  $d_c$  değerlerinin,  $\phi=28^\circ$ 'den sonra ise Meyerhof [10] ile hesaplanan  $d_c$  değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4).

Şekil 4b incelendiğinde, Meyerhof [10] ve Hansen [9] tarafından önerilen bağıntılarla hesaplanan  $d_q$  değerlerinin  $\phi$  ile birlikte arttığı, Hansen [13] ile hesaplanan  $d_q$  değerlerinin ise yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'ye kadar arttığı,  $\phi=20^\circ$ 'den sonra ise azalmaya başladığı görülmektedir.

Meyerhof'da [10]  $d_q = d_\gamma$  olduğu, Hansen'da [9, 13] ise her durumda  $d_\gamma=1$  alınabileceğini belirtildiğinden  $d_\gamma$  için herhangi bir karşılaştırma yapılmamıştır.

Şekil 4'te sunulan karşılaştırmalar  $D_f/B=1$  için geçerli olup,  $D_f/B$  oranı değiştiğinde bağıntılar arasındaki sıralamanın değişip değişmeyeceğini görmek için  $D_f/B=0.5$  ve  $D_f/B=0.25$  için de  $d_c$  ve  $d_q$  katsayıları hesaplanıp sonuçları karşılaştırılmış ve tipik olarak Şekil 4'tekine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle fazladan yer kaplamaması için  $D_f/B=0.5$  ve  $D_f/B=0.25$  için elde edilen grafikler bu çalışmada sunulmamıştır.



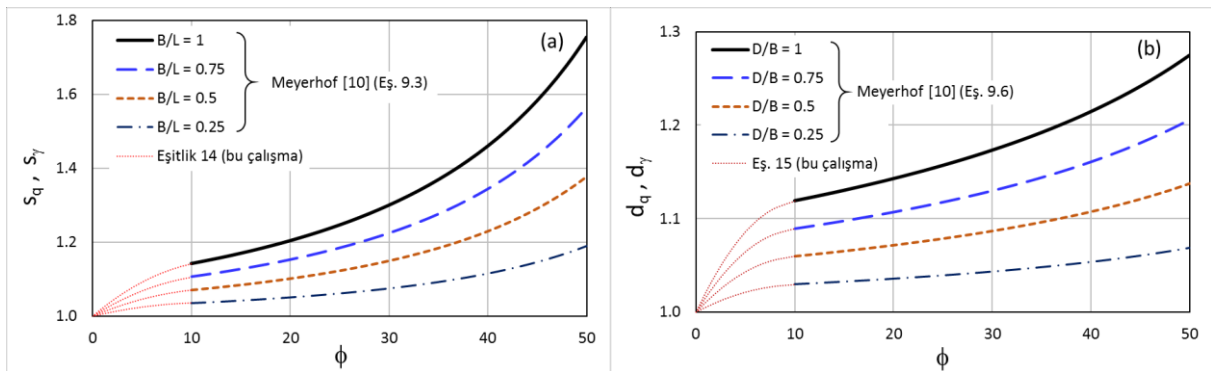
Şekil 4.  $\phi > 0^\circ$  ve  $D_f/B=1$  için farklı bağıntularla hesaplanan; a)  $d_c$  değerlerinin, b)  $d_q$  değerlerinin karşılaştırılması

#### 4.2.3. Meyerhof [10]'un bağıntılarına $\phi \leq 10^\circ$ için şekil ve derinlik katsayılarının eklenmesi (Adding shape and depth factors for $\phi \leq 10^\circ$ to the Meyerhof [10]'s equations)

Meyerhof [10]'un  $s_q$ ,  $s_\gamma$  ve  $d_q$ ,  $d_\gamma$  bağıntıları (Eş. 9.3 ve 9.6)  $\phi=0^\circ$  ile  $10^\circ$  arasındaki zeminler için geçerlidir. Bu nedenle bu katsayıların  $\phi \leq 10^\circ$  olan zeminlerin taşıma gücü hesaplamalarında kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için Meyerhof [10] tarafından önerilen bağıntularla çizilen grafiklere dış kestirim yapılarak  $\phi \leq 10^\circ$  olan zeminler için  $s_q$ ,  $s_\gamma$  ve  $d_q$ ,  $d_\gamma$  bağıntıları elde edilmiştir. Bu amaçla,  $\phi > 10^\circ$  için çizilen  $s_q$ ,  $s_\gamma$  ve  $d_q$ ,  $d_\gamma$  grafiklerinin genel gidişatına uygun olacak şekilde  $\phi=10^\circ$ 'den  $\phi=0^\circ$ 'ye kadar uzanan birkaç adet dış kestirim noktası yerleştirilmiş ve eğri uydurma yöntemiyle bu noktalardan geçen eğrinin denklemleri bulunmuştur. Bu şekilde bulunan denklemler Eş. 14 ve 15'te, bu denklemlerle hesaplanan  $s_q$ ,  $s_\gamma$  ve  $d_q$ ,  $d_\gamma$  değerleri ise Şekil 5'te sunulmuştur.

$$s_q = s_\gamma = 1 + (1.3 \tan \phi - 2.9 \tan^2 \phi) (B/L) \quad (\phi \leq 10^\circ \text{ için}) \quad (14)$$

$$d_q = d_\gamma = 1 + (1.3 \tan \phi - 3.6 \tan^2 \phi) (D_f/B) \quad (\phi \leq 10^\circ \text{ için}) \quad (15)$$

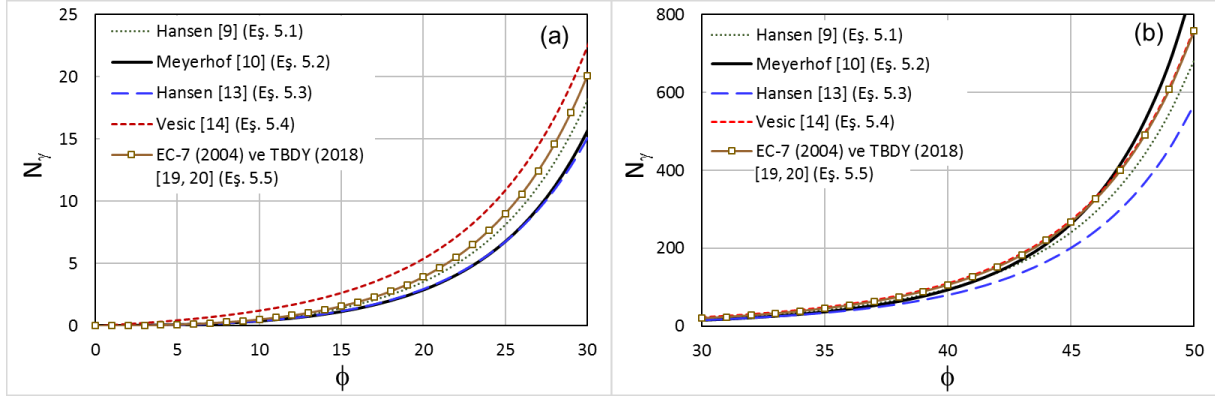


Şekil 5.  $\phi \leq 10^\circ$  için Meyerhof'un [10] bağıntılarına dış kestirim yoluyla eklenen; a)  $s_q$ ,  $s_\gamma$  ve b)  $d_q$ ,  $d_\gamma$  değerleri

#### 4.4. $N_\gamma$ Taşıma Gücü Katsayılarının Karşılaştırılması (Comparison of the $N_\gamma$ Factors)

Literatürde genel kabul görmüş  $N_\gamma$  değerlerini karşılaştırmak için Çizelge 1'de sunulan bağıntularla  $\phi=0^\circ$ 'den  $\phi=50^\circ$ 'ye kadar  $N_\gamma$  değerleri hesaplanmış ve sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur.  $N_\gamma$  değerleri

arasındaki farkı daha yakından görebilmek için sonuçlar  $\phi$ 'ye göre ikiye bölünmüş ve Şekil 6a'da  $\phi=0^\circ-30^\circ$  arasındaki değerler için, Şekil 6b'de ise  $\phi=30^\circ-50^\circ$  arasındaki değerler için hesaplanan  $N_\gamma$  değerleri verilmiştir.



Şekil 6. Farklı bağıntılarla; a)  $\phi=0^\circ-30^\circ$  için, b)  $\phi=30^\circ-50^\circ$  için hesaplanan  $N_\gamma$  değerleri

Şekil 6'dan görüldüğü gibi, en yüksek  $N_\gamma$  değerleri yaklaşık  $\phi=45^\circ$ 'ye kadar Vesic'in [14],  $\phi=45^\circ$ 'den sonra ise Meyerhof [10]'un bağıntısıyla hesaplanmıştır. En düşük  $N_\gamma$  değerleri ise yaklaşık  $\phi=25^\circ$ 'ye kadar Meyerhof [10]'un,  $\phi=25^\circ$ 'den sonra ise Hansen'in [13] bağıntısıyla elde edilmiştir (Şekil 6). Yaklaşık  $\phi=25^\circ$ 'ye kadar en yüksek ve en düşük sonuçları veren Vesic [14] ile Meyerhof'un [10]  $N_\gamma$  değerleri arasında yaklaşık 2 kat fark olduğu görülmüştür. Örneğin  $\phi=18^\circ$  için  $N_\gamma$  değeri Meyerhof [10]'un bağıntısıyla 2 olarak hesaplanırken, Vesic'in [14] bağıntısıyla 4 olarak hesaplanmaktadır. TBDY 2018'de [19] önerilen bağıntıyla hesaplanan  $N_\gamma$  değerlerinin ise yaklaşık  $\phi=45^\circ$ 'ye kadar Meyerhof [10] ile hesaplanan değerlerden daha yüksek, Vesic [14] ile hesaplanan değerlerden ise daha düşük olduğu görülmüştür.

## 5. FARKLI DÜZELTME KATSAYILARIYLA HESAPLANAN EMNİYETLİ TAŞIMA GÜCÜ DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF ALLOWABLE BEARING CAPACITY VALUES CALCULATED WITH DIFFERENT CORRECTION FACTORS)

Farklı araştırmacılar tarafından önerilen bağıntılarla hesaplanan şekil, derinlik ve  $N_\gamma$  katsayıları ayrı ayrı karşılaştırıldığında aralarında önemli farklar olduğu görülmüştür. Ancak taşıma gücü bağıntısında bu katsayılar bir arada kullanıldığı için, katsayılar arasındaki bu farkın taşıma gücünü ne ölçüde yansıdığını görebilmek için bu katsayıların çeşitli kombinasyonlarıyla taşıma gücü bağıntıları oluşturulmuş ve bu bağıntılarla örnek senaryolar üzerinde emniyetli taşıma gücü değerleri hesaplanmış ve sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Emniyetli taşıma gücünün hesaplanmasında güvenlik katsayısı 3 olarak alınmıştır.

Taşıma gücü hesaplamalarında kullanılmak üzere örnek senaryoların oluşturulmasında tek dairesel konut tipi bir bina seçilmiştir. Yapı yüklerinin radye temel sistemiyle zemine aktarılacağı kabul edilmiş ve radye temel ölçüleri ambatan genişliği dâhil  $16 \times 10$  m olarak ( $B/L=0.625$ ) tasarlanmıştır. Binada 1 kat bodrum olacağı düşünülmüş ve temel taban kotu  $-3.0$  m ( $D_f = 3$  m) olarak tasarlanmıştır ( $D_f/B=0.3$ ). Binanın düz bir zemine inşa edileceği düşünülmüş ve zeminde  $D_f+B$  derinliği içinde yeraltı suyu rastlanmadığı kabul edilmiştir. Zeminin doğal birim hacim ağırlığı  $\gamma_n=18$  kN/m<sup>3</sup> olarak alınmış ve derinlikle birlikte değişmediği kabul edilmiştir. Zemin dayanımı bakımından farklı durumları senaryo edebilmek için suya doymuş killi zeminleri temsilen  $\phi=0^\circ$  analizlerinin yanı sıra, kumlu-siltli-killi zeminleri temsilen  $c, \phi$  analizleri de yapılmıştır.  $c, \phi$  analizlerinde zeminin kohezyonu  $c=20$  kPa ile  $200$  kPa, içsel sürtünme açısı ise  $\phi=0^\circ$  ile  $40^\circ$  arasında değiştirilerek farklı  $c, \phi$  kombinasyonları için taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda zeminin  $c, \phi$  değerlerinin derinlik boyunca değişmediği kabul edilmiştir.



### 5.1. $\phi=0^\circ$ İçin Yapılan Analizler (The Analysis Performed For $\phi=0^\circ$ )

Tasarlanan kurgusal senaryoya uygun olarak  $\phi=0^\circ$ ,  $B/L=0.625$  ve  $D_f/B=0.3$  için bu çalışmada ele alınan farklı bağıntılarla hesaplanan şekil ve derinlik katsayıları Çizelge 2’de sunulmuştur.

**Çizelge 2.**  $\phi=0^\circ$ ,  $B/L=0.625$  ve  $D_f/B=0.3$  için farklı bağıntılarla hesaplanan şekil ve derinlik katsayıları

Kaynak	Şekil Katsayıları			Derinlik Katsayıları		
	$s_c$	$s_q$	$s_\gamma$	$d_c$	$d_q$	$d_\gamma$
Skempton [6]	1.125	-	-	1.06	-	-
Meyerhof [10]	1.125	1	1	1.06	1	1
Hansen [9]	1.125	1	0.94	1.105	1	1
Hansen [13]	1.125	1	0.75	1.12	1	1
De Beer [12]	1.2	1	0.75	-	-	-
Vesić [13, 14]	-	-	-	-	-	-

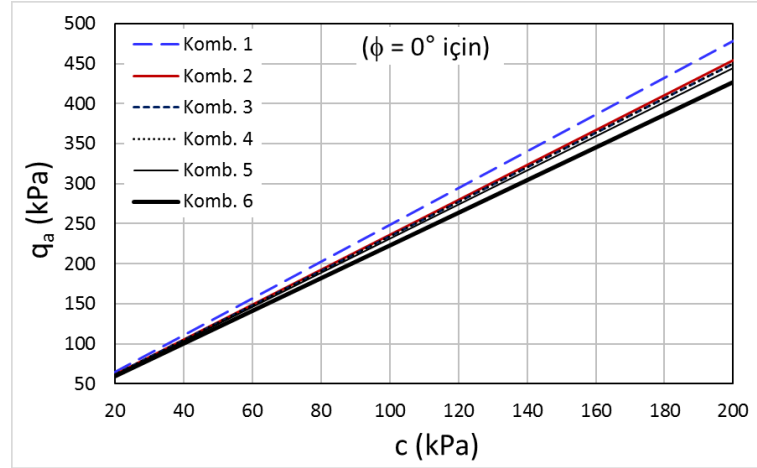
**Açıklama:** Bağıntı önerilmediği için hesaplanamayan katsayıların yerine - işareti konulmuştur.

Çizelge 2 incelendiğinde, Skempton [6], Hansen [9] ve Meyerhof [10]’un bağıntılarıyla hesaplanan  $s_c$  değerlerinin aynı, De Beer [12] ile hesaplanan  $s_c$  değerinin ise bunlardan farklı olduğu görülmektedir.  $d_c$  değerlerine bakıldığında ise Skempton [6] ve Meyerhof [10]’un bağıntılarıyla hesaplanan  $d_c$  değerlerinin aynı, Hansen [9] ve Hansen [13] ile hesaplanan  $d_c$  değerlerinin ise bunlardan farklı olduğu görülmektedir.  $s_q$ ,  $d_q$  ve  $d_\gamma$  değerlerine bakıldığında hepsinin 1 olduğu görülmektedir.  $s_\gamma$  değerlerinin ise her birinin farklı olduğu görülmektedir. Ancak  $\phi=0^\circ$  için  $N_\gamma = 0$  olduğundan  $s_\gamma$  değerlerindeki farkın taşıma gücü hesaplamalarında bir etkisi bulunmamaktadır. Bu durumda  $\phi=0^\circ$  analizleri için genel taşıma gücü bağıntısında kullanılmak üzere düzeltme katsayısı seçilirken  $s_c$  ve  $d_c$  değerlerinin belirleyici olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre taşıma gücü hesaplamalarında kullanılmak üzere  $s_c$  ve  $d_c$  bağıntıları dikkate alınarak oluşturulan çeşitli denklem kombinasyonları Çizelge 3’te sunulmuştur.

**Çizelge 3.**  $\phi=0^\circ$  için genel taşıma gücü bağıntısında kullanılan denklem kombinasyonları

Komb. No	Şekil katsayıları	Derinlik katsayıları
Komb. 1	De Beer [12] (Eş. 10.2, 10.3, 10.9)	Hansen [13] (Eş. 11.21, 11.16, 11.17)
Komb. 2	De Beer [12] (Eş. 10.2, 10.3, 10.9)	Meyerhof [10] (Eş. 9.4, 9.5)
Komb. 3	Meyerhof [10] (Eş. 9.1, 9.2)	Hansen [13] (Eş. 11.21, 11.16, 11.17)
Komb. 4	Hansen [13] (Eş. 11.12 – 11.14)	Hansen [13] (Eş. 11.21, 11.16, 11.17)
Komb. 5	Hansen [9] (Eş. 8.1 – 8.3)	Hansen [9] (Eş. 8.4 – 8.6)
Komb. 6	Meyerhof [10] (Eş. 9.1; 9.2)	Meyerhof [10] (Eş. 9.4, 9.5)

Çizelge 3’te verilen denklem kombinasyonları ile  $c=20-200$  kPa arasında değişen değerler için emniyetli taşıma gücü değerleri hesaplanmış ve sonuçları grafik olarak Şekil 7’de,  $c=50, 100, 150$  ve  $200$  kPa için hesaplanan emniyetli taşıma gücü değerleri ise sayısal olarak Çizelge 4’te sunulmuştur. Taşıma gücü hesaplamalarında  $N_c$  ve  $N_q$  için ise sırasıyla Prandtl [2] ve Reissner [3] tarafından önerilen bağıntılar (sırasıyla Eş. 3.1 ve 4.1) kullanılmıştır.  $\phi=0^\circ$  için  $N_\gamma = 0$  olduğundan hesaplamalarda  $N_\gamma$ ’lı terim kullanılmamıştır.



Şekil 7.  $\phi=0^\circ$ ,  $B/L=0.625$  ve  $D/B=0.3$  için Çizelge 3'te sunulan denklem kombinasyonlarıyla hesaplanan emniyetli taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 7 ve Çizelge 4 incelendiğinde, taşıma gücü hesaplamalarında kullanılan düzeltme katsayılarının emniyetli taşıma gücünü önemli ölçüde etkilediği ve kohezyon değeri arttıkça farklı kombinasyonlarla hesaplanan taşıma gücü değerleri arasındaki farkın da arttığı görülmektedir. En yüksek taşıma gücü değerleri Komb.1, en düşük taşıma gücü değerleri ise Komb.6 ile elde edilmiştir. Komb.1 ve Komb.6 ile hesaplanan taşıma gücü değerleri arasındaki fark incelenecek olursa;  $c=50$  kPa'da aralarındaki fark 13 kPa iken,  $c=100$  kPa'da bu fark 26 kPa'ya,  $c=150$  kPa'da 39 kPa'ya,  $c=200$  kPa'da ise 52 kPa'ya çıkmaktadır (Çizelge 4). Konut tipi bir binada 1 kattan zemine aktarılan taban basıncının yaklaşık 15 kPa olduğu kabul edilecek olursa bunun önemli bir fark olduğu değerlendirilebilir.

Çizelge 4.  $\phi=0^\circ$ ,  $B/L=0.625$ ,  $D_f/B=0.3$  ve  $c=50, 100, 150$  ve  $200$  kPa için Çizelge 3'te sunulan kombinasyonlarla hesaplanan emniyetli taşıma gücü değerleri

Komb. No	$q_a$ (kPa)			
	$c = 50$ kPa	$c = 100$ kPa	$c = 150$ kPa	$c = 200$ kPa
Komb. 1	133	248	363	479
Komb. 2	127	236	345	454
Komb. 3	126	234	342	450
Komb. 4	126	234	342	450
Komb. 5	124	231	337	444
Komb. 6	120	222	324	427

Bu sonuçlara göre,  $\phi=0^\circ$  analizlerinde Meyerhof'un [10] şekil ve derinlik katsayıları kullanılarak (Komb. 6) hesaplanan taşıma gücü değerlerinin diğer kombinasyonlara kıyasla daha emniyetli tarafta kaldığı öne sürülebilir.

## 5.2. $\phi>0^\circ$ İçin Yapılan Analizler (The Analysis Performed For $\phi>0^\circ$ )

$\phi>0^\circ$  ve  $D_f \leq B$  için şekil ve derinlik katsayısı öneren araştırmacılar Çizelge 5'te verilmiştir.  $D_f > B$  için sadece Hansen [13] tarafından bir bağıntı önerilmiş olup, bu çalışma için tasarlanan kurgusal yapıda  $D_f < B$

olduğu için, Hansen [13] tarafından  $D_f > B$  için önerilen derinlik katsayıları karşılaştırmalara dâhil edilmemiştir.

**Çizelge 5.**  $\phi > 0^\circ$  ve  $D_f \leq B$  için şekil ve derinlik katsayısı öneren araştırmacılar

Kaynak	$s_c$	$s_q$	$s_\gamma$	$d_c$	$d_q$	$d_\gamma$
Meyerhof [10]	+	+	+	+	+	+
Hansen [9]	+	+	+	-	-	+
Hansen [13]	-	+	+	-	+	+
De Beer [12]	+	+	+	-	-	-
Vesić [14]	-	-	-	+	-	-
Vesić [15]	-	-	-	+	-	-

**Açıklama:** + işareti bağıntı önerildiğini, - işareti bağıntı önerilmediğini göstermektedir.

Çizelge 5 incelendiğinde, şekil ve derinlik katsayılarının tamamı için sadece Meyerhof [10] tarafından bağıntı önerildiği görülmektedir. Hansen [9] tarafından  $d_c$  ve  $d_q$  hariç diğer katsayılar, Hansen [13] tarafından  $s_c$  ve  $d_c$  hariç diğer katsayılar, De Beer [12] tarafından sadece şekil katsayıları, Vesić [14, 15] tarafından ise sadece  $d_c$  için bağıntı önerilmiştir (Çizelge 5). Bu durumda Vesić [14, 15] ile Hansen [13] tarafından önerilen derinlik katsayılarının birbirini tamamladığı ve genel taşıma gücü bağıntısında birlikte kullanılacakları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda oluşturulan genel taşıma gücü bağıntısı denklem kombinasyonları Çizelge 6'da sunulmuştur.

**Çizelge 6.**  $\phi > 0^\circ$  ve  $D_f \leq B$  için farklı şekil ve derinlik katsayıları ve  $N_\gamma$  bağıntıları kullanılarak oluşturulan genel taşıma gücü bağıntısı denklem kombinasyonları

Komb. No	Şekil katsayıları	Derinlik katsayıları	$N_\gamma$ katsayısı
Komb. 1	Meyerhof [10]	Meyerhof [10]	TBDY-2018 [19]
Komb. 2	De Beer [12]*	$d_c$ için Vesić [15]; $d_q$ ve $d_\gamma$ için Hansen [13]	TBDY-2018 [19]
Komb. 3	De Beer [12] <sup>ψ</sup>	$d_c$ için Vesić [15]; $d_q$ ve $d_\gamma$ için Hansen [13]	TBDY-2018 [19]
Komb. 4	$s_c$ için De Beer [12] <sup>ψ</sup> ; $s_q$ ve $s_\gamma$ için Hansen [13]	$d_c$ için Vesić [15]; $d_q$ ve $d_\gamma$ için Hansen [13]	TBDY-2018 [19]
Komb. 5	Meyerhof [10]	Meyerhof [10]	Meyerhof [10]
Komb. 6	De Beer [12] <sup>ψ</sup>	$d_c$ için Vesić [15]; $d_q$ ve $d_\gamma$ için Hansen [13]	Vesić [13]

**Açıklama:** \*De Beer [12]'in  $\tan\phi$ 'li bağıntıları kullanılmıştır. <sup>ψ</sup>De Beer [12]'in  $\sin\phi$ 'li bağıntıları kullanılmıştır.

Hansen [9] tarafından önerilen düzeltme katsayıları Hansen [13] tarafından güncellendiği için, oluşturulan kombinasyonlarda Hansen [9] tarafından önerilen düzeltme katsayılarına yer verilmemiştir. Oluşturulan kombinasyonlarda TBDY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısının yanı sıra Vesić [14] ve Meyerhof [10] tarafından önerilen  $N_\gamma$  bağıntıları da kullanılmıştır. Hansen [9, 13] tarafından önerilen  $N_\gamma$  bağıntıları diğer

bağıntılara yakınlık gösterdiğinden (Şekil 6a) sonuçların sunumunda sadelik sağlamak için kombinasyonlarda bu bağıntılara yer verilmemiştir. TBDY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısının kullanıldığı denklemlerden en yüksek ve en düşük sonuçları veren Kombinasyon 1 ve 3'te TBDY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısı yerine Vesic [14] ve Meyerhof [10] tarafından önerilen  $N_\gamma$  bağıntıları kullanılarak Kombinasyon 5 ve 6 oluşturulmuştur.

Çizelge 6'da verilen taşıma gücü bağıntısı denklem kombinasyonları ile  $c=50, 100$  ve  $200$  kPa için  $\phi=2^\circ$ 'den  $40^\circ$ 'ye kadar taşıma gücü değerleri hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 7-9 ve Şekil 8-9'da sunulmuştur.

**Çizelge 7.**  $c=50$  kPa,  $D_f/B=0.3$  ve  $B/L=0.625$  için farklı denklem kombinasyonlarıyla hesaplanan emniyetli taşıma gücü değerleri

$\phi^\circ$	$q_a$ (kPa)					
	Komb. 1	Komb. 2	Komb. 3	Komb. 4	Komb. 5	Komb. 6
2	136	142	142	142	<b>136</b>	145
5	166	173	173	173	<b>165</b>	181
10	243	249	249	249	<b>238</b>	265
15	375	376	374	374	<b>360</b>	398
20	611	592	586	586	<b>574</b>	619
25	1053	977	<b>960</b>	960	971	1002
30	1929	1699	<b>1654</b>	1654	1763	1706
35	3799	3148	<b>3030</b>	3030	3484	3093
40	8174	6310	<b>5993</b>	5993	7666	6068

**Açıklama:** En düşük değerler koyu olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 8.**  $c=100$  kPa,  $D_f/B=0.3$  ve  $B/L=0.625$  için farklı denklem kombinasyonlarıyla hesaplanan emniyetli taşıma gücü değerleri

$\phi^\circ$	$q_a$ (kPa)					
	Komb. 1	Komb. 2	Komb. 3	Komb. 4	Komb. 5	Komb. 6
2	249	261	261	261	<b>249</b>	264
5	299	312	312	312	<b>298</b>	320
10	419	434	433	433	<b>414</b>	449
15	614	627	623	623	<b>599</b>	647
20	948	941	931	931	<b>910</b>	963
25	1547	1480	<b>1452</b>	1452	1466	1494
30	2692	2457	<b>2384</b>	2384	2526	2435
35	5052	4352	<b>4166</b>	4166	4736	4229
40	10405	8360	<b>7876</b>	7876	9897	7951

**Açıklama:** En düşük değerler koyu olarak gösterilmiştir.

**Çizelge 9.**  $c=200$  kPa,  $D_f/B=0.3$  ve  $B/L=0.625$  için farklı denklem kombinasyonlarıyla hesaplanan emniyetli taşıma gücü değerleri

$\phi^\circ$	$q_a$ (kPa)					
	Komb. 1	Komb. 2	Komb. 3	Komb. 4	Komb. 5	Komb. 6
2	475	499	499	499	<b>475</b>	502
5	563	591	591	591	<b>562</b>	599
10	770	804	802	802	<b>765</b>	818
15	1092	1128	1121	1121	<b>1077</b>	1145
20	1622	1640	1620	1620	<b>1584</b>	1653
25	2536	2487	<b>2436</b>	2436	2454	2478
30	4217	3972	<b>3843</b>	3843	4051	3895
35	7557	6759	<b>6437</b>	6437	7242	6500
40	14868	12459	<b>11641</b>	11641	14359	11717

**Açıklama:** En düşük değerler koyu olarak gösterilmiştir.

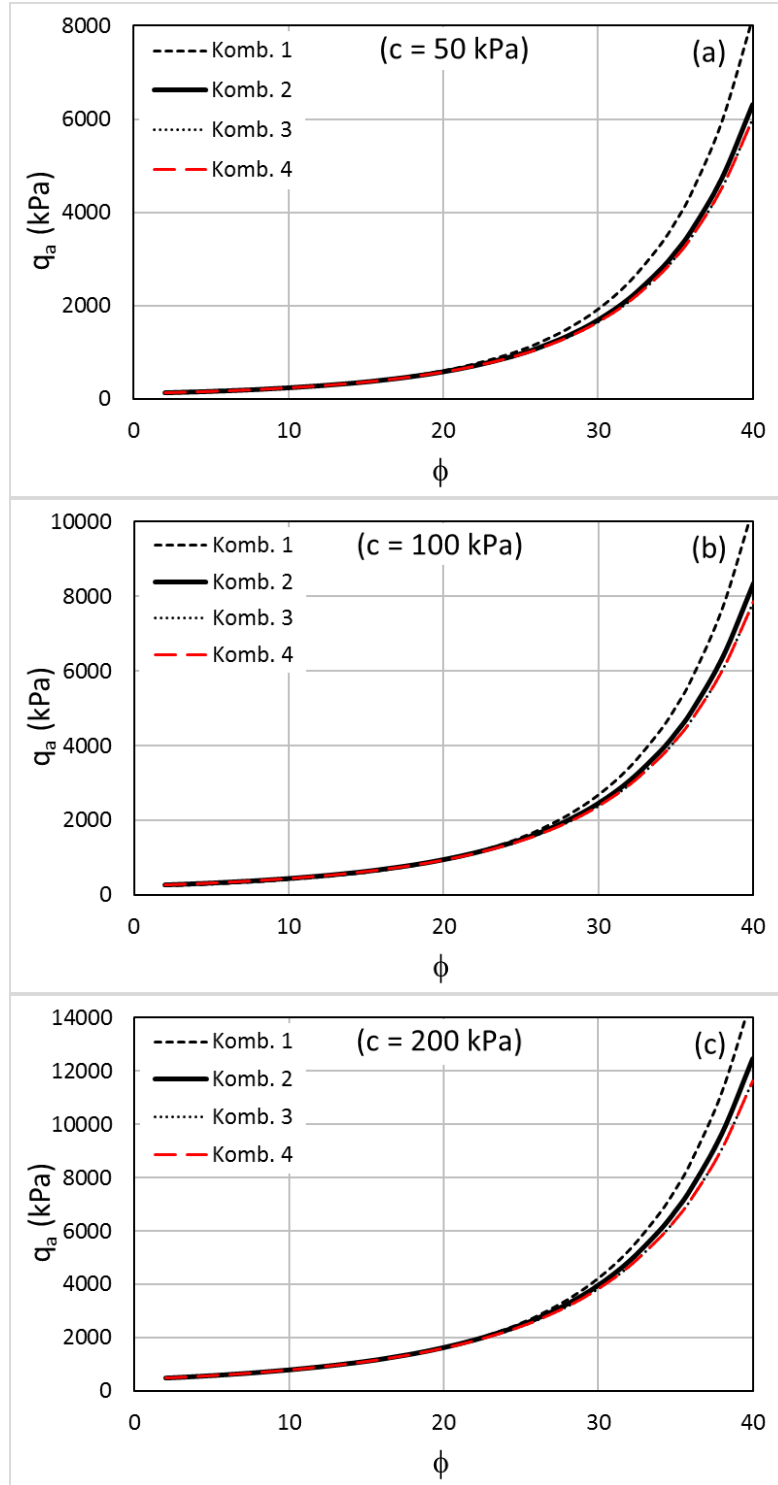
Taşıma gücü bağıntısında TBDY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısının kullanılması halinde en güvenli sonuçları veren kombinasyonun belirlenebilmesi için ilk dört kombinasyonla hesaplanan taşıma gücü değerleri ayrı olarak Şekil 8'de sunulmuştur.  $N_\gamma$  bağıntısının taşıma gücü değerleri üzerindeki etkisini görebilmek için ise Kombinasyon 1, 3, 5 ve 6 ile hesaplanan taşıma gücü değerleri ayrı bir grafik halinde Şekil 9'da sunulmuştur.  $c=50, 100$  ve  $200$  kPa için elde edilen sonuçlar hiyerarşik (tipik) olarak birbirine benzediği için Şekil 9'da sadece  $c=50$  kPa için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Ayrıca,  $\phi$ 'ye bağlı olarak kombinasyonlar arasındaki farkı daha yakından görebilmek için sonuçlar  $\phi$ 'ye göre ikiye bölünmüş ve  $\phi < 15^\circ$  için hesaplanan sonuçlar ayrı,  $\phi > 25^\circ$  için hesaplanan sonuçlar ise ayrı bir grafik halinde sunulmuştur (Şekil 9a ve 9b).

Çizelge 7-9 ve Şekil 8-9 incelendiğinde, farklı düzeltme katsayılarıyla hesaplanan taşıma gücü değerleri arasındaki farkın sabit olmadığı, içsel sürtünme açısına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Ancak Komb. 3 ve 4'ün tüm  $c$ - $\phi$  değerleri için aynı sonucu verdiği görülmektedir. Bunun nedeni, temele gelen yüklerin dik olması durumunda Hansen [13] tarafından önerilen  $s_q$  ve  $s_\gamma$  bağıntılarının De Beer [12] tarafından önerilen  $\sin\phi$ 'li bağıntılarla aynı olmasıdır.

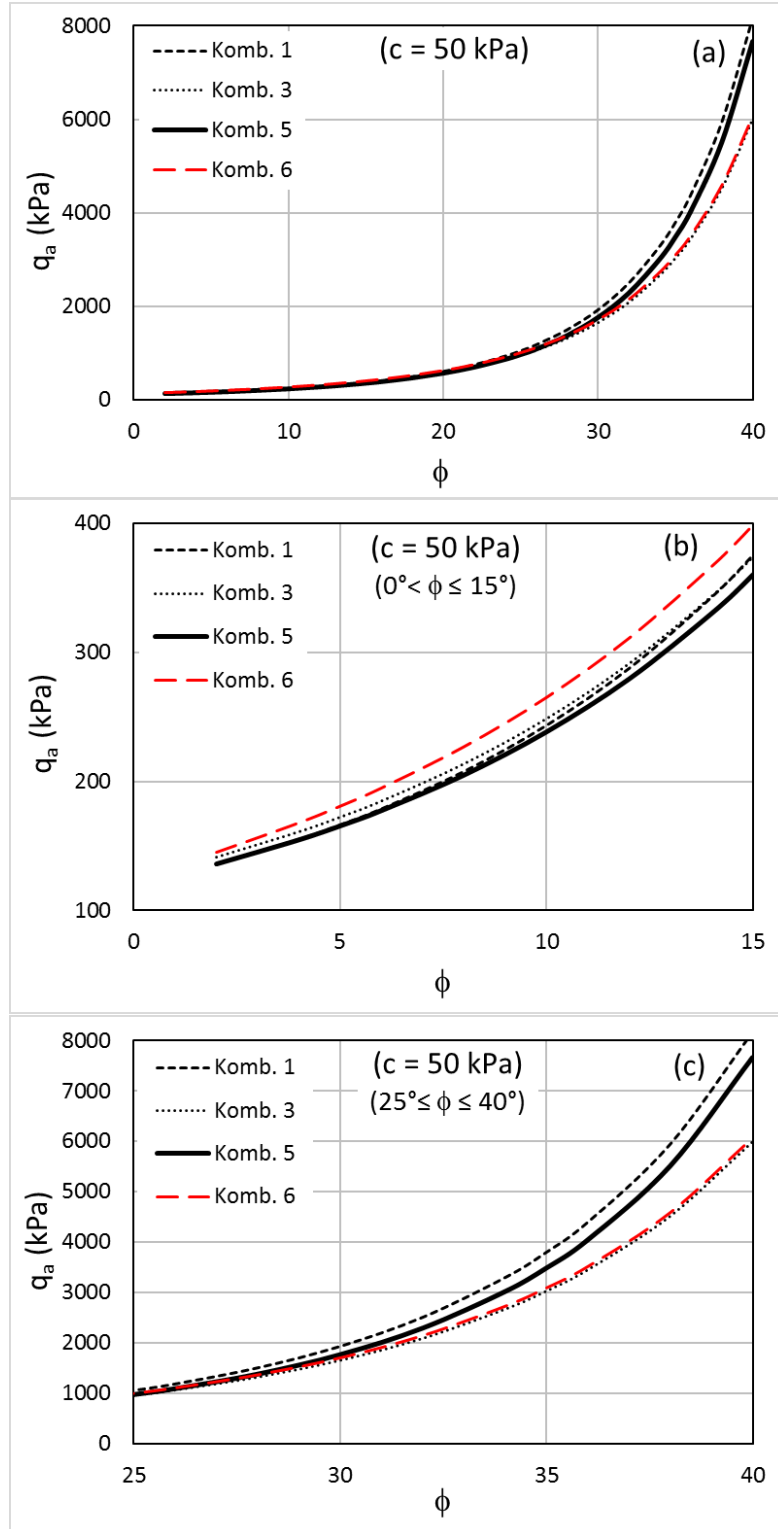
De Beer'in [12]  $\tan\phi$ 'li ve  $\sin\phi$ 'li bağıntıları (sırasıyla Komb. 2 ve Komb.3) karşılaştırıldığında; yaklaşık  $\phi=15^\circ$ 'ye kadar her ikisinin birbirine yakın sonuçlar verdiği,  $\phi=15^\circ$ 'den sonra ise  $\sin\phi$ 'li bağıntılarla yaklaşık %1'den %7'ye kadar daha düşük taşıma gücü değerleri elde edildiği görülmektedir (aralarındaki fark düşük " $c, \phi$ " değerlerinde yaklaşık %1 iken, yüksek " $c, \phi$ " değerlerinde en fazla %7'ye kadar çıkmaktadır). Bu sonuçlara göre, De Beer'in [12]  $\sin\phi$ 'li ve  $\tan\phi$ 'li bağıntıları arasında bir tercih yapılması gerektiğinde, tasarımcıyı daha güvenli tarafta bırakacağı için  $\sin\phi$ 'li bağıntıların tercih edilebileceği değerlendirilmiştir.

TBDY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısının kullanıldığı denklemler (Komb.1-4) karşılaştırıldığında (Şekil 8), yaklaşık  $\phi < 20^\circ$  için tüm kombinasyonlar hemen hemen aynı sonucu veriyormuş gibi görünse de Çizelge 7-9 incelendiğinde, yaklaşık  $\phi=15^\circ$ 'ye kadar Komb. 1'in daha düşük (daha emniyetli) sonuçlar verdiği,  $\phi=15^\circ$ 'den sonra ise giderek artan oranda diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca, yaklaşık  $\phi=15-20^\circ$ 'de yöntemler arasındaki sıralamanın değiştiği ve yaklaşık  $\phi=15^\circ$ 'den sonra Komb. 3'ün daha düşük (daha emniyetli) sonuçlar vermeye başladığı görülmektedir. Taşıma gücü değerleri açısından kombinasyonlar arasındaki farkı irdelemek gerekirse,  $\phi < 10^\circ$  ve  $c=50$  kPa olan zeminlerde Komb. 1 ile Komb. 3 arasındaki farkın 6-7 kPa kadar olduğu, ancak kohezyon değeri arttıkça bu farkın daha da arttığı ve  $c=100$  kPa'da 14 kPa'ya,  $c=200$  kPa'da ise 32 kPa'ya kadar çıktığı

görülmektedir (Çizelge 7-9).  $\phi > 15^\circ$  olan zeminler için kombinasyonlar arasındaki fark irdelendiğinde, örneğin  $\phi = 25^\circ$  için Komb. 1 ile hesaplanan taşıma gücü değerlerinin Komb. 3'e kıyasla 93 ile 100 kPa arasında değişen miktarlarda daha yüksek taşıma gücü değerleri verdiği görülmektedir. Zeminin  $\phi$  değeri arttıkça aradaki bu farkın daha da arttığı Şekil 8'den görülmektedir.



Şekil 8. TB DY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısının kullanıldığı denklem kombinasyonlarıyla; a)  $c=50$  kPa için, b)  $c=100$  kPa için, c)  $c=200$  kPa için hesaplanan taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması



**Şekil 9.** Farklı  $N_\gamma$  bağıntılarının kullanıldığı denklem kombinasyonlarıyla; **a)**  $0^\circ < \phi \leq 40^\circ$  için, **b)**  $0^\circ < \phi \leq 15^\circ$  için, **c)**  $25^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$  için hesaplanan taşıma gücü değerlerinin karşılaştırılması

Farklı  $N_\gamma$  bağıntılarının kullanıldığı denklemler (Komb. 1, 3, 5 ve 6) karşılaştırılacak olursa (Şekil 9), en düşük (en güvenli) taşıma gücü değerlerinin yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'ye kadar Komb. 5 ile,  $\phi=20^\circ$ 'den sonra ise Komb. 3 ile elde edildiği görülmektedir (Çizelge 7-9 ve Şekil 9b). Yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'den sonra Kombi. 3 ve 6'nın birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Benzer şekilde yaklaşık  $\phi=20^\circ$ 'den sonra Komb. 1 ve 5'in de birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bu hesaplamaların  $D_f/B = 0.3$  için yapıldığı hatırlanacak olursa,  $D_f/B$  oranı değiştiğinde burada elde edilen sonuçların değişip değişmeyeceğinin ortaya konulması gerektiği değerlendirilebilir. Bu değişimi görebilmek amacıyla bu çalışmada ele alınan kurgusal binaya bir bodrum katı daha ilave edileceği düşünülerek temel taban kotu -6 m'ye indirilmiş (bu durumda  $D_f/B=0.6$ ) ve Çizelge 6'da verilen kombinasyonlar kullanılarak  $D_f/B = 0.6$  ve  $c=50, 100$  ve  $200$  kPa için  $\phi=2^\circ$ 'den  $40^\circ$ 'ye kadar emniyetli taşıma gücü değerleri tekrar hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların sonucunda elde edilen taşıma gücü değerleri karşılaştırıldığında kombinasyonlar arasındaki hiyerarşinin (sıralamanın) değişmediği görülmüştür. Buna göre, bu çalışmada belirlenen kombinasyonlar arasındaki hiyerarşinin (sıralamanın) farklı  $D_f/B$  oranları için de geçerli olduğu anlaşılmıştır.

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

Şekil, derinlik ve  $N_\gamma$  katsayıları için literatürde önerilen farklı bağıntılarla hesaplanan taşıma gücü değerleri arasında önemli oranda fark olduğu ve bu farkın sabit olmadığı,  $\phi=0^\circ$  analizlerinde kohezyon değerine, “c- $\phi$ ” analizlerinde ise içsel sürtünme açısına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

$\phi=0^\circ$  analizlerinde, en düşük (en emniyetli) taşıma gücü değerinin Meyerhof'un [10] şekil ve derinlik katsayıları kullanılarak elde edildiği görülmüştür. En yüksek taşıma gücü değerleri ise şekil katsayıları için De Beer [12], derinlik katsayıları için ise Hansen'in [13] bağıntıları kullanıldığında elde edilmiştir. En yüksek ve en düşük taşıma gücü değerleri arasında, kohezyon değerine bağlı olarak 13 kPa ile 52 kPa arasında değişen seviyelerde fark bulunduğu görülmüştür. Konut tipi binalarda bir kattan zemine aktarılan taban basıncının yaklaşık 15 kPa olduğu kabul edilecek olursa bunun önemli bir fark olduğu değerlendirilebilir.

“c- $\phi$ ” analizlerinde farklı  $N_\gamma$  katsayılarının kullanıldığı denklemler karşılaştırıldığında; yaklaşık  $\phi < 20^\circ$  olan zeminlerde en düşük (en emniyetli) taşıma gücü değerlerinin yine Meyerhof [10]'un şekil, derinlik ve  $N_\gamma$  katsayıları kullanılarak elde edildiği görülmüştür. Yaklaşık  $\phi > 20^\circ$  olan zeminlerde ise en emniyetli taşıma gücü değerleri, şekil katsayıları için De Beer'in [12]  $\sin\phi$ 'li bağıntıları, derinlik katsayılarından  $d_c$  için Vesic'in [15],  $d_q$  ve  $d_\gamma$  için Hansen'in [13] bağıntıları ve  $N_\gamma$  katsayısı için TBDY-2018'de [19] önerilen bağıntı kullanılarak elde edilmiştir.

“c- $\phi$ ” analizlerinde TBDY-2018'de [19] önerilen  $N_\gamma$  bağıntısı kullanılarak oluşturulan denklem kombinasyonları karşılaştırıldığında ise; yaklaşık  $\phi < 15^\circ$  olan zeminlerde en emniyetli taşıma gücü değerlerinin Meyerhof [10]'un şekil ve derinlik katsayılarıyla hesaplandığı görülmüştür. Yaklaşık  $\phi > 15^\circ$  olan zeminlerde ise en emniyetli taşıma gücü değerleri şekil katsayıları için De Beer'in [12]  $\sin\phi$ 'li bağıntıları, derinlik katsayılarından  $d_c$  için Vesic'in [15],  $d_q$  ve  $d_\gamma$  için Hansen'in [13] bağıntıları kullanılarak elde edilmiştir.

“c- $\phi$ ” analizlerinde yaklaşık  $\phi < 15^\circ$  olan zeminlerde en yüksek ve en düşük taşıma gücü değerleri arasındaki farkın %3-5 arasında değiştiği görülmüştür. Bu farkın taşıma gücü açısından karşılığı ise yaklaşık 6-32 kPa'ya tekabül etmektedir. Yaklaşık  $\phi > 15^\circ$  olan zeminlerde ise en düşük ve en yüksek taşıma gücü değerleri arasındaki farkın daha da büyük olduğu ve zeminin “c- $\phi$ ” değerlerine bağlı olarak arttığı görülmüştür. Örneğin  $\phi=25^\circ$ 'de en yüksek ve en düşük taşıma gücü değerleri arasındaki fark 93-100 kPa (% 4-10) arasında değişirken  $\phi=40^\circ$ 'de bu fark yaklaşık 2200-3200 kPa'ya (% 28-36) kadar çıkmaktadır.

## 7. SİMGELER (SYMBOLS)

$A$	Etkin temelin alanı
$B'$	Etkin temel genişliği
$B$	Temel genişliği (daireysel temellerde temelin çapı)
$b_c, b_q, b_\gamma$	Temel tabanı eğim katsayıları
$c$	Temel tabanından itibaren $B$ derinliği içindeki zeminin kohezyonu
$D_f$	Temel derinliği



$d_c, d_q, d_\gamma$	Derinlik katsayıları
EC-7	Eurocode 7
$g_c, g_q, g_\gamma$	Zemin yüzeyi eğim katsayıları
$H$	Temele gelen eğik kuvvetin yatay (temele yüzeyine paralel) bileşeni
$i_c, i_q, i_\gamma$	Yük eğim katsayıları
$N_c, N_q, N_\gamma$	Taşıma gücü katsayıları
$q$	Yüklü alanın kenarlarındaki sürşarj yükü
$q_u$	Zeminin sınır (nihai) taşıma gücü
$s_c, s_q, s_\gamma$	Şekil katsayıları
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
$V$	Temele gelen eğik kuvvetin düşey (temele yüzeyine dik) bileşeni
$\phi$	Zeminin içsel sürtünme açısı
$\gamma'_1$	Temel tabanı seviyesinin üstündeki zeminin efektif birim hacim ağırlığı
$\gamma'_2$	Temel tabanından itibaren $B$ derinliği içindeki zeminin efektif birim hacim ağırlığı
$\alpha$	Temel tabanının yatayla yaptığı açı
$\beta$	Zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açı (şev açısı)
$\delta$	Temele gelen yükün düşeyden sapma açısı

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- [2] Prandtl, L. (1920). Über die Harte Plastischer Körper, Nachrichten von der Könighlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalischen Klasse, pp. 74–85.
- [3] Reissner, H. (1924). Zum Erddruckproblem, In: Biezeno, C.B., Burgers, J.M. (Eds.) Proceedings of the 1st International Congress for Applied Mechanics, Delft, The Netherlands, pp. 295–311.
- [4] Baars, S.V. (2018). 100 Years of Prandtl's Wedge. 135 p., IOS Press BV, Amsterdam, Netherlands.
- [5] Terzaghi, K., Peck, R.B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd edition. John Wiley and Sons, Inc. New York, USA.
- [6] Skempton, A.W. (1951). The Bearing Capacity of Clays, Building Research Congress., vol. 1, pp 180-189.
- [7] Meyerhof, G. G. (1953). The Bearing Capacity of Foundations Under Eccentric and Inclined Loads. Proceedings of Third Int. Conf. Soil Mech., vol. 1: 440-445.
- [8] Meyerhof, G. G. (1956). Discussion on "Rupture surfaces in sand under oblique loads." Proc. Am. Soc. Civil Engrs., Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 82 (3): 15-19.
- [9] Hansen, J. B. (1961). A General Formula for Bearing Capacity, Bulletin No. 11, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen.
- [10] Meyerhof, G. G. (1963). Some Recent Research On the Bearing Capacity of Foundations, Canadian Geotechnical Journal, 1(1): 16–26.
- [11] Meyerhof, G. G. (1951). The Ultimate Bearing Capacity of Foundations, Geotechnique, 2 (4): 301-332.

- [12] De Beer, E. E. (1970). Experimental Determination of the Shape Factors and Bearing Capacity Factors of Sand, *Geotechnique*, 20(4): 387–411.
- [13] Hansen, J. B. (1970). A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity, Bulletin No. 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen,.
- [14] Vesić, A. S. (1973). Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers*, 99(SM1): 45–73.
- [15] Vesić, A. S. (1975). Bearing Capacity of Shallow Foundations. *Foundation Engineering Handbook*, 1st ed. pp.121-147. Winterkorn, Hans F. and Fang, Hsai-Yang, Eds., Van Nostrand Reinhold, New York. 751 pp
- [16] Das, B.M. (2011). *Principles of Foundation Engineering, Seventh Edition*, Cengage Learning, Stamford, USA.
- [17] Das, B. M. (2017). *Shallow Foundations Bearing Capacity and Settlement, Third Edition*, CRC Press, Taylor & Francis Group, FL, USA.
- [18] Das, B. M., Sivakugan, N. (2019). *Principles of Foundation Engineering, Ninth Edition*, Cengage Learning, Inc., Boston, USA.
- [19] TBDY-2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018). İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara, Türkiye.
- [20] EC-7 (2004), Eurocode 7 - Geotechnical Design - Part 1: General Rules, European Standard, EN 1997-1: 2004, European Committee for Standardization, Brussels.
- [21] Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design, Fifty Edition*, McGraw-Hill, USA.



# High Performance Classification of Cancer Types with Gene Microarray Datasets: Hybrid Approach

Yılmaz ATAY<sup>1,\*</sup> Muhterem Oğuzhan YILDIRIM<sup>1</sup> Cuma Umur DOĞAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Eti Mh. Yükseliş Sk. No: 5, 06570 Maltepe/ANKARA

## Graphical/Tabular Abstract

### Article Info:

Research article  
Received: 15.12.2021  
Revision: 14.12.2021  
Accepted: 26.09.2021

### Highlights

- JSON.
- MongoDB.
- Location Services.

### Keywords

Ensemble Method  
Genetic Algorithm  
Cancer  
Microarray  
Naive Bayes  
Classification

In this study, the classification of human cancer diseases is discussed by using different gene microarray datasets. In addition, a new methodology is presented for the efficient classification of cancer diseases over gene microarray datasets.

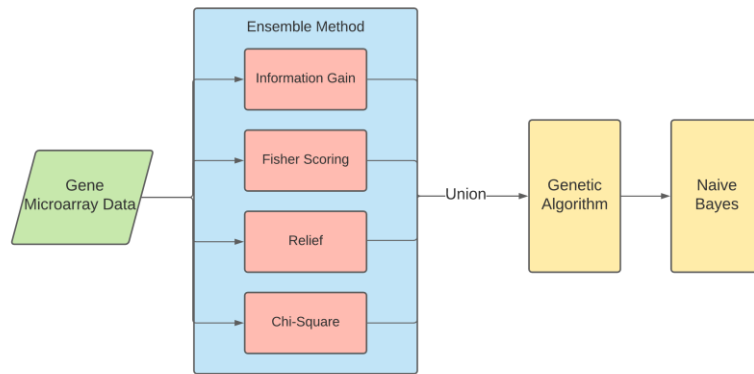


Figure A. Flowchart of proposed hybrid approach

**Purpose:** The main purpose of this study is to develop a machine learning model that can predict whether samples from gene microarray data are cancerous or not. The problem of classification of gene microarray data as a field of study has many difficulties due to its unique features, another aim of this study is to minimize these difficulties with effective methods, thus increasing the classification success of the proposed model.

**Theory and Methods:** In the proposed hybrid method, different filtering, wrapping and classification methods should be used together. For this reason, the materials and methods used in the development of the proposed system are explained in different headings. Fisher scoring, Chi-square, relief, information gain, customized genetic algorithm and Naive Bayes methods explained in detail according to the proposed hybrid method.

**Results:** The proposed model can be defined in three different parts. By applying the ensemble feature selection method instead of a single feature selection method in the first part, the probability of not selecting the features that can be decisive during classification is reduced. In the second part, the most successful feature combination is selected by performing a stochastic search with a genetic algorithm on the sub-dataset that result of the ensemble feature selection method. And in the third part, the classifier is trained with the sub dataset, which is the result of the previous part. The proposed model in this study was trained separately with Leukemia, Central Nervous System, and Colon Tumor datasets, and accuracy values were obtained as 97.06%, 85.48%, and 86.67% respectively.

**Conclusion:** In all Leukemia, Central Nervous System and Colon Tumor datasets considered in the study, the accuracy rate of the proposed hybrid method was observed to be better than the accuracy rates of other studies. The hybrid approach proposed within the scope of the study is both designed to directly affect the classification performance and presented in a structure with developable flexibility. Based on the test results obtained, it can be said that the proposed hybrid approach generally gives successful results in the classification problems of cancer diseases and has a high potential for maximizing the performance in datasets with different characteristics



## High Performance Classification of Cancer Types with Gene Microarray Datasets: Hybrid Approach

Yılmaz ATAY<sup>1,\*</sup> Muhterem Oğuzhan YILDIRIM<sup>1</sup> Cuma Umur DOĞAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

### Abstract

Currently the approach of biological meaningfulness detection from gene microarray datasets obtained with microarray technology is used effectively in many areas such as disease diagnosis and differentiation of cancer types. However, since datasets obtained with this technology measure gene expression profiles collectively, the number of features in the dataset can be quite high. The small number of samples in gene microarray datasets, the high number of features and where the data is noisy significantly complicates the preparation process of these datasets. In order for machine learning models to successfully classify, the number of features that represent the size of the dataset should be reduced. In the proposed method, gene microarray data is taken as input and Information Gain, Fisher Correlation Scoring, ReliefF and, Chi-Square methods are applied separately for feature selection. After this stage, a sub-dataset containing the new genes is obtained and a pool of genes for Genetic Algorithm is created according to this dataset. Bayes classifier is trained using the sub-dataset created with the genes of the most successful chromosome. Thus, the classification process of cancer data is successfully completed. The model proposed in this study was applied to datasets that are frequently used in the literature and high success rates were obtained in classification. As a result; acceptable feature selection methods and the hybrid method based on Genetic Algorithm generally provided the most appropriate results on all test data.

### Makale Bilgisi

*Araştırma makalesi*  
Başvuru: 15.12.2021  
Düzeltilme: 14.12.2021  
Kabul: 26.09.2021

### Keywords

*Ensemble Method*  
*Genetic Algorithm*  
*Cancer*  
*Microarray*  
*Naive Bayes*  
*Classification*

### Anahtar Kelimeler

*Ensemble Metot*  
*Genetik Algoritma*  
*Kanser*  
*Mikrodizi*  
*Naive Bayes*  
*Sınıflandırma*

## Gen Mikrodizi Veri Setleriyle Kanser Türlerinin Yüksek Başarılı Sınıflandırılması: Hibrit Yaklaşım

### Öz

Günümüzde mikrodizi teknolojisi ile elde edilen gen mikrodizi veri setlerinden biyolojik anlamlılık tespiti yaklaşımı, hastalık tanısı ve kanser türlerinin ayırt edilmesi gibi pek çok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat bu teknoloji ile elde edilen veri kümeleri, gen ifade profillerini toplu olarak ölçtüğü için veri kümesindeki özellik sayısı oldukça fazla olabilmektedir. Gen mikrodizi veri kümelerindeki örnek sayılarının az olması, özellik sayısının fazla olması ve verilerin gürültülü olması bu veri kümelerinin ön hazırlık işlemlerini oldukça karmaşık hale getirmektedir. Makine öğrenmesi modellerinin sınıflandırmayı başarıyla yapabilmesi için özellik sayısının, yani veri kümesinin boyutunun azaltılması gerekmektedir. Önerilen yöntemde, gen mikrodizi verileri girdi olarak alınır ve öznitelik seçimi amacıyla Bilgi Kazancı, Fisher Korelasyon Skorlama, ReliefF ve Ki-Kare yöntemleri ayrı ayrı uygulanır. Bu aşamadan sonra yeni gen alt veri kümesi elde edilir ve Genetik Algoritmanın gen havuzu oluşturulur. Bu algoritmanın uygun adımlarda tekrar çalıştırılması sonrasında seçilen en başarılı kromozomun genleri ile oluşturulan alt veri kümesi kullanılarak Naive Bayes sınıflandırıcısı eğitilir. Böylece kanser verilerinin sınıflandırılması işlemi tamamlanır. Bu çalışmada önerilen model, literatürde sıklıkla kullanılan veri kümelerine uygulanmış ve sınıflandırmada yüksek başarı oranları elde edilmiştir. Sonuç olarak; uygun öznitelik seçim yöntemleri ve Genetik Algoritma temelli hibrit yöntem genel anlamda tüm test verileri üzerinde en uygun sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İsimlerini genellikle ortaya çıktıkları doku ve organlardan alan ve sayısı yüzü geçen kanser çeşidi bulunmaktadır. Kanserler doku hücrelerinin tipine göre Karsinom, Sarkom, Miyelom, Lösemi, Lenfoma ve karışık tipler olmak üzere altı ana kategoride incelenebilir [1]. Kanserli hücrelerin tıbbi olarak teşhisi ve tümör tiplerinin belirlenmesi büyük öneme sahiptir. Tümörlerin sınıflandırılması süreci, hastaların daha iyi tedavi görebilmesine olanak sağlarken; maruz kalacakları toksin ve yan etkilerin en aza indirgenmesine olanak sağlayabilir. Tümörlerin geleneksel yöntemler kullanılarak teşhis edilmesi ve sınıflandırılması oldukça zor ve maliyetli bir süreçtir. Ayrıca bu işlemler insan hatalarına ve gözlemciler arası değişkenliğe karşı da oldukça hassastır. Bu sebeple tanı sürecinde yeni yöntemlerin geliştirilmesi hayati öneme sahiptir [2]. Kanser tanısında gen ekspresyon profili, hücresel özelliklerin tanımlanmasında etkin olabilir. Burada gen ekspresyon profili hücrenin fenotipini, işlevini ve uyarılara karşı tepkisini belirler. Kanserli hücrelerin gen ekspresyon profilleri, normal hücrelerin gen ekspresyon profilleri ile karşılaştırıldığında edinilen bilgi ile kanser tanı süreci iyileştirilebilir. Diferansiyel gösterim, gen ekspresyonu seri analizi ve mikrodizi yöntemleri gibi gen ekspresyonu profillemeye yöntemleri, kanser araştırmalarında başarıyla uygulanmaktadır. Kanserli hücrelerin gen ekspresyon verilerini çıkarmada en çok kullanılan teknoloji mikrodizi teknolojisi'dir. Bunun sebebi kullanımlarının kolay olması, büyük ölçekli DNA dizilemesi gerektirmemesi ve çoklu örneklerden sayısız genin paralel olarak sayısallaştırılmasına olanak sağlamasıdır [3]. Mikrodizi teknolojisi ile elde edilen DNA mikrodizi veri kümeleri biyoinformatik ve makine öğrenmesinde kullanılmaktadır. Bu veri kümeleri hastalık tanısı, kanser tiplerinin ayırt edilmesi gibi pek çok faydalı alanda kullanılmaktadır. Fakat bu teknoloji ile elde edilen veri kümeleri, gen ifadesini toplu olarak ölçtüğü için veri kümesindeki özellik sayısı oldukça fazladır. DNA mikrodizi veri kümelerindeki örnek sayılarının az olması, özellik sayısının fazla olması [4] ve verilerin gürültülü olması bu veri kümelerinin ön hazırlık işlemlerini oldukça zor bir hale getirmektedir. Makine öğrenmesi modellerinin sınıflandırmayı başarıyla tamamlayabilmesi için öznitelik sayısının indirgenmesi ve sonuç olarak veri kümesinin boyutunun azaltılması önemlidir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; Yu ve diğerlerinin önerdiği çalışmada, temelde gen mikrodizi verilerinin dengesiz sınıflara sahip olması probleminde odaklanılmıştır [5]. İncelenen çalışmanın kısıtları temelde uygulanan yöntemin oldukça zaman alıcı olması ve önerilen yöntemin sadece iki sınıflı veri kümeleri üzerinde çalışabilmesi ile ilgilidir. Önerilen modelde öznitelik seçme yöntemi olarak Weighted Metric, sınıflandırma yöntemi olarak ise Decision Rule önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen model Leukemia ve Colon Tumor veri kümeleri ile eğitilmiş ve sırasıyla %95.55 ve %85.49 doğruluk oranları elde edilmiştir. Gunavathi ve Premalatha tarafından gerçekleştirilen çalışmada [6], önerilen modelde öznitelik seçme yöntemleri olarak T-istatistik, Signal-to Noise Ratio ve F-test yöntemleri; sınıflandırma yöntemleri olarak ise k-en yakın komşu ve destek vektör makinesi yöntemleri önerilmiştir. Çalışmada önerilen model Central Nervous System veri kümesi ile eğitilmiş ve Doğruluk Oranı olarak %81.25 değeri elde edilmiştir. Bu çalışmadaki en önemli kısıtlar diğer çalışmalarda da olduğu gibi üzerinde çalışılan gen mikrodizi verilerinin çok yüksek sayıda öznitelikçe sahip olması ve az sayıda örnek içermesidir. [7] referas numaralı çalışmada önerilen yaklaşım, öznitelikleri seçmek için genetik algoritmayı kullanırken; sınıflandırma süreci için de destek vektör makinesini tercih etmiştir. İlgili çalışmada önerilen model ayrı ayrı Leukemia ve Colon Tumor veri kümeleri ile eğitilmiş ve sırasıyla %91.5 ve %84.6 başarı değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada da yüksek öznitelik sayısı ve düşük örnek sayısı temel zorluğu oluşturmaktadır ayrıca bu çalışmanın zaman karmaşıklığının yüksek olması ve çok sınıflı veriler üzerinde uygulanabilir olmaması temel kısıtlarını oluşturmaktadır. Salem ve diğerlerini bilimsel çalışmasındaki [8] yöntemde, öznitelik seçme yöntemi olarak bilgi kazancı yaklaşımı tercih edilirken; sınıflandırma yöntemi olarak Small for Gestational Age yaklaşımı kullanılmıştır. Nguyen ve diğerlerinin sunduğu çalışmada [9], Leukemia veri kümesi üzerinde Analytic Hierarchy Process ile öznitelik seçimi yapılmış olup; Hidden Markov Models ile sınıflandırma yapılmıştır. Çalışmada önerilen modelin Leukemia veri seti üzerindeki doğruluk oranı %96.48 olarak belirlenmiştir. Hengpraprophm'un çalışmasında [10] Leukemia veri kümesi üzerinde Signal-to Noise Ratio yöntemi ile öznitelik seçimi yapılmış ve Genetik Algoritma uygulanmıştır. Çalışmada önerilen yöntemin Leukemia veri kümesi üzerindeki Doğruluk Oranı %91.9'dur. Feature selection with ensemble learning for prostate cancer diagnosis from microarray gene expression [11] isimli çalışmada gen mikrodizi verilerinin yüksek boyutlu olduğu ve özellikle kanserli hastaların teşhisi için olan gen mikrodizi veri kümelerinin az örneğe sahip olduğundan bir diğer deyişle Curse of Dimensionality

probleminden bahsedilmiştir. Çalışma prostat kanserinin gen mikrodizi verilerinden teşhisi üzerinedir. Teşhis işlemi iki adımda tanımlanmıştır. Birinci adımda Korelasyon Öznitelik (Correlation Feature Selection) Seçimi yöntemi ile öznitelik seçimi yapılırken, ikinci adımda Random Committee Ensemble sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Önerilen modelin teşhis doğruluk oranının tespiti için ise 10 katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmış, %95.098 doğruluk oranı elde edilmiştir ve bu oranın aynı veri kümesi üzerinden teşhis yapmayı amaçlayan diğer çalışmaların sonuçlarından daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Genetik Algoritma ve Sınıflandırıcı Yöntemler ile Kanser Tahmini [12] isimli çalışmada akciğer ve beyin kanseri ile ilgili gen mikrodizi verileri kullanılmış ve genetik algoritma ile öznitelik seçimi yapılmıştır. Naive Bayes, Bayes Net, k-En Yakın Komşu, Rastgele Orman ve Destek Vektör Makineleri sınıflandırma yöntemleri eğitilerek başarı oranları karşılaştırılmıştır ve sonucunda genetik algoritma ile öznitelik seçimi işleminin makine öğrenmesi ile yapılacak olan kanser teşhisi çalışmalarında başarıyı arttırıcı özelliği olduğu gösterilmiştir. Bir diğer çalışma olan Çok Amaçlı Genetik Algoritma Kullanarak DNA Mikrodizi Verilerinin Kümeleneşmesi [13] çalışmasında ise DNA mikrodizi verilerini örnek tabanlı kümelemek için küme sayısı önceden belirlenmeden çok amaçlı genetik algoritmalarla göre yeni bir yöntem geliştirmektedir. Önerilen yöntem daha önce geliştirilmiş olan hızlı genetik k-means algoritmasını çok amaçlı genetik algoritma süreci ile birleştirmiştir. Bu sayede daha etkin ve doğruluk oranı daha yüksek bir sınıflandırma yöntemi ortaya çıkmıştır. Diğer bir bilimsel çalışma ise Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanarak Kanser Teşhisi [14] isimli araştırma çalışmasıdır. Göğüs kanseri veri seti kullanılarak kanser verilerinin sınıflandırması üzerine nitelik indirgeme metotlarının etkisinin incelenmesini amaçlayan bu çalışmanın sonucunda öznitelik eleme yöntemlerinin eğitim başarısı üzerindeki olumlu etkisi analiz edilmiş ve sonuçları gösterilmiştir. A Cancer Gene Selection Algorithm Based on the K-S Test and CFS isimli çalışmada [15] K-S (Kolmogorov-Smirnov) Test, Wilcoxon Test ve T-Test isimli yöntemler öznitelik seçme yöntemleri olarak tercih edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada en iyi sonuçların K-S Test ile elde edildiği görülmüştür.

Bu çalışmada gen mikrodizi verileri kullanılarak insanlara ait kanser hastalıklarının sınıflandırılma konusu ele alınmış ve gen mikrodizi veri kümeleri üzerinden kanser hastalıklarının etkin bir şekilde sınıflandırılması için yeni bir metodoloji sunulmuştur. Bu metodolojiye göre öncelikle bilgi kazancı, fisher korelasyon skorlama, relief ve ki-kare yöntemleri kullanılarak elde edilen alt kümelerin birleşimi ensemble metot ile sağlanır. Bu işlemlerle öznitelik seçimi yapılır ve daha sonra genetik algoritma kullanılarak öznitelik azaltma süreci uygulanır. Son olarak, naive bayes sınıflandırıcısı kullanılarak sınıflandırma işlemi yapılır. Önerilen bu hibrit yaklaşım literatürde yaygın olarak kullanılan üç kanser veri seti üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki güncel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın sonraki kısımları şu şekilde düzenlenmiştir: bölüm 2'de temel problemler tanımlanmıştır, bölüm 3'te kullanılan veri kümeleri, kullanılan öznitelik indirgeme ve sınıflandırma yöntemleri ve önerilen model detaylı bir şekilde açıklanmıştır, bölüm 4'te önerilen modelin uygulanması sonucunda elde edilen bulgular açıklanmış ve tartışılmıştır, son olarak bölüm 5'te ise sonuçlar sunulmuştur

## 2. PROBLEM TANIMI (PROBLEM DEFINATION)

Bu çalışmanın temel amacı, gen mikrodizi verilerinden elde edilen örneklerin kanserli olup olmadığını tahmin edebilecek bir makine öğrenmesi modeli geliştirmektir. Çalışma alanı olarak gen mikrodizi verilerinin sınıflandırılması problemi, kendine has özelliklerinden kaynaklı birçok zorluğa sahiptir. Bu zorluklardan ilki gen mikrodizi verilerinin yapısından kaynaklı bir problemdir. Bu problem, veri kümelerinin genellikle binlerce gene yani özneliğe sahip olmasından ve bunun aksine örnek sayısının birkaç yüzü geçmemesinden kaynaklanmaktadır [16]. İkinci zorluk, veri setlerindeki genlerin sadece birkaçının üstünde çalışılan kanser türüyle ilişkili olmasıdır. On binlerce gen arasından en alakalı genlerin ortaya çıkartılması, en basit haliyle genlerin mümkün olan tüm alt kümelerinin tespiti ve denenmesiyle bulunabilir. Teorik olarak bu uygulanabilir görünse de uygulamada birçok problemle karşılaşmaktadır [16]. Çünkü gen mikrodizi verilerinde gen sayılarının çok fazla olması sebebiyle tüm alt kümelerin test edilmesi kaynak, teknik ve zaman kısıtları sebebiyle mümkün değildir. Bu sebepten dolayı, genlerin tüm alt kümelerinin denenmesi ile etkin genlerin bulunması problemi genellikle NP-hard problem sınıfına dahil edilir. NP-hard problemler, doğrusal zamanda çözülmesi ve çözümünün doğrulanması mümkün olmayan problem sınıfındadır [17]. Üçüncü zorluk, gen mikrodizi verilerinin hem elde edilmesindeki sürecin maliyetli

oluşundan hem de biyolojik sebeplerden dolayı elde edilen veri setlerinin gürültü olmasından kaynaklanmaktadır. Bu verilerin gürültülü olması etkin genlerin tespit edilmesinde yanılgılara sebep olabilmektedir [18]. Dördüncü zorluk ise uygulama alanından ve çalışılan problemin tipinden kaynaklanan zorluktur. Kanser sınıflandırmasında etkin olacak genlerin tespitinden sonra eğitilecek modelin başarı (accuracy) skoru, modeli değerlendirmek için yeterli değildir. Bunun sebebi, her bir sınıfa ait örnek sayısının birbirinden sayısal olarak aralarında büyük farklar olabilme ihtimalidir. Böyle bir durumda accuracy metriği ile değerlendirme yapıldığında hatalı sonuçlar elde edilebilir [19]. Dolayısıyla, etkin genlerle eğitilen modelin sadece accuracy ölçütü ile değerlendirilmesi yeterli değildir. Bu yüzden farklı değerlendirme ve doğrulama metriklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

### 3. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

#### 3.1. Öznitelik Seçimi (Feature Selection)

Gen mikrodizi verileri genellikle çok sayıda özneliğe sahiptir. Bu durum boyutsallığın lanetine (curse of dimensionality) sebep olmaktadır. Bu tip veri kümelerinde genlerin çoğu alakasız veya gereksizdir. Gen ifade verileri kanser oluşumunu gösterebilir. Fakat alakasız gen ifade verileri makine öğrenmesi modelinin düzgün şekilde eğitilmesini engeller. Böyle durumlarla baş edebilmek için verinin yapısını bozmadan veriyi daha az değişkenle temsil edebilmek mümkündür. Bunun için özellik seçimi (*feature selection*) ve özellik çıkarma (*feature extraction*) şeklinde iki temel yaklaşım tercih edilmektedir. Bunlardan öznelik seçimi yapılmasıyla alakasız gen verileri veri kümesinden rahatlıkla çıkarılabilir. Bu sayede işlem ve zaman karmaşıklığı azaltılmış olur.

##### 3.1.1. Bilgi Kazancı (Information Gain)

Bu yöntem, makine öğrenmesi alanında oldukça yaygın kullanılan bir değerlendirme yaklaşımıdır. Bu yöntem aslında entropide beklenen azalmayı ölçer [20]. X özelliğine bağlı şekilde Y özelliğinin entropisindeki azalma aşağıdaki gibi hesaplanır [21].

$$H(Y) = - \sum_{y \in Y} p(y) \log_2(p(y)) \quad (1)$$

$$H(Y \setminus X) = - \sum_{x \in X} p(x) \sum_{y \in Y} p(y \setminus x) \log_2(p(y \setminus x)) \quad (2)$$

$$\text{BilgiKazancı} = H(Y) - H(Y \setminus X) \quad (3)$$

Bilgi Kazancı, öznelik seçimi için kullanılabilir. Bir veri kümesindeki tüm öznelikler sınıflandırma için eşit etkiye sahip değildir. Kimi öznelik sınıfları birbirinden daha iyi ayırt edilebilirken; kimi öznelik sınıfları bu tür bir işlem için elverişli değildir. Bilgi kazancı skoru ile diğer özneliklere göre ayırt ediciliği daha yüksek öznelikler belirlenebilir. Bu öznelikler, sınıflara karar verme konusunda diğer özneliklere göre daha çok katkıda bulunabilir [22].

Bilgi Kazancı yöntemi ile skorlanan özneliklerden en yüksek skora sahip olanı, sınıflandırma için kullanıldığında en yüksek ayırt edici öznelik olacağı kabul edilir. Karar Ağaçlarında da kullanılan bu yöntem, bu çalışmada öznelik seçimi için kullanılmıştır çünkü gen mikrodizi verilerinin içerisinde tespit edilmek istenen kanserle ilişkili genlerin yanında alakasız genler de bulunmaktadır ve bu genler model eğitimi sırasında öznelik olarak kullanılırsa, modelin sınıflandırma başarısı olumsuz etkilenir. Bilgi Kazancı yönteminin bu çalışma da kullanılmasının sebebi çalışılan veri kümesinin gen mikrodizi veri kümesi olmasından dolayı tespit edilmeye çalışılan kanser türüyle alakasız veya az alakalı genlerin yani özneliklerin elenmesi, dolayısıyla sınıflandırma modelinin kanser türüyle daha alakalı genler ile eğitilmesini sağlamaktır. Bu yöntem ile öznelik seçim işlemi, özneliklerin Bilgi Kazancı skorlarına göre büyükten küçüğe sıralanması ve sıralanmış özneliklerin belirlenen sayıda seçilmesi ile yapılmıştır.

### 3.1.2. Fisher Skorlama (Fisher Scoring)

Bu skorlama türü, özellikler için ayrı ayrı ilişki skoru hesaplar. Bu yöntem ilişki skoru hesabında her sınıf için özelliklerin standart sapmasını ve ortalamasını kullanılır. Bu yöntemin formülü Denklem 4'te gösterilmiştir [23].

$$F(x_i) = \frac{|\mu_i^+ - \mu_i^-|}{\sigma^+ - \sigma^-} \quad (4)$$

Bu formülde sınıflar (+) ve (-) işaretleri ile gösterilmektedir. Standart sapmalar  $\sigma^+$  ve  $\sigma^-$  sembolleriyle, ortalamalar ise  $\mu^+$  ve  $\mu^-$  sembolleriyle gösterilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen en yüksek skorlu özellik iki sınıfı birbirinden ayırabilmede uygun bir seçenek olarak tercih edilebilir. Fisher skorlamanın özellik seçimi için kullanımı sırasında öncelikle bu yöntemle skorlanan özellikler büyükten küçüğe doğru sıralanır. Daha sonra en yüksek skorlu özellikten başlanarak istenilen sayıda özellik seçilir ve işlem tamamlanır.

Bilgi Kazancı yöntemi entropi metriğini kullanarak öznitelikleri skorlarken, Fisher Skorlama standart sapma ve ortalama metriklerini kullanır. Bu çalışmada ki hibrit öznitelik seçme modeli oluşturulurken kullanılan yöntemlerden bir tanesi de Fisher Skorlama'dır çünkü bu yöntem özniteliklerin sınıflandırma ile ilişkisini skorlarken diğer yöntemlerden farklı metrikler kullanır.

### 3.1.3. Relief-F

Kira ve Rendell [24] tarafından önerilen bu yöntem, özellikler arasındaki bağımlılıkları ortaya çıkartarak bu özelliklerin seçilebilirliği için anlamsal değerleri bulmayı hedefler ve ikili sınıflandırma problemlerinde etkin bir şekilde kullanılır. ReliefF yaklaşımı, komşuluk algoritmalarının çalışma mantığına yakın bir işleyişe sahiptir. Ele alınan özelliğin sınıflarda bulunup bulunmadığına göre sınıflardaki yakınlıklar göz önünde bulundurularak ağırlıklandırılmalar yapılır. Relief algoritması üç temel adımdan oluşmaktadır. Bu adımlardan ilkinde, ele alınan örneklerle aynı ve farklı sınıflarda bulunan en yakın örneklerin ilgili özellik skorlarının ayrı ayrı belirlenmesi sağlanır. İkincisinde ele alınan özelliklerin ağırlıkları hesaplanır. Üçüncüsünde ise ağırlıklandırılan özelliklerin sıralanması ve belirlenen bir eşik değerinin üstünde kalan k adet özelliğin belirlenmesi işlemleri tamamlanır. Denklem 5'te ağırlıkların güncellenmesi ile ilgili formül verilmiştir. Burada n örnek sayısını,  $W_i$  belirlenen özelliğin ağırlığını,  $nearHit_i$  aynı sınıftaki en yakın örneklerle ilişkili özellik değerini,  $nearMiss_i$  farklı sınıftaki yakın örneklerle ilişkili özellik değerini, x ise rastgele seçilen örneği gösterir. Böylece algoritmanın ikinci adımındaki ağırlıklar bu formülün n kez tekrarlanmasıyla hesaplanır [25].

$$W_i = W_{i-1} - (x_i - nearHit_i)^2 + (x_i - nearMiss_i)^2 \quad (5)$$

Relief-F öznitelik seçme yöntemi de bu çalışmada tanımlanan hibrit öznitelik seçme modelinde kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Relief-F'in hibrit modele dahil edilmesinin sebebi yine öznitelikleri skorlarken diğer yöntemlerden farklı metrikler kullanmasıdır.

### 3.1.4. Ki-Kare (Chi-Square)

Bu yaklaşım veri bilimindeki popüler öznitelik seçme yöntemlerinden biridir. Ki-kare testinin çalışma mantığı beklenen ve gözlemlenen frekanslar arasındaki farklılığın anlamlı olup olmadığını belirlenmesine dayanmaktadır. Bu yöntemde özellikler (X) ile sınıflar (Y) arasındaki ilişkinin varlığını incelemektedir. Bu inceleme sonucunda Y ile ilişkisi bulunmayan özellikler veri kümesinden çıkarılır. Ki-kare test skoru, Denklem 6, 7 ve 8'de verilen formüller kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$X^2 = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (N_{ij} - \widehat{N}_{ij}) / \widehat{N}_{ij} \quad (6)$$



$$\hat{N}_{ij} = \frac{N_i N_j}{N} \quad (7)$$

$$d = (I - 1)(J - 1) \quad (8)$$

Yukarıda verilen denklemlerdeki  $N_{ij}$ ,  $Y$ 'nin  $i$ . ve  $X$ 'in  $j$ . düzeyinde bulunan birim sayısını,  $\hat{N}_{ij}$  iki özellik birbirinden bağımsızken  $Y$ 'nin  $i$ . ve  $X$ 'in  $j$ . düzeydeki beklenen birim sayısını ve  $d$  test istatistiği hesaplaması yapılacak olan Ki-kare dağılımının serbestlik derecesini ifade eder.  $I$  ve  $J$  ise satırlar ve sütunlardır. Bu yöntem kullanılarak öznitelik seçme işlemi yapılacağında, özellikler hesaplanan skorlara göre büyükten küçüğe doğru sıralanır ve en yüksekten başlayarak istenilen sayıda özellik elde edilmiş olur.

Ki-Kare öznitelik seçme yöntemi de bu çalışmada tanımlanan hibrit öznitelik seçme modelinde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin hibrit modele dahil edilmesinin sebebi yine öznitelikleri skorlarken diğerlerinden daha farklı bir yaklaşımda bulunmasıdır.

### 3.2. Sınıflandırma (Classification)

#### 3.2.1. Naive Bayes

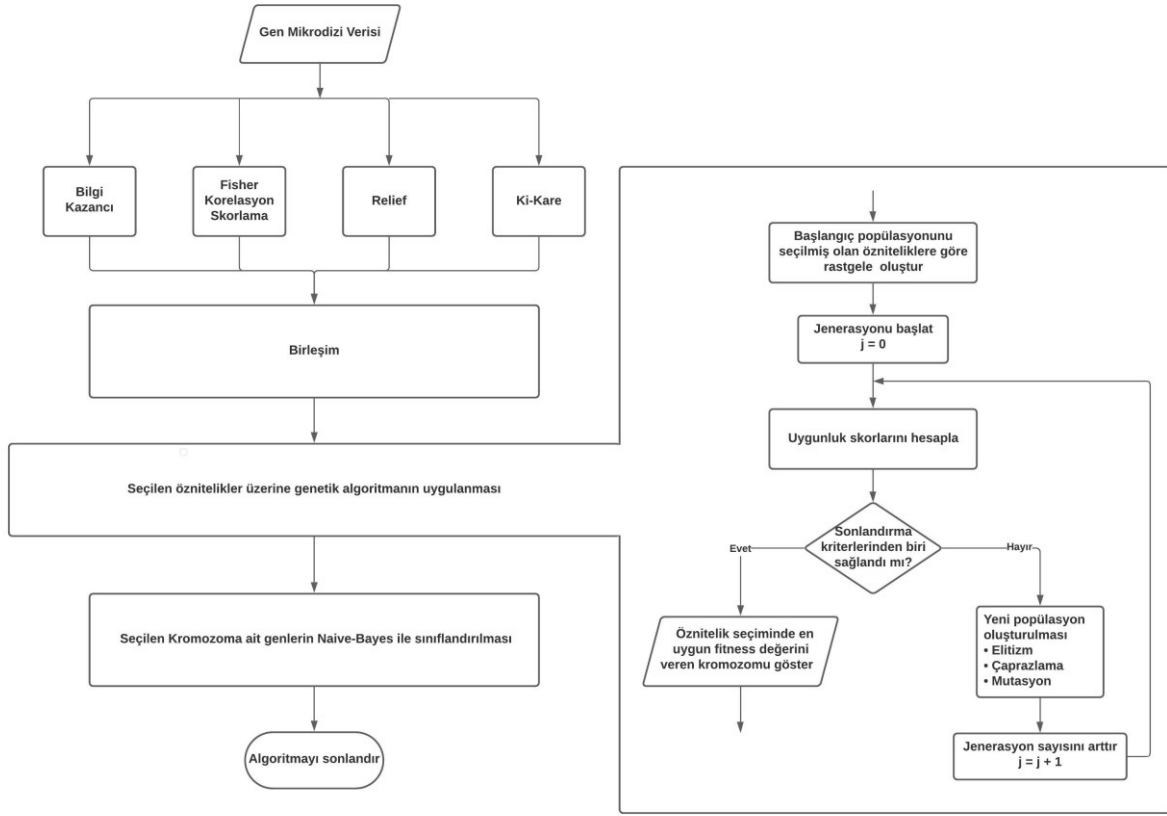
Bu sınıflandırıcı hem ayrık hem de sürekli özniteliklerle gerçek hayat problemleri üzerinde yüksek performansla çalışabilen hızlı ve artırılabilir bir algoritmadır. Bu algoritmada etkin sınıflandırıcı her durumun olasılıklarını ayrı ayrı hesaplar ve olasılık değeri en yüksek olan sınıfa atanır. Naive Bayes sınıflandırıcısının kararları bilgi kazanımlarının toplamı olarak ifade edilebilir. Bu sınıflandırıcı, özniteliklerin verilen sınıftan bağımsız olduğunu varsayar. Bu durum öğrenmeyi oldukça basit bir hale getirir. Burada bağımsızlık genellikle zayıf bir varsayımdır fakat pratikte Naive Bayes'e göre daha karmaşık sınıflandırıcılarla başarı bağlamında oldukça yüksek başarıyla rekabet eder. Buna karşın öznitelikler arası güçlü bağımlılıkların olduğu alanlarda yüksek performans görülmeyebilir. Naive Bayes yaklaşımının uygulama formülleri Denklem 9 ve 10'da gösterilmiştir [25].

$$P(a_1, a_2, \dots, a_n | v_j) = \operatorname{argmax}_{v_j \in V} \prod_i P(a_i | v_j) \quad (9)$$

$$v_{NB} = \operatorname{argmax}_{v_i \in V} (v_j) \prod_i P(a_i | v_j) \quad (10)$$

### 3.3. Önerilen Hibrit Yaklaşım (The Proposed Hybrid Approach)

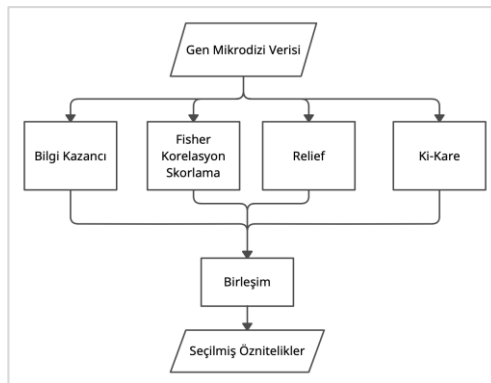
Önerilen hibrit yöntemde, gen mikrodizi verisi girdi olarak alınır ve Bilgi Kazancı, Fisher Korelasyon Skorlama, ReliefF, Ki-Kare isimli yöntemler bu veriye ayrı ayrı uygulanır ve elde edilen sonuçların küme bileşimi alınarak yeni gen alt veri kümesi elde edilir. Bu alt veri kümesi Genetik Algoritma'nın girdisini oluşturur ve başlangıç popülasyonu bu verilere göre oluşturulur. Daha sonra bu alt veri kümesine Genetik Algoritma uygulanarak, sınıflandırmada en etkin olan öznitelikler bulunur. Bu işlemler önerilen yaklaşımın sınıflandırmada etkin olan özniteliklerin seçiminde çok etkilidir. Son olarak, Genetik Algoritma'nın işlemleri sonucunda geri döndürülen öznitelik alt kümesi kullanılarak Naive Bayes sınıflandırıcısı eğitilir ve kanser sınıflandırılması yapılır. Şekil 1'deki akış şemasında önerilen modelin bütüncül yapısı sunulmuştur.



Şekil 1. Önerilen hibrit yöntem çalışma adımları

### 3.3.1. Özellik Seçim Yaklaşımı (Feature Selection Approach)

Önerilen yöntemde özellik seçimi, gen mikrodizi verisi üzerine Bilgi Kazancı, Fisher Korelasyon Skorlama, Relief ve Ki-Kare yöntemleri kullanılarak oluşturulan Ensemble yöntemle gerçekleştirilir. Ensemble Özellik Seçim Algoritması'nın ilk adımında veri kümesi özellikleri ayrı ayrı Bilgi Kazancı, Fisher Korelasyon Skorlama, Relief ve Ki-kare yöntemleri ile skorlanır. Her bir yöntem ile ölçülen bu özelliklerin ilk N tanesi kaydedilir. Daha sonra elde edilen gen alt kümelerinin birleşimi sağlanır ve bu aşamalardan sonra uygun özellikler belirlenir. İlgili işlem adımları Şekil 2'de gösterilmiştir. Birleşim yöntemi sayesinde, farklı özellik seçme yöntemlerinde birden fazla sayıda yüksek skor almış ve seçilmiş özelliklerin tekrar etmesi engellenir. Ayrıca bu Ensemble yöntem sayesinde sınıflandırmada etkin olabilecek özelliklerin elenmesinin büyük oranda önüne geçilmiş olur.



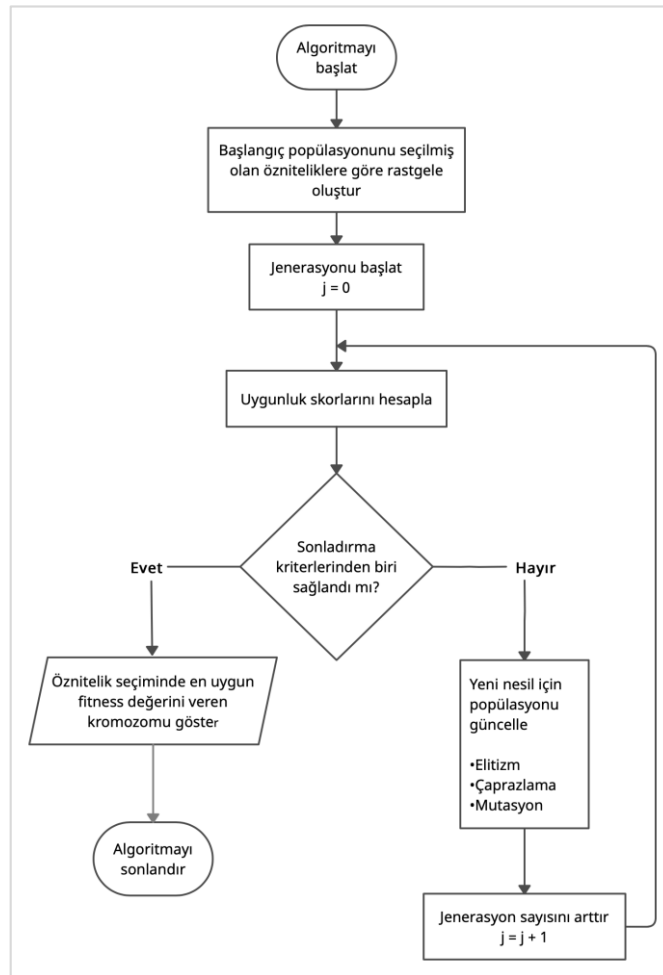
Şekil 2. Önerilen ensemble seçim yaklaşımı

### 3.3.2. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)

Genetik Algoritma doğadan esinlenerek oluşturulmuş evrimsel bir optimizasyon algoritmasıdır [12]. Bu algoritma, çevreye adaptasyon konusunda en başarılı olan bireyin hayatta kalması prensibine dayanan stokastik bir algoritmadır. Stokastik bir algoritma olduğu için büyük veri uzayıdaki aramayı daha hızlı yapabilmekte ve optimal sonuçlara yakın çözümlerin bulunmasında önemli avantajlara sahiptir.

Genetik Algoritmadaki genler, gen mikrodizi verilerindeki özniteliklere karşılık gelmektedir. Belirli sayıda gen bir araya gelerek kromozomlar oluşturur. Bu sebepten dolayı kromozomlar aslında gen mikrodizi veri kümesinin özniteliklerinin farklı alt kümeleridir. Kromozomlar ise bir araya gelerek popülasyonu oluşturmaktadır.

Ele alınan problemin çözümü için belirlenen algoritmanın başlangıç aşamasında bir önceki Ensemble Öznitelik Seçimi aşamasında seçilmiş gen alt kümesi kullanılarak rastgele bir popülasyon oluşturulur ve popülasyondaki tüm kromozomlar için uygunluk (fitness) skoru hesaplanır. Fitness skoru hesaplanan kromozomlar, fitness skorlarına göre büyükten küçüğe sıralanır ve elitizm yüzdeliği içerisinde olan kromozomlar doğrudan sonraki nesle (jenerasyon) aktarılır. Sonrasında elitizm ile seçilen kromozomlar kendi aralarında çaprazlanır. Çaprazlama işlemi sonrası mutasyonlar ile gen değişimi gerçekleşebilir. Bu şekilde yeni jenerasyon oluşturulur. Yeni jenerasyon için tekrar fitness skorları hesaplanır ve durdurma koşulu kontrol edilir. Eğer koşul sağlanmazsa elitizm aşamasına geri dönülür ve kalan adımlar tekrarlanır. Eğer koşul sağlanırsa seçilen kromozom, problemdeki biyobelirteç genler olarak belirlenir. Bu algoritmanın bu temel işlem adımları aşağıda kısaca açıklanmış olup; çalışma adımları Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 3. Genetik algoritma çalışma adımları

### 3.3.2.1. Gen Havuzunun Belirlenmesi (Determination of Gene Pool)

Bu çalışmada genetik algoritmanın gen havuzu, ensemble öznitelik seçimi adımında elde edilen öznitelik altkütmesi kullanılarak oluşturulmaktadır.

### 3.3.2.2. Popülasyon Oluşturma (Generation of Population)

Genetik algoritmada popülasyonu, kromozomlar oluşturmaktadır. Kromozomları ise genler oluşturmaktadır. Popülasyonu oluşturmak için kromozomların oluşturulması gerekmektedir. Kromozomların uzunluğu kaç tane gen taşınacağını belirler. Örneğin; bir kromozomun uzunluğu 10 ise ilgili kromozom içerisinde 10 farklı gen bulunur. Kromozomların oluşturulması süreci, kromozom uzunluğu kadar rastgele ve birbirinden farklı genlerin seçilmesiyle gerçekleştirilir. Bu şekilde popülasyon sayısı kadar rastgele kromozomlar oluşturulur.

### 3.3.2.3. Fitness Fonksiyonu (Fitness Function)

Genetik algoritmanın başarısını belirleyen en önemli fonksiyon fitness fonksiyonudur. Çünkü bir sonraki jenerasyona hangi kromozomların aktarılacağını bu fonksiyon belirler. Bu çalışmada fitness skoru, f1 skor olarak belirlenmiştir. Buradaki fitness fonksiyonu uygunluk skorunun hesaplanmasında kullanılır. Bu çalışmada accuracy yerine F1 Uygunluk değerinin kullanılmasının en temel sebebi sadece false-negative ya da false-positive değil; aynı zamanda tüm hata maliyetlerini de içerecek bir ölçme metriğine ihtiyaç duyulmasıdır [26].

Her bir jenerasyonda, ilgili nesilde bulunan tüm kromozomlar fitness fonksiyonu ile skorlanır. Fitness fonksiyonu her bir kromozomun içerdiği genlerden oluşan veri alt kümeleri ile makine öğrenmesi modelini eğitir ve eğitilen modelin F1 skorlarını hesaplar. Fitness fonksiyonunda makine öğrenmesi modeli olarak Gaussiann Naive Bayes yaklaşımı kullanılmıştır.

### 3.3.2.4. Yeni Jenerasyonun Belirlenmesi (Determination of New Generation)

Genetik algoritmanın temel motivasyonlarından biri en iyi kromozomların sonraki nesillere sistematik olarak aktarılmasıdır. Bunun sağlanması için öncelikle popülasyondaki tüm kromozomlar, fitness fonksiyonu ile skorlanır. Sonrasında kromozomlar fitness skorlarına göre yüksek skordan düşük skora doğru sıralanır. Daha önceden belirlenen elitizm oranına karşılık gelen kromozom sayısı kadar birey en yüksek skorlu kromozomdan başlanarak seçilir. Burada seçilen kromozomlar, doğrudan sonraki nesile aktarılır. Fakat yeni nesile aktarılan kromozomlar yeni neslin tamamını oluşturmaz. Yeni nesilde eksik kalan kromozomlar, elitizm ile seçilen kromozomların kendi aralarında çaprazlanmasıyla oluşturulan yeni kromozomlarla tamamlanır.

### 3.3.2.5. Çaprazlama ve Mutasyon (Crossover and Mutation)

Elitizm ile seçilen kromozomlar kendi aralarında çaprazlanarak yeni jenerasyonun kalan kromozomlarını oluşturur. Çaprazlama (cross-over) işlemi sırasında her yeni kromozom elitizm ile seçilen kromozomlar arasından rastgele belirlenen iki ebeveyn kromozom tarafından oluşturulur. Yeni kromozomun genleri belirlenirken üç olasılık mevcuttur. İlk olasılıkta seçilen gen, birinci ebeveynden alınmış olabilir. İkinci olasılıkta gen ikinci ebeveynden alınmış olabilir ve son olasılıkta ilgili gen mutasyon sonucu elde edilmiş olabilir. Mutasyon işlemi sayesinde yeni kromozoma dahil edilecek genin ebeveyn kromozomlardan seçilen bir gen ile değil; gen havuzundan rastgele seçilmesiyle gerçekleştirilir. Mutasyonun gerçekleşme ihtimali, daha önceden belirlen mutasyon yüzdesi parametresi ile belirlenir.

### 3.3.2.6. Durdurma Kriteri (Stopping Condition)

Algoritmadaki durdurma kriteri iki farklı durumda sağlanabilir. Birinci durum, Genetik Algoritmanın başlangıçta belirlenen maksimum jenerasyon sayısına ulaşılmasıdır. Algoritma bu sayıya ulaştığında işlemler tamamlanır. İkinci durum ise algoritma çalışmadan önce belirlenen kontrol aralığı durumuna ve hata parametrelerine bağlıdır. Bu durum, kontrol aralığı parametresi ile belirtilen sayıdaki jenerasyonlar

boyunca tüm nesillerdeki en yüksek fitness skorlarının değişiminin belirlenen değişim oranından büyük olmadığına gerçekleşir.

Algoritma sonlandırıldığında, en yüksek uygunluk skoruna sahip kromozom belirlenir. Sonrasında belirlenen kromozom içerisindeki genlerden oluşan veri alt kümesi, sınıflandırıcının eğitilmesi için önerilen modelin sonraki aşamasına girdi olarak verilir.

### 3.3.3. Sınıflandırma (Classification)

Genetik Algoritma'nın işlem adımları sonrasında seçilen gen alt kümesi, sınıflandırmada en etkin genler olarak kabul edilir. Bu genlerden oluşan veri altkümesi ile sınıflandırma yapılması için bir makine öğrenmesi modeli eğitilir. Bu problem için sınıflandırma işlemlerinde başarılı olan ve istatistiksel alt yapısı problem çözümünde etkin olan Gaussian türü Naive Bayes Algoritması kullanılmıştır. Sınıflandırıcı ile ilgili formüller Denklem 11 ve 12'de verilmiştir.

$$P(a_i|v_j) = \frac{n_c + mp}{n + m} \quad (11)$$

$$V_{nb} = \operatorname{argmax}_{v_j \in V} P(V_j) \prod P(a_i|v_j) \quad (12)$$

Burada  $n$ ,  $v = v_j$  için eğitim örneklerinin sayısını gösterirken;  $n_c$ ,  $v = v_j$  ve  $a = a_i$  için belirlenen örneklerin sayısını ifade eder. Denklem 12'deki  $V_{nb}$  ise sınıf değişkenini gösterir.

### 3.4. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Bu bölümde, hibrit seçim ve genetik algoritma temelli önerilen yaklaşımın performans değerlendirme sonuçları sunulmuş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

#### 3.4.1. Veri Kümeleri (Datasets)

Bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan üç kanser türü için üç ayrı gen mikrodizi veri kümesi üzerinde testler yapılmıştır. Bu veri setleri Tablo 1'de sunulmuştur. Ayrıca çalışmada kullanılan genetik algoritmaya ait parametrelerin belirlenmesi için daha güncel teknoloji ile elde edilmiş prostat kanseri gen mikrodizi veri seti de kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Veri Kümesi Özellikleri

Veri Kümesi	Sınıf Türü Sayısı	Gen Sayısı	Örnekler Sayısı	Sınıf Dağılımı
Leukemia	2	7129	72	25 AML- 47 ALL
Central Nervous System	2	7129	60	39 Class0 ve 21 Class1
Colon Tumor	2	6500	62	22 Pozitif ve 40 Negatif

Çalışmada kullanılan ilk veri kümesinde, kolon kanseri hastalarından toplanan 62 örnek ele alınmıştır. Bunlar arasından 40 tanesi tümör biyopsisi sonucunda negatif olarak etiketlenmişken; 22 tanesi aynı insanların sağlıklı kısımlarından alınarak pozitif etiketlenmiştir. Veri kümesinde toplamda 2000 adet özellik bulunmaktadır [27].

İkinci veri kümesi, merkezi sinir sistemi ile ilişkili tümör hastalıkları için kişilerin hayatta kalıp kalamadığı bilgisini gösteren veri setidir. Bu veri setindeki birinci sınıf, tedaviden sonra hayatta kalan hastaların grubunu gösterirken; ikinci sınıf, tedavide başarısız olanların grubunu ifade eder. Veri seti 60 hasta örneği içerir. Bunlardan 21'i survivors olarak ifade edilir ve Sınıf1 (Class-1) olarak etiketlenir. Kalan 39'u ise failures olarak isimlendirilen Sınıf0 (Class-0) etiketini ifade eder. Ayrıca bu veri setinde 7129 gen bulunmaktadır [28].

Üçüncü veri kümesinde, lösemi hastalarından toplanan 72 örnek vardır. Bunların arasından 25 tanesi Akut Miyeloid Lösemi (AML) hastasıyken; 47 tanesi ise Akut Lenfoblastik Lösemi (ALL) hastasıdır. Bu veri kümesi toplamda 7129 gen verisine sahiptir [29].

Ensemble öznitelik seçim yaklaşımının ve genetik algoritmanın parametre değerleri belirlenirken, daha güncel teknoloji ile elde edilen ve CuMiDa [30] çalışmasıyla sunulan prostat kanseri veri kümesi kullanılmıştır. Prostate\_GSE6919\_U95C veri kümesi içerisinde toplamda 115 örnek ve 12648 özellik yani gen verisi bulunmaktadır. Veri kümesinin analiz zorluğu, az sayıda örneğe karşılık çok sayıda özelliğin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bu veri kümesinde veriler kanserli veya normal olarak etiketlenerek algoritmaların parametrik değerleri belirlenmiştir.

### 3.4.2. Parametrelerin Belirlenmesi (Determination of Parameters)

Bu çalışmada önerilen hibrit yöntemin birçok parametresi bulunmaktadır. Ensemble öznitelik seçimi kısmında seçilecek ilk N adet gen parametresi; genetik algortmada kontrol aralığı, değişim miktarı, maksimum jenerasyon sayısı, popülasyon sayısı, kromozom uzunluğu, elitizm yüzdesi ve mutasyon oranı parametreleri sınıflandırma sonuçlarını doğrudan etkilemektedir. Bu sebepten dolayı parametre değerlerinin uygun yöntemler ile belirlenmesi sağlanmıştır.

**Tablo 2. Genetik Algoritma ile ilgili parametre değerleri**

<i>Seçilen N gen</i>	<i>Popülasyon x Kromozom</i>	<i>Elitizm Oranı</i>	<i>Mutasyon Oranı</i>
550	600 genlik veri	%25	%12

Bu çalışmadaki temel parametre değerleri Tablo 2’de sunulmuştur. Sınıflandırma için ilk N adet gen 550 olarak belirlenmiştir. “Popülasyon x Kromozom” kısmı genleri temsil eder ve bu çarpımın belirlenen değeri 600’dür. Elitizm ve mutasyon oranları sırasıyla; yüzde 25 ve yüzde 12 olarak belirlenmiştir. Tüm bu değerler *Prostate\_GSE6919\_U95C* veri seti[30] üzerindeki testlerle belirlenmiştir. Tablo 2’deki parametre içeriklerinin belirlenmesi ile ilgili adımlar aşağıdaki başlıklarda özetlenmiştir.

#### 3.4.2.1. İlk N Gen Parametresi (Determination of First N Gene)

N parametresi, ensemble öznitelik seçim yöntemi ile skorlanıp, yüksek skordan küçük skora doğru sıralanan genlerin, ilk kaç adedinin seçileceğini ifade eder. Bu değişken değerinin doğru belirlenebilmesi, çalışmanın sonucunu doğrudan etkilemektedir. N parametresinin içeriğinin uygun bir şekilde belirlenebilmesi için önerilen yöntem, parametrenin iteratif şekilde artırılıp her bir artırım sonucunda hesaplanan F1 skor değerlerinin karşılaştırılmasıdır. Deneysel çalışmalarda N parametresinin her bir artırım işleminden sonra seçilen genleri Genetik Algoritma’ya girdi olarak verilmiştir. Genetik Algoritma ise bu girdilere göre 10 kez çalıştırılmış ve işlem sonlandırıldığında elde edilen F1 skorları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, en yüksek başarı ilk 550’şer öznitelik seçimi ve bileşimi ile elde edilmiştir. Bu testten sonra N sayısı 550 olarak belirlenmiştir.

#### 3.4.2.2. Popülasyon Ve Kromozom Uzunluğu Parametreleri (Determination of Population and Chromosome Lengths Parameters)

Kromozom uzunluğu ve popülasyon sayısı parametrelerinin nasıl belirleneceği önemli bir konudur. Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, deneme ve yanılma yöntemi bu parametrelerin belirlenmesinde en çok kullanılan yaklaşımlardan biridir. Deneysel çalışmalarda algoritmanın çalışma süreleri göz önüne alındığında “kromozom uzunluğu x popülasyon” değişkeni içeriğinin 600’den fazla olması işlemsel/zamansal karmaşıklığı arttırmakta ve deneme yanılma yönteminin işlevselliğini kaybettirmektedir. Yapılan denemeler ve analizler sonucunda ilgili parametre değerinin 600 olmasına karar verilmiştir.

#### 3.4.2.3. Elitizm Oranı Parametresi (Determination of Elitizm Ratio Parameter)

Elitizm yüzdesi, genetik algoritmanın başarısına önemli ölçüde etki etmektedir. Bu parametrenin küçük seçilmesi daha kısır jenerasyonlara, sebep olurken; büyük seçilmesi ise yerel maksimum (optimum)

sonuçtan uzaklaşılmasına ve daha düşük yerel maksimum sonuçlar elde edilmesine sebep olabilir. Bu parametrenin optimal değerinin tespiti için önerilen yöntem deneme yanılma yöntemidir. %5 ile %30 arasındaki tüm değerler için Genetik Algoritma 10'ar kez çalıştırılmış ve ortalama sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda Elitizm parametresinin değeri %25 olarak belirlenmiştir.

#### 3.4.2.4. Mutasyon Oranı Parametresi (Determination of Mutation Ratio Parameter)

Mutasyon oranı parametresi de elitizm parametresi gibi Genetik Algoritma'nın başarısını doğrudan etkiler. Genetik algoritma doğadan esinlenen bir algoritma olduğu için ele alınan mutasyon parametresi de doğadaki mutasyon ihtimaline uygun olarak oldukça küçük belirlenmelidir. Fakat genetik algoritmanın uygulandığı probleme göre mutasyon oranının farklı değerler şeklinde belirlenmesi de mümkündür. Mutasyon oranının yüksek olması, yerel maksimuma ulaşılma ihtimalini düşürmektedir. Fakat bu durum mevcut yerel maksimumdan daha yüksek değere sahip farklı bir yerel maksimuma ulaşılma ihtimalini de arttırabilmektedir. Dolayısıyla bu parametrenin optimal değerinin tespiti, algoritmanın test sonuçlarına fazlaca etki etmektedir. Bu parametrenin optimal değerinin tespiti için önerilen yöntem yine deneme yanılma yöntemidir. Yapılan deneylerde mutasyon oranı %2 ile %20 arasındaki tüm değerler için genetik algoritma 10'ar kez tekrar çalıştırılmış ve sonuçların ortalaması karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda mutasyon oranı %12 iken en yüksek başarı elde edilmiştir. Bu sebepten dolayı mutasyon oranı parametresi %12 olarak belirlenmiştir. Tüm bu belirlenen parametre değerlerine göre yapılan testlerin sonuçları Tablo 3 ve 4'te özetlenmiştir.

#### 3.4.3. Performans Değerlendirme Metrikleri (Metrics of Performance Evaluation)

Makine öğrenme modellerinin başarısını ölçmek için bazı performans ölçme yöntemlerinden yararlanılır. Bu ölçümün gerçekleştirilmesinde gerçek ve tahmin edilen sınıflar için True Positive (TP) değişkeni pozitif tahmin edilen ve gerçekte de pozitif olanları ifade ederken; True Negative (TN) değişkeni negatif tahmin edilen ve gerçekte de negatif olanları gösterir. Yanlış tahminlemede ise False Negative (FN) negatif olarak tahmin edilen ama gerçekte pozitif olanları ifade ederken; False Positive (FP) pozitif olarak tahmin edilen fakat gerçekte negatif olanları gösteren değişkenleri gösterir. Bu parametreler kullanılarak başarıların test edilmesinde bir karışıklık/hata matrisi (confusion matrix) tanımlanır [31].

**Tablo 3.** Önerilen yöntemin performans değerlendirme metrikleri (yüzde olarak)

<i>Veri Kümesi</i>	<i>Doğruluk</i>	<i>Duyarlılık</i>	<i>Kesinlik</i>	<i>F1-Skor</i>
<i>Leukemia</i>	98.28	98.66	98.38	98.26
<i>Central Nervous System</i>	93.66	95.25	92.95	93.18
<i>Colon Tumor</i>	93.33	83.00	90.00	86.03

Önerilen sistemin performansı Denklem 13-16 arasında verilen formüller kullanılarak ölçülür. Bu denklemlerle doğruluk (*accuracy*), duyarlılık (*precision*), kesinlik (*recall*) ve F1 skor değerleri hesaplanır.

$$\text{doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (13)$$

$$\text{kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (14)$$

$$\text{duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (15)$$

$$F1 = \frac{2 \times \text{kesinlik} \times \text{duyarlılık}}{\text{kesinlik} + \text{duyarlılık}} \quad (16)$$

### 3.4.4. K-Katlamalı Çapraz Doğrulama (K-Fold Cross Validation)

K-kez çapraz doğrulamada, veri kümesi rastgele k adet, birbirini dışlayan alt kümelere bölünür. ( $1/k$ ) kadarlık örnek, test alt kümesi olarak belirlenirken; geriye kalan ( $(k-1/k)$ ) kadarlık örnek eğitim verisi olarak belirlenir ve model bu verilerle hem eğitilir hem de test edilir [33]. Bu işlem, test verisinin öncekilerden farklı olması şartı ile k kez tekrar edilir. Burada modelin performans metrikleri hesaplanırken tüm iterasyondaki performans metriklerinin ortalaması alınır.

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

Bu bölümde literatürdeki diğer çalışmaların sonuçlarıyla bu makalede yapılan çalışmanın sonuçları karşılaştırılmış olup; çıktılara göre bazı değerlendirmeler yapılmıştır. Tablo 4, literatürdeki güncel 6 çalışma ve önerilen yöntemin doğruluk değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Bu tabloda (-) ile doldurulmuş hücreler ismi geçen çalışmada ilgili veri setinin kullanılmadığı anlamına gelir. Karşılaştırılan yöntemlerin ilgili test verileri üzerindeki sonuçları aşağıda analiz edilmiştir.

**Tablo 4. Önerilen yöntemin ve Diğer Yöntemlerin Sınıflandırma Başarıları**

Çalışma	Öznitelik Seçme Yöntemi	Sınıflandırma Yöntemi	Leukemia	Central Nervous System	Colon Tumor
<i>T. Nguyen</i>	Analytic hierarchy process (AHP)	Hidden Markov models	96.48%	-	-
<i>S. Hengpraprom</i>	Signal-to Noise Ratio (SNR)	GA	91.9%	-	-
<i>H. Yu</i>	A weighted metric	Decision rule	95.55%	-	85.49%
<i>C. Gunavathi</i>	T-Statistics SNR, F-Test values	KNN, SVM	-	81.25%	-
<i>J. C. H. Hernandez</i>	GA	SVM	91.5%	-	84.6%
<i>H. Salem</i>	IG	SGA	97.06%	85.48%	86.67%
<b>Önerilen Yöntem</b>	Ensemble	GA	98.28%	93.66%	93.33%

Çalışmada önerilen model ayrı ayrı Leukemia, Central Nervous System ve Colon Tumor veri kümeleri ile eğitilmiş ve sırasıyla %97.06, %85.48 ve %86.67 değerleri elde edilmiştir. Tablo 3'te, bu çalışmada önerilen metodun ele alınan Leukemia, Central Nervous System ve Colon Tumor veri kümelerinin hepsinde literatürdeki güncel çalışmalara kıyasla daha yüksek sınıflandırma doğruluğu elde ettiği görülmektedir. Bir diğer test sonucu Tablo 4'te gösterilmektedir. Burada algoritmanın ilgili veriler üzerindeki stabil çalışma performansı test edilmiştir. Önerilen model her bir veri seti üzerinde 10 kez çalıştırılmış ve sonuçlar dört farklı metriğe göre elde edilmiştir. Bu sonuçlar tüm çalıştırmalarda elde edilen genel sonuçların ortalamasını göstermektedir. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, önerilen yöntemin hem farklı veri setleri üzerinde başarıyla çalıştığı hem de literatürdeki güncel yaklaşımlardan daha iyi performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır. Önerilen modelin başarılı olmasının temel sebebi, çalışılan verinin yani gen mikrodizi verisinin temel problemlerinin çoğuna etkili çözümler bulunmasıdır. Yüksek öznitelik sayısı, az örnek sayısı, verilerin gürültü olması, sınıflandırmada etkin genlerin sayısının az olması gibi problemler gen mikrodizi verisinin temel problemlerindedir [16]. Yüksek öznitelik sayısı önerilen ensemble öznitelik seçimi yöntemi ile azaltılmıştır. Fakat elde edilen yeni öznitelik alt kümesindeki öznitelik sayısı, sınıflandırmada etkin özniteliklerin alt kümesindeki öznitelik sayısından hala oldukça fazladır. Bu sebepten dolayı, indirgenen öznitelikler arasında optimum gen kombinasyonunu bulmak amacıyla stokastik arama yapma ihtiyacı doğmuştur. Bu arama işlemi, stokastik arama algoritması olan ve mevcut problemlere göre özelleştirilmiş Genetik Algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu özelleştirme de genetik algoritmanın



gen havuzuna, önerdiğimiz ensemble öznitelik seçme yöntemiyle indirgenmiş öznitelikler tanımlanmıştır. Popülasyondaki kromozom sayısı, kromozomdaki gen sayısı, elitizm yüzdesi, mutasyon yüzdesi gibi parametreler birçok farklı gen mikrodizi veri kümeleri kullanılarak deneme ve yanılma yöntemiyle optimize edilmiştir. Genetik Algoritmanın başarısını doğrudan etkileyen fitness fonksiyonu: az örnek sayısı, verilerin gürültülü olması ve sınıflara ait örnek sayılarının dengesiz olması gibi problemleri indirgeyecek şekilde düzenlenmiştir. Fitness fonksiyonu sonraki nesile aktarılacak kromozomların skorlanması için kullanılır. Dolayısıyla yanlış bir skora yöntemi kullanılması seçilecek kromozomların sınıflandırmada en etkili genler olması olasılığını düşürmektedir. Çalışmada fitness fonksiyonu olarak Naive Bayes sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Çünkü Naive Bayes sınıflandırıcısı, sınıflara ait örnek sayısında dengesizlik olması durumundan etkilenmemesi, örnek sayısı az olan eğitim verilerinde diğer sınıflandırma yöntemlerine göre daha başarılı olması, hızlı eğitilmesi gibi avantajlara sahiptir [32].

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Gen mikrodizi verileri kullanılarak kanser hastalıklarının sınıflandırması problemi, veri madenciliği ve makine öğrenmesi alanlarında oldukça fazla dikkat çeken konulardan biridir. Bu çalışmada dünyadaki en önemli sağlık sorunlarından biri olan kanserin erken teşhisi konusuna odaklanılmıştır. Burada DNA mikrodizi verileri kullanılarak kanser hastalıklarını ayırt etmeyi amaçlayan yeni bir metodoloji önerilmiştir. Bu metodolojiye göre öncelikle bilgi kazancı, fisher korelasyon skora, relief ve ki-kare yöntemleri kullanılarak elde edilen alt kümelerin birleşimi sağlanır. Bu yaklaşımların tümü ensemble metot ile bir araya getirilerek öznitelik seçimleri yapılır. Daha sonrada genetik algoritma kullanılarak öznitelik azaltma işlemleri uygulanır. Son aşamada ise naive bayes sınıflandırıcısı kullanılarak kanser türlerinin sınıflandırması işlemi başarılı bir şekilde tamamlanır. Önerilen metodoloji literatürde yaygın olarak kullanılan üç farklı veri kümesiyle test edilmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar literatürdeki güncel altı farklı çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada ele alınan Leukemia, Central Nervous System ve Colon Tumor veri kümelerinin sınıflandırma doğruluğu kriter sonuçlarının diğer çalışmaların sonuçlarına kıyasla daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmadaki literatürel karşılaştırmalar sonucunda önerilen yöntemin diğer yöntemlerden daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında önerilen hibrit yaklaşım hem sınıflandırma performansına doğrudan etki edecek şekilde tasarlanmış hem de geliştirilebilir esnekliklere sahip bir yapıda sunulmuştur. Elde edilen test sonuçlarına dayanarak önerilen hibrit yaklaşımın kanser hastalıklarının sınıflandırılması problemlerinde genellikle başarılı sonuçlar verdiği ve farklı özelliklerdeki veri setlerinde performansın en üst seviyeye çıkarılması konusunda yüksek potansiyele sahip olduğu söylenebilir. Bu çıkarımlara göre önümüzdeki süreçte önerilen yöntemin farklı karakteristik özelliklerdeki veri setlerine uygulanması planlanmaktadır. Buna göre elde edilecek deneysel çıktıların biyolojik anlamlılık açısından analiz edilmesi sağlanacaktır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] SEER Training Modules, Cancer Classification. U. S. National Institutes of Health, National Cancer Institute. (2019, May 21). <<https://training.seer.cancer.gov/disease/categories/classification.html>>.
- [2] Al-shamasneh, A. R. M., Obaidallah, U. H. B. (2017). Artificial Intelligence Techniques for Cancer Detection and Classification: Review Study. European Scientific Journal, 13(3). <https://doi.org/10.19044/esj.2016.v13n3p342>.
- [3] Russo, G., Zegar, C., Giordano, A. (2003). Advantages and limitations of microarray technology in human cancer - Oncogene. Oncogene, 22, 6497–6507. doi: 10.1038/sj.onc.1206865.
- [4] Bolón-Canedo, V., Sánchez-Marroño, N., Alonso-Betanzos, A., Benítez, J. M., Herrera, F. (2014). A review of microarray datasets and applied feature selection methods. Inform. Sci., 282, 111–135. doi: 10.1016/j.ins.2014.05.042.
- [5] Yu, H., Ni, J., Dan, Y., Xu, S. (2012). Mining and integrating reliable decision rules for imbalanced cancer gene expression data sets. Tsinghua Sci. Technol., 17(6), 666–673. doi: 10.1109/TST.2012.6374368.

- [6] Gunavathi, C., Premalatha, K. (2014). Performance analysis of genetic algorithm with KNN and SVM for Feature Selection in Tumor Classification. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Control, Quantum and Information Engineering, 8(8), 1390–1397.
- [7] Hernandez, J. C. H., Duval, B., Hao, J.-K. (2007). A Genetic Embedded Approach for Gene Selection and Classification of Microarray Data. Evolutionary Computation, Machine Learning and Data Mining in Bioinformatics. Springer. doi: 10.1007/978-3-540-71783-6\_9.
- [8] Salem, H., Attiya, G., El-Fishawy, N. (2017). Classification of human cancer diseases by gene expression profiles. Appl. Soft Comput., 50, 124–134. doi: 10.1016/j.asoc.2016.11.026.
- [9] Nguyen, T., Khosravi, A., Creighton, D., Nahavandi, S. (2015). Hidden Markov models for cancer classification using gene expression profiles. Inform. Sci., 316, 293–307. doi: 10.1016/j.ins.2015.04.012.
- [10] Hengpraprom, S. (2013). GA-Based Classifier with SNR Weighted Features for Cancer Microarray Data Classification. International Journal of Signal Processing Systems, 1(1), 29–33. doi: 10.12720/ijsp.1.1.29-33.
- [11] Gumaei, A., Sammouda, R., Al-Rakhami, M., AlSalman, H., & El-Zaart, A. (2021). Feature selection with ensemble learning for prostate cancer diagnosis from microarray gene expression. Health Informatics J., 27(1), 1460458221989402. doi: 10.1177/1460458221989402
- [12] Candan, H., Durmuş, A., Harman, G. (2019). Genetik Algoritma ve Sınıflandırıcı Yöntemler ile Kanser Tahmini. Veri Bilimi, 2(1), 30–34.
- [13] Kahraman M., Kaya, M. (2010). Çok amaçlı genetik algoritma kullanarak DNA mikrodizi verilerinin kümelenmesi. (20 Ağustos 2021). Retrieved from <https://tez.yok.gov.tr> (tez no: 269977).
- [14] Turgut S., Dağtekin M., Ensari T. (2017). Makine öğrenmesi yöntemleri kullanarak kanser teşhisi. (22 Ağustos 2021). Retrieved from <https://tez.yok.gov.tr> (tez no: 487852).
- [15] Su, Q., Wang, Y., Jiang, X., Chen, F., Lu, W.-c. (2017). A Cancer Gene Selection Algorithm Based on the K-S Test and CFS. Biomed Res. Int., 2017, 1645619. doi: 10.1155/2017/1645619.
- [16] Tinker, A. V., Boussioutas, A., & Bowtell, D. D. L. (2006). The challenges of gene expression microarrays for the study of human cancer. Cancer Cell, 9(5), 333–339. doi: 10.1016/j.ccr.2006.05.001
- [17] Motieghader, H., Najafi, A., Sadeghi, B., & Masoudi-Nejad, A. (2017). A hybrid gene selection algorithm for microarray cancer classification using genetic algorithm and learning automata. Inf. Med. Unlocked, 9(C), 246–254. doi: 10.1016/j.imu.2017.10.004
- [18] Hong, H., Hong, Q., Liu, J., Tong, W., & Shi, L. (2013). Estimating relative noise to signal in DNA microarray data. Int. J. Bioinf. Res. Appl., 24001721. doi: 10.1504/IJBRA.2013.056085
- [19] Chicco, D., & Jurman, G. (2020). The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation. BMC Genomics, 21(1), 1–13. doi: 10.1186/s12864-019-6413-7
- [20] Roobaert et al.: Information Gain, Correlation and Support Vector Machines, StudFuzz 207, 463–470 (2006).
- [21] Hall, M. 1999. Correlation-based Feature Selection for Machine Learning, The University of Waikato, PhD Thesis, Hamilton.
- [22] Jadhav, S., He, H., Jenkins, K. (2018). Information Gain Directed Genetic Algorithm Wrapper Feature selection for Credit Rating. Appl. Soft Comput., 69. doi: 10.1016/j.asoc.2018.04.033.

- [23] Budak, H. (2018). Özellik Seçim Yöntemleri ve Yeni Bir Yaklaşım. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(zel), 10. doi: 10.19113/sdufbed.01653.
- [24] Kira, K., Rendell, L. A. (1992). The feature selection problem: traditional methods and a new algorithm. AAAI'92: Proceedings of the tenth national conference on Artificial intelligence. AAAI Press. doi: 10.5555/1867135.1867155.
- [25] Islam, M. J., Wu, Q. M. J., Ahmadi, M., Sid-Ahmed, M. A. (2007). Investigating the performance of naive-Bayes classifiers and K-nearest neighbor classifiers. 2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007).
- [26] Chicco, D. and Giuseppe J., "The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation", *BMC genomics* 21.1 (2020): 1-13.
- [27] Alon, U., Barkai, N., Notterman, D. A., Gish, K., Ybarra, S., Mack, D., Levine, A. J. (1999). Broad patterns of gene expression revealed by clustering analysis of tumor and normal colon tissues probed by oligonucleotide arrays. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 96(12), 6745–6750. doi: 10.1073/pnas.96.12.6745.
- [28] Pomeroy, S. L., Tamayo, P., Gaasenbeek, M., Sturla, L. M., Angelo, M., McLaughlin, M. E., ...Golub, T. R. (2002). Prediction of central nervous system embryonal tumour outcome based on gene expression - *Nature*. *Nature*, 415, 436–442. doi: 10.1038/415436a.
- [29] Golub, T. R., Slonim, D. K., Tamayo, P., Huard, C., Gaasenbeek, M., Mesirov, J. P., ...Lander, E. S. (1999). Molecular Classification of Cancer: Class Discovery and Class Prediction by Gene Expression Monitoring. *Science*, 286(5439), 531–537. doi: 10.1126/science.286.5439.531.
- [30] Feltes, B. C., Chandelier, E. B., Grisci, B. I., Dorn, M. (2019). CuMiDa: An Extensively Curated Microarray Database for Benchmarking and Testing of Machine Learning Approaches in Cancer Research. *J. Comput. Biol.*, 26(4), 376–386. doi: 10.1089/cmb.2018.0238.
- [31] Islam, Md. M., Iqbal, H., Haque, Md. R., Hasan, Md. K. (2017). Prediction of breast cancer using support vector machine and K-Nearest neighbors. 2017 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC). IEEE. doi: 10.1109/R10-HTC.2017.8288944.
- [32] Al-Aidaros, K. M., Bakar, A. A., & Othman, Z. (2010). Naïve bayes variants in classification learning. 2010 International Conference on Information Retrieval & Knowledge Management (CAMP). IEEE. doi: 10.1109/INFRKM.2010.5466902
- [33] Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *IJCAI'95: Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. doi: 10.5555/1643031.1643047.