



ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik Bilimleri Dergisi

Journal of Engineering Science
of Adiyaman University

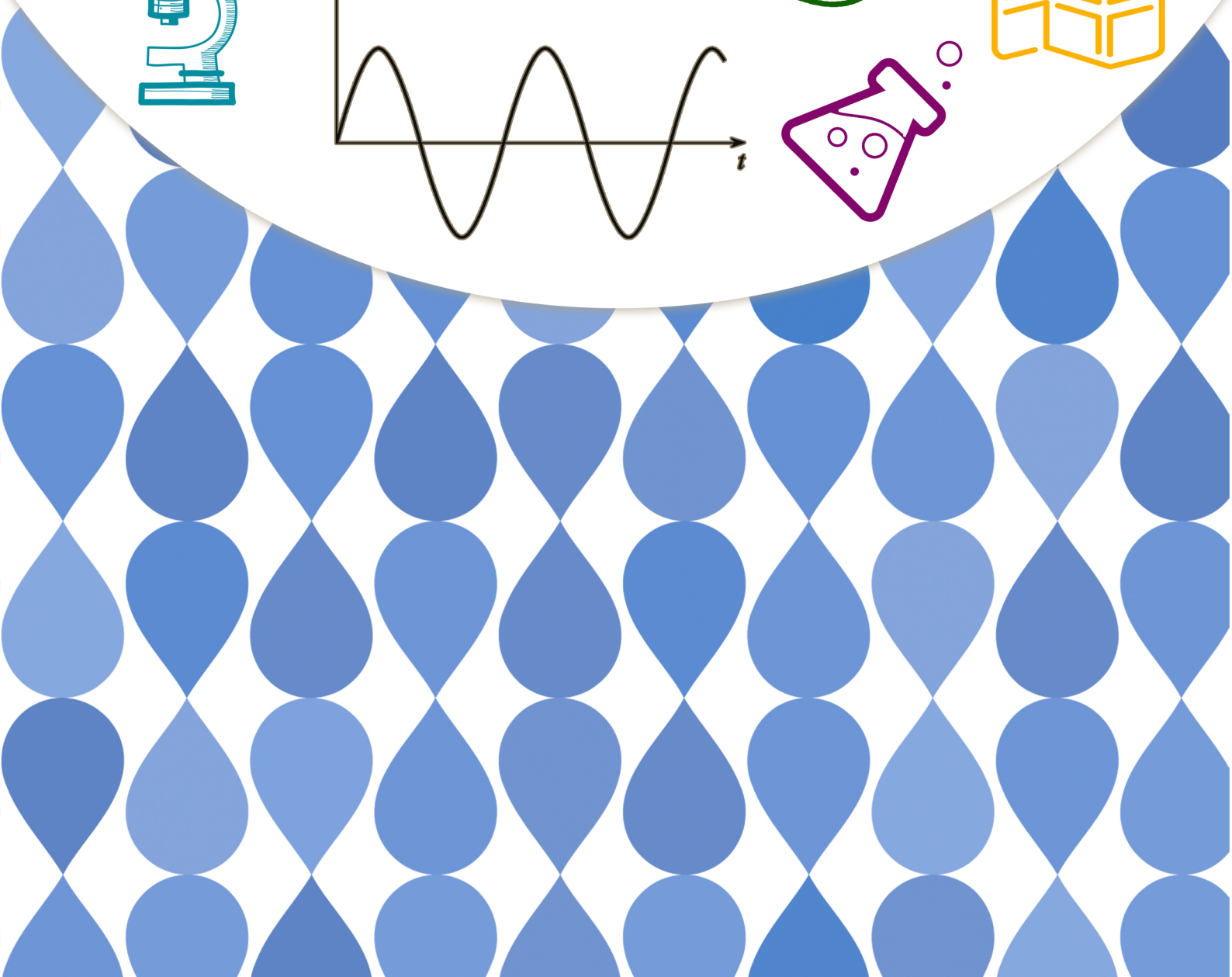
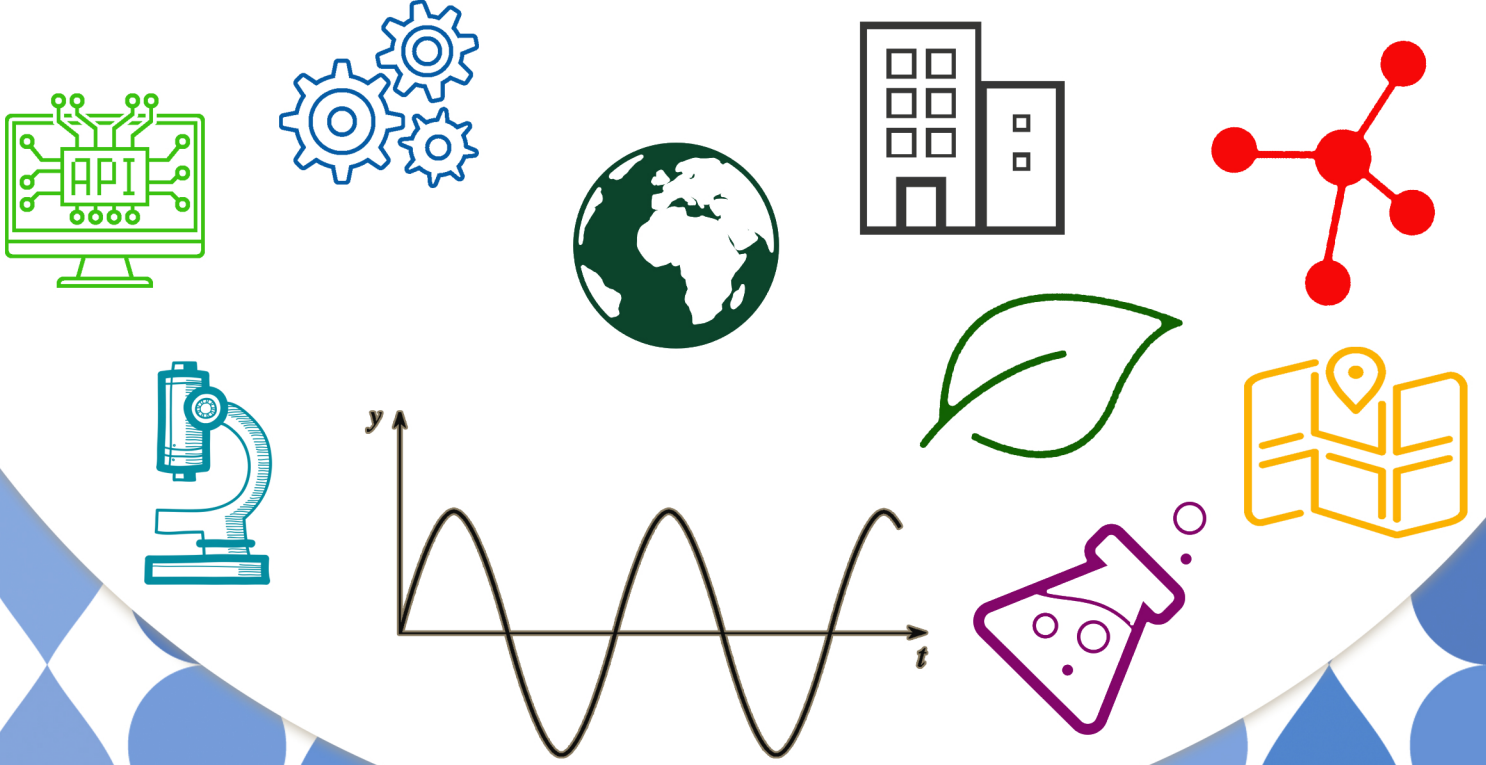
ISSN: 2149-0309

CİLT
VOLUME **10**

SAYI
ISSUE **21**

ARALIK
DECEMBER

2023



ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ

Mühendislik Bilimleri Dergisi

Journal of Engineering Science of Adiyaman University

ISSN: 2149-0309

Dergi Yöneticisi

Prof. Dr. Murat PALA

Cilt:10 Sayı:21

Baş Editör

Prof. Dr. Murat PALA / Baş Editör ve Alan Editörü

Editörler

Prof. Dr. Leon JOLOLIAN / Alan Editörü

Assist. Prof. Dr. Oksana KOPLAK / Alan Editörü

Dr. Thomas FEGGELER / Alan Editörü

Prof. Dr. Tanju TEKER / Alan Editörü

Doç. Dr. Harun TÜRKMENLER / Alan Editörü

Doç. Dr. Şerif ÇİTİL / Alan Editörü

Doç. Dr. Miraç UÇKUN / Alan Editörü

Dr. Öğr. Üyesi Saadin OYUCU / Alan Editörü

Dr. Öğr. Üyesi Musa EŞİT / Alan Editörü

Arş. Gör. Abuzer DOĞAN / Alan, Mizanpaj ve Dil Editörü

Yazışma Adresi / Correspondence

Address - Adiyaman Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi Dekanlığı

e-mail: mbd@adiyaman.edu.tr

Tel: 0 (416) 223 38 08

Fax: 0 (416) 223 38 09

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/adyumbd>

YAYIN KURULU/ EDITORIAL BOARD

- 1-Prof.Dr. Şemsettin TEMİZ.....(İnönü Üniversitesi)
- 2-Prof.Dr. Murat DEMİR AYDIN (Erzurum Teknik Üniversitesi)
- 3-Prof.Dr. İbrahim TÜRKMEN (İnönü Üniversitesi)
- 4-Prof.Dr. Naci ÇAĞLAR.....(Sakarya Üniversitesi)
- 5-Prof.Dr. Abdulkadir ÇEVİK(Gaziantep Üniversitesi)
- 6-Prof.Dr. Seyhan FIRAT (Gazi Üniversitesi)
- 7-Prof.Dr. Hasan OKUYUCU.....(Yıldırım Beyazıt Üniversitesi)
- 8-Prof.Dr. Eyüp DEBİK..... (Yıldız Teknik Üniversitesi)
- 9-Prof.Dr. Yusuf TUNÇTÜRK..... (Yüzüncü Yıl Üniversitesi)
- 10-Prof.Dr. Nevzat ARTIK (Ankara Üniversitesi)
- 11-Prof.Dr. Hamit ADİN..... (Batman Üniversitesi)
- 12-Prof.Dr. Halef DİZLEK(Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi)
- 13-Doç. Dr. Yaşar AYZAZ (İnönü Üniversitesi)
- 14-Doç. Dr. Aysun ŞENER.....(Adana Bilim Teknoloji Üniversitesi)

DANIŞMA KURULU/ ADVISORY BOARD

- 1-Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ(İnönü Üniversitesi)
- 2-Prof. Dr. Ergün ERÇELEBİ.....(Gaziantep Üniversitesi)
- 3-Prof. Dr. İbrahim TÜRKMEN(İnönü Üniversitesi)
- 4-Prof. Dr. Naci ÇAĞLAR(Sakarya Üniversitesi)
- 5-Prof. Dr. Abdulkadir ÇEVİK.....(Gaziantep Üniversitesi)
- 6- Prof. Dr. Eyüp DEBİK.....(Yıldız Teknik Üniversitesi)
- 7- Prof. Dr. Sema Koç KAYHAN(Gaziantep Üniversitesi)

ALAN EDİTÖRLERİ / SECTION EDITORS

Prof. Dr. Murat Pala	pala@adiyaman.edu.tr	İnşaat Mühendisliği , Deprem, Betonarme	2021-Devam Ediyor
Prof. Dr. Atilla AKKOYUNLU	akkoyun@boun.edu.tr	Çevre Bilimleri ve Mühendisliği	2021-Devam Ediyor
Dr. Öğr. Üyesi Bayram YURT	byurt@bingol.edu.tr	Gıda Bilimleri ve Mühendisliği	2021-Devam Ediyor
Dr. Öğr. Üyesi Faruk KÜRKER	fkurker@adiyaman.edu.tr	Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elektrik Enerjisi ve Güç Sistemleri, Elektrik Tesisleri	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Mehmet Fatih DİLEKOĞLU	dilekoglu@harran.edu.tr	Çevre Bilimleri ve Mühendisliği, Çevre Kimyası, Su Kaynakları Yönetimi, Su ve atıksu arıtma	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Harun TÜRKMENLER	hturkmenler@adiyaman.edu.tr	Aritma Tesisi Tasarımı, Çevre Kimyası, Su ve atıksu arıtma, Toprak Kirliliği ve Kontrolü, Yenilenebilir Enerji Kaynakları	2021-Devam Ediyor
Prof. Dr. İsmail BOZKURT	ibozkurt@adiyaman.edu.tr	Makine Mühendisliği, Enerji, Termodinamik, Yenilenebilir Enerji Sistemleri	2021-Devam Ediyor
Prof. Dr. Kerim KÜÇÜK	kerim.kucuk@deu.edu.tr	Maden Mühendisliği, Kaya Mekaniği ve Tahkimat, Maden Tasarımı, İşletme ve Ekonomisi, Madencilik Yöntemleri ve Maden Sistem Analizi, Madenlerde İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Miraç UÇKUN	m.uckun@adiyaman.edu.tr	Gıda Bilimleri ve Mühendisliği	2021-Devam Ediyor
Dr. Öğr. Üyesi Musa EŞİT	mesit@adiyaman.edu.tr	Atmosfer Bilimleri, Hidroloji	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Mustafa ASLAN	maslan@harran.edu.tr	Su ve atıksu arıtma, Yenilenebilir Enerji Kaynakları	2021-Devam Ediyor
Dr. Öğr. Üyesi Saadin OYUCU	saadinoyucu@adiyaman.edu.tr	Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği, Bilgisayar Sistem Yazılımı, Bilgisayar Yazılımı, Gömülü Sistemler, Veri Tabanları, Yapay Zeka	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Senem TEKİN	senemtekin@adiyaman.edu.tr	Yer Bilimleri ve Mühendisliği, Deprem, Uygulamalı Jeoloji	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Şerif ÇİTİL	scitil@adiyaman.edu.tr	Makine Mühendisliği	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Seval UYANIK	suyanik@adiyaman.edu.tr	Tekstil Bilimleri ve Mühendisliği	2021-Devam Ediyor
Doç. Dr. Mihrimah ÖZMEN	mihrimah@erciyes.edu.tr	Endüstri Mühendisliği, Yöneylem Araştırması	2021-Devam Ediyor
Prof. Dr. Tanju TEKER	tanjuteker@cumhuriyet.edu.tr	İmalat Mühendisliği, Malzeme Teknolojileri	2021-Devam Ediyor
Prof. Dr. Zuhal KARAGÖZ	zgenic@adiyaman.edu.tr	Metaller ve Malzeme Mühendisliği	2021-Devam Ediyor
Arş. Gör. Abuzer DOĞAN	abuzerdogan@adiyaman.edu.tr	Bilgisayar Mühendisliği	2021-Devam Ediyor

İÇİNDEKİLER- CONTENTS

1- SÜRDÜREBİLİR YAPILARDA GEOTEKSTİL KEÇE KATMANLI HAFİF BETONDAN MAMUL KÂGİR BLOK ELEMANLARIN TERMAL YALITIM VERİMLİLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE BİR YAKLAŞIM– “Araştırma Makalesi”

AN APPROACH ON IMPROVING THERMAL INSULATION EFFICIENCY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE MASONRY BLOCK ELEMENTS WITH GEOTEXTILE FELT LAYER IN SUSTAINABLE BUILDINGS– “Research Article”

Lütfullah GÜNDÜZ, Şevket Onur KALKAN 182-197

2- UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ KULLANARAK BİR MEKANİK JİROSKOPUN YALPALAMA KESTİRİMİ – “Araştırma Makalesi”

PRECESSION FORECASTING OF A MECHANICAL GYROSCOPE USING ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM – “Research Article”

İlyas KACAR..... 198-209

3- BASİT YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA YAPIŞTIRICI HASAR KRİTERLERİNİN YÜKSEK DAYANIMLI EPOKSİ YAPIŞTIRICIDA İNCELENMESİ – “Araştırma Makalesi”

INVESTIGATION OF ADHESIVE FAILURE CRITERIA FOR HIGH STRENGTH AN EPOXY ADHESIVE IN SIMPLE ADHESIVE JOINTS – “Research Article”

İsmail SARAÇ 210-226

4- KUANTUM PROGRAMLAMA AÇISINDAN KUANTUM DERLEYİCİLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE IBMQ UYGULAMASI – “Araştırma Makalesi”

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTUM COMPILERS IN TERMS OF QUANTUM PROGRAMMING AND IBMQ IMPLEMENTATION – “Research Article”

Mehmet KARAKÖSE, Hasan YETİŞ, Osman Furkan KÜÇÜK, Çağatay Umut ÖĞDÜ, Orhan YAMAN5.....227-241

5- KRİPTOGRAFİK YAPILAR İÇİN SEÇMELİ KAOTİK PERMÜTASYONLAR TABANLI YENİ BİR S-BOX ÜRETME ALGORİTMASI – “Araştırma Makalesi”

A NEW S-BOX GENERATION ALGORITHM BASED ON SELECTİVE CHAOTİC PERMUTATİONS FOR CRYPTOGRAPHİC STRUCTURES – “Research Article”

Fırat ARTUĞER..... 242-251

6- MONEL 400 NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMIN TORNALANMASINDA OLUŞAN KESME KUVVETİ BİLEŞENLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ – “Araştırma Makalesi”

EVALUATION OF CUTTING FORCE COMPONENTS IN TURNING OF MONEL 400 NICKEL BASED SUPERALLOY AND MODELING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS – “Research Article”

Barış ÖZLÜ, Levent UĞUR.....252-265

7- COMPARISON OF METAHEURISTIC ALGORITHMS WITH DIFFERENT PERFORMANCE CRITERIA – “Research Article”

METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN FARKLI PERFORMANS KRİTERLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI – “Araştırma Makalesi”

Yıldız ZORALIOGLU, Sibel ARSLAN266-275

8- ELEKTRON MİKROSKOBUNDAN ELDE EDİLEN GÖRÜNTÜLERİN PARÇACIK SAYIMINDA ÖN İŞLEME TEKNİKLERİNİN ETKİSİ – “Araştırma Makalesi”

THE EFFECT OF PRE-PROCESSING TECHNIQUES ON PARTICLE COUNTING OF IMAGES OBTAINED BY ELECTRON MICROSCOPE – “Research Article”

Saliha Banu ERTÜRK, Murat KARAKOYUN.....276-287

9- ANTIOXIDANT ACTIVITY AND AROMA PROFILE OF WILD-TYPE BLACKBERRY FRUITS GROWING IN ARAPGİR – “Research Article”

ARAPGİR'DE YETİŞEN YABANI BÖĞÜRTLEN MEYVELERİNİN ANTİOKSİDAN AKTİVİTESİ VE AROMA PROFİLİ – “Araştırma Makalesi”

Nurullah DEMİR.....288-298

10- A NOVEL METHOD FOR BREAST CANCER CLASSIFICATION: A SIGNAL PROCESSING-BASED APPROACH IN ULTRASOUND IMAGES – “Research Article”

MEME KANSERİ SINIFLANDIRMASI İÇİN YENİ BİR YÖNTEM: ULTRASON GÖRÜNTÜLERİNDE SİNYAL İŞLEME TEMELLİ BİR YAKLAŞIM – “Araştırma Makalesi”

Şerife GENGEÇ BENLİ, Zeynep AK.....299-306

11- ZAMAN PENCERELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ İÇİN KÜMELEME TEMELLİ KLONAL SEÇİM ALGORİTMASI– “Araştırma Makalesi”

CLUSTER-BASED CLONAL SELECTION ALGORITHM FOR VEHICLE ROUTING PROBLEMS WITH TIME WINDOWS– “Research Article”

Bilge Kağan DEDETÜRK, Burak KOLUKISA, Mihrimah ÖZMEN307-320

12- NESNEYE YÖNELİK PROGRAMLAMADA SINIF TEST ÜRETİMİ İÇİN OLAY TEMELLİ BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ– “Araştırma Makalesi”

PROPOSAL OF AN EVENT-BASED APPROACH FOR CLASS TEST GENERATION IN OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING– “Research Article”

Tuğkan TUĞLULAR..... 321-329

SÜRDÜREBİLİR YAPILARDA GEOTEKSTİL KEÇE KATMANLI HAFİF BETONDAN MAMUL KÂĞİR BLOK ELEMANLARIN TERMAL YALITIM VERİMLİLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE BİR YAKLAŞIM

Lütfullah GÜNDÜZ¹, Şevket Onur KALKAN^{2*}

^{1,2}İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35620, Türkiye
Geliş Tarihi/Received Date: 08.04.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 24.10.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1279518

ÖZET

Dünyadaki optimum enerji kullanımı ile gerçek enerji kullanımı arasında bir enerji verimliliği farkı olduğu sıklıkla belirtilmektedir. İnşaat sektöründe, binalarda enerji verimliliğini optimize etmek için çeşitli yapı malzemeleri üretilmekte ve kullanılmaktadır. Bu yapı malzemeleri arasında hafif beton blokların hem ülkemizde hem de dünyada kullanımı oldukça yaygındır. Bu tür yapı malzemelerinin binalarda kullanımının en önemli getirisi ısı yalıtımıdır. Bu bağlamda, hafif betonların yalıtım özelliklerinin daha da iyileştirilmesi bilimsel ve endüstriyel çalışmaların güncel konularından biri olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, ısı yalıtımı amacı ile üretilen ve kullanılan hafif betondan mamul kâğır blokların ısı yalıtım ve ısı direnç özelliklerinin iyileştirilerek optimum tasarım kriterlerinin incelenmesi amacıyla, sabit bir blok tasarımına farklı miktarda geotekstil eklenerek blokların ısı performansları irdelenmiştir. Bu amaçla, dilinimli 7 sıra boşluklu ve 24 gözlü kâğır blok referans olarak kabul edilmiştir. Daha sonra, referans blok ürününün 1 sıra (10 mm), 2 sıra (22 mm), 3 sıra (32 mm) boşluklarına geotekstil keçe konulmuş son test örneğinde ise 3 sıra boşluk ve enine harç hatılı kaldırılarak tek katmanda 72 mm genişliğinde geotekstil keçe konularak test örnekleri oluşturulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, geotekstil keçe katman kalınlığı arttıkça, ürünlerin termal direnci artmakta ve ısı transferine karşı daha dirençli bir forma ulaşmaktadır. Ayrıca, termal yalıtım performansı iyileştirilecek blok tasarımlarında tek katman şeklinde ve eşdeğer kalınlığı büyük, minimum ısı köprüsü oluşturan bir formda geotekstil keçe katmanı uygulanması önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kâğır Blok, Termal Yalıtım, Termal Direnç, Geotekstil Keçe

AN APPROACH ON IMPROVING THERMAL INSULATION EFFICIENCY OF LIGHTWEIGHT CONCRETE MASONRY BLOCK ELEMENTS WITH GEOTEXTILE FELT LAYER IN SUSTAINABLE BUILDINGS

ABSTRACT

It is frequently stated that there is an energy efficiency difference between the optimum energy use in the world and the actual energy use. In the construction industry, various building materials are produced and used to optimize energy efficiency in buildings. Among these building materials, the use of lightweight concrete blocks is quite common both in our country and in the world. The most important benefit of using such building materials in buildings is thermal insulation. In this context, further improvement of the insulation properties of lightweight concrete masonry blocks is considered as one of the current issues of scientific and industrial studies. In this study, the thermal performance of the masonry blocks was examined by adding different amounts of geotextile to a fixed block design in order to examine the optimum design criteria by improving the thermal insulation and heat resistance properties of lightweight concrete blocks produced and used for thermal insulation. For this purpose, a lightweight concrete block with 7 rows and 24 cells was accepted as a reference. Then, in the test specimens, where geotextile was placed in the gaps of 1 row (10 mm), 2 rows (22 mm), 3 rows (32 mm), and

e-posta¹ :lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2487-467X>

* e-posta² :sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0250-8134> (Sorumlu Yazar)

a 72 mm wide geotextile felt was placed in a single layer of the reference block product, According to the results of the study, as the thickness of the geotextile layer increases, the thermal resistance of the products increases and it reaches a more resistant form against heat transfer. In addition, it is important to apply a geotextile layer in the form of a single layer and in a form with a large equivalent thickness and a minimum thermal bridge in block designs that will improve thermal insulation performance.

Keywords: Masonry Block, Thermal Insulation, Thermal Resistance, Geotextile Felt

1. Giriş

Binalarda enerji verimliliği yoluyla enerji tasarrufunun sağlanması, günümüz koşullarında tüm dünyada birincil önem kazanmıştır. Bir binada enerji verimliliğinin sağlanması için genellikle dört temel faktör önem kazanmıştır. Bunlardan ilki ve en önemlisi, inşaatın yapımı öncesi proje aşamasında iken neredeyse sıfır enerjili pasif bina tasarımının oluşturulmasıdır. İkinci aşamada ise inşaat projesinin hayata geçmesi ve inşaat yapımı sırasında düşük enerjili yapı malzemelerinin kullanımı gelmektedir. Üçüncü önemli faktör, düşük işletme enerjisi gereksinimi için enerji verimli ekipmanların kullanımı olup, çeşitli uygulamalar için yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyonu ise genelde dördüncü faktörü oluşturmaktadır [1]. Sürdürülebilir bina projelerinin hayata geçirilmesinde burada sayılan dört temel faktörün proje uygulamalarında detaylı analiz edilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Dünyanın hemen hemen her bölgesinde içinde buldukları iklim ve atmosfer ortam koşullarına göre enerji verimli bina yapımları son derece önem kazanmakla birlikte, bu binaların fiili şekilde yapımlarında enerji verimliliği yüksek ve olabildiğince yatırım maliyet yükü düşük olabilecek yapı malzeme bileşenlerini uygulamak çok önem arz etmektedir [2-4]. Binalarda enerjinin büyük bir kısmı ısıtma, havalandırma ve iklimlendirmede tüketilmektedir. Bu nedenle termal konforun sağlanması amacıyla yapı sektörü büyük miktarda enerji tüketmesine karşın, bu enerji etkin yalıtım stratejileri ile azaltılabilmektedir. Başlangıç maliyeti nispeten yüksek görünse de uygun şekilde yalıtılmış binaların yalıtım maliyeti, binanın ömrü boyunca kendini birçok kez amorti edebilmektedir. Uygulanabilecek yalıtımla birlikte enerji tüketimi azalacak, bununla birlikte fosil yakıtlara bağımlılık azalacak ve enerji tüketiminden kaynaklanan sera gazı emisyonları da azalacaktır. Bu bağlamda, birçok ülkede konu üzerine yenilikçi araştırmalar sürdürülebilmekte ve her coğrafyaya özgü, enerji verimliliği ve sürdürülebilirliği yüksek yeni yapı yalıtım elemanı türleri ve yenilikçi tasarımları, gelişen araştırmaların temel konuları arasında görülebilmektedir [5-9]. Ayrıca, bina projelerinde iç ve/veya dış bölme duvarları oluşturan birimlerde, farklı tasarım bileşenlerine sahip ve farklı malzeme türlerinin üretimlerinde kullanılan kâgir blok elemanlarını görmek de mümkündür. Ancak, kâgir blok elemanlarının enerji verimlilik ve sürdürülebilirlik kavramları dahilinde termal yalıtım özelliklerinin değişkenliğinin irdelenmesi ve yüksek termal yalıtım özelliğine sahip blok tasarımlarının uygulamalarda kullanımı son derece önemlidir [10-11]. Bu sebeple, kâgir blok elemanlarının termal yalıtım özelliklerinin irdelenmesinde boyut, geometri, konfigürasyon ve tasarımında özel nitelikli yalıtım katmanı içerip içermediği gibi konuların yanı sıra, kâgir birimin ısı iletkenlik değeri, ısı geçirgenlik direnci ve termal yalıtım verimliliği gibi parametrelerde ayrı bir önem kazanmaktadır.

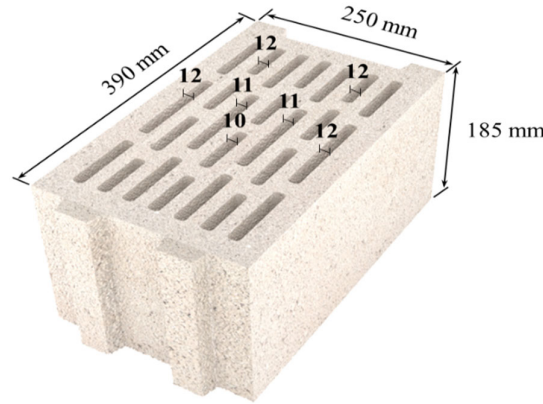
Günümüzde boşluklu geometrik tasarımlara sahip hafif betondan mamul kâgir blok elemanların gelişimi, binaların iç ve/veya dış duvarlarının yapımında kullanılan en etkili yapı malzemelerinden biridir [12-14]. Özel tasarımlara sahip termal verimliliği yüksek kâgir blok elemanlardan oluşan inşaat sistemleri, minimum yapı kalınlığı ile gerekli ısı yalıtımını sağlar. Ancak, yapının termal yalıtım verimliliğinin artırılmasında, yapı kesitinde ve/veya yapıyı oluşturan her bir birimin tasarımında ısı geçişine kolaylıkla müsaade edebilecek ısı köprülerinin yer almaması veya minimize edilmesi ayrı bir önem taşımaktadır [14, 15]. Günümüzde piyasa koşullarında konut ve ticari binalar için çok çeşitli beton ve duvar sistemlerinin uygulamalarda yer aldığı görülmektedir. Bu sistemler, malzeme konfigürasyonu ve beton türüne göre değişkenlik göstermekle birlikte, yapı kesitinde ve bina kabuğundaki ısı köprüsü oluşumlarının kapsamını da etkiler. Bina kabuğundaki ısı köprüleri, çoğunlukla yapısal ve yalıtım malzemelerinin farklı ısı iletkenliklere sahip olduğu yerlerde meydana gelir. Beton ve duvar teknolojileri, karmaşık ısı yalıtım konfigürasyonları içerebilir [16]. Yoğunluğu $>1900 \text{ kg/m}^3$ 'ten daha yüksek olan normal ağırlıklı betondan yapılan çoğu kâgir blok elemanları için, betonun ısı iletkenliği alternatif diğer yalıtım malzemelerine kıyasla 20 kat daha yüksek olabilir. Bazı

yalıtım biçimleri ve yapısal bileşenler için, gizli termal kısa devreler, önemli ısı kayıplarına neden olabilir ve bu da bina kabuğundaki katmanların sırasını, beton yoğunluğunu, kütle ve ısı yalıtımı konfigürasyonunu optimize etmeyi kritik hale getirmektedir [15].

Bu makalede, pomza agregalı hafif betondan mamul farklı tasarımlara sahip kâgir birimlerin konfigürasyon ve beton yoğunluk değişimi bağlamında termal yalıtım özelliklerinin incelenmesi ve kâgir birimin termal yalıtım performansının iyileştirilmesi üzerine yapılan bir çalışmanın özet karşılaştırmalı bulguları tartışılmaktadır. Kâgir blok tasarımında özellikle %80 geri dönüştürülmüş tekstil elyaflarından elde edilmiş geotekstil keçenin, farklı kalınlık ve alternatif uygulama şekilleriyle kâgir birimin termal yalıtım özelliklerine etkisi detaylı analiz edilmiştir. Elde edilen teknik bulgulardan kâgir blok tasarımcılarına alternatif yalıtım malzemelerinin blok üretiminde verimli bir şekilde kullanılmasına ve makul bir maliyetle en iyi termal performansı sağlamasına olanak tanıyabilecek önerilerin sunulması amaçlanmıştır.

2. Kâgir Blok Elemanları Tasarımı ve Geotekstil Keçe

Çalışma kapsamında sektörel uygulamalarda kullanılan sık dilimli 7 sıra boşluklu ve 24 gözlü 250mm x 390mm x 185mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) anma boyutuna sahip hafif betondan mamul bir blok formu referans blok tasarımı olarak değerlendirilmiştir. Referans blok tasarımı MD0 olarak kodlanmış olup, geometrik formu Şekil 1’de verilmiştir. MD0 blok tasarımının geometrik verileri ve konfigürasyon değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.

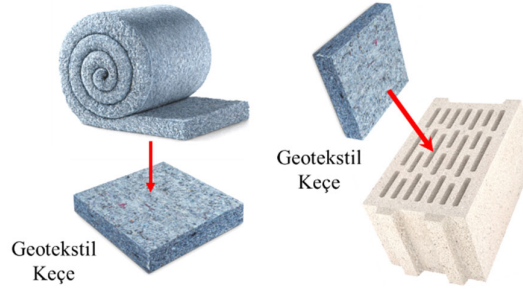


Referans Blok Formu

Şekil 1. Referans blok elemanının tasarımı ve genel görünümü

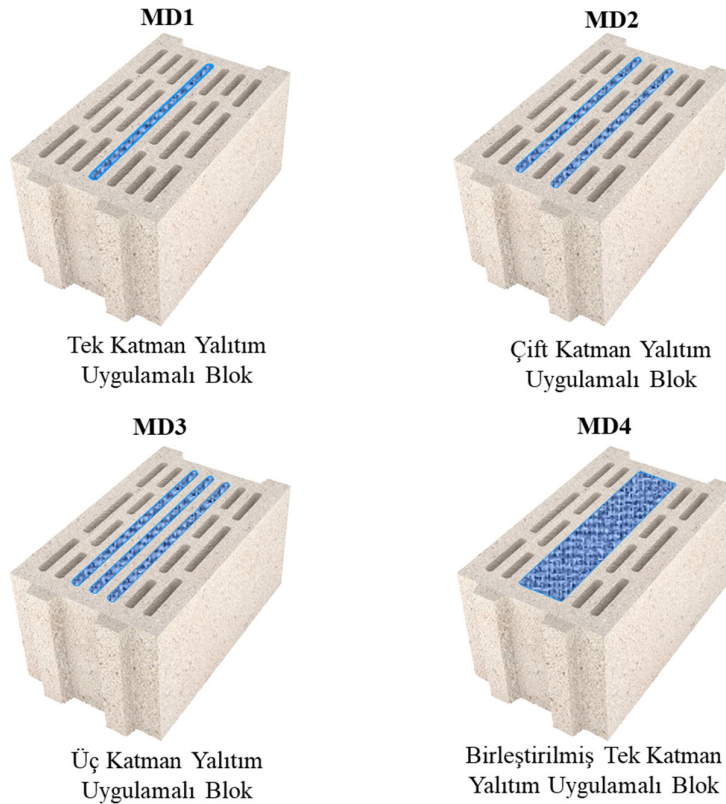
Hafif betondan mamul kâgir blok elemanların termal yalıtım verimliliğinin geliştirilmesi amacıyla blok tasarımlarına %80 geri dönüştürülmüş tekstil elyaflarından elde edilmiş geotekstil keçe, farklı boyutlarda levhalar şeklinde yerleştirilerek, yalıtım katmanlı blok tasarımları oluşturulmuştur. Keçe, genel bağlamda dokuma olmayan bir malzeme olup, çözücü ve atkılardan değil, bir tekstil yüzeyi oluşturmak üzere karma yapıda liflerden oluşur. Keçe, kullanım amacına bağlı olarak lif içeriği, rengi, boyutu, kalınlığı, yoğunluğu ve daha birçok faktör açısından değişiklik gösterebilir [17-19]. Endüstriyel uygulamalarda genellikle 3 farklı keçe türü ile karşılaşılmaktadır. Bunlar: Yün Keçe, Polyester Keçe ve Akriklik Keçe’dir. Yün keçeler, en yaygın ve bilinen keçe türü olup, koyun yünü ve/veya diğer türev yünlerle kaplanmış hayvan postları kullanılarak yapılan keçe türleri olarak bilinir. Polyester keçe ise, %100 polyesterden yapılmış sentetik iğneli keçe malzemeleridir. Akriklik keçe ise, yüne kıyasla daha ucuz bir versiyon ve akrilonitril kullanılarak yapılan keçeler olarak bilinmektedir [17-21]. Çalışma kapsamında kullanılan geotekstil keçenin ortalama yoğunluğu 70 kg/m³ olup, ısı iletkenlik katsayı değeri $\lambda=0.037$ W/mK’dir. Geri dönüştürülmüş tekstil sentetik elyafların iğneleme yöntemi ile mekanik olarak bağlanması sonucu oluşturulmuş, dayanıklı, esnek, kolay uygulanabilir

nonwoven yapıda, fenolik reçineli keçe yerine de kullanılabilir özellik taşıyan bir keçe formundadır [22-23] (Şekil 2). Geotekstil keçe, normal ticari piyasa koşullarından temin edilerek kâgir blok tasarımlarında değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Geotekstil keçe ve blok tasarımında katman olarak kullanımı-sembolik görünümü

MD0 blok tasarımına sahip hafif betondan mamul kâgir blok elemanının mevcut durumda sağladığı termal yalıtım performansının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla, bu tasarım üzerinde yer alan sıra boşluk hacimlerine ve boşluk gözlerinde alternatifli olarak yapılan bir dizi tasarım değişikliği ile termal yalıtım materyali olarak geotekstil keçe yerleştirilmiştir. Bu şekilde blok elemanların ilave yalıtım katmanlı yeni formlarının oluşturulması tasarlanmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında 4 farklı tasarım değişikliği yapılarak her bir tasarıma ait termal yalıtım performans irdelemeleri için örnek tasarımlar oluşturulmuştur. Geotekstil keçe katmanlı bu tasarımlar MD1, MD2, MD3 ve MD4 olarak kodlanmış olup, geometrik formları Şekil 3'te ve konfigürasyon değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Geotekstil keçe katmanlı blok elemanların tasarımı ve genel görünümü

Çizelge 1. Kâgir blok elemanı tasarımlarının konfigürasyon değerleri.

	MD0	MD1	MD2	MD3	MD4
Toplam Yüzey Alanı, mm ²	97500	97500	97500	97500	97500
Boş Yüzey Alanı, mm ²	22132	22792	23100	23760	36960
Dolu Yüzey Alanı, mm ²	75368	74708	74400	73740	60540
Alansal Boşluk Oranı, %	22,7	23,38	23,69	24,37	37,91
Alansal Doluluk Oranı, %	77,3	76,62	76,31	75,63	62,09
Toplam Hacim, cm ³	18038	18038	18038	18038	18038
Boşluk Hacmi, cm ³	4094	4217	4274	4396	6838
Dolu Kısımın Hacmi, cm ³	13943	13821	13764	13642	11200
Hacimsel Boşluk Oranı, %	22,7	23,38	23,69	24,37	37,91
Hacimsel Doluluk Oranı, %	77,3	76,62	76,31	75,63	62,09
Sandviç Kısım Oluşan Alan, m ²	0,0533	0,0570	0,0590	0,0609	0,0621
Isı Köprüsü Oluşan Alan, m ²	0,0188	0,0152	0,0132	0,0112	0,0101
Yalıtım Katmanı Hacmi, cm ³	-	610,50	1343,1	1953,6	4395,6
Geotekstil Katmanı Ağırlığı, gr	-	42,74	94,02	136,76	307,70

MD1 blok tasarımında kâgir blok elemanının 10 mm göz açıklığındaki orta sıra (4. sıra) boşluk dilinimleri arasında kalan harç iç hatılları kaldırılarak, tek katman şeklinde geotekstil keçenin eşdeğer kalınlıkta yerleştirilebileceği geometrik bir form oluşturulmuştur. Bu boşluk geometrisine geotekstil keçe yerleştirilerek, 10 mm tek katman yalıtım uygulamalı kâgir blok tasarımı elde edilmiştir. Benzer şekilde MD2 blok tasarımında, kâgir blok elemanının 11 mm göz açıklıklarına sahip 3. ve 5. sıra boşluk dilinimlerindeki boyuna harç iç hatılları kaldırılarak, tek katman şeklinde geotekstil keçenin eşdeğer kalınlıkta yerleştirilebileceği geometrik bir formlar oluşturulmuştur. Bu boşluklara geotekstil keçe yerleştirilerek, 22 mm çift katman yalıtım uygulamalı kâgir blok tasarımı elde edilmiştir. MD3 tasarımında ise, MD1 ve MD2 tasarımları için hazırlanmış 3, 4 ve 5. sıra boşluk dilinimlerindeki gözlere (11 mm + 10 mm + 11 mm) ayrı yarı katmanlar şeklinde geotekstil keçe yerleştirilerek toplamda 32 mm üç katman yalıtım uygulamalı kâgir blok tasarımı elde edilmiştir. Bu tasarımlara ilaveten MD4 tasarımında ise MD3 tasarımındaki 3, 4 ve 5. sıra boşlukların arasında yer alan enine harç hatılları da kaldırılarak blok tasarımında tek katman formunda 72 mm genişliğinde bir boşluk hacmi oluşturulmuştur. Bu boşluğa geotekstil keçe yerleştirilerek, 72 mm birleştirilmiş tek katman yalıtım uygulamalı kâgir blok tasarımı elde edilmiştir. Sonuç olarak 4 ayrı blok tasarımında (MD1, MD2 MD3 ve MD4) yalıtım katmanı geotekstil keçe kalınlıkları sırasıyla 10 mm, 22 mm, 32 mm ve 72 mm olarak değerlendirilmiştir.

3. Hafif Beton Kâgir Harcı ve Isıl İletkenlik

Hafif agregalı kâgir blok elemanı üretiminde kullanılan harcın formu, blok elemanının teknik değerlerine doğrudan etkiyen önemli faktörlerin başında gelmektedir. Blok geometrik tasarımı ve konfigürasyonuna da bağlı olmak koşuluyla, üretimde kullanılan harcın özellikle sertleşmiş birim hacim kütle değeri kâgir blok elemanının mukavemet değeri yanı sıra termal yalıtım özellikleri bağlamında önem arz eder. Örneğin sertleşmiş harç yoğunluğu düştükçe (harç hafifledikçe), bu harç ile üretilen blok elemanının basınç dayanımı düşeceği genel bir tecrübe olarak görülebilmektedir. Buna karşın blok elemanının tasarım parametreleri bağlamında termal yalıtım özelliklerinin de iyileşme gösterebileceği ayrı bir tecrübedir. Doğal olarak bu olguların tersi de geçerlidir. Diğer bir deyişle, blok üretimi için uygulanan harç yoğunluğu arttıkça, blok dayanımı iyileşmekte, ancak termal yalıtım özelliklerinde de zayıflama görülebilmektedir. Sektörel uygulamalarda da yaygınlık kazanmış pomza kayacı doğal gözenekliliği ve hafifliği sebebiyle harç bileşimlerinde sıklıkla kullanılan bir agrega malzeme türüdür. Bu bağlamda, çalışma kapsamında termal yalıtım özelliklerinin incelenmesi için tasarımları yapılan kâgir blok elemanlarının üretilmesinde sertleşmiş birim hacim kütle değerleri 600 kg/m³ ile 1350 kg/m³ aralığında değişim gösteren 9 ayrı seri doğal gözenekli pomza agrega katkılı

hafif betondan mamul pomza agregalı harç (PAH) kombinasyonlarının kâgir blok üretimlerinde kullanım durumu irdelenmiştir. PAH kombinasyonlarının tasarımında hafif beton harcının slump değeri 0 ve kuru harç kıvamı olarak ele alınmıştır. Bu harç formları blok üretiminde uygulanan presleme ve vibrasyon işlemlerine uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. PAH serilerin harç yoğunluk aralıkları şu şekilde sıralanmıştır: (1) 600 – 650 kg/m³. (2) 700 – 750 kg/m³. (3) 800 – 850 kg/m³. (4) 850 – 900 kg/m³. (5) 900 – 950 kg/m³. (6) 950 – 1000 kg/m³. (7) 1000 – 1050 kg/m³. (8) 1050 – 1100 kg/m³ ve (9) 1300 – 1350 kg/m³.

Hafif agregalı kâgir blok elemanların ısı iletkenliği hesap değerlerinin belirlenmesi, TS EN 1745 ve TS EN ISO 6946 [24-25] standartlarında öngörülen parametreler ve kurallar bağlamında çok tabakalı yapı elemanlarının hesap algoritmasına göre yapılmıştır. Bu yöntemde, beton kâgir birimi birden fazla, farklı ısı iletkenliği hesap değerine sahip malzemeden meydana geliyorsa, birimin ısı iletkenliği hesap değerinin belirlenmesinde öncelikle her bir malzemenin kalınlıkları ve alanları dikkate alınarak ısı geçirgenlik dirençleri hesaplanır. Böylece yüzey yüzde (%) oranlarına göre ortalama ısı iletkenlik değerleri belirlenerek, kâgir birimin boyutlarına ve duvar örgüsünde derz durumları da dikkate alınarak beton kâgir birimin eş değer ısı iletkenlik değeri ($\lambda_{eş}$) hesaplanabilmektedir. Hesap işleminde kâgir birim ve duvar örgüsüyle ilgili boyut, geometri, konfigürasyon ve fiziksel özellikler gibi aşağıda verilen parametreler önem kazanmaktadır:

- Kâgir Birimin anma boyutları (Yükseklik, uzunluk ve genişlik),
- Kâgir Birimin Kuru Birim Hacim Kütle
- Örgü Harcı Dahil Toplam Alan,
- Kâgir Birimin Toplam Yüzey Alanı,
- Kâgir Birim Boşluk Yüzeylerin Toplam Alanı,
- Kâgir Birim Dolu Yüzeylerin Toplam Alanı,
- Kâgir Birim Toplam Hacmi,
- Kâgir Birim Toplam Boşluk Hacmi,
- Kâgir Birim Beton Kısımın Toplam Hacmi,
- Kâgir Birim Beton Kısımın Net Birim Hacim Kütleli.

Hesaplama işleminde basitleştirilmiş olarak öncelikle kâgir birim tasarımında birbirinden farklı malzemelerin sınıflandırması yapılır. Bunlar; a)- Sandviç bitişik yapı elemanları. b)- Sandviç bitişik yapı elemanlarını bağlayan federler (kâgir birimi oluşturan beton kısım). c)- Kâgir birimin 1 m²'lik ısı geçiren yüzeyindeki kâgir birimleri bağlayan örgü harç malzemesi. Bununla birlikte, kâgir birim tasarımında yer alan malzeme türlerinin TS EN 1745 standardında öngörülen ısı iletkenlik çizelge değerlerinden yoğunluk değerlerine göre P=%10 veya P=%90 kategorideki öngörülen ısı iletkenlik değerlerinden yararlanılarak tanımı yapılır [24]. Bu bağlamda özellikle sandviç bitişik yapı elemanlarının λ değerleri, sandviç bitişik yapı elemanlarını bağlayan federlerin λ değerleri ve 1 m² ısı geçiren yüzeydeki kâgir birimleri bağlayan örgü harcı malzemesinin λ değerleri tanımlanır. Ayrıca kâgir birim tasarımındaki her bir farklı malzemenin alanları geometri ve konfigürasyon değerlerinden belirlenerek, kâgir birimin 1 m²'lik yüzeyinden geçen ısı miktarları (Q), her bir farklı malzeme türü için ayrı ayrı hesaplanır: a)- Sandviç bitişik yapı elemanlarının ısı kaybının değeri (Q_{san}), b)- Sandviç bitişik yapı elemanlarını bağlayan federlerin ısı kaybının değeri (Q_{isk}) ve c)- Örgü harcı malzemesi alanlarının ısı kaybı değeri (Q_{har}). Bu parametrelere göre 1 m²'lik yüzeyden geçen toplam ısı miktarı ($Q_{top} = Q_{san} + Q_{isk} + Q_{har}$) yaklaşımıyla belirlenir [25]. Bu toplam ısı miktarı aşağıdaki eşitlikte verilen değerlendirmeye eşitlenerek ($Q_{toplam}=Q$) kâgir birimin eşdeğer ısı geçirgenlik değeri ($U_{eş}$) belirlenmiştir.

$$Q = A \times U_{eş} \times (T_i - T_d) \quad (1)$$

Burada;

- A : Kâgir birimin ısı geçişi oluşan yüzey alanı (1 m²),
 T_i : İç ortam sıcaklık değeri, (°C),
 T_d : Dış ortam sıcaklık değeri, (°C),
 U_{eş} : Kâgir birimin eşdeğer ısı geçirgenlik değeri, (W/m²K).

Buradan U_{eş} değeri belirlenerek sonrasında aşağıdaki eşitlik yardımıyla kâgir birimin eşdeğer ısı iletkenlik değeri (λ_{eş}) W/mK biriminde belirlenebilir:

$$\lambda_{eş} = \frac{L}{\frac{1}{U_{eş}} \left(\frac{1}{\alpha_{iç}} + \frac{1}{\alpha_{dış}} \right)} \quad (2)$$

Burada;

- L : Kâgir birimin ısı geçişi oluşan kesit kalınlığı, (m),
 α_{iç} : İç yüzey ısı iletim direnç değeri,
 α_{dış} : Dış yüzey ısı iletim direnç değeri,

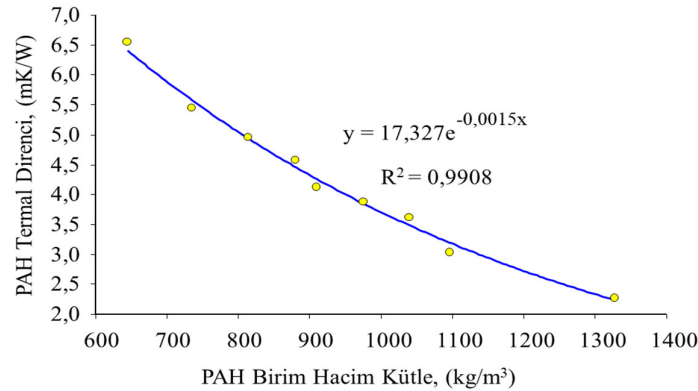
Bu hesaplama yönteminde, beton kâgir birimin geometrik tasarımında yer alan hava boşluklarının ısı iletkenlik değeri, hava boşluğunun kesit kalınlığına ve ısının akış yönüne bağımlı olarak TS EN ISO 6946 standardında öngörülen parametrelere göre belirlenir [25]. Ayrıca, iç yüzey ve dış yüzey ısı iletim direnç değerlerinin, ısının akış yönüne göre parametrik değerleri de TS EN ISO 6946 standardında öngörülmüş olan değerler olarak kullanılır. Bu çalışmadaki uygulanan hesaplamada, 1 m² ısı geçiren yüzeydeki beton kâgir birimleri birbiriyle bağlayan örgü harc malzemesinin λ değerleri ise TS EN 1745 standardında örgü harcı malzemeleri için öngörülen λ_{10kuru} değerlerine göre alınmıştır [24]. Kâgir birimin ısı geçirgenlik direnci (R_i) değeri, blok elemanın kesit genişliğine (L_b) bağlı olarak (L_b/λ_{eş}) orantısıyla belirlenmiştir.

4. Kâgir Blok Elemanların Termal Performansı ve Yalıtım Verimliliği

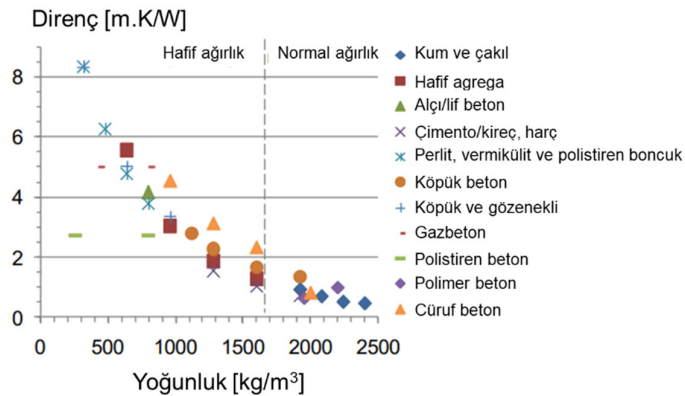
Hafif betondan mamul kâgir blok elemanlarının termal performansının analizinde kâgir blok elemanın geometrik formu, konfigürasyon durumu ve blok üretiminde kullanılacak hafif beton harcının ısı iletkenlik katsayı değeri temel parametreler olarak ele alınarak TS EN 1745 [24] ve TS EN ISO 6946 [25] standartlarında öngörülen hesap algoritmasına göre kâgir blok elemanın ısı iletkenlik değeri hesaplanabilmektedir. Bu bağlamda öncelikle çalışma kapsamında PAH tasarımlarının sertleşmiş birim hacim kütle değerlerine TS EN 1745 standardında “Çizelge A.4 Sadece pomza taşı kullanılmış beton kâgir birimler” [24] başlığı altında öngörülen ve beton harcı yoğunluğuna karşılık λ_{10kuru} durumu için beyan edilen ısı iletkenlik katsayı değerleri P=%90 koşulu dikkate alınarak istatistiksel regresyonel yaklaşımla belirlenmiştir. Sonrasında belirlenen ısı iletkenlik değerleri bağlamında her bir PAH tasarımının termal direnci “mK/W” biriminde (1/λ_{10kuru}) yaklaşımıyla tanımlanmıştır. Bu çalışma kapsamında 9 ayrı seri olarak değerlendirilmesi irdelenen farklı birim hacim kütle değerli PAH tasarımlarının her birinin termal direnç değerleri yukarıda tanımlanan hesaplama algoritmasına göre belirlenerek PAH birim hacim kütle değeri değişimine bağlı irdelenmesi yapılmıştır. Bu irdeme bulgularına ilişkin PAH birim hacim kütle - PAH termal direnci analizi Şekil 4’te grafiksel olarak verilmiştir.

Şekil 4 irdelendiğinde, PAH birim hacim kütle değeri arttıkça, TS EN 1745 standardında *sadece pomza taşı kullanılmış beton kâgir birimler* için öngörülen ısı iletkenlik (λ_{10kuru}) değerleri baz alınarak (1/λ_{10kuru}) yaklaşımıyla elde edilmiş harcın termal direnci düşmektedir. Diğer bir deyişle, kâgir blok harcı yoğunluğu arttıkça, termal direnç özelliği zayıflayarak, ısı geçişine karşı daha düşük bir

performans sergileyeceği görülmektedir. Kâgir blok harcı yoğunluğunun artması, aynı zamanda blok elemanının daha ağır bir form kazanmasına sebep olacağı için benzer yorum bu durum için de geçerli olacaktır. Bu değerlendirme aynı zamanda, termal konfor özelliği iyileştirilecek bir blok elemanının birim hacim kütesinin olabildiğinde düşük, buna karşın termal direncinin de yüksek olması gerekliliğini temsil etmektedir. Bu öz değerlendirme kâgir blok tasarımcıları için önemli bir noktayı işaret etmektedir. Çalışma kapsamındaki analiz bulgularına göre PAH yoğunluğunun 645 kg/m^3 - 1327 kg/m^3 aralığında değişiminde harcın termal direncindeki değişim $6,55 \text{ mK/W}$ - $2,28 \text{ mK/W}$ aralığındadır. PAH yoğunluğunun düşmesi, termal direncinin artmasına ve ısısal konforu daha yüksek bir harç formu oluşturmaktadır. Diğer taraftan, *sadece pomza taşı kullanılmış beton kâgir birimler* için PAH yoğunluğunda 2,06 kat artış, harcın termal direncinde 2,88 kat azalmaya neden olmaktadır. Urban ve arkadaşları [15] kâgir blok üretimlerinde kullanılan farklı agrega bileşenleri ve karışım tasarımlarına sahip 11 ayrı hafif ve normal yoğunluktaki beton için beton yoğunluğuna bağlı termal direnç değerlerini analiz etmişler ve Şekil 5’de verilen grafiksel analiz bulgusunu literatürde detaylı tartışmışlardır. Bu değerlendirmeye göre, beton yoğunluğu arttıkça betonun termal direnci istatistiksel üstel bir eğilimle düştüğü görülmektedir. Bu yaklaşımda alternatif farklı agrega türleriyle imal edilmiş hafif beton kategorisinde (yoğunluk $<1650 \text{ kg/m}^3$) irdelenen harcın termal direnç değerlerinin $8,5 \text{ mK/W}$ - $1,0 \text{ mK/W}$ aralığında azalarak değişim gösterdiği ifade edilmiştir [15]. Bu değerlendirmeye kıyasla çalışma kapsamında irdelenen PAH tasarımları için elde edilen termal direnç değerlerinin kâgir blok üretimleri için geliştirilen alternatif hafif beton harcı türleriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Elde edilen bulgular genel olarak irdelendiğinde termal yalıtım özelliği yüksek olan bir kâgir blok elemanı tasarlandığında bu blok elemanının üretiminde yoğunluğu düşük, termal direnci yüksek olan bir harç kombinasyonunun kullanımı kaçınılmaz olmaktadır.

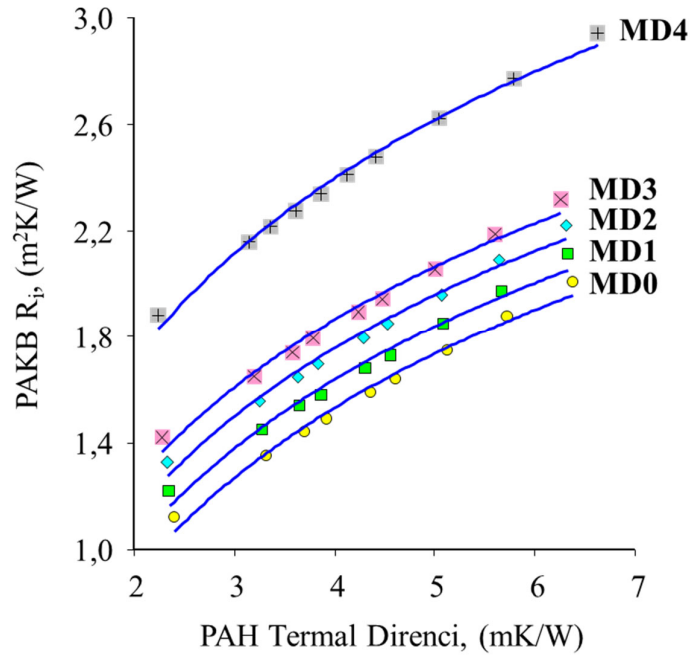


Şekil 4. PAH birim hacim kütle - PAH termal direnci ilişkisi



Şekil 5. Beton yoğunluğu - termal direnç ilişkisi analizi [15]

Çalışma kapsamında öncelikle geotekstil keçe yalıtım katmanı uygulanmamış MD0 kodlu pomza agregalı kâgir blok (PAKB) formunun TS EN 1745 [24] ve TS EN ISO 6946 [25] standartlarında öngörülen hesap algoritmasına göre $650 \text{ kg/m}^3 - 1350 \text{ kg/m}^3$ PAH yoğunluk değişimleri için ısı geçirgenlik direnç değerleri (R_i) " $\text{m}^2\text{K/W}$ " biriminde belirlenmiştir. Blok elemanın ısısal konfor performansının ön analizi amacıyla $650 \text{ kg/m}^3 - 1350 \text{ kg/m}^3$ aralığında PAH yoğunluk değişimlerinin termal direnci Şekil 4'de üstel fonksiyon olarak elde edilen eşitlik yardımıyla hesaplanmış ve bu değişimin $6,53-2,29 \text{ mK/W}$ aralığında olduğu belirlenmiştir. Blok harcı için elde edilen bu direnç değerlerinde MD0 blok tasarımının EN 1745 [24] ve TS EN ISO 6946 [25] standartlarında öngörülen algoritmayla hesaplanmış PAKB R_i değerleri ise $2,01- 1,12 \text{ m}^2\text{K/W}$ aralığında olduğu belirlenmiştir. Blok harcının termal direnci arttıkça, kâgir bloğun ısı geçirgenlik direnci de artış eğilimi göstermektedir. Diğer taraftan, blok tasarımındaki harç yoğunluğu düştükçe (hafifledikçe), ısı geçirgenlik direnci artmakta ve blok kesitinden ısı transferine karşı daha dirençli bir form kazanmaktadır. Benzer yaklaşımla bu çalışma kapsamındaki diğer blok tasarımları MD1, MD2, MD3 ve MD4 için de ayrı ayrı hesaplamalar yapılarak elde edilen bulgular karşılaştırmalı bir analizi temsil etmesi bağlamında PAH termal direnci – blok tasarımının R_i ilişkisi grafiksel olarak Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. PAH termal direnci – PAKB R_i ilişkisi

Şekil 6 irdelendiğinde görüldüğü üzere, termal direnci 27 mK/W olan %80 geri dönüştürülmüş tekstil elyaflarından elde edilmiş geotekstil keçenin yalıtım katmanı olarak kullanıldığı 4 farklı PAKB tasarımlarında (MD1-MD4), geotekstil keçe yalıtım katmanının etkisiyle blok elemanın ısı geçirgenlik direnç değerleri, MD0 kodlu referans bloğun değerlerine oranla önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. PAKB tasarımında geotekstil keçe katman kalınlığı arttıkça, harcın artan termal direnci bağlamında blok elemanın R_i değeri artmakta ve ısı transferine karşı daha dirençli bir forma ulaşmaktadır. Bu da blok elemanın termal yalıtım özelliğini iyileştiren ve geliştiren bir durumu temsil etmektedir. Ancak, blok elemanın tasarım formatında geotekstil keçenin ne kadar kalınlıkta ve blok elemanı kesitinde nerede yer alması gerektiği, burada tanımlanan ve Şekil 6'da verilen grafiksel ilişkiden yararlanılarak çıkarım yapılabilmektedir. Analizde görüldüğü üzere, birleştirilmiş tek katman şeklinde kalın bir uygulama formunda blok elemanına yerleştirilen geotekstil keçenin, blok elemanın ısısal yalıtım performansını en iyi artıran etki oluşturduğu görülmektedir. Bu şekilde bir uygulama, aynı zamanda gerek blok elemanın üretiminde daha kolay uygulanabilirlik, gerekse daha

düzenli kompakt görünümde bir blok elemanı elde edilmesine de olanak sağlamış olacaktır. Çalışma kapsamında sayısal veriler bağlamında bulgular detayda irdelendiğinde, MD1 blok tasarımında PAH termal direnci 2,36 – 6,32 mK/W aralığında değişim gösterirken, 10 mm kesit kalınlığındaki geotekstil keçenin etkisiyle PAKB Ri değerleri ise 1,22 – 2,11 m²K/W aralığında değişim göstermektedir. Bu da yalıtım katmanı uygulanmamış MD0 blok tasarımının değerlerine göre PAH yoğunluğuna bağlı %5 - %9 aralığında Ri direnci kazanımı olduğu belirlenmiştir. MD2 blok tasarımında PAH termal direnci ise 2,35 – 6,30 mK/W aralığında değişim gösterirken, 22 mm kesit kalınlığındaki geotekstil keçenin etkisiyle PAKB Ri değerleri ise 1,33 – 2,22 m²K/W aralığında değişim göstermektedir. Bu da yalıtım katmanı uygulanmamış MD0 blok tasarımının değerlerine göre PAH yoğunluğuna bağlı %10.4 - %18.8 aralığında Ri direnci kazanımı olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde MD3 blok tasarımında PAH termal direnci 2,30 – 6,24 mK/W aralığında, 32 mm kesit kalınlığındaki geotekstil keçenin etkisiyle PAKB Ri değerlerinin ise 1,42 – 2,31 m²K/W aralığında değişmektedir. MD0 blok tasarımına göre Ri direnci kazanımı ise %14.9 - %26.8 aralığında değişmektedir. Geotekstil keçe katman kalınlığının 72 mm uygulandığı MD4 tasarımında ise bu değişim eğilimlerinin PAH termal direnci bağlamında 2,24 – 6,58 mK/W aralığında ve Ri direnç kazanımı bağlamında ise %45.8 - %67.9 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Dört farklı tasarımdaki PAKB elemanlarının Ri değerleri genel olarak irdelendiğinde yukarıda da değinildiği üzere tek katman şeklinde kalın bir yalıtım materyali kullanımının ısı transferine direnç sağlamak açısından daha efektif bir sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Bu yaklaşıma göre belirlenmiş değerlerin ve yaklaşımların daha rasyonel olarak etüt edilebilmesi ve blok elemanın yalıtım performansı değerlendirmesinde destekleyici bir unsur olarak blok tasarımında uygulanan yalıtımın *termal verimlilik değeri* de detaylı irdelenmesi ayrıca önem kazanmaktadır.

Blok tasarımına ilave bir yalıtım katmanı uygulamak, kâgir blok üretiminde önemli bir maliyet yükünü de gündeme getirebilmektedir. Bu nedenle, tasarımda uygulanacak yalıtım katmanını etkin bir şekilde kullanmak önemlidir. Kâgir blok elemanların termal yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla tasarımlarında gerek boşluk gözlerine dolgu şeklinde gerekse yeni boşluk hacmi oluşturularak uygulanacak ilave yalıtım katmanı/katmanları için alternatif birden fazla yalıtım malzeme türü kullanılabilir. Ancak bu malzemelerden hangilerinin daha olumlu sonuç verebileceği ve tasarımda nasıl bir etki oluşturacağını tanımlamak ve yorumlamak için yalıtım malzemesinin *bağlı termal verimliliği* “TE” değeri incelenerek, görece daha az yalıtım malzemesi kullanılarak yüksek yalıtım performanslı kâgir blok elemanlarının nasıl tasarlanacağı öngörülebilir [15]. Bu analiz şekli aynı zamanda, beton ve kâgir blok elemanlarıyla örülmüş bir duvar sisteminin maliyetinin optimizasyonunda da son derece önemli bir faktör olarak yer alacaktır. Bununla birlikte, kullanılan yalıtımın nominal R değeri, bu yalıtımın neden olduğu duvar R değerindeki artışla karşılaştırıldığında, duvar R değerindeki gerçek artış genellikle önemli ölçüde daha düşüktür. İstenmeyen termal köprüler, yalıtım malzemesinin etkisiz kullanımına yol açan önemli ısı kayıplarına neden olabilir [15, 26].

PAKB tasarımında 27 mK/W’lık termal direnç değerli %80 geri dönüştürülmüş tekstil elyaflarından elde edilmiş geotekstil keçenin, yalıtım katmanı olarak uygulanması durumunda uygulamanın blok elemanın termal verimliliğine etkisinin belirlenmesi amacıyla, her bir blok tasarımı için bağlı termal verimliliği “TE” değerleri hesaplanmıştır. TE değerinin belirlenmesinde uygulanan yöntem, her biri aynı F_u yüzey alanına sahip olan yalıtımlı (R_i) ve yalıtımsız (R_u) duvar birimlerinin R-değeri karşılaştırmasına dayanır [15]. Blok tasarımında uygulanan yalıtım katmanının eşdeğer R-değeri (R_e), söz konusu kâgir blok elemanı ile aynı yüz yüzey alanına A_f (m²) sahip olan ve aynı V_{ins} (m³) hacmini içeren blok elemanını yalıtım için kullanılan yalıtım malzemesi tabakası için de hesaplanabilir [15]. TE, aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [15]:

$$TE = \frac{R_i - R_u}{R_e} \times 100 (\%) \quad (3)$$

Burada;

TE : PAKB elemanı bağlı termal verimliliği, (%),

R_i : Yalıtılmış PAKB elemanının R-değeri, (m²K/W),

R_u : Yalıtılmamış PAKB elemanın R-değeri, (m^2K/W),

R_e : Tek bir kesintisiz katmanda yapılandırılmış, tek başına yalıtım malzemesinin R-değeri (m^2K/W).

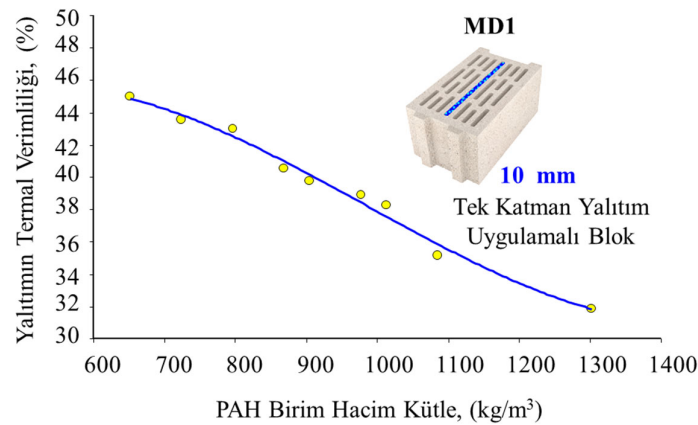
PAKB elemanında kullanılan geotekstil keçe yalıtımının eşdeğer kalınlığı “ d_e ”yi hesaplamak için yalıtım malzemesinin hacmi V_{ins} , PAKB elemanın ön yüzey alanı A_f ’ye bölmesiyle elde edilebilmektedir. Yalıtım malzemesinin eşdeğer kalınlık değeri (d_e) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [15]:

$$d_e = \frac{V_{ins}}{A_f} \quad (4)$$

Kullanılan yalıtım katmanı malzemesinin R_e ’nin eşdeğer R değeri ise [15]:

$$R_e = r_i \times d_e \quad (5)$$

Burada r_i , yalıtım katmanı malzemesinin ısı direncidir. Bu metodolojiye göre geotekstil keçenin yalıtım katmanı olarak uygulandığı MD1-MD4 PAKB tasarımlarında PAH yoğunluk değişimine bağlı PAKB elemanın TE değerleri ayrı ayrı hesaplanarak yalıtımın bağlı termal verimliliği irdelenmiştir. Yapılan analiz bulgularında genel eğilim, PAH yoğunluğu arttıkça (harç ağırlaştıkça) PAKB elemanın bağlı termal verimliliği düşmektedir. 10 mm kesit kalınlığındaki geotekstil keçenin yalıtım etkisiyle MD1 tasarımı için PAH yoğunluk - bağlı termal verimlilik değişimi Şekil 7’de verilmiştir.

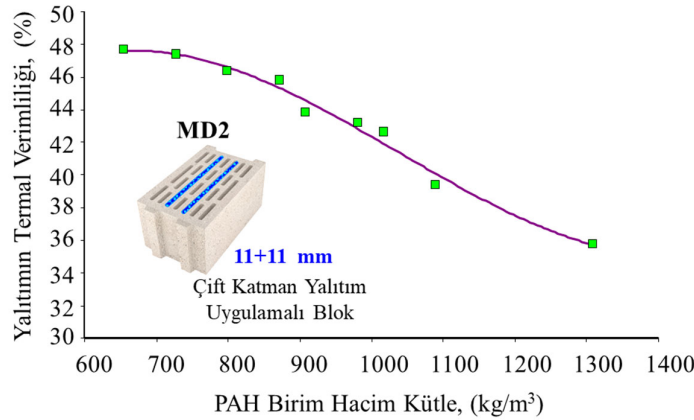


Şekil 7. PAH yoğunluğu – yalıtımın TE ilişkisi (MD1)

Yalıtım katmanlı bir blok tasarımının bağlı termal verimliliğinin yukarıda tanımlanan algoritmaya göre belirlenmesine sayısal bir örnek olarak 1302 kg/m^3 PAH harcı ile yapılmış ve 10 mm tek katman yalıtımlı MD1 kodlu blok tasarımı ele alınacak olursa; ilk önce yalıtım malzemesinin eşdeğer kalınlık değeri belirlenir. Bu blok tasarımı için $V_{ins}=610,5 \text{ cm}^3$ ve $A_f=975 \text{ cm}^2$ ’dir. Buna göre 4 nolu eşitlik kullanılarak “ d_e ” değeri $d_e=0,626 \text{ cm}$ olarak elde edilir. Daha sonra tasarımda kullanılan yalıtım katmanı malzemesinin R_e değeri ise $1/(\text{yalıtım katmanının ısı iletkenlik değeri})$ olarak belirlenir. Burada $\lambda_{yalıtım}=0,037 \text{ W/mK}$ ele alınmış olup, blok tasarımının R_e değeri “ $R_e=1/\lambda_{yalıtım}$ ” $27 \text{ m}^2K/W$ ’dir. Bir sonraki adımda ise yalıtılmış ve yalıtılmamış formda blok elemanın R_i ve R_u değerleri belirlenir. Buna göre bu blok tasarımı için $R_i=1,222 \text{ m}^2K/W$ ve $R_u=1,168 \text{ m}^2K/W$ olarak elde edilmiştir. Bu değerler bağlamında eşitlik 3’de verilen bağıntıya göre bağlı termal verimlilik hesaplandığında bu blok tasarımı için $TE=\%31,9$ olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde blok tasarımının değişken tüm değerleri için ayrı ayrı bağlı termal verimlilik değerleri hesaplanabilmektedir. Bu örneklem değerlendirmesi esas alınarak değişken parametre bağlamında 650

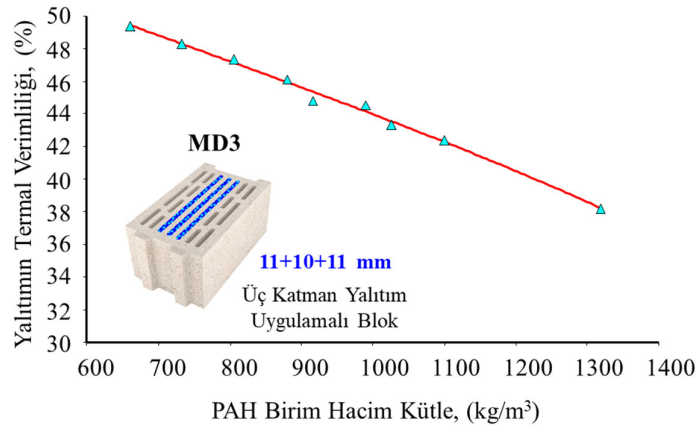
– 1302 kg/m³ PAH yoğunluk değişimleri için 10 mm tek katman yalıtım şeklinde MD1 tasarımında uygulanmış geotekstil keçenin bağıl termal verimliliği %31.9 - %45 aralığında değişim göstermiş olup, değişimin trendi Şekil 7’de de açıkça görülebilmektedir. Buna göre, PAH yoğunluğu düştükçe, blok tasarımının TE değeri iyileşmektedir. Bu bağlamda, PAH yoğunluğu yaklaşık 2 kat arttığında yalıtımın bağıl termal verimliliği ortalama %29 oranında azalmaktadır. Diğer bir değişle, eşdeğer kalınlıkta bir yalıtım katmanının yer aldığı blok tasarımında blok elemanındaki yalıtımın termal verimliliğinin iyileşmesi için de blok üretiminde kullanılacak harç yoğunluğunun hafifliği bir kez daha bu şekilde önem kazanmakta olduğu görülmektedir.

Eşitlik 3 – Eşitlik 5’de belirtilen algoritmik yaklaşıma ve yukarıda örnek olarak verilen sayısal değerlendirmeye benzer şekilde, 22 mm iki ayrı katman yalıtım şeklinde MD2 tasarımında uygulanmış geotekstil keçenin bağıl termal verimliliği ise %35.8 - %47.7 aralığında değişim göstermiştir. Bu değişimde etken olan parametre blok üretiminde kullanılacak PAH yoğunluğunun 1308 kg/m³’ten 654 kg/m³’e değişimi olmuştur (Şekil 8). MD1 tasarımındaki benzer şekilde PAH yoğunluğu düştükçe, blok tasarımının TE değeri iyileşmektedir. Bu bağlamda, PAH yoğunluğu yaklaşık 2 kat arttığında yalıtımın bağıl termal verimliliği ortalama %25 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ancak, blok tasarımında yalıtım katman kalınlığının değişimine bağlı elde edilen TE değerleri açısından irdelendiğinde, yalıtımın eşdeğer kalınlığı arttıkça TE değeri de artmaktadır. Örneğin, MD1 tasarımında 10 mm geotekstil keçe katmanı için eşdeğer yalıtım kalınlığı 6,26 mm olarak belirlenmiş olup, 900 kg/m³’lük PAH yoğunluğundaki harç ile blok tasarlandığında bu blok elemanında yalıtımın bağıl termal verimliliği ortalama %40 olmaktadır. Buna karşın, MD2 tasarımında 22 mm geotekstil keçe katmanı için eşdeğer yalıtım kalınlığı 13.8 mm olarak belirlenmiş olup, 900 kg/m³’lük PAH yoğunluğundaki harç ile blok tasarlandığında bu blok elemanında yalıtımın bağıl termal verimliliği ise %44 olmaktadır. Diğer bir değişle, eşdeğer PAH yoğunluğundaki bir harçla tasarlanan blok elemanında yalıtım katmanının eşdeğer kalınlığındaki 7,54 mm’lik artış, yalıtımın verimliliğini ortalama %4 kadar artırmıştır.

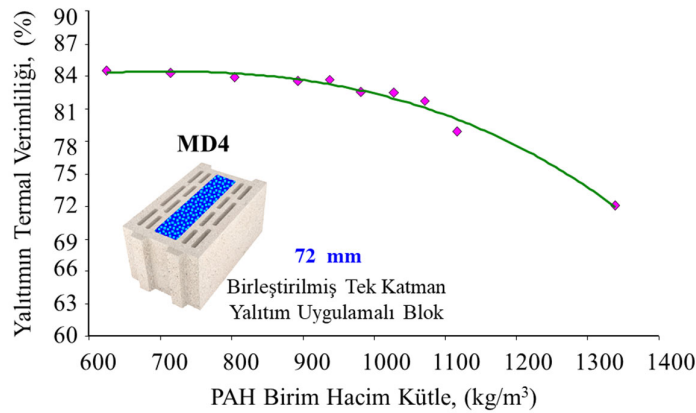


Şekil 8. PAH yoğunluğu – yalıtımın TE ilişkisi (MD2)

Bir diğer PAKB tasarımı MD3 için 32 mm üç ayrı katman yalıtımın uygulandığı geotekstil keçenin bu blok tasarımındaki eşdeğer yalıtım kalınlığı yaklaşık 20 mm’dir. Bu kalınlıkta bağıl termal verimliliği %38,2 - %49,4 aralığında değişim göstermekte olup, PAH yoğunluğunun ise değişimi azalan bir eğilimle 1319 kg/m³ - 660 kg/m³’tür (Şekil 9). PAH yoğunluğu yaklaşık 2 kat arttığında yalıtımın bağıl termal verimliliği ortalama %23 oranında azalmaktadır. Diğer taraftan, MD 4 için de benzer olgu gözlenmiştir. MD4 için 72 mm tek katman yalıtımın uygulandığı geotekstil keçenin bu blok tasarımındaki eşdeğer yalıtım kalınlığı ise yaklaşık 45.1 mm’dir. Bu kalınlıkta bağıl termal verimliliği %72.05 - %84.5 aralığında değişim göstermekte olup, PAH yoğunluğunun ise değişimi azalan bir eğilimle 1339 kg/m³ - 625 kg/m³’dür (Şekil 10). PAH yoğunluğu yaklaşık 2,14 kat arttığında yalıtımın bağıl termal verimliliği ortalama %14,7 oranında azalmaktadır.



Şekil 9. PAH yoğunluğu – yalıtımın TE ilişkisi (MD3)



Şekil 10. PAH yoğunluğu – yalıtımın TE ilişkisi (MD4)

MD1 ve MD2 tasarımlarındaki benzer şekilde MD3 ve MD4 tasarımlarında da PAH yoğunluğu düştükçe, blok tasarımının TE değeri iyileşmektedir. MD3 ve MD4 blok tasarımında yalıtım katman kalınlığının değişimine bağlı elde edilen TE değerleri açısından irdelendiğinde, yalıtımın eşdeğer kalınlığı arttıkça TE değeri de artmaktadır. Örneğin, MD3 tasarımında 32 mm geotekstil keçe katmanı için eşdeğer yalıtım kalınlığı 20 mm olarak belirlenmiş olup, 900 kg/m³'lük PAH yoğunluğundaki harç ile blok tasarlandığında bu blok elemanında yalıtımın bağıl termal verimliliği ortalama %45 olmaktadır. Bununla birlikte, MD4 tasarımında 72 mm geotekstil keçe katmanı için eşdeğer yalıtım kalınlığı 45.1 mm olarak belirlenmiş olup, 900 kg/m³'lük PAH yoğunluğundaki harç ile blok tasarlandığında bu blok elemanında yalıtımın bağıl termal verimliliği ise %84 olmaktadır. Yapılan bu analiz bulguları genel bir eğilimle, blok tasarımında tek katman şekliyle yalıtım malzemesi uygulandığında, yalıtımın eşdeğer kalınlığı arttıkça önemli bir ölçüde yalıtımın bağıl verimliliği artış göstermektedir. MD1 ile MD4 blok tasarım formları bu bağlamda mukayese edildiğinde geotekstil keçe yalıtım eşdeğer kalınlığı 38.8 mm'lik bir artışla blok elemanın bağıl yalıtım verimliliğinde ise (%40'tan %84'e gelişimiyle) %44'lük önemli bir iyileşme olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular ve yapılan irdelemeler genel olarak göstermiştir ki; termal yalıtım performansı iyileştirilecek blok tasarımlarında tek katman şeklinde ve eşdeğer kalınlığı büyük, minimum ısı köprüsü oluşturan bir formda yalıtım katmanı uygulanması son derece önem arz etmektedir. Yalıtımın malzemesinin farklı boyutlarda blok tasarımında yer alan boşluk hacimlerine yerleştirilmesi ve ısı köprüsü oluşturan beton harcı birimlerin tasarımda yer alması, daha düşük yalıtım verimliliği elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Yalıtım malzemesinin yüksek miktarda blok

tasarımında kullanılmasından ziyade, blok tasarım geometrisi ve konfigürasyonunun modellenerek minimum ısı köprüsü oluşturacak ve/veya ısı köprüsü oluşturmayan bir formda tasarlanarak kullanımının daha efektif sonuçlar sağladığı kaçınılmaz olmaktadır. Blok elemanın termal verimliliğine doğrudan etken diğer bir önemli değişken parametre ise blok üretiminde kullanılacak harcın yoğunluk değerinin mümkün olduğu ölçüde düşük ve hafif değerlerde olması önem kazanmaktadır. Ancak harç yoğunluk değerinin, elde edilecek blok elemanın kabul edilebilir bir mukavemet değerini sağlayıp sağlayamayacağı da detaylı irdelenmelidir.

5. Sonuçlar

Bu makalede, pomza agregalı hafif betondan mamul farklı tasarımlara sahip kâgir birimlerin konfigürasyon ve beton yoğunluk değişimi bağlamında termal yalıtım özelliklerinin incelenmesi ve kâgir birimin termal yalıtım performansının iyileştirilmesi üzerine yapılan bir çalışmanın özet karşılaştırmalı bulguları tartışılmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre;

1. Pomza agregalı harcın birim hacim kütle değeri arttıkça, harcın termal direnci düşmektedir. PAH yoğunluğunda 2,06 kat artışta harcın termal direncinde 2,88 kat azalma oluşmaktadır.
2. PAKB tasarımında geotekstil keçe katman kalınlığı arttıkça, harcın artan termal direnci artmakta ve ısı transferine karşı daha dirençli bir forma ulaşmaktadır.
3. MD1 blok tasarımında PAH termal direnci 2,36 – 6,32 mK/W aralığında değişim gösterirken, 10 mm kesit kalınlığındaki geotekstil keçenin etkisiyle PAKB Ri değerleri ise 1,22 – 2,11 m²K/W aralığında değişim göstermektedir. Bu da yalıtım katmanı uygulanmamış MD0 blok tasarımının değerlerine göre PAH yoğunluğuna bağlı %5 - %9 aralığında Ri direnci kazanımı oluştuğu belirlenmiştir.
4. MD2 blok tasarımında PAH termal direnci ise 2,35 – 6,30 mK/W aralığında değişim gösterirken, 22 mm kesit kalınlığındaki geotekstil keçenin etkisiyle PAKB Ri değerleri ise 1,33 – 2,22 m²K/W aralığında değişim göstermektedir. Bu da yalıtım katmanı uygulanmamış MD0 blok tasarımının değerlerine göre PAH yoğunluğuna bağlı %10.4 - %18.8 aralığında Ri direnci kazanımı oluştuğu belirlenmiştir.
5. MD3 blok tasarımında PAH termal direnci 2,30 – 6,24 mK/W aralığında, 32 mm kesit kalınlığındaki geotekstil keçenin etkisiyle PAKB Ri değerlerinin ise 1,42 – 2,31 m²K/W aralığında değişmektedir. MD0 blok tasarımına göre Ri direnci kazanımı ise %14.9 - %26.8 aralığında değişmektedir.
6. Geotekstil keçe katman kalınlığının 72 mm uygulandığı MD4 tasarımında ise bu değişim eğilimlerinin PAH termal direnci bağlamında 2,24 – 6,58 mK/W aralığında ve Ri direnci kazanımı bağlamında ise %45.8 - %67.9 aralığında değiştiği belirlenmiştir.
7. Dört farklı tasarımdaki PAKB elemanlarının Ri değerleri genel olarak irdelendiğinde tek katman şeklinde kalın bir yalıtım materyali kullanımının ısı transferine direnci sağlamak açısından daha efektif bir sonuç verdiği gözlenmiştir.
8. MD1 tasarımında (10 mm tek katman geotekstil keçeli) bağıl termal verimlilik %31.9 - %45 aralığında, MD2 tasarımında (22 mm iki ayrı katman yalıtım şeklinde uygulanmış geotekstil keçeli) bağıl termal verimliliği ise %35.8 - %47.7 aralığında, MD3 tasarımında (32 mm üç ayrı katman geotekstil keçeli) bağıl termal verimlilik %38.2 - %49.4 aralığında MD4 tasarımında (72 mm tek katman geotekstil keçeli) bağıl termal verimlilik %72.05 - %84.5 aralığında değişim göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında, büyük oranda geri dönüştürülmüş tekstil elyaflarından elde edilmiş geotekstil keçenin hafif betondan mamul kâgir blokların ısı dirençlerini artırmakta ve dolaylı olarak duvar yapımında kullanılması ile birlikte binalarda ısı yalıtımı açısından önemli iyileştirme sağlayabileceği gözlemlenmiştir. Ayrıca, hafif betondan mamul kâgir blokların yeterli dayanım

değerlerini sağlayabilecek düzeyde düşük yoğunlukta üretilmesi ve ısı köprüsü oluşumlarını minimuma indirebilecek şekilde tek katmanlı ve uygulama kalınlığı nispeten yüksek olan geotekstil keçelerin kullanılması, bu ürünlerin ısı yalıtım özelliklerini oldukça iyileştirmiş ve sürdürülebilir yapılarda kullanılabilmesi açısından önemli sonuçlar vermiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Chel A, Geetanjali K. Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. Alexandria engineering journal 2018; 57: 655-669.
- [2] Gheni, AA, ElGawady ME, Myers JJ. Energy efficient masonry units using sustainable techniques. Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation 2016; 1702-1707.
- [3] Suleymanova LA, Lesovik VS, Kara KA, Malyukova MV, Suleymanov KA. Energy-Efficient Concretesfor Green Construction. Research Journal of Applied Sciences 2014; 12: 1087-1090
- [4] Korjenic A, Petráněk V, Zach J, Hroudová J. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. Energy and Buildings 2011; 43: 2518–2523.
- [5] Nemanič V, Žumer M. New organic fiber-based core material for vacuum thermal insulation. Energy and Buildings 2015;90: 137-141.
- [6] Boafó FE, Kim JT, Chen Z. Configured cavity-core matrix for vacuum insulation panel: Concept, preparation and thermophysical properties. Energy and Buildings 2015; 97: 98–106.
- [7] Zhu L, Dai J, Bai G, Zhang F. Study on thermal properties of recycled aggregate concrete and recycled concrete blocks. Construction and Building Materials 2015; 94: 620-628.
- [8] Solomon AA, Hemalatha G. Characteristics of expanded polystyrene (EPS) and its impact on mechanical and thermal performance of insulated concrete form (ICF) system. Structures 2020; 23: 204-213.
- [9] Caruana C, Yousif C, Bacher P, Buhagiar S, Grima C. Determination of thermal characteristics of standard and improved hollow concrete blocks using different measurement techniques. Journal of building engineering 2017; 13: 336-346.
- [10] Sutcu M, del Coz Díaz JJ, Rabanal FPÁ, Gencel O, Akkurt S. Thermal performance optimization of hollow clay bricks made up of paper waste. Energy and Buildings; 2014: 75, 96-108.
- [11] Xu R, He T, Da Y, Liu Y, Li J, Chen C. Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete. Construction and Building Materials 2019; 208: 242-249.
- [12] Suleymanova LA, Pogorelova IA, Marushko MV. Theoretical basis of formation highly organized porous structure of aerated concrete. Materials Science Forum 2019; 945: 309-317.
- [13] Ahmed A. Sustainable construction using autoclaved aerated concrete (aircrete) blocks. Research and Development in Material Science 2017; 1(4). ISSN 2576-8840
- [14] Gorshkov AS, Rymkevich PP, Vatin NI. Simulation of non-stationary heat transfer processes in autoclaved aerated concrete-walls. Magazine of Civil Engineering 2014; (8): 38-48.
- [15] Urban B, Engelmann P, Kossecka E, Kosny J. Arranging insulation for better thermal resistance in concrete and masonry wall systems. In 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland; 2011.
- [16] Kosny J, Christian JE. The optimum use of insulation for concrete masonry block foundations. Building Research Journal 1993; 2.
- [17] Sakthivel S, Kumar SS, Melese B. Sound-absorbing recycled cotton/polyester thermal bonded nonwovens, The Journal of The Textile Institute 2021; 112: 1588-1595.

- [18] Bradley W, Greer DS., Nonwoven fabric composites from coir fibers. Patent US 2013/0260631 A1 13/899,417, 2013.
- [19] Moghadam A, Yousefi SH, Tafreshi HV, Pourdeyhimi B. Characterizing nonwoven materials via realistic microstructural modeling. *Separation and Purification Technology* 2019; 211: 602-609.
- [20] Rebolledo P, Cloutier A, Yemele MC. Effect of density and fiber size on porosity and thermal conductivity of fiberboard mats. *Fibers* 2018; 6: 81.
- [21] Santhanam S, Temesgen S, Atalie D, Ashagre G. Recycling of cotton and polyester fibers to produce nonwoven fabric for functional sound absorption material. *Journal of Natural Fibers* 2019; 16: 300-306.
- [22] PUNTEKS. <http://www.punteks.com/urunler-izogreenkece.aspx> (Erişim Tarihi: 06.04.2023)
- [23] PAnetti-HB. <https://www.panetti.com.tr/urunlerimiz/panetti-hb-seri/> (Erişim Tarihi: 06.04.2023)
- [24] Kâgir ve kâgir mamulleri - Isıl özelliklerinin tayini yöntemleri. Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 1745, 2020.
- [25] Yapı bileşenleri ve yapı elemanları - Isıl direnç ve ısı geçirgenlik-Hesaplama yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, TS EN ISO 6946, 2017.
- [26] Kosny J, Syed AM. Interactive Internet-based building envelope materials database for whole-building energy simulation programs. *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX*, Clearwater, Florida, 2004.

UYARLAMALI AĞ TABANLI BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ KULLANILAN BİR MEKANİK JİROSKOPUN YALPALAMA KESTİRİMİ

İlyas KACAR*

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 23.05.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 25.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1301423

ÖZET

Jiro-tork üretme kabiliyetleri nedeni ile mekanik jiroskoplar, hava ve uzay araçları gibi tamamen asılı veya tek, çift tekerlekli kara araçlarını dengelemek, yön vermek için sıklıkla kullanılmaktadır. Jiro-tork yüksek hızda dönen volan ve onun üç eksen etrafında dönme hareketi yapabilmesine olanak tanıyan bir şasi sayesinde üretilmektedir. Jiro-torku kontrol etmek için yalpalama hızı uygulanmaktadır. Yalpalama hızına ilişkin zaman serisi verisi katı cisim dinamik analizi sayesinde elde edilmiştir. Veriye herhangi bir ön işlem uygulanmamıştır. Bu hızın açık çevrim kestirimi için uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) kullanılmıştır. Elde edilen modelde korelasyon değeri 0.99981 ve hata karesinin ortalamasının kökü 0.02467 rad/s olarak bulunmuştur. Model çıktıları ile veri seti arasında yüksek doğrusal bir ilişki mevcuttur. ANFIS ağının veriye herhangi bir ön işlem yapılması gereksinimini ortadan kaldırdığı da görülmüştür. Kullanılan ağ parametreleri ve bu ağ ile elde edilen kestirim performansı çalışmada sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Jiroskop, Makine öğrenimi, Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi, Yalpalama*

PRECESSION FORECASTING OF A MECHANICAL GYROSCOPE USING ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM

ABSTRACT

Due to their ability to generate gyro-torque, mechanical gyroscopes are frequently used to balance or orientate fully suspended air or spacecraft or single or double-wheeled land vehicles. Gyro-torque is produced with a high-speed rotating flywheel and its chassis that allows it to rotate around three axes. The precession is applied to control the gyro-torque. The time series data on the precession was obtained by rigid body dynamic simulation. No pre-processing was applied to the data. An adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) is used for open loop prediction of the precession. In the model obtained, the correlation value was found to be 0.99981 and the root of the mean square of the error was 0.02467 rad/s. High linear relationship between the model outputs and the data set is found. It has also been seen that the ANFIS network eliminates the need for any pre-processing of the data. The network parameters used and the prediction performance obtained are presented.

Keywords: *Gyroscope, Machine Learning, Adaptive neuro fuzzy inference system, Precession*

1. Giriş

Jiroskoplar mekanik, optik veya elektromekanik türlerde olabilmektedir. Ana uygulamaları navigasyon olsa da mekanik olanlar sayesinde jiroskopik tork üretilmesi de mümkündür. Hava ve uzay aracı gibi tamamen havada hareket eden araçları yönlendirmek için itki sistemlerine alternatif olarak kullanılmaktadır. Ayrıca karada tek tekerlekli bisikletlerin ve motosikletlerin otonom stabilizasyonu için de kullanılmaktadır. Çoğunlukla savunma sanayiine yönelik uygulamaları mevcuttur. Mekanik jiroskopların da çeşitli türleri vardır. Bu makale, ağırlık ve yalpalama hızına yanıt olarak jiro-tork üreten

* e-posta : ikacar@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5887-8807>

mekanik jiroskopları ele almaktadır. Bu tip jiroskoplarda dönen volan, elastik bir burulma çubuğu ile gimbal'e bağlanmaktadır. Volan, ayar hızı adı verilen özel bir hızda dönmektedir.

Jiroskoplar manyetik olarak yataklanmak sureti ile uzay aracının konum kontrolünde kullanılan önemli bir aktüatördür. Volan yüksek hızda döndüğü için hassas kontrol çok önemlidir. Rotor dinamiği, elektromanyetik kuvvet, pertürbasyon ve harici bozucular kontrolü güçleştirmektedir. Sorunlarının üstesinden gelmek için geleneksel kontrol yöntemlerine ilave olarak bulanık entegre kayan kipli denetleyici, makine öğrenme modelleri kullanılmaktadır.

Veri kullanılarak yapılan modelleme ve kestirim yöntemleri, analitik formüllerle modellenemeyecek kadar karmaşık olan yapıların modellenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Her ne kadar geleneksel bir yöntem olan regresyonlar hâlâ günümüzde kullanılıyor olsa da makine öğrenme yöntemleri ile oluşturulan modellerin çok daha yüksek modelleme ve kestirim başarısına sahip olduğu bildirilmiştir [1]. Nikkhah ve ark. (2009) bir mekanik jiroskoptaki rastgele bozucu ve gürültüler nedeni ile oluşan hataları kestirmek üzere otomatik gerilemeli (AR), otomatik gerilemeli hareketli ortalama (ARMA), uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) ve nonlineer otomatik gerilemeli (NAR) yöntemlerinin kullanımını araştırmıştır [2]. Manyetometre, güneş sensörü ve jiroskop verilerini kullanarak bir uydunun durumu ve açısal hızları ANFIS gözlemcisi ile kapalı döngü kestirimi yapılmıştır [3]. Niu ve Cui (2017) kontrol moment jiroskop (CMG) sisteminin bulanık Takagi-Sugeno yöntemi ile kontrol stratejisi tasarlamıştır [4]. Manyetik olarak askıya alınmış kontrol momenti jiroskopu (MSCMG), uzay aracı kontrolünün konum hizalaması için önemli bir aktüatör olup kontrol sorunlarının üstesinden gelmek üzere bulanık entegre kayan kipli denetleyici kullanmışlardır [5].

Yazarların bilgisine göre, açık literatürde, ANFIS ağı kullanarak mekanik jiroskop yalpalamasının zaman serisi kestirimini içeren bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada dinamik simülasyonla elde edilmiş olan yalpalama hızı verisinin zaman serisinin modellenmesinde ANFIS ağının randımanı değerlendirilmiş ve bir kestirim modeli oluşturulmuştur. Modeli oluşturmak için kullanılan ağ parametreleri ve bu model ile elde edilen kestirim performansları çalışma içerisinde sunulmuştur. İkinci bölümde jiro-tork elde edilmesine ilişkin esaslar verilmişken üçüncü bölümde veri toplama ve simülasyon anlatılmıştır. Müteakip bölümde modellerin randımanlarının değerlendirilmesinde kullanılan metrikler verilmiştir. ANFIS ağının parametreleri beşinci, sonuçlar ve tartışma ise altıncı başlıkta verilmiştir. Varılan temel çıkarımlar ise yedinci ve son bölümde sunulmuştur.

2. Materyal ve Metod

2.1. Jiro-tork eldesi

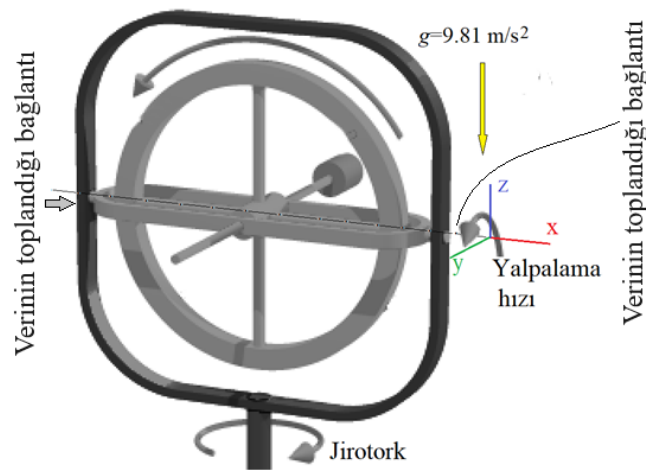
Jiro-tork ile yalpalama hızı arasındaki ilişki klasik (Newtonian) mekanik kullanılarak cisme sabitlenmiş bir eksen takımına göre Eşitlik (1) sayesinde hesaplanmaktadır [6].

$$\sum \vec{M} = \frac{d(\vec{L})_{xyz}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{L} \quad (1)$$

Burada $\sum \vec{M}$ ifadesi net tork olup, yönü ise, bağıntıya göre $d\vec{L}$ veya $\vec{\Omega} \times \vec{L}$ vektörel çarpımı yönündedir. $\vec{\Omega}$, yalpalama olarak adlandırılan ikinci Euler açısındaki [7] açısal hızdır. \vec{L} açısal momentum ve t ise zamandır. Jiroskopik tork üretmek için ağırlık kullanılan mekanik jiroskoplarda denklemin sol tarafı $\sum \vec{M} = \vec{r} \times m\vec{g}$ ifadesine eşit olacaktır. \vec{r} moment kolu olup volan ağırlık merkezi ile dönme merkezi arasındaki mesafe, m volan kütlesi ve \vec{g} yerçekimi ivmesidir. Açısal momentumun, volanın dönme hızı yönünde olacağı unutulmamalıdır. Volanın dönme hızı, yalpalama hızı ve moment eksenleri birbirlerine diktir. Tork oluşmasına neden olan unsur ağırlıktır.

2.2. Simülasyon ve veri toplama

Mekanik jiroskopun rijit dinamik simülasyonu yapılarak zaman serisi olarak yalpalama hızı elde edilmiştir [8]. Analiz jiroskopun 5 saniyelik hareketini kapsamaktadır. İki zaman adımı uygulanmıştır. Her zaman adımında minimum $1e-7$ s ve maksimum $5e-2$ s olan alt adımlar uygulanmıştır. Volanın yataklandığı bağlantının üç eksen etrafındaki ve bileşke yalpalama hızları kaydedilmiştir. Volanın kendi eksenini etrafındaki dönüşü 200 rad/s'dir. 693 adet yalpalama hızı verisi toplanmıştır. Toplanan veri, sonuçlar ve tartışma kısmında verilmiştir. Her bir simülasyon, 3.40 GHz hızında çalışan dört çekirdekli işlemciye, 8 GB RAM'e sahip bir bilgisayarda 4.756 saniye sürmüştür. Çalışmada kullanılan mekanik jiroskop Şekil 1'de verilmiş olup, ağırlık dengeleme esaslıdır. Tasarım sayesinde volanın hem kendi eksenini etrafında hem de diğer iki eksen etrafında serbestçe dönebilmesi mümkündür. Yerçekimi ivmesi uygulanmıştır. Temel kabuller şunlardır: • Malzemede yapısal sönüm mevcut değildir. • Yataklar sürtünmesizdir. • Temas veya yataklama esnasında yüzeylerin tamamı bağlantılıdır. • Başka durumlar dikkate alınmamıştır. • Parçaların hepsi rijittir. Bu nedenle esneme veya hasar söz konusu değildir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan mekanik jiroskop [9]

Temas çifti mevcut değildir. Mevcut tasarıma göre kütle merkezinden dönme merkezine olan mesafe nedeni ile ağırlığın sebep olduğu tork $\mathbf{Tork}_W = \mathbf{r} \times m\mathbf{g} = 0.03 * 1.59 * 9.8066 = 0.468 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$ şeklinde analitik olarak hesaplanabilmektedir. Engle's ARCH testi toplanan veriye uygulanmış ve veride değişken varyans olduğu görülmüştür. Çalışmada ham veri üzerinde herhangi bir ön işlem yapılmamıştır. Bu sayede genel veri eğrisini yakalayabilmesinin yanı sıra eğrideki tepe ve çukurları da yakalayabilmesi, ANFIS ağının ayırt edici özelliklerinden birisi olacaktır. Üstelik veriye ön işlem yapılmaması sayesinde verinin doğallığı muhafaza edilecek ve ilave iş yükü ortadan kalkacaktır.

2.3. Modelin randımanı

Modelleme ve kestirim çalışmalarında istatistiki olarak bazı hata metrikleri ve analiz türleri sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları Eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (p(t) - o(t))^2 \quad (2.a)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.b)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |p(t) - o(t)| \quad (2.c)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|p(t)-o(t)|}{o(t)} \quad (2.d)$$

$$\text{Hata} = p(t) - o(t) \quad (2.e)$$

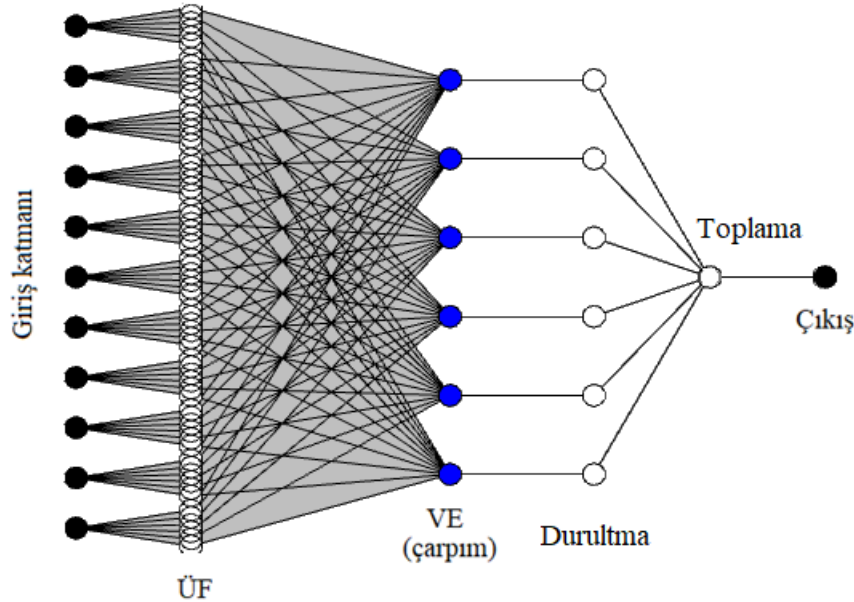
$$R = \frac{N \sum_{t=1}^N p(t)o(t) - (\sum_{t=1}^N p(t))(\sum_{t=1}^N o(t))}{\left(\sqrt{N \sum_{t=1}^N p(t)^2 - (\sum_{t=1}^N p(t))^2} \sqrt{N \sum_{t=1}^N o(t)^2 - (\sum_{t=1}^N o(t))^2} \right)} \quad (2.f)$$

İfadelerde t zaman adımında, veri setindeki değerler $o(t)$ olup model tahmini ise $p(t)$ 'dir. R ifadesi korelasyon katsayısı ve R^2 ise determinant katsayısı olup -1 ile 1 arasında değer almaktadır, birimi yoktur. MSE hataların karelerinin ortalaması, MSE'nin karekökü RMSE, MAE mutlak hatanın ortalaması ve MAPE ise mutlak hatanın ortalamasının yüzdesidir. MSE (birim²), RMSE (birim), MAE (birim) ve MAPE (birim) değerlerinin sıfıra yakın olması hata değerlerinin azlığını göstermektedir. Ayrıca regresyon analizleri de modellerin iyiliklerini belirleme araçlarından biridir.

R (veya R^2) değerlerinin pozitif 1'e yakın olması, fonksiyon kestirimi ile ham veri arasında yüksek doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Negatif 1'e yakın değerler yüksek doğrusal ters bir ilişki olduğunu göstermektedir. Sıfıra yakın değerler ise herhangi bir ilişki olmadığı anlamına gelmektedir.

2.4. ANFIS ile modelleme

Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi, hem YSA yapısına hem de bulanık karar verme stratejisine sahip bir tekniktir. YSA yapısından gelen sinirsel öğrenme kabiliyetine sahipken, kararlar ise bulanık teknikten gelen "eğer-ise" kurallarına ve üyelik fonksiyonlarına (ÜF) dayanmaktadır. Eğitim sırasında ÜF'larının boyutunu değiştirmek, bu bulanık çıkarım sistemine (FIS) uyarlamalılık özelliği katmaktadır. Bu çalışmada kullanılan ANFIS yapısı Şekil 2'de verilmiştir.



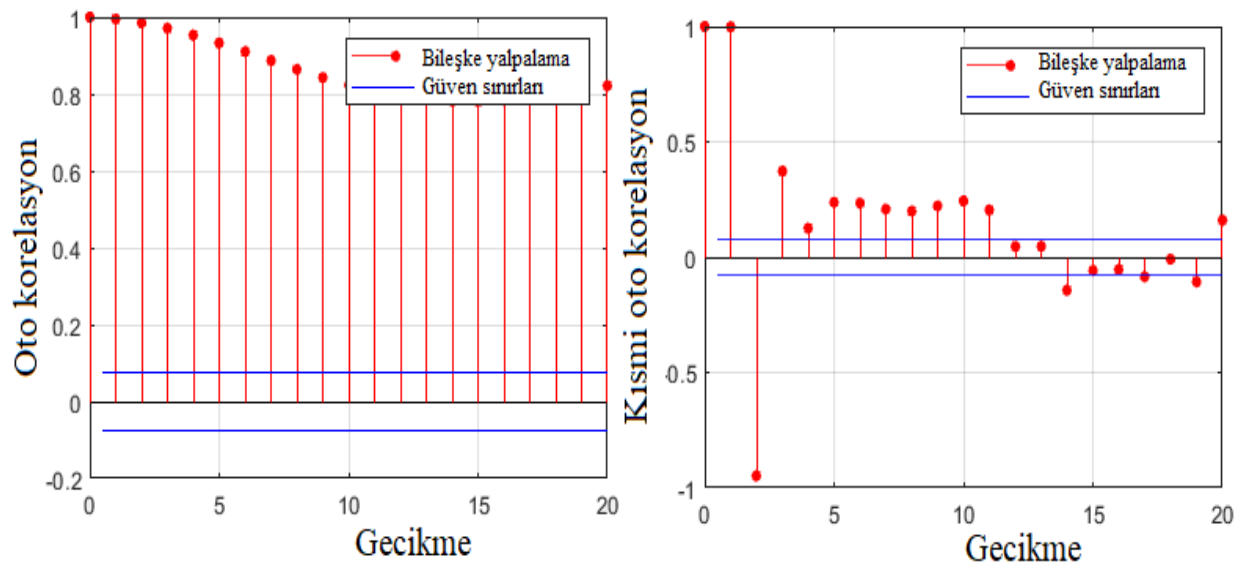
Şekil 2. On bir gecikmeli ANFIS ağı [10]

Genelleştirilmiş bir bulanıklaştırma kuralı Eşitlik (3)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} & \text{If } (in_1 = A_i) \wedge (in_2 = B_j) \wedge \dots \wedge (in_n = C_k) \\ & \text{then } f_n = f(in_1, in_2, \dots, in_n) \end{aligned} \quad (3)$$

Burada \wedge işareti “ve” operatörüdür. A, B, \dots, C kümelere karşılık gelen girdi değişkenlerinin dilsel ifadeleridir. $i, j, k = 1, 2, \dots$ bulanıklaştırma katmanındaki her girdi değişkeni için kümeleme sayılarıdır. in_1, in_2, \dots giriş değişkenleridir. $n = 1, 2, \dots$ kural adetidir. f_n durulaştırma katmanındaki her bir düğümdeki çıktı fonksiyonudur. Bu sabit (sıfır dereceli Sugeno modeli olarak adlandırılır) veya lineer $f_n = p_n * in_1 + q_n * in_2 + \dots + r_n * in_n + s_n$ olabilmektedir. Burada $p_n, q_n, r_n,$ ve s_n doğası gereği regresyon yoluyla belirlenecek katsayılardır. Bir kuralın “eğer” kısmındaki parametrelere *öncül* parametreler, “ise” kısmındaki parametrelere *sonuç* parametreleri denmektedir.

Zaman gecikmelerini tespit etmek için korelogramlar kullanılmıştır (Şekil 3). Yalpalamanın bileşenleri ve bileşkesi oto korelasyon ve kısmi oto korelasyon grafiklerinde değerlendirilmiştir. Her iki tip grafikten serideki verilerin rastgele olmadığı, kendi gecikmelerine bağlı olduğu görülmüştür. Otokorelasyon fonksiyonu (OKF) giderek azalmaktadır. OKF katsayıları sıfırdan önemli ölçüde farklıdır ve yavaş yavaş sıfıra doğru düşmektedir. Kısmi otokorelasyon fonksiyonu (KOKF) 11. gecikmeden sonra kesilmektedir. Sonraki gecikmeler sıfıra çok yakındır. İki standart sapma kadarlık oluşturulan güven sınırlarının hemen hemen dışında kalmaktadır. Bu durum 11 gecikmenin birbirleri ile yüksek ilişkili ve sonraki ardışık değerlerin birbiriyle ilişkili olmadığı anlamına gelmektedir. Bu davranış, serinin ilk on bir gecikmeye bağlı ve otomatik gerileyen bir seri AR(11) olduğunu göstermektedir. Şekilde sadece yalpalamanın bileşkesine ait grafikler verilmiş olsa da diğer bileşenlerin de benzer desende olduğu görülmüştür. Bu nedenden dolayı sadece bileşkeye ait grafikler verilmiştir.



Şekil 3. (a) Bileşke yalpalama verisine ait OKF, (b) KOKF

Toplam veri setinin ilk %60'ı eğitim için, geri kalan %40'ı ise kestirim için kullanılmıştır. Veriler yazılım içerisinde başlangıçta normalleştirilmiştir. NAR ağları, yazılım kodları kullanılarak oluşturulmuştur [11]. IoT (nesnelerin interneti) kullanan herhangi bir donanım uygulaması bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Ağırlıklara eğitimden önce ilk değer olarak sıfır verilmiştir. Hata yakınsaması olarak RMSE gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan ANFIS ağının özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

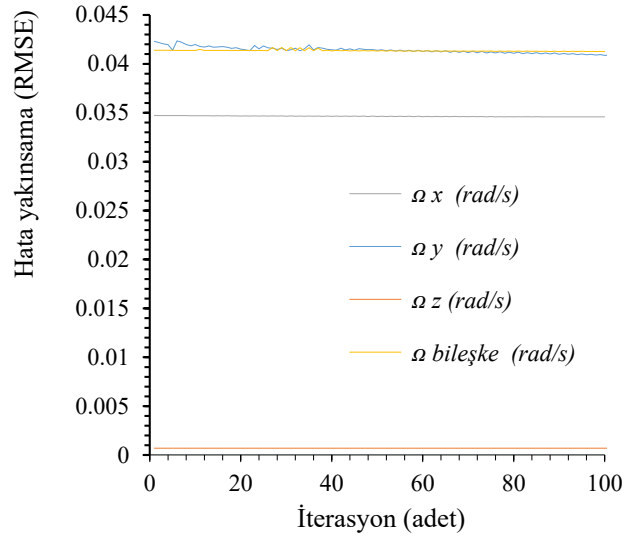
Çizelge 1. ANFIS mimarisinin katman yapılandırması

Katman	Konfigürasyon	Parametreler
Çıktı	1	--
Giriş	11	11 gecikmeli geri besleme
Veri bölümlenmesi	--	60% eğitim, 40% kestirim
Bulanıklaştırma ve veri kümeleme	Fuzzy C Means	Giriş ÜF: Gauss Kümeleme: Her ÜF için 4 $m=2$
Durulaştırma	Çıkış ÜF	Birinci merteye Sugeno
Karar verme	Çarpım	VE
Eğitim algoritması	Hybrid	--
Epochs	İterasyon = Epoch	100 Epoch

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Doğrulama

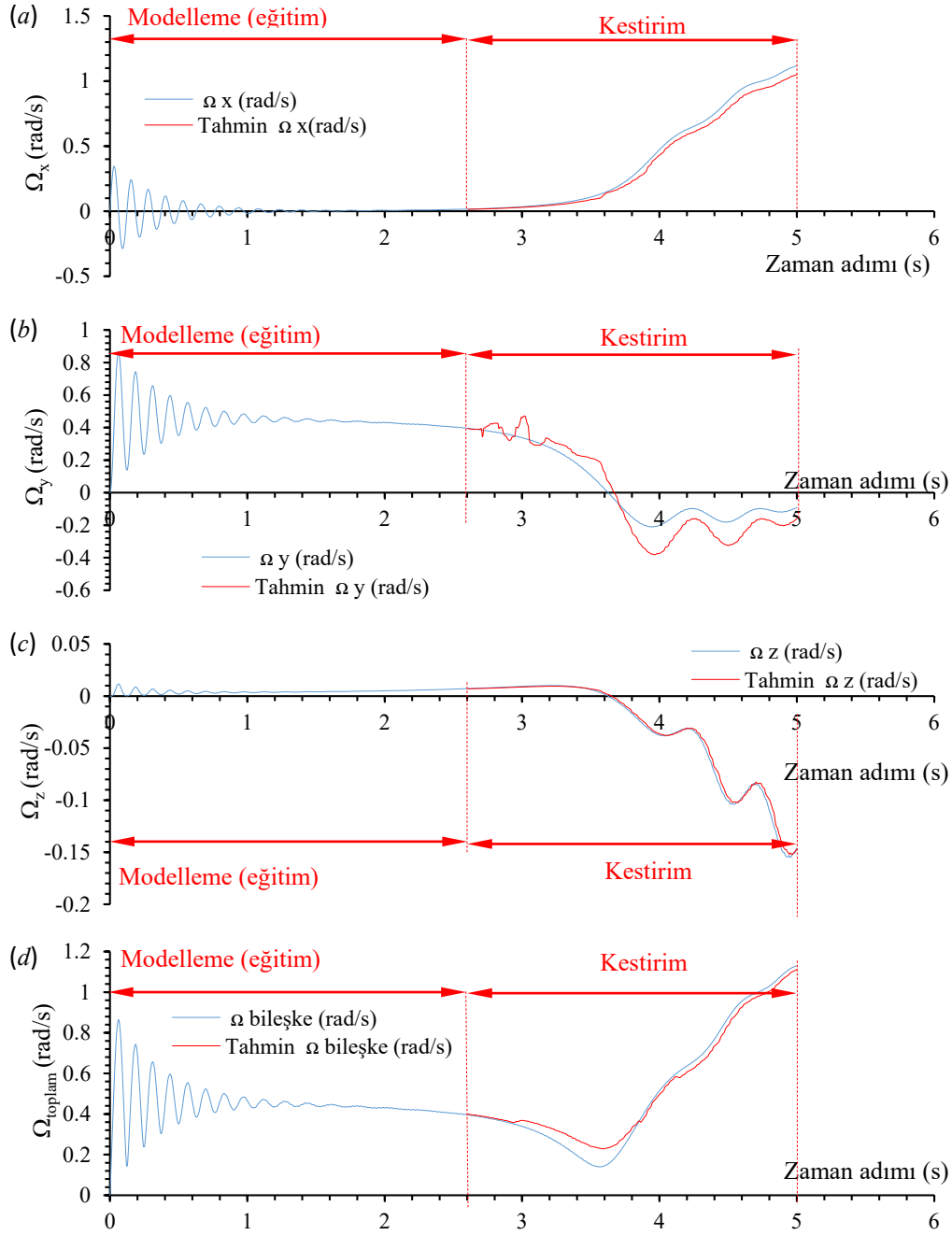
Ağ eğitimi iteratif bir biçimde gerçekleşmektedir. Her iterasyonun sonunda modelin hata değerinin azalmış olması beklenmektedir. İterasyonlara göre hata değişimini gösteren hata yakınsama grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Bütün eğriler sıfıra yaklaşmaya meyillidir. Gidişatta herhangi bir sapma yoktur. Bununla birlikte yalpalamanın z bileşenine ait tahmin modelinin diğerlerine göre en az hataya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Ağın eğitimi sırasında hata yakınsaması

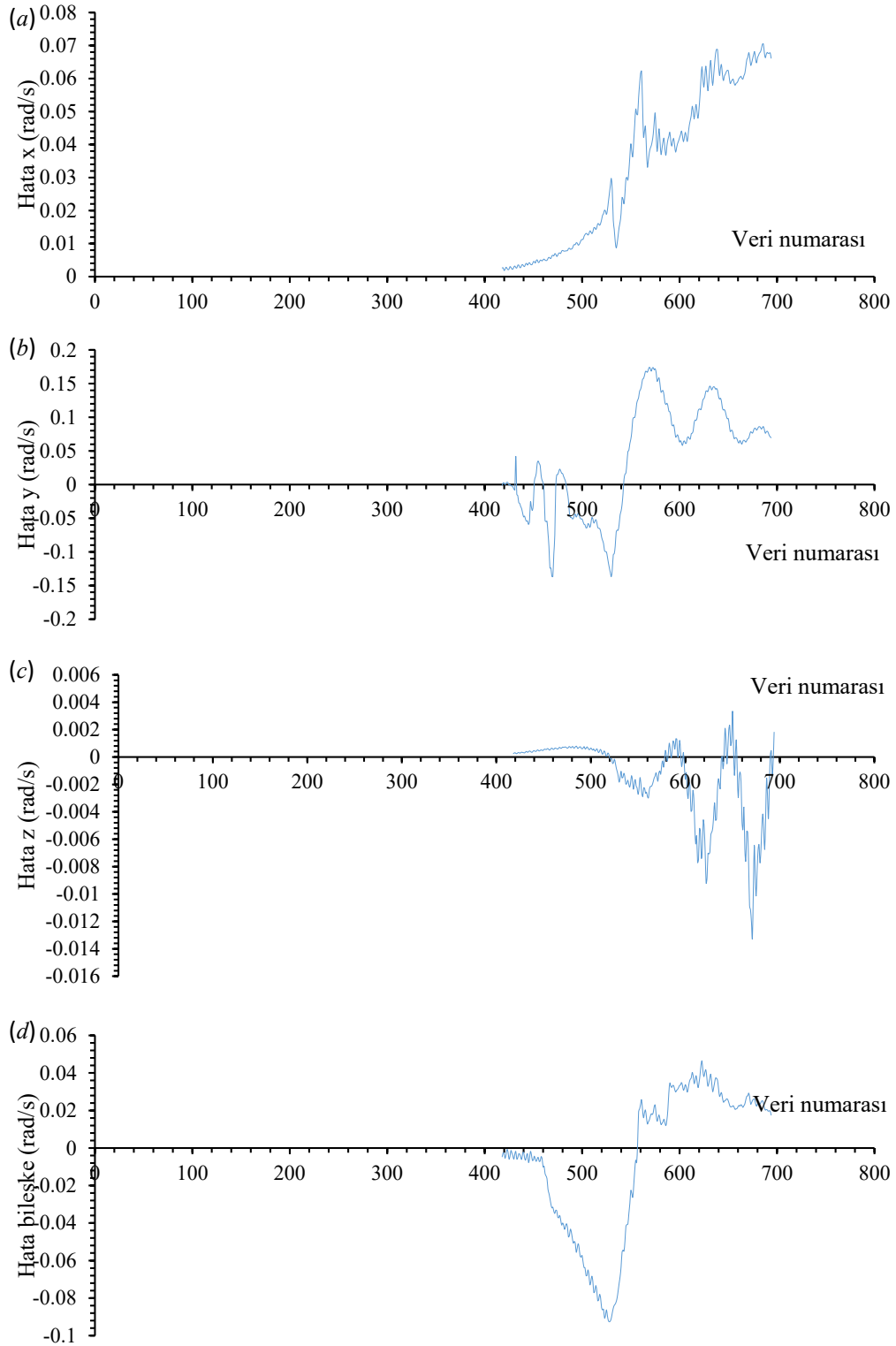
3.2. Kestirim eğrileri

İterasyonlar bittikten sonra elde edilen modellerinin verinin kestirim için kullanılan kısmı için kestirim eğrileri Şekil 5'te, kestirimdeki hata değerlerini içeren grafikler Şekil 6'da, varyans grafikleri Şekil 7'de ve modellerin lineer regresyon analizleri Şekil 8'de verilmiştir. Ağlar eğitim, test ve doğrulama sırasında kestirim verilerini bilmemekteydiler.



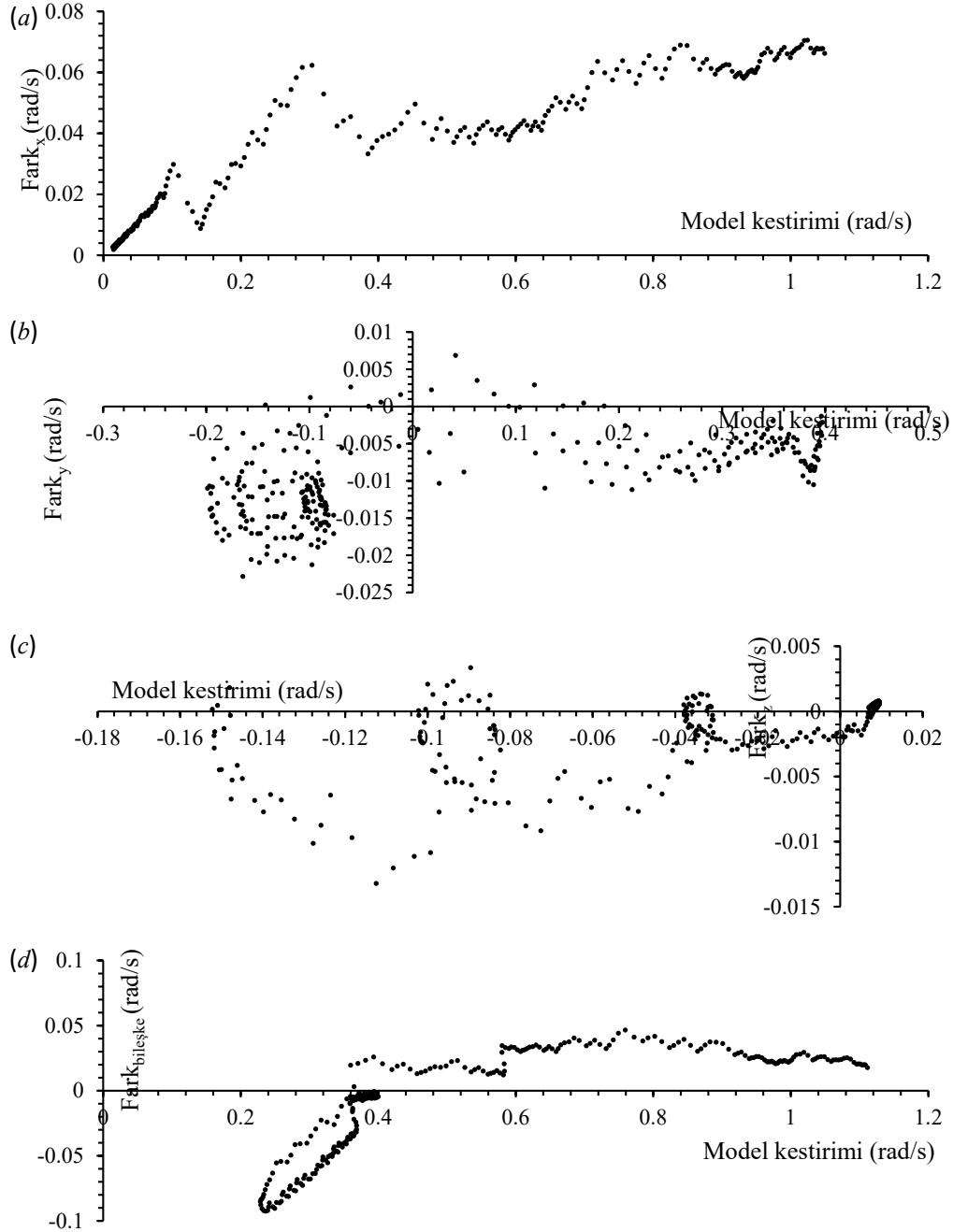
Şekil 5. Ağın (a) x doğrultusu, (b) y doğrultusu, (c) z doğrultusu etrafındaki ve (d) bileşke yalpalama hızına dair kestirimleri

Kestirim eğrileri incelendiğinde, ağların genel eğri, şekillerini temsiliyet yeteneklerinin yüksek olduğu, eğrilerdeki lokal tepe ve çukurlukları da temsil edebildiği görülmüştür. Tepe ve çukurlukları temsil etmede ağın Ω_z verisi üzerindeki başarısı daha yüksektir. Ancak ham veri ile model tahmini arasında bir gecikme mevcuttur. Ω_y verisine yönelik tahmin eğrisindeki salınımlar diğerlerine göre daha fazladır. Bunun nedeninin jiroskobun y eksenini etrafındaki dönme verisinin hem yalpalama hem de volan dönüşü nedeni ile olan dönmeleri bir arada içermesi, bu nedenle de veri üzerinde farklı etkilerin kestiriminde modelin başlangıçta salınım yaptığı düşünülmektedir. Zira zaman adımı ilerledikçe sapmaların azaldığı görülmektedir.



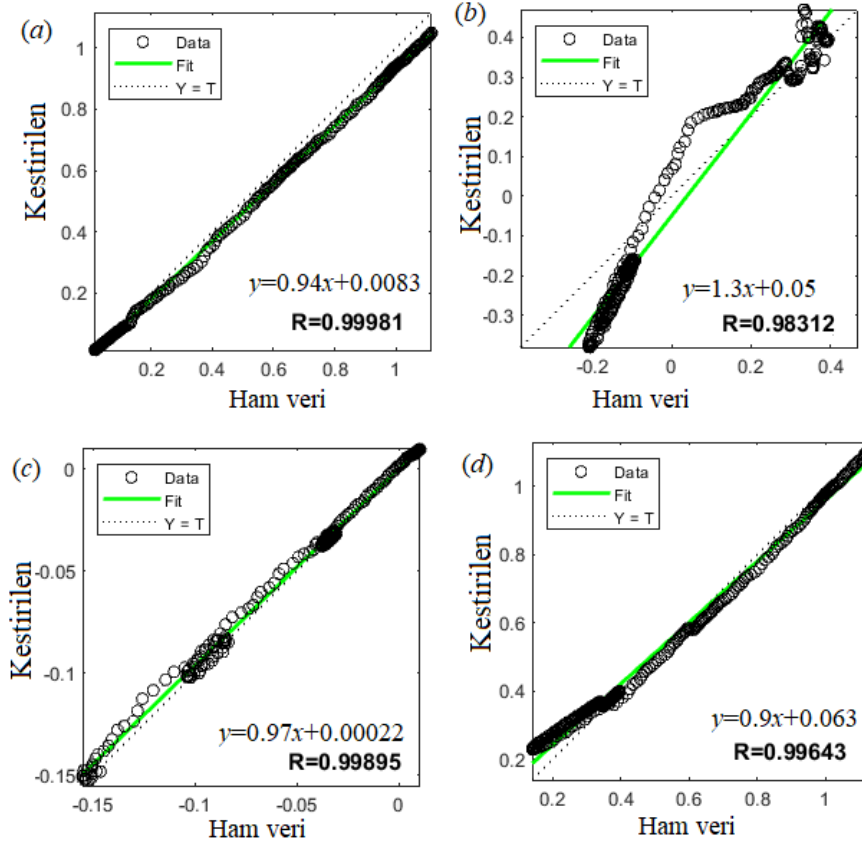
Şekil 6. Ağın kestirimi ile veri seti arasındaki fark (a) x doğrultusu, (b) y doğrultusu, (c) z doğrultusu etrafındaki ve (d) bileşke yalpalamadaki hata

Eğitilmiş modelin, kestirim verisi üzerindeki tahminleri ile kestirim ham verisi arasındaki farkı gösteren hata grafikleri incelendiğinde hatanın değişken olduğu, en az hatanın Ω_2 verisi üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7. Ağın kestirimindeki (a) x doğrultusu, (b) y doğrultusu, (c) z doğrultusu etrafındaki ve (d) bileşke yalpalamadaki varyans

Bir modelin sabit varyansa sahip olup olmadığını belirlemenin en yaygın yolu, model kestirime karşı fark (hata) grafiği oluşturmaktır. Modellemelerde temel varsayımlarından biri, farkların her seviyesinde sabit varyansa sahip olmasıdır. Fark dağılımı, kestirim değerlerinin her seviyesinde kabaca eşitse, sabit varyans varsayımı karşılanmış olacaktır. Aksi takdirde, farkın yayılması sistematik olarak artar veya azalır, bu varsayım büyük olasılıkla ihlal edilmiştir. Varyans dağılımları incelendiğinde başlangıçta sıfıra yakın olan fark dağılımı model kestirimi arttıkça, rasgele ve homojen olup sabit bir hâle ulaşmaktadır. Bu nedenle varyansın sabit olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 8. (a) x doğrultusu, (b) y doğrultusu, (c) z doğrultusu etrafındaki ve (d) bileşke yalpalama için ağız kestirimi ile veri seti arasındaki lineer regresyon analizi

Regresyon analizleri modellerin iyiliklerini belirleme araçlarından biridir. Regresyon bir eğri uydurma yöntemidir [12]. Bir ekseninde veri setindeki değerler diğer ekseninde de modelin tahmin ettiği değerler bulunmaktadır. Arzu edilen, idealde olması beklenen durum *Model tahmini=Ham veri* olmasıdır. Bu durumda $R = 1$ olacaktır ve tüm noktalar tam olarak aynı doğru üzerinde bulunacaktır. Şekillerden model kestirimleri ile ham veri arasındaki korelasyonlarının çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum modellerin temsiliyet yeteneğinin iyi olduğunun bir göstergesidir.

Çizelge 2. ANFIS ağız kestirim performans metrikleri

Metrikler	Ω_x	Ω_y	Ω_z	$\Omega_{bileşke}$
MAE (birim)*	0.054253	0.12298	0.00679	0.162059
MAPE (%)	0	31.10436	0	0
Ort. hata (birim)	0.007398	0.122684	-0.00479	-0.0889
MSE (birim ²)	0.005596	0.018588	0.000609	0.076139
RMSE (birim)	0.074804	0.136337	0.02467	0.275933
Hesaplama süresi (s)	5.216651	4.547085	4.218278	3.940082
R_{test}	0.99981	0.98312	0.99895	0.99643
R_{trn}	0.792613	0.809492	0.832657	0.811449
İterasyon adeti	100	100	100	100

(*) Birim, veri birimidir (rad/s).

Çizelge 2’de ise ağı kestirim performans metrikleri verilmiştir. R_{test} ve R_{trn} değerleri sırasıyla test ve eğitim esnasında modellerin korelasyon değerleridir. Hesaplama süresi en fazla 5.2 saniye olmaktadır. Elde edilen modelde en yüksek korelasyon 0.99981 ve en küçük RMSE ise 0.02467 rad/s olarak bulunmuştur. Model çıktıları ile veri seti arasında yüksek doğrusal bir ilişki bulunmuştur.

3.3. Tartışma

Mekanik jiroskoplarda yalpalama kestiriminde sıklıkla regresyon ve nadiren makine öğrenme yöntemlerinin kullanılmaktadır. Ancak regresyonların öncesinde veriye uygulanan ön işlemler verinin doğallığını bozmaktadır. Bu çalışmada ANFIS ile jiroskopik yalpalama hızı verisine bir ön işlem yapmaya gerek olmadan 0.99981 korelasyonla ve 0.02467 rad/s RMSE ile kestirim yapabilen bir model oluşturulmuştur. Model kestirimlerindeki varyans sabittir. Kestirim eğrileri incelendiğinde hem genel eğri hem de tepe-çukur şekilleri yüksek hassasiyetle kestirebilmiştir.

AR(4) modeli ile Akaike Information Criteria (AIC) kriterinin 1.5817, ARMA(4, 2) ile 0.9237, ANFIS ile 1.3568 ve MLP ile 1.4068 olduğu bildirilmiştir [2]. Yalpalama hızı tahmininde 0.01 derece/s’den ve mutlak hata 0.001°’den az olmuştur [4]. Shi ve ark. (2019) RMSE hatasını geriye yayılım (BP) algoritmasıyla 0.0135 °C, SVM yöntemiyle 0.0151°C ve LSTM yöntemiyle 0.0112 °C olarak bulmuştur [13]. Wang ve ark. (2022) yüksek hızda dönen hava ve uzay araçlarının tutum değişikliği parametrelerini kestirmek ve çözmek için BP, kapılı tekrarlayan birim (GRU), LSTM, BILSTM ağları kullanmışlardır. Simülasyon ve deney sonuçlarını kıyaslamak sureti ile BILSTM'nin kestirim doğruluğunun diğerlerine kıyasla daha iyi olduğunu göstermiştir [14].

4. Sonuçlar

Bu çalışmada bir mekanik jiroskopun dinamik analizi yapılarak elde edilen yalpalama verisinin ANFIS ağı ile modellenmesi sağlanmıştır. Model performansı araştırılmıştır. Çalışma sonunda elde edilmiş olan temel çıkarımlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Yalpalama hızının kestiriminde ANFIS ağı hem eğri genel şeklini hem de eğrilerdeki pik ve çukurları yüksek temsil yeteneğine sahiptir. Yöntem veri üzerine herhangi bir ön işlem yapılması gereksinimini ortadan kaldırmıştır.
- Giriş kümelemesi FCM, çıkış durulaştırması ise birinci mertbe Sugeno olan 11 gecikmeli bir ANFIS ağı oluşturulmuştur. Eğitim için hibrit algoritma kullanılmış, 100 adet iterasyon yapılmıştır.
- Jiroskopik yalpalama hızı verisine bir ön işlem yapmaya gerek olmadan 0.99981 korelasyonla ve 0.02467 rad/s RMSE ile kestirim yapabilen bir model oluşturulmuştur.

Teşekkür

Rijit dinamik simülasyonları için kullanılan Ansys®’in eğitsel amaçlı kullanım imkânını sağlayan Karadeniz Teknik Üniversitesi’ne, Dr. Mehmet Seyhan’a teşekkür ederim. Bu çalışmanın inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları değerli katkılardan dolayı editör, hakem ve emeği geçenlere içten teşekkür ederim.

Rekabetçi Menfaat Beyanı

Yazarlar rakip bir finansal çıkar beyan etmemektedir.

Finansman Kaynakları

Bu araştırma, kamu, ticari veya kâr amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından herhangi bir özel hibe almamıştır.

Kaynaklar

- [1] Yalçın C, Sabah L. CBS tabanlı bulanık mantık ve ahp yöntemleri kullanılarak adıyaman İlçelerinin deprem tehlike analizinin oluşturulması. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 5 (8): 101-113.
- [2] Nikkhah A, Heydari P, Khaloozadeh H, Heydari AP. Gyroscope random drift modeling, using neural networks, fuzzy neural and traditional time-series methods. Journal of Aerospace and Technology 2009; 6(1):37-44.
- [3] Wang X, Abtahi SM, Chahari M, Zhao T. An adaptive neuro-fuzzy model for attitude estimation and control of a 3 dof system. Mathematics 2022; 10 (6): 976. DOI: 10.3390/math10060976
- [4] Niu Z, Cui Y. Research on fuzzy control of control moment gyro driven by traveling wave hollow ultrasonic motor. 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP) 2017; 1-5.
- [5] Xudong Y, Pengfei Z, Yuanping X, Xingwu L. Forecasting method for axial ring laser gyroscope drifts in single-axis rotation inertial navigation system. High Power Laser and Particle Beams 2013; 25 (04): 847-852. <https://doi.org/10.3788/HPLPB20132504.0847>.
- [6] Kacar İ, Eroğlu MA, Yalçın MK, Design and development of an autonomous bicycle. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2021; 10 (1): 364-372. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.628580>.
- [7] Wikipedia®, Precession, Wikimedia Foundation, Inc.: <https://en.wikipedia.org/wiki/Precession> (11.08.2023).
- [8] Ansys®, Academic research mechanical products, 2021 r2 help system, Ansys mechanical user's guide. ANSYS, Inc. 2023; 18-48.
- [9] Clenois N., Gyroscope physics. Cleonis 2023; 1 (1):1.
- [10] Tabari H, Kisi Ö, Ezani A., Talae PH. SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment. Journal of Hydrology 2012; 444 (7): 78-89. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.007>.
- [11] Heris MK, Time-series prediction using ANFIS. The Yarpiz Project, Fuzzy Systems, 2015.
- [12] Kacar İ, Korkmaz C, Prediction of agricultural drying using multi-layer perceptron network, long short-term memory network and regression methods. Gümüşhane University Journal of Science and Technology Institute 2022; 12 (4): 1188-1206. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1110463>
- [13] Shi H, Hu S, Zhang J, LSTM based prediction algorithm and abnormal change detection for temperature in aerospace gyroscope shell. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics 2019; 12 (2):274-291. <https://doi.org/10.1108/IJICC-11-2018-0152>
- [14] Wang JW, Deng ZH, Shen K, Virtual gyros construction and evaluation method based on BILSTM. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2022; 71: 1007710. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3212544>.

BASİT YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA YAPIŞTIRICI HASAR KRİTERLERİNİN YÜKSEK DAYANIMLI EPOKSİ YAPIŞTIRICIDA İNCELENMESİ

İsmail SARAÇ^{*1}

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aksaray, 68100, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 22.06.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 15.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1318670

ÖZET

Yapıştırma bağlantıları, mekanik bağlantı tekniklerine alternatif oluşturabilecek, endüstrinin birçok alanında kullanımı gittikçe artan bir bağlantı yöntemidir. Yapıştırma bağlantılarının dayanımlarının tahmin edilmesine yönelik ilk çalışmalar, analitik olarak yapılmıştır. Sonra sayısal bir teknik olan sonlu elemanlar yönteminin yaygınlaşmaya başlamasıyla birlikte, yapıştırma bağlantılarının dayanım tahminleri geometri sınırlaması olmadan kapsamlı bir şekilde yapılmaya başlandı. Yapıştırma bağlantılarında hasar tahminleri yapılması amacıyla çok sayıda hasar kriteri literatürde bulunmaktadır. Bu kriterlerin kullanılabilmesi için kritik bölgedeki gerilme veya gerinme dağılımları analitik veya sayısal yöntemlerle hesaplandıktan sonra en uygun kriter belirlenerek hasar tahminleri yapılabilmektedir. Kriter seçiminde bağlantı geometrisi, kullanılan yapıştırıcının mekanik davranışı önemlidir. Ayrıca yapıştırıcı hasar kriterlerinin uygulanabilmesi için yapıştırıcı tabakasının, bağlantının genel mukavemeti içerisinde en zayıf kısım olması gerekmektedir. Bu çalışmada, epoksi yapıştırıcı ve çelik plaka kullanılarak oluşturulan basit yapıştırma bağlantısında, analitik modeller ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hasar yükleri elde edilmiştir. Analitik ve sayısal hasar yükleri daha önce yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen hasar yüküyle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Yapıştırma bağlantıları, epoksi yapıştırıcı, yapıştırıcı hasar analizi*

INVESTIGATION OF ADHESIVE FAILURE CRITERIA FOR HIGH STRENGTH AN EPOXY ADHESIVE IN SIMPLE ADHESIVE JOINTS

ABSTRACT

Adhesive joints are a fastening method that can be employed as an alternative to mechanical connection techniques and is increasingly used in many areas of the industry. The first studies on estimating the strength of adhesive joints were made analytically. Then, with the widespread use of the finite element method, which is a numerical way, the strength estimates of adhesive joints began to be made comprehensively without any geometry limitation. Numerous damage criteria are present in the literature for damage estimation of adhesive bonds. In order to use these criteria, after the stress or strain distributions in the critical region are calculated by analytical or numerical methods, damage estimates can be made by determining the most appropriate criterion. In the selection of criteria, the connection geometry and the mechanical behavior of the adhesive used are important. In addition, for the adhesive damage criteria to be applied, the adhesive layer must be the weakest part of the overall strength of the joint. In this study, failure loads were obtained using analytical models and finite element method for a simple bonding joint formed by using epoxy adhesive and steel plate. Analytical and numerical damage loads were compared with the damage load obtained as a result of the previous experimental study.

Keywords: *Adhesive joints, epoxy adhesive, adhesive failure analysis*

1. Giriş

Günlük hayatta veya teknik uygulamalarda kullandığımız nesnelere çoğunluğu birkaç parçanın birleştirilmesi sonucu meydana gelmektedir. Yıllar boyunca mekanik birleştirme teknikleri (cıvata,

* e-posta¹ : ismailsarac@aksaray.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8438-2744> (Sorumlu Yazar)

perçin, kaynak, lehim vb.) gelişmiş ve standartlaşmıştır. Bu tekniklerin kullanımı konusunda herhangi bir tereddüt yaşanmamaktadır, hasar tahminleri ile ilgili yöntemler açıktır. Yapıştırma tekniğinin, ilk çağlardan itibaren insanlar tarafından kullanılmasına rağmen mühendislik uygulamalarında kullanımının son yıllarda yaygınlaştığını söylemek mümkündür [1].

Tek tesirli bağlantı tipi, yapıştırma bağlantılarının analizlerinde ve deneysel çalışmalarda üretim kolaylığı avantajından dolayı en çok kullanılan bağlantı yöntemidir. Ancak yükün bağlantıya eksantrik olarak etki etmesi bir dezavantajdır. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bunlar; yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri, yapıştırılan malzemenin kalınlığı, bindirme uzunluğu, yapıştırıcı hattı kalınlığı, yüzey hazırlama yöntemi ve kürleşme prosesi olarak sıralanabilir [2-3].

Yapıştırma bağlantılarının, özellikle yüksek dayanımlı yapısal yapıştırıcıların üretilmesiyle endüstride kullanımı yaygınlaşmıştır. Yapıştırma bağlantıları, diğer mekanik bağlantı yöntemleriyle karşılaştırıldığında, önemli avantajlara sahiptir [4-5]. Ancak, yapıştırma bağlantılarında hasar tahminleri yapabilmek diğer bağlantı yöntemlerine göre kesin kurallara bağlı değildir. Tarihsel süreç içerisinde 1940'lerden itibaren günümüze kadar çok sayıda hasar tahmin yöntemleri araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Araştırmalar incelendiğinde, yapılan ilk çalışmalar, klasik analizler olarak da adlandırılan, Volkersen [6], Goland-Reissner [7] ve Hart-Smith [8], tarafından yapılan iki boyutlu, lineer analitik analizlerdir.

İlerleyen süreçte bu çalışmaları referans olarak çok sayıda elastik ve elasto-plastik analiz çalışmaları yapılmıştır. Ancak geliştirilen modeller daha genel hale geldikçe, çözülmesi gereken denklem sayısı ve karmaşıklığın artması sonucu bilgisayar kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Bilgisayarlarla birlikte, kapalı form fonksiyonların çözümü ve diferansiyel denklemlerin sayısal olarak çözümü olmak üzere iki tip çözüm yöntemi daha etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [9].

Da Silva [9], yapıştırma bağlantılarında analiz yöntemleri ile ilgili yaptığı geniş çaplı literatür araştırmasında analitik veya sayısal olarak çözüm üreten modelleri bir tablo halinde sunmuştur. Yapıştırma bağlantıları ile ilgili analitik çözümlerin büyük bir çoğunluğu iki boyutludur. Klasik analizlerde ve daha sonrasında yapılan lineer analizlerde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler elastik olarak kabul edilmektedir. Bu analiz yöntemleri kullanılarak, çok az plastik davranış gösteren gevrek/kırılgan yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantılarda yeterli derecede doğru sonuçlar elde edilebilmektedir.

Bazı epoksi yapıştırıcılarda olduğu gibi, plastik şekil değişim özelliği fazla olan yapıştırıcıların kullanıldığı durumlarda gerilme dağılımlarını doğru olarak hesaplayabilmek için, yapıştırıcının ve yapıştırılan malzemelerin plastisite özelliği mutlaka dikkate alınmalıdır. Analitik olarak çözüm istenildiğinde genellikle malzemelerin plastik davranışı dikkate alınmamaktadır. Çünkü, plastisitenin dikkate alınması matematik formülasyonu oldukça karmaşık hale getirmektedir. Dolayısıyla bu durumda çözümler ancak sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmektedir.

Literatürde yer alan iki boyutlu elasto-plastik analitik modellerin çoğunda, sadece yapıştırıcının plastik davranışı hesaplamalarda dikkate alınmıştır [10-13].

Ortalama kayma gerilme teorisi yapıştırma bağlantıları ile ilgili en basit teoridir. Bu teoriye göre yapıştırıcının sadece kayma etkisiyle deforme olduğu ve yapıştırılan plakaların rijit olduğu kabul edilmektedir. Kayma gerilmesinin yapıştırıcı hattı boyunca değişmediği kabul edilir. Yapıştırıcı tabakasındaki ortalama kayma gerilmesi, uygulanan yükün bindirme alanına bölünmesiyle hesaplanır. Bu analiz yöntemi özellikle yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesinin sabit kabul edilmesinden dolayı çok gerçekçi bir yöntem değildir. Ancak, ortalama bir yaklaşım sunduğu için, yapıştırıcı kayma dayanımı testlerinde ASTM ve ISO standartları tarafından kullanılmaktadır [9].

Yapıştırma bağlantıları ile literatürde yer alan ilk analitik model, Volkersen [6] tarafından geliştirilmiştir. Volkersen modelinde, tek etkili bindirme bağlantılarında eksantrik yükleme nedeniyle oluşan eğilme etkisi dikkate alınmamıştır. Bu yöntem kullanılarak yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilme dağılımı hesaplanabilmektedir [4].

Volkersen yönteminde, yapıştırıcının sadece kayma etkisiyle, yapıştırılan plakaların ise rijit olmadığı ve sadece çekme etkisiyle deforme olduğu varsayılmıştır. Bu teoriye göre kayma gerilmesi bindirme uçlarında maksimum, orta kısımda ise minimum değerler almaktadır. Volkersen teorisinin çift tesirli bindirme bağlantılarında kullanımı daha doğrudur. Çünkü çift etkili bağlantılarda eğilme etkisi tek etkili bağlantılara kıyasla ihmal edilebilir seviyededir [4]. Bu teorisinin, ortalama kayma gerilme teorisinden farkı, kayma gerilme dağılımının yapıştırıcı hattı boyunca değişken olmasıdır.

Goland ve Reissner [7], Volkersen teorisinden farklı olarak, geliştirdikleri anitilik modelde ilk defa plakaların dönme etkisini dikkate almışlardır. Tek tesirli bindirme bağlantılarında eksantrik yüklemeye dolaylı eğilme momenti ve yüklemeye doğrultusunda dik yönde, bindirme uç bölgelerinde transvers kuvvetler oluşmaktadır. Goland ve Reissner, dönme momenti etkisini dönme momenti faktörü (k) ile transvers kuvvet etkisini transvers kuvvet faktörü (k') ile hesaplamalarında dikkate almışlardır. Bu teoride, yapıştırılan plakaların büyük şekil değişimini özelliği (large deflection) dikkate alınmıştır.

Volkersen ve Goland-Reissner teorilerinin aksine Hart-Smith teorisinde, yapıştırıcının plastik davranışı dikkate alınmıştır [4]. Sünekliği fazla olan yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantılarda bu teori kullanılabilir. Bu teoride kayma gerilmeleri elastik ve plastik olarak hesaplanabilirken, soyulma gerilmeleri sadece elastik olarak hesaplanmaktadır. Hart-Smith teorisinde tek tesirli bindirme bağlantılarında çekme kuvveti etkisiyle oluşan plakaların büyük şekil değişimi dikkate alınmıştır.

Analitik modeller, yapıştırma bağlantılarında, gerilmeler hakkında fikir vermesine rağmen, sayısal yöntemlerin ve bilgisayar teknolojilerinin sürekli gelişiminin, bağlantılardaki gerilme ve gerinme analizleri için daha iyi bir araç sağladığı kanıtlanmıştır. Hem geometrik hem de fiziksel olarak belirli özelliklere sahip bağlantılar için analitik modeller geliştirilmiştir, ancak sayısal teknikler bu tür kısıtlamalara sahip değildir [1].

En bilinen ve kullanılan sayısal çözüm tekniği, herhangi bir bağlantı geometrisinin rahatlıkla modellenebileceği Sonlu Elemanlar Modelidir (SEM) [14-16].

Kapalı form analizine dayanan daha önceki çalışmaların temel sınırlamaları; soyulma ve kayma gerilmelerinin yapıştırıcı kalınlığı boyunca sabit kabul edilmesi ve yapıştırılan malzemelerin sadece çekme sırasında deforme olduğunun varsayılmasıdır. Sürekli ortam mekaniği yaklaşımının bir parçası olan kapalı form analizlerinin kullanımı, çok idealleştirilmiş bağlantılarla sınırlıdır ve yapıştırıcının doğrusal olmayan davranışını ihmal eder. Dolayısıyla sayısal yöntemlerin, özellikle SEM' in kullanılmasıyla yapıştırma bağlantılarının analizi daha kapsamlı bir şekilde yapılabilir [17].

Analitik yöntemlerdeki sınırlamalar göz önüne alındığında, SEM, Adams vd. tarafından yapılan öncü niteliğindeki çalışmaların ardından yapıştırma bağlantılarının araştırmak için en yaygın kullanılan analiz yöntemi haline geldi [14, 18-19].

Sonlu elemanlar yazılımlarında, geometrik ve malzeme doğrusalsızlıkları analizlere kolaylıkla adapte edilebilmeleri matematiksel iş yükünü oldukça azaltmaktadır.

Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı bölgesi dikkate alınarak yapılan hasar tahmini ile ilgili çok sayıda kriter bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; maksimum değer kriteri, belirli bir alandaki kritik gerilme ve gerinme kriteri, limit durum kriteri ve kırılma mekaniği yaklaşımlarıdır. Hangi kriterin hasar tahmininde en uygun olduğu ile ilgili kesin bir şey söylemek zordur. Kullanılan yapıştırıcı özelliği ve bağlantı geometrisi seçilecek olan kriteri etkilemektedir [17]. Bunun yanında, yapıştırıcı hasar kriterlerinin kullanılabilmesi için yapıştırıcı tabakasının bağlantının en zayıf bölgesi olması gerekmektedir. Yapıştırılan parçalar hasar almadan yapıştırıcı hasar görmelidir.

Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerinde basitliği nedeniyle en yaygın olarak kullanılan bağlantı geometrisi basit bindirmeli bağlantılardır. Bu tür bağlantılar kullanılarak yapıştırıcıların kayma ve soyulma özellikleri rahatlıkla analiz edilebilmektedir. Analitik yöntemler kullanılarak, bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımları hesaplanabilmektedir. Analitik yöntemlerin temel hasar tahmin yöntemi, yapıştırıcı bölgesindeki maksimum gerilme değerlerinin bulunması ve bu gerilmelerin yapıştırıcı mukavemetiyle karşılaştırılması şeklinde olmaktadır.

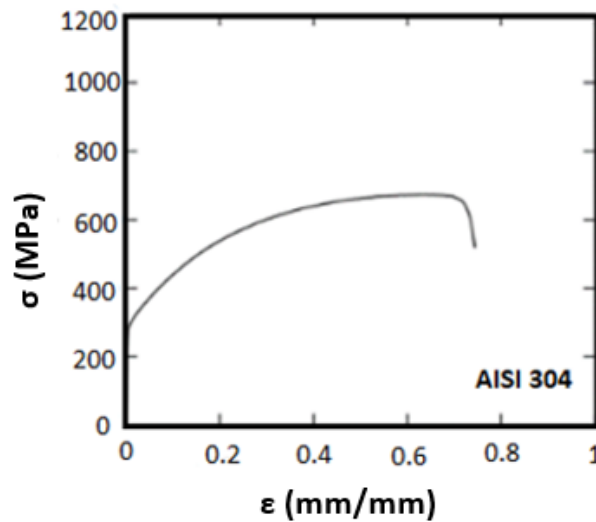
Teorik metotlar ilk aşamada, yapıştırma bağlantılarındaki genel gerilme dağılımı ve hasar eğilimi hakkında önemli bilgiler verse de, sadece basit geometrilere uygulanabilmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojisi, numerik çözümleri bütün mühendislik problemlerinde olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da vazgeçilmez hale getirmiştir. Özellikle sonlu elemanlar çözüm yöntemini kullanan yazılımların gelişimiyle birlikte yapıştırma bağlantıları daha etkin bir şekilde geometri sınırlaması olmadan analiz edilebilmektedir [17].

Literatürdeki çalışmalara genel olarak bakıldığında, analitik modellerin büyük bir çoğunluğu iki boyutludur. Bu modellerde düzlem gerilme veya düzlem şekil değiştirme yaklaşımları kullanılmıştır. Analizlerin büyük bir kısmında yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler elastik olarak modellenmiştir. Çünkü malzemelerin plastik davranışının dikkate alınması analizleri çok kompleks hale getirmekte ve çözümü zorlaştırmaktadır. Sonuç olarak, yapıştırıcının sünek veya gevrek olma durumu, eğilmenin etki derecesi, yapıştırılan malzemelerin mekanik davranışları gibi birçok faktör, çözümü dolayısıyla çözüm için kullanılacak yöntemi etkilemektedir.

Yapılan bu çalışmada, DP460 epoksi yapıştırıcı ve AISI 304 çelik plaka kullanılarak oluşturulan basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında analitik ve sayısal hasar yükleri hesaplanarak daha önce gerçekleştirilen bir çalışmadan [20] alınan deneysel hasar yükleriyle karşılaştırılmıştır. Analitik hasar yüklerinin belirlenmesinde Volkersen, Goland-Reissner, Hart-Smith analitik modelleri kullanılmıştır. Analitik hasar yükleri belirlenirken, maksimum kayma ve soyulma gerilmeleri hasar kriteri olarak alınmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde sürekli ortam mekaniği yaklaşımı kullanılmıştır. Sayısal çalışmada elasto-plastik malzeme modeli uygulanmıştır. Hasar yüklerinin belirlenmesinde yapıştırıcılarla ilgili literatürde bulunan, maksimum gerilme kriterleri, limit durum kriteri, Von Mises ve Drucker-Prager akma kriterleri kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, sünek karakterde olmayan yüksek dayanımlı epoksi yapıştırıcıların kullanıldığı basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, en uygun hasar yükü tahmin yöntemlerinin tespit edilmesidir.

2. Materyal ve Metod

Basit bindirme bağlantılarının modellenmesinde, yapıştırılan malzeme AISI 304 paslanmaz çelik, yapıştırıcı olarak çift bileşenli DP460 Epoksi kullanıldı. Her iki malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 1’de gösterilmiştir. AISI 304 paslanmaz çeliğe ait çekme uzama eğrisi Şekil 1’de, DP460 epoksiye ait çekme uzama ve kayma-uzama eğrileri Şekil 2’de gösterilmiştir [21-23].

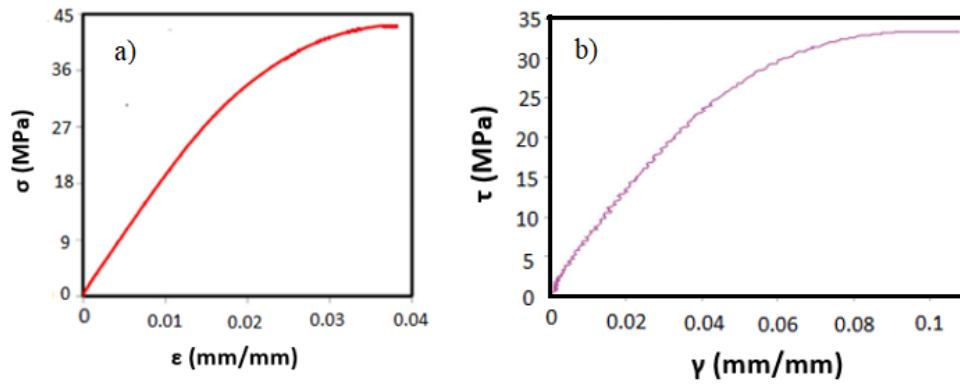


Şekil 1. AISI 304 çekme eğrisi

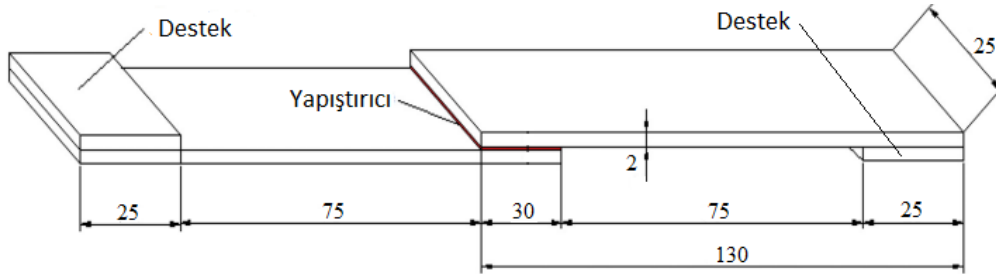
Çizelge 1. DP460 ve AISI 304 mekanik özellikleri

Özellikler	AISI 304	DP460
Çekme dayanımı, σ_c (MPa)	515-720	44.6 ± 1.2
Akma dayanımı, σ_a (MPa)	210	38.4 ± 1.1
Kayma dayanımı, τ (MPa)		33.35
Elastisite modülü, E (MPa)	190.000	1984 ± 43
Poisson oranı, ν	0.29	0.37
Maks. birim şekil değişimi, ϵ_{maks} (%)	≥ 50	4.7

Analitik, sayısal ve deneysel çalışmalarda kullanılan tek tesirli bağlantı geometrik boyutları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. DP460, çekme uzama (a) ve kayma uzama (b) eğrileri



Şekil 3. Basit bindirme bağlantı boyutları

2.1. Analitik metotlar

Yapılan bu çalışmada, analitik hasar yüklerinin belirlenmesinde, Volkersen [6], Goland-Reissner [7], ve Hart-Smith [8], modelleri tercih edilmiştir. Kullanılan analitik modeller Excel'de programlanmıştır. Formüllerdeki sabitler ve parametreler yazılan programa girilerek hasar yükleri elde edilmiştir. Aşağıda bu çalışmada kullanılan analitik modeller tanıtılmıştır.

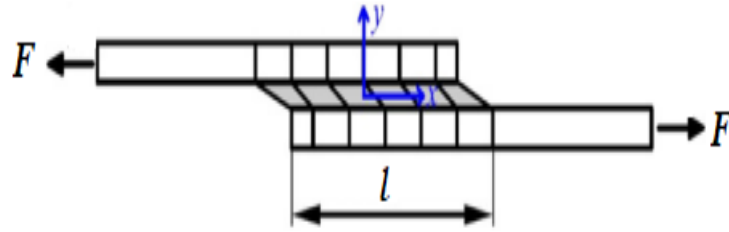
2.1.1. Volkersen modeli

Volkersen Modelinde, yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilme dağılımı Denklem (1) ile hesaplanmaktadır. Bindirme bölgesinin merkezindeki gerilme değerini hesaplamak için Denklem (1)'deki x değeri 0 olarak alınır, merkezden bindirme uçlarına doğru Denklem (1)'e x mesafesi girilerek gerilme dağılımları bindirme bölgesi merkezinden uç kısımlara doğru elde edilmektedir. Diğer analitik modellerde de aynı yöntemle gerilme dağılımları merkezden uç kısımlara doğru elde edilmektedir.

$$\tau(x) = \frac{F\omega \cosh(\omega x)}{2b \sinh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} + \left(\frac{t_t - t_b}{t_t + t_b}\right) \left(\frac{\omega l}{2}\right) \frac{\sinh(\omega x)}{\cosh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{G_a}{E t_t t_a} \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \quad (1.1)$$

Denklem (1) ve Denklem (1.1)'deki t_t üst plaka kalınlığı, t_b alt plaka kalınlığı, t_a yapıştırıcı kalınlığı, b plaka genişliği, l bindirme bölgesi uzunluğu, E yapıştırılan plaka elastisite modülü, G_a yapıştırıcı kayma modülü, F bağlantıya uygulanan yükü ifade etmektedir. Eksen takımı bindirme bölgesi ortasında yer almaktadır (Şekil 4)[4].



Şekil 4. Volkersen Modeli

2.1.2. Goland-Reissner modeli

Goland ve Reissner modelinde, Volkersen modelinden farklı olarak, bağlantıya uygulanan çekme kuvvetinin etkisiyle oluşan eğilme etkisi hesaplamaya dahil edilmiştir (Şekil 5). Eğilme etkisinin dahil edilmesiyle, özellikle tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı hattındaki soyulma gerilmesi dağılımının hesaplanması mümkün olmaktadır. Goland-Reissner teorisinde yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımı Denklem (2)'ye göre hesaplanmaktadır.

$$\tau(x) = -\frac{1}{8} \frac{\bar{F}}{c} \left[\frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\left(\frac{\beta c}{t}\right) \left(\frac{x}{c}\right)\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right] \quad (2)$$

$$k = \frac{\cosh(\Phi c)}{\cosh(\Phi c) + 2\sqrt{2} \sinh(\Phi c)} \quad (2.1)$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{F}}{tE}} \quad (2.2)$$

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (2.3)$$

Denklem (2)'de kullanılan; \bar{F} birim genişliğe uygulanan çekme yüküdür, c bindirme uzunluğunun yarısı, t yapıştırılan plaka kalınlığı, k eğilme momenti faktörü, ν poisson oranıdır.

Goland-Reissner teorisine göre soyulma gerilmesi dağılımı Denklem (3)'e göre hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \frac{1}{\Delta} \frac{\bar{F} t}{c^2} (A + B) \quad (3)$$

$$A = \left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cos \lambda \cosh(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (3.1)$$

$$B = \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sin \lambda \sinh(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \quad (3.2)$$

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1-\nu^2) \frac{\bar{F}}{tE}} \quad (3.3)$$

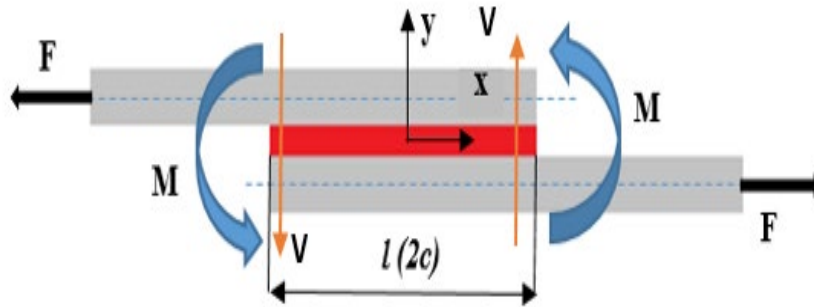
$$\lambda = \gamma \frac{c}{t} \quad (3.4)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a t}{E t_a} \quad (3.5)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (3.6)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (3.7)$$

$$R_2 = -\cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (3.8)$$

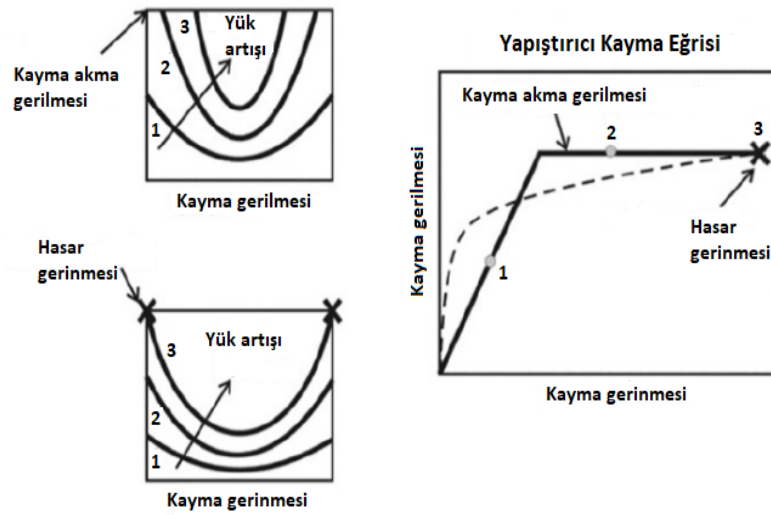


Şekil 5. Goland-Reissner Modeli

2.1.3. Hart-Smith teorisi

Hart-Smith analitik modelinde yapıştırıcı tabakasındaki soyulma ve kayma gerilme dağılımları hesaplanabilmektedir. Kayma gerilmeleri elastik ve elasto-plastik olarak, soyulma gerilmeleri ise sadece elastik olarak hesaplanmaktadır. Bu modelde de Goland-Reissner modelinde olduğu gibi tek tesirli bindirme bağlantılarında oluşan eğilme etkisi hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

Hart-Smith modelinde yapıştırıcının plastik deformasyon özelliği dikkate alınmıştır. Plastik deformasyon özelliği dikkate alındığında gerilme temelli hasar kriteri yerine gerinme temelli hasar kriteri kullanılmaktadır [1,4]. Hart-Smith modelinde kullanılan yapıştırıcının elastik-mükemmel plastik davranışı Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da gösterildiği gibi, bağlantıya uygulanan yükün artmasıyla birlikte 3 farklı durum ortaya çıkmaktadır. 1. durumda yapıştırıcı elastik bölgededir, 2. durumda yapıştırıcının akma limitine ulaşılmış ve yapıştırıcı akmaya başlamıştır. 3. durumda, yapıştırıcı maksimum gerinme değerine ulaştığında hasara uğramıştır.



Şekil 6. Hart-Smith Modeli yapıştırıcı plastik davranışı

Hart-Smith Modeline göre Denklem (4) kullanılarak yapıştırıcı hattındaki kayma gerilme dağılımı elastik olarak hesaplanabilmektedir.

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (4)$$

$$\lambda' = \sqrt{\left[\frac{1 + 3(1 - \nu^2)}{4} \right] \frac{2G_a}{t_a E t}} \quad (4.1)$$

$$A_2 = \frac{G_a}{t_a E t} \left[\bar{F} + \frac{6(1 - \nu^2)M}{t} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda'c)} \quad (4.2)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[\bar{F} - \frac{A_2}{\lambda'} \sinh(2\lambda'c) \right] \quad (4.3)$$

$$M = \bar{F} \left(\frac{t + t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + \left(\frac{\xi^2 c^2}{6} \right)} \quad (4.4)$$

$$\xi^2 = \frac{\bar{F}}{D} \quad (4.5)$$

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (4.6)$$

\bar{F} , G_a , t_a , E , E_a , ν , t , c değişkenleri Volkersen ve Goland-Reissner Teorisinde verilen değişkenler ile aynıdır. Hart-Smith Teorisine göre yapıştırıcı tabakasındaki soyulma gerilme dağılımı Denklem (5) ile hesaplanır.

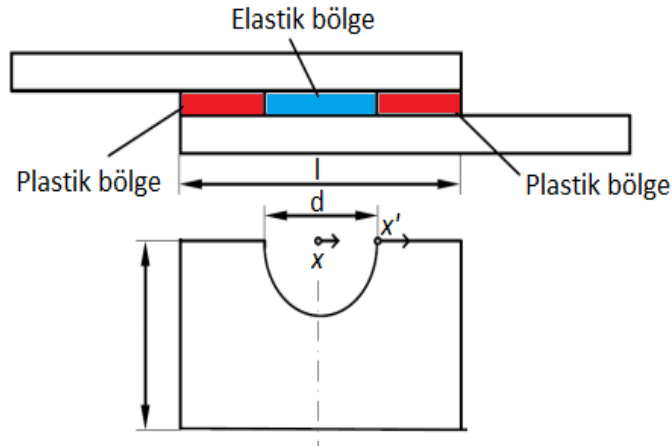
$$\sigma(x) = A \cosh(\chi x) \cos(\chi x) + B \sinh(\chi x) \sin(\chi x) \quad (5)$$

$$B = \frac{E_a M [\sin(\chi c) + \cos(\chi c)]}{D t_a \chi^2 e^{\chi c}} \quad (5.1)$$

$$A = \frac{-E_a M [\sin(\chi c) - \cos(\chi c)]}{D t_a \chi^2 e^{\chi c}} \quad (5.2)$$

$$\chi^4 = \frac{E_a}{2Dt_a} \quad (5.3)$$

Hart-Smith modelinde kayma gerilmeleri, yapıştırıcının elastik-plastik davranışı dikkate alınarak Denklem (6)'ya göre hesaplanabilmektedir. Bu yaklaşıma göre yapıştırıcı tabakası 3 bölgeye ayrılır, orta kısım elastik bölge kenar kısımlar ise plastik bölge olarak tanımlanır (Şekil 7).



Şekil 7. Hart-Smith Modeli yapıştırıcı tabakasındaki bölgeler

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + \tau_p(1 - K) \quad (6)$$

Plastik bölgedeki kayma gerilmesi Denklem (6.1)'e göre hesaplanır.

$$\tau(x) = A_2 \cosh(2\lambda'x) + \tau_p(1 - K) \quad (6.1)$$

τ_p , yapıştırıcının plastik kayma gerilmesidir.

$$A_2 = \frac{K\tau_p}{\cosh(\lambda'd)} \quad (6.2)$$

K ve d, Denklem (6.3), (6.4) ve (6.5) kullanılarak iterativ yaklaşımla elde edilir.

$$\frac{\bar{F}}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + (1-K)(\lambda'd) + K \tanh(\lambda'd) \quad (6.3)$$

$$\left[1 + 3k(1 - \nu^2) \left(1 + \frac{t_a}{t} \right) \right] \frac{\bar{F}}{\tau_p} \lambda^2 \left(\frac{l-d}{2} \right) = 2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e} \right) + K \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) \right]^2 \quad (6.4)$$

$$2 \left(\frac{\gamma_p}{\gamma_e} \right) = K \left\{ \left[2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + \tanh(\lambda'd) \right]^2 - \tanh^2(\lambda'd) \right\} \quad (6.5)$$

γ_e ve γ_p elastik ve plastik kayma gerilmeleridir.

2.2. Sonlu elemanlar çalışması

Analitik metotların çoğunda, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mükemmel elastik kabulüne göre çözümler yapılmaktadır. Analitik yöntemlerde malzeme ve geometrik doğrusalsızlıkları dikkate almak problemi oldukça kompleks hale getirmekte ve çözümü zorlaştırmaktadır. Sonlu Elemanlar çalışması, ANSYS [24] yazılımı kullanılarak malzeme ve geometrik doğrusalsızlık durumları dikkate alınarak yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan numune ölçülerine göre bağlantı 2 boyutlu olarak modellenmiştir ve çözümde düzlem gerilme yaklaşımı kullanılmıştır. Sınır şartları ve ağ yapısının oluşturulmasından sonra, bağlantıya çekme kuvveti uygulanmıştır. Hasar yüklerini hesaplamak için tercih edilen kriterlere göre kritik bölge olan yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımları dikkate alınmıştır (Şekil 8). Sonlu elemanlar çalışmalarında, ağ yapısı sonuçları etkilemektedir. Ağ yapısındaki eleman sayısının artması, çözüm sürelerini uzatmaktadır. Eleman sayısının düşük olduğu durumda ise çözüm süreleri kısaltmakta ancak elde edilen sonuçlar yüksek oranlarda hatalı olabilmektedir. Dolayısıyla ideal ağ yapısını tespit edebilmek için yapılan çalışma sonucunda eleman boyutu 0.6 mm olarak belirlendi.

Sonlu elemanlar çalışmalarında ağ yapısı ve geometrik faktörlerden kaynaklı olarak gerilme tekilliğine mutlaka dikkate alınması gereken bir konudur. Yapıştırma bağlantılarında, bu gerilme tekilliği etkisini minimize etmenin en yaygın yolu, yapıştırıcı tabakasının orta hattındaki gerilme dağılımının referans alınmasıdır. Bu yöntem literatürde merkez hattı yöntemi (Centerline Method) olarak yer almaktadır [25]. Bu çalışmada da yapıştırıcı tabakasındaki merkez hattı yöntemi benimsenmiştir.

Sonlu elemanlar çalışmalarında, malzeme hasarını değerlendirmenin en yaygın yöntemi sürekli ortam mekaniği yaklaşımıdır. Sürekli ortam mekaniği yaklaşımında, yapılan analiz sonucunda elde edilen gerilme veya gerinme dağılımları, seçilen hasar kriterine göre değerlendirilerek hasar durumu belirlenir. Sürekli ortam mekaniği yaklaşımının kullanımı için az sayıda parametre gerektirmesi ve uygulamadaki basitliği bu yöntemin avantajıdır. Ancak yapıdaki herhangi bir noktada kritik değerlere ulaşılması durumunda hasar oluşacağı kabul edilmesi bir sınırlamadır.

Son yıllarda kırılma mekaniği temelli koheziv bölge modeli yaklaşımı, tanımlandığı bölgede yapıştırıcı ayrılmasını karakterize edebilmektedir. Ancak, bu modelin kullanılabilmesi için çok sayıda parametrenin deneysel olarak belirlenmesine ihtiyaç vardır. Ayrıca deneysel gözlemler arasındaki uyumsuzluklarda başka bir problemdir. Dolayısıyla koheziv bölge modeli yaklaşımı, ilaveten çok sayıda doğrulama testleri yapılacağı düşünüldüğünde iş yükü oldukça fazla olan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [26-29].



Şekil 8. SEM çözümlerinde gerilmelerin alındığı hat

2.3. Hasar kriterleri

Yapıştırma bağlantılarıyla ilgili literatürde çok sayıda hasar kriteri bulunmaktadır. Bu kriterler temelde iki ana başlık altında kategorize edilebilir. Bunlardan birincisi, yapıştırılan malzeme ile ilgili özellikle kompozit malzemelerin hasarı ile ilgili kriterler, ikincisi ise yapıştırıcı hasarı ile ilgili kriterler. Bu çalışmada, yapıştırılan malzeme çelik olarak seçildiğinden, yapıştırıcı bölgesinde meydana gelen hasara odaklanılmıştır. Yapıştırıcı ile ilgili literatürde maksimum değer, belirli bir bölgedeki kritik gerilme veya kritik gerinme, limit durum, kırılma mekaniği ve hasar mekaniği hasar kriterleri yer almaktadır [4, 5, 17].

2.3.1. Maksimum değer kriteri

Yapısal yapıştırıcılar için en fazla kullanılan hasar kriteridir. Bu kritere göre, yapıştırıcı tabakasında hesaplanan maksimum gerilme veya gerinme değerleri yapıştırıcının kritik dayanım değerlerinin üzerinde olması halinde hasar beklenmektedir. Analitik yöntemlerin gelişimine paralel olarak bu hasar kriteri ve tasarım yöntemleri gelişim gösterdi. Örneğin, Volkersen modelinde yapıştırıcının sadece kayma gerilmesi ile deforme olacağı varsayıldığından, bunun sonucu olarak maksimum kayma gerilmesi kriteri hasar kriteri olarak ortaya çıktı.

Maksimum soyulma gerilmesi Hart-Smith tarafından hasar kriteri olarak kabul edildi [8]. Soyulma gerilmelerinin yapıştırıcılar için yıkıcı etkisinden dolayı, tasarım aşamalarında en aza indirilmelidir. Harris ve Adams [30]; Maksimum asal çekme gerilmesi ve gerinim kriterlerini kullanarak tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mukavemetini elastoplastik sonlu eleman analizi kullanılarak yaklaşık %10 doğrulukla tahmin etmiştir.

Crocombe vd. [31], maksimum asal gerilme kriterinin kırılma ve tokluğu iyi olmayan yapıştırıcılar için daha uygun olduğunu belirtmiştir. Ikegami vd. [32], maksimum von Mises gerilme kriterini eğik yüzeyli yapıştırma bağlantılarında hasar kriteri olarak kullanmışlardır. Charalambides vd. [33], çift bindirmeli yapıştırma bağlantılarda maksimum von Mises gerilme kriterini etkisiz bulmuşlardır. Polimerlerin deformasyon davranışını önemli ölçüde etkileyen hidrostatik gerimeyi dikkate almadığı için von Mises kriterinin, polimerlerin analizinde kullanılması doğru bir yaklaşım olmadığı belirtilmiştir [4,17]. Maksimum kayma gerilmesi kriteri Lee ve Lee [34], tarafından silindirik yapıştırma bağlantılarında kullanılmıştır. Crocombe ve Adams [35], tek eksenli plastik gerinme kriterini soyulma test numunelerinde kullanmışlardır.

Tanımlanan tüm maksimum gerilme veya gerinme kriterleri için sorun, gerilme veya gerinme değerlerinin tekilliklerden kaynaklı maksimum değerler almasından kaynaklanır. Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırma bölgelerinin uç kısımlarında her zaman tekillik durumuyla karşılaşmaktadır. Tekillikleri en aza indirebilmek için sayısal çözümlerde ağ yapısını iyileştirmeye yönelik çalışmalar mutlaka yapılmalıdır. Literatür incelendiğinde özellikle tek tesirli yapıştırma bağlantı modellerinde bindirme uçlarındaki tekillikleri azaltmaya yönelik çok sayısal çalışmayla karşılaşmaktadır [36-38].

2.3.2. Von Mises ve Drucker-Prager akma kriterleri

Von Mises ve Drucker-Prager akma kriterleri polimerlerin ve yapıştırıcıların akma dayanımlarını tanımlamak için literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Von Mises kriteri gerilme tansöründeki sapma gerilmeleri (deviatoric stress) esas alınarak geliştirilmiştir. Von Mises kriterinde hidrostatik gerilmeler ihmal edilmiştir, dolayısıyla akma olayı hidrostatik gerilmelerden bağımsız olarak değerlendirilir. Başlangıçta metal malzemeler ve alaşımları için geliştirilmiştir.

Drucker-Prager akma kriteri, toprak, kaya, beton gibi malzemelerin akma davranışlarını incelemek için geliştirilmiştir. Polimer ve yapıştırıcılar için kullanımı uygundur. Drucker-Prager kriterinde gerilmenin hidrostatik bileşenin akmaya etkisi dikkate alınmıştır.

Von Mises kriterine göre, eşdeğer gerilme, asal gerilmeler ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) kullanılarak aşağıdaki Denklem (7)'ye göre hesaplanır.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]\}/2} \quad (7)$$

Von Mises kriteri, yapıştırma bağlantılarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, yapıştırıcılar için tamamen doğrulandığını söylemek güçtür. Von Mises kriteri, düşük tokluk değerine sahip yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli bindirme bağlantılarında deneysel sonuçlarla

uyum göstermiştir. Ancak yüksek tokluk değerine sahip epoksi yapıştırıcıların kullanıldığı, tek tesirli, eğik ve T tipi bağlantılarda deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilmemiştir.

Çok sayıda araştırmacı tok yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantılarda Denklem (8)'de gösterilen Drucker-Prager akma kriterini kullanmışlardır [39].

$$\sigma_{DP} = (\sqrt{3}\sigma_s) - \mu\sigma_m \quad (8)$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (8.1)$$

$$\mu = 3 \left(\frac{\sqrt{3}\sigma_s}{\sigma_t} - 1 \right) = 3 \left(1 - \frac{\sqrt{3}\sigma_s}{\sigma_c} \right) = 3 \frac{\left[\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right) - 1 \right]}{\left[\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right) + 1 \right]} \quad (8.2)$$

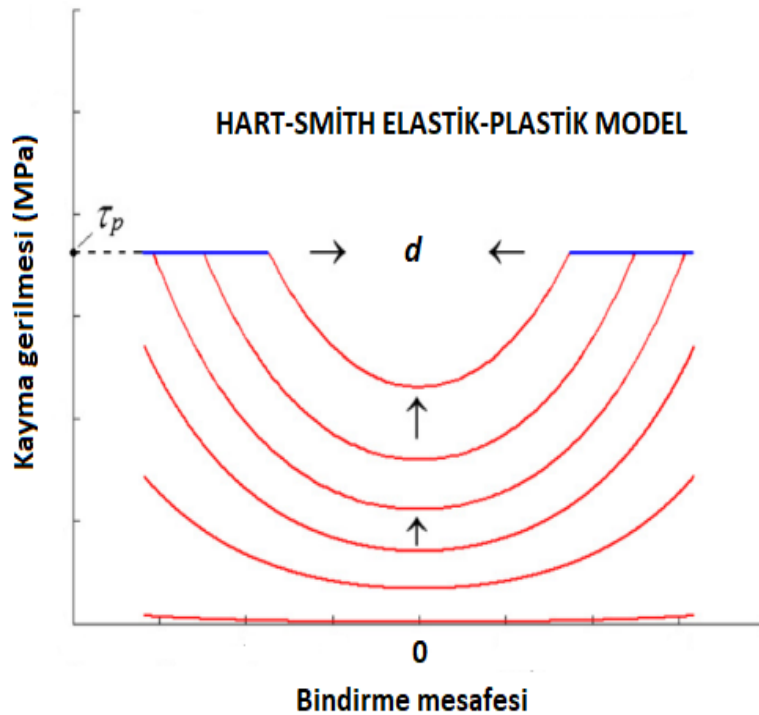
Denklem (8.1) ve (8.2)'deki σ_m hidrostatik gerilme ve μ hidrostatik gerilme oranı değerleri, asal gerilmeler ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), çekme durumunda akma gerilmesi (σ_t), basma durumunda akma gerilmesi (σ_c), kayma durumunda akma gerilmesi (σ_s), değerleri kullanılarak hesaplanır.

Literatürde Drucker-Prager kriterinin, Von Mises kriterine göre deneysel sonuçlarla daha iyi uyum sağladığı belirtilmiştir [39].

2.3.3.Limit durum kriteri

Bu kriter ilk defa Crombe tarafından tanıtılmıştır. Temel yaklaşımı, global akma olarak adlandırılan, yapıştırıcıya etki eden yükün belirli bir değerden sonra önemli bir artış göstermeyeceği ve yapıştırıcının kritik bir uzamaya kadar plastik olarak akacağı prensibine dayanır [15].

Bu kriter sınırlı oranda yapıştırma bağlantılarına uygulanabilir. Çünkü yapısal yapıştırıcıların büyük bir çoğunluğu, yeterli süneklilikte olmadığı için akma dayanımı aşılmca kopma meydana gelmektedir.



Şekil 9. Hart-Smith modelinde yapıştırıcının akması

Hart-Smith modelinde yapıştırıcı tabakası, ortada elastik bölge ve kenarlarda plastik bölgeler olmak üzere 3 kısma ayrılır. Uygulanan yük arttıkça plastik bölgede artar (Şekil 9). Kırmızı çizgiler gerilme dağılımındaki elastik bölgeyi, mavi çizgi ise yükün artmasıyla yapıştırıcının akma dayanımına ulaşıldığında plastikleşme prosesini göstermektedir. Düşük yük değerlerinden yapıştırıcının akma sınırına yaklaştıkça elastik bölge azalmakta plastik bölge artmaktadır. Yapıştırıcı bölgesi, uygulanan yük artışı ile birlikte tamamen plastik olduğunda ($d=0$), bağlantı maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşır. Bu durum literatürde, global akma (global yielding) olarak adlandırılır ve yapıştırıcının tamamen aktığı kabul edilir. Sonuç olarak global akma durumuna ulaşıldığı anda hasar meydana gelecektir. Bu hasar kriterinin, belirli bir yükten sonra, yük artışı olmadan şekil değiştiren sünek karakterli yapıştırıcıların kullanıldığı yapıştırma bağlantılarında kullanımı uygundur. Yapısal epoksi yapıştırıcıların çoğu sünek olmadığından hasar tahmininde Limit durum kriterinin kullanımı uygun değildir.

Hart-Smith, tarafından önerilen elastik-plastik modellerle ilgili formülasyon oldukça kompleks ve çözümü tekrarlamalı (iterative) yaklaşımı gerektirmektedir. Ancak, bazı basitleştirmeler yapılarak hasar yükünü bulmak mümkündür. Denklem (6.3) tekrar yazılsın;

$$\frac{\bar{F}}{l\tau_p}(\lambda'l) = 2\lambda' \left(\frac{l-d}{2} \right) + (1-K)(\lambda'd) + K \tanh(\lambda'd) \quad (6.3)$$

Global akma kriterine göre $d=0$ yazılırsa Denklem (8) elde edilir.

$$\bar{F} = \frac{F}{b} = l\tau_p \quad (8)$$

Denklem (8)'e göre hasar yükü sadece yapıştırıcının akma mukavemetine (τ_p), bindirme uzunluğuna (l) ve bağlantı genişliğine (b) bağlıdır. Buna göre Denklem (8.1) kullanılarak hasar yükü hesaplanabilir.

$$F_{HASAR} = bl\tau_p \quad (8.1)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Volkersen, Goland-Reissner ve Hart-Smith analitik metodları ve sonlu elemanlar çözümü kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantılarında hasar yükleri hesaplanmıştır. Çizelge 2'de her yöntem için kullanılan hasar kriteri gösterilmiştir. Çizelge 2'de yer alan τ_y , yapıştırıcının kayma dayanımı, σ_y , yapıştırıcının çekme dayanımı değerleridir.

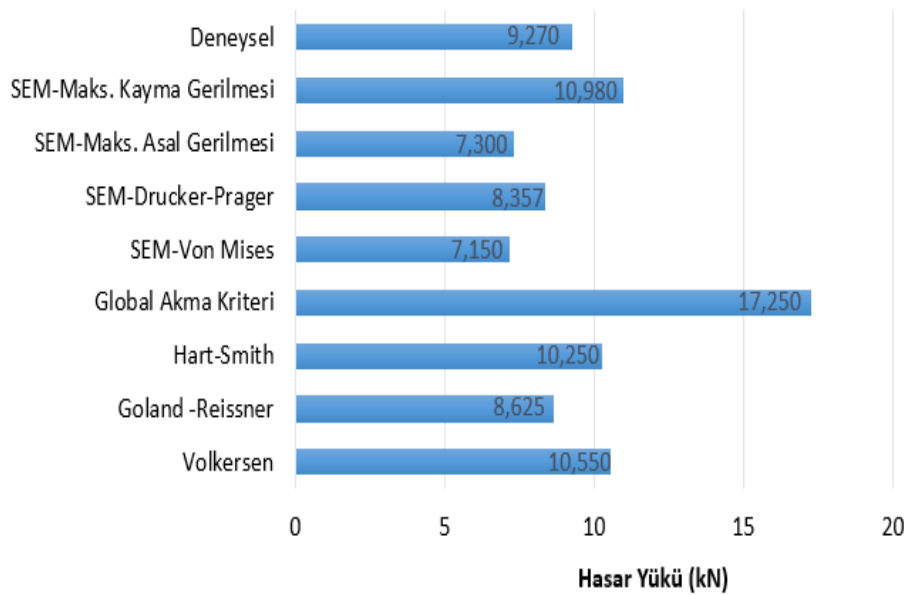
Çizelge 2'de gösterilen hasar kriterleri kullanılarak hesaplanan hasar yükleri ve hata oranları Çizelge 3'te gösterilmiştir. Şekil 10'da daha önce yapılmış deneysel çalışmadan alınan edilen hasar yükünün analitik ve sayısal hasar yükleriyle karşılaştırılması gösterilmiştir. Volkersen modeline göre hasar yükü hesaplanmasında Denklem (1) kullanılmıştır. Goland-Reissner modeline göre hasar yüklerinin hesaplanmasında Denklem (3) kullanılmıştır. Hart-Smith modelinde, hasar yüklerinin hesaplanmasında Denklem (5) kullanılmıştır. Global akma kriterine göre hasar yükü hesaplanmasında Denklem (8.1) kullanılmıştır.

Çizelge 2. Kullanılan çözüm yöntemleri ve hasar kriterleri

Çözüm Yöntemi	Analiz Tipi	Hasar Kriteri
Volkersen	Elastik	Maksimum kayma gerilmesi, $\tau_{maks} > \tau_y$
Goland-Reissner	Elastik	Maksimum soyulma gerilmesi, $\sigma_{maks} > \sigma_y$
Hart-Smith	Elastik	Maksimum soyulma gerilmesi, $\sigma_{maks} > \sigma_y$
Hart-Smith	Elastik-Plastik	Global Akma Kriteri, $F_{HASAR} = bl\tau_{akma}$
Sonlu Elemanlar-2D	Elastik-Plastik	Maksimum asal gerilme, $\sigma_{maks.asal} > \sigma_y$
Sonlu Elemanlar-2D	Elastik-Plastik	Von-mises eş değer gerilme, $\sigma_{maks.vm} > \sigma_y$
Sonlu Elemanlar-2D	Elastik-Plastik	Drucker-Prager eş değer gerilme, $\sigma_{maks.DP} > \sigma_y$
Sonlu Elemanlar-2D	Elastik-Plastik	Maksimum kayma gerilmesi, $\tau_{maks} > \tau_y$

Çizelge 3. Hasar yükleri ve sapma oranları

Çözüm Yöntemi	Hasar Yükü (kN)	Hata Oranı (%)
Volkersen (Elastik/ Maks. Kayma Gerilmesi)	10.550	+13.8
Goland -Reissner (Elastik / Maks. Soyulma Gerilmesi)	8.625	-7
Hart-Smith (Elastik / Maks. Soyulma)	10.250	+10.6
Global Akma Kriteri	17.250	+86.1
Sonlu Elemanlar(Elastik-Plastik / Von Mises)	7.150	-22.9
Sonlu Elemanlar(Elastik-Plastik / Drucker-Prager)	8.357	-9.8
Sonlu Elemanlar(Elastik-Plastik / Maks. Asal Gerilmesi)	7.300	-21.3
Sonlu Elemanlar (Elastik-Plastik/ Maks. Kayma Gerilmesi)	10.980	+18.4



Şekil 9. Hasar yüklerinin karşılaştırması

İki boyutlu sonlu elemanlar analizinde hasar yüklerinin hesaplanmasında, yapıştırıcı tabakasındaki maksimum kayma gerilmesi, maksimum soyulma gerilmesi, maksimum von Mises gerilmesi, maksimum Drucker-Prager eşdeğer gerilmesi ve maksimum asal gerilme değerleri kullanılarak hasar yükleri hesaplanmıştır. Hasar yükleri hata oranları Denklem (9)'a göre hesaplanmıştır.

$$\% Hata = \frac{Hesaplanan\ Y\ddot{u}k - Deneysel\ Y\ddot{u}k}{Deneysel\ Y\ddot{u}k} \times 100 \quad (9)$$

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak hasar yükleri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önceki bir çalışmadan alınan deneysel hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

Genel olarak, deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü, yaklaşık - %7 lik bir sapma değeriyle, Goland Reissner yöntemi kullanılarak elde edilen hasar yükü olmuştur.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapılan çözümlerde deneysel sonuçlara en yakın hasar yükü - % 9.8 sapma değeriyle Drucker-Prager akma kriterine göre bulunan hasar yükü çıkmıştır.

Drucker-Prager akma kriterine göre yapılan çözümlemenin (-% 9.8 sapma), von Mises akma kriterine göre yapılan çözümlemeye (-%22.9) göre deneysel sonuçlara daha uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Analitik yöntemler kullanılarak yapılan çözümlerin sapma oranları sayısal yöntemlerle yapılan çözümlemelere göre daha düşük çıkmıştır (Goland-Reissner zm hariç).

Bu çalışmada kullanılan DP460 epoksi yapıştırıcı gibi sünek karakterde olmayan yapıştırıcıların kullanıldığı basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında, hasar yükleri hesaplanmasında elastik çözüm yönteminin kullanıldığı analitik modellerin kullanılması durumunda elde edilen hasar yüklerinde çok yüksek oranlarda sapmalar görülmemiştir (Maksimum sapma + %13.8). Bu durumda sünek karakterde olmayan yapıştırıcıların kullanıldığı basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında analitik modellerin kullanılması ilk tasarım çalışmaları için pratik ve uygun bir yöntemdir.

Global akma kriterinin DP460 gibi sünek karakterde olmayan bir yapıştırıcı için (deneysel sonuçlardan, +% 86.1'lik yüksek bir sapma oranıyla) uygun bir hasar tahmin yöntemi olmadığı gösterilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Snchez-Arce IJ, Ramalho LDC, Campilho RDSG, Belinha J. Evaluation of an elastic meshless formulation to adhesive joints' strength prediction against established methods. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2020; 34: 1206-1232.
- [2] Adams RD, Wake WD. *Structural adhesive joints in engineering*. Elsevier Applied Science Publishers, England, 1984.
- [3] Da Silva LF, Dillard DA, Blackman B, Adams RD. *Testing adhesive joints: best practices*. John Wiley & Sons, 2012.
- [4] Rodríguez RQ, De Paiva WP, Sollero P, Rodrigues PMRB, De Albuquerque EL. Failure criteria for adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2012; 37: 26-36.
- [5] Rodríguez RQ, Sollero P, Rodrigues MB, De Albuquerque EL. Stress analysis and failure criteria of adhesive bonded single lap joints. In 21st international congress of mechanical engineering, pp. 24-28, Natal, RN, Brazil 2011.
- [6] Volkersen O. Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung* 1938, 15: 41-47.
- [7] Goland M, Reissner E. The Stresses in Cemented Joints. *J. Appl. Mech.* 1944; 11: A17-A27.
- [8] Hart-Smith LJ. Adhesive-bonded single-lap joints, NASA CR-11223 Technical report, 1973.

- [9] Da Silva LF, Lima RF, Teixeira RM, Puga A. Closed-form solutions for adhesively bonded joints. Reports of the project "Development of the software for the design of adhesive joints" University of Porto, Portugal, 2008.
- [10] Raghava R, Caddell RM, Yeh GS. The macroscopic yield behaviour of polymers. *Journal of Materials Science* 1973; 8: 225-232.
- [11] Bigwood DA, Crocombe AD. Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints. *International journal of Adhesion and Adhesives* 1989; 9: 229-242.
- [12] Adams RD, Mallick V. The effect of temperature on the strength of adhesively-bonded composite-aluminium joints. *The Journal of Adhesion* 1993, 43: 17-33.
- [13] Mortensen F, Thomsen OT. Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach. *Composites Science and Technology* 2022; 62: 1011-1031.
- [14] Adams RD, Peppiatt NA. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *Journal of strain analysis* 1974; 9: 185-196.
- [15] Crocombe AD. Global yielding as a failure criterion for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 1989; 9: 145-153.
- [16] Roberts TM. Shear and normal stresses in adhesive joints. *Journal of Engineering Mechanics* 1989; 115: 2460-2479.
- [17] Odi RA, Friend CM. An improved 2D model for bonded composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2004; 24: 389-405.
- [18] Adams RD, Harris JA. The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 1987; 7: 69-80.
- [19] Adams RD, Atkins RW, Harris JA, Kinloch AJ. Stress analysis and failure properties of carbon-fibre-reinforced-plastic/steel double-lap joints. *The Journal of Adhesion* 1986; 20: 29-53.
- [20] Saraç İ, Adin A, Temiz Ş. Investigation of the effect of use of Nano-Al₂O₃, Nano-TiO₂ and Nano-SiO₂ powders on strength of single lap joints bonded with epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering* 2019; 166: 472-482.
- [21] Akpınar S. The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers. *Composites Part B: Engineering* 2014; 67: 170-178.
- [22] Kim MS, Kim HT, Choi YH, Kim JH, Kim SK, Lee JMA. New Computational Method for Predicting Ductile Failure of 304L Stainless Steel. *Metals* 2022; 12:1309.
- [23] Aydın MD, Akpınar S, Özel A, Erdoğan S. Kayma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarından yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, *Mühendis ve Makina* 2015; 56: 48-55.
- [24] ANSYS. The general purpose finite element software swanson analysis systems, Houston, Texas, 2022.
- [25] Yue T, Wahab MA. Finite element analysis of stress singularity in partial slip and gross sliding regimes in fretting wear. *Wear* 2014; 321: 53-63.
- [26] Noorman DC. Cohesive zone modelling in adhesively bonded joints: Analysis on crack propagation in adhesives and adherends. Master's thesis, Delft University of Technology, 2014
- [27] Mohammed Waseem HS, Kiran Kumar N. Finite element modeling for delamination analysis of double cantilever beam specimen. *International Journal of Mechanical Engineering* 2014; 1: 27-34.
- [28] Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, da Silva LFM, de Jesus AMP. Strength prediction of single - and double - lap joints by standard and extended finite element modelling. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2011, 31: 363-372.
- [29] Fiamegkou E. Development of improved, multi-functional, nano-structured polymer based adhesives with applications in the bonding of composite components and the repair of engineering structures with composite patches. PhD thesis, University of Patras, 2015.
- [30] Harris J, Adams RD. Strength prediction of bonded single lap joints by nonlinear finite element methods. *International journal of adhesion and adhesives* 1984; 4: 65-78. 1984.
- [31] Crocombe AD, Bigwood DA, Richardson G. Analysing structural adhesive joints for failure. *International journal of adhesion and adhesive* 1990; 10: 167-178. 1990.
- [32] Ikegami K, Takeshita T, Matsuo K, Sugibayashi T. Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre reinforced plastics and metals. *International journal of adhesion and adhesive* 1990; 103: 199-206.

- [33] Charalambides M, Kinloch A, Matthews F. Strength prediction of bonded joints. In: Proceedings of AGARD conference on bolted/bonded joints in polymeric composites, London, 1997.
- [34] Lee SJ, Lee DG. Development of a failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint. *The Journal of Adhesion* 1992; 40: 1-14.
- [35] Crocombe AD, Adams RD. An elasto-plastic investigation of the peel test. *The Journal of Adhesion* 1982; 13: 241-267.
- [36] Calik A. Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively single lap joint. *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva* 2016; 36: 29-34.
- [37] Saraç İ. Çekme yükü uygulanmış boru yapıştırma bağlantılarında bindirme uç geometrisinin bağlantı dayanımına etkisinin araştırılması, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2020; 8:733-744.
- [38] Saraç İ. Basit bindirmeli yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesi uç açısı değişiminin bağlantı mukavemetine etkisinin sayısal olarak incelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2020; 25: 101-110.
- [39] Mohapatra PC, Smith LV. Characterization of adhesive yield criteria using mixed-mode loading. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2019, 33: 1248-1260.

KUANTUM PROGRAMLAMA AÇISINDAN KUANTUM DERLEYİCİLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE IBMQ UYGULAMASI

Mehmet KARAKÖSE¹, Hasan YETİŞ^{2*}, Osman Furkan KÜÇÜK³, Çağatay Umur ÖGDÜ⁴, Orhan YAMAN⁵

^{1,2,3,4} Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

⁵ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü, Elazığ, 23119, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 31.07.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 17.11.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1334196

ÖZET

Kuantum hesaplama, geleneksel bilgisayarların yapamayacağı kadar karmaşık hesaplamaları çok daha hızlı ve daha verimli gerçekleştirmeye olanak tanıyan bir teknolojidir. Ancak kuantum bilgisayarların çalıştırılması için özel olarak tasarlanmış kuantum algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu algoritmaların kuantum bilgisayarlarda verimli bir şekilde çalıştırabilmek için uygun derleyici ve kuantum bilgisayar seçimi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada kuantum programlama ve derleyicileri hakkında bilgiler verilerek, literatürdeki kuantum derleyicilerin karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Örnek bir soyut kuantum devre 5 kübitlik `ibmq_belem`, `ibmq_quito` ve `ibmq_manila` kuantum bilgisayarlarında çalıştırılarak, kuantum devrelerin çalışma mantığı uygulamalı olarak açıklanmıştır. Yapılan analizler sonucunda L tipi kübit bağlantısına sahip `ibmq_manila` bilgisayarının ortalama %86 ile daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan T tipi kübit bağlantılarına sahip `ibmq_quito` ve `ibmq_belem` bilgisayarlarının ürettikleri sonuçların başarısı ortalama %82 ve %48 ile sınırlı kalmaktadır. Aynı kübit bağlantısına sahip bu bilgisayarların başarımları arasındaki gözle görülür farkın sebebi kübit ve bağlantılardaki hata oranlarının olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uygulamalı kuantum hesaplama, Kuantum bilgisayarlar, Kuantum derleyiciler, IBMQ.

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTUM COMPILERS IN TERMS OF QUANTUM PROGRAMMING AND IBMQ IMPLEMENTATION

ABSTRACT

Quantum computing is a technology that allows performing complex calculations much faster and more efficiently than conventional computers. However, specifically designed quantum algorithms are needed to run quantum computers. Appropriate compiler and quantum computer selection is critical in order to run these algorithms efficiently on quantum computers. In this study, information about quantum programming and compilers is given and the quantum compilers in the literature are compared. An example quantum circuit is run on 5 qubit `ibmq_belem`, `ibmq_quito` and `ibmq_manila` quantum computers, and the working logic of quantum circuits is explained practically. As a result of the analysis, it is observed that the `ibmq_manila` computer with L-type qubit connection produced more successful results with an average of 86%. On the other hand, the success of the results produced by `ibmq_quito` and `ibmq_belem` computers with T-type qubit connections is limited to 82% and 48% on average. It has been concluded that the reason for the noticeable difference between the performances of these computers with the same qubit connection is the error rates in the qubits and connections.

Keywords: Applied quantum computing, Quantum computers, Quantum compilers, IBMQ.

e-posta¹ : mkarakose@firat.edu.tr

e-posta² : h.yetis@firat.edu.tr

e-posta³ : osmanfurkankucuk2003@gmail.com

e-posta⁴ : cagatayogdu@gmail.com

e-posta⁵ : orhanyaman@firat.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-3788>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7608-3293> (Sorumlu Yazar)

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-5594-3009>

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-1697-4392>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9623-2284>

1. Giriş

Kuantum mekaniğini kullanarak bir fiziksel hesaplamanın nasıl yapılacağı üzerinde fikirler kuran bilim insanları, çeşitli girişimlerde bulunarak kuantum bilgisayar düşüncesini geliştirmişlerdir. 1980 ve 1990'lı yıllarda Richard Feynman ve Paul Benioff yapmış oldukları çalışmalar ile kuantum bilgisayarların temelini literatüre kazandırmışlardır ve kuantum bilgisayarlar günümüzde de gelişimine devam etmektedir [1–3]. Henüz pratikte kullanımı kısıtlı olan bu teknoloji, yakın gelecekte siber güvenlik, malzeme, ilaç, bankacılık, finans sektörlerinde ve ileri imalat teknolojilerinde ciddi katkı sağlayacağı öngörülmektedir [4].

Klasik bilgisayarlardan farklı olarak klasik bitler yerine kuantum bitleri (kübit) kullanır. Bu kübitler herhangi bir foton, elektron, iyon veya atom çekirdeklerinin uygun koşullarda muhafaza edilmesi ile oluşturulabilir. Kuantum bitlerinin kendine has özellikleri sayesinde problem çözümlerinde çok yüksek bir hız kazanılmıştır. Öyle ki 53 kübite sahip, Google Yapay Zekâ Topluluğu tarafından geliştirilen Sycamore kuantum işlemcisinin, klasik süper bilgisayarın 10.000 yılda yapabileceği hesaplanan işlemi yaklaşık 200 saniyede tamamlayacağı gösterilmiştir [5]. Yapılan çalışmalarda, kombinatoriyal optimizasyon problemlerinde, doğrusal cebir temelli problemlerde, diferansiyel denklem problemlerinde, faktörizasyon sürecinde klasik bilgisayarlara nazaran üstün performans sergilediği de bilinmektedir [6]. Üstelik bir süper bilgisayar olan Tianhe-2 çalışması esnasında 17.6 MW güç tüketirken Sycamore 26 kW güç tüketmekte ve hesaplamayı saniyeler içinde tamamlamaktadır.

Kuantumun üstünlüğü kendini göstermiş olsa da ne yazık ki günümüz kuantum bilgisayarları gürültülü sonuçlar ürettiğinden bu üstünlüğü tam kapasite ile kullanamamaktayız. Gürültü kuantum bilgisayarların özelliğinden kaynaklanan bir durumdur. Bir kuantum hesaplamanın yapılabilmesi için kübitlerin birbirleriyle kuvvetli bir bağ içinde olması ve dışarıdan son derece izole halde tutulmaları gerekir. Kuantum bitler yalnızca diğer kübitlerle dolanık hale gelmez, manyetik ve elektriksel gürültüler nedeniyle sistem, yani çevre ile de dolanık hale gelebilmekte ve etkilenebilmektedir. Bu etkiye kuantum uyumsuzluğu (*quantum decoherence*) denir [7]. Günümüzde kuantum bilgisayarlar mutlak 0 sıcaklığına yakın değerlerde ve herhangi manyetik etkiden uzak tutulmaktadır. Sadece ölçüm yapılacağı zaman ise sisteme dışarıdan etki edilir. Bulduğumuz noktada çağımız Gürültülü Orta Ölçekli Kuantum (NISQ) çağı olarak adlandırılmaktadır [8]. Yapılan ölçümün hata oranının düşük sayılabilmesi için çeşitli donanım sınırlamaları getirilir. Örneğin bir kuantum işlemcide kübitler sınırlı bağlantılarla 2 boyutlu bir harita üzerinde düzenlenir ve yalnızca bitişik komşusu olan kübitler ile etkileşime girmesine izin verilir. Bu yüzden NISQ çağında kuantum devrenin en iyi şekilde optimizasyonunu sağlayacak uygun kuantum derleyicinin seçimi önemlidir [9].

Bu makalede kuantum programlama temellerine, kuantum derleyicinin görevlerine, çalışma mekanizmalarına, mevcut olan kuantum derleyicilerin karşılaştırmalarına yer verilerek IBMQ composer ortamında yarım toplayıcı devre uygulaması gerçekleştirilmektedir. Farklı kübit bağlantılarına sahip IBMQ bilgisayarların üretmiş oldukları sonuçlar analiz edilmiştir.

1.1. Motivasyon

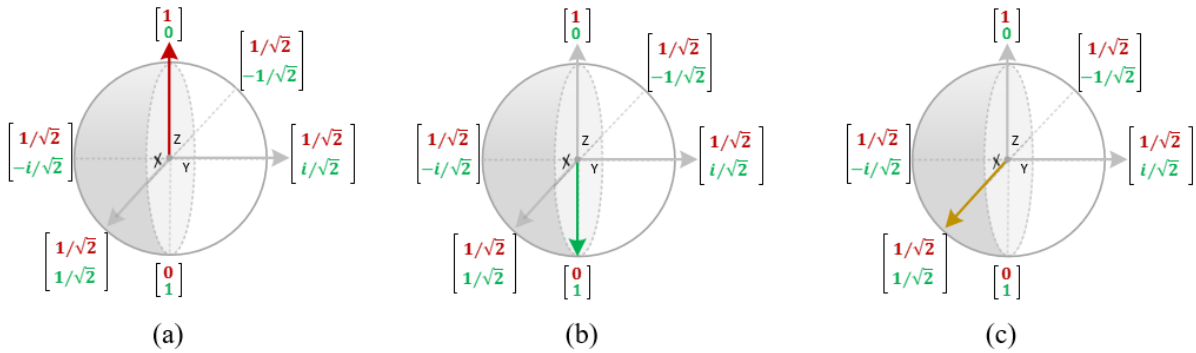
Kuantum hesaplama ve kuantum bilgisayarlar yüksek işlem gücü ve düşük güç tüketimleri ile büyük potansiyel arz etmektedir. NISQ çağında değerlendirilen günümüz kuantum bilgisayarlarında, kuantum devrelerin çalıştırılması sırasında gürültü meydana gelmektedir. Gürültülerin en aza indirgenmesi için kuantum derleyiciler ve uygun kuantum bilgisayar seçimi önemli bir konudur. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışma için temel motivasyon kaynaklarımız aşağıda verilmiştir:

- Literatürde kuantum derleyiciler ve uygun kuantum bilgisayarların seçilmesi ile ilgili yapılan çalışmaların yetersizliği ve özellikle Türkçe kaynakların eksikliği. Uygulamalı kuantum hesaplama alanında çalışmak isteyen araştırmacılar için kaynak teşkil edilmesi.

- Kuantum donanımların sahip oldukları kubit/bağlantı hata değerlerinin ve derleyiciler aracılığıyla elde edilen dönüştürülmüş devrelerin kuantum algoritmaların çalıştırılması üzerindeki etkilerinin incelenmesi.
- NISQ dönemindeki kuantum bilgisayarlarda gürültülerin en aza indirgenmesi gerekliliği ve gürültüleri azaltmak için uygun derleyici/donanım seçiminin öneminin vurgulanması

2. Kuantum Bilgisayarlarda Programlama

Kuantum programlama belirli bir sonuç elde etmek amacıyla kuantum donanımında çalışabilir bir dizi işlemin oluşturulması için kodun tasarlanması ve oluşturulmasıdır [10]. Kuantum programlamada kubit kavramları kullanılmaktadır. Kubitler 0-1 arasında sonsuz değerde bulunabilirler [11]. Kubitlerin aynı anda 1 ve 0 değerlerini alabilme ilkesine süperpozisyon ilkesi denir. Kubit durumlarının daha iyi anlaşılabilmesi adına görsel olarak Bloch küreleri ile temsil edilir [12]. Bloch küresi örneği Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1.a, 1.b ve 1.c sırası ile $|0\rangle, |1\rangle$ ve $|+\rangle$ durumlarını göstermektedir.



Şekil 1. Bloch küresi üzerinde kubit durumları. a) $|0\rangle$, b) $|1\rangle$, c) $|+\rangle$ [13].

Bir kuantum bilgisayarda programın/algoritmanın çalıştırılması istenildiğinde genel olarak dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır [14]:

- I. Kullanıcı programı hangi kapı setiyle ifade edebilir.
- II. Gerçekte hangi fiziksel kapılar kullanılmaktadır.
- III. Kubit bağlantıları nelerdir.
- IV. Gürültü kaynakları nelerdir.

Kullanıcının kullandığı kapı seti ile donanımın sunduğu kapı seti farklılık gösterebilir. Uyumsuzluğu gidermek için kapı işlemleri daha farklı alt işlemlere ayrılması gerekebilir, bu da algoritmanın uzamasına sebep olabilir. Aynı şekilde kuantum donanımı yazılan algoritmanın gerektirdiği fiziksel kubit bağlantılarını sağlamayabilir. Son maddede değinilen gürültü kaynağı, kullanılan kapıların tam olarak kuantum bilgisayarın kullandığı kapı setine eşlenememesinden kaynaklanır. Doğru eşlenememe durumu kubitlerin dolanıklığını bozar ve algoritmanın performansını önemli ölçüde azaltır [15].

Mevcut durumda kuantum programlama için Cirq, Forest, Ocean, ProjectQ, Qiskit, IBM-Q, PyZX, Pytket gibi kütüphaneler; OpenQL [16] gibi yük seviyeli framework'ler, IBM Quantum gibi bulut tabanlı donanım erişimi sağlayıcıları bulunmaktadır [17]. Ayrıca diğer kütüphanelerin aksine Quantum Development Kit (QDK), kendi dili olan Q# ile kullanıcılara kuantum programlama imkân sunar. Çizelge 1'de temel bir Bell Durumu'nu oluşturmak için Python dilinde Cirq Kütüphanesi kullanılarak yazılmış kod verilmiştir [18].

Çizelge 1. Cirq kütüphanesi kullanılarak Python ortamında yazılmış Bell durumu kodları.

1	import cirq
2	from qiskit.visualization import plot_histogram
3	# Devreyi ve kubitleri çağırma
4	qreg = [cirq.LineQubit(x) for x in range(2)]
5	circ = cirq.Circuit()
6	# Devreyi bell durumuna hazırlama
7	circ.append([cirq.H(qreg[0])])
8	cirq.CNOT(qreg[0], qreg[1])])
9	print(circ) #devreyi çizme
10	circ.append(cirq.measure(*qreg, key="z")) # Ölçüm ekleme
11	# Devreyi simüle etme
12	sim = cirq.Simulator()
13	res = sim.run(circ, repetitions=100)
14	# Çıktıları yazdırma
15	print("Olcumler:")
16	print(res.histogram(key="z"))

Bell durumu 2 kubitin birbiri ile maksimum korelasyon ve bağlantı içerdiği halidir. Yani kubitlerin dolanık hale gelmesidir [19]. İki den fazla kubitin dolanık hale gelmesi için farklı durumlar bulunsa da Bell durumu yalnızca 2 dolanık kubitin ölçümlerinin eş olduğunu gösterir [18]. Şekil 2’de verilen programın çıktılarına bakıldığında, 100 defa çalıştırılan simülasyonda sonucun $|00\rangle$ (0) ya da $|11\rangle$ (3) olarak üretildiği görülmektedir. Bu durum ilk kubitin ölçümünün yapılması ile ikinci kubitin de de aynı değeri alması anlamına gelmektedir.

```
Circuit
0: —H—@—
      |
1: ———X—

Measurements:
Counter({0: 52, 3: 48})
```

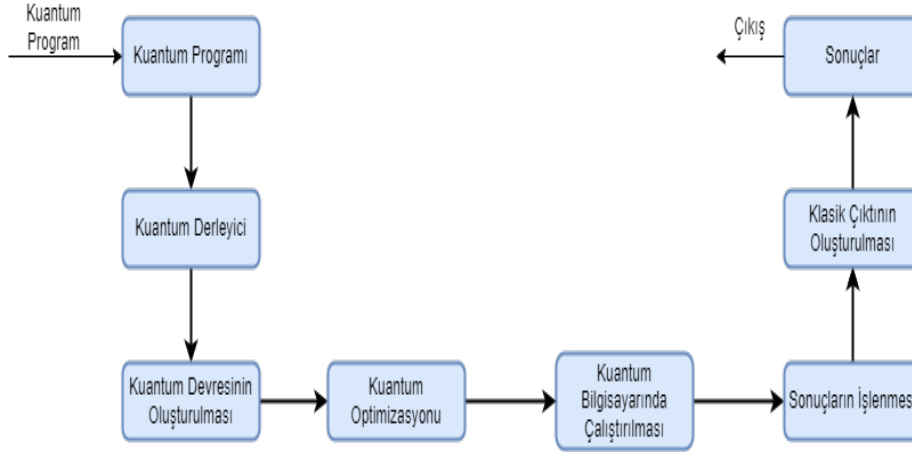
Şekil 2. Python Cirq kütüphanesi Bell durumu çıktısı

Kuantum devreleri genellikle kullanıcılar tarafından devrenin donanım bağımsız (soyut) tasarlanır. Bu soyut devre uygun bir derleyici aracılığıyla belirli bir kuantum donanımında çalıştırılacak bir devreye dönüştürülür. Fakat devre dönüşümü ihmal edilemez bir maliyeti de bulunmaktadır. Bu nedenle, derleyici bir optimizasyon sorunuyla karşı karşıyadır. Yükü en aza indirirken uygulanabilir bir dönüşüm bulmak tek bir işlemci için bile NP-zor olduğu bilinmektedir [20,21]. Bu nedenle, kuantum derleyicisinin optimizasyon yapması gerekmektedir [22].

3. Kuantum Derleyiciler

Kuantum programlama, kuantum bilgisayarlarının gücünden faydalanarak yeni ve gelişmiş algoritmaların geliştirilmesini sağlayan bir alandır. Kuantum bilgisayarları, geleneksel bilgisayarlara kıyasla benzersiz hesaplama yetenekleri sunar ancak bu yetenekleri tam anlamıyla kullanabilmek için özel olarak tasarlanmış derleyici yazılımlarına ihtiyaç duyarlar. Kuantum derleyiciler, kuantum programlarını kuantum bilgisayarlarında yürütülebilir hale getirmek için kaynak kodunu optimize eden, çeviren ve düzenleyen araçlardır. Ayrıca, kuantum cihazlarındaki sınırlamalara, hatalara uyum sağlamak için optimizasyon teknikleri ve hata düzeltme yöntemleri uygular. Kuantum derleyiciler, kuantum

programcılarında daha etkili, hata toleranslı ve performans açısından optimize edilmiş kuantum programlar oluşturma imkânı sunar, böylece kuantum bilgisayarların potansiyelini tam anlamıyla kullanabilmelerini sağlar. Şekil 3'te temel olarak kuantum programının çalışması için gerçekleştirilen aşamalar verilmiştir. Devamında her bir aşama maddeler halinde açıklanmıştır.



Şekil 3. Kuantum programların çalıştırılarak sonuçların elde edilmesi süreci

- 1) **Kuantum Programı:** Kuantum derleyicinin başlangıç noktasıdır. Kuantum programı, kuantum bilgisayarda çalıştırılacak olan algoritmanın veya işlemin bir tanımını içerir. Genellikle yüksek seviye kuantum programlama dilleriyle yazılır.
- 2) **Kuantum Derleyici:** Kuantum programını geleneksel bilgisayarların anlayabileceği dile dönüştüren bir yazılım aracıdır. Kuantum derleyici, kuantum programını analiz eder, doğruluk kontrolleri yapar ve optimize eder. Derleyici, kuantum programını kuantum devresi olarak temsil eden düşük seviyeli bir temsile dönüştürür.
- 3) **Kuantum Devresinin Oluşturulması:** Kuantum derleyicinin çıktısı olarak elde edilen kuantum devresi, kuantum programını fiziksel olarak gerçekleştirmek için kullanılan bir dizi kuantum kapısının ve kuantum hallerinin düzenlenmesini içerir. Kuantum devresi, kuantum kapıları, ölçümler ve kuantum durumları arasındaki ilişkileri tanımlar.
- 4) **Kuantum Optimizasyonu:** Kuantum devresi oluşturulduktan sonra, kuantum optimizasyon aşaması gerçekleştirilir. Bu aşamada, kuantum devresi üzerinde çeşitli optimizasyon teknikleri uygulanır. Optimizasyon, devrenin performansını iyileştirmek, hata (gürültü) etkisini azaltmak veya kullanılan kaynakları azaltmak gibi amaçlarla yapılabilir.
- 5) **Kuantum Bilgisayarında Çalıştırılması:** Kuantum devresi, kuantum bilgisayarda gerçekleştirilmek üzere fiziksel kuantum cihazlarına veya kuantum simülasyonlarına aktarılır. Gerçekleme aşamasında, kuantum kapıları ve ölçümler, kuantum cihazının özelliklerine ve kısıtlamalarına uygun şekilde uygulanır.
- 6) **Sonuçların İşlenmesi:** Kuantum bilgisayarda çalıştırılma işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen sonuçlar işlenir. Bu aşamada ölçümlerden elde edilen kuantum durumları veya istatistiksel sonuçlar analiz edilir ve yorumlanır.
- 7) **Klasik Çıktının Oluşturulması:** Kuantum sonuçları, klasik bir çıktı formatına dönüştürülür. Bu çıktı, kuantum bilgisayardan gelen sonuçların klasik bilgisayarlar veya diğer sistemler tarafından işlenebilmesini sağlar.
- 8) **Sonuçlar:** Kuantum derleme sürecinin sonunda elde edilen sonuçları ifade eder. Bu aşamada, çıktılar kullanıcının elde etmek istediği bilgilere veya çözümlere dönüştürülür.

Kuantum hesaplama ve programlama için literatürde birçok derleyici tasarımı bulunmaktadır. Her derleyici farklı avantajlara sahiptir. Bu nedenle, en uygun derleyiciyi seçmek için önemli bir konudur. Kuantum algoritmaları genellikle Python gibi yüksek seviyeli dillerin sunmuş olduğu kütüphaneler aracılığıyla yazılarak QASM diline çevrilir. Bu sebeple, kuantum algoritmalarının devreye dönüştürülmesi için kullanılan programlama diline dikkat edilmesi ve derleyiciye uygun hale getirilmesi için teknik bilgiye ihtiyaç duyulduğu bildirilmektedir [23]. Bu kapsamda kuantum derleyicinin, gerçek kuantum bilgisayarının kapı seti ile en uygun nasıl eşleyebileceği önemli bir konudur [24]. Uygun kapı seti ile eşlenmemesi durumunda kuantum programların yürütme süresi uzamakta ve hata toleransı artmaktadır [25]. Ayrıca kubitlerin uygun fiziksel kubitlerle eşlenmesi gerektiği ve bu eşleme işleminin, kubitlerin çözünürlük süresi veya bağlantı özellikleri gibi farklı karakteristikleri nedeniyle kuantum algoritmasının yürütülmesini doğrudan etkilediği belirtilmiştir [26].

Literatürde kuantum derleyicilerin kubit eşleştirilmesi ve kullanılan optimizasyon algoritmaları hakkında yapılan çalışmalar yer almaktadır [23,25–27]. Bir kuantum algoritmanın optimizasyonu donanımdan bağımsız ve donanıma bağımlı olmak üzere iki aşamada optimize edilebilir [28]. Donanımdan bağımsız optimizasyon, devre boyutu veya devre derinliği gibi bir maliyet fonksiyonuna göre kuantum devre düzeyinde genel optimizasyonlar yapılır [22,29]. Donanıma bağımlı optimizasyonda ise hedef kuantum bilgisayarın mevcut kapı seti, kubitlerin hata oranları, kubitlerin bağlantı özellikleri veya farklı kubitlerin süperpozisyon halinden klasik davranışa dönüşme süresi (*decoherence*) gibi donanıma özgü özellikleri dikkate alınır [30].

Kuantum algoritmalarının optimize etmek için çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar arasında Heyfron ve Campbell, Clifford+T kapı setini kullanarak T kapılarının sayısını azaltan bir kuantum derleyicisi önermektedir. T kapısının maliyetinin diğer Clifford kapılarından çok daha yüksek olduğunu ve T kapılarının sayısını azaltarak devre maliyetini düşürdüklerini raporlamışlardır [31]. Itoko, derleme aşamasında kubitler ile kapıların eşlenmesini geliştirmek için bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşıma göre donanım özelliklerine bağlı olarak en uygun eşlemeyi sağlayan bir algoritma kullanılmıştır. Bu algoritma, belirli bir kuantum bilgisayarın donanım özelliklerini dikkate alarak, kuantum algoritmalarının uygun bir şekilde derlenmesi için gerekli olan kubitlerin ve kapıların belirlenmesine yardımcı olmaktadır [30]. Bu yaklaşım sayesinde kuantum algoritması daha verimli bir şekilde derlenebilir ve donanımın mevcut özellikleri en iyi şekilde kullanılabilir. Maslov, devre derinliğini yani, kubitlerde ardışık olarak yürütülen kapıların sayısını azaltmak için şablon tabanlı bir yaklaşımda bulunmuştur. Bu yöntem, devre derinliğinin azaltılması gibi çeşitli avantajlar getirmekte ve kuantum algoritmalarının daha verimli bir şekilde derlenmesini sağlamaktadır [32].

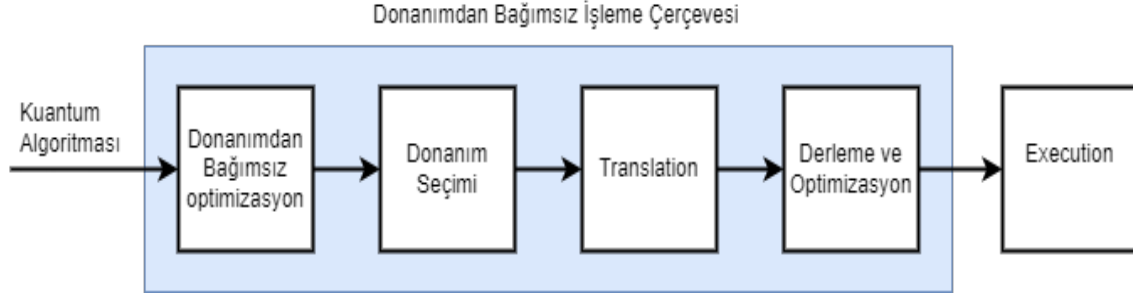
Verimli bir derleyici tasarlamak zor bir görevdir çünkü kuantum bilgisayarlarının karmaşıklığı ve donanım kısıtlamalarıyla başa çıkmak gerekmektedir. Bu nedenle literatürde sorunu ele alan birçok öneri ortaya çıkmıştır. Farklı öneriler bir araya getirilerek daha etkili ve optimize edilmiş derleyiciler geliştirilebilir. Bu konuda IBMQ çerçevesindeki kuantum derleyicisi bir örnektir [17]. IBMQ derleyicisi, farklı yönlerden sorunu ele alan ve çeşitli optimizasyon katmanlarına sahip bir yapıya sahiptir. Bu katmanlar, derleme işlemini daha etkili hale getirmek için farklı yöntemler ve teknikler kullanmaktadır.

4. Kuantum Derleyicilerin Mimari Analizi ve IBMQ Uygulaması

Derleyici tasarımlarının etkili bir şekilde tasarlanması zor bir görevdir. Bu nedenle, literatürde bu sorunu ele alan birçok öneri bulunmaktadır. Bu bölümde kuantum literatürde kuantum derleyiciler ile gerçekleştirilen çalışmalar analiz edilerek, yarım toplama devresinin IBM composer ortamında uygulaması gerçekleştirilmiştir. Farklı kubit bağlantılarına ve hata oranlarına sahip kuantum bilgisayarlar üzerinde gerçekleştirilen uygulamalar sonucu elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

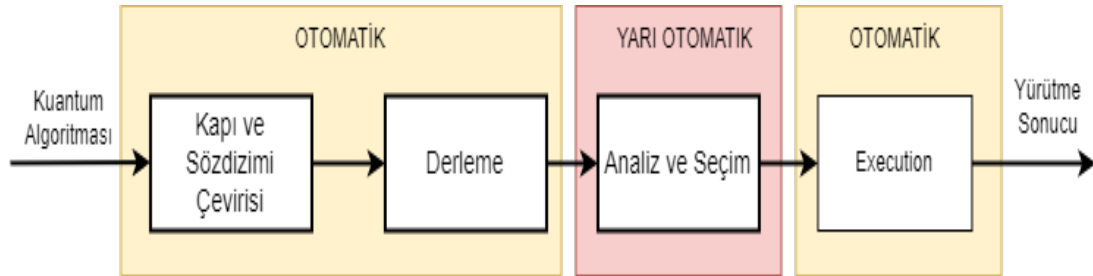
Bu alanda gerçekleştirilen bir çalışmada Frank Leymann, donanım bağımsız kuantum algoritmalarının işlenmesi için bir yöntem sunmuştur [24]. Gerekli işlem adımları Şekil 4'te verilmiştir. Yönteme göre öncelikle bağımsız bir kuantum programlama dili kullanarak kuantum algoritması tanımlanır. Kuantum algoritması daha önce açıklanan optimize yöntemlerle optimize edilir ve kuantum bilgisayar için uygun hale getirilir. Kuantum algoritmasını karakterize eden önemli özelliklerden,

örneğin kubit sayısı veya kullanılan kapı seti gibi yararlanarak uygun kuantum donanımı seçilir [33]. Seçilen kuantum donanımında çalıştırılabilmesi için, destekleyen bir kuantum bilgisayar (IBM, Google, Honeywell vb.) [34] kullanılarak kuantum diline dönüştürülür ve seçilen kuantum donanımı için yürütülebilir bir forma derlenir.



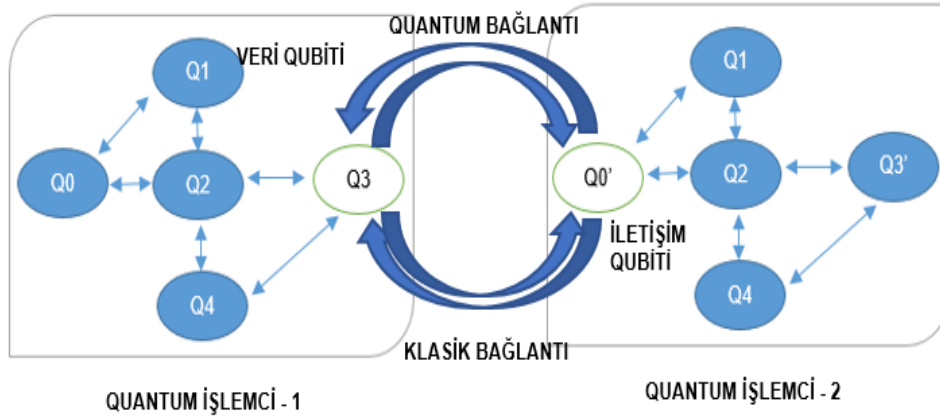
Şekil 4. Donanımdan bağımsız kuantum algoritmaları için gerekli işleme adımları [24].

Hangi kuantum derleyicinin daha uygun olduğunu tespit etmek yazılan algoritmanın farklı derleyicilerde ayrı ayrı derlenmesini ve derleme sonuçlarının karşılaştırılmasını gerektirmektedir. Bu işlem oldukça zaman almaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için Marie Salm, seçilen kuantum algoritma ve kuantum bilgisayar için birden fazla kuantum derleyicinin otomatik olarak denenmesini sağlayan bir çerçeve önermiştir [9]. Genel olarak bu yaklaşım Şekil 5'te gösterilmiştir. Yaklaşımına göre öncelikle, verilen kuantum devresi seçilen derleyicilerin SDK'ları tarafından desteklenen programlama diline ve uygun kapı setine çevrilir. Çevrilen devreler ve seçilen kuantum bilgisayarı hakkındaki bilgiler ikinci adımda derleme için girdi olarak kullanılır. Derleme işleminden sonra, oluşan devrelerin genişlikleri ve derinlikleri NISQ Analyzer kullanılarak analiz edilir ve kullanıcıya uygun sonuçlar önerilir [35]. Kullanıcı daha sonra en uygun derlemeyi manuel olarak seçer ve seçilen devre yürütülür.



Şekil 5. Çoklu derleyicilerle devrelerin otomatik derlemesi ve karşılaştırılması [9].

Ferrari ve arkadaşları Şekil 6'da mimari modeli gösterilen dağıtık bir kuantum hesaplama önerisinde bulunmuşlardır [36]. Dağıtık model ile NISQ çağındaki kuantum bilgisayarların sınırlamalarına çözüm olmayı hedeflemişlerdir. Sistem, birden fazla küçük ölçekli kuantum bilgisayarın birbiriyle iletişim halinde birleşerek büyük ölçekli kuantum bilgisayarı gerçekleştirmektedir. Klasik bilgileri iletmek amacıyla klasik bağlantı kurulurken, kuantum işlemleri gerçekleştirmek için kuantum bağlantı kullanılır. Her iki işlemcide de en az bir iletişim kubitini ayrılır ve kuantum bağlantısında Bell durumları iletilerek dolanık hale getirilir. Dolanık hale gelen kubitlere CNOT işlemini uygulayarak veri iletimini sağlamaktadır. Devredeki her CNOT işleminde uzaktan bir CNOT uygulanması gerektiğinden çalışmalarında, iki farklı dolaşma (*entanglement*) stratejisi kullanmışlardır. Önerilen model konsept model olup, yazılan kuantum algoritmaların bu mimaride çalışabilecek şekilde uygun derlenmesi için farklı derleyici tasarımlarının geliştirilmesi bu alandaki yeni çalışma konularını oluşturmaktadır.



Şekil 6. Dağıtık kuantum hesaplama için önerilen model [36].

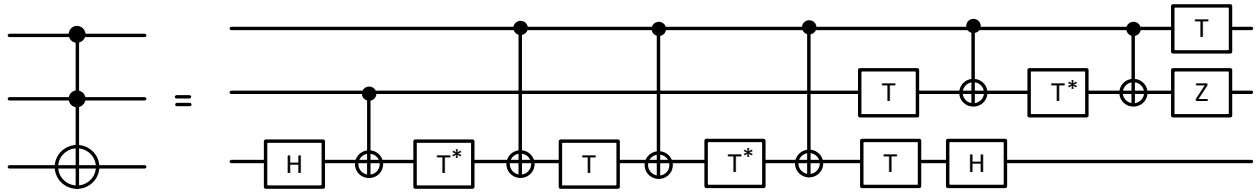
Kuantum hesaplama alanında konu ile ilgili diğer çalışmalar destekledikleri mimari, kullandıkları optimizasyon yöntemleri ve uygulama alanlarına göre Çizelge 2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. Derleyicilerin mimari, optimizasyon yöntemi ve uygulama alanı bakımından analizi

Çalışma	Desteklenen Mimari	Optimizasyon Yöntemi	Uygulama Alanı
[9]	Genişletilmiş HTTP REST API ve NISQ Analyzer UI	-	Kuantum Algoritma-Derleyici Analizi
[37]	Pauli dizisi merkezli mimari	VQE (varyasyonel kuantum özçözücü)	Kimya Simülasyonları
[38]	NFC tabanlı iletişim ağı mimarisi	BB84 protokolü	Kriptografi
[39]	IBM Q16 Melbourne kuantum mimarisi	Makine öğrenimi	Kuantum devre çıktısının değerlendirilmesi
[40]	Genel NISQ (Gürültülü Orta Ölçekli Kuantum) ve FT (Hata Tolereli) Kuantum Mimarileri	SQUARE (Stratejik Kuantum Ancilla Bit Yeniden Kullanımı)	Modüler kuantum program optimizasyonu
[41]	FT (Hata Tolereli) Kuantum Mimarileri	Code Teleportation (Kod Teleportasyonu)	Kuantum hata düzeltme kodlarının entegrasyonu
[42]	QuTech	-	Kuantum veritabanı
[36]	Distributed (Dağıtık), IBM Yorktown ve IBM Melbourne	Eşlenme Takası Temelli Strateji, Veri Kübiti Takası Temelli Strateji	Genel Hesaplamalar

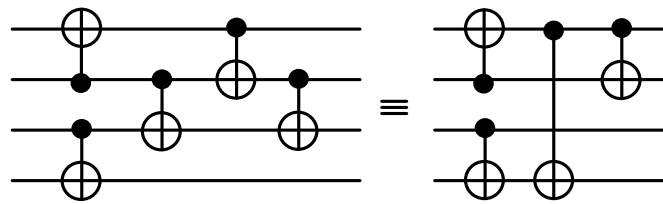
Kuantum derleyiciler yüksek seviyeli programlama dilini QASM diline optimum bir şekilde çevirmeyi gerçekleştirmenin yanında bu dilin uygun bilgisayar mimarisinde çalışması için gerekli işlemleri de gerçekleştirmektedir. Burada gerçekleşen temel adım aşağıda açıklanmıştır:

- Kuantum devrenin kuantum bilgisayarın çalıştırabileceği kapılara ayrıştırılması (Decomposition): Kuantum algoritmaların kuantum bilgisayarın deteklediği kapılar cinsinden yazılması gerekmektedir. Örneğin Toffoli kapısı doğrudan kuantum bilgisayarlarda çalışmaz. Bunun için ilgili kuantum bilgisayarın çalıştırabileceği kapılar cinsinden dönüşümü gerekmektedir. Şekil 7’de Toffoli kapısının H, T, Z ve CNOT kapıları cinsinden yazımı gösterilmiştir.



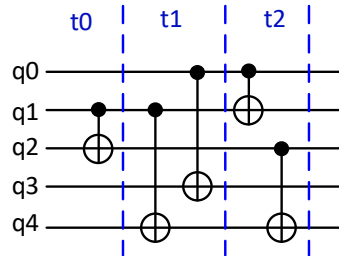
Şekil 7. Toffoli kapısının H, T, Z ve CNOT kapıları cinsinden oluşturulması [43].

• **Devre elemanlarının optimizasyonu (Optimization):** Kuantum devrelerin daha az kapı ile temsil edilmesi, kubitlerin daha kısa süre saklanması gerekliliğini doğuracağından ortaya çıkabilecek gürültü miktarının azalmasında olumlu etki göstermektedir. Bu optimizasyon işlemi tekrar eden kapıların birbirini sadeleştirilmesi şeklinde yapılabileceği gibi aynı işlemi yapan kuantum devre karşılıklarının elde edilmesi ile de gerçekleştirilebilir. Şekil 8’de örnek bir optimizasyon işlemi gösterilmiştir.



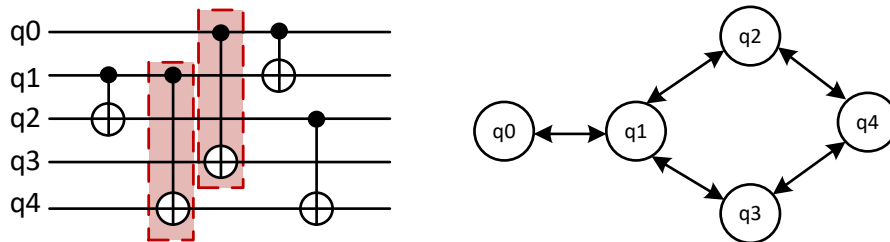
Şekil 8. Devre üzerinde optimizasyon işlemi

• **Aynı anda çalışabilecek kapıların belirlenmesi ile paralelleştirilmesi (Scheduling):** Kuantum devrelerde farklı kubitler üzerinde gerçekleşen işlemler aynı t anında yapılabilir. Aynı anda çalışabilecek kapıların belirlenmesi örneği Şekil 9’da verilmiştir. Şekilde CNOT(q1,q4) ve CNOT(q0,q3) kapıları farklı kubitler üzerinden işlem yaptığından aynı t1 anında gerçekleştirilmektedir.



Şekil 9. Aynı anda çalışabilecek kapıların belirlenmesi

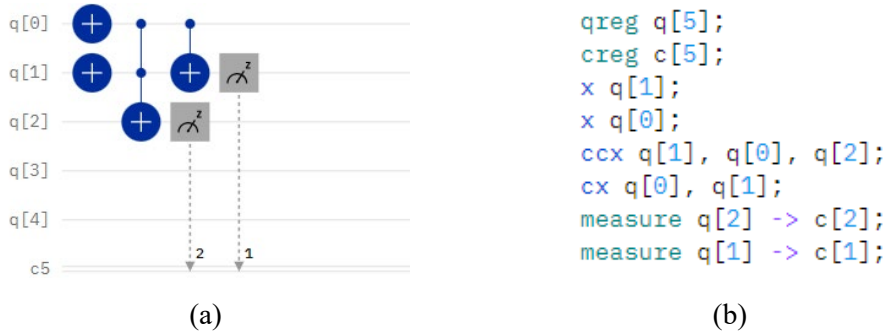
• **Donanım kubit bağlantısına bağlı olarak kubit eşleştirmelerinin gerçekleştirilmesi (Mapping):** Kuantum bilgisayarlar farklı kubit bağlantılarına sahip yapıda olabilir ve genellikle tüm kubitlerin birbiri ile fiziksel bağlantıları bulunmaz. Şekil 10’da örnek bir kuantum devre ve bu devrenin çalıştırılacağı kuantum bilgisayarın kubit bağlantısı verilmiştir. Şekilde kırmızı ile gösterilen CNOT kapılarının uygulanması için q1-q4 ve q0-q3 arasında donanım üzerinde doğrudan bağlantı olmadığı görülmektedir. Bu durumda kubit değiştirme (*swapping*) işlemi uygulanarak eşleştirme işlemi gerçekleştirilebilir.



Şekil 10. Kubit eşleştirmesinin gerçekleştirilmesi

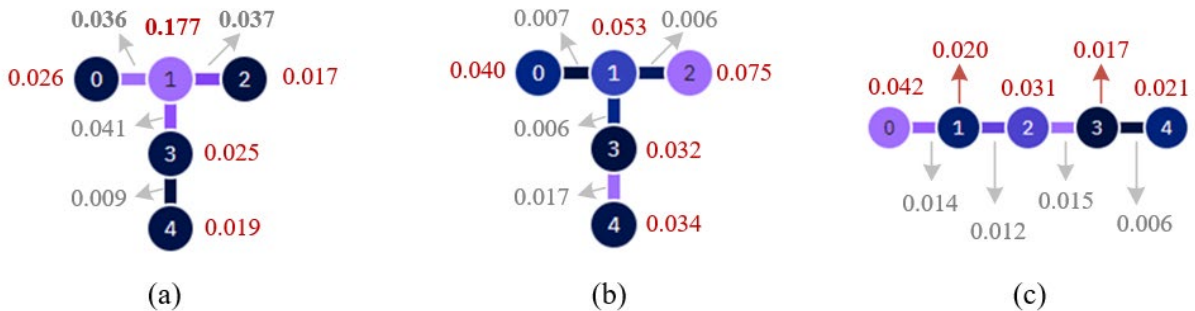
• **Hata toleransını en aza indirmek için iyileştirmeler yapılması (Fault Tolerance):** Kuantum bilgisayarlarda kubitlerin ve bağlantıların hata değerleri bulunmaktadır. Bir kuantum devre bu hatalardan minimum etkilenecek şekilde ayarlanmalıdır.

Yukarıda sayılan adımlar IBM kuantum devre oluşturucu (*IBMQ Composer*) tarafından oluşturulan devrelerin uygun kuantum bilgisayara göre dönüşümde de (*transpiling*) uygulanmaktadır. Bu çalışmada yarım toplayıcı devresinin 5 kubitlik *ibm_belem*, *ibm_quito* ve *ibm_manila* bilgisayarlarda uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yarım toplayıcı devresi ve karşılık gelen QASM kodu Şekil 11’de verilmiştir. Burada $q[0]$ ve $q[1]$ girişleri 1 olarak ayarlanmıştır. Sonuç $q[2]q[1]$ kubitlerine yansıtılmıştır. Dolayısı ile sonucun $|10\rangle$ (2) olması beklenmektedir.



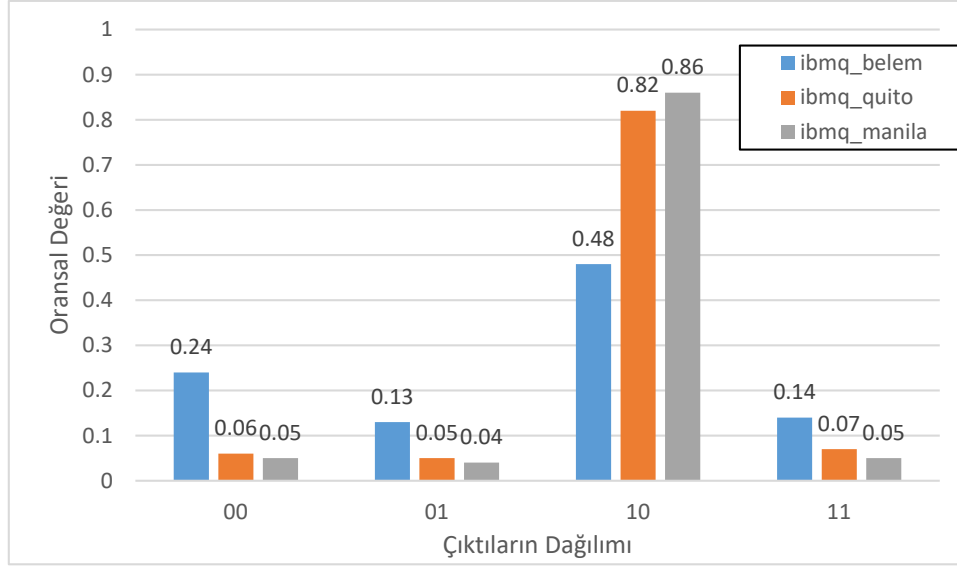
Şekil 11. Yarım toplayıcı kuantum devrenin IBM composer ortamında oluşturulması ve karşılık gelen QASM kodu. a) Yarım toplayıcı kuantum devre, b) QASM kod karşılığı

Örnek uygulama *ibm_belem*, *ibm_quito* ve *ibm_manila* kuantum bilgisayarları için test edilmiştir. Kuantum bilgisayarların sonuçlarının güvenilirliğini belirlemek üzere *Quantum Volume* (QV) metriği kullanılır. Bu bilgisayarlar sırası ile 16, 16 ve 32 QV değerlerine sahiptir. Bu kuantum bilgisayarlardan *ibmq_belem* ve *ibmq_quito* T tipi bağlantıya sahipken, *ibmq_manila* L tipi bağlantıdadır. Bilgisayarların kubit bağlantıları Şekil 12’de verilmiştir. Şekilde kubitlerin renkleri çalışmanın gerçekleştiği sıradaki okuma hatalarını, bağlantı renkleri ise CNOT uygulama hatalarını temsil etmektedir. Burada koyu renkler hatanın daha düşük olduğunu göstermektedir. Her renklendirme kendi içindeki kubitler üzerinde yapıldığından bu renkler karşılaştırma için yeterli olmamaktadır. Bu sebeple kubit okuma hataları kırmızı renkle, CNOT bağlantı hataları ile gri renkte gösterilmiştir. Şekil 12.a’da *ibmq_belem*’in 1. Kubitindeki okuma hatasının ve CNOT bağlantı hatalarının yüksek olması dikkat çekmektedir.



Şekil 12. IBM kuantum bilgisayarlarının kubit bağlantıları ve hata değerleri. Kırmızılar kubit hataları, griler CNOT bağlantı hatalarını göstermektedir. a) *ibmq_belem*, b) *ibmq_quito*, c) *ibmq_manila*

Orijinal devresi Şekil 11’de verilen kuantum devrenin, kuantum bilgisayarların çalıştırabileceği kapı kümesi cinsinden dönüşümü Şekil 13’te verilmiştir. Her üç dönüşüm devresi de aynı işlemi gerçekleştirmekte olup farklı kubitleri kullanmaktadır. Sonuçta gözlem işlemi yapılırken ilgili kubitler



Şekil 14. Örnek uygulamanın gerçek kuantum bilgisayarlarda 1024 *shots* çalıştırılması ile ürettikleri sonuçların oransal dağılımı.

5. Sonuçlar

Kuantum hesaplama ve programlamanın klasik bilgisayarlarımıza getirdiği üstünlüğün kabul edilmesi bu alanda yapılan çalışmaları hızlandırmış ve siber güvenlik, kimya, finans gibi çeşitli sektörlerde çığır açacak gelişmeler sağlayacağı öngörülmüştür. Ancak günümüz teknoloji sınırlamaları nedeniyle bu bilgisayarlarda donanımsal hatalar meydana gelmektedir. Kuantum gürültüsü yaşanan gelişmelerin bir noktada sınırlanmasına, yavaşlamasına, çeşitli problemlerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Kuantum bilgisayarların çalıştırılması için özel olarak tasarlanmış kuantum algoritmalarına ihtiyaçları vardır ve bu algoritmaların oluşturulması için uygun bir derleyiciye ihtiyaç duyulmaktadır. Derleyiciler, programlama dili seviyesinde yazılmış kuantum algoritmalarını kuantum devrelerine çevirir ve kuantum bilgisayarlarda çalıştırılabilir duruma getirir. Derleyiciler, kuantum bilgisayarın özelliklerine ve sınırlamalarına dikkat eder. Farklı kuantum bilgisayarlar ve mimariler için algoritmalarını kuantum devrelerine dönüştürürken kullanılacak en uygun kapı seti kümesini seçerek, daha az sayıda kuantum biti kullanarak daha büyük ve karmaşık problemleri çözmeyi mümkün kılar.

Kuantum derleyiciler, kuantum programlarımızı/algoritmalarımızı kuantum bilgisayarında işlenebilen kübit talimatlarını çevirmeyi sağlayan, bunu yaparken hata önlemeye ve kuantum hesaplamayı hızlandıracak çeşitli iyileştirmeler yapmaya çalışır. Klasik programlamaya benzer olarak kuantum programlama şu aşamaları barındırır: Algoritmanın yazılması, yüksek seviye derleme, düşük seviye derleme-kuantum devrenin elde edilmesi, kuantum optimizasyon-kuantum hata düzeltmesi, donanımda çalıştırılması, sonuçların ölçülmesi. Uygun derleyici ve kuantum bilgisayar seçimi, kuantum devresinin en uygun şekilde derlenmesini sağlayarak devrenin çalıştırılma süresinin düşmesini ve dolayısıyla hata oranını düşürebilir. Gürültülü Orta Ölçekli Kuantum (NISQ) çağındaki kuantum donanımdan tam verim alabilmek için devrelerimizi algoritmamıza en uygun derleyiciyi elde etmemiz son derece önemlidir.

Günümüzde kullanıcı bağımsız veya kullanıcı bağımlı birçok derleyici, programlama kütüphaneleri, yazılım çerçeveleri bulunmakla beraber genelde kuantum devreler soyut olarak (donanımdan bağımsız) oluşturulur. Çalışmada soyut devrenin gerçek bir devreye dönüşüm aşamaları bakımından, kullandığı mimari, kullanım alanı, tasarımı açısından birbirinden farklı derleyicilere yer verilerek IBM composer ortamında gerçek kuantum bilgisayarlarda soyut devrenin uygulanarak analiz edilmesi sağlanmıştır. Yapılan çalışmada 5 kübitlik *ibmq_belem*, *ibmq_quito* ve *ibmq_manila* bilgisayarlarına yer verilmiştir. Bu bilgisayarlardan *ibmq_belem* ve *ibmq_quito* T tipi kübit bağlantılarına sahip iken, *ibmq_manila* L tipi kübit bağlantısına sahiptir. Yarım toplayıcı örneğinin bu

bilgisayarlarda çalıştırılması ile elde edilen dönüştürülmüş devreler gösterilerek, ürettiği sonuçlar analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda L tipi bağlantıya sahip `ibmq_manila` bilgisayarının problemimiz için daha iyi sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan aynı tip kübit bağlantı yapısına sahip olmasına rağmen `ibmq_belem` bilgisayarının ürettiği sonuçlar gözle görülür bir şekilde yetersiz kalmaktadır. Bunun sebebi `ibmq_belem` bilgisayarının kullandığı kübitlerdeki, kübit okuma ve CNOT kapısı uygulama gibi hata oranlarının yüksek olması olarak yorumlanmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma, geliştirilen kuantum programının daha doğru çalışabilmesi için uygun dönüşümleri gerçekleştiren derleyicilerin ve yapısına uygun kuantum bilgisayarın seçilmesi gerektiğini gözler önüne sermektedir. Yapılan çalışma ile kuantum programlama ve kuantum derleyicilerin yapıları hakkında bilgi verilmiş, uygulamalı kuantum hesaplamada daha başarılı sonuçlar elde etmek için uygun derleyici/donanım seçiminin önemi vurgulanmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından TÜBİTAK 1001 programı kapsamında 121E439 nolu proje ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bir kurum, kuruluş veya kişi ile mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Feynman RP. Simulating physics with computers. *Int j Theor phys.* 2018;21(6/7).
- [2] Benioff P. The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *Journal of statistical physics.* 1980;22:563-91.
- [3] Yetiş H, Karaköse M. A New Framework Containing Convolution and Pooling Circuits for Image Processing and Deep Learning Applications with Quantum Computing Implementation. *Traitement du Signal.* Nisan 2022;39(2):501-12.
- [4] Bova F, Goldfarb A, Melko RG. Commercial applications of quantum computing. *EPJ quantum technology.* 2021;8(1):2.
- [5] Arute F, Arya K, Babbush R, Bacon D, Bardin JC, Barends R, vd. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature.* 2019;574(7779):505-10.
- [6] Hassija V, Chamola V, Saxena V, Chanana V, Parashari P, Mumtaz S, vd. Present landscape of quantum computing. *IET Quantum Communication.* 2020;1(2):42-8.
- [7] Salm M, Barzen J, Leymann F, Weder B. Prioritization of compiled quantum circuits for different quantum computers. İçinde: 2022 IEEE International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER). IEEE; 2022. s. 1258-65.
- [8] Preskill J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum.* 06 Ağustos 2018;2:79.
- [9] Salm M, Barzen J, Leymann F, Weder B, Wild K. Automating the comparison of quantum compilers for quantum circuits. İçinde: Symposium and Summer School on Service-Oriented Computing. Springer; 2021. s. 64-80.
- [10] Miszcak J. High Level Structures for Quantum Computing. Springer Nature; 2022.
- [11] Yetiş H, Karaköse M. Kuantum Uyarlamalı Genetik Algoritmalar için Çözüm Kalitesini Artıracak Yeni Bir Yaklaşım. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi.* 2021;33:71-9.
- [12] Mukai T. Completely scrambled memory for quantum superposition. *Scientific reports.* 2019;9(1):1147.

- [13] SoniaLopezBravo. The qubit in quantum computing - Azure Quantum [Internet]. 2023 [a.yer 27 Temmuz 2023]. Erişim adresi: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/concepts-the-qubit>
- [14] Coles PJ, Eidenbenz S, Pakin S, Adedoyin A, Ambrosiano J, Anisimov P, vd. Quantum Algorithm Implementations for Beginners. :77.
- [15] Yetiş H, Karaköse M. Investigation of Noise Effects for Different Quantum Computing Architectures in IBM-Q at NISQ Level. İçinde: 2021 25th International Conference on Information Technology (IT). Zabljak, Montenegro: IEEE; 2021
- [16] Khammassi N, Ashraf I, Someren JV, Nane R, Krol AM, Rol MA, vd. Openql: A portable quantum programming framework for quantum accelerators. ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC). 2021;18(1):1-24.
- [17] BM Quantum [Internet]. [a.yer 25 Nisan 2022]. IBM Quantum. Erişim adresi: <https://quantum-computing.ibm.com/>
- [18] Hidary JD, Hidary JD. Quantum computing: an applied approach. C. 1. Springer; 2019.
- [19] Bar NF, Yetiş H, Karaköse M. An Approach Based on Quantum Reinforcement Learning for Navigation Problems. İçinde: 2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry (ICDABI). IEEE; 2022. s. 593-7.
- [20] Botea A, Kishimoto A, Marinescu R. On the complexity of quantum circuit compilation. İçinde: Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search. 2018. s. 138-42.
- [21] Soeken M, Meuli G, Schmitt B, Mozafari F, Riener H, De Micheli G. Boolean satisfiability in quantum compilation. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2020;378(2164):20190161.
- [22] Yetiş H, Karaköse M. An improved and cost reduced quantum circuit generator approach for image encoding applications. Quantum Information Processing. 01 Haziran 2022;21:203.
- [23] Bishop LS, Bravyi S, Cross A, Gambetta JM, Smolin J. Quantum volume. Quantum Volume Technical Report. 2017;
- [24] Leymann F, Barzen J, Falkenthal M, Vietz D, Weder B, Wild K. Quantum in the cloud: application potentials and research opportunities. arXiv preprint arXiv:200306256. 2020;
- [25] Steiger DS, Häner T, Troyer M. ProjectQ: an open source software framework for quantum computing. Quantum. 2018;2:49.
- [26] Zhang Y, Deng H, Li Q, Song H, Nie L. Optimizing quantum programs against decoherence: Delaying qubits into quantum superposition. İçinde: 2019 International Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering (TASE). IEEE; 2019. s. 184-91.
- [27] Salm M, Barzen J, Leymann F, Weder B. About a criterion of successfully executing a circuit in the NISQ era: what $\omega \ll 1/\epsilon$ really means. İçinde: Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software. 2020. s. 10-3.
- [28] Häner T, Steiger DS, Svore K, Troyer M. A software methodology for compiling quantum programs. Quantum Science and Technology. 2018;3(2):020501.
- [29] Svore KM, Aho AV, Cross AW, Chuang I, Markov IL. A layered software architecture for quantum computing design tools. Computer. 2006;39(1):74-83.
- [30] Itoko T, Raymond R, Imamichi T, Matsuo A. Optimization of quantum circuit mapping using gate transformation and commutation. Integration. 2020;70:43-50.
- [31] Heyfron LE, Campbell ET. An efficient quantum compiler that reduces T count. Quantum Science and Technology. 2018;4(1):015004.
- [32] Maslov D, Dueck GW, Miller DM, Negrevergne C. Quantum Circuit Simplification and Level Compaction. IEEE Trans Comput-Aided Des Integr Circuits Syst. Mart 2008;27(3):436-44.

- [33] Suchara M, Kubiawicz J, Faruque A, Chong FT, Lai CY, Paz G. Qure: The quantum resource estimator toolbox. İçinde: 2013 IEEE 31st International Conference on Computer Design (ICCD). IEEE; 2013. s. 419-26.
- [34] McCaskey AJ, Lyakh DI, Dumitrescu EF, Powers SS, Humble TS. XACC: a system-level software infrastructure for heterogeneous quantum-classical computing. *Quantum Science and Technology*. 2020;5(2):024002.
- [35] Salm M, Barzen J, Breitenbücher U, Leymann F, Weder B, Wild K. The NISQ analyzer: automating the selection of quantum computers for quantum algorithms. İçinde: Symposium and Summer School on Service-Oriented Computing. Springer; 2020. s. 66-85.
- [36] Ferrari D, Cacciapuoti AS, Amoretti M, Caleffi M. Compiler design for distributed quantum computing. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*. 2021;2:1-20.
- [37] Li G, Shi Y, Javadi-Abhari A. Software-hardware co-optimization for computational chemistry on superconducting quantum processors. İçinde: 2021 ACM/IEEE 48th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA). IEEE; 2021. s. 832-45.
- [38] Han J, Liu Y, Sun X, Song L. Enhancing data and privacy security in mobile cloud computing through quantum cryptography. İçinde: 2016 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). IEEE; 2016. s. 398-401.
- [39] Saravanan V, Saeed SM. Test data-driven machine learning models for reliable quantum circuit output. İçinde: 2021 IEEE European Test Symposium (ETS). IEEE; 2021. s. 1-6.
- [40] Ding Y, Wu XC, Holmes A, Wiseth A, Franklin D, Martonosi M, vd. Square: Strategic quantum ancilla reuse for modular quantum programs via cost-effective uncomputation. İçinde: 2020 ACM/IEEE 47th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA). IEEE; 2020. s. 570-83.
- [41] Oskin M, Chong FT, Chuang IL. A practical architecture for reliable quantum computers. *Computer*. 2002;35(1):79-87.
- [42] Chakraborty S. A Prototype For Quantum Database In Hybrid Quantum. 2022;
- [43] Gerdt VP, Kragler R, Prokopenya AN. A mathematica package for simulation of quantum computation. İçinde: International Workshop on Computer Algebra in Scientific Computing. Springer; 2009. s. 106-17.

KRİPTOGRAFİK YAPILAR İÇİN SEÇMELİ KAOTİK PERMÜTASYONLAR TABANLI YENİ BİR S-BOX ÜRETME ALGORİTMASI

Fırat ARTUĞER^{1*}

¹Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tunceli, 62000, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 28.07.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 25.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1334213

ÖZET

Kriptografi, güvenli olmayan ağlar üzerinden iletilen verilerin korunması için algoritmalar tasarlamayı amaçlamaktadır. Bu algoritmalar, verileri şifreler ve üçüncü kişiler tarafından ele geçirilse bile, veriyi anlaşılabilir hale getirir. S-box, algoritmada karıştırma adı verilen temel gereksinimlerden birini sağlamaktadır. Lineer olmama değeri yüksek bir s-box yapısı, çeşitli saldırılarına karşı güvenliği oldukça arttırmaktadır. Bu nedenle, bir şifreleme algoritmasında s-box oldukça hayati bir önem taşımaktadır. Literatüre bakıldığında kaos tabanlı s-box yapıları sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak kaos ile üretilen s-box 'ların lineer olmama değeri düşüktür. Bu makalede, bu problemin üstesinden gelmek için yeni bir algoritma önerilmiştir. Önerilen yöntemde öncelikle herhangi bir kaotik harita yardımıyla bir s-box üretilir. Daha sonra bu s-box 'da yine aynı kaotik harita ile seçilmiş iki elemanın yeri değiştirilerek lineer olmama değeri kontrol edilir. Bu değer arttığında s-box güncellenir. Bu şekilde sadece 100 yineleme sonucunda lineer olmama değeri 107.5 olan bir s-box üretilmiştir. Bu değer literatürdeki birçok çalışmayı geride bırakmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yer değiştirme kutusu (s-box), Kaos, Kaotik haritalar

A NEW S-BOX GENERATION ALGORITHM BASED ON SELECTIVE CHAOTIC PERMUTATIONS FOR CRYPTOGRAPHIC STRUCTURES

ABSTRACT

Cryptography aims to design algorithms for the protection of data transmitted over unsecured networks. These algorithms encrypt the data and render it incomprehensible even if it is intercepted by third parties. S-box satisfies one of the basic requirements in the algorithm, called confusion. An s-box structure with a high nonlinearity value greatly increases the security against various attacks. Therefore, s-box is of vital importance in an encryption algorithm. When we look at the literature, chaos-based s-box structures are frequently used. However, the nonlinearity value of s-boxes produced with chaos is low. In this article, a new algorithm is proposed to overcome this problem. In the proposed method, an s-box is first generated with the help of any chaotic map. Then, in this s-box, the nonlinearity value is checked by changing the location of the two selected elements with the same chaotic map. When this value increases, the s-box is updated. In this way, an s-box with a nonlinearity value of 107.5 was produced after only 100 iterations. This value surpasses many studies in the literature.

Keywords: Substitution box (s-box), Chaos, Chaotic maps

1. Giriş

Kriptografi, geçmişten günümüze kadar çeşitli önemli verileri korumak için uygulanan yaklaşımların başında gelmektedir [1]. Bu bilimin alt dallarından biri olan şifreleme, gizliliği sağlayan en önemli yapıdır. Şifreleme algoritmaları, simetrik ve asimetrik olmak üzere iki şekilde ele

* e-posta¹ : [firartartuger@munzur.edu.tr](mailto:firatartuger@munzur.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4096-0458> (Sorumlu Yazar)

alınmaktadır. Asimetrik algoritmalar yavaş olduğu için genellikle anahtar değişimi ve sayısal imza gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Şifreleme aşaması için simetrik algoritmalar kullanılmaktadır. Simetrik algoritmalar ikiye ayrılır. İlki akış şifrelemedir. Akış şifrelemedeki temel felsefe bitleri tek tek şifrelemektir. Bu teknikte verinin boyutu arttıkça uygulaması olanaksız hale gelmektedir [1]. Bir diğer yaklaşım ise blok şifreleme yapısıdır. Burada veri bloklara bölünür ve her blok kendi içinde şifrelenir. Günümüzde kullanılan veri şifreleme standardı olan AES algoritması [2] ve hala sıklıkla kullanılan DES algoritması [3], blok şifreleme algoritmalarıdır. Günümüzün sürekli gelişen koşullarıyla birlikte özellikle uygulamaların boyutlarına göre yeni şifreleme algoritmalarına olan ihtiyaç kaçınılmazdır. Bu ihtiyacı karşılamak için yeni ve etkili blok şifreleme algoritmaları geliştirilmelidir. Bir blok şifreleme algoritmasının en önemli birimlerinden bir tanesi s-box yapılarıdır. Yani blok şifreleme algoritmalarının güvenliği çoğunlukla kullanılan s-box yapısının gücüne bağlıdır. Bundan dolayı, doğrusal kriptanaliz saldırılarına karşı dirençli bir şifreleme algoritması tasarlamak için yüksek lineer olmama özelliklerine sahip olan s-box yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır [4].

Bir s-box basitçe, matematiksel olarak bir değer başka bir değerle değiştirildiği bir dönüşümdür [5]. Bu dönüşüm sayesinde algoritmalar oldukça güçlü hale gelmektedir. Ancak, algoritmanın güçlü olabilmesi için s-box yapısının da kriptografik olarak güçlü olması gerekmektedir. Bir s-box 'ın güçlü olabilmesi için yüksek lineer olmama değerine sahip olması gerekmektedir. Çünkü, blok şifreleme algoritmalarında genellikle lineer olmayan tek yapı s-box 'dır. Bu yüzden lineer olmama değeri yüksek olmalıdır. Bu tür s-box 'lar üretmek oldukça zordur. Çünkü 8 bit bir s-box yapısında 256 değer bulunmaktadır. Bunun anlamı, optimum bir s-box elde etmek için arama uzayının 256! büyüklüğünde olmasıdır. Bu tür problemler NP-hard problem olarak adlandırılmaktadır. Bu problemi çözmek için geçmişten günümüze kadar farklı yaklaşımlar üzerinde durulmuştur. Bu yaklaşımlar temelde 3 sınıfta toplanmaktadır. Bunlar optimizasyon tabanlı, matematiksel dönüşüm tabanlı ve kaos tabanlı yaklaşımlardır. Bu yaklaşımların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları olduğu için yeni yöntemler geliştirilmeye devam etmektedir.

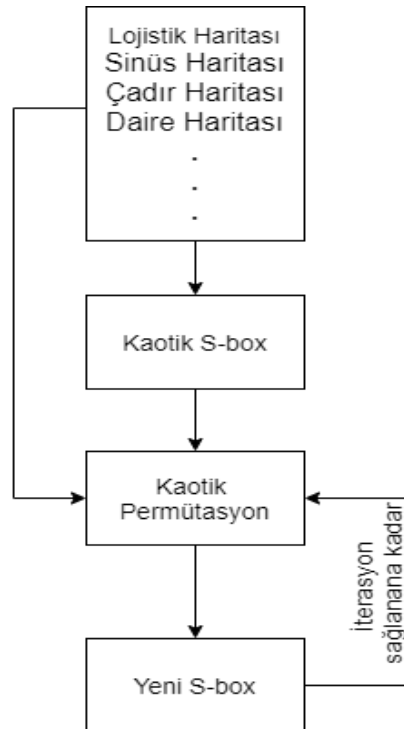
Optimizasyon temelli yaklaşımların avantajı, çoğu zaman kriptografik olarak güçlü s-box yapıları elde edilebilmesidir. Ancak, bu yaklaşımda hesaplama maliyeti oldukça fazladır. En önemli dezavantajının bu olduğu söylenebilir. Geçmişten günümüze kadar s-box üretiminde; parçacık sürüsü optimizasyonu [6], genetik algoritma [5], ateş böceği algoritması [7], kesirli sıralı hopfield sinir ağı algoritması [8], sinüs kosinüs optimizasyon algoritması [9], öğretme-öğrenme optimizasyonu [10], bakteriyel yiyecek arama optimizasyonu [11], karınca kolonisi optimizasyonu [12], tavlama algoritması [13], tiki-taka algoritması [14], uyarlanabilir ajan kahramanları ve korkaklar optimizasyonu [15], guguk kuşu arama algoritması [16] teknikleri kullanılmıştır. Bu optimizasyon teknikleri kullanılırken, genellikle bir kaotik harita yardımıyla başlangıç için bir s-box üretilir, daha sonra bu s-box optimizasyon algoritması ile daha güçlü hale getirilir. Bir diğer yaklaşım matematiksel dönüşüm tabanlı yaklaşımlardır. Bu yaklaşımlarda genellikle cebirsel dönüşümler kullanılmaktadır. Bu felsefe ile elde edilen s-box yapıları genellikle kriptografik olarak güçlü özelliklere sahiptirler. Ancak bu s-box 'lar çeşitli cebirsel [17] ve uygulama [18] saldırılara karşı dayanıksız olabilmektedirler. Ayrıca hesaplama maliyetleri de oldukça yüksek ve karmaşık bir yapıya sahiptirler. Bu sebepler, bu yöntemlerle elde edilen s-box yapılarının en önemli dezavantajıdır. Son yıllarda; boole fonksiyonları tabanlı [19], dönme matrisleri tabanlı [20], mobius grubuna ve sonlu alana dayalı [21], grup teorik ve grafiksel tabanlı [22], karmaşık davranış ve cebirsel yapı tabanlı [23], simetrik bir grup kullanılarak [24], modüler bir grubun eylemi kullanılarak [25], bir grup teorisine dayalı [26] yöntemler kullanılarak matematiksel dönüşüm tabanlı s-box yapıları geliştirilmiştir. S-box üretmek için, son olarak kaos tabanlı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlarda genellikle kaotik haritalar kullanılır. Kaotik haritalar sayesinde s-box tablosu rastgele bir şekilde doldurulur. Sadece kaos ile elde edilen bu s-box yapılarının elde edilmesi oldukça hızlı ve kolaydır. En önemli avantajının bu olduğu söylenebilir. Ancak, bu s-box 'lar kriptografik olarak genellikle kötü özelliklere sahiptirler. Özellikle lineer olmama değerleri çok düşük kalabilmektedir. En büyük dezavantajlarının bu olduğu söylenebilir. Çünkü düşük lineer olmama değeri çeşitli saldırılara karşı zafiyetler yaratmaktadır. Çok düşük lineer olmama değerine sahip s-box yapılarının performansını arttırmak için zig-zag tarama yöntemi [27] önerilmiştir. Bu yöntemde elde edilen kaotik s-box, zig-zag şekilde taranarak s-box 'ların lineer olmama değeri artırılmıştır. Bir diğer

yaklaşımında [28] kaotik bir s-box yapısının satır ve sütunları yer değiştirilerek performansı artırılmıştır. Buradaki yer değiştirme işleminde DES algoritmasında kullanılan s-box yapıları kullanılmıştır. DES s-box tabloları birleştirilerek yer değiştirecek olan satır ve sütunlar bu tablodan seçilmiştir. Bu sayede lineer olmama değeri artırılmıştır. Kaos tabanlı yaklaşımlarla s-box üretmek için çadır harita [29], baker harita [30], geliştirilmiş tek boyutlu ayrık bir kaotik harita [31], tam sayıların çarpımını temel alan yeni bir ayrık zamanlı kaotik harita [32], kaotik labirent rene Thomas sistemi [33], kaotik sinüs harita [34], kesirli Lorenz-Duffing sistemi [35], lojistik harita [36], kaotik kısmi diferansiyel denklem [37], kaotik ölçekli Zhongtang sistemi [38], hiperkaotik sistem [39], kaotik Lorenz sistemi [40], kesirli kaotik sistem [41], kesirli sıralı kaotik Chen sistemi [42] ve daha birçok kaotik sistem kullanılmıştır.

2. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemde öncelikle kaotik bir harita yardımıyla giriş için kullanılacak lineer olmama değeri genellikle düşük olan bir s-box üretilir. Bu giriş s-box 'ını elde etmek için kullanılan algoritmanın sözde kodu tablo 1 'de verilmektedir. Bunun için öncelikle kaotik bir haritanın başlangıç ve durum parametreleri belirlenir. Daha sonra bir çıkış değeri hesaplanır ve mod256 işlemi ile [0,256] aralığında bir değere dönüştürülür. Bu değer s-box 'da yoksa tabloya eklenir, varsa eklenmez. Çünkü s-box yapısının bijektif olması gerekmektedir. Yani 0 'dan 256 'ya kadar her değer bir kez kullanılması gerekmektedir. Bu şekilde tablo dolana kadar devam edilmektedir. Sadece bu yaklaşım ile oluşturulan s-box yapılarında lineer olmama değeri en fazla 106.75 olarak hesaplanmıştır [43]. Böylece çeşitli güvenlik zafiyetleri ortaya çıkabilmektedir. Daha sonra, elde edilen bu zayıf s-box yapısında kaotik bir harita ile seçilmiş iki eleman yer değiştirilmektedir. Bu yer değiştirme sonucunda lineer olmama değeri artarsa s-box güncellenmektedir. Bu şekilde s-box 'ın lineer olmama değeri artırılmaktadır. Önerilen yöntemin sistem modeli şekil 1 'de verilmiştir. Şekil 1 'de verilmiş kaotik haritalar artırılabilir. Bu çalışmada s-box oluşturmak ve yer değiştirecek elemanları elde etmek için lojistik harita kullanılmıştır. Lojistik haritanın matematiksel modeli denklem 1 'de verilmiştir.

$$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n), x_n \in [0,1], a \in [3.5, 4] \quad (1)$$



Şekil 1. Önerilen yöntemin sistem modeli

Tablo 1 'de, bu kaotik s-box 'ların lineer olmama değerini hızlı bir şekilde arttırmak için önerilen algoritma verilmektedir. Önerilen yaklaşımda, herhangi bir kaotik harita ile iki değer üretilmektedir. Bu değerler mod256 işlemi ile [0,256] aralığındaki değerlere dönüştürülmektedir. Daha sonra elde edilen bu iki değer yer değiştirilir ve yeni lineer olmama değeri hesaplanır. Yeni lineer olmama değeri eski lineer olmama değerinden büyük ise s-box güncellenir. Bu şekilde yineleme sayısı tamamlanana kadar devam edilir. Bu sayede lineer olmama değeri hızlı bir şekilde artırılmış olur. Bu çalışmada sadece 100 yinelemede lineer olmama değeri 107.5 olan bir s-box elde edilmiştir.

Tablo 1. Önerilen yaklaşımın sözde kodu

```

SboxÜretme ()
Kaotik bir harita seçilir ve haritanın giriş
parametreleri girilir
begin
KaotikSbox= []
i=0
while (i < 256)
çıktı= kaotik haritanın matematiksel modeline göre
bir çıktı değeri hesaplanır
değer= (çıktı*10000000) mod 256
if ( !içeriyor (KaotikSbox, değer) )
KaotikSbox[i]= değer
i++
end if
end while

```

```

KaotikSboxİyileştirme ()
İyileştirilmişKaotikSbox = []
Eski_LineerOlmama= Kaotik s-box yapısının lineer
olmama değeri
for (int i=0; i<100; i++)
a= Kaotik harita ile seçilmiş değer
b= Kaotik harita ile seçilmiş değer
Yer_Değiştir (KaotikSbox[a], KaotikSbox[b])
Yeni_LineerOlmama = Hesapla_LineerOlmama
(İyileştirilmişKaotikSbox)
if (Yeni_LineerOlmama > Eski_LineerOlmama)
Güncelle Sbox
end if
else
KaotikSbox= İyileştirilmişKaotikSbox
end else
end for
end

```

3. Analiz Sonuçları

Bir s-box 'ı analiz etmek için kullanılan çeşitli değerlendirme kriterleri mevcuttur. Bu çalışmada elde edilen s-box yapısının performansını değerlendirmek için, eşit olası giriş-çıkış XOR dağılımı, katı çığ kriteri (SAC), çıkış bitlerinden bağımsızlık kriteri (BIC) ve lineer olmama metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

3.1. Giriş-Çıkış XOR Dağılımı

XOR dağılımında, çıkışta elde edilen XOR değerleriyle, girişteki XOR değerlerinin aynı olasılığa sahip olması istenmektedir [44]. Diferansiyel saldırılara karşı direnci ölçmek için kullanılan bir kriterdir. Saldırı başarısını istatistiksel olarak değerlendirdiği için tabloda hesaplanan en yüksek değer olabildiğince küçük olması istenmektedir. Burada ideal değer AES algoritmasında olduğu gibi 4 olmalıdır. Önerilen algoritma ile elde edilen s-box yapısının XOR dağılım değerleri Tablo 2 'de verilmektedir. Bu değerlere bakıldığında en yüksek değer 12 olarak görülmektedir. Bu değer iyileştirilebilecek bir değerdir. Literatürdeki birçok çalışmanın bu noktada eksik olduğu söylenebilir. Çünkü bu çalışmada olduğu gibi çoğu çalışma lineer olmama değerini arttırmak için algoritmalar geliştirmektedir. Ayrıca bu noktadaki eksiklik gelecek çalışmalar için bir motivasyon olabilir.

Tablo 2. Önerilen s-box yapısı için XOR dağılımı değerleri

8	6	10	6	8	6	6	10	10	8	6	6	8	6	6	8
8	12	8	6	6	6	6	6	8	10	10	8	8	6	8	6
6	6	6	6	6	6	8	6	6	8	6	6	6	8	10	6
6	6	6	6	6	8	6	6	8	6	6	6	6	6	8	6
8	10	6	6	6	6	6	6	8	6	6	10	8	6	6	8
8	8	6	6	8	6	6	8	6	4	8	8	6	6	6	6
8	6	8	8	6	6	6	8	8	8	8	6	8	8	6	6
6	6	6	8	8	6	8	10	8	8	8	6	8	8	6	6
6	8	6	8	8	6	6	8	8	8	6	6	8	6	6	8
6	6	10	8	6	8	8	6	10	6	8	8	10	6	6	8
6	6	6	6	8	6	10	6	8	8	8	6	6	6	8	6
6	6	8	6	6	10	8	6	8	8	6	6	8	8	6	10
6	8	10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	4	8	6	8
6	8	6	6	6	6	8	6	6	6	8	6	6	6	6	6
6	6	6	6	6	10	6	6	6	6	8	8	6	8	8	6
6	6	6	6	6	6	6	8	6	8	8	6	8	8	8	0

Tablo 3. Önerilen s-box yapısı için SAC değerleri

0,5469	0,4531	0,5	0,5	0,4688	0,4531	0,5	0,4688
0,4688	0,4844	0,5	0,5156	0,4844	0,4531	0,4531	0,5469
0,5156	0,5469	0,5	0,4531	0,5625	0,5	0,5938	0,5
0,5312	0,5156	0,5	0,5312	0,4219	0,4844	0,5156	0,5312
0,4688	0,5625	0,5	0,5312	0,5781	0,4844	0,4375	0,5
0,4531	0,4844	0,5938	0,5	0,5469	0,5469	0,5312	0,5781
0,5469	0,4688	0,4844	0,5312	0,5156	0,4844	0,4531	0,4375
0,5	0,5	0,5469	0,5156	0,5	0,5156	0,4844	0,5469

3.2. Katı Çıg Kriteri (SAC - Strict Avalanche Criterion)

SAC, girişte meydana gelebilecek bir değişikliğin, çıkışta meydana getireceği olasılığı hesaplamaktadır [45]. Kriptografi, girişte meydana gelen bir bitlik bir değişikliğin, çıkıştaki bitlerin yarısının değişmesi gerektiğini söylemektedir. Yani girişteki bir bitlik değişiklik çıkıştaki çok sayıda ya da az sayıda biti etkilerse, bu durum saldırganlar için ipuçları sağlar. Bu yüzden SAC oldukça önemli bir metriktir. Yani SAC değerinin 0,5 veya buna yakın bir değer olması istenmektedir. Önerilen

algoritma ile elde edilen kaotik s-box yapısının SAC değerleri Tablo 3 'de verilmektedir. Bu değerlerin ortalamasına bakıldığında 0,5051 değeri ile bu kriterin sağlandığı görülmektedir.

3.3. Bitlerinden Bağımsızlık Kriteri (BIC - Bits Independence Criterion)

BIC, bitlerin birbirlerinden bağımsız olarak değişmesi gerektiğini belirtmektedir [45]. Bu kriterde hem lineer olmama değeri hesaplanmaktadır. Bu değer olabildiğince yüksek olması istenir. Hem de SAC değerini sağlaması gerekmektedir. BIC metriği için önerilen s-box yapısında SAC değerleri tablo 4 'de, lineer olmama değerleri ise tablo 5 'de verilmektedir. Burada SAC değerinin ortalama 0.4988 değeri ile 0.5 'e çok yakın olduğu için bu kriterin sağlandığı söylenebilir. Lineer olmama değerinin ise ortalama 103.57 olduğu hesaplanmıştır. Bu değer de yine XOR dağılımında olduğu gibi geliştirilebilecek bir sonuçtur. Burada ideal değer 112 'dir. Ancak çok az çalışma bu değere ulaşabilmiştir. Bu değer geliştirilmesi de yine gelecek çalışmalar için önemli bir motivasyon kaynağıdır.

Tablo 4. Önerilen s-box yapısı için BIC-SAC değerleri

0	0,5117	0,4688	0,5078	0,5098	0,5215	0,498	0,5059
0,5117	0	0,4746	0,5039	0,4961	0,4844	0,5	0,4941
0,4688	0,4746	0	0,4961	0,4844	0,5215	0,4922	0,5156
0,5078	0,5039	0,4961	0	0,5137	0,5059	0,5176	0,4707
0,5098	0,4961	0,4844	0,5137	0	0,4766	0,4961	0,5195
0,5215	0,4844	0,5215	0,5059	0,4766	0	0,5195	0,4922
0,498	0,5	0,4922	0,5176	0,4961	0,5195	0	0,4688
0,5059	0,4941	0,5156	0,4707	0,5195	0,4922	0,4688	0

Tablo 5. Önerilen s-box yapısı için BIC-Lineer olmama değerleri

0	106	102	106	100	106	106	106
106	0	106	102	104	108	106	98
102	106	0	106	100	104	106	92
106	102	106	0	108	100	110	104
100	104	100	108	0	100	104	104
106	108	104	100	100	0	102	104
106	106	106	110	104	102	0	100
106	98	92	104	104	104	100	0

3.4. Lineer Olmama

Blok şifreleme algoritmalarında genellikle lineer olmayan tek birim s-box yapısıdır. Bir s-box yapısının saldırılara karşı dirençli olabilmesi için bu değer olabildiğince yüksek olması gerekmektedir. AES algoritmasında kullanılan s-box yapısı en yüksek değer olan 112 lineer olmama değerine sahiptir. Önerilen s-box yapısının lineer olmama değerleri tablo 6 'da verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde önerilen yöntem ile elde edilen s-box 'da bu değer ortalama 107.5 olduğu görülmektedir. Bu değer 112 değerinden uzak olsa da literatürdeki özellikle kaos tabanlı çalışmaların çoğunu geride bırakmaktadır. Ancak bu değer de geliştirilebilecek bir değerdir.

Tablo 6. Önerilen s-box yapısı için lineer olmama değerleri

1	2	3	4	5	6	7	8
108	108	108	108	106	104	110	108

Önerilen algoritma ile elde edilen s-box yapısı tablo 7 'de verilmektedir. Bu s-box sadece 100 yineleme ve $O(n)$ notasyonunda elde edilmiştir. Bu durum, algoritmanın hızlı çalıştığını göstermektedir. Yani önerilen algoritma hızlı bir şekilde lineer olmama değerini arttırmaktadır. Önerilen s-box yapısının üstünlük sağladığı diğer s-box yapılarıyla performans karşılaştırması tablo 8 'de verilmiştir. Buradaki karşılaştırma sonuçları, 8-bit bir S-box 'ın lineer olmama, XOR dağılımı, SAC ve BIC özelliklerini göstermektedir. Önerilen yöntem, lineer olmama değeri bakımından bu çalışmalara üstünlük sağlamıştır. Diğer kriterler için çalışmaların çoğunda birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 7. Önerilen s-box yapısı

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	136	138	39	55	243	145	46	74	3	179	36	73	58	156	15	41
1	89	210	247	115	111	126	198	30	171	214	185	199	14	186	42	96
2	140	71	114	90	7	226	155	116	35	117	148	225	22	13	178	59
3	130	240	92	106	235	84	190	91	215	43	194	113	49	183	78	137
4	69	158	139	180	132	110	141	101	134	231	208	249	182	250	27	102
5	95	238	200	224	52	252	123	0	227	149	165	79	127	244	31	40
6	216	57	203	1	230	67	2	63	105	120	229	160	56	242	174	170
7	197	61	175	251	37	254	146	223	32	143	228	233	220	29	162	108
8	218	47	142	153	133	128	150	65	19	206	24	70	221	81	204	177
9	201	222	60	191	248	82	6	25	87	112	236	48	144	166	93	159
10	62	213	98	253	125	104	205	195	168	245	184	20	100	103	8	207
11	241	176	121	68	16	86	107	33	255	38	239	34	135	17	51	26
12	234	187	189	5	77	4	9	237	129	209	54	217	192	99	147	28
13	169	75	80	88	94	181	164	124	161	122	12	172	212	193	72	131
14	83	163	157	188	152	232	53	45	211	151	196	85	64	246	66	18
15	11	21	50	109	219	119	76	23	97	44	202	10	173	118	154	167

Tablo 8. Diğer s-box üretme yaklaşımlarıyla performans karşılaştırması

Yöntem	Lineer Olmama			SAC	BIC		max XOR
	ort	min	max	ort	SAC	Lineer O.	
Önerilen	107.5	104	110	0.5051	0.4988	103.57	12
[21]	107.25	106	110	0.501	-	107	6
[7]	107	106	108	0.496	0.4974	104.6	10
[12]	107	106	110	0.5015	0.5010	105.5	10
[35]	106.7	108	104	0.4976	0.504	103.5	10
[31]	106.5	108	106	0.4978	0.5003	104.2	10

[10]	106.5	104	110	0.5120	0.4984	105.2	10
[6]	106.5	104	108	0.5036	0.4995	105.85	10
[32]	106.2	108	106	0.501	0.5288	100	10
[38]	106.2	110	104	0.5039	0.5023	102.3	10
[34]	105.5	110	102	0.5010	0.4988	104.3	12
[36]	105.25	108	102	0.5037	0.4994	102.6	10
[33]	104.7	108	102	0.5034	0.4972	103.3	10
[13]	104	102	106	0.4980	0.4971	103.2	10
[29]	103.8	108	101	0.5058	0.4958	102.6	14
[30]	103.3	99	110	0.4987	0.4995	103.3	10

Tablo 8. Devamı.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, yüksek lineer olmama değerine sahip s-box yapıları üretmek için yeni ve hızlı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem özellikle kaos tabanlı s-box yapılarının lineer olmama değerini arttırmak için geliştirilmiştir. Çünkü kaos tabanlı s-box yapılarının lineer olmama değeri düşüktür ve bu durum çeşitli güvenlik zafiyetleri doğurmaktadır. Önerilen yöntem ile başlangıçta kaotik bir harita yardımıyla bir s-box üretilir. Daha sonra yine kaotik harita ile elde edilen iki değer yer değiştirilerek lineer olmama değeri kontrol edilir. Bu değer arttığında s-box güncellenir. Bu sayede lineer olmama değeri hızlı bir şekilde artırılır ve s-box daha güçlü hale gelir. Bu çalışmada sadece 100 yineleme sonucunda lineer olmama değeri 107.5 olan bir s-box elde edilmiştir. Bu değer bile literatürdeki birçok çalışmayı geride bırakmaktadır. Yineleme sayısı artırıldığında daha yüksek değerlere ulaşılabilir. Ayrıca önerilen yöntem ile elde edilen s-box yapısının diğer kriptografik gereksinimleri sağladığı da yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir. Önerilen yöntemin en önemli avantajlarından bir tanesi, çok sayıda kaotik harita olmasıdır. Farklı kaotik haritalarla hem başlangıç s-box yapısı oluşturulabilir hem de yer değiştirilecek elemanlar farklı kaotik haritalarla seçilebilir.

Kaynaklar

- [1] Van Oorschot, P. C., Menezes, A. J., Vanstone, S. A. Handbook of applied cryptography. CRC press, 1996.
- [2] J. Daemen and V. Rijmen, AES proposal: Rijndael, in Proc. 1st Adv. Encryption Conf., CA, USA, pp. 1-45, 1998.
- [3] Standard, D. E. Data encryption standard. Federal Information Processing Standards Publication, 112, 1999.
- [4] Artuğer, F., Özkaynak, F. SBOX-CGA: substitution box generator based on chaos and genetic algorithm. Neural Computing and Applications, 1-9, 2022.
- [5] Artuğer, F., Özkaynak, F. An effective method to improve lineer olmama değeri of substitution boxes based on random selection. Information Sciences, 576, 577-588, 2021.
- [6] Ahmad, M., Khaja, I. A., Baz, A., Alhakami, H. Alhakami, W. Particle swarm optimization based highly nonlinear substitution-boxes generation for security applications. IEEE Access, 8, 116132-116147, 2020.
- [7] Alhadawi, H. S., Lambić, D., Zolkipli, M. F., Ahmad, M. Globalized firefly algorithm and chaos for designing substitution box. Journal of Information Security and Applications, 55, 102671, 2020.
- [8] Ahmad, M., Al-Solami, E. Evolving dynamic S-boxes using fractional-order hopfield neural network based scheme. Entropy, 22(7), 717, 2020.
- [9] Alzaidi, A. A., Ahmad, M., Ahmed, H. S., Solami, E. A. Sine-cosine optimization-based bijective substitution-boxes construction using enhanced dynamics of chaotic map. Complexity, 2018, 2018.

- [10] Farah, T., Rhouma, R., Belghith, S. A novel method for designing S-box based on chaotic map and teaching-learning-based optimization. *Nonlinear dynamics*, 88(2), 1059-1074, 2017.
- [11] Tian, Y., Lu, Z. Chaotic S-box: Intertwining logistic map and bacterial foraging optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017.
- [12] Ahmad, M., Bhatia, D., Hassan, Y. A novel ant colony optimization based scheme for substitution box design. *Procedia Computer Science*, 57, 572-580, 2015.
- [13] Chen, G. A novel heuristic method for obtaining S-boxes. *Chaos, Solitons & Fractals*, 36(4), 1028-1036, 2008.
- [14] Zamli, K. Z., Kader, A., Din, F., Alhadawi, H. S. Selective chaotic maps Tiki-Taka algorithm for the S-box generation and optimization. *Neural Computing and Applications*, 1-18, 2021.
- [15] Zamli, K. Z. Optimizing S-box Generation based on the Adaptive Agent Heroes and Cowards Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 115305, 2021.
- [16] Alhadawi, H. S., Majid, M. A., Lambić, D., Ahmad, M. A novel method of S-box design based on discrete chaotic maps and cuckoo search algorithm. *Multimedia Tools and Applications*, 80(5), 7333-7350, 2021.
- [17] Wei, Y., Pasalic, E., Zhang, F., Hodžić, S. Efficient probabilistic algorithm for estimating the algebraic properties of Boolean functions for large n. *Information Sciences*, 402, 91-104, 2017.
- [18] Örs, S. B., Preneel, B., Verbauwhede, I. Side-channel analysis attacks on hardware implementations of cryptographic algorithms. *Wireless Security and Cryptography-Specifications and Implementations*, 213-247, 2007.
- [19] Hussain, I. True-chaotic substitution box based on Boolean functions. *The European Physical Journal Plus*, 135(8), 1-17, 2020.
- [20] Malik, M. S. M., Ali, M. A., Khan, M. A., Ehatisham-Ul-Haq, M., Shah, S. N. M., Rehman, M., Ahmad, W. Generation of highly nonlinear and dynamic AES substitution-boxes (S-boxes) using chaos-based rotational matrices. *IEEE Access*, 8, 35682-35695, 2020.
- [21] Arshad, B., Siddiqui, N., Hussain, Z., Ehatisham-ul-Haq, M. A Novel Scheme for Designing Secure Substitution Boxes (S-Boxes) Based on Mobius Group and Finite Field. *Wireless Personal Communications*, 1-22, 2022.
- [22] Razaq, A., Ullah, A., Alolaiyan, H., Yousaf, A. A novel group theoretic and graphical approach for designing cryptographically strong nonlinear components of block ciphers. *Wireless Personal Communications*, 116(4), 3165-3190, 2021.
- [23] Ahmad, M., Al-Solami, E. Improved 2D Discrete Hyperchaos Mapping with Complex Behaviour and Algebraic Structure for Strong S-Boxes Generation. *Complexity*, 2020.
- [24] Khan, M., Shah, T. A novel image encryption technique based on Hénon chaotic map and S8 symmetric group. *Neural Computing and Applications*, 25(7), 1717-1722, 2014.
- [25] Siddiqui, N., Yousaf, F., Murtaza, F., Ehatisham-ul-Haq, M., Ashraf, M. U., Alghamdi, A. M., Alfakeeh, A. S. A highly nonlinear substitution-box (S-box) design using action of modular group on a projective line over a finite field. *Plos one*, 15(11), e0241890, 2020.
- [26] Razaq, A., Ahmad, M., Yousaf, A., Alawida, M., Ullah, A., Shuaib, U. A group theoretic construction of large number of AES-like substitution-boxes. *Wireless Personal Communications*, 122(3), 2057-2080, 2022.
- [27] Artuğer, F., Özkaynak, F. A novel method for performance improvement of chaos-based substitution boxes. *Symmetry*, 12(4), 571, 2020.
- [28] Artuğer, F., Özkaynak, F. A method for generation of substitution box based on random selection. *Egyptian Informatics Journal*, 23(1), 127-135, 2022.
- [29] Tang, G., Liao, X. A method for designing dynamical S-boxes based on discretized chaotic map. *Chaos, solitons & fractals*, 23(5), 1901-1909, 2005.
- [30] Tang, G., Liao, X., Chen, Y. A novel method for designing S-boxes based on chaotic maps. *Chaos, Solitons & Fractals*, 23(2), 413-419, 2005.
- [31] Lambić, D. S-box design method based on improved one-dimensional discrete chaotic map. *Journal of Information and Telecommunication*, 2(2), 181-191, 2018.
- [32] Lambić, D. A new discrete-space chaotic map based on the multiplication of integer numbers and its application in S-box design. *Nonlinear Dynamics*, 100(1), 699-711, 2020.
- [33] Özkaynak, F. An analysis and generation toolbox for chaotic substitution boxes: A case study based on chaotic labyrinth rene thomas system. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 44(1), 89-98, 2020.
- [34] Belazi, A., Abd El-Latif, A. A. A simple yet efficient S-box method based on chaotic sine map. *Optik*, 130, 1438-1444, 2017.
- [35] Ye, T., Zhimao, L. Chaotic S-box: Six-dimensional fractional Lorenz-Duffing chaotic system and O-shaped path scrambling. *Nonlinear Dynamics*, 94(3), 2115-2126, 2018.
- [36] Özkaynak, F. On the effect of chaotic system in performance characteristics of chaos based s-box designs. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 550, 124072, 2020.
- [37] Khan, M., Shah, T., Gondal, M. A. An efficient technique for the construction of substitution box with chaotic partial differential equation. *Nonlinear Dynamics*, 73(3), 1795-1801, 2013.

- [38] Cavuşoğlu, Ü., Zengin, A., Pehliyan, I., Kaçar, S. A novel approach for strong S-Box generation algorithm design based on chaotic scaled Zhongtang system. *Nonlinear dynamics*, 87(2), 1081-1094, 2017.
- [39] Liu, G. Designing S-box based on 4D-4wing hyperchaotic system. *3D Research*, 8(1), 1-9, 2017.
- [40] Özkaynak, F., Özer, A. B. A method for designing strong S-Boxes based on chaotic Lorenz system. *Physics Letters A*, 374(36), 3733-3738, 2010.
- [41] Khan, M., Shah, T. An efficient construction of substitution box with fractional chaotic system. *Signal, Image and Video Processing*, 9(6), 1335-1338, 2015.
- [42] Özkaynak, F., Çelik, V., Özer, A. B. A new S-box construction method based on the fractional-order chaotic Chen system. *Signal, Image and Video Processing*, 11(4), 659-664, 2017.
- [43] Tanyildizi, E., Özkaynak, F. A new chaotic S-box generation method using parameter optimization of one dimensional chaotic maps. *IEEE Access*, 7, 117829-117838, 2019.
- [44] Biham, E., Shamir, A. Differential cryptanalysis of DES-like cryptosystems. *Journal of Cryptology*, 4(1), 3-72, 1991.
- [45] Webster, A. F., Tavares, S. E. On the design of S-boxes. In *Conference on the theory and application of cryptographic techniques* (pp. 523-534). Springer, Berlin, Heidelberg, 1985.

MONEL 400 NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMIN TORNALANMASINDA OLUŞAN KESME KUVVETİ BİLEŞENLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ

Barış ÖZLÜ¹, Levent UĞUR^{2*}

¹ Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Aksaray, 68000, Türkiye

²Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, 05100, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 09.08.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 25.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1340057

ÖZET

Yapılan çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Birinci Bölüm, Monel 400 alaşımının farklı kesme parametrelerinde tornalanması sonucu kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenlerine ve esas kesme kuvvetine etkileri değerlendirilmiştir. İkinci bölüm ise farklı kesme parametrelerinde yapılan tornalama deneylerinde ölçülen kesme kuvveti bileşenlerinin Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle tahmininden oluşmaktadır. Çalışmada kesme parametresi olarak üç farklı kesme hızı (60-85-110 m/dak), üç farklı ilerleme miktarı (0,05-0,07-0,09 mm/dev) ve üç farklı kesme derinliği (0,4-0,8-1,2 mm) seçilmiştir. Kesme kuvveti bileşenlerinin (Fz, Fx ve Fy) ölçümü A KISTLER 9257 B tipi piezoelektrik dinamometre ile gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvveti bileşenlerinin tahmininde YSA yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, Monel 400 alaşımının tornalanmasında en düşük kesme kuvveti bileşenleri 0,4 mm kesme derinliğinde, 110 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme miktarında Fz:227,48 N, Fy:154 N ve Fx:99,16 N ölçülmüştür. Kesme hızının artması ile esas kesme kuvveti değerleri azalırken, ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin artırılması esas kesme kuvveti değerlerinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. YSA yöntemini ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında YSA yöntemini ile yapılan tahminlerin yüksek doğruluk içerdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tornalama, Monel 400 Alaşımı, Kesme Kuvveti Bileşenleri, Yapay Sinir Ağı.

EVALUATION OF CUTTING FORCE COMPONENTS IN TURNING OF MONEL 400 NICKEL BASED SUPERALLOY AND MODELING WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

The study consists of two parts. The first part evaluates the effects of cutting parameters on the cutting force components and the actual cutting force as a result of turning Monel 400 alloy at different cutting parameters. The second part consists of the prediction of the cutting force components measured in turning tests at different cutting parameters by Artificial Neural Networks (ANN) method. Three different cutting speeds (60-85-110 m/min), three different feed rates (0.05-0.07-0.09 mm/rev) and three different depths of cut (0.4-0.8-1.2 mm) were selected as cutting parameters. The measurement of the cutting force components (Fz, Fx and Fy) was carried out with a KISTLER 9257 type B piezoelectric dynamometer. ANN method was used to predict the shear force components. As a result, the lowest cutting force components Fz:227.48 N, Fy:154 N and Fx:99.16 N were measured at 0.4 mm depth of cut, 110 m/min cutting speed and 0.05 mm/rev feed rate for turning Monel 400 alloy. When the cutting force components predicted by ANN method and experimental results are analyzed, it is seen that the predictions made by ANN method have high accuracy.

Keywords: Turning, Monel 400 Alloy, Cutting Force Components, Artificial Neural Network.

1. Giriş

Nikel alaşımlar, yüksek korozyon direnci, yüksek gerilme mukavemeti, yüksek sıcaklıklarda dayanım kabiliyeti ve hafiflik gibi özellikleri nedeni ile günümüzde havacılık, nükleer, denizcilik,

e-posta¹ : barisozlu@aksaray.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8594-1234>

* e-posta² : levent.ugur@amasya.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3447-3191> (Sorumlu Yazar)

biyomedikal ve otomobil sektörlerinde kullanılmaktadır [1-3]. Bu alaşımlar yüksek sertlik, düşük elastik modül, yüksek sıcaklıkta takım malzemesiyle kimyasal reaktivite ve düşük termal iletkenlik gibi özellikleri nedeni ile işlenmesi zor malzemeler olarak bilinirler. Ayrıca nikel bazlı alaşımlarda, ikinci faz parçacıklarının oluşumu alaşımları daha güçlü, aşındırıcı ve işlenmesi zor hale getirmektedir [3, 4]. Nikel bazlı alaşımlardan biri olan Monel 400 özellikle sıfırın altındaki sıcaklıklarda bile iyi mekanik özelliklere sahiptir [5].

Nikel esaslı malzemelerin endüstride kullanılabilir hale getirilmesi için konvansiyonel yöntemlerle işlenmesi gerekmektedir. Ancak bu işlemler sırasında hızlı takım aşınması, yüksek kesme kuvveti ve yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri gibi birçok problemlerle karşılaşmaktadır [6]. Bu nedenle literatürde nikel esaslı süper alaşımların işlenmesi üzerine yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Akgün, Monel K500 alaşımının sıcak işlenmesinde kesme sıcaklığını ve talaş oluşumunu nümerik olarak incelemiştir. Sonuç olarak sıcak işleme koşullarında kesme kuvvetinin azaldığını ve sürekli talaş oluşumunu gözlemlemiştir [7]. Ross ve arkadaşları, Monel 400'ün tormalanmasında farklı soğutma koşullarının tribolojik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkilerini incelemiştir. Sonuç olarak, CMQL soğutmanın sürtünmeyi azalttığı mümkün ve en iyi yüzeyi yaratan en iyi etkili soğutma tekniği olduğunu ifade etmişlerdir. CMQL koşulu, kuru, MQL ve CO2 koşullarına kıyasla yanak aşınmasının azaldığını tespit etmişlerdir [8]. Pawade ve arkadaşları, Inconel 718 tormalanmasında kesici takım geometrisinin ve işleme parametrelerinin kesme kuvvetine ve yüzey bütünlüğüne etkilerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak radyal ve ilerleme kuvveti bileşenlerinin hemen hemen eşit olduğu ve esas kesme kuvveti bileşeninin, ilerleme ve radyal kuvvet bileşenlerinin iki ile üç katı olduğunu görülmüştür. Bilenerek artı pahlı kesici kenarlı kesici takımların, kesme kuvvetlerinin önemli ölçüde azaltılmasında etkili olduğunu gözlemlemiştir. Kesme kuvvetini artıran kesici takımlarda daha geniş yüzey hasarları yanı sıra zayıf yüzey pürüzlülüğüne neden olduğunu bildirmişlerdir [9]. Özlü ve Uğur yaptıkları çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının tormalama kesme parametreleri ile kesme kuvveti arasındaki ilişki sayısal ve istatistiksel olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak, düşük kesme hızlarında, yüksek ilerleme miktarında ve talaş derinliğinde kesme kuvvetinin arttığını bildirmişlerdir. İstatistiksel analizler sonucu kesme kuvveti üzerine en etkin kesme parametresinin kesme derinliğinin olduğunu ifade etmişlerdir [10]. Dhananchezian yaptığı çalışmada, kaplamasız ve TiAlN kaplı takımlarla Monel 400 alaşımının farklı kesme parametrelerinde ve kesme boylarında yapılan tormalama işleminde yüzey pürüzlülüğü değişimi incelemiştir. Monel 400 alaşımının TiAlN kaplamalı kesici takımla 14 m/dak kesme hızında, 0,122 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm kesme derinliğinde ve 17-25 mm işleme boyunda tormalanması sonucu en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,667 μm olarak ölçülmüştür. TiAlN kaplı kesici takım yapılan deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, kaplamasız kesici takımla yapılan deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerine göre önemli ölçüde azaldığını bildirmiştir [11]. Dhananchezian yaptığı başka bir çalışmada, karbür kesici uç ile Ti-6Al-4V, Monel 400 ve Inconel 600 alaşımlarının kuru tormalanmasında kesme sıcaklığına, yüzey pürüzlülüğüne, talaş kalınlığına, talaş formuna ve kesici takım aşınmasına kesme parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Bu üç malzemenin farklı kesme parametrelerinde tormalanması sonucu en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,723 μm ile Ti-6Al-4V alaşımında elde edilmiştir. Diğer alaşımlara göre en yüksek talaş kalınlığı ve testere dişi formunun Monel 400 alaşımında elde edildiği rapor etmiştir [12]. Hanief ve Chao yaptıkları çalışmada, Monel-400 alaşımının tormalanmasında kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve iş parçası sıcaklığının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerine etkilerinin modellenmesi ve optimizasyonu amaçlamıştır. Önerilen modellemenin yüzey pürüzlülüğünü ve yanak aşınmasını tahmin etme konusunda yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Kesme hızı ve ilerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalırken, sıcaklık ve kesme derinliğinin artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğindeki artış yanak aşınmasının artmasına neden olduğu görülmüştür. Sıcaklığın belli bir sınıra kadar artması takım aşınmasını azaltmış, ancak dahada artan sıcaklığın yanak aşınmasını artırdığı tespit edilmiştir. Ancak sıcaklığın belirli bir sınıra kadar artması takım aşınmasını azaltmış, daha sonra sıcaklığın artmasıyla birlikte yanak aşınmasını artırdığı rapor edilmiştir [13]. Dhananchezian ve Rajkumar yaptıkları çalışmada, kaplamasız ve TiAlN kaplı tungsten karbür kesici takımlarla Monel 400 alaşımının kuru koşullar altında değişen kesme hızlarında tormalanması sırasında kesme performansını araştırmışlardır. Kesici takım performansını incelemek için kesme kuvveti, kesme

sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve talaş morfolojisinin, çeşitli kesme hızlarında takım aşınmasıyla ilişkili olduğunu bildirmişlerdir. TiAlN kaplı kesici takımlar, kaplamasız kesici takımlara göre daha düşük kesme sıcaklığına ve kesme kuvvetine neden olduğu görmüşlerdir. Bununda kesme hızı ile birlikte daha iyi yüzey kalitesi ve daha az kesici uç aşınmasına yol açacağını rapor etmişlerdir[14]. Nikel esaslı farklı alaşımların tormalanması, frezelenmesi ve delinmesi gibi farklı işleme teknikleri ile incelenmiş çalışmalar vardır [15-20].

Son yıllarda nikel esaslı alaşımların işlenmesi üzerinde deneysel, nümerik ve istatistiksel çalışmaların giderek arttığı görülmüştür. Ancak yapılan literatür incelenmesinde Monel 400 alaşımının tormalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenlerine ve esas kesme kuvvetine etkilerinin değerlendirildiği ve elde edilen verilerin YSA ile tahmin edildiği çalışmaların yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada, Monel 400'ün tormalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenleri ve esas kesme kuvveti üzerine etkileri değerlendirilmiş ve elde edilen kesme kuvveti bileşenleri yapay sinir ağları ile modellenmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1. İş Parçası Malzemesi

Bu çalışmada, üstün mekanik özellikleri nedeni ile özellikle havacılık, nükleer, denizcilik, biyomedikal ve otomobil sektörlerinde kullanılan ve işlenmesi zor malzeme sınıfına giren Monel 400 alaşımının iş parçası olarak seçilmesinde büyük etkisi olmuştur. Bu nedenle tormalama deneylerinde iş parçası olarak 35 mm çapında ve 270 mm uzunluğunda Monel 400 alaşımı kullanılmıştır. Monel 400 nikel esaslı süper alaşımın kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca işlenebilirlik deneylerinde sağlıklı sonuçlar alabilmek için Monel 400 alaşımının üretiminde iş parçasının yüzeyinde oluşabilecek oksitler ve dekarbürizasyon bölgeleri 1 mm talaş kaldırılarak temizlenmiştir.

Çizelge 1. Monel 400 nikel esaslı süper alaşımın kimyasal kompozisyonu.

Malzeme	Elementler						
	Ni	Fe	C	Mn	Si	S	Cu
Monel 400	64,95	1,42	0,0001	0,71	0,15	0,01	32,37

2.2. Takım Tezgâhı, Kesici Takım ve Kesme Parametreleri

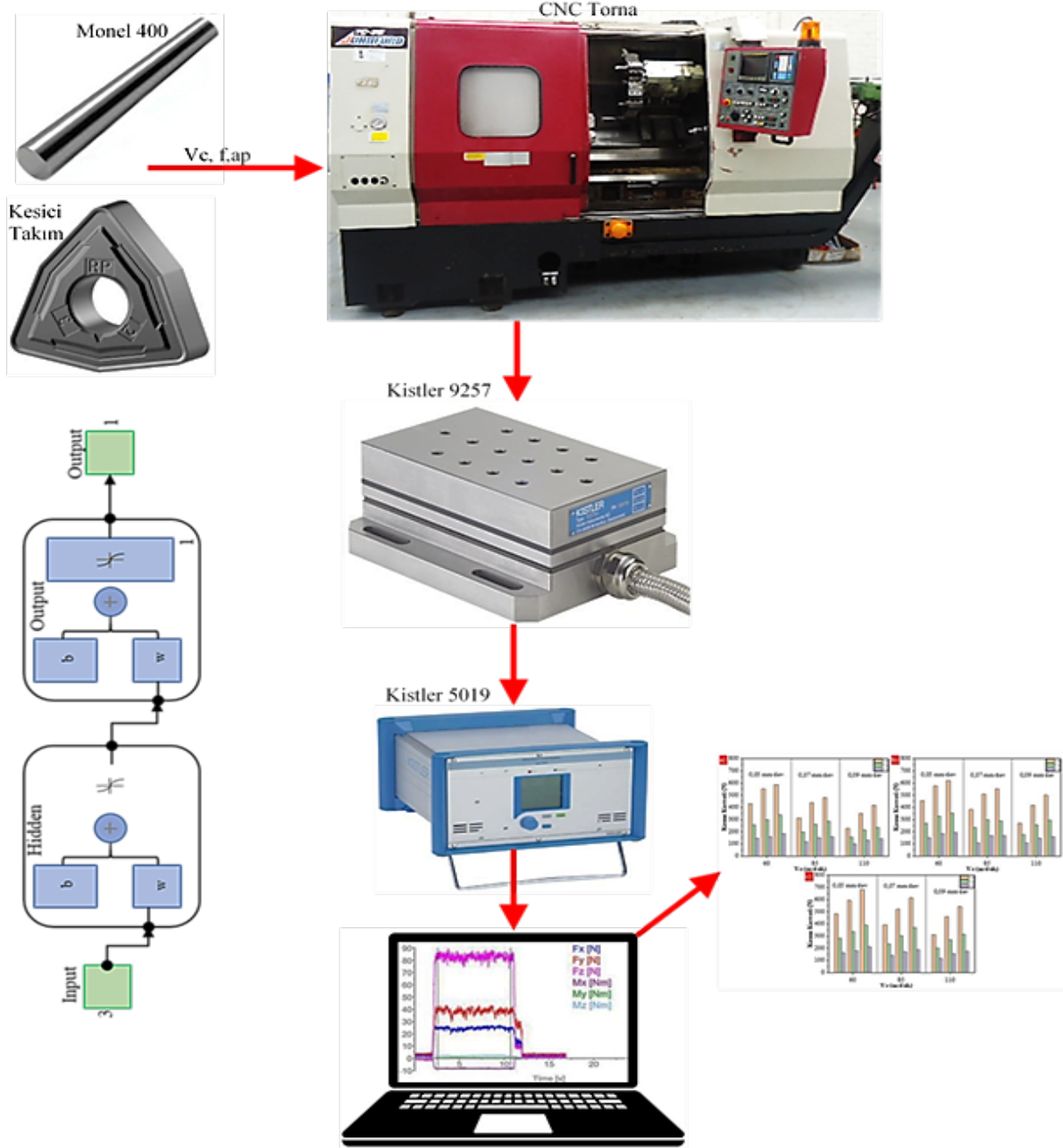
Tormalama deneyleri, 10 kW motor gücüne ve iş mili maksimum 3500 dev/dk çıkabilen Johnford marka TC35 model CNC torna tezgâhında yapılmıştır. Deneylerde Kennametal KCU10 kalite ve WNMG080408FN ISO tanımlamasında kaplamalı karbür kesici takım tercih edilmiştir. Tüm kesici takım uçlarının köşe yarıçapı 0,8 mm'dir. Kesici takımların bağlanmasında DWLNR 2525 M08 KC04 takım tutucu seçilmiştir. Her test için yeni bir kesici uç kullanılmıştır. Monel 400 nikel esaslı süper alaşımın tormalanması için seçilen kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kesme parametreleri ve seviyeleri

Semboller	Kesme Parametreleri	Birimler	Seviyeler		
			I	II	III
Vc	Kesme hızı	m/dak	60	85	110
f	İlerleme miktarı	mm/dev	0,05	0,07	0,09
ap	Kesme derinliği	mm	0,4	0,8	1,2

2.3. Kesme Kuvveti Ölçümü

Tornalama deneyleri boyunca meydana gelen kesme kuvveti bileşenlerini (F_z , F_x ve F_y) aynı anda ölçebilen A KISTLER 9257 B tipi piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır. Dinamometreden gelen sinyaller RS32 veri aktarım kablosu ile veriler KISTLER 5070A amplifier aktarılmış ve son olarak veriler DynoWare yazılımı ile sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Bu çalışma için hazırlanan deney düzeneği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği

2.4. Yapay Sinir Ağları

İşlenebilirlik çalışmalarında, kesme parametrelerinin deney sonuçları üzerine etkilerinin araştırılmasında gereken işleme süreçlerinde tahmine dayalı modeller faydalı araçlar olarak değerini

kanıtlamıştır. YSA incelenen kesme parametreleri aralığında kesme parametreleri için deney sonuçlarının tahmininde kullanılan en bilinen tahmine dayalı modellerden biridir. Özellikle YSA birçok çalışmada araştırmacılar tarafından tornalama deneylerinde sürecin modellenmesinde başarıyla kullanılmıştır [21-23].

3. Sonuçlar

Nikel alaşımlı Monel 400 alaşımı için farklı kesme parametreleri ile tornalama deneyleri yapılmış ve kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenlerine (F_z , F_y ve F_x) ve esas kesme kuvvetine etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca YSA ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonrası elde edilen kesme kuvveti bileşenleri ile YSA ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri Tablo 3’de verilmiştir.

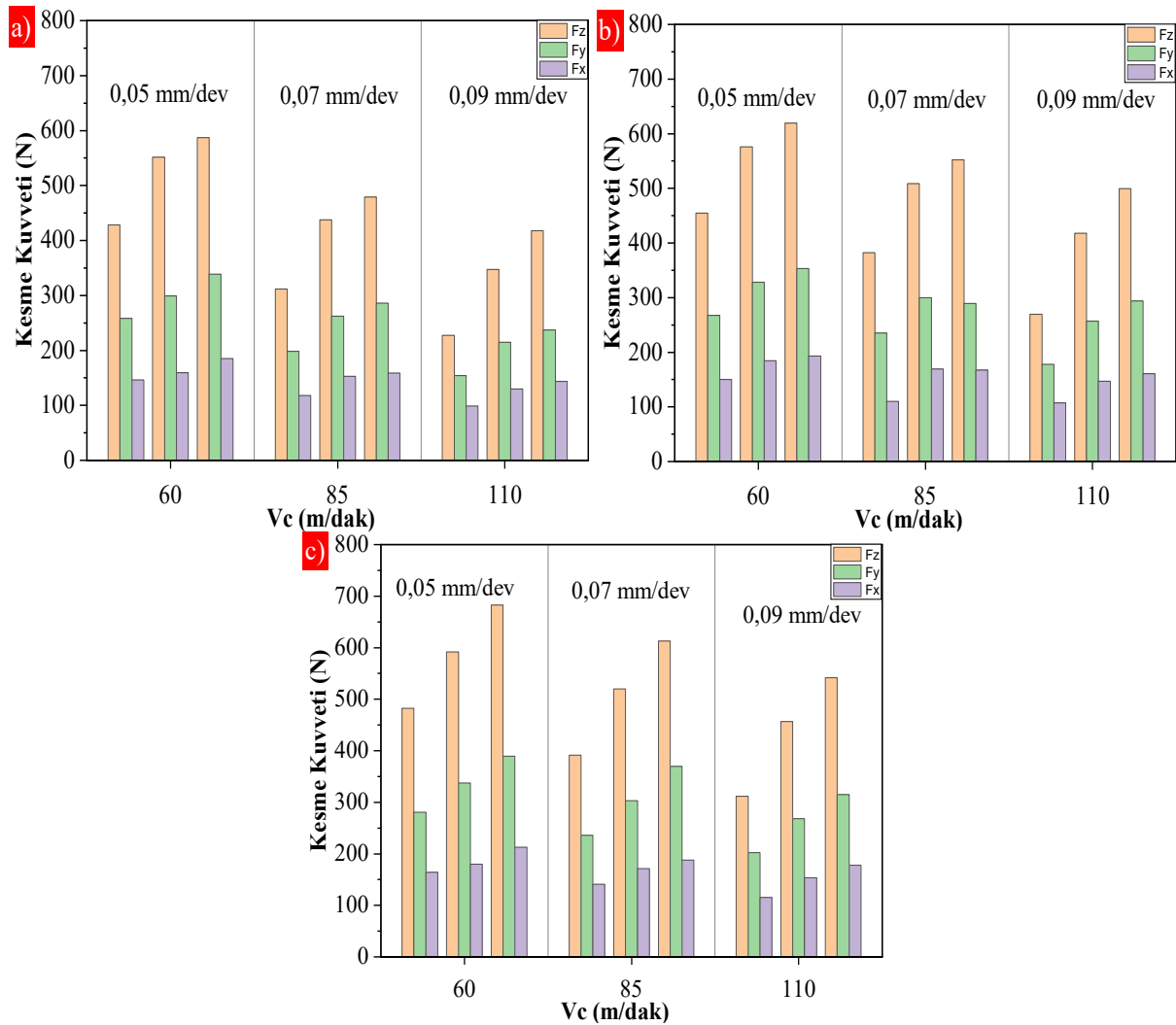
Tablo 3. Deneysel ve YSA ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri

Deney No	ap	Vc	f	F_z (N)	F_y (N)	F_x (N)	YSAF _z (N)	YSAF _y (N)	YSAF _x (N)
1	0,4	60	0,05	428,44	258,48	146,40	429,33	259,16	139,96
2	0,4	60	0,07	551,86	299,19	159,26	549,53	301,38	165,87
3	0,4	60	0,09	587,19	338,86	185,09	549,91	288,90	169,42
4	0,4	85	0,05	311,88	198,20	118,26	308,59	193,02	116,90
5	0,4	85	0,07	437,49	262,01	152,66	439,48	266,29	151,80
6	0,4	85	0,09	479,12	285,82	159,07	480,61	279,34	158,12
7	0,4	110	0,05	227,48	154,01	99,16	243,97	162,45	104,29
8	0,4	110	0,07	347,36	214,94	130,13	343,70	212,39	131,67
9	0,4	110	0,09	417,56	237,04	143,68	418,32	240,32	144,11
10	0,8	60	0,05	454,71	267,62	149,97	455,29	267,42	152,37
11	0,8	60	0,07	576,16	328,34	184,33	577,77	327,97	178,10
12	0,8	60	0,09	619,26	352,89	193,11	620,12	351,58	188,13
13	0,8	85	0,05	382,44	235,48	109,90	379,85	235,02	125,50
14	0,8	85	0,07	508,63	299,58	169,45	509,33	295,70	163,98
15	0,8	85	0,09	552,33	289,43	167,37	548,56	297,04	173,87
16	0,8	110	0,05	269,28	177,90	107,61	271,59	183,44	106,95
17	0,8	110	0,07	417,75	257,14	146,73	418,51	253,70	141,29
18	0,8	110	0,09	499,21	293,87	161,09	486,21	261,27	158,06
19	1,2	60	0,05	482,67	280,60	163,96	482,93	279,64	163,44
20	1,2	60	0,07	591,76	337,14	180,23	591,01	340,20	181,33
21	1,2	60	0,09	682,85	389,69	213,00	657,78	378,90	197,48
22	1,2	85	0,05	391,49	236,01	141,16	420,75	221,39	132,92
23	1,2	85	0,07	519,88	303,20	171,26	521,88	303,08	170,82
24	1,2	85	0,09	613,16	369,84	187,58	612,69	361,80	191,16
25	1,2	110	0,05	311,86	202,19	115,26	311,62	200,58	111,43
26	1,2	110	0,07	456,38	268,45	153,39	454,27	272,34	152,07
27	1,2	110	0,09	541,83	315,18	177,75	543,50	313,69	179,17

3.1. Kesme Kuvveti Bileşenleri

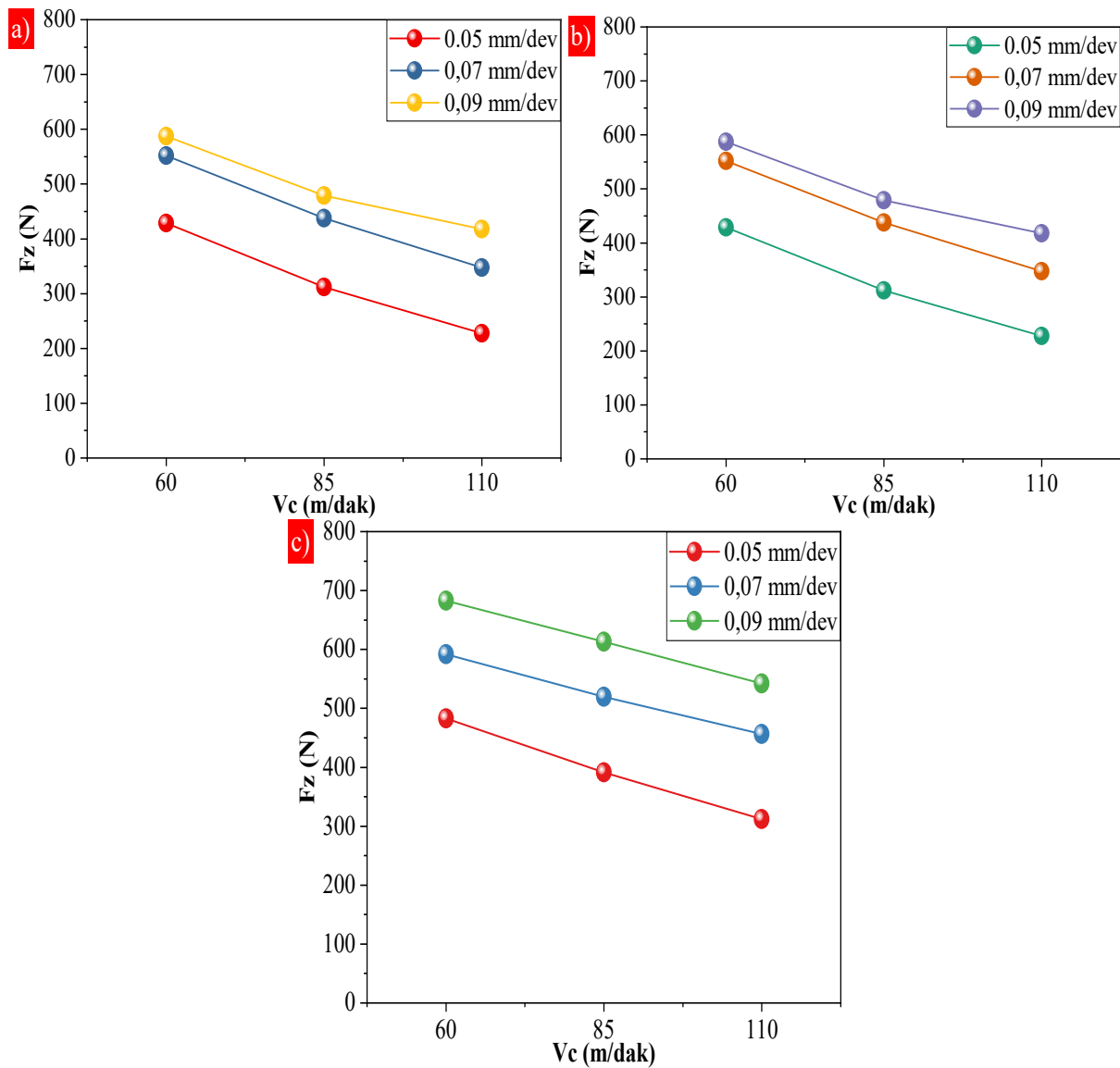
Nikel esaslı süper alaşımların işlenmesi esnasında oluşan yüksek kesme kuvvetleri ve sürtünme bu malzemelerin işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple bu malzemelerin işlenmesi esnasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin ölçülmesi işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde büyük önem taşımaktadır [24, 25]. Bu nedenle yapılan çalışmada Monel 400 nikel esaslı süper alaşımın üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme miktarı ve üç farklı kesme derinliğinde yapılan tornalama deneyleri sonucu ölçülen kesme kuvveti bileşenleri ve esas kesme kuvvetleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Tornalama deneyleri sonucu kesme parametrelerine bağlı kesme kuvveti bileşenlerindeki değişim Şekil 2’de verilmiştir. Tornalama deneyleri sonucu oluşan kesme kuvveti bileşenleri arasında teorik olarak $F_z:F_y:F_x=4:2:1$ gibi bir ilişkinin olduğu ifade edilmiştir. Bu eşitliğe göre esas kesme kuvveti (F_z), ilerleme kuvvetinin (F_y) iki katı iken pasif kuvvetin (F_x) dört katına eşittir [26]. Yapılan çalışmada elde edilen kesme kuvveti bileşenlerinden esas kesme kuvveti 227,48-682,85 N, ilerleme kuvveti 154,01-389,69 N ve pasif kuvvetin 99,16-213 N arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlarda daha önce Ahmed ve arkadaşlarının [27], Vadgeri ve arkadaşlarının [28], Jialong ve arkadaşlarının [29] yaptıkları çalışmalarla paralellik göstermektedir. Genel olarak Şekil 2’de kesme hızının artması ile bütün kesme kuvveti bileşenlerinin azaldığı görülmüştür. Ancak ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin artırılması kesme kuvveti bileşenlerinin artmasına neden olmuştur.



Şekil 2. Monel 400 süper alaşımının tornalanmasında ölçülen kesme kuvveti bileşenleri; a) $a_p=0,4$ mm, b) $a_p=0,8$ mm ve c) $a_p=1,2$ mm

Kesme kuvveti bileşenlerinden kesme hızı vektörü doğrultusunda olan esas kesme kuvveti genellikle oluşan en yüksek kesme kuvveti bileşenidir. Bu nedenle işlenebilirlik çalışmalarında kesme kuvvetinin değerlendirilmesinde birincil düzeyde önem taşımaktadır. Yapılan çalışmada kesme parametrelerine bağlı esas kesme kuvvetinin değişimi Şekil 3’de sunulmuştur. Yapılan çalışmada kesme parametrelerine bağlı esas kesme kuvveti 227,48-682,85 N arasında değişmektedir. Şekil 3a’da 0,4 mm kesme derinliğinde 60 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme miktarında esas kesme kuvveti 428,44 N ölçülmüştür. İlerleme miktarının sırası ile 0,07 mm/dev ve 0,09 mm/dev çıkarılması ile esas kesme kuvvetinde sırası ile %28,8 ve %37 oranlarında artış olmuştur. İlerleme miktarının 0,05 mm/dev’de sabit tutarak kesme hızının sırası ile 85 m/dak ve 110 m/dak çıkarılması ile esas kesme kuvvetlerinde sırası ile %37,37 ve % 88,34 oranlarda azalmanın olduğu görülmüştür. 0,07 mm/dev ve 0,09 mm/dev ilerleme miktarlarında kesme hızının 60 m/dak’dan 110 m/dak çıkarılmasında benzer şekilde esas kesme kuvveti değerlerinde azalmanın olduğu görülmüştür. Şekil 3b-c’de kesme derinliğinin 0,8 mm ve 1,2 mm çıkarılması ile esas kesme kuvvetlerinde sırası ile ortalama %13 ve %21,2 oranlarında artışın olduğu görülmüştür.

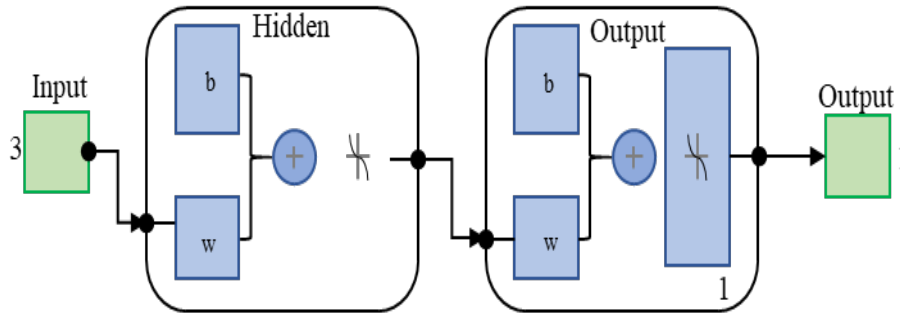


Şekil 3. Monel 400 süper alaşımının tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvveti;
a) $a_p=0,4$ mm, b) $a_p=0,8$ mm ve c) $a_p=1,2$ mm

Yapılan çalışmada, elde edilen bileşke kuvvet değerleri (Şekil 2) ve esas kesme kuvveti (Şekil 3) değerlerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Kesme hızının artması ile kesme kuvveti bileşenlerinin ve esas kesme kuvvetinin azalması kesme bölgesindeki ısının yükselmesi iş parçasının kayma dayanımının azalması ve takım/talaş ara yüzeyi temas alanının azalması ile açıklanabilir [26, 30, 31]. İlerleme miktarının artışına bağlı kesme kuvveti bileşenlerinin ve esas kesme kuvvetinin artması literatürde yaygın olarak karşılan bir durumdur [32-34].

3.2.Yapay Sinir Ağı Modeli

YSA, biyolojik sinir sistemlerinden ilham alarak tasarlanan makine öğrenimi modelleridir. YSA'lar doğrusal/doğrusal olmayan sistemlerdeki bilgi akışlarını işleyebildikleri için çok yönlü uygulamalarda kullanılmıştır [35]. Bu uygulamalardan biri de imalat sektörüdür. YSA yaklaşımı, yüzey pürüzlülüğü ve giriş parametreleri arasında doğrusal olmayan yüksek bir korelasyon kurmak için deneysel bir veri setinden öğrenme yeteneğine sahiptir [36]. Talaşlı imalatta çok çeşitli kesme parametreleri kullanıldığı için, kesme kuvvetlerinin kesme parametrelerine karşı tepki yüzey grafiğinin oldukça doğrusal olmayan özellikler göstermesi beklenir. Bu nedenle bu çalışma, kesme parametrelerine (kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği) dayalı olarak kesme kuvveti bileşenlerini (F_z , F_y ve F_x) modellemek ve tahmin etmek için bir YSA tekniği kullanılmıştır. Genel bir YSA'nın basit birçok katmanlı mimarisi Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Şematik ANN diyagramı [37]

Tablo 4. Farklı yapıya sahip YSA modellemesi kullanılarak optimum YSA parametrelerinin belirlenmesine yönelik istatistiksel veriler

Öğrenme Algoritması	Aktivasyon Fonksiyonu	Nöron Sayısı	Eğitim	Test	En İyi Doğrulama Performansına Sahip MSE
Trainlm	logsig	15	0,97421	0,98965	315,548
		25	0,98799	0,95514	569,875
		50	0,95025	0,60787	756,654
		100	0,88654	0,67889	896,548
		125	0,71685	0,53535	279,355
	purelin	15	0,97582	0,98092	3548,581
		25	0,89554	0,85616	2341,696
		50	0,9536	0,97235	6523,657
		100	0,9687	0,97781	1554,548
		125	0,9290	0,92543	500,549
	tansig	15	0,99715	0,99748	18,900
		25	0,99430	0,99254	10,548
		50	0,99525	0,99125	5,556
		100	0,99901	0,99841	0,055

		125	0,99678	0,99485	12,549
		15	0,52700	0,84563	3729,396
		25	0,38962	0,98331	1794,216
	logsig	50	0,02782	0,92284	4089,915
		100	0,07196	0,33847	3938,887
		125	0,69591	0,81152	3887,087
		15	0,99935	0,99151	88,333
		25	0,99329	0,99087	3917,198
	purelin	50	0,99824	0,97685	26,960
		100	0,99682	0,99620	48,609
		125	0,99900	0,99650	420,359
		15	0,96312	0,99724	4098,761
		25	0,96634	0,94695	6823,524
	tansig	50	0,97067	0,58884	7184,963
		100	0,85721	0,66743	2256,394
		125	0,69584	0,54567	4487,602

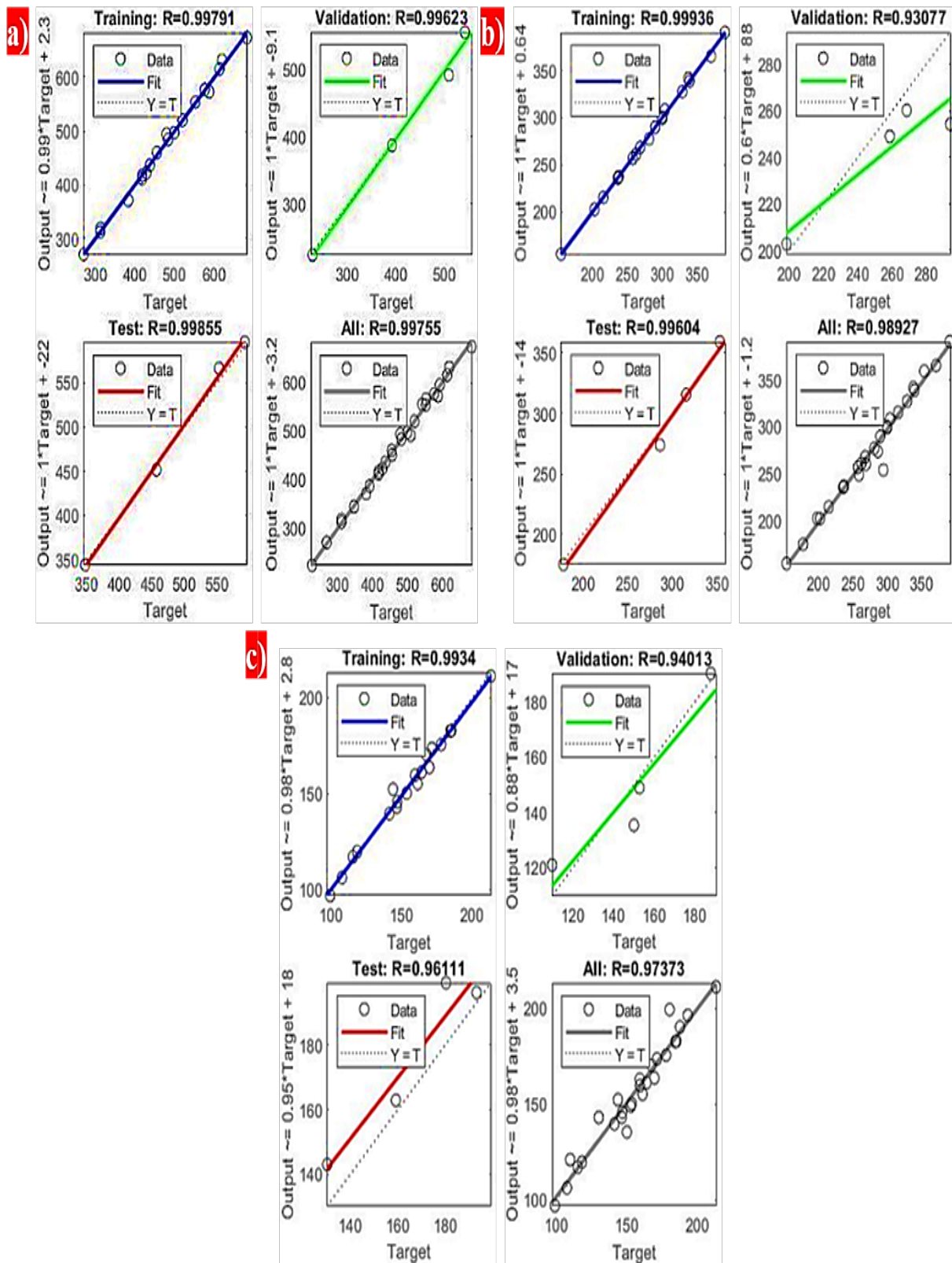
Tablo 4. Devamı

Tablo 5. YSA modelinin eğitim parametreleri.

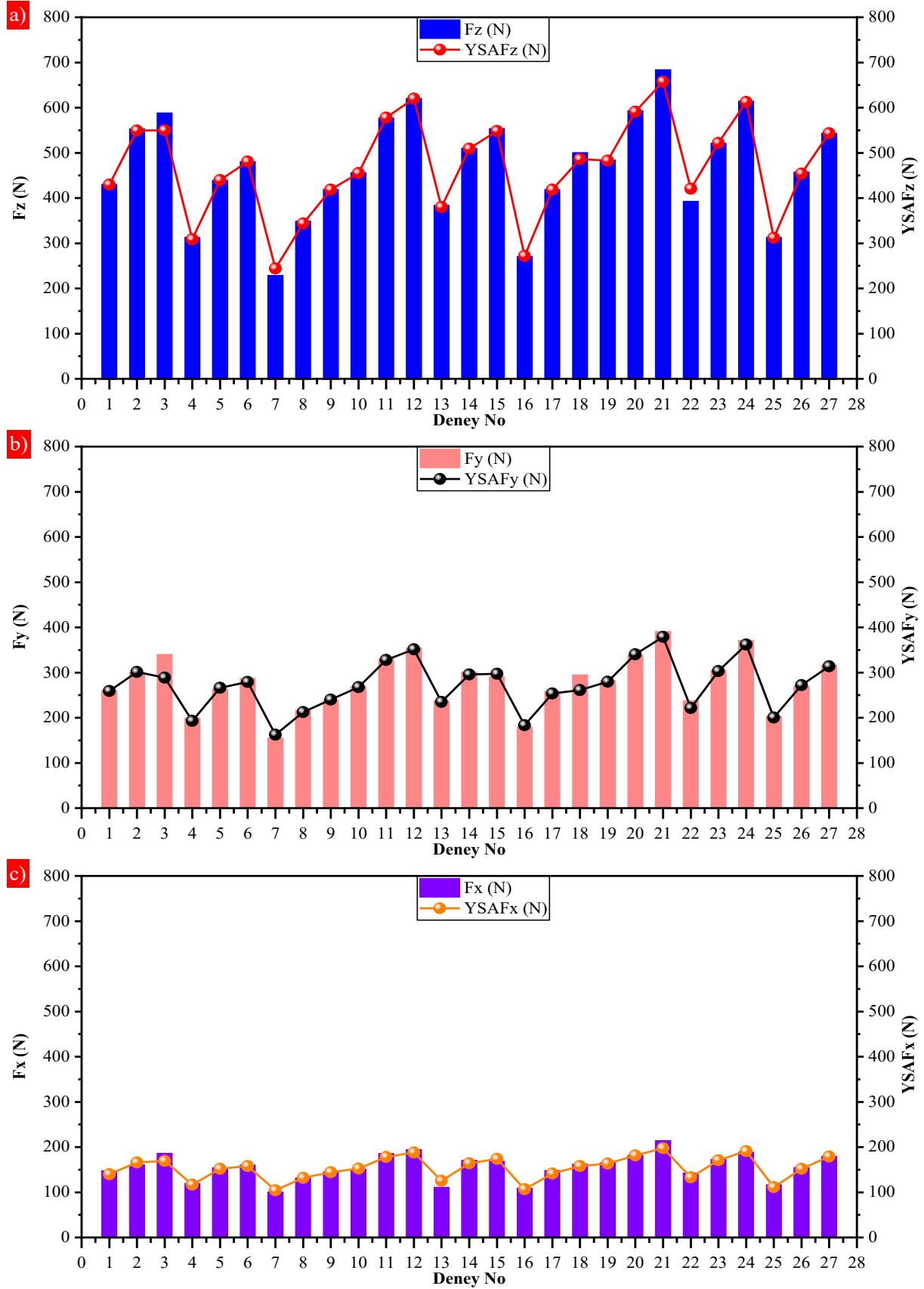
Parametre	Değer
Katmandaki nöron sayısı	1-100-1
Öğrenme algoritması	Levenberg–Marquardt'tır (trainlm)
Aktivasyon fonksiyonu	tansig (tangent sigmoid)
Gizli katman sayısı	1
Nöron sayısı	100
İterasyon sayısı (epochs)	2000
Eğitim veri oranı (rastgele)	%70
Test veri oranı (rastgele)	%15
Doğrulama veri oranı (rastgele)	%15

Çalışmada YSA modeli oluşturmak için MATLAB R2022a programı kullanılmıştır. Deneylemlerden elde edilen kesme kuvveti bileşenlerine ait veriler Matlab programına aktarılmıştır. Model, Matlab YSA aracında geliştirilmiştir. YSA veri setinin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test için kullanılmıştır. Belirlenen oranlarda kullanılacak veriler YSA arka planında giriş ve çıkış verilerinden rastgele seçilir. Eğitim işlevi Levenberg–Marquardt'tır (trainlm) ve performans işlevi ortalama karesel hatadır. YSA modelini oluşturmak için farklı kombinasyonlarla birçok girişimde bulunulmuştur. Bu denemelerde, ağ türünün neredeyse tamamı ileri beslemelidir ve biri kademeli ileri yayılım tipidir. En yüksek R oranını ve en düşük MSE oranını bulmak için nöron sayısı, gizli katman sayısı ve aktivasyon fonksiyonu deneme yanılma yoluyla değiştirilmiştir. Tablo 4'de görüleceği gibi en iyi model seçimi için performans kriteri olarak ortalama kare hata (MSE) ve regresyon katsayısı (R) değerleri kullanıldı. Yapılan deneyler sonucunda yüksek R ve düşük hata oranına göre en iyi model belirlenmiştir. Bahsedilen denemeler için kullanılan parametreler Tablo 5'de verilmiştir.

YSA modelini geliştirmek için, ağ bir dizi deneysel değer kullanılarak eğitilmiştir. Başarılı bir eğitimden sonra ağ, doğrulama ve test için kesme kuvvetini tahmin etmek üzere kullanılmıştır. Her bir kesme kuvveti için YSA sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5'ten, eğitim sırasında tüm deneysel ve tahmin edilen değerlerin regresyon çizgisi üzerinde mükemmel bir şekilde çakıştığı ve Fz (N), Fy (N) ve Fx (N) kuvvetleri için eğitimde sırasıyla $R^2 = 0,99791$, $R^2 = 0,99936$ ve $R^2 = 0,9934$ olduğu görülmektedir. R^2 değeri doğrulama ve test için Fz (N) kuvveti için sırasıyla 0,99623 ve 0,99855, Fy (N) kuvveti için sırasıyla 0,93077 ve 0,99604 ve Fx (N) kuvveti için sırasıyla 0,94013 ve 0,96111 bulunmuştur. Deneysel değerlerin modelin öngördüğü değerlerle karşılaştırılması Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da deneysel ve tahmin edilen değerler arasındaki hatanın önemli ölçüde azaldığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5. YSA sonuçları a) Fz (N) b) Fy (N) c) Fx (N)



Şekil 6. Deneysel ve YSA ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri değerlerinin karşılaştırılması.

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, Monel 400 alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenlerine ve esas kesme kuvvetine etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Ayrıca deneyler sonucu elde edilen kesme kuvveti bileşenleri ile yapay sinir ağları ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Monel 400 alaşımının tornalanmasında kesme hızının artırılması kesme kuvveti bileşenlerinin azalmasına neden olurken, ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin artırılması ise kesme kuvveti bileşenlerinin artmasına neden olduğu görülmüştür.
- En düşük kesme kuvveti bileşenleri 0,4 mm kesme derinliğinde, 110 m/dak kesme hızında ve 0,05 mm/dev ilerleme miktarında F_z :227,48 N, F_y :154 N ve F_x :99,16 N ölçülmüştür.
- En yüksek kesme kuvveti bileşenleri 1,2 mm kesme derinliğinde, 60 m/dak kesme hızında ve 0,09 mm/dev ilerleme miktarında F_z :682,85 N, F_y :389,69 N ve F_x :213 N ölçülmüştür.
- Yapılan çalışmada YSA yöntemini ile tahmin edilen kesme kuvveti bileşenleri ile deneysel sonuçlar incelendiğinde YSA yöntemini ile yapılan tahminlerin yüksek doğruluk içerdiği görülmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] I. Choudhury and M. El-Baradie, "Machinability of nickel-base super alloys: a general review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 77, no. 1-3, pp. 278-284, 1998.
- [2] A. K. Parida and K. Maity, "Modeling of machining parameters affecting flank wear and surface roughness in hot turning of Monel-400 using response surface methodology (RSM)," *Measurement*, vol. 137, pp. 375-381, 2019.
- [3] A. K. Parida and K. Maity, "Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 364-370, 2018.
- [4] M. Davami and M. Zadshakoyan, "Investigation of tool temperature and surface quality in hot machining of hard-to-cut materials," *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, vol. 2, no. 10, pp. 252-256, 2008.
- [5] Y. Zhu, H. Liu, D. Zhang, J. Wang, and F. Yan, "Effect of polarization potentials on tribocorrosion behavior of Monel 400 alloy in seawater environment," *Tribology International*, vol. 168, p. 107445, 2022.
- [6] E. Ezugwu, Z. Wang, and A. Machado, "The machinability of nickel-based alloys: a review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 86, no. 1-3, pp. 1-16, 1999.
- [7] M. Akgün, "Monel K-500 Alaşımının Isı Destekli İşlenmesi Üzerine Sayısal Bir Çalışma," *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, vol. 14, no. 1, pp. 23-29, 2022.
- [8] N. S. Ross, M. Ganesh, D. Srinivasan, M. K. Gupta, M. E. Korkmaz, and J. Krolczyk, "Role of sustainable cooling/lubrication conditions in improving the tribological and machining characteristics of Monel-400 alloy," *Tribology International*, vol. 176, p. 107880, 2022.
- [9] R. Pawade, S. S. Joshi, P. Brahmankar, and M. Rahman, "An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 192, pp. 139-146, 2007.

- [10] B. Özlü and L. Uğur, "Optimization of cutting forces on turning of Ti-6Al-4V Alloy by 3D FEM simulation analysis," *Journal of Engineering Research and Applied Science*, vol. 10, no. 2, pp. 1789-1795, 2021.
- [11] M. Dhananchezian, "Experimental investigation on dry turned Monel 400 alloy surface parameters with uncoated and coated tool," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 8303-8306, 2021.
- [12] M. Dhananchezian, "Comparison of the turning performance of Ti-6Al-4V, monel 400 and inconel 600 alloy with carbide insert," in *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2395, no. 1: AIP Publishing.
- [13] M. Hanief and M. Charoo, "Modeling and optimization of flank wear and surface roughness of Monel-400 during hot turning using artificial intelligence techniques," *Metallurgical and Materials Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 57-69, 2020.
- [14] M. Dhananchezian and K. Rajkumar, "Cutting velocity influenced machinability of Monel 400 by coated tool," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 38, no. 1, pp. 116-125, 2023.
- [15] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvık, and F. Erzincanlı, "Nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının seramik takımlarla frezelenmesinde kesme kuvvetinin Taguchi Metodu ile optimizasyonu," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 5, no. 2, pp. 400-414, 2017.
- [16] E. Nas and F. Kara, "Optimization of EDM machinability of hastelloy C22 super alloys," *Machines*, vol. 10, no. 12, p. 1131, 2022.
- [17] F. Meydaneri and U. Gültekin, "Rene 41 Süper Alaşımının Tornalama Yöntemiyle İşlenebilirliğinin Araştırılması," *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, vol. 3, no. 2, pp. 32-38, 2022.
- [18] H. Gökçe, "Modelling and optimization for thrust force, temperature and burr height in drilling of custom 450," *Experimental Techniques*, vol. 46, no. 4, pp. 707-721, 2022.
- [19] M. Akgün and H. Demir, "Estimation of surface roughness and flank wear in milling of Inconel 625 superalloy," *Surface Review and Letters*, vol. 28, no. 04, p. 2150011, 2021.
- [20] H. Kazan and E. U. Ergül, "Kesme Parametrelerinin Haynes 242 Nikel Bazlı Süper Alaşım Malzemenin Tornalamasında Güç Tüketimi Üzerindeki Etkilerinin RSM ve GA ile İncelenmesi," *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 22, no. 5, pp. 1204-1213, 2022.
- [21] F. Djavanroodi, B. Omranpour, and M. Sedighi, "Artificial neural network modeling of ECAP process," *Materials and Manufacturing processes*, vol. 28, no. 3, pp. 276-281, 2013.
- [22] J. P. Davim, V. Gaitonde, and S. Karnik, "Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models," *Journal of materials processing technology*, vol. 205, no. 1-3, pp. 16-23, 2008.
- [23] S. Ranganathan, T. Senthilvelan, and G. Sriram, "Evaluation of machining parameters of hot turning of stainless steel (Type 316) by applying ANN and RSM," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, no. 10, pp. 1131-1141, 2010.
- [24] D. Zhu, X. Zhang, and H. Ding, "Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 64, pp. 60-77, 2013.
- [25] Ş. Şirin and T. Kıvık, "Effects of hybrid nanofluids on machining performance in MQL-milling of Inconel X-750 superalloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 70, pp. 163-176, 2021.
- [26] B. Özlü, "Sleipner soğuk iş takım çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş şekli üzerine etkisinin incelenmesi," *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, vol. 36, no. 3, 2021.
- [27] T. Ahmed, N. Mollick, S. Mahmud, and T. Ahmad, "Analysis of effects of machining parameters on cutting force components in turning AISI 201 stainless steel using cemented carbide cutting tool insert," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 832-837, 2021.
- [28] S. S. Vadgeri, S. R. Patil, and S. T. Chavan, "Static and fatigue analysis of lathe spindle for maximum cutting force," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 4438-4444, 2018.

- [29] J. He, S. Wang, G. Li, Z. Yang, L. Hu, and K. Wu, "Compilation of NC lathe dynamic cutting force spectrum based on two-dimensional mixture models," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 98, pp. 251-262, 2018.
- [30] I. Ciftci, "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools," *Tribology international*, vol. 39, no. 6, pp. 565-569, 2006.
- [31] B. Özlü, H. Demir, M. Türkmen, and S. Gündüz, "Examining the machinability of 38MnVS6 microalloyed steel, cooled in different mediums after hot forging with the coated carbide and ceramic tool," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 235, no. 22, pp. 6228-6239, 2021.
- [32] M. Akgün, B. Özlü, and F. Kara, "Effect of PVD-TiN and CVD-Al₂O₃ coatings on cutting force, surface roughness, cutting power, and temperature in hard turning of AISI H13 steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 32, no. 3, pp. 1390-1401, 2023.
- [33] B. ÖZLÜ, "Evaluation Of energy consumption, cutting force, surface roughness and vibration In machining toolox 44 steel using taguchi-based gray relational analysis," *Surface Review and Letters*, vol. 29, no. 08, p. 2250103, 2022.
- [34] M. Akgün and F. Kara, "Analysis and optimization of cutting tool coating effects on surface roughness and cutting forces on turning of AA 6061 alloy," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, pp. 1-12, 2021.
- [35] T. Wu and K. Lei, "Prediction of surface roughness in milling process using vibration signal analysis and artificial neural network," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 1-4, pp. 305-314, 2019.
- [36] A. M. Zain, H. Haron, and S. Sharif, "Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 2, pp. 1755-1768, 2010.
- [37] M. Ramezani and A. Afsari, "Surface roughness and cutting force estimation in the CNC turning using artificial neural networks," *Management Science Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 357-362, 2015.

COMPARISON OF METAHEURISTIC ALGORITHMS WITH DIFFERENT PERFORMANCE CRITERIA

Yıldız ZORALIOGLU¹, Sibel ARSLAN^{2*}

¹Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 58140, Sivas, Türkiye

²Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Technology, Department of Software Engineering, 58140, Sivas, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 16.08.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 27.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1344257

ABSTRACT

Nature-inspired metaheuristic algorithms are widely used because they achieve successful results in difficult optimization problems. Their popularity has led to the development of new metaheuristics for solving different engineering problems. New metaheuristics lead scientific research by providing faster and more efficient results. In this study, Artificial Rabbit Algorithm (ARO), Dwarf Mongoose Algorithm (DMO) and Genetic Algorithm (GA), which are recently developed metaheuristics, are compared. According to the literature review, the performances of these three algorithms are compared for the first time. Single and multi-modal standard quality test functions were used to evaluate the algorithms. The results of the algorithms were checked by t-test to see if there is a significant difference in terms of the functions used. According to the results obtained, it was observed that ARO produced more successful results than the other algorithms compared. This shows that the newly developed metaheuristics can be used in many engineering problems.

Keywords: *Metaheuristic Algorithms, Artificial Rabbit Algorithm, Dwarf Mongoose Algorithm, Genetic Algorithm, Quality Test Functions*

METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN FARKLI PERFORMANS KRİTERLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Doğadan ilham alan metasezgisel algoritmalar, zor optimizasyon problemlerinde başarılı sonuçlar elde ettikleri için yaygın olarak kullanılır. Algoritmaların popülerliği farklı mühendislik problemlerinin çözümü için yeni metasezgisellerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Yeni metasezgiseller, daha hızlı ve verimli sonuçlar sunarak bilimsel araştırmalara öncülük etmektedir. Bu çalışmada, yeni geliştirilen metasezgisellerden Yapay Tavşan Algoritması (Artificial Rabbit Algorithm, ARO), Cüce Firavun Algoritması (Dwarf Mongoose Algorithm, DMO) ve temel metasezgisellerden Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA) kıyaslanmıştır. Literatür taramasına göre bu üç algoritmanın performansları ilk defa karşılaştırılmıştır. Algoritmalar değerlendirilirken tek ve çok modlu standart kalite testi fonksiyonları kullanılmıştır. Algoritmaların sonuçları kullanılan fonksiyonlar bakımından anlamlı bir fark olup olmadığı t-testi ile kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ARO'nun karşılaştırılan diğer algoritmalarından daha başarılı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Bu durum yeni geliştirilen metasezgisellerin birçok mühendislik problemlerinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: *Metasezgisel Algoritmalar, Yapay Tavşan Algoritması, Cüce Fira-vun Algoritması, Genetik Algoritma, Kalite Testi Fonksiyonları*

1. Introduction

Metaheuristic algorithms (Metaheuristic Algorithm, MA) are an approach that has an impact on solving complex optimization problems and is generally based on heuristic methods [1]. They also have a wide range of applications and are used in many engineering problems in various fields. Due to their

e-posta¹ : yildizzoralioglu@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7482-0964>

* e-posta² : sibelarslan@cumhuriyet.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3626-553X> (Sorumlu Yazar)

goal of finding the best result in these problems, their importance has been increasing in recent years [2]. The reasons for the popularity of MAs are their simplicity and ease of implementation [3].

The algorithms compared in this study are: Genetic Algorithm (GA), Artificial Rabbit Algorithm (ARO) and Dwarf Mongoose Algorithm (DMO). The contributions of the study are as follows:

- To the best our knowledge, the algorithms used in this study have been compared for the first time.
- The performance of the algorithms has been tested on various functions.
- According to experimental results, the best performance was obtained with the newly proposed ARO metaheuristic method.

The organization of the rest of the study is as follows: Detailed information about the algorithms is presented in Section 2. The functions and parameters used in the experiments are discussed in Section 3. Then simulation results are presented in Section 4. Statistical test results are provided in Section 5, finally the conclusions and information about future work are presented in Section 6.

2. Related Works

In this section, recent studies on metaheuristic in recent years are presented. The studies are as follows:

Alorf, in his study conducted in 2023, examined 57 recently proposed metaheuristic algorithms and compiled a list. He analyzed 26 of these algorithms through experiments. During the experiments, the usage and exploration capabilities of metaheuristics were compared using 50 single-modal and 50 multi-modal functions. To rank the metaheuristics, he employed the statistical Friedman average ranking test. According to the test results, Gradient-Based Optimizer (GBO), Political Optimizer, and Manta Ray Foraging Optimization algorithms were found to have superior usage and exploration capabilities. In terms of comparison functions, Marine Predators Algorithm (MPA), Forensic-Based Investigation, and Heap-Based Optimizer (HBO) algorithms were identified as the most balanced, while HBO, GBO, and Mayfly Algorithm were observed to be particularly suitable for solving engineering optimization problems [4].

In their study conducted in 2022, Cikan et al. implemented a new search algorithm, Equilibrium Optimizer (EO), to enhance reliability indices, increase voltage magnitudes, and reduce active power loss in power distribution networks for reconfiguration. The contributions of this study to the literature include the development of a novel algorithm for calculating reliability indices and providing a comprehensive perspective on solving the reconfiguration problem. The EO algorithm was analyzed on four different distribution test systems and compared with ten contemporary search algorithms. According to this comparison, EO demonstrated the best performance from various perspectives, such as having a lower error rate and successfully reaching the global optimum [5].

In their 2021 study, Gupta et al. analyzed the behavior of nine metaheuristic algorithms. The algorithms they utilized include the Salp Swarm Algorithm, Multi-Verse Optimizer (MVO), Moth-Flame Optimizer (MFO), Atom Search Optimization (ASO), Ecogeography-Based Optimization, Queuing Search Algorithm, EO, Evolutionary Strategy, and Hybrid Self-Adaptive Orthogonal Genetic Algorithm. These algorithms were evaluated using solution quality and convergence analysis on eight mechanical design problems. Additionally, the study demonstrated the broad applicability of the algorithms to real-world application problems [6].

In their 2023 study, Yiğit et al. utilized current metaheuristic algorithms to determine switching instants in Multilevel Inverters and to find switching angles for the Selective Harmonic Elimination problem. These algorithms include Ant Lion Optimization, Artificial Hummingbird Algorithm, Dragonfly Algorithm, Harris Hawk Optimization, MFO, Sine Cosine Algorithm, Flow

Direction Algorithm, EO, ASO, Artificial Electric Field Algorithm, and Arithmetic Optimization Algorithm. In the literature, commonly employed algorithms for solving these problems include MPA, Whale Optimization Algorithm, Grey Wolf Optimizer, Particle Swarm Optimization, MVO, Teaching–Learning–Based Optimization, and GA [7]. When all algorithms are compared in this study, MFO demonstrates superiority over many aspects compared to other algorithms [8].

In the 2022 study conducted by Altay, the recent metaheuristic algorithms, namely Harris Hawk Optimization Algorithm (HHO), Sparrow Search Algorithm (SSA), MVO, MPA and Coot Optimization Algorithm were analyzed on 23 different test functions, considering both single-modal and multi-modal scenarios. According to the findings of this study, the HHO algorithm exhibited good performance in the majority of single-modal quality functions, while the SSA algorithm performed well in five multi-modal functions, and the HHO algorithm showed good results in four multi-modal functions. For complex multi-modal quality functions, the algorithms tested produced similar results in four functions, whereas in the remaining five different functions, the MPA method demonstrated the best performance [9].

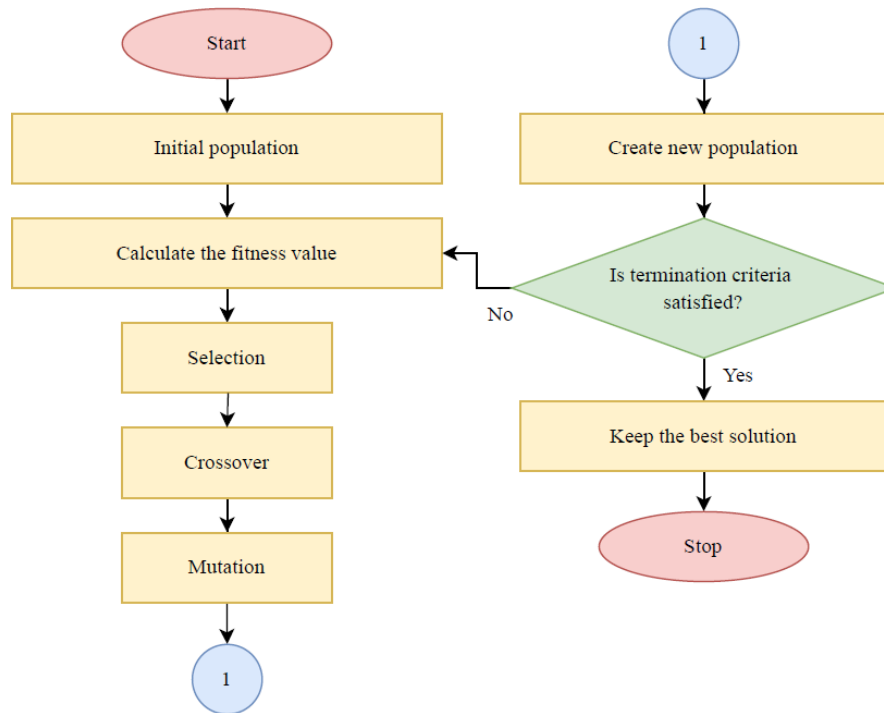


Figure 1. GA flowchart [11]

3. Algorithms

In this section, detailed information about metaheuristic algorithms to be used in the study is provided.

3.1. Genetic Algorithm

GA, a stochastic metaheuristic first proposed by John Holland in 1975 [10], is based on the concept of “survival of the fittest” as stated in Darwin’s theory of evolution. Starting from a randomly selected initial population, the algorithm produces the next generation through genetic variations and

selection processes. To find the best solution among generations, selection, crossover, and mutation operators are utilized. Solutions in a GA are encoded as fixed-length bit strings or specifically tailored to the problem. The solutions represent the chromosome, and the parameters represent the gene. The flowchart of the GA is provided in Fig. 1 [11]. A random initial population is created, fitness values are calculated, and subsequently, selection, crossover, and mutation operations are applied to generate a new population. When the termination criterion is satisfied, the algorithm terminates, presenting the best individual as the solution.

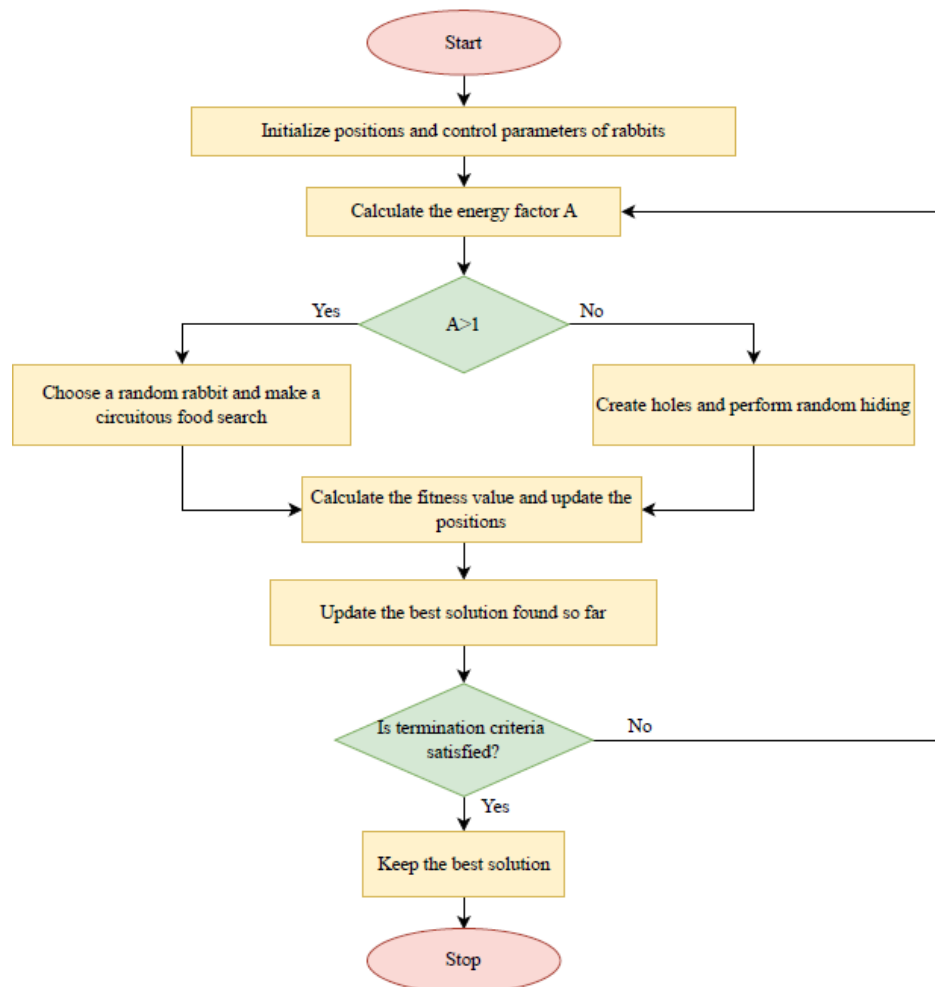


Figure 2. ARO flowchart [13]

3.2. Artificial Rabbit Algorithm

ARO is a recent metaheuristic proposed by Wang et al. in 2022 [3]. This algorithm consists of exploration and exploitation phases. Exploration involves searching for new solutions in different regions. Exploitation aims to increase suitability by utilizing existing solutions and making improvements to them [12]. ARO has two main strategies. The first strategy is food foraging, and the second strategy is random hiding. These strategies represent the stages of exploration and exploitation, respectively. The transition between the two stages occurs based on energy shrink.

Rabbits are generally in the exploration phase in the early stages of iterations, as their energy levels are high. During this exploration phase, rabbits feed on grass in distant areas to prevent predators

from finding their nests. In the subsequent stages of the iteration, they engage in exploitation as their energy decreases. During this stage, rabbits usually build multiple nests around to hide from predators and hunters. Later, they complete the exploitation by selecting one of these nests randomly.

Flowchart of algorithm, as seen in Fig. 2. Firstly, the positions of the rabbits and the control parameters are initialized. The energy of each rabbit is calculated, and based on this, exploration or exploitation is performed. The fitness value is calculated, and the positions are updated again. This loop is repeated until the iteration count is completed, and the process is terminated while retaining the best solution [13].

3.3. Dwarf Mongoose Algorithm

DMO is an algorithm developed by Agushaka et al. in 2022, inspired by the cooperation and organizational abilities of the dwarf mongoose to solve complex problems [14].

In this algorithm, the dwarf mongoose is divided into three social groups: alpha (female), scouts and babysitters. In DMO, the fitness value of each individual is calculated, and the best one is selected as the alpha based on this value. From the members of the population, scout groups and babysitters are formed by selecting randomly. The scouts inform the alpha about the newly found hill to stay. The flowchart of the DMO is provided in Fig. 3. The alpha initiates the search for food, evaluates the exploration route, the distance covered, and assesses the suitable spot to rest. A switch between the scout group and the babysitters for hunting is made, and this exchange process is referred to as the exploitation stage. Dwarf mongooses do not return to the ancient dwelling area and they explore new habitat areas, thus learning the entire region. In this way, the exploration phase is conducted [15].

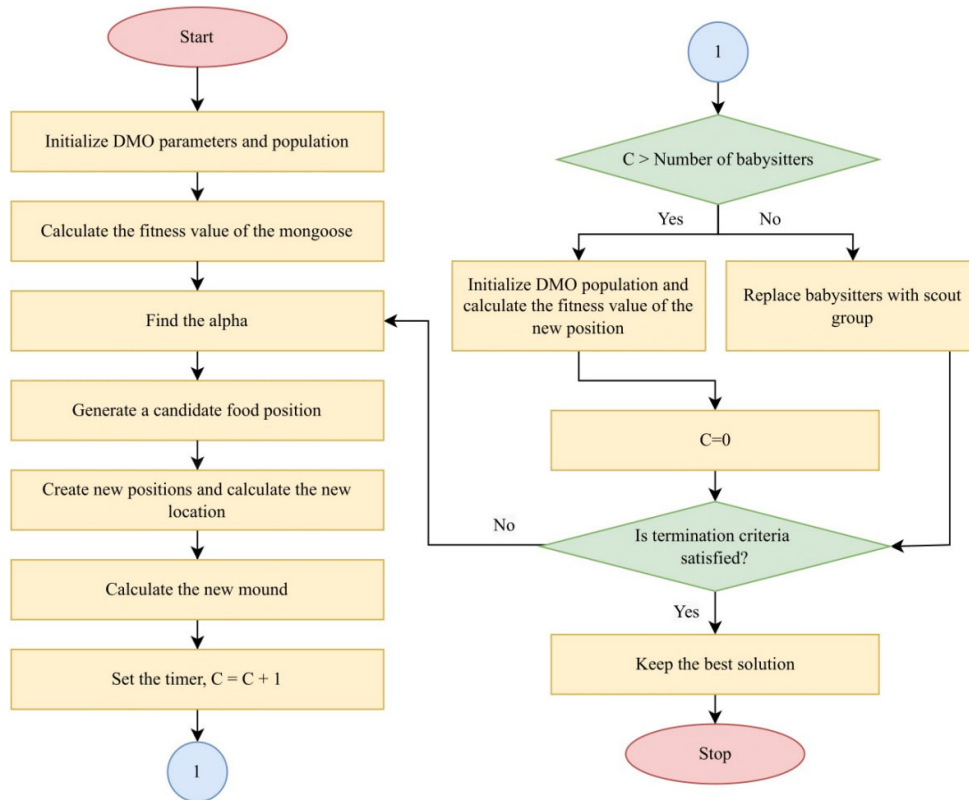


Figure 3. DMO flowchart [15]

4. Experimental Design

In this section, the test functions and parameter values used in the comparison of algorithms are presented.

4.1. Functions

In the study, algorithms were compared using four different quality test functions. The functions were selected from two main groups: single-modal and multi-modal [16]. The groups are given in Table 1. F_1 and F_2 are single-modal test functions, while F_3 and F_4 are multi-modal test functions [17]. The dimension of all functions has been set to 30 in the experiments.

The range given in the table is the valid range of values for each component of the inputs, and different range values are provided for each function. F_{min} represents the minimum value of a function. The minimum value is set to zero for all functions [18]. The graphs of the functions used are given in Fig. 4.

Table 1. Test functions

Function	Range	f_{min}
$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	[-100,100]	0
$F_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	[-10,10]	0
$F_3(x) = 418.9829n + \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	[-500,500]	0
$F_4(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	[-5.12,5.12]	0

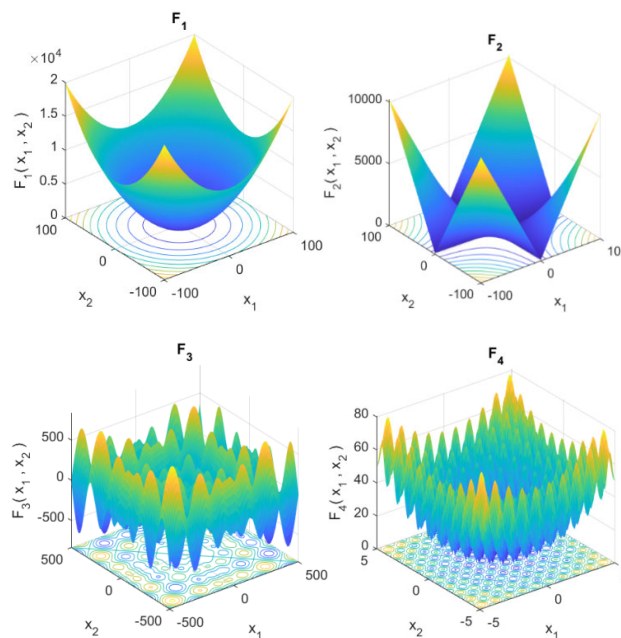


Figure 4. Quality test functions

4.2. Parameters

The parameters used in algorithms are provided in Table 2. The number of genes indicates the number of variables. Genes are represented as bit sequences within a chromosome. Also, P_c denotes the crossover probability, and P_m represents the mutation probability in GA. Babysitters are a DMO specific parameter. However, ARO does not have any specific control parameters unique to the algorithm.

Table 2. Parameters

Control parameters	Algorithms		
	GA	ARO	DMO
Number of genes	30	-	-
P_c	0.80	-	-
P_m	0.20	-	-
Number of babysitters	-	-	3
Alpha female vocalization	-	-	2
Population size	100	100	100
Maximum number of iterations	200	200	200

Table 3. Simulation results of quality test functions

Functions	Algorithms	ARO	DMO	GA
F_1	Mean	1.93E-23	1.41E+03	3.52E+04
	Std	2.91E-23	2.06E+02	3.88E+03
	Best	1.43E-27	1.05E+03	2.80E+04
	Worst	9.25E-23	1.76E+03	4.14E+04
	Rank	1	2	3
F_2	Mean	1.50E-13	8.56E+01	1.23E+04
	Std	1.55E-13	1.70E+01	1.64E+04
	Best	2.86E-15	5.84E+01	1.07E+02
	Worst	4.67E-13	1.17E+02	5.76E+04
	Rank	1	2	3
F_3	Mean	2.73E+03	7.50E+03	3.72E+05
	Std	3.88E+02	2.47E+02	2.84E+02
	Best	1.88E+03	6.94E+03	3.71E+05
	Worst	3.26E+03	7.90E+03	3.73E+05
	Rank	1	2	3
F_4	Mean	0.00E+00	2.61E+02	9.24E+03
	Std	0.00E+00	1.57E+01	3.26E+01
	Best	0.00E+00	2.16E+02	9.17E+03
	Worst	0.00E+00	2.81E+02	9.28E+03
	Rank	1	2	3
Total rank		4	8	12

5. Simulation Results

The algorithms were run independently 30 times in the study. The algorithms were implemented on the MATLAB R2023a platform, utilizing a machine with the following specifications: Core i5-8250U CPU, 1.6 GHz speed, and 8GB RAM. The simulation results of the quality test functions are provided in Table 3. All runs of functions are presented in the table, showing the mean, standard deviation, best, and worst results. In the table, algorithms that produce the highest mean and best value are highlighted in bold. Rankings are based on the means.

When considering the mean and best performances of all functions, ARO stands out as the most successful algorithm. Following ARO, the other best performing algorithm in terms of the solutions it generates is DMO. There are significant differences between the means of DMO and GA as well. For instance, in the function F_3 , GA has a mean that is $3.65E+05$ higher than DMO. Therefore, in all functions, GA has produced worse solutions than both algorithms. Furthermore, the low values of standard deviation in the algorithms indicate that the results of the convergence are close to each other and the difference between them is minimal. As in the other criteria, ARO has the lowest value in standard deviations. Moreover, ARO reached the optimal value of zero in the F_4 function. Even the worst values of ARO in each function produced better results than the best values of the other algorithms. At the same time, ARO has the lowest value in total ranks. This proves that ARO is the most successful algorithm in all functions.

6. t-test Results

t-test is a hypothesis test used in statistical analysis to determine the significance of the difference between two groups [19]. In this study, a one-tailed t-test has been used. The significance level in the t-test has been set at 5%. In the results, a value of h equal to 1 and p-values less than 0.05 indicate a significant difference between the two algorithms [20]. The statistical test results of the algorithms across all runs for each function used are provided in Table 4. The values of h have been bolded in the table.

In the right-tailed t-test, the algorithm on the right of the two given algorithms gives the minimum value. By referring to Table 3, three distinct pairs have been formed. According to the t-test results in the 1st and 2nd pairs, ARO, DMO, and GA have produced better results respectively. When comparing the results of DMO and GA, it is evident that DMO has performed better.

Table 4. t-test results

Functions	DMO-ARO		GA-ARO		GA-DMO	
	p	<i>h</i>	p	<i>h</i>	p	<i>h</i>
F_1	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00
F_2	0.00E+00	1.00E+00	1.53E-04	1.00E+00	1.63E-04	1.00E+00
F_3	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00
F_4	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00	0.00E+00	1.00E+00

7. Conclusion

In this study, metaheuristics ARO, DMO, and GA are compared for the first time. Experiments are conducted on four different quality test functions using these algorithms. The success of the algorithms is evaluated using statistical t-tests to determine whether the differences are significant. According to the test results, it is observed that overall, in all functions, ARO consistently produces better results by generating minimum values compared to both DMO and GA. The order of algorithm success is ARO, DMO and GA. This situation indicates that suggesting and developing different metaheuristics could lead to better results. Future researches aims to compare various metaheuristic algorithms on diverse functions.

References

- [1] Yang XS. Nature-inspired metaheuristic algorithms. Luniver press 2010.
- [2] Çelik Y, Yıldız İ, Karadeniz AT. Son Üç Yılda Geliştirilen Metasezgisel Algoritmalar Hakkında Kısa Bir İnceleme. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2019; 463-477.
- [3] Wang L, Cao Q, Zhang Z, Mirjalili S, Zhao W. Artificial rabbits optimization: A new bio-inspired meta-heuristic algorithm for solving engineering optimization problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2022; 114, 105082.
- [4] Alorf A. A survey of recently developed metaheuristics and their comparative analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2023; 117, 105622.
- [5] Cikan M, Kekezoglu B. Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration. *Alexandria Engineering Journal* 2022; 61(2), 991-1031.
- [6] Gupta S, Abderazek H, Yıldız BS, Yildiz AR, Mirjalili S, Sait SM. Comparison of metaheuristic optimization algorithms for solving constrained mechanical design optimization problems. *Expert Systems with Applications* 2021; 183, 115351.
- [7] Panda KP, Panda G. Application of swarm optimisation-based modified algorithm for selective harmonic elimination in reduced switch count multilevel inverter. *IET Power Electronics* 2018; 11(8), 1472-1482.
- [8] Yiğit H, Ürgün S, Mirjalili S. Comparison of recent metaheuristic optimization algorithms to solve the SHE optimization problem in MLI. *Neural Computing and Applications* 2023; 35(10), 7369-7388.
- [9] Altay O. Güncel Metasezgisel Yöntemlerin Standart Kalite Testi Fonksiyonlarında Karşılaştırılması. *International Journal of Pure and Applied Sciences* 2022; 8(2), 286-301
- [10] Mirjalili S, Mirjalili S. Genetic algorithm. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications* 2019; 43-55.
- [11] Lambora A, Gupta K, Chopra K. Genetic algorithm-A literature review. In 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon) 2019; 380-384.
- [12] What is Exploitation and Exploration in Optimization Algorithms. https://www.researchgate.net/post/What_is_Exploitation_and_Exploration_in_Optimization_Algorithms. (Erişim Tarihi:02.07.2023)
- [13] Riad AJ, Hasanien HM, Turkey RA, Yakout AH. Identifying the PEM Fuel Cell Parameters Using Artificial Rabbits Optimization Algo-rithm. *Sustainability* 2023; 15(5), 4625.
- [14] Agushaka JO, Ezugwu AE, Abualigah L. Dwarf mongoose optimization algorithm. *Computer methods in applied mechanics and engineering* 2022; 391, 114570.
- [15] Mehmood K, Chaudhary NI, Khan ZA, Cheema KM, Raja MAZ, Milyani AH, Azhari AA. Dwarf Mongoose optimization metaheuristics for autoregressive exogenous model identification. *Mathematics* 2022; 10(20), 3821.

- [16] Kızılloluk S, Can Ü. Kalite Test Fonksiyonları Kullanılarak Güncel Metasezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Karşılaştırılması. *International Journal of Pure and Applied Sciences* 2021; 7(1), 100-112.
- [17] Saremi S, Mirjalili S, Lewis A. Grasshopper optimisation algorithm: theory and application. *Advances in engineering software* 2017; 105, 30-47.
- [18] Arslan S. Güncel Metasezgisel Algoritmalarının Performansları Üzerine Karşılaştırılmalı Bir Çalışma. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2023; 11(4), 1861-1884.
- [19] Kim TK. T test as a parametric statistic. *Korean journal of anesthesiology* 2015; 68(6), 540-546.
- [20] Browne RH. The t-test p value and its relationship to the effect size and $P(X > Y)$. *The American Statistician* 2010; 64(1), 30-33.

ELEKTRON MİKROSKOBUNDAN ELDE EDİLEN GÖRÜNTÜLERİN PARÇACIK SAYIMINDA ÖN İŞLEME TEKNİKLERİNİN ETKİSİ

Saliha Banu ERTÜRK¹, Murat KARAKOYUN^{2,*}

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 23.08.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 15.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1348886

ÖZET

Görüntü işleme, teknolojinin yüksek seviye gelişimi ile hayatımızın her alanına girmeye başlamıştır. Görüntü işlemenin; eğitim, güvenlik, endüstri, sanayi, sağlık, eğlence gibi farklı alanlarda kullanılması bu alanlara bambaşka boyutlar kazandırmıştır. Görüntü işleme uygulamalarının başarısını etkileyen birçok etken mevcuttur. Bu etkenler içerisinde görüntü kalitesi, kullanılan donanımın özellikleri gibi dış etkenler mevcut iken kullanılan yöntemler, seçilen parametre değerleri gibi uygulama içi etkenler de bulunmaktadır. Dolayısıyla görüntü işleme uygulamalarında birçok durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada, elektron mikroskobu ile elde edilen metal parçacık görüntüleri üzerinde parçacık sayımı gerçekleştirilmiştir. Seçilen görüntüler; içerdiği parçacık sayısı, parçacıkların şekilleri, üst üste örtüşmesi gibi özellikleri bakımından karakteristik özelliklere sahiptir. Bu görüntüler üzerinde yapılan parçacık sayımında morfolojik, filtreleme ve eşikleme ön işlem yaklaşımları uygulanmıştır. Bu yaklaşımların parçacık sayımındaki etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. Daha sonra bu yaklaşımların birlikte uygulanmasının etkileri ele alınmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara bakıldığında; her bir kategorideki ön işlem adımlarının tek başına yetersiz kaldığı görülmüştür. Ayrıca karakteristiği farklı olan görüntülerde farklı ön işleme kombinasyonlarının başarılı olduğu görülmüştür. Tüm görüntüler için elde edilen ortalama başarıya bakıldığında Açma (morfolojik) – Gauss (filtreleme) – Otsu (eşikleme) kombinasyonunun %59,18 ile ilk sırada yer aldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eşikleme, Filtreleme, Görüntü işleme, Morfolojik işlemler, Parçacık sayımı

THE EFFECT OF PRE-PROCESSING TECHNIQUES ON PARTICLE COUNTING OF IMAGES OBTAINED BY ELECTRON MICROSCOPE

ABSTRACT

Image processing has begun to enter all aspects of our lives with the high-level development of technology. Image processing; its use in different fields such as education, security, industry, health and entertainment has brought a whole new dimension to these fields. There are many factors that affect the success of image processing applications. Among these factors, there are external factors such as image quality, the features of the hardware used, while there are also internal factors such as the methods used and the selected parameter values. Therefore, many situations should be considered in image processing applications. In this study, particle counting was performed on metal powder particle images obtained by electron microscope. Selected images; it has characteristic features in terms of the number of particles it contains, the shapes of the particles, and their overlapping. Morphological, filtering and thresholding preprocessing approaches were applied in particle counting on these images. The effects of these approaches on particle counting are examined separately. Then, the effects of applying these approaches together are discussed. Considering the experimental results obtained; it has been seen that the pre-processing steps in each category alone are insufficient. In addition, it has been observed that different preprocessing combinations are successful in images with different characteristics. Considering the average success achieved for all images, it was seen that the Opening (morphological) - Gauss (filtering) - Otsu (thresholding) combination ranked first with 59.18%.

Keywords: Thresholding, Filtering, Image processing, Morphological operators, Particle counting

e-posta¹ : salihabanuerturk@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-2659-599X>

* e-posta² : mkarakoyun@erbakan.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0677-9313> (Sorumlu Yazar)

1. Giriş

Görüntü işleme ile parçacık veya partikül sayımı gibi uygulamalara farklı disiplin alanlarında gerek duyulmaktadır. Parçacıkların doğru sayımı sonuçlar açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Parçacık analizi ve sayımı problemi üzerine literatüre kazandırılan birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar birçok farklı alanlarda farklı ortam ve cihazlar ile elde edilen görüntülere yönelik yapılmıştır. Üzerinde çalışılan görüntünün elde edildiği cihazın özellikleri veya parçacık sayımı için kullanılan yöntem, başarı durumunu büyük ölçüde etkilemektedir. Literatüre bakıldığında, parçacık sayımı problemi hakkında endüstri, sağlık, tarım ve tekstil gibi bir çok farklı alanda bir çok çalışmanın gerçekleştirildiği görülmektedir [1-4]. Şüphesiz yapılan tüm çalışmalarını incelemek zaman ve efor açısından imkansız gibi görünmektedir. Bu nedenle mevcut güncel çalışmalardan önemli görülen bazı çalışmalar ele alınmıştır.

Adams ve ark. [5] akciğer bilgisayarlı tomografi görüntülerinde görüntü işleme uygulamaları ile tümörlerinin tespitinde BT (Bilgisayarlı Tomografi) görüntülerini incelemiştir. Tümör tespiti için üç aşamada görüntüleri ele almışlardır. Segmentasyon sonucu test görüntülerinin %83,56'sı başarıyla bölümlere ayırdığını, doku özelliklerini kullanarak, açıklamalı öğelerin %80,82'sine kadar tümörlerin başarılı bir şekilde tespit edilip, SVM (Support Vector Machine) ile doku özelliklerinin sınıflandırılmasına yönelik sunulan metodolojinin küçük eğitim setlerinde bile iyi sonuçlar elde edebildiğini gözlemlemiştir. Metodolojilerin, otomatik tümör teşhisi için eksiksiz bir sistemin uygulanmasında başarıyla kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Özdet ve İçer [6] akciğer tümör tespiti çalışmalarında sütunsal tarama yaklaşımı ve klasik eşikleme yöntemi kullanmışlardır. İki yöntemin kullanılan veri setinde başarılı akciğer segmentasyonu yapma oranları klasik eşikleme için %30,77 olup sütunsal tarama metodu için %80,77 olduğunu gözlemlemiştir.

Telli ve Özkan [7] tekstil mamullerinde giyim ve yıkanma sonucu sürtünmeye bağlı olarak oluşan boncuklanma sayısının tespitini gerçekleştirmişlerdir. Gri Düzey Eş Oluşum Matrisi (Gray Level Co-Occurrence matrix, GLCM) ile doku analizi yapılabilecek formata getirilen görüntülere standart sapma filtresi uygulanmıştır. Daha sonra Otsu'nun global eşikleme algoritmasını kullanmışlardır. Görüntü erozyona uğratarak, belirlenen büyüklüğün altındaki değerler maskelenmiştir. Referans yarıçapı belirlenerek her devir için sağlıklı bir karşılaştırma olanağı sunulmuştur. Diğer çalışmalardan farklı olarak özel bir görüntü alma sistemi kurulmasına gerek kalmadan standart ofislerde kullanılan tarayıcılardan alınan görüntüler ile kumaş yüzeyindeki boncuklanma tespitini sağlamışlardır.

Çam ve Güven [8] yaptıkları çalışma ile mikroskop altında alınan kan hücresi görüntülerinden beyaz kan hücresi sınıflandırılmasına yönelik yaptıkları incelemeler ile nötrofil, lenfosit, eosinofil, monosit ve basofil hücrelerin kan içinde bulunma sayılarını tespit etmeyi ve bu sayılara göre hastalıkların tespitini amaçlamışlardır. Çalışmalarında segmentasyon amacıyla kullandıkları Watershed, k-means, kNN (k-Nearest Neighbors) yöntemlerinin başarılı olduğunu, sınıflandırma işleminde CNN (Convolutional Neural Network) ve SVM (Support Vector Machine) yöntemlerinin yapay sinir ağı destekli kullanımı ile maksimum başarıyı sağladığını gözlemlemiştir.

Aşlıyan [9] beyin tümörü tespitinde MR (Manyetik Rezonans) görüntüleri üzerinde Otsu eşikleme yöntemini ve Rocchio sınıflandırıcı metodu kullanmıştır. Bu çalışmada, ilk olarak beyin tümörü veri seti, eğitim ve test olmak üzere ikiye bölünmüş ve sistem Rocchio metoduyla eğitilmiştir. Sonrasında test veri setindeki görüntüler Otsu metodu ile bölütlenmiştir. Kafatası ayrılmadan ve ayrıldıktan sonraki görüntüler bölütlenmiş ve doğruluk, kesinlik ve seçicilik başarı ölçülerine göre değerlendirilmiş ve başarıları karşılaştırılmıştır. Kafatası ayrıldıktan sonra başarı oranının yaklaşık %10 arttığını gözlemlemiştir. Bununla birlikte art-ışlemeli sistem uygulandığında %10'a ek olarak başarı oranları yaklaşık %4 daha yükseldiğini görmüştür. Sistemin doğruluk, kesinlik ve seçicilik oranları sırasıyla %96, %95 ve %95 olduğu sonucuna varmıştır.

Boztoprak ve Ergün [10] yapraklı ağaçların kalitesini ve kullanım alanını belirleyen trahe ve liflerin sayısını bulmak üzere yapraklı ağaçların mikroskopik yapıda enine kesit görüntüsünü

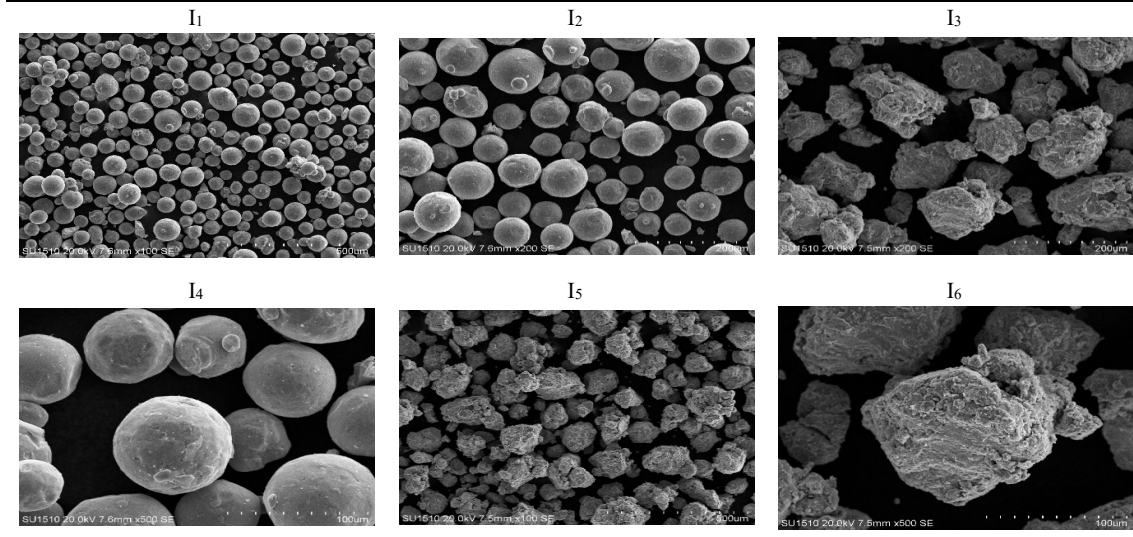
incelemişlerdir. Trahe ve lifleri belirlemek için gri seviyedeki görüntülere kapama ve eşikleme işlemleri uygulamışlardır. Traheleri belirledikten sonra görüntüden çıkarıp lifler için eşikleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kullandıkları morfolojik işlemlerin klasik yöntemlerden daha pratik olduğunu gözlemlemişlerdir.

Karşılı ve Dihkan [11] çalışmalarında, granit kayaçlar üzerindeki K-feldspar kristallerine ait çeşitli ölçütlerin tespitine yönelik olarak uygun bir otomatik görüntü analiz tekniği geliştirmişlerdir. Çalışmada tanecik tespiti ve sınırlarının belirlenmesinde başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Kullandıkları şekil tanıma teknikleri yardımıyla yapılan analizlerde, taneciklerin şekilsel özelliklerine göre sınıflandırmasını yapmışlardır. Son olarak metodun, farklı düzeyde başkalaşımın meydana gelmiş kayaç türleri üzerinde test edilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Kerimoğlu [12] yaptığı tez çalışmasında, mikroskop altında almış olduğu kırmızı kan hücre görüntüleri üzerinde morfolojik işlemler, mantıksal işlemler ve Hough Transform tekniği kullanmıştır. CHT (Circle Hough Transform) dairesel desenler bulmaya yönelik bir teknik olup merkezi (x_0, y_0) ve bir yarıçap (r) ile karakterize edilen bir çemberi bulmak için tasarlanmıştır. Bu işlemler sonucunda Kerimoğlu yüksek maliyetli akış sitometrilere alternatif oluşturabilecek, sahrada kullanım için uygun, düşük maliyetli, maliyetine oranla yüksek doğruluk oranı sağlayan bir POC (Proof of Concept) akış sitometrisi sistemi geliştirmiştir.

Bu çalışmada elektron mikroskobu ile elde edilmiş olan 6 görüntü veri seti olarak kullanılmış olup, üzerinde çalışma ve deneyler yapılmıştır. Parçacık sayımında kullanılması tercih edilen morfolojik işlemler, eşikleme ve filtreleme işlemleri bu çalışmada da kullanılmıştır. Kullanılan her bir ön işleme yaklaşımının sonuçları kategorik olarak sunulmuştur. Ayrıca her bir kategorideki en başarılı ön işleme yönteminin sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Son olarak farklı kategorilerdeki ön işleme yöntemlerinin birbiri ile kullanılması sonucu elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuştur. Bu aşamada farklı kombinasyonlar kullanılarak en başarılı olan tespit edilmeye çalışılmıştır. Tüm görüntülerde başarılı olan bir kombinasyon elde edilememiştir. Bununla beraber tüm görüntüler üzerinde ortalama en iyi başarı ise %59,18 ile *Açma (morfolojik) – Gauss (filtreleme) – Otsu (eşikleme)* kombinasyonu ile elde edilmiştir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: 2. Bölümde çalışmada kullanılan görüntüler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ayrıca parçacık sayımında kullanılan ön işleme yaklaşımları detaylandırılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ise 3.Bölümde detaylı bir şekilde sunulmuştur. Son olarak çalışmanın genel bir değerlendirilmesi 4.Bölümde yapılmıştır.



Şekil 1. Elektron mikroskobu ile elde edilen parçacık görüntüleri

2. Materyal ve Metod

Bu bölümde kullanılan görüntüler hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca bu görüntüler üzerinde yapılan parçacık sayımı işleminden önce kullanılan ön işleme yöntemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

2.1. Kullanılan Görüntüler

Bu çalışmada, elektron mikroskobu ile elde edilen metal parçacıkları görüntüleri kullanılmıştır. Kullanılan yöntemlerin etkilerinin daha detaylı incelenebilmesi adına farklı karakteristikteki görüntüler ele alınmıştır. Şekil 1’de kullanılan görüntüler sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde yapısal olarak birbirinden farklı görüntülerin olduğu görülmektedir. Bununla beraber parçacıkların konumlarının karmaşıklıkları bakımından da görüntülerin birbirinden farklı karakteristiklere sahip olduğu görülmektedir.

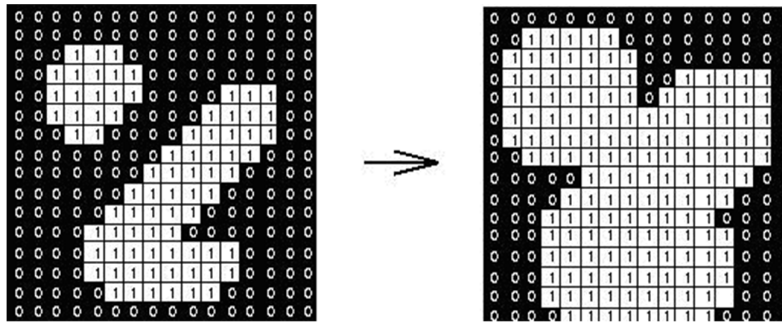
2.2. Görüntü Ön İşleme Yaklaşımları

Elektron mikroskobundan elde edilen görüntüler üzerinde parçacık sayımından önce bazı ön işleme adımları uygulanmış ve bu yöntemlerin etkileri incelenmiştir. Kullanılan ön işleme yaklaşımları genel olarak *morfolojik işlemler*, *eşikleme* ve *filtreleme* şeklinde kategorize edilebilir.

2.2.1. Morfolojik İşlemler

Görüntü işlemede sıkça tercih edilen temel işlemlerdendir. Morfolojik işlemler çok geniş bir kullanım alanına sahiptir; görüntünün kaldırılması, istenilen görüntünün veya nesnenin izole edilmesi ve kopuk nesnelerin birleştirilmesi gibi işlemler [13]. Gelişmiş morfolojik işlemler pikseller yerine parçacıklar üzerinde yoğunlaşarak en iyi görüntüyü elde etmeyi amaçlamaktadır [14]. Bu çalışmada *genişleme*, *aşındırma*, *açma* ve *kapama* morfolojik işlemleri kullanılmıştır.

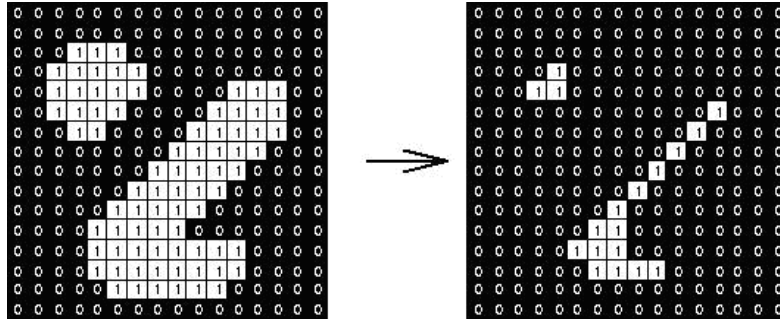
Genişleme işlemi giriş olarak verilen görüntü üzerindeki parametreler ile verilen alan içerisindeki sınırları genişletmektedir. Bu genişletme sayesinde piksel grupları büyür ve pikseller arası boşluklar küçülür [15]. Sayısal bir resmi genişletmek resmi yapısal elemanla kesiştiği bölümler kadar büyütme demektir. Kalınlaştırma işleminin nasıl yapılacağını yapı elemanı belirler [16]. Şekil 2’de örnek bir genişleme sonucu verilmiştir. Örnekte beyaz pikseller nesneyi temsil ederken siyah pikseller arka planı temsil etmektedir.



Şekil 2. Genişleme morfolojik işlemi sonucu

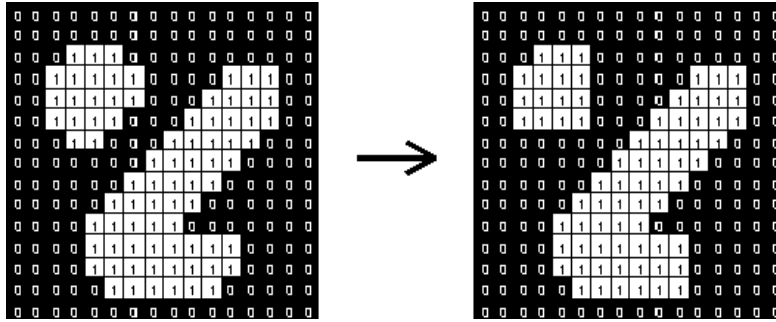
Aşındırma işlemi, ikili moda dönüştürülen görüntü üzerinde küçültme ya da inceltme işlemlerinin yapıldığı morfolojik sonuçları kapsamaktadır. Aşındırma işlemi bir bakıma genişleme işleminin tersidir. Aşındırma işlemi ile sayısal resim üzerinde inceltme yapılmış dolayısıyla görüntüde tahribat meydana

getirilmiş olur [17]. Şekil 3'te aşındırma işleminin örnek bir uygulaması sunulmuştur. Şekilden anlaşılacağı üzere aşındırma sonucunda görüntü içindeki nesnenin boyutunda azalma olurken arka planda artma olmuştur. Yani söz konusu aşınma görüntü içindeki nesnelere olmaktadır.



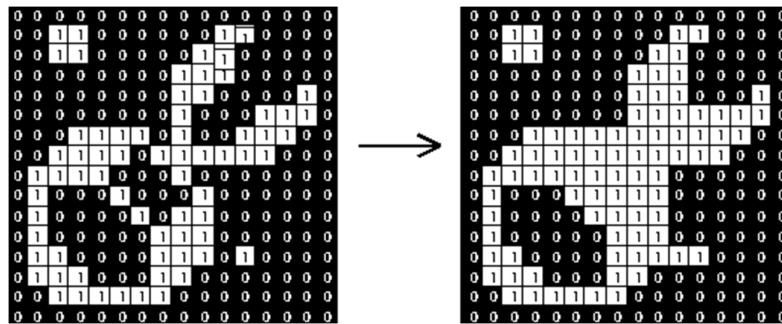
Şekil 3. Aşındırma morfolojik işlemi sonucu

Açma işlemi, sayısal bir görüntüye ilk olarak aşındırma sonrasında ise genişleme işleminin uygulanmasıyla elde edilmektedir [18]. Açma işlemi tek piksellik nesnelere ve tek piksellik çıkıntılara gibi küçük anormallikleri görüntüden kaldırmak için kullanılır. Şekil 4'te açma morfolojik işlemi bir görüntü üzerindeki etkisi sunulmuştur.



Şekil 4. Açma morfolojik işlemi sonucu

Kapama işlemi, sayısal bir görüntüye ilk olarak genişleme sonrasında ise aşındırma işleminin uygulanmasıyla elde edilmektedir [18]. Kapama işlemi tek piksellik küçük delikler ve tek piksellik girintileri kaldırmak için kullanılmaktadır. Şekil 5'te sayısal bir görüntüye uygulanmış kapama işleminin sonuçları sunulmuştur.



Şekil 5. Kapama morfolojik işlemi sonucu

2.2.2. Eşikleme Yaklaşımı

Eşikleme işlemi görüntüyü sonraki aşamalar için daha anlaşılır hale getirmek ve sonraki işlemlere hazırlamak için uygulanan bir süreçtir. Bu aşamadaki temel amaç pikselleri gruplandırmaktır. Görüntüdeki pikselleri benzerliklerine göre ve görüntünün daha az pikselle temsil edilmesine göre gruplandırma yapılır. Bu aşamadan sonra görüntüdeki nesnelere arka plandan ayırmak daha kolay olmaktadır. Bu yöntem basit ve pratik olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir [19]. Bu çalışmada, eşikleme yöntemleri içerisinde popüler olan benzerlik tabanlı Otsu metodu ve entropi tabanlı Kapur metodu kullanılmıştır.

Otsu metodu [20], en iyi eşik değerlerini bulmak için basit ve etkili bir tekniktir. Bu yöntem, sınıf içi varyansı en aza indirerek veya sınıflar arasındaki varyansı en üst düzeye çıkararak en uygun eşik değerlerini seçer. Ayrıca, bu yöntem hem iki seviyeli hem de çok seviyeli eşik bulmak için kullanılabilir. Bu çalışmada *Otsu* metodunun sınıf içi varyansı minimize etmeyi amaçlayan yaklaşımı kullanılmıştır. Burada amaç sınıflar içerisindeki toplam varyansı minimize eden eşik değerlerini belirlemektir [21].

Kapur entropisi [22], eşikleme için kullanılan başka bir basit yöntemdir. Bu yaklaşım entropiye dayalı olarak çalışır. Temel amaç, ayrılan bölgelerin entropisini eşik değerleri ile maksimize etmektir [19].

2.2.3. Filtreleme

Filtreleme işleminde renkli görüntüler, gri tonlu görüntüye dönüştürüldükten sonra filtreleme uygulanabilir. Filtre, 3x3, 5x5, 7x7 gibi piksel boyutlu sayı matrisidir (kernel) ve uygulanacak filtreleme yöntemine göre bu sayı matrisi farklı değerlerden oluşmaktadır. Filtreleme, bu filtre matrisi görüntü üzerindeki bütün piksellerde dolaştırılarak uygulanır. Yüksek frekansları vurgulayan ve düşük frekansları bastıran filtrelere yüksek geçirgenli filtreler (high-pass filters) denir. Yüksek geçirgenli filtreler açık ve koyu tonlu detaylar arasındaki farkı belirginleştirir. Benzer olarak alçak geçirgenli filtreler de vardır. Alçak geçirgenli filtreler (low-pass filters) açık ve koyu detaylar arasındaki ton farkını azaltırlar [23]. Bu çalışmada *Medyan* ve *Gauss* filtreleme yaklaşımları kullanılmıştır.

Medyan (Ortanca) filtresi, genellikle bir görüntüdeki tuz-biber olarak adlandırılan gürültüyü gidermek için kullanılan doğrusal olmayan bir dijital filtreleme tekniğidir. Aynı zamanda bir alçak geçiren filtredir. Görüntüde parazit azaltma işlemi, sonraki işlemin sonuçlarını iyileştirmek için tipik bir ön işleme adıdır. Belirli koşullar altında gürültüyü ortadan kaldırırken kenarları korur. Filtrenin sinyal işleme uygulamaları da mevcuttur [12, 24]. Şekil 6'da tuz-biber gürültüsünü gidermek amacıyla uygulanmış medyan filtresinin etkisi sunulmuştur.



Şekil 6. Medyan filtresi ile temizlenen görüntü

Gauss filtreleme yöntemi görüntüde her piksel bölgesinin ağırlıklı ortalamalarını çıkararak merkez piksel değerine doğru yaklaştıkça ağırlıklı ortalamaları giderek artırır. Bu durum, ortalama filtreleme yöntemine göre daha hassas bir düzeltme yaparak görüntüdeki veri geçişlerinin daha yumuşak hale getirilmesini sağlar. Böylelikle görüntüde düzeltme sağlayan ve bulanıklık etkisi oluşturan alçak

geçiren bir filtre elde edilir [25, 26]. Şekil 7’de Gauss filtresinin bir görüntü üzerindeki sonucu sunulmuştur.



Şekil 7. Gauss filtresi uygulanan görüntü

2.3. Kontur Bulma

Kontur çıkarımı işlemi aynı renk ve yoğunluğa sahip pikselleri gruplayarak kesintisiz bir biçimde birleştiren kapalı bir eğri bulma olarak tanımlanabilir. Kontur bulma işlemi görüntü işleme biliminin en temel yapı taşlarından bir tanesidir. Konturlar genel olarak bir görüntüde bulunan nesnelere [27].



Şekil 8. Kontur bulma işlemi ile nesne tespiti

3. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde her bir ön işleme kategorisi uygulandıktan sonra elde edilen sonuçlar ayrı ayrı ele alınmıştır. Daha sonra sonuçlar genel olarak değerlendirilmiştir.

3.1. Morfolik İşlemlerin Uygulanması Sonucu Elde Edilen Sonuçlar

Görüntüler ilk olarak gri seviyeye getirildikten sonra morfolojik işlemler uygulandı. Şekil 1’de verilmiş olan görüntülere (3x3) - (11x11) maske boyutu aralığında genişleme, aşındırma, açma ve kapama morfolojik işlemleri uygulandı. Her bir morfolojik işlemin uygulanması sonucu elde edilen parçacık sayımı sonuçları Çizelge 1-4’te verilmiştir.

Çizelge 1. Farklı maske boyutlarında uygulanan *Genişleme* morfolojik işlemi sonucu elde edilen parçacık sayım sonuçları

Görüntü	Gerçek Parçacık Sayısı	Maske Boyutları				
		3x3	5x5	7x7	9x9	11x11
I ₁	243	2177	1796	1703	1477	1324
I ₂	65	1715	1227	984	826	785
I ₃	28	3102	2264	1578	1185	963
I ₄	16	1556	953	715	615	534
I ₅	82	4025	2930	2128	1641	1346
I ₆	7	2051	1512	1120	859	698

Çizelge 2. Farklı maske boyutlarında uygulanan *Aşındırma* morfolojik işlemi sonucu elde edilen parçacık sayım sonuçları

Görüntü	Gerçek Parçacık Sayısı	Maske Boyutları				
		3x3	5x5	7x7	9x9	11x11
I ₁	243	1063	607	434	378	346
I ₂	65	988	404	279	233	195
I ₃	28	2629	1472	939	638	494
I ₄	16	799	420	165	104	87
I ₅	82	3277	1945	1313	978	750
I ₆	7	1632	899	620	441	348

Çizelge 3. Farklı maske boyutlarında uygulanan *Açma* morfolojik işlemi sonucu elde edilen parçacık sayım sonuçları

Görüntü	Gerçek Parçacık Sayısı	Maske Boyutları				
		3x3	5x5	7x7	9x9	11x11
I ₁	243	1027	626	443	369	337
I ₂	65	727	339	234	196	155
I ₃	28	2585	1467	896	594	421
I ₄	16	554	208	127	84	67
I ₅	82	3221	1849	1254	921	684
I ₆	7	1463	871	572	405	319

Çizelge 4. Farklı maske boyutlarında uygulanan *Kapama* morfolojik işlemi sonucu elde edilen parçacık sayım sonuçları

Görüntü	Gerçek Parçacık Sayısı	Maske Boyutları				
		3x3	5x5	7x7	9x9	11x11
I ₁	243	1279	1221	1240	1170	1019
I ₂	65	1177	866	720	615	532
I ₃	28	2899	1937	1316	994	777
I ₄	16	1081	663	548	472	423
I ₅	82	3404	2430	1750	1302	1023
I ₆	7	1802	1283	963	738	578

Çizelge 1-4'te verilen sonuçlara bakıldığında, ön işleme adımı olarak kullanılan morfolojik işlemlerin oldukça başarısız sonuçlar ürettiği görülmektedir. Her bir morfolojik işlem kendi içerisinde değerlendirildiğinde maske boyutu 11x11 olduğunda diğer maske boyutlarına göre daha başarılı

sonuçların elde edildiği görülmektedir. Morfolojik işlemlerin genel olarak sonuçlarına bakıldığında ise açma işleminin diğerlerine kıyasla daha başarılı olduğu söylenebilir.

3.2. Eşikleme Yaklaşımlarının Uygulanması Sonucu Elde Edilen Sonuçlar

Gri seviyeye dönüştürülen görüntüler üzerine uygulanan diğer ön işleme yaklaşımı ise eşikleme olmuştur. Daha önce belirtildiği üzere bu çalışmada temel eşikleme yaklaşımlarından olan Otsu ve Kapur yöntemleri kullanılmıştır. Otsu ve Kapur yaklaşımları uygulanması ile elde edilen parçacık sayım sonuçları Çizelge 5'te sunulmuştur. Eşikleme işlemleri ile elde edilen sonuçlar da morfolojik yaklaşımlara benzer olarak tatmin edici seviyede olmamıştır. Dolayısıyla eşikleme ön işleme yaklaşımının da tek başına başarılı sonuçlar vermediği görülmüştür.

Çizelge 5. Otsu ve Kapur eşikleme yöntemi sonucu elde edilen parçacık sayım sonuçları

Görüntü	Gerçek Parçacık Sayısı	Eşikleme Yöntemi	
		Otsu	Kapur
I ₁	243	719	4077
I ₂	65	513	3956
I ₃	28	1446	2190
I ₄	16	940	4460
I ₅	82	3291	3698
I ₆	7	3202	2969

3.3. Filtreleme İşeminin Uygulanması Sonucu Elde Edilen Sonuçlar

Filtreleme işlemi, gri seviyeye dönüşüm yapıldıktan sonra uygulanmıştır. Daha önce bahsedildiği üzere gauss ve medyan filtreleme yaklaşımları kullanılmıştır. Filtreleme işlemlerinde de morfolojik işlemlerde olduğu gibi maske boyutu (3x3) - (11x11) aralığında uygulanmıştır. Çizelge 6-7'de sırasıyla Gauss ve medyan filtreleme işlemlerinin uygulanması ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Çizelge 6. Gauss filtresinin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar

Görüntü	Gerçek Parçacık Sayısı	Maske Boyutları				
		3x3	5x5	7x7	9x9	11x11
I ₁	243	683	693	544	482	412
I ₂	65	728	367	208	164	139
I ₃	28	2283	1582	701	338	181
I ₄	16	594	301	159	108	71
I ₅	82	3178	2023	985	561	310
I ₆	7	1121	729	411	254	152

Çizelge 7. Medyan filtresinin uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar

Görüntü	Gerçek Parçacık Sayısı	Maske Boyutları				
		3x3	5x5	7x7	9x9	11x11
I ₁	243	935	514	473	340	308
I ₂	65	763	299	231	152	134
I ₃	28	2502	1223	659	312	186
I ₄	16	710	199	185	81	54
I ₅	82	3319	1635	908	519	363
I ₆	7	1347	766	484	237	130

Filtreleme işlemleri sonucu elde edilen deneysel sonuçlara bakıldığında genel olarak gerçek parçacık sayılarından daha farklı değerlerin elde edildiği görülmektedir. Medyan ve Gauss filtrelerinin başarıları kıyaslandığında ise Medyan filtresinin nispeten daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Ancak bu başarı tatmin edici düzeyde değildir.

3.4. Ön İşleme Yaklaşımlarının Birlikte Kullanılması Sonuçları

Ön işlem adımlarının her birisi için deneysel sonuçlar elde edildi. Bu sonuçların her birine ayrı ayrı bakıldığında hiç bir ön işleme adımının tatmin edici seviyede başarı yakalayamadığı görülmektedir. Bu noktada ön işlem adımlarının birlikte kullanılmasının nasıl bir sonuç vereceği merak konusu olmaktadır. Ön işleme adımlarının tek başına yetersiz kalması ve birlikte kullanılmalarının etkilerinin incelenmesi adına her bir kategoriden birer yöntem alınarak farklı kombinasyonlar ile uygulanmıştır. Morfolojik ve filtreleme işlemlerinde maske boyutu 11x11 iken genel olarak daha başarılı sonuçların alındığı gözlemlendiğinden kombinasyonlarda bu iki kategori için maske boyutu bu şekilde seçilmiştir. Her bir kategoriden alınan yöntemlerin oluşturduğu kombinasyonlar ve bu kombinasyonlardan elde edilen sonuçlar Çizelge 8’de sunulmuştur. Çizelgede her bir kombinasyonun bulduğu parçacık sayısı ile gerçek parçacık sayısına oranlandığında elde ettiği başarı yüzdesi parantez içerisinde verilmiştir. Ayrıca çizelgenin en sağında tüm görüntüler için elde edilen ortalama başarı sunulmuştur.

Çizelge 8. Farklı kombinasyonlar sonucu elde edilen edilen sonuçlar

Kombinasyonlar	I ₁ (243)	I ₂ (65)	I ₃ (28)	I ₄ (16)	I ₅ (82)	I ₆ (7)	Ortalama başarı (%)
Genişleme-medyan-otsu	62 (%25.52)	9 (%13.85)	24 (%85.72)	7 (%43.75)	65 (%79.27)	51 (NA)	41.35
Genişleme-medyan-kapur	149 (%61.32)	113 (%26.16)	70 (NA)	75 (NA)	80 (%97.5)	51 (NA)	30.83
Genişleme-gauss-otsu	84 (%34.57)	14 (%21.54)	27 (%96.43)	15 (%93.75)	74 (%90.25)	56 (NA)	56.09
Genişleme-gauss-kapur	181 (%74.49)	139 (NA)	83 (NA)	91 (NA)	92 (%87.81)	62 (NA)	27.05
Aşındırma-medyan-otsu	202 (%83.13)	63 (%96.93)	48 (28.58)	13 (%81.25)	149 (%18.03)	19 (NA)	51.36
Aşındırma-medyan-kapur	134 (%55.15)	89 (%63.08)	45 (%39.29)	33 (NA)	74 (%90.25)	26 (NA)	41.29
Aşındırma-gauss-otsu	206 (%84.78)	69 (%93.85)	52 (%14.29)	12 (%75)	168 (NA)	22 (NA)	44.65
Aşındırma-gauss-kapur	251 (%96.71)	89 (%63.08)	47 (%32.15)	39 (NA)	97 (%85.37)	38 (NA)	46.21
Açma-medyan-otsu	33 (%13.59)	27 (541.54)	24 (%85.72)	8 (%50)	55 (%67.08)	28 (NA)	45.80
Açma-medyan-kapur	167 (%68.73)	57 (%87.7)	45 (%39.29)	25 (%43.75)	68 (%82.92)	32 (NA)	56.69
Açma-gauss-otsu	78 (%32.1)	43 (%66.16)	25 (%89.29)	11 (%68.75)	81 (%98.79)	29 (NA)	59.18
Açma-gauss-kapur	221 (%90.95)	82 (%73.85)	74 (NA)	26 (%37.5)	141 (%28.65)	37 (NA)	38.49
Kapama-meydan-otsu	6 (%2.47)	12 (%18.47)	26 (%92.86)	8 (%50)	48 (%58.54)	30 (NA)	33.56
Kapama-medyan-kapur	73 (%30.05)	57 (%87.7)	45 (%39.29)	25 (%43.75)	68 (%82.92)	32 (NA)	47.28

Kapama-gauss-otsu	8 (%3.3)	17 (%26.16)	28 (%100)	7 (%43.75)	51 (%62.2)	45 (NA)	31.39
Kapama-gauss-kapur	75 (%30.80)	64 (%98.47)	59 (NA)	44 (NA)	72 (%87.81)	49 (NA)	36.19

NA: Gerçek parçacık sayısı ile hesaplanan parçacık sayısı arasındaki mutlak fark gerçek parçacık sayısından daha büyük olduğu durumlardır. Ortalama başarı hesaplanırken NA değeri 0 (sıfır) olarak alınmıştır.

Çizelge 8. Devamı

Çizelge 8'e bakıldığında farklı karakteristik ve parçacık sayılarına sahip olan görüntülerde farklı kombinasyonlar başarı olmuştur. Her bir görüntüdeki en başarı sonuca bakıldığında kombinasyondaki morfolojik işlemler dikkate alındığında herhangi bir yöntemin öne çıktığı görülmemektedir. Her başarı durumunda farklı bir morfolojik işlemin etki ettiği gözlemlenmektedir. Bu durum eşikleme yaklaşımları için de söz konusudur. Hem Otsu hem de Kapur yöntemlerinin başarılı olduğu kombinasyonlar mevcuttur. Ancak filtreleme ile ön işlem yöntemlerine bakıldığında ise başarılı olan kombinasyonlarda Gauss filtresinin öne çıktığı gözlemlenmektedir. Tüm görüntüler için elde edilen ortalama başarıya bakıldığında ise *Açma-Gauss-Otsu* kombinasyonunun %59.18 ile en başarılı sonucu elde ettiği görülmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, elektron mikroskobu ile elde edilen metal parçacıkları görüntüleri üzerinde parçacık sayımı yapılmıştır. Farklı karakteristik ve parçacık sayılarına sahip olan 6 görüntü üzerinde çalışılmıştır. Parçacık sayımında görüntü ön işleme adımlarının etkilerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda ön işleme adımlarından olan morfolojik işlemler (genişleme, aşındırma, açma ve kapama operatörleri), filtreleme işlemleri (Gauss ve medyan filtre) ve eşikleme yaklaşımları (Otsu ve Kapur) her bir görüntü için ayrı ayrı uygulanmıştır. Morfolojik ve filtreleme işlemlerinin bir parçası olan maske için boyut değerleri 3x3 ile 11x11 aralığında ele alınmış ve analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlara bakıldığında ön işlem adımlarının tek başına uygulandığında oldukça başarısız sonuçların elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle ön işleme adımlarının farklı kombinasyonları kullanılarak yeni sonuçlar elde edilmiştir. Sonucunda, ön işleme adımları birlikte kullanılarak gerçek değere yakın sonuçlar elde edilmiştir. Toplamda 16 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. Bu kombinasyonların her birinde morfolojik, filtreleme ve eşikleme yaklaşımlarından birer tane alınarak oluşturulmuştur. Kombinasyonların uygulanması sonucu elde edilen bulgulara göre *Açma/Gauss/Otsu* kombinasyonunun ortalama başarı olarak öne çıktığı görülmüştür. Görüntüler tek başına değerlendirildiğinde ise her bir görüntü için farklı kombinasyonların gerçeğe yakın sonuçlar üretmek başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, seçilen ön işlem yöntemlerinin sistemin başarısında doğrudan etkili olduğunu göstermiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, belirli görüntüler dikkate alınarak hangi tür görüntü için hangi ön işleme adımlarının birlikte kullanılmasının daha uygun olduğu araştırılabilir. Ayrıca mevcut kombinasyonlardan esinlenilerek literatüre yeni yaklaşımlar kazandırılabilir.

Kaynaklar

1. Xu R. Optical Particle Counting: Counting and Sizing. Particle Characterization: Light Scattering Methods 2002; 182-222.
2. McTigue NE, Lewis CM, *Fundamentals of Drinking Water Particle Counting*. 2000: American Water Works Association.
3. Chadha GK, vd. An automated method for counting red blood cells using image processing. *Procedia Computer Science* 2020; 167769-778.
4. Çelik A, Tekin E. Hough transform görüntü işleme yöntemiyle ekim makineleri için tohum sayma uygulaması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2020; 260-267.
5. Adams T, vd. Automated lung tumor detection and diagnosis in CT Scans using texture feature analysis and SVM in FedCSIS (Communication Papers). 2018.

6. ÖZDET B, Semra İ. Akciğer Bilgisayarlı Tomografi Görüntülerinde Görüntü İşleme Uygulamaları ile Tümörlerinin Tespit Edilmesi.Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi 2022; 27(1):135-150.
7. Telli A, Özkan İ. Görüntü İşleme Teknikleri ile Örne Kumaşlardaki Boncuklanma Direncinin Objektif Ölçümü.Tekstil ve Mühendis 2018; 25(112):313-318.
8. Furkan Ç, Güven A. Dijital Mikroskop Altında Alınan Kan Hücreleri Görüntülerinden Beyaz Kan Hücrelerinin Algılanması ve Sınıflandırılması.Electronic Letters on Science and Engineering 2019; 15(3):23-43.
9. AŞLIYAN R. Otsu ve Rocchio Metotlarıyla Beyin Tümörü Tespiti.Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2022; (43):69-74.
10. BOZTOPRAK H, ERGÜN ME. Yapraklı Ağaçlarda Trahe ve Liflerin Belirlenmesi.Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi 2017; 6(2):87-96.
11. Dihkan M, Karslı F. Kayaç Üzerinde Kristal Dağılımının (CSD) Dijital Görüntü İşleme ile Tespiti in III. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu. Kocaeli, Türkiye;2010.
12. Kerimoğlu E. Mikroskobik gölge görüntüleme tabanlı mikroakışkan sitometrisi. Yüksek Lisans.Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2021.
13. Çubukçu A, vd. Görüntü işleme ile 3 eksenli robot mekanizması üzerinde nesne ayırt edilmesi ve sıralanması in Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK'2015. Denizli;2015.
14. Yağmur D, ATALI G. HSL Renk Uzayında Görüntü İşleme ve Morfolojik İşlemler Kullanarak Gerçek Zamanlı Nesne Tespiti ve Sınıflandırması.Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; (28):607-613.
15. Boztoprak H, Çağlar MF, Merdan M. Alternatif morfolojik bir yöntemle plaka yerini saptama.XII. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi. Eskişehir, Kasım 2007;
16. Soyhan İ, GUREL S, Tekin SA. Yapay Zeka Tabanlı Görüntü İşleme Tekniklerinin İnsansız Hava Araçları Üzerinde Uygulamaları.Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2021; (24):469-473.
17. Atalı G, Özkan S, Karayel D. Morfolojik görüntü işleme tekniği ile yapay sinir ağlarında görüntü tahribat analizi.Akademik Platform Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi 2016; 4(1):
18. Bayram RB. Metal Sektörü İçin Görüntü İşleme Tabanlı Bir Kusurlu Ürün Tespit Sistemi. Yüksek Lisans.Bursa Uludağ Üniversitesi; 2019.
19. KARAKOYUN M. THE COMPARISON OF THE EFFECTS OF THRESHOLDING METHODS ON SEGMENTATION USING THE MOTH FLAME OPTIMIZATION ALGORITHM.Kahramanmaraş Sütcü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 26(2):517-531.
20. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms.IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 1979; 9(1):62-66.
21. Karakoyun M, Baykan NA, Hacibeyoglu M. Multi-level thresholding for image segmentation with swarm optimization algorithms.International Research Journal of Electronics and Computer Engineering 2017; 3(3):1-6.
22. Kapur JN, Sahoo PK, Wong AK. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram.Computer vision, graphics, and image processing 1985; 29(3):273-285.
23. ALTUNTAŞ C. FİLTRELEME YÖNTEMİ İLE DİĞİTAL GÖRÜNTÜ ZENGİNLEŞTİRME VE ÖRNEK BİR YAZILIM.Selcuk University Journal of Engineering Sciences 2011; 10(1):99-107.
24. Zebari NA, TENKEKİ E. Skin Lesion Segmentation Using K-means Clustering with Removal Unwanted Regions.Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 9(18):519-529.
25. Üncü YA, Sevim G, Canpolat M. Difüz Optik Tomografi Sisteminde Görüntü İşleme Uygulamalarının Test Edilmesi.Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science 2021; 16(1):1-16.
26. KARAKUŞ MÖ, ÖZBAY E. LÖKOSİT TESPİTİ İÇİN BEYAZ KAN HÜCRELERİNİN ESA KULLANILARAK SINIFLANDIRILMASI.Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 9(17):333-344.
27. Özcan FT. Ön görüntü işleme ve bölütleme algoritmalarını kullanarak standart tarayıcı ile optik form okuma. Yüksek Lisans.Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi; 2022.

ANTIOXIDANT ACTIVITY AND AROMA PROFILE OF WILD-TYPE BLACKBERRY FRUITS GROWING IN ARAPGİR

Nurullah DEMİR^{1*}

¹ Gıda İşleme Bölümü, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Meslek Yüksekokulu, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, 12000, Türkiye
Geliş Tarihi/Received Date: 19.10.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 12.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1378264

ABSTRACT

This research aimed to describe the physicochemical and pomological characteristics of blackberry fruits of the wild-type variety growing in the region of Arapgir (town of Malatya). The investigation focused on determining the indicators of bioactive characteristics, antioxidant activity, total phenolic and anthocyanin content of the blackberry fruits. The blackberry samples exhibited a higher total phenolic content (2132.66 mg GAE 100g⁻¹) compared to several studies, although their total anthocyanin content (356.19 mg cyn-3-O-gly 100g⁻¹) was determined to be similar to earlier research findings. The methanolic extracts exhibited significant radical-scavenging activity, suggesting superior antioxidant capacity. The ABTS^{•+} and DPPH[•] capacities were determined to be 19.38 mmol TE 100g⁻¹ and 26.88 mmol TE 100g⁻¹, respectively. Furthermore, the aroma profile was assessed by conducting volatile component analysis using the SPME/GC-MS technique. As a result of volatile component analysis, a total of 67 components were identified, including 13 aldehydes, 4 ketones, 20 alcohols, 24 esters, 4 terpenes and 2 miscellaneous components.

Keywords: Blackberry, Bioactive compounds, Antioxidant activity, Aroma, Volatiles

ARAPGİR'DE YETİŞEN YABANI BÖĞÜRTLEN MEYVELERİNİN ANTIOKSİDAN AKTİVİTESİ VE AROMA PROFİLİ

ÖZET

Bu çalışmada Arapgir'de (Malatya ilinin ilçesi) yetişen yabani tip böğürtlen meyvelerinin bazı fizikokimyasal ve pomolojik özellikleri belirlenmiştir. Bunun yanında meyvelerin biyoaktif özelliklerini ifade eden toplam fenolik, toplam antosiyanin ve antioksidan aktivitesi araştırılmıştır. Böğürtlen örneklerinin toplam antosiyanin içerikleri (356.19 mg Cyn-3-O-Gly 100g⁻¹) daha önceki çalışmaların sonuçlarına yakın tespit edilirken, toplam fenolik içeriği (2132.66 mg GAE 100g⁻¹) daha önce yapılan birçok çalışmadan yüksek bulunmuştur. Metanolik ekstraktların antioksidan özellikleri ise oldukça iyi bir radikal giderici aktivite göstermiştir. ABTS^{•+} ve DPPH[•] değerleri sırasıyla 19.38 mmol TE 100g⁻¹ ve 26.88 mmol TE 100g⁻¹ olarak saptanmıştır. Ayrıca örneklerin, aroma profilini belirlemek üzere SPME/GC-MS tekniği ile uçucu bileşen analizi yapılmıştır. Uçucu bileşen analizi sonucunda, 13 aldehit, 4 keton, 20 alkol, 24 ester, 4 terpen ve 2 çeşitli bileşen olmak üzere toplamda 67 bileşen tanımlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Böğürtlen, Biyoaktif bileşenler, Antioksidan aktivite, Aroma, Uçucu bileşenler

1. Introduction

Due to the numerous advantageous effects attributed to phenolic compounds, there has been an increase in the search for identifying plant species characterised by a substantial phenolic content and related biological activity. Berries are a well-known food source of phenolic compounds, which have both antioxidant and bioactive qualities [1]. Epidemiological and clinical research suggest that phenolic compounds in berries may lower the obesity risk, coronary disease, degenerative illnesses, and cancer. Research has examined the health effects and processes of anthocyanins in vitro and in animal models.

* e-posta¹ : ndemir@bingol.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9221-7826> (Sorumlu Yazar)

Blackberries (*Rubus fruticosus* L.) have a rich and storied history that dates back thousands of years. Native to Europe, Asia, and North America, diets of people have included blackberry since the dawn of time. Native Americans were known to use blackberries for medicinal purposes, while the ancient Greeks and Romans used them for culinary delights and even fermented them into wine [2]. Blackberry plants are characterized by their perennial growth habit. They belong to the '*Rubus*' genus and are part of the '*Rosaceae*' family. Blackberry plants typically have long, thorny canes that arch and trail along the ground. Some cultivated varieties have been developed with reduced thorniness for easier harvesting. Blackberries develop from the flowers of the blackberry plant. The fruit starts green and gradually turns red, then deep purple to black as it ripens. The harvest season for blackberries varies by region but is generally in the summer months, typically from May to August, depending on the climate. There are numerous blackberry cultivars with varying characteristics in terms of fruit size, flavor, yield, and growth habit. Popular cultivars include 'Marion', 'Boysen', 'Chester', and 'Thornless Evergreen' [3-5].

Blackberries have garnered attention as a fruit of significance due to their large quantities of anthocyanins, ellagitannins, and other phenolic compounds, which together contribute to their considerable antioxidant capacity. Blackberries have been the subject of multiple investigations due to their superior oxygen radical absorption capability compared to other fruits, which has resulted in the identification of their strong antioxidant activity. In Europe, blackberries have been used to cure eye and mouth infections since the 16th century because of their renowned therapeutic properties [6]. Consuming blackberries regularly can offer a wide range of health benefits. Thanks to their high vitamin C content, blackberries can strengthen the immune system, helping the body fend off illnesses. The fiber, potassium, and antioxidants in blackberries contribute to heart health by reducing blood pressure and cholesterol levels. Blackberries' fiber content aids in digestion and may help prevent constipation. Antioxidants in blackberries combat free radicals, which can lead to premature aging, making your skin look and feel better. Several studies have indicated that the existence of antioxidants in blackberries may potentially contribute to a decrease in the likelihood of developing specific types of cancer [7-11]. The content and quantities of phenolic compounds in blackberries have been observed to be altered by various factors, including genetics, growing circumstances, and maturation [12]. The blackberry fruit offers diversity in its consumption, as it can be enjoyed in its fresh form or undergo various processing methods to create a range of products such as juice ice-cream, frozen treats, dry snacks, cake, jam, marmalade, wine and liqueur [13]. The current information about the metabolism of blackberry phenolic compounds is restricted and there is a lack of research dedicated to exploring their potential health benefits, digestion, bioavailability, and the underlying mechanisms responsible for delivering these advantages. In this study, some physicochemical properties and aroma profiles, as well as antioxidant properties, of blackberries grown in Arapgir were characterized.



Figure 1. The collection of blackberry fruits (wild type) took place in Arapgir.

2. Material and Method

2.1. Blackberry Fruits

Blackberry fruits (Figure 1) were gathered from wild species growing in Arapgir district of Malatya province. The fruits were promptly stored in a freezer set at a temperature of -86 °C.

The act of keeping in the freezer is employed as a means of safeguarding phenolic components, particularly anthocyanins, from potential harm or degradation.

2.1. Physicochemical Qualities of Blackberry Fruits

The pomological features, including size and weight measurements, were evaluated using a digital micrometer and an analytical balance, respectively. Before conducting the tests, the blackberry fruits were subjected to a cleaning and pitting procedure to ease the mash production using a mixer. Following that, a homogenate was prepared using a homogenizer in order to carry out several specified analyses. A comprehensive examination was conducted on a representative group to determine the total acidity, pH, and °Brix levels. To the previously mentioned description of the sample preparation procedure for chemical analysis, a homogenate with a mass of 10 g was diluted by adding 100 mL of Milli-Q water (Millipore, Bedford, Mass., U.S.A.). Subsequently, the pH of each homogenate was assessed using a pH meter (Mettler-Toledo, Greifensee, Switzerland). The samples' overall acidity was evaluated using titration, utilizing a solution of 0.1 M NaOH. The chromameter (model CR-5, Konica Minolta, Osaka, Japan) was used to quantify the surface color attributes, namely L^* , a^* , b^* , Chroma (C^*), and hue angle (h°). The measurements were performed utilizing a petri dish with a diameter of 3 mm, employing illuminant D-65 and an observer angle of 10°.

2.2. Analysis of Total Anthocyanin and Total Phenolics

The method published by Serradilla et al. [14] was used to determine the total anthocyanin contents of sweet cherries. The methanolic extracts of the samples utilized for determining the total phenolic content were subjected to measurement at a wavelength of 520 nm using a precise spectrophotometer. The quantification was accomplished by employing the standard calibration curve of cyanidin-3-O-rutinoside, obtained from Sigma-Aldrich, located in St. Louis, Missouri, United States. The total amounts of anthocyanin were quantified and reported as mg cyanidin-3-O-rutinoside equivalent per 100 grams of fresh weight (FW). The quantification of total phenolic compounds in blackberries was conducted using the 'Folins' method utilizing a UV-spectrophotometer (model: UV-1800, Shimadzu, Kyoto, Japan), as previously described by Singleton et al. [15].

2.3. Antioxidant Capacity of Blackberry Fruits

The scavenging radical activity of blackberry samples was determined using two experimental methods: ABTS^{•+} (2,2-azino-di-(3-ethylbenzothiazoline-sulphonic)) and DPPH[•] (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) assays. The ABTS^{•+} solution was made by combining 2.45 mmol of potassium persulphate. The resulting solution was then diluted with methanol until it reached an absorbance of 0.70±0.02 at a temperature of 30 °C, using a precise spectrophotometer. The cherries that underwent homogenization were subsequently diluted with ethanol in a ratio of 1:50. Following the procedure outlined in the sample preparation section, a 0.1 mL aliquot of the homogenate was combined with 3.9 mL of ABTS. Subsequently, the resulting solution was incubated in darkness for a duration of 10 minutes. The absorbance of the samples was then determined at a wavelength of 734 nm, as described by Xu et al. [16]. The samples' absorbance was measured and compared to the Trolox[®] standard, which ranged from 5 to 100 µg g⁻¹. The findings were then represented as mg Trolox equivalent (TE) per gram of fresh weight (FW). The analysis of DPPH[•] radical scavenging capacity was conducted by producing a solution of 2.5 mg of DPPH in 100 mL of methanol, as described by Lucena et al. [17]. A volume of 100 µL of blackberry extract was diluted with pure methanol and thereafter combined with 3.9 mL of

DPPH' solution. The resulting mixture was allowed to rest for a duration of 45 minutes at a temperature of 20 °C. The measurement of absorbance at 517 nm was conducted on the combination using a precise spectrophotometer. The absorbance values of the samples were then compared to those of Trolox, ranging from 5 to 500 $\mu\text{g g}^{-1}$. The findings were quantified in mgs of Trolox equivalents per gram of FW.

2.4. Aroma Profile of Blackberry Fruit

The volatile compounds of blackberries were extracted by solid-phase microextraction (SPME) using a DVB/CAR/PDMS (Divinylbenzene/Carboxen/Polydimethylsiloxane; 50/30 μm coating thickness; 2 cm length; Supelco, Bellefonte, Pa., U.S.A.) fiber. A lab blender homogenized approximately 50 g of blackberries. Three grams of the homogenized sample were promptly transferred in triplicate into 15 mL SPME vials (Supelco, Bellefonte, Pa., U.S.A.) within 2 minutes. Subsequently, 10 μL of an internal standard solution containing 81 mg/kg of 2-methyl-3-heptanone (for all volatiles except acids) and 2-methyl pentanoic acid (for volatile acids; Sigma-Aldrich Co., U.S.A.) in methanol was added as an internal standard. The vials were manually agitated and thereafter placed on a heater set at a temperature of 40 °C for a duration of 30 minutes in order to facilitate the accumulation of volatile substances in the headspace. Following that, fiber was introduced into a vial with the purpose of absorbing volatile chemicals for a duration of 30 minutes. The temperature at which desorption occurred in the MS sampler was measured to be 250 °C.

The volatiles present in the blackberries were collected through hand sampling using a solid-phase microextraction (SPME) fiber. The collected samples were then analyzed using a gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) system, namely the Shimadzu GC-2010 gas chromatography and QP-2010 mass spectrometry system manufactured by Shimadzu Corporation in Kyoto, Japan. The separation process was conducted using a DB-Wax column (60 m \times 0.25 mm \times 0.25 mm; J&W Scientific, Folsom, Calif., U.S.A.) under splitless mode. The carrier gas utilized in the experiment was helium, with a flow rate of 1.0 mL/min. The temperature protocol was executed in accordance with the methodology outlined by Yildiz et al. [18], with minor adjustments. The experimental protocol involved a heating gradient procedure, wherein the temperature was initially set at 40 °C for a duration of 2 minutes, followed by a further increase at a rate of 3 °C per minute until reaching a final temperature of 80 °C, which was maintained for 1 minute. Subsequently, the temperature was elevated to 240 °C at a rate of 5 °C per minute, and maintained at this level for a duration of 6 minutes. The chromatograms were evaluated and the peaks were identified using the Wiley 8 and NIST05 mass spectrum libraries. The n-alkane series, ranging from C₁₀ to C₂₆, was employed under identical experimental settings in order to validate the retention indices. The results were determined by quantifying the peak area of each chemical as $\mu\text{g kg}^{-1}$ of the sample.

3. Results And Discussion

3.1. Chemical and physical characteristics

Table 1 offers data on the physicochemical and some of the pomological characteristics of blackberry fruits. The °Brix value is a measure of the sugar content in a solution, including fruit juices. It is commonly used to assess the sweetness of fruits and their potential for producing high-quality juice or other processed products. Brix is expressed as a percentage, and it indicates the grams of sucrose (table sugar) in 100 grams of juice or fruit. °Brix is often used as an indicator of fruit ripeness. As fruits mature and sugars accumulate, the °Brix value tends to increase. However, it's important to note that other factors, such as acidity and aroma, also effect the overall acceptance of the fruits. The °Brix value of blackberry fruit is estimated to be approximately 14. Nevertheless, the overall dry matter content was found to be 22%. The experimental findings indicated that the quantity of insoluble dry matter dissolved in water was comparatively lower in relation to the quantity of soluble matter. It's important to note that while °Brix is a useful indicator of sweetness, it doesn't provide a complete picture of fruit quality.

Other factors such as aroma, texture, and overall flavor profile are also important considerations in assessing fruit quality.

Table 1. Some physicochemical and pomological properties of blackberry fruit grown in Arapgir

Physicochemical and pomological values <i>Rubus fruticosus</i> L.					
Humidity	77.26	±0.71	L^*	20.14	±5.88
a_w	0.959	±0.001	a^*	8.09	±4.69
°Brix	13.92	±0.13	b^*	3.31	±2.80
pH	4.053	±0.01	C^*	9.12	±4.80
Titratable acidity (mg citric acid 100g ⁻¹)	0.91	±0.01	h°	20.80	±16.75
			Length (mm)	13.41	±0.68
			Weight (g)	1.21	±0.19

Averages; ± Standard deviations

The color of blackberries is primarily due to existence of anthocyanins, which give them their deep purple to black hue. The color may vary slightly depending on the cultivar and ripeness. The quality of dark-colored berry fruits and processed foods is significantly influenced by the color of the fruit, which is mostly determined by the presence of anthocyanins. Anthocyanins are a category of pigments that are soluble in water and are recognised for their antioxidative properties. The primary anthocyanin found in blackberries is cyanidin-3-glucoside [19]. The L^* (20.14) and a^* (8.09) values of blackberry fruit have been attributed to its anthocyanin composition. The acidity of fruits is an essential component of their flavor profile and plays a significant role in determining their taste. The acidity of fruits is predominantly attributed to the existence of organic acids, wherein citric acid, malic acid, and tartaric acid are the prevalent acids commonly observed in fruits. The optimal proportion between sweetness and acidity plays an essential part in determining the comprehensive sense of fruit flavour. Fruits with a good balance between sweetness and acidity are often considered the most palatable. We found the pH value of blackberry samples to be 4.05 and the titratable acidity to be 0.91 mg/100 g. In their study, Wang and Xu [20] determined the pH and titratable acidity levels of blackberry juice and concentrate to be 2.86 and 1.65 mg/100 g, respectively.

Table 2. Total phenolic and total anthocyanin content and antioxidant activity of blackberry fruit grown in Arapgir

<i>Rubus fruticosus</i> L.		
ABTS (mmol TE 100g ⁻¹ d.w.)	19.38	±0.42
DPPH (mmol TE 100g ⁻¹ d.w.)	26.88	±0.55
Total phenolics (mg GAE 100g ⁻¹ d.w.)	2132.66	±104.11
Total anthocyanins (mg Cyn-3-O-Gly 100g ⁻¹ d.w.)	356.19	±27.52

Averages; ± Standard deviations; TE: Trolox® equivalent; GAE: Gallic acid equivalent; Cyn-3-O-Gly: cyanidin-3-O-glycoside equivalent; d.w.: dry matter

The study conducted by Yilmaz et al. [21] aimed to assess various physico-chemical properties of blackberry genotypes. The study centered around a comprehensive analysis of a total of sixteen selected wild-type blackberries and nine cultivated and varieties that are grown in Türkiye. The findings indicated that cultivated blackberries had greater average fruit weight and greater fruit dimensions compared to wild blackberry specimens. Nevertheless, the total soluble solids, acidity levels, and pH values exhibited greater measurements in the wild samples. The findings of our study agree with the findings of previous research carried out in Türkiye at the same time [21].

3.2. Antioxidant Activity, Total Anthocyanin and Phenolic Content of Blackberry Fruit

Blackberries are popular due to their antioxidant properties, which are related to their high anthocyanin and phenolic content. [22]. The overall anthocyanin and phenolic content of blackberry fruit depends on cultivar, ripeness, growing conditions, and extraction and analysis procedures. Blackberries contain several compounds that contribute to various health benefits. Table 2 presents the findings on the total anthocyanin content, the total phenolic content, and the antioxidant activity of blackberry fruits.

Anthocyanins have also been proven to be capable of inhibiting cellular growth and inducing apoptosis in cancer cells through in vitro research [23, 24]. Therefore, the anthocyanins that are found in the blackberry extract are able to exert various protective actions against the pleurisy that is caused by carrageenan [25]. The measured quantity of anthocyanins in our sample was found to be 356.19 mg 100g⁻¹, while its total phenolic content was confirmed to be 2132.66 mg 100g⁻¹ dry weight. Siriwoharn et al. [26] have studied three blackberry cultivars in Oregon, (U.S.). The anthocyanin content exhibited a significant increase, rising from 74.7 to 317 mg100 g⁻¹ FW for 'Marion' and from 70 to 164 mg 100 g⁻¹ FW for 'Evergreen'. The study found that the levels of total anthocyanin in 'Marion' berries grew dramatically as they ripened. At the underripe stage, the total anthocyanin content of 'Marion' berries were comparable to that of 'Evergreen' berries. However, in the ripe and overripe stages, the total anthocyanin content of 'Marion' berries was about twice as high as that of 'Evergreen' berries [26]. The total anthocyanin content in blackberries can vary widely but is typically in the range of 100 to 300 mg per 100 grams of fresh weight. However, specific cultivars and growing conditions can lead to higher or lower anthocyanin levels. Upon conducting a thorough analysis and comparison of our results with those of other studies, we observed that our performance metrics were significantly higher [26, 27]. Anthocyanin levels tend to increase as blackberries ripen, which is why ripe blackberries have a deeper color. Environmental factors, such as sunlight exposure, can also impact anthocyanin production in the fruit [3, 28]. Bowen-Forbes et al. [29] studied the anthocyanin contents of four cultivated blackberry genotypes in Michigan were examined and found the results 146-2200 mg 100 g⁻¹. Also it has been known that the blackberry anthocyanins cyanidin-3-glucoside and cyanidin-3-rutinoside are the primary and minor anthocyanins in blackberries [30]. Throughout the method of preparing our results, we conducted calculations based on the compound cyanidin-3-O-glucoside.

Blackberries contain flavonoids, phenolic acids and tannins. Antioxidants in blackberries come from phenolic chemicals. Blackberry phenolic compounds may reduce chronic disease risk and enhance cardiovascular health, according to research. [2, 31]. The total phenolic content of blackberries is typically higher than that of many other fruits. It can range from 500 to 1500 mg of gallic acid equivalents (GAE) per 100 grams of fresh weight. It's important to note that the total anthocyanin and phenolic content of blackberries can vary not only between different cultivars but also between individual berries within the same harvest [2, 29]. Koca and Karadeniz [32] conducted research on ten different cultivars of blackberry fruit that are grown in Türkiye. The observed ranges for the total anthocyanin and total phenolic contents of the samples under investigation were as follows: blackberries exhibited values ranging from 95 to 197 mg 100g⁻¹ for total anthocyanin content, and from 173 to 379 mg 100g⁻¹ for total phenolic content. In our study, the fruits of the blackberry have been measured to have a total phenolic content of 2132 mg 100g⁻¹. In their study, Siriwoharn et al. [26] found that the levels of a certain compound were measured to be 1541 mg 100g⁻¹ and 1035 mg 100g⁻¹ throughout overripe phase of 'Marion' and 'Evergreen' cultures, respectively. Our values higher than these ideals in terms of value and significance. Yilmaz et al. [21] evaluated the blackberry cultivars and wild genotypes exhibited a range of total phenolic contents, with values ranging from 584 mg 100 g⁻¹ ('cv. Bartin') to 788 mg 100 g⁻¹ ('cv. Chester') and from 610 mg 100 g⁻¹ ('Genotype R2') to 1455 mg 100 g⁻¹ ('Genotype R16'), expressed as gallic acid equivalents (GAE), based on fresh weight measurements. When compared to the findings of other studies, the results we obtained came in at a quite high level. Akin et al. [12] researched fruits of wild blackberry, black and white mulberries grown in southern Bulgaria. The findings demonstrate that black mulberries indicated the highest level of antioxidant activity, with a measured value of 122.30 mmol TE 100g⁻¹. White mulberries followed closely with a measurement of 86.13 mmol TE 100g⁻¹, while blackberries demonstrated a lower antioxidant activity of

44.90 mmol TE 100g⁻¹ [12]. Despite the fact that our findings fall below these benchmarks, they exhibit a degree of familiarity.

In a study, Gündoğdu et al. [33] utilized a total of eleven blackberry cultivated in Malatya. In the study where the Trolox equivalent antioxidant capacity was determined, the blackberry cultures showed antioxidant results ranging from 3.08 to 4.89 mmol 100g⁻¹. Yilmaz et al. [21] determined the antioxidant activity of blackberry fruits, both cultivated and wild, ranged from 72.15% (cv. Arapaho) to 89.75% (cv. Bursa 3) and from 59.85% (R1) to 87.42% (R10), respectively. The measured antioxidant activity of the standard BHA compound was determined to be 85.07%. Consistently, various cultivars cultivated in the same geographical area shown notable variations in their antioxidant activity [21]. Oszmiański et al. [34] conducted a study in which twenty-three distinct samples of wild blackberry fruit were examined to evaluate their phenolic profiles, contents, and antioxidant activity using two different extraction methods, namely FRAP and ABTS. A total of thirty-four phenolic compounds were identified. The findings of the ABTS test that was carried out on samples of blackberries that had been subjected to pressurized liquid extraction showed that the value ranged anywhere from 4 mmol TE 100g⁻¹ to 9 mmol TE 100g⁻¹ as dry weight. The observation that our data exhibit greater values compared to those obtained using pressurised liquid extraction indicates notable differences in extraction efficiency and impact.

3.3. Aroma Profile of Blackberry Fruits

The formation of fruit taste is attributed to the varying quantities of volatile components. Furthermore, fragrance components play a crucial role in discerning the sensory distinctions among fruits, exerting a considerable impact on fruit quality. The technique known as Solid-Phase Microextraction (SPME) was introduced in the novel researches as a viable method for separating volatile molecules from non-volatile matrix components that may cause interference. In addition to several benefits, SPME can be regarded as a rapid, straightforward, cost-effective, highly sensitive, solvent-free, and easily automatable method. The choice of SPME fibre coating primarily affects recovery of volatile compounds. The application of SPME in the investigation of food flavour components has been extensively employed [35]. The main organic constituents contributing to the flavour profile of fruit berries contain numerous volatile chemicals, including aldehydes, ketones, alcohols, esters, furanones, sulphur compounds and terpenoids [36]. Table 3 displays the fragrance profile associated with blackberry fruits. Based on the analysis of the volatile component composition of the samples, a total of 67 components were identified. These components included 13 aldehydes, 4 ketones, 20 alcohols, 24 esters, 4 terpenes, and 2 miscellaneous components.

Du et al. [37] analyzed the volatile composition of 'Marion' and 'Black Diamond' fruits to explore differences in their aroma. Despite a similar overall profile, some compounds differed significantly in concentration. For example, 'Marion' had a stronger berry, fruity, and strawberry aroma, while 'Black Diamond' had a more pronounced floral aroma. The cultivar known as 'Thornless Evergreen' exhibited a higher overall concentration of volatiles, primarily consisting of alcohols, terpenoids, and phenols, in comparison to the cultivar 'Marion', which displayed a greater abundance of organic acids. Qian and Wang [38] identified ethyl hexanoate, β -ionone, linalool, 2-heptanone, 2-undecanone, α -ionone, and hexanal as compounds with strong smell activity in 'Marion' and 'Thornless Evergreen', compounds with strong odour activity included ethyl hexanoate, 2-heptanone, 2-methylbutanoate, 2-heptanol, 3-methylbutanal, α -pinene, limonene, *p*-cymene, linalool, (*E*)-2-hexenal, myrtenol, hexanal, 2-methylbutanal, and Our blackberry samples showed a significant presence of (*E*)-2-hexenal (115.16 $\mu\text{g kg}^{-1}$), which appeared to be the most prominent component, followed by ethanol (42.87 $\mu\text{g kg}^{-1}$), hexanal (27.22 $\mu\text{g kg}^{-1}$), (*E*)-2-hexene-1-ol (21.29 $\mu\text{g kg}^{-1}$), linalool (11.95 $\mu\text{g kg}^{-1}$) and 1-hexanol (11.82 $\mu\text{g kg}^{-1}$).

Table 3. Volatile components of blackberry fruits grown in Arapgir

<i>Aldehydes (13)</i>	RI	$\mu\text{g kg}^{-1}$	<i>Alcohols (20)</i>	RI	$\mu\text{g kg}^{-1}$
Ethanal	673	2.01 \pm 0.59	Ethanol	907	42.87 \pm 1.60
2-Methylbutanal	871	0.36 \pm 0.06	2-Butanol	1008	0.27 \pm 0.09

3-Methylbutanal	878	0.65	±0.19	3-Methyl-1-butanol	1201	0.58	±0.02
Hexanal	1066	27.22	±14.73	2-Heptanol	1309	8.38	±0.98
(Z)-3-Hexenal	1118	1.06	±0.79	2-Methyl-3-heptanol	1324	7.82	±5.87
2-Methyl-4-pentenal	1123	0.99	±0.22	1-Hexanol	1344	11.82	±6.53
(E)-2-Hexenal	1214	115.16	±38.32	(Z)-3-Hexen-1-ol	1377	2.51	±0.96
Octanal	1275	0.13	±0.08	(E)-2-Hexene-1-ol	1397	21.29	±18.65
Nonanal	1385	0.89	±0.08	1-Octen-3-ol	1436	0.24	±0.03
(E,E)-2,4-Hexadienal	1400	1.16	±0.35	6-Methyl-5-hepten-2-ol	1450	9.97	±0.50
(E,E)-2,4-Heptadienal	1460	0.27	±0.03	2,6-Dimethyl-7-octen-2-ol	1455	3.30	±4.45
Decanal	1490	0.71	±0.25	Pinacol	1472	0.67	±0.24
(E)-2-Decenal	1637	0.15	±0.07	(E)-2-Heptene-1-ol	1499	0.26	±0.03
Esters (24)				2-Nonanol	1503	0.14	±0.03
Methyl acetate	764	0.49	±0.17	1-Octanol	1544	1.31	±0.09
Ethyl acetate	833	6.44	±2.15	(Z)-2-Octen-1-ol	1601	0.19	±0.02
Methyl propionate	861	0.38	±0.09	1-Nonanol	1644	0.55	±0.12
Methyl butyrate	960	0.59	±0.09	2-Tridecanol	1698	0.33	±0.04
methyl carbonate	965	0.17	±0.02	Benzyl Alcohol	1870	0.54	±0.01
Methyl-2-methylbutyrate	990	0.37	±0.04	Phenylethyl Alcohol	1908	0.38	±0.09
3-Methyl-methyl butanoate	1001	1.48	±0.53	Ketones (4)			
Ethyl butyrate	1019	0.16	±0.02	2-Heptanone	1173	2.17	±0.84
Ethyl isovalerate	1051	0.93	±0.29	3-Octanone	1245	0.43	±0.10
Isobutyl isobutyrate	1073	0.48	±0.16	Acetoin	1286	1.46	±0.25
Methyl 3-methylpentanoate	1114	0.16	±0.04	6-Methyl-5-heptene-2-one	1330	0.57	±0.18
Isobutyl isobutyrate	1130	0.38	±0.07	Terpene Compounds (4)			
2-Methylpropyl Butanoate	1143	0.22	±0.03	L-Limonene	1184	1.06	±0.07
Butyl isocyanatoacetate	1200	0.31	±0.15	Linalool	1531	11.95	±1.64
Hexyl acetate	1261	0.23	±0.16	Tetrahydro linalool	1736	0.24	±0.06
Pentyl 3-methylbutanoate	1284	1.79	±0.54	Isogeraniol	1795	0.21	±0.07
(E)-4-Methyl-ethyl-2-pentenoate	1319	0.51	±0.18	Miscellaneous Component (2)			
Methyl octanoate	1379	0.69	±0.45	Anisole	1338	0.22	±0.10
Ethyl-octanoate	1423	0.15	±0.04	Methyleugenol	1996	0.15	±0.04
Methyl nonanoate	1481	0.56	±0.20				
Maltyl isobutyrate	1484	0.39	±0.09				
Methyl caprate	1582	0.12	±0.01				
Methyl benzoate	1623	0.30	±0.04				
Methyl Salicylate	1782	0.72	±0.32				

Averages; ± Standard deviations; Retention Index (RI): calculated in DB-Wax 60m column with C8-C20 alkane series.

Table 3. Continue

The synthesis of volatile molecules that contribute to aroma is closely linked to the process of pigment formation during ripening. Nevertheless, it is important to acknowledge that specific molecules, especially hexanal and (E)-2-hexenal, can be generated via the process of oxidation or the lipoxygenase-catalyzed oxidative degradation of fatty acids [13]. Du et al. [37] focused on the examination of glycosidically bound volatiles and precursors in genotypes that represent a predecessor of the 'Marion' blackberry. The mix of volatile precursors in the genotypes within the 'Marion' pedigree exhibited a high degree of similarity to their corresponding distribution of free volatiles. Meret et al. [39] analyzed the composition of free and glycosidically bound volatiles in purees derived from the fruit of 'Andean blackberry' (*Rubus glaucus* Benth.). They identified and quantified a total of 55 volatile compounds using solvent extraction. Additionally, a separate investigation was conducted utilising HS-SPME, focusing on the identification of seventy-one compounds.

Esters are synthesised subsequent to converting amino acids into certain extended aliphatic compounds during catabolic reactions, a characteristic fruity aroma in fruits. Esters were the most

common in our samples regarding the number of volatile compounds. Nevertheless, the quantities of each of these substances are quite small. Following esters, alcohols exhibit a comparatively greater diversity and abundance. The process of alcohol formation in fruits involves the conversion of amino acids through a series of processes, including decarboxylation or reduction. In contrast, aldehydes possess the capability to undergo reduction to become alcohols within cellular environments, facilitated by the enzymatic action of aldehyde reductases or alcohol dehydrogenases. Ethanol is a byproduct of fermentation that is made without oxygen by the alcohol dehydrogenase enzyme in fruit and yeast. It is the starting point for many aroma compounds that start with acetaldehyde. It has been said that acetaldehyde and ethanol levels rise as oranges and pears dissolve before they are harvested [40, 41]. Terpenes and terpineols, which are composed of isopropene units, are synthesised through the metabolic processes of carbohydrates and lipids in fruits. These molecules are essential in generating the characteristic fruity and floral aromas [42]. Linalool, which is responsible for the blackberry aroma [43], was found in high concentrations.

4. Conclusion

Blackberries are widely cultivated, and there are numerous cultivated varieties with distinct flavors, sizes, and colors. They belong to the rose family and grow on thorny bushes. Blackberries provide a high nutritional value, as they include a significant amount of vital vitamins, minerals, and antioxidants. Some physicochemical properties, bioactive properties and aroma profiles of wild-type blackberry fruits grown in Arapgir, were investigated. In this way, it could be compared with blackberries grown in Türkiye and other countries. The fact that wild-type fruits are smaller than cultured fruits does not mean that they cannot compete with them in terms of content.

Conflict Of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgment

I would like to thank Dr. Ali Adnan Hayaloğlu for his invaluable support and recommendation.

References

- [1] Céspedes CL, Valdez-Morales M, Avila JG, El-Hafidi M, Alarcón J, Paredes-López O. Phytochemical profile and the antioxidant activity of Chilean wild black-berry fruits, *Aristotelia chilensis* (Mol) Stuntz (Elaeocarpaceae). *Food Chemistry*. 2010;119(3):886-95.
- [2] Kaume L, Howard LR, Devareddy L. The blackberry fruit: a review on its composition and chemistry, metabolism and bioavailability, and health benefits. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2012;60(23):5716-27.
- [3] Finn CE, Clark JR. Blackberry. *Fruit breeding*. 2012:151-90.
- [4] Kafkas E, Koşar M, Türemiş N, Başer K. Analysis of sugars, organic acids and vitamin C contents of blackberry genotypes from Turkey. *Food chemistry*. 2006;97(4):732-6.
- [5] Kopjar M, Piližota V. Blackberry juice. *Handbook of Functional Beverages and Human Health*: CRC Press; 2016. p. 159-70.
- [6] Cho MJ, Howard LR, Prior RL, Clark JR. Flavonoid glycosides and antioxidant capacity of various blackberry, blueberry and red grape genotypes determined by high-performance liquid chromatography/mass spectrometry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2004;84(13):1771-82.
- [7] Akin M, Eyduran SP, Ercisli S, Yilmaz I, Cakir O. Phytochemical profiles of wild grown blackberry and mulberry in Turkey. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*. 2016;15(1).

- [8] Dai J, Patel JD, Mumper RJ. Characterization of blackberry extract and its antiproliferative and anti-inflammatory properties. *Journal of medicinal food*. 2007;10(2):258-65.
- [9] Jiao H, Wang SY. Correlation of antioxidant capacities to oxygen radical scavenging enzyme activities in blackberry. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2000;48(11):5672-6.
- [10] Krikorian R, Shidler MD, Nash TA, Kalt W, Vinqvist-Tymchuk MR, Shukitt-Hale B, et al. Blueberry supplementation improves memory in older adults. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2010;58(7):3996-4000.
- [11] Zhao Y. *Berry fruit: value-added products for health promotion*: CRC press; 2007.
- [12] Akin M, Eydurán SP, Ercisli S, Kapchina-Toteva V, Eydurán E. Phytochemical profiles of wild blackberries, black and white mulberries from southern Bulgaria. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*. 2016;30(5):899-906.
- [13] Jacques AC, Chaves FC, Zambiasi RC, Brasil MC, Caramão EB. Bioactive and volatile organic compounds in Southern Brazilian blackberry (*Rubus fruticosus*) fruit cv. Tupy. *Food Science and Technology*. 2014;34:636-43.
- [14] Serradilla MJ, Lozano M, Bernalte MJ, Ayuso MC, López-Corrales M, González-Gómez D. Physicochemical and bioactive properties evolution during ripening of 'Ambrunés' sweet cherry cultivar. *LWT-Food Science and Technology*. 2011;44(1):199-205.
- [15] Vi S. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*. 1999;299:152-78.
- [16] Xu C, Zhang Y, Cao L, Lu J. Phenolic compounds and antioxidant properties of different grape cultivars grown in China. *Food Chemistry*. 2010;119(4):1557-65.
- [17] Lucena A, Nascimento R, Maciel J, Tavares J, Barbosa-Filho J, Oliveira E. Antioxidant activity and phenolics content of selected Brazilian wines. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2010;23(1):30-6.
- [18] Yildiz O, Gurkan H, Sahingil D, Degirmenci A, Er Kemal M, Kolayli S, et al. Floral authentication of some monofloral honeys based on volatile composition and physicochemical parameters. *European Food Research and Technology*. 2022;248(8):2145-55.
- [19] Patras A, Brunton NP, Da Pieve S, Butler F. Impact of high pressure processing on total antioxidant activity, phenolic, ascorbic acid, anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2009;10(3):308-13.
- [20] Wang W-D, Xu S-Y. Degradation kinetics of anthocyanins in blackberry juice and concentrate. *Journal of food engineering*. 2007;82(3):271-5.
- [21] Yilmaz KU, Zengin Y, Ercisli S, Serce S, Gunduz K, Sengul M, et al. Some selected physico-chemical characteristics of wild and cultivated blackberry fruits (*Rubus fruticosus* L.) from Turkey. *Romanian biotechnological letters*. 2009;14(1):4152-63.
- [22] Elisia I, Hu C, Popovich DG, Kitts DD. Antioxidant assessment of an anthocyanin-enriched blackberry extract. *Food chemistry*. 2007;101(3):1052-8.
- [23] Felgines C, Talavera S, Texier O, Gil-Izquierdo A, Lamaison J-L, Remesy C. Blackberry anthocyanins are mainly recovered from urine as methylated and glucuronidated conjugates in humans. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2005;53(20):7721-7.
- [24] Seeram NP, Adams LS, Zhang Y, Lee R, Sand D, Scheuller HS, et al. Blackberry, black raspberry, blueberry, cranberry, red raspberry, and strawberry extracts inhibit growth and stimulate apoptosis of human cancer cells in vitro. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2006;54(25):9329-39.
- [25] Rossi A, Serraino I, Dugo P, Di Paola R, Mondello L, Genovese T, et al. Protective effects of anthocyanins from blackberry in a rat model of acute lung inflammation. *Free radical research*. 2003;37(8):891-900.
- [26] Siriwoharn T, Wrolstad RE, Finn CE, Pereira CB. Influence of cultivar, maturity, and sampling on blackberry (*Rubus* L. Hybrids) anthocyanins, polyphenolics, and antioxidant properties. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2004;52(26):8021-30.
- [27] SKENDER A, AJDINOVIĆ T, BEĆIRSPAHIĆ D, KURTOVIĆ M, ERCISLI SHJAS, editors. The comparison of phenotypic characteristics of improved and wild blackberry genotypes. Presidency of the Congress; 2014.
- [28] Siriwoharn T, Wrolstad R. Polyphenolic composition of Marion and Evergreen blackberries. *Journal of food science*. 2004;69(4):FCT233-FCT40.

- [29] Bowen-Forbes CS, Zhang Y, Nair MG. Anthocyanin content, antioxidant, anti-inflammatory and anticancer properties of blackberry and raspberry fruits. *Journal of food composition and analysis*. 2010;23(6):554-60.
- [30] Fan-Chiang HJ, Wrolstad RE. Anthocyanin pigment composition of blackberries. *Journal of food science*. 2005;70(3):C198-C202.
- [31] Tamer CE. A research on raspberry and blackberry marmalades produced from different cultivars. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2012;36(1):74-80.
- [32] Koca I, Karadeniz B. Antioxidant properties of blackberry and blueberry fruits grown in the Black Sea Region of Turkey. *Scientia Horticulturae*. 2009;121(4):447-50.
- [33] Gündoğdu M, Kan T, Canan I. Bioactive and antioxidant characteristics of blackberry cultivars from East Anatolia. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2016;40(3):344-51.
- [34] Oszmiański J, Nowicka P, Teleszko M, Wojdyło A, Cebulak T, Oklejewicz K. Analysis of phenolic compounds and antioxidant activity in wild blackberry fruits. *International journal of molecular sciences*. 2015;16(7):14540-53.
- [35] D'Agostino M, Sanz J, Sanz ML, Giuffrè A, Sicari V, Soria AC. Optimization of a solid-phase microextraction method for the gas chromatography–mass spectrometry analysis of blackberry (*Rubus ulmifolius* Schott) fruit volatiles. *Food chemistry*. 2015;178:10-7.
- [36] Christensen LP, Edelenbos M, Kreutzmann S. *Fruits and vegetables of moderate climate. Flavours and fragrances: chemistry, bioprocessing and sustainability*: Springer; 2007. p. 135-87.
- [37] Du X, Finn CE, Qian MC. Bound volatile precursors in genotypes in the pedigree of 'Marion' blackberry (*Rubus* sp.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2010;58(6):3694-9.
- [38] Qian MC, Wang Y. Seasonal variation of volatile composition and odor activity value of 'Marion' (*Rubus* spp. *hyb*) and 'Thornless Evergreen' (*R. laciniatus* L.) blackberries. *Journal of Food Science*. 2005;70(1):C13-C20.
- [39] Meret M, Brat P, Mertz C, Lebrun M, Günata Z. Contribution to aroma potential of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth.). *Food Research International*. 2011;44(1):54-60.
- [40] Jiang Y, Song J. *Fruits and fruit flavor: Classification and biological characterization. Handbook of fruit and vegetable flavors*. 2010:1-23.
- [41] Pesis E. The role of the anaerobic metabolites, acetaldehyde and ethanol, in fruit ripening, enhancement of fruit quality and fruit deterioration. *Postharvest Biology and Technology*. 2005;37(1):1-19.
- [42] Reineccius G. *Flavor chemistry and technology*: CRC press; 2005.
- [43] Du X, Finn CE, Qian MC. Volatile composition and odour-activity value of thornless 'Black Diamond' and 'Marion' blackberries. *Food chemistry*. 2010;119(3):1127-34.



A NOVEL METHOD FOR BREAST CANCER CLASSIFICATION: A SIGNAL PROCESSING-BASED APPROACH IN ULTRASOUND IMAGES

Şerife GENGEÇ BENLİ^{1*}, Zeynep AK²

¹Erciyes University, Engineering Faculty, Biomedical Engineering, Kayseri, Turkey

²Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Biomedical Eng. Dept., Kayseri, Turkey
Geliş Tarihi/Received Date: 23.10.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 11.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1378982

ABSTRACT

Breast cancer, a leading cause of mortality among women worldwide, the importance of accurate and efficient diagnostic methods is emphasized. This study contributes to the literature on breast cancer classification, particularly using breast ultrasound images, with a new method using a signal processing approach. It introduces a novel approach by combining features extracted from signals obtained from breast ultrasound images with signals from Variational Mode Decomposition (VMD) sub-bands. The results demonstrate that utilizing features from both preprocessed raw data and VMD sub-band signals can effectively distinguish benign and malignant breast ultrasound images. Classification performance varied depending on the algorithms and data used. According to the numerical results, the highest classification performance was achieved through the study with balanced data using the artificial neural network method, with an area under the curve value of 0.9971 and an accuracy value of 0.9821.

Keywords: *Breast ultrasound images, Variational mode decomposition, Sub-bands, Classification.*

MEME KANSERİ SINIFLANDIRMASI İÇİN YENİ BİR YÖNTEM: ULTRASON GÖRÜNTÜLERİNDE SİNYAL İŞLEME TEMELLİ BİR YAKLAŞIM

ÖZET

Meme kanseri, dünya genelinde kadınlar arasında ölümün önde gelen nedenlerinden biri olup, doğru ve etkili tanı yöntemlerinin önemi vurgulanmaktadır. Bu çalışma, özellikle meme ultrason görüntülerini kullanarak meme kanseri sınıflandırması alanındaki literatüre yeni bir sinyal işleme yaklaşımı kullanan yöntem ile katkı sağlamaktadır. Çalışma, meme ultrason görüntülerinden elde edilen sinyaller ve Varyasyonel Kip Ayrışımı (VMD) alt bantlarından elde edilen sinyalleri kullanan yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar ile hem orijinal veriden hem de VMD alt bant sinyallerinden elde edilen özelliklerin iyi huylu ve kötü huylu meme ultrason görüntülerini etkili bir şekilde ayırt edilebileceği gösterilmiştir. Kullanılan algoritma ve uygulanan verilere göre elde edilen sınıflandırma performansları değişmektedir. Sayısal sonuçlara göre, dengelenmiş veriler kullanılarak yapay sinir ağları yöntemi ile yapılan çalışma sonucunda en yüksek sınıflandırma performansı elde edilmiş olup, eğri altında kalan alan değeri 0.9971 ve doğruluk değeri 0.9821 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Meme ultrason görüntüleri, Varyasyonel kip ayrışımı, Altbantlar, Sınıflandırma.*

1. Introduction

Breast cancer is a prominent cause of mortality among women globally [1,2]. The effectiveness of treatment greatly relies on the accuracy and reliability of early diagnosis, along with the capability to

* e-posta¹ : serifegengec@erciyes.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5527-8574> (Corresponding Author)

e-posta² : zeynepak.bmm@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8621-9465>

differentiate between benign and malignant tumors. Commonly used medical imaging methods for breast tissues are known as mammography and ultrasound. Ultrasound is widely regarded as a primary imaging modality for the characterization of breast lesions due to its widespread accessibility, cost-effectiveness, satisfactory diagnostic accuracy, and ability to provide noninvasive imaging capabilities. It allows real-time imaging of breast lesions from different angles and orientations, reducing the risk of false-negative diagnoses [3]. On the other hand, ultrasound waves cannot penetrate the regular muscle system, leading to an inaccurate depiction of the boundaries of breast tumors. Extracting a region of interest (ROI) for subsequent research can also be challenging for imaging. Additionally, it is susceptible to speckle noise, which can make working with ultrasound images difficult.

When reviewing the literature on breast cancer classification using on the breast ultrasound images (BUSI) dataset, it is observed that there is an increasing trend towards machine learning and deep learning approaches in BUSI. Payithra et al., initially attempted to reduce speckle noise in the images using speckle-reducing anisotropic diffusion. Subsequently, active contour-based segmentation was employed in the study to find the ROI. Texture features were extracted to classify the images as normal, benign, or malignant. Three classifiers were utilized, and performance was compared based on classification accuracy. They achieved an accuracy of 83% for the k-Nearest Neighbors (kNN) algorithm, 85% for the decision tree algorithm, and 88% for the random forest classifier [4]. Mishra et al., performed feature selection using a recursive feature elimination-based method by extracting multiple different image features from the tumor region. They classified benign and malignant tumors with Random Forest, Adaboost, and Gradient Boosting classifiers, achieving accuracy rates of 96.7%, 97.4%, and 96.5%, respectively [5]. In their study, Lo et al., extracted breast tissue features from a dataset comprising 48 benign and 21 malignant cases, asserting that these features are more beneficial for clinical diagnosis. They achieved an accuracy of 80.0% in classification using Logistic Regression [6]. Huang et al., extracted 73 features using five breast ultrasound image characteristics, which included grey-level histogram, Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM), histogram of oriented gradients (HOG), shape, and position. To achieve better results in this study conducted with 46 breast ultrasound images diagnosed with tumors, feature selection was performed using the Bicluster score in order to select the best features. Using the selected top 25 features in conjunction with an SVM classifier, they achieved an accuracy of 98.3% [7]. In another study, Huang et al., extracted grey histograms, Grey Level Co-occurrence Matrices (GLCM), and Local Binary Patterns (LBP) from images generated by superpixels. In a classification using the kNN algorithm, which included 160 breast ultrasound (BUS) images in both benign and malignant groups, they achieved an accuracy of 86.5% [8]. Liu et al., utilized edge information for breast ultrasound classification. They generated edge profiles of breast ultrasound images and extracted edge features, including maximum curvature sum, maximum curvature and peak sum, maximum curvature sum, and standard deviation. Subsequently, morphological features were extracted, and classification was performed using the SVM algorithm. To evaluate their method, they used 192 BUS images, achieving an accuracy of 82.69% with edge-based features and 67.31% with morphological features [9]. Kriti et al., examined the impact of different speckle filters on the classification of BUSI, resulting in a total of 149 texture features and 13 morphological features. They conducted classification using SVM and employed Principal Component Analysis (PCA) to select features from different structures. The study was carried out on a total of 100 breast ultrasound images, and the results obtained for different filters were reported as 94.1%, 66.6%, 96.0%, and 68.6% accuracy, respectively [10].

Some researchers have focused on BUSI using a segmentation additionally classification frameworks. Yi et al., designed their work around segmentation with CRA-ENet and classification with SA-Net. CRA-ENet is a network derived from ENet by incorporating a hybrid attention mechanism that can accurately segment breast tumor boundaries and allow precise localization of lesion regions. They achieved a segmentation accuracy of 97.47% and a classification accuracy of 95.84% for BUSI [11]. Sadad et al., applied the Hilbert transform to raw ultrasound images and then applied the watershed transform for segmentation. Methods based solely on texture analysis are quite sensitive to speckle noise and other artifacts. Therefore, a hybrid feature set was developed after the extraction of shape-based and texture features from the breast lesion. They classified using kNN, decision tree, and ensemble algorithms, achieving accuracies of 96.6%, 94.90%, and 97.86%, respectively [12]. Furthermore, as

seen in the literature, it is clear that the inclination towards deep learning studies in this subject is increasing day by day [11,13–15].

Upon examining the literature studies, it is observed that different datasets and image processing algorithms are used, and classification studies are conducted in the context of distinguishing BUS images. In the proposed study, the aim is to contribute to the literature in the field of classifying benign and malignant BUS images based on signals obtained from BUS images using signal processing methods. With the use of the employed dataset and methods, the study aims to achieve successful results. In this study, a new method for classifying cancer types based on BUS images has been proposed using the BUSI [16] dataset. For the first time in the literature, the study introduces an innovative approach where various features extracted from signals obtained from BUS images and signals from Variational Mode Decomposition (VMD) sub-bands are extracted and utilized for classification.

The main contributions of this study to the literature can be summarized as follows:

Unlike the other literature studies, this study focuses on breast cancer classification using signal processing methods from breast ultrasound images. This can assist in better analysis of breast ultrasound images and reaching more precise results using the proposed method. This method presents a novel approach by combining different signal features from the BUS image dataset using VMD sub-band signals for classification. This can lead to better classification results.

2. Material and Method

Dataset, preprocessing, feature extraction, data balancing, feature selection and classification methods used for the proposed method are explained in this section.

2.1. Dataset

In this study, data for the analysis of breast lesions were obtained from the publicly available BUSI dataset, which was collected with Dhabyani et al [16]. The dataset includes 780 images, each with a resolution of 500x500 pixels and consists of three categories: normal (133 images), malignant (210 images), and benign (487 images). The aforementioned images were acquired by the use of two LOGIQ E9 ultrasound machines, including a sample size of 600 female patients ranging in age from 25 to 75. Mask images are provided alongside the raw images, making them suitable for use in segmentation or detection purposes. In this recommended study, raw and masked images of 437 benign and 210 malignant images have been used. Classification of raw BUS images and mask BUS images was conducted performing two different methods.

2.2. Preprocessing of Breast Ultrasound Images

Ultrasound images inherently contain speckle noise and are sensitive to segmentation and classification algorithms due to their low contrast. Therefore, various preprocessing steps have been applied to the BUS images. First, noise elimination was attempted using the widely used median filter in ultrasound images. The reason for choosing the median filter is its ability to remove noise while being sensitive to edges. This is crucial because the boundary between tumor tissue and normal tissue plays a significant role in feature extraction [17]. Subsequently, gray level contrast enhancement was applied to the low-contrast ultrasound images to increase the differentiation between tumor tissue and normal tissue [18].

2.3. Sub-band Decomposition Method

In this study, features were extracted from preprocessed raw (p-raw) BUS images and mask images. Two types of images were converted into signals. P-raw and sub-band signals belonging to two types of images were used for feature source classification of tasks. Variational mode decomposition (VMD) was utilized as the sub-band decomposition method described below.

2.3.1. Variational Mode Decomposition

Dragomiretskiy et al. [19] recently developed the VMD approach, which is a data-driven and adaptive signal decomposition method used for separating complex signals into simpler modes, each

with a specific frequency and amplitude content. VMD uses an iterative optimization algorithm to decompose the signal into a finite number of modes, each of which is represented by a complex-valued function that oscillates around its local mean. VMD has been applied to a variety of signal processing tasks, including time-frequency analysis, denoising, feature extraction, and classification. The method is particularly useful for separating and analyzing signals with non-stationary and non-linear characteristics. The method is described in depth, together with the relevant mathematical formulae, in the cited work [19].

Signals obtained from p-row BUS images and mask BUS images were decomposed into different sub-bands. Since the classification performance was optimal at nine for this proposed study, the obtained signals were decomposed into nine sub-bands using the VMD.

2.4. Feature Extraction

For using in the classification with various approaches, during the feature extraction stage, a total of 14 features were acquired from the signals of both the p-row image and mask image, and 9x14 features were extracted from the VMD sub-bands. These extracted features are mobility, activity, entropy, mean, standard deviation, variation, kurtosis, skewness, maximum, minimum, energy, median, log entropy, and Shannon entropy.

2.5. Data Balancing

Classifying biomedical data is extremely difficult since this data type is typically large and unbalanced. Common methods for resolving the class imbalance include down-sampling and data augmentation. In the proposed study, Adaptive Synthetic sampling approach (ADASYN) was used for data augmentation to generate synthetic minority samples, hence achieving a balanced distribution of samples across the various categories into which the dataset was partitioned [20].

2.6. Feature Selection

The present research used the Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) technique to conduct feature selection. The LASSO, a statistical technique proposed by Tibshirani [21], is used in regression analysis for the purpose of estimating parameters and selecting variables. This feature selection method has the potential to provide an analytical solution and a low-variance estimate that is easily interpretable within the framework of linear regression.

2.7. Classification

Following the feature extraction and selection processes described previously, a number of machine learning techniques were implemented, and their ability to classify distinct tasks was compared. Support vector machines, multi-perception artificially intelligent networks and Naive Bayes were among these algorithms. The employed algorithms are explained concisely here.

Support Vector Machines (SVMs) are a class of supervised machine learning algorithms that excel in classification tasks by finding an optimal hyperplane in a high-dimensional feature space. They are particularly effective when the dataset is non-linearly separable or when a clear margin of separation is desired [22].

Naive Bayes (NB) is a probabilistic machine learning algorithm based on Bayes' theorem. It is widely used for classification tasks in biomedical applications such as disease diagnosis and medical image analysis. In the context of classification, it helps determine the probability of a data point belonging to a particular class given its features [23].

Artificial neural networks (ANNs) have found numerous applications in the field of biomedicine due to their ability to model complex relationships within data. ANNs may be structured with either a single or several layers. These networks are composed of processing units, also known as nodes or neurons, which are coupled by changeable weights. These weights enable signals to propagate through the network in a parallel and sequential manner. In general, ANNs may be categorized into three layers of neurons: the input layer, which receives information; the hidden layer, which is responsible for extracting patterns and doing the majority of internal processing; and the output layer, which creates and delivers the final network outputs [24].

In this research, we used the Bayesian optimization approach to find values for all of the classifier parameters. The feature vector used as input to the classifier was normalized such that its mean was zero and its standard deviation was one. The study's framework is shown in Figure 1.

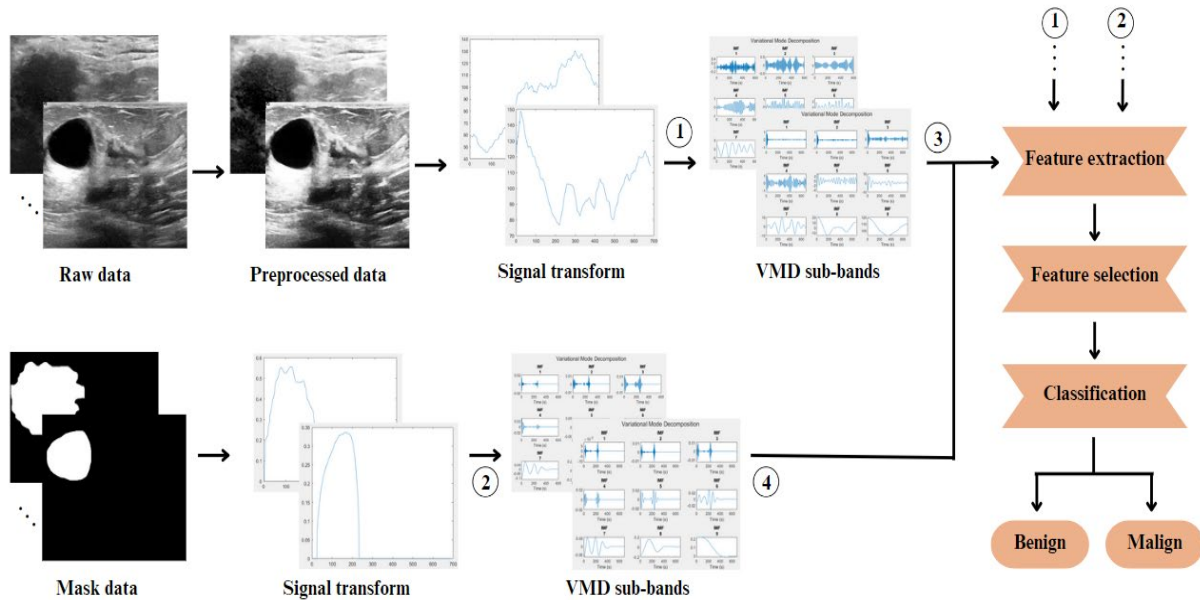


Figure 1. Representation of the classification process of raw data and mask data belonging to BUS images

3. Results and Discussion

This study was performed using the BUS images of 437 benign and 210 malignant. The p-row images and mask images were transformed to signals and these obtained signals decomposed into nine sub-bands using VMD method. In the feature extraction stage, various features of the p-row signal and its corresponding 9 VMD sub-bands obtained from each images (mask and p-row). In addition, among obtained these features, the most important ones have been identified for classification using the LASSO method in both two approaches. The success of VMD sub-bands and p-row signal in distinguishing benign and malignant BUS images has been examined using different approaches, including SVM, Naive Bayes, and ANNs. The classification performance measures, such as Area Under the Curve (AUC), accuracy (ACC), precision, and F1 score obtained from binary classification have been evaluated. Tables 1 and 2 show mean classification performance as binary for all images as p-row signals and VMD sub-band signals, respectively. The examination of these tables reveals the classification performance achieved when utilizing features from both the p-row signals and the VMD sub-band signals. Throughout the classification study, the training and testing datasets were identified using a 10-fold cross-validation approach. There were ten iterations of each classification procedure, and the provided tables show the average performance in the classification results.

Table 1. Binary classification results with features obtained from signals which transformed p-row and mask BUS images

		Classification				Classification with ADASYN			
Data type	Classification methods	AUC	Accuracy	Precision	F1	AUC	Accuracy	Precision	F1
p-row image ①	SVM	0.7133	0.6931	0.6131	0.2414	0.7117	0.6522	0.6546	0.6249
	ANN	0.7129	0.7032	0.5781	0.4181	0.8514	0.8045	0.7748	0.8066
	NB	0.5890	0.6818	0.6385	0.1907	0.6610	0.6240	0.6066	0.6211
Mask image ②	SVM	0.8739	0.8352	0.8114	0.7164	0.8489	0.7678	0.7690	0.7436
	ANN	0.8725	0.8267	0.7798	0.7088	0.8842	0.8233	0.7941	0.8164
	NB	0.7981	0.7619	0.7137	0.5532	0.7629	0.70	0.6641	0.6929

Table 2. Binary classification results with features obtained from VMD sub-band signals which transformed p-row and mask BUS images

		Classification				Classification with ADASYN			
Data type	Classification methods	AUC	Accuracy	Precision	F1	AUC	Accuracy	Precision	F1
p-row image ③	SVM	0.7112	0.7285	0.6411	0.4747	0.7395	0.6821	0.6788	0.6808
	ANN	0.7146	0.7315	0.6303	0.5080	0.9201	0.8504	0.8088	0.8586
	NB	0.6350	0.6876	0.6118	0.2808	0.7325	0.6864	0.6742	0.6959
Mask image ④	SVM	0.9850	0.9547	0.9624	0.9276	0.9870	0.9592	0.9604	0.9596
	ANN	0.9811	0.9540	0.9533	0.9274	0.9971	0.9821	0.9689	0.9826
	NB	0.9153	0.8579	0.7811	0.7812	0.8897	0.8329	0.8358	0.8341

4. Conclusion

In this study, BUS images, consisting of 437 benign and 210 malignant cases, were subjected to a comprehensive analysis using a signal processing-based approach. The p-row images and corresponding mask images were transformed into signals and decomposed into nine sub-bands via the VMD method. Feature extraction was performed on both the p-row signal and the nine VMD sub-bands, for each image (mask and p-row). Using the LASSO method, the most significant features were determined for classification in both approaches.

In Table 1, classification results using features derived from signals transformed from both p-row and mask BUS images are provided. The results show varying levels of performance, with the mask image features generally outperforming the p-row image features, particularly when employed in conjunction with ANN or SVM classifiers. Table 2 presents classification results using features extracted from VMD sub-band signals transformed from both p-row and mask BUS images.

When examining the given tables, it is observed that the ADASYN method improved the classification performance with ANN on the p-row images. For example, the ACC value increased from 0.7032 to 0.8045. However, no significant change in classification performance was observed on the masked images. In the classification obtained using VMD signals with ANN on the p-row images, the ACC value increased from 0.7315 to 0.8504 as a result of the ADASYN method. Through data balancing and classification model with the VMD-ANN method on masked images, the ACC value increased from 0.9540 to 0.9821. Based on the findings, the best classification performance was obtained by employing

the ANN method on balanced data, yielding exceptional results, including an AUC value of 0.9971 and an accuracy of 0.9821.

In conclusion, this study showcases the potential of signal processing methods, particularly the VMD approach, in distinguishing between benign and malignant breast ultrasound images. The classification performance improvements, especially when using the mask images and VMD sub-band signals, highlight the promise of this methodology.

These findings provide valuable insights for future research and clinical applications in breast cancer diagnosis and classification, further enhancing the role of signal processing in medical imaging.

Data availability statement

The performed breast ultrasound dataset, generated by Al-Dhabyani et al., can be downloaded from <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104863> (accessed on 10 October 2021).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- [1] Fitzmaurice C, Dicker D, et al. The Global Burden of Cancer 2013. *JAMA Oncol.* 2015;1(4):505–527.
- [2] Lima SM, Kehm RD, Terry MB. Global breast cancer incidence and mortality trends by region, age-groups, and fertility patterns. *EClinicalMedicine.* 2021;7:38:100985.
- [3] Gong X, Zhou H, Gu Y, Guo Y. Breast ultrasound image classification with hard sample generation and semi-supervised learning. *Biomedical Signal Processing and Control.* 2023;86:105196.
- [4] Pavithra S, Vanithamani R, Justin J. Computer aided breast cancer detection using ultrasound images. *Materials Today.* 2020;33(7):4802–4807.
- [5] Mishra A, Roy P, Bandyopadhyay S, Das S. Breast ultrasound tumour classification: A Machine Learning—Radiomics based approach. *Expert Systems.* 2021;38:e12713.
- [6] Lo CM, Chang RF, Huang CS, Moon WK. Computer-Aided Diagnosis of Breast Tumors Using Textures from Intensity Transformed Sonographic Images. In: 1st Glob. Conf. Biomed. Eng. 9th Asian-Pacific Conf. Med. Biol. Eng. Springer International Publishing, Cham. 2015;124–127.
- [7] Huang Q, Yang F, Liu L, Li X. Automatic segmentation of breast lesions for interaction in ultrasonic computer-aided diagnosis. *Information Sciences.* 2015;314:293–310.
- [8] Huang Q, Huang Y, Luo Y, Yuan F, Li X. Segmentation of breast ultrasound image with semantic classification of superpixels. *Med Image Anal.* 2020;61:101657.
- [9] Liu Y, Ren L, Cao X, Tong Y. Breast tumors recognition based on edge feature extraction using support vector machine. *Biomedical Signal Processing and Control.* 2020;58:101825.
- [10] Kriti, Virmani J, Agarwal R. Effect of despeckle filtering on classification of breast tumors using ultrasound images. *Biocybernetics and Biomedical Engineering.* 2019;39(2):536–560.
- [11] Yi S, Chen Z, Yi L, She F. CAS: Breast Cancer Diagnosis Framework Based on Lesion Region Recognition in Ultrasound Images. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences.* 2023;35(8):101707.
- [12] Sadad T, Hussain A, Munir A, Habib M, Ali Khan S, Hussain S, Yang S, Alawairdhi M. Identification of Breast Malignancy by Marker-Controlled Watershed Transformation and Hybrid Feature Set for Healthcare. *Applied Sciences.* 2020;10(6):1900.
- [13] Pacal I. Deep Learning Approaches for Classification of Breast Cancer in Ultrasound (US) Images. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.* 2022;12(4):1917–1927.
- [14] Jiménez-Gaona Y, Rodríguez-Álvarez MJ, Lakshminarayanan V. Deep-Learning-Based Computer-Aided Systems for Breast Cancer Imaging: A Critical Review. *Applied Sciences.* 2020;10(22):8298.
- [15] Zhang G, Zhao K, Hong Y, Qiu X, Zhang K, Wei B. SHA-MTL: soft and hard attention multi-task learning for automated breast cancer ultrasound image segmentation and classification. *International Journal of Computer Assisted Radiology Surgery.* 2021;16(10):1719–1725.

- [16] Al-Dhabyani W, Gomaa M, Khaled H, Fahmy A. Dataset of breast ultrasound images, *Data in Brief*. 2020;28:104863.
- [17] Khusna DA, Nugroho HA, Soesanti I. Performance analysis of edge and detailed preserved speckle noise reduction filters for breast ultrasound images. 2015 2nd International Conference on Information Technology Computer, and Electrical Engineering 2015:76–80.
- [18] Gupta S, Kaur Y. Review of Different Local and Global Contrast Enhancement Techniques for a Digital Image. *International Journal of Computer Applications*. 2014;100(18):18–23.
- [19] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational Mode Decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2014;62(3):531–544.
- [20] He H, Bai Y, Garcia EA, Li S. ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning. in: 2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence). 2008:1322–1328.
- [21] Tibshirani R. Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*. 1996;58(1):267–288.
- [22] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks. *Machine Learning*. 1995;20:273–297.
- [23] Rish I. An Empirical Study of the Naïve Bayes Classifier. *IJCAI 2001 Workshop Empirical Methods in Artificial Intelligence*. 2001;3(22):41-46.
- [24] Zhang G, Hu MY, Eddy Patuwo B, Indro DC. Artificial neural networks in bankruptcy prediction: General framework and cross-validation analysis. *European Journal of Operational Research*. 1999;116(1):16–32.

ZAMAN PENCERELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ İÇİN KÜMELEME TEMELLİ KLONAL SEÇİM ALGORİTMASI

Bilge Kağan DEDETÜRK¹, Burak KOLUKISA², Mihrimah ÖZMEN^{3*}

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38039, Türkiye

²Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38080, Türkiye

³Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38039, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 26.10.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 22.11.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1381562

ÖZET

Günümüzde doğal felaketlerin sayısı artmakta, daha sık yaşanmakta ve bu afetler, insan hayatını derinden etkilemektedir. Depremler, sel olayları ve salgınlar gibi doğal felaketlerin yol açtığı tahribatla başa çıkmak oldukça zordur. Türkiye'de gerçekleşen 6 Şubat depremi 11 ili etkileyerek yaklaşık 14 milyon insanı mağdur etmiştir. Deprem sonrası yol, köprü, tünel ve demiryolu gibi ulaşım altyapıları işlevsiz hale gelebilmekte ve alternatif rotaların hızla belirlenmesi zorlaşabilmektedir. Deprem sonrası yardım dağıtım faaliyetlerinde, araç rotalama problemleri (ARP) ile çözüm üretilebilir. ARP, çok sayıda müşteriye hizmet vermek amacıyla bir araç filosunu optimize eden kombinatoriyal bir optimizasyon ve tam sayılı programlama problemidir. Zaman pencereci araç rotalama problemi (ZP-ARP) belirli zaman ve kapasite kısıtları altında en düşük maliyetle rotaların belirlenmesini amaçlar. Bu çalışmada, ZP-ARP için Kümeleme Temelli Klonal Seçim Algoritması (KSA) önerilmektedir. K-ortalama ve K-ortalama++ algoritmaları kullanılarak algoritmanın başlangıç çözümü kümesi iyileştirilmiş ve ardından KSA ile ZR-ARP için sonuçlar elde edilmiştir. Deneyler, ARP algoritmalarının sınanmasında literatürde sıklıkla kullanılan Solomon C1 ve R1 veri setleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup, çeşitli problemler için sonuçları alınmıştır. Deney sonuçlarına göre, kümeleme algoritması ile başlangıç çözümü elde edilmesi, KSA'nın sonuçlarını iyileştirdiği ve KSA'nın yerel optimuma takılmasını önlediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kümeleme, Klonal Seçim Algoritması, Araç Rotalama Problemi, Solomon Veri Seti

CLUSTER-BASED CLONAL SELECTION ALGORITHM FOR VEHICLE ROUTING PROBLEMS WITH TIME WINDOWS

ABSTRACT

Today, the number of natural disasters is increasing and occurring more frequently, and these disasters deeply affect human life. Dealing with the devastation caused by natural disasters such as earthquakes, floods, and pandemics is quite challenging. The earthquake in Turkey on February 6 affected 11 provinces and affecting approximately 14 million people. After earthquakes, transportation infrastructure like roads, bridges, tunnels, and railways can become non-functional, making it challenging to quickly determine alternative routes. Vehicle routing problems (VRP) approaches can offer solutions for post-earthquake relief distribution activities. VRP is a combinatorial optimization and integer programming problem that optimizes a vehicle fleet to serve many customers. The Vehicle Routing Problem with Time Window (VRPTW) aims to determine routes with the lowest cost under specific time and capacity constraints. In this study, a Clustering-Based Clonal Selection Algorithm (CSA) is proposed for VRPTW. The initial solution set of the algorithm has been improved using K-means and K-means++ algorithms, and then results for VRPTW have been obtained with CSA. Experiments were conducted on the Solomon C1 and R1 datasets frequently used in the literature for testing VRP algorithms, and results were obtained for various problems. According to the experimental results, obtaining an initial solution with the clustering algorithm improved the results of the CSA and prevented the CSA from getting stuck in a local optimum.

Keywords: Clustering, Clonal Selection Algorithm, Vehicle Routing Problem, Solomon Dataset

¹e-posta: bilgededeturk@erciyes.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8026-5003>

²e-posta: burak.kolukisa@agu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0423-4595>

³e-posta: mihrimah@erciyes.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2648-5865> (Sorumlu Yazar)

1. Giriş

Son yıllarda doğal felaketlerin sıklığı ve etkisi artmakta olup, bireylerin ve toplulukların yaşamını derinden etkilemektedir. Özellikle deprem ve salgın gibi beklenmedik doğal afetler geniş kapsamlı hasar ve mağduriyete yol açmaktadır. Dünya genelinde 2019 yılında, toplamda 396 doğal felaket rapor edilmiştir, bu felaketler 11.755 kişinin ölümüne, 95 milyondan fazla kişinin etkilenmesine yol açmış olup yaklaşık 130 milyar dolarlık ekonomik zarara neden olmuştur. Özellikle Türkiye gibi aktif fay hatları üzerinde bulunan ülkeler, depremlere karşı hassastır. Türkiye’de 1900 yılından 2020 yılına kadar büyüklüğü beş veya daha yüksek olan potansiyel olarak zarar verebilecek 1.796 deprem yaşanmıştır. Son olarak, 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Ekinözü ilçelerinde ardı ardına iki büyük deprem meydana gelmiştir. Pazarcık'ta meydana gelen 7,8 büyüklüğündeki depremin ardından dokuz saat sonra 7,5 büyüklüğünde ikinci deprem meydana gelmiştir. Bu depremler, Türkiye'de 50.783 kişinin hayatını kaybetmesine sebep olmuş ve yaklaşık 14 milyon insanı etkilemiştir [1]. Bu depremler ağır can kayıplarına ve büyük ekonomik kayıplara neden olmuştur. Araştırmacılar, can kaybını en aza indirmek ve mağduriyeti hızla gidermek amacıyla, afet malzemelerini mümkün olan en kısa sürede ulaştıracak bir afet yardım ağı üzerine çalışmaktadırlar [2].

Afetler sonrasında yardım ağı yönetim sistemi, etkilenen toplulukların acil ihtiyaçlarını stratejik ve koordineli bir şekilde karşılamayı amaçlamaktadır. Özellikle deprem sonrası, yol, köprü, tünel ve demiryolu gibi ulaşım altyapıları ciddi hasar görebilir ve ulaşım güzergahlarında önemli değişiklikler meydana gelebilir. Bu durum, ulaşım rotalarında büyük değişikliklere neden olmakta ve alternatif yolların hızla belirlenmesi gerekmektedir. Erken müdahalenin hayat kurtarıcı etkisi ve yardım malzemelerinin zamanında ve etkili bir şekilde dağıtılmasının büyük önemi unutulmamalıdır. Bu tür eylemlerin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmekte olup afet bölgesinde hayatta kalma olasılığı 72 saat sonra önemli ölçüde azalmaktadır [3]. Bu nedenle, araç yönlendirme, afet yardım ağı yönetim sistemlerinde önemli bir zorluk teşkil etmektedir ve bu soruna bir çözüm bulmak kritik öneme sahiptir. Araştırmacılar, yardım dağıtım süreçlerini kolaylaştırmak için yeni yaklaşımlar ve teknolojiler üzerinde çalışmaktadır. Sonuç olarak, araç yönlendirme sorunu, acil durum yönetim sistemlerinde ciddi bir zorluk oluşturur ve bu soruna hızlı bir şekilde çözüm bulmak kritik önem taşımaktadır.

Araç rotalama problemi (ARP), bir depodan tüm müşterilere mal taşırken araç kapasite kısıtlarını gözeterek en kısa rotayı bulma problemi [4]. Bu problem, ilk olarak Dantzig ve Ramser tarafından literatüre kazandırılmıştır [5]. Zaman pencereli araç rotalama problemi (ZP-ARP)'nin amacı, belirli zaman ve kapasite kısıtları altında en düşük maliyetli rotaları belirlemektir [6, 7]. ZP-ARP, NP-zor (non-deterministik polinom-zaman zorluğunda) bir problem olarak tanımlanmıştır [5-7]. ZP-ARP'yi çözmek için tam, sezgisel ve meta-sezgisel algoritmaları kullanan birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Müşteri kümesinin boyutu küçükse, tam algoritmalar kullanılabilir; ancak küme büyüdükçe bu algoritmaların kullanılması yüksek çözüm süresi nedeniyle uygun olmamaktadır [8]. Bu nedenle, 1987 yılında Solomon [9], ZP-ARP'yi çözümlemek için kullandığı sezgisel yöntemleri ilk defa literatüre tanıtmıştır ve özellikle son yıllarda sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler büyük bir popülerlik kazanmıştır [10, 11]. Bu algoritmalar iteratif bir yaklaşımla geliştirilmiş olup, geniş arama alanlarında ideal ya da neredeyse ideale yakın çözümleri tespit etmek için kullanılmaktadır. Yapay Bağışıklık Sistemleri (YPS), doğal bağışıklık sisteminin işleyişinden ilham alır ve çeşitli gerçek dünya problemlerini çözmek için kullanılan hesaplamalı modellerdir [12, 13].

Klonal Seçim Algoritması (KSA) YPS algoritmalarından bir tanesidir [13-15]. KSA, ilk olarak 2002 yılında de Castro ve Von Zuben tarafından önerilmiş olan bu algoritma, bağışıklık sisteminin bir antijenik uyarana tepkisi temel alınarak geliştirilmiştir. Doğal bağışıklık sürecini temel alarak, antijenlerin tanınması ve etkili bir şekilde ortadan kaldırması süreçlerini simüle eder. Bu algoritma, en uygun antikörlerin seçilmesi, klonlanması ve adaptasyonunu içerir; bu sürece klonal seçim ilkesi denir. KSA, birçok problemde uygulanmıştır [16]. Özellikle çalışma [17], araç rotalama probleminin özel bir türü olan açık araç rotalama problemi için KSA sunulmuştur. Öne çıkan diğer çalışmalarda kapasiteli

araç rotalama [18] ve stokastik taleplerle araç rotalama [16] için KSA temelli yaklaşımlar sunulmuştur. Bu yaklaşımların genel amacı, NP-zor kategorisindeki bu problemlerin etkin bir şekilde çözülmesini sağlamaktır. Özellikle ZP-ARP üzerindeki KSA algoritması kullanımına dair tek bilinen çalışma [19]'dir. Bu çalışmaların sonuçları, literatürde kabul gören en iyi çözümlerden farklı olsalar da iyi olarak değerlendirilebilir.

Çalışma [8], ZP-ARP çözümü için çok amaçlı bir genetik algoritma (GA) yaklaşımı önerilmiş ve GA'nın başlangıç popülasyonu oluşturma adımında kullanılan farklı kümeleme algoritmaları (K-ortalama, Merkez tabanlı sezgisel, Gürültüyle Uygulamaların Yoğunluk Tabanlı Mekansal Kümelemesi, Paylaşılan En Yakın Komşu, Yol Ağı Kümesi) Solomon'un ZP-ARP referans problemlerinde değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, K-ortalama algoritmasının diğer algoritmalara göre seyahat edilen mesafe, bekleme süresi, araç sayısı ve hesaplama süresi kriterlerini göz önünde bulundurarak diğer algoritmalara göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, GA'nın başlangıç popülasyonunu oluşturma aşamasında kümeleme algoritmalarının kullanılmasının sonuçlar üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermiştir.

- ZP-ARP problemleri NP-zor problem sınıfında yer aldığı için meta sezgisel algoritmalarla başarılı çözüm yaklaşımları literatürde çok sayıda yer almasına rağmen, KSA ile yapılan çalışmalar kısıtlıdır. Bu nedenle bu çalışma, ZP-ARP'nin KSA ile uygulaması açısından literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.
- Literatürde ZP-ARP problemleri için KSA ile yapılan çalışmalar sınırlı olmasının yanı sıra KSA ile kümeleme yaklaşımlarının entegrasyonu bildiğimiz kadarıyla ilk defa bu çalışma ile önerilmiştir.
- Bu çalışmada, ZP-ARP problemlerinin çözümünde KSA algoritmasının başlangıç çözüm üretme adımında amaç fonksiyonunu optimize edebilmek için kümeleme temelli iki yeni yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen iki yeni yaklaşım ve çözümlerin rastgele sıralama sonucu elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlk olarak çözümler rastgele sıralanıp KSA uygulanmıştır. İkinci yaklaşımda, ilk elde edilen toplam mesafeyi iyileştirebilmek için kümeleme yaklaşımları (K-ortalama ve K-ortalama++) ile başlangıç çözümler iyileştirilmiş ve sonra yine KSA uygulanmıştır. Üçüncü yaklaşımda ise, ikincisinde elde edilen araç sayısını da azaltmak için kümeleme sonuçları müşteriye son teslim süresine göre sıralanarak başlangıç çözümler iyileştirilmiş ve sonra yine KSA uygulanmıştır.
- Bu çalışmada, ZP-ARP problemi için geliştirilen yaklaşımlar, toplam 21 farklı Solomon C1 ve R1 verisetlerinde denenmiştir. KSA ve kümeleme yaklaşımları ile başlangıç çözümler iyileştirilmiş KSA versiyonları kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Deney sonuçları, kümeleme yönteminin KSA'nın sonuçlarını iyileştirdiği ve KSA'nın yerel optimuma takılmasını önlediğini göstermiştir.

2. Zaman Pencere Araç Rotalama Problemleri için Kümeleme Temelli Klonal Seçim Algoritması

Başlangıç çözüm üretme stratejisi, optimizasyon sürecinin nerede başlayacağını belirlemede çok önemlidir. İyi seçilmiş bir başlangıç popülasyonu, daha hızlı yakınsamayı ve küresel optimumu bulma şansını artırabilir [20]. Literatürde, kümeleme yaklaşımlarının meta-sezgisellerle entegre edildiği, ZP-ARP için çeşitli yaklaşımlar yer almaktadır. Ancak bildiğimiz kadarıyla, KSA ile kümeleme yaklaşımları ZP-ARP problemlerinde ilk defa uygulanmıştır.

Çalışma [8]'de ZP-ARP için GA ile birçok kümeleme algoritması kullanılarak çözüm yaklaşımları incelenmiştir. Deneyler sonucunda, K-ortalama algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla

daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada da K-ortalama kümeleme yaklaşımları tercih edilmiştir. Bu çalışmada, ZP-ARP için K-ortalama ve K-ortalama++ kümeleme algoritmaları ile KSA'nın başlangıç çözümü üretme stratejileri geliştirilerek iki yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımların temel amacı yerel optimumdan kaçınmak, global optimuma yaklaşmak ve çözüm uzayındaki arama yinelemelerinin sayısını azaltmaktır.

2.1. Zaman Pencere Aracı Rotalama Problemleri

ZP-ARP, merkezi bir depo olarak adlandırılan özel bir düğüm, ziyaret edilmesi gereken bir müşteri kümesi ve depo ile müşterileri birbirine bağlayan yönlü bir ağ tarafından tanımlanır. Taşıma kapasitesi aynı olan bir araç filosu da mevcuttur. Araçların çıkış noktası depo olup, bütün araçlar depodan çıkmalı ve depoya geri dönmelidir. Kullanılabilecek araç sayısında bir sınırlama olmadığı varsayılmaktadır, ancak model formülasyonu kolaylaştırmak için filonun maksimum araç sayısı K ile gösterilmiştir. $N + 1$ müşteri (düğüm) olduğunu varsayıldığında, burada depo 0 ve müşteriler 1 ile N arası olarak belirtilmiştir. ZP-ARP'nin amacı, belirtilen zaman penceresi içerisinde tüm müşterilerin gerekli taleplerini temin ederken, araç kapasitelerini aşmadan ve toplam seyahat maliyetini minimize etmektir.

Çizelge 1. Optimizasyon Probleminin Parametreleri ve Karar Değişkenleri.

Parametreler
N : Toplam düğüm sayısını gösterir.
K : Toplam araç sayısını gösterir.
d_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki mesafeyi gösterir.
a_{ik}, t_{ij}, w_{ik} : i düğümü ve k araç arasındaki özel maliyet veya süreleri gösterir.
q_k : k aracının kapasitesini ifade eder.
e_i, l_i : i numaralı düğüm için en erken başlangıç ve en geç bitiş zamanı.
Değişkenler
x_{ijk} : Eğer i 'den j 'ye k aracı seçilirse (0,1) ikili bir karar değişkeni atanır.

Her bir düğüm arası bir ağ mevcuttur, bu ağ iki yönlü olup düğümleri (müşterileri) birbirine bağlar. Bir aracın depodan çıkıp bir dizi müşterinin taleplerini temin edip tekrar depoya dönmesi ile bir rota tamamlanır. Herhangi iki düğüm (i, j) arasında bir d_{ij} mesafesi bulunur ve bu mesafe t_{ij} seyahat süresine eşittir. Her bir düğümün talebi sadece bir araç tarafından karşılanabilir. Her aracın sınırlı bir kapasitesi q_k olduğundan ve her müşterinin farklı bir talebi olduğundan, araç kapasitesi ziyaret edilen müşterilerin talepleri toplamından m_i büyük veya eşit olmalıdır. Ayrıca her bir müşteri i 'nin, önceden belirlenmiş bir zaman aralığı bulunmakta olup en erken varış zamanı e_i ve en geç varış zamanı l_i ile sınırlıdır. Araçlar en erken varış zamanından önce geldiğinde, en erken varış zamanına kadar bekleyerek talepleri teslim edilebilir; ancak en geç varış zamanından sonra geldiklerinde, talepleri teslim edemezler. Araç k için düğüm i 'deki araç bekleme süresi w_{ik} ve araç k 'nın düğüm i 'deki taleplerin teslim edilme süresi f_{ik} olup, bunlar toplam süreye eklenir. Araçlar, rotalarını başarılı bir şekilde tamamlamaları için, deponun en geç varış zamanından dönmelidir.

Modelin iki karar değişkeni bulunmaktadır. Her ağ bağlantısı (i, j) için, burada $i \neq j$, $i, j \neq 0$ ve her araç k için, karar değişkeni X_{ijk} , araç k 'nin düğüm i 'den düğüm j 'ye gitmesi durumunda 1'e eşit, aksi halde 0'dır. Karar değişkeni a_{ik} , her araç k 'nın düğüm i 'ye varış zamanını gösterir. Çizelge 1'de optimizasyon probleminin parametreleri ve karar değişkenleri mevcuttur.

ZP-ARP nin temel amacı, tüm müşterilere zamanında hizmet verirken araçların kat ettiği mesafeyi ve kullanılan toplam araç sayısını minimize etmektir. Ayrıca, her aracın hizmeti depodan başlar ve depoda sona erer. Her müşteriye bir kez hizmet verilir ve araç kapasitesi ile zaman penceresi kısıtlamalarına uyan çözümler üretilir. Bu matematiksel modelin amacı, araçların toplam kat ettiği mesafeyi minimize etmek olup, denklem (1) ile gösterilmiştir. Her rotanın depodan başlamasını ve depoda bitmesini sağlayan kısıt (2) ve (3)' dür. Her müşteri düğümünün yalnızca bir araç tarafından bir kez ziyaret edilmesini kısıt (4) ve (5) sağlar. Kısıt (6), araç kapasitelerinin aşılmamasını sağlar. Kısıt (7) ve (8), zaman penceresini tanımlar. Kısıt (9) ve (10), karar değişkenlerinin alabileceği değer kümelerini belirtir.

$$\text{Min } \sum_{i=0}^N \sum_{j=0, j \neq i}^N \sum_{k=1}^N d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N x_{ij} \leq 1 \text{ for } i = \{0, \dots, N\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N x_{jk} \leq 1 \text{ for } k = \{0, \dots, K\} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk} = 1 \text{ for } i = \{1, \dots, N\} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0, i \neq j}^N x_{ijk} = 1 \text{ for } j = \{1, \dots, N\} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^N m_i \sum_{j=0, j \neq i}^N x_{ijk} \leq q_k \text{ for } k = \{1, \dots, N\} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K m_i \sum_{i=0, i \neq j}^N x_{ijk} (a_{ik} + t_{ij} + f_{ij} + w_{ik}) \leq a_{jk} \text{ for } j = \{1, \dots, N\} \quad (7)$$

$$e_i \leq (a_{ik} + w_{ik}) \leq l_i \text{ for } i = \{1, \dots, N\}, k = \{1, \dots, N\} \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \text{ for } i, j = \{1, \dots, N\} \quad (9)$$

$$a_{ik} \geq 0 \text{ for } i = \{1, \dots, N\}, k = \{1, \dots, K\} \quad (10)$$

Bu çalışmada, yukarıda tanımlanan ZR-ARP için kümeleme temelli KSA yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda, kümeleme yöntemi ile KSA başlangıç çözüm bulma stratejisi

iyileştirilerek, KSA ile araç rotalama problemine çözüm getirilmiştir. Aşağıda geliştirilen hibrit yöntem detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

2.2. Kümeleme Algoritmaları

2.2.1. K-Ortalama Algoritması

K-ortalama algoritması, yaygın olarak kullanılan bir kümeleme yöntemidir [21]. Bu algoritmanın amacı, veri örneklerini belirli bir benzerliğe dayanarak K kümeye ayırmaktır, böylece her kümedeki örnekler yüksek benzerliğe sahip olur ve her kümenin örnekleri karşılık gelen merkez etrafında toplanır. K-ortalama, küme içi benzerliği maksimize ederken, küme arası benzerliği minimize etmeyi hedefler. K-ortalama algoritmasının avantajları arasında hızlı ve kolay uygulanabilir olması yer alır. K-ortalama kümeleme algoritması şu adımlarla gerçekleştirilir:

1. Elbow yöntemi ile belirlenen K değeri için rasgele başlangıç küme merkezleri seçilir.
2. Her veri noktası, belirlenen merkezlere olan uzaklığına göre en yakın merkeze atanır. Bu atama genellikle Öklidyen mesafesi kullanılarak gerçekleştirilir, bu da genellikle denklem (11) ile ifade edilir. Burada x ve y veri noktasının koordinat bilgilerini temsil eder.

$$d(x, y) = \sqrt{((x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2)} \quad (11)$$

3. Her küme için, o kümeye ait düğüm noktalarının ortalaması alınarak yeni küme merkezleri belirlenir (12), burada N_k kümeye ait olan düğüm noktalarının temsil eder ve C_k , bu düğüm noktalarını koordinatlarını belirtir.

$$\mu_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i \in C_k} x_i \quad (12)$$

4. Yeni küme merkezleriyle düğümler tekrar kümelere atanır ve yeni düğüm merkezleri hesaplanır. Bu işlem, küme merkezlerinde değişiklik olmadığında, yakınsama sağlandığında ya da belirli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında sona erer.

2.2.2. K-Ortalama++ Algoritması

K-ortalama algoritması, başlangıçta rastgele seçim noktasını kullanarak çalışır ve bu seçim, sonuçlar üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [22]. Farklı başlangıç noktaları, tamamen farklı sonuçlara yol açabilir. Bu sorunu çözmek için K-ortalama++ algoritması önerilmektedir. Bu algoritma, başlangıç kümeleme merkezlerinin birbirinden olabildiğince uzak olmasını sağlayarak daha tutarlı ve genellikle daha iyi sonuçlar elde etme kapasitesine sahiptir [23]. Ancak, ek adımlar nedeniyle standart K-ortalama'ya göre daha yavaş çalışır. K-ortalama algoritmasından farklı olarak, K-ortalama++'ın başlangıç merkezi seçimi belirli adımlarla gerçekleşir:

1. Veri kümesinden rastgele bir düğüm seçilir ve bu, ilk merkez olarak belirlenir.

2. Sonraki merkezleri, $D(x)$ olarak ifade edilen x noktasının en yakın mevcut küme merkezine olan mesafesine dayanarak, belirli bir olasılıkla (13) seçilir.

$$P(x) = \frac{D(x)^2}{\sum_{y \in veri} D(y)^2} \quad (13)$$

3. K adet merkez seçilene kadar ikinci adımı tekrar edilir.

2.2.3. Elbow Yöntemi

K -ortalama algoritmasında en uygun ' K ' küme sayısını belirlemek amacıyla Elbow yöntemi yaygın olarak kullanılır [24]. Bu yöntem, farklı K değerleri için toplam iç kümeler arası uzaklığı hesaplar ve bu hatanın en hızlı değiştiği noktayı tespit eder. Elbow yönteminin dezavantajı, dirsek noktasının her zaman belirgin olmaması ve bazen subjektif bir karar gerektirebilir olmasıdır. Bu yüzden, çalışmamızda, Elbow yöntemiyle belirlenen K değerinin 2 üstü ve altı değerlerini de inceledik. Ancak, genellikle en uygun kümelerin sayısını belirlemek için kullanılan etkili bir yöntemdir. Elbow yönteminin adımları aşağıdaki belirtilmiştir:

1. Potansiyel K değerleri aralığında (örneğin, $K=1$ 'den $K=N$ 'e kadar) K -ortalama algoritması uygulanır.
2. Her potansiyel K değeri için kümeler arası toplam kare hata (veya varyans) değeri hesaplanır. Bu değer literatürde genellikle "kümeler içi kareler toplamı" (WCSS) olarak adlandırılır ve ilgili formül denklem (14) ile verilir. Burada, C_i belirli bir i kümesini oluşturan veri noktalarını, μ_i i . kümeye ait merkezi ve x i . kümeye dahil olan bir veri noktasını temsil eder.

$$WCSS(K) = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (14)$$

3. Farklı K değerleri için elde edilen WCSS değerleri bir grafik üzerinde gösterilir.
4. Grafik incelendiğinde, WCSS değerinin hızla azaldığı ve ardından daha istikrarlı bir değişim gösterdiği 'dirsek' noktası tespit edilir. Bu tespit edilen nokta, en uygun küme sayısını ifade eder.

2.3. Klonal Seçim Algoritması

KSA, 2002 yılında de Castro ve Von Zuben tarafından bağışıklık sisteminin antijenik bir uyarana olan tepkisi temel alınarak önerilmiştir [14]. Algoritmanın temelinde, doğal bağışıklık sisteminde bir antijenin tanınmasını takiben, bu antijeni en iyi tanıyan antikorların uyarılması, klonlanması, somatik hipermutasyona uğraması ve yeni, daha iyi utum sağlayan antikorların ortaya çıkması süreçleri bulunmaktadır. Daha az tanınan antikorlar, daha iyi tanıyan yeni antikorlar tarafından yer değiştirilir. Bu mekanizma, bağışıklık sisteminin antijenleri etkili bir şekilde tanıyıp yok etmesini mümkün kılar; bu ilkeye klonal seçim ilkesi denir. Bu çalışmada, KSA algoritması ARP çözmek için uyarlanmıştır. ARP kapsamında, KSA algoritmasının uygulanışı şu şekildedir:

P adet antikordan oluşan ilk popülasyonunu rastgele oluşturur, popülasyondaki her bir antikorda N adet düğüm bulunur ve düğümlerin sırası rasgele belirlenir.

$$Ab = \{Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_p\} \quad (15)$$

$$Ab_i = Ab_{i,1}, Ab_{i,2}, \dots, Ab_{i,n} \quad (16)$$

$$Ab_{i,j} = \{N_{21}, N_{22}, N_2\} \quad (17)$$

Bir aracın bir düğümden diğer düğüme gidebilmesi için iki kriter vardır; i) aracın güncel yükü, maksimum kapasitesini geçemez, ii) aracın mevcut süresi, depoya varış süresini geçemez. Eğer bu iki kısıttan birini sağlamaz ise araç yeni bir düğüme gitmez ve yerine, yeni bir araç depodan sonraki düğüme hareket etmek üzere yola çıkar.

Denklem (15)' te popülasyon sayısına eşdeğer miktarda farklı yol güzergahları oluşturulur. Denklem (16)' ta Her Ab_i antikoru için alt yollar oluşturulmuştur. Bir aracın bir düğümden diğer düğüme gidebilmesi için 2 kriter vardır; i.) aracın güncel yükü, maksimum kapasitesini geçemez, bu bir operasyon veya atama sonrasında aracın maksimum kapasitesini aşmamasını sağlar. ii.) aracın mevcut süresi, depoya varış süresini geçemez, bu bir aracın güncellenmiş geçen süresinin izin verilen zaman sınırları içinde olduğunu ve aracın zamanında hareket edebileceğini belirtir. Bu iki kriter sağlanana kadar bir araç belirtilen sıraya göre düğümleri ziyaret eder. Denklem (17) ile eğer bu iki kısıttan birini sağlamaz ise araç yeni bir düğüme gitmez ve yerine, yeni bir araç depodan sonraki düğüme hareket etmek üzere yola çıkması sağlanır.

Araçların yaptığı toplam measafeyi minimize etmek için uygunluk fonksiyonu $F(Ab_i)$ değeri oluşturulur. Sonrasında, klonlama aşamasında popülasyondaki her bir antikoru (Ab_i) için uygunluk fonksiyonu değeri $F(Ab_i)$ ile doğru orantılı olarak klon oluşturulur. Oluşturulacak toplam klon sayısı aşağıdaki denklemle tespit edilir (18).

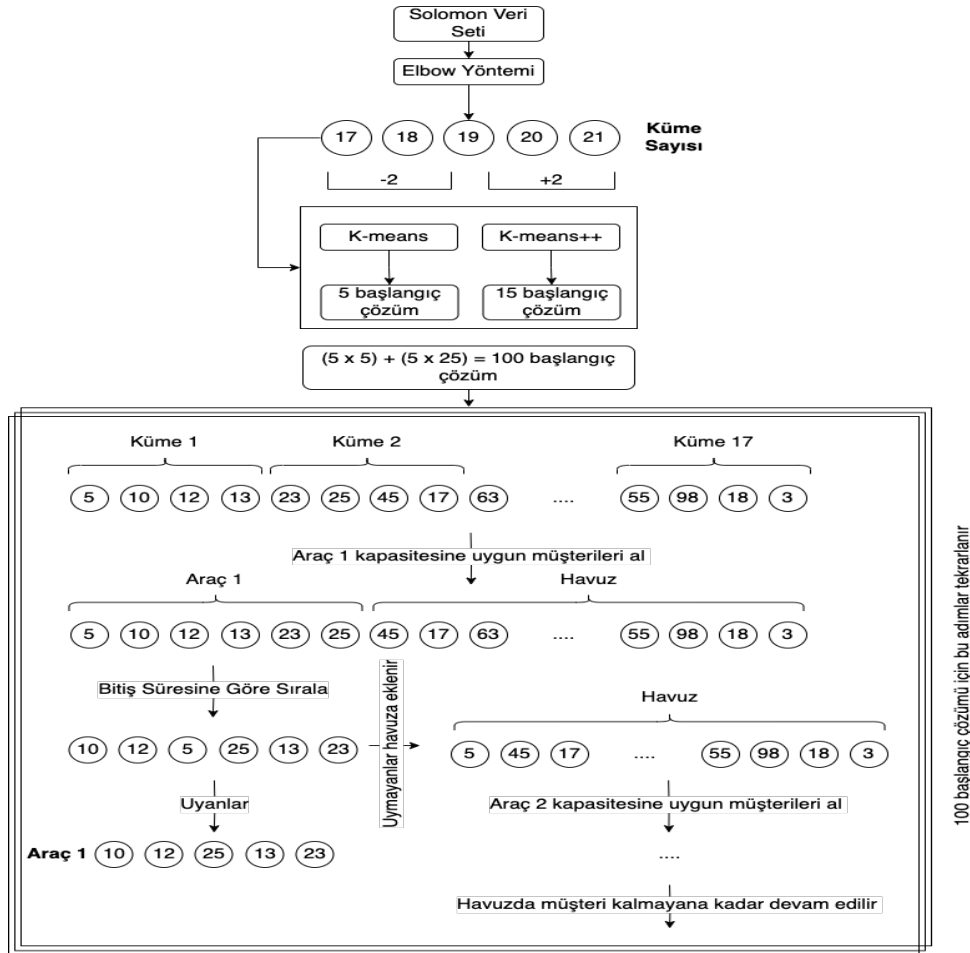
$$CAb_i = (\alpha \cdot \rho) / n \quad (18)$$

Belirtilen denklemde, C her bir antikoru (Ab_i) için üretilen toplam klon sayısını, α klonlama katsayısını, ρ klonlamaya maruz kalacak toplam antikoru sayısı, i değeri antikoru uygunluk değeri açısından sıralamasını gösterir. Uygunluk değeri en yüksek olan antikoru için $n = 1$ olacaktır, böylece uygunluk değeri yüksek olan antikolar için daha fazla klon oluşturulurken, uygunluk değeri düşükçe oluşturulacak klon sayısı da azalır.

Klon popülasyonundaki her bir klon CAb_i , uygunluk fonksiyonu değerini artırmak için hipermutasyon adımına tabi tutulur. Hipermutasyon süreci iki aşamadan oluşur: ters mutasyon ve çift yönlü mutasyon. Eğer mutasyon aşamasında daha iyi bir çözüm elde edilemezse CAb_i aynı kalır. Popülasyondaki aynı miktarda antikoru korumak için her Ab_i antikoru klonundan en yüksek uygunluk fonksiyon değerine sahip klon seçilir ve Ab_i 'ye atanır. Son olarak, mevcut antikoru popülasyonundaki en düşük uygunluk fonksiyon değerine sahip $\%B$ kadar antikoru, yeni oluşturulan antikolarla değiştirilir. Bu işlem "reseptör düzenleme" olarak bilinir. Durdurma kriteri karşılanana kadar bu işlemler tekrarlanır.

Ters mutasyon aşamasında, daha önce oluşturulan Ab_i düğümünde rasgele 1 ile 100 arasında iki sayı seçilir (Örneğin K ve L). Bu seçilen iki sayı $|K - L| > 2$ olması koşuluyla işleme devam edilir. $CAb_{i,k}$ ve $CAb_{i,l}$ arasındaki kısım CAb_i klonu için tersine çevrilir. Elde edilen mutasyona uğramış yeni CAb_i klonu, orjinal CAb_i 'den daha yüksek bir uygunluk değerine sahipse, bu klon için hiper mutasyon işlemi tamamlanmış olur. Eğer mutasyon sonrası daha iyi bir çözüm elde edilemezse, farklı bir mutasyon adımı uygulanır veya eski CAb_i değeri tutulur, işlem bitirilir.

İkili mutasyon aşamasında, önceden oluşturulan Ab_i düğümünde rasgele 1 ile 100 arasında iki sayı seçilir (Örneğin K ve L). Bu seçilen iki sayı $|K - L| > 2$ olması koşuluyla işleme devam edilir. $CAB_{i,k}$ ve $CAB_{i,l}$ arasındaki CAB_i klonu için yer değiştirme yapılır. Elde edilen mutasyona uğramış yeni CAB_i klonu, orijinal CAB_i 'den daha yüksek bir uygunluk değerine sahipse, C klonu için hiper mutasyon işlemi tamamlanmış olur. Eğer mutasyon sonrası daha iyi bir çözüm elde edilemezse, farklı bir mutasyon adımı uygulanır veya eski CAB_i değeri tutulur ve işlem bitirilir.



Şekil 1. ZP-ARP için geliştirilen kümeleme temelli klonal seçim algoritmasının akış diyagramı.

2.4. ZP-ARP için Kümeleme Temelli KSA Çözüm Yaklaşımları

Bu çalışmada, ZP-ARP için K-ortalama ve K-ortalama++ kümeleme algoritmaları ile KSA için başlangıç çözümü üretme stratejileri geliştirilerek iki yeni yaklaşım önerilmektedir. Geliştirilen bu yaklaşımlar ve rastgele başlangıç çözüm üretme stratesi ile elde edilen çözümler karşılaştırılmıştır.

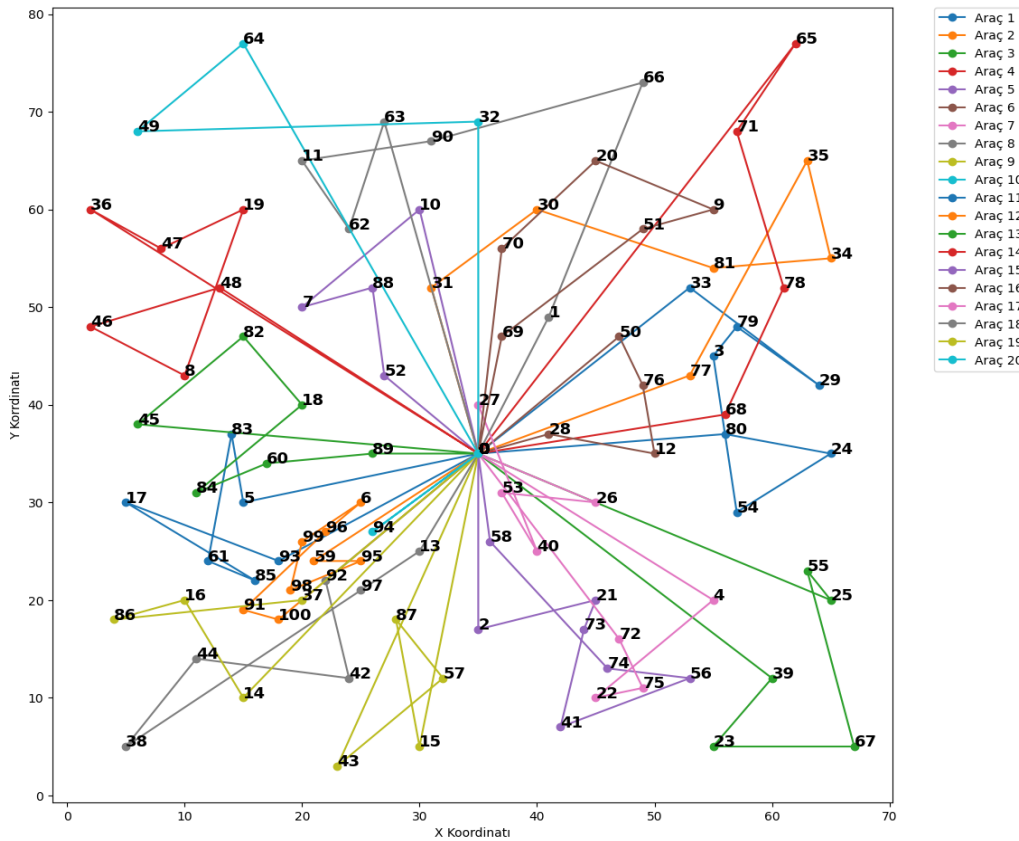
Yaklaşım 1'de, düğümler rastgele başlangıç çözümlerine atanmış ve ardından KSA ile araç rotalama işlemi uygulanmıştır. Bu yaklaşımda, KSA'nın kaliteli çözümlerle başlamaması sebebiyle yerel optimuma takıldığı ve bu yüzden amaç fonksiyonunu, toplam kat edilen mesafeyi iyileştiremediği gözlenmiştir.

Yaklaşım 1' deki sorunla başa çıkabilmek için Yaklaşım 2' de, düğümlerin rastgele sıralaması yerine daha yapılandırılmış bir yaklaşım önerilmiştir. Literatürde ARP için kümeleme yaklaşımları başarıyla uygulanmaktadır [8]. Bildiğimiz kadarıyla, literatürde KSA algoritması ile ARP

için kümeleme algoritmaları uygulanmıştır. Sonuç olarak, Yaklaşım 2 ve 3, Yaklaşım 1'e göre bütün verilerde daha başarılı sonuçlar sunmuştur. Karşılaştırmalı analizde, Yaklaşım 2 ve 3'ün belirli problemlerde birbirlerine üstün olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 2. Solomon C1 veri seti üzerinde Kümeleme Tabanlı Klonal Seçim Algoritmasıyla elde edilen ZP-ARP sonuçları.

	KSA-v1		KSA-v2		KSA -v3	
	Mesafe	Araç Sayısı	Mesafe	Araç Sayısı	Mesafe	Araç Sayısı
C101	2247.93	28	828.93	10	828.93	10
C102	2045.08	23	974.42	12	1036.80	11
C103	1880.97	19	1050.30	12	1192.61	12
C104	1636.81	16	1051.34	12	1320.29	13
C105	2062.18	26	828.93	10	828.93	10
C106	2067.59	25	828.93	10	863.59	10
C107	2074.63	22	828.93	10	828.93	10
C108	1921.31	23	828.93	10	1038.12	10
C109	1774.09	10	828.93	10	926.54	10



Şekil 3. R101 veri setinde ZP-ARP için kullanılan kümeleme temelli klonal seçim algoritmasıyla elde edilen alt yolların görselleştirilmesi.

Çizelge 3. Solomon R1 veri seti üzerinde Kümeleme Tabanlı Klonal Seçim Algoritmasıyla elde edilen ZP-ARP sonuçları.

	KSA-v1		KSA-v2		KSA -v3	
	Mesafe	Araç Sayısı	Mesafe	Araç Sayısı	Mesafe	Araç Sayısı
R101	2130.73	31	1923.77	25	1774.12	20
R102	1989.86	26	1776.11	23	1691.70	18
R103	1742.37	23	1493.82	19	1606.30	16
R104	1474.42	16	1211.05	14	1451.24	15
R105	1932.09	25	1642.09	20	1610.33	15
R106	1797.63	21	1503.38	17	1543.92	14
R107	1621.24	20	1309.32	15	1483.64	15
R108	1433.79	15	1196.09	13	1457.31	15
R109	1707.77	20	1373.41	17	1551.58	14
R110	1585.39	19	1360.83	15	1564.68	14
R111	1611.74	19	1345.38	14	1547.92	15
R112	1423.81	15	1175.48	13	1506.03	13

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma, ZP-ARP için bir kümeleme temelli KSA geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu algoritma, doğal felaketler sonucu ortaya çıkan acil durumlar gibi olağanüstü koşullarda etkili bir afet yardım ağı yönetimi için potansiyel bir çözüm sunmaktadır.

Çalışmanın sonuçları, KSA algoritmasının başlangıç çözümlerinin, kullanılan kümeleme yaklaşımlarıyla önemli ölçüde geliştirildiğini göstermektedir. Yaklaşım 2 ve 3, Yaklaşım 1'e kıyasla daha düşük mesafe ve daha az araç sayısı ile daha iyi sonuçlar sağlamıştır. Bu, ZP-ARP probleminin çözümünde KSA algoritmasının etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir ve afet yardımı gibi acil durumlar için daha hızlı ve etkili rotalama çözümleri sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, KSA algoritmasının farklı sezgisel yöntemlerle entegrasyonu veya bütünleşik yaklaşımların geliştirilmesi üzerinde çalışılabilir. Ayrıca, gerçek dünya afet senaryolarında bu algoritmanın uygulanması ve pratik kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi faydalı olacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma ZP-ARP problemleri için yeni bir çözüm yaklaşımı sunmuş ve acil durum yönetimindeki etkinliği açısından önemli bir adım atmıştır. Bu algoritmanın daha da geliştirilmesi ve uygulanması, doğal felaketlerle başa çıkmak için önemli bir araç olabilir.

Teşekkür

Bu çalışma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından 121E406 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] <https://reliefweb.int/report/turkiye/cred-crunch-newsletter-issue-no-72-september-2023-earthquakes-turkiye-review-1900-today>
- [2] Zhong, S., Cheng, R., Jiang, Y., Wang, Z., Larsen, A., & Nielsen, O. A. (2020). Risk-averse optimization of disaster relief facility location and vehicle routing under stochastic demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 141, 102015.
- [3] Benson, M., Koenig, K. L., & Schultz, C. H. (1996). Disaster triage: START, then SAVE—a new method of dynamic triage for victims of a catastrophic earthquake. *Prehospital and disaster medicine*, 11(2), 117-124.
- [4] Zhang, J., Zhang, J., Qin, Z., & Jia, Y. (2022). Vehicle routing problems with time windows based on the improved hybrid fish swarm-ant colony algorithm. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1-8.
- [5] Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- [6] Hang, Z., Luo, Z. L., & Huang, S. W. (2015). Application research of hybrid ant colony algorithm in vehicle routing problem with time windows. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 54(1), 41-46.
- [7] Pang, Y., Luo, H. L., Xing, L. N., & Ren, T. (2019). A survey of vehicle routing optimization problems and solution methods. *Control Theory Appl*, 36(10), 1574-1582.
- [8] Gocken, T., & Yaktubay, M. (2019). Comparison of different clustering algorithms via genetic algorithm for VRPTW.
- [9] Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, 35(2), 254-265.
- [10] Xiao-nan, Z. H. A. N. G., & Hou-ming, F. A. N. (2021). Hybrid memetic algorithm for vehicle routing problem with time windows. *Operations Research and Management Science*, 30(7), 128.
- [11] Tang, J., Zhang, J., & Pan, Z. (2010). A scatter search algorithm for solving vehicle routing problem with loading cost. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4073-4083.
- [12] Dasgupta, D. (Ed.). (2012). *Artificial immune systems and their applications*. Springer Science & Business Media.
- [13] De Castro, L. N., & Timmis, J. (2002). *Artificial immune systems: a new computational intelligence approach*. Springer Science & Business Media.
- [14] De Castro, L. N., & Von Zuben, F. J. (2002). Learning and optimization using the clonal selection principle. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(3), 239-251.
- [15] Brabazon, A., & O'Neill, M. (2006). *Biologically inspired algorithms for financial modelling*. Springer Science & Business Media.
- [16] Marinakis, Y., Marinaki, M., & Migdalas, A. (2014). A hybrid clonal selection algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands. In *Learning and Intelligent Optimization: 8th International Conference, Lion 8, Gainesville, FL, USA, February 16-21, 2014. Revised Selected Papers 8* (pp. 258-273). Springer International Publishing.
- [17] Pan, L., & Fu, Z. (2009, October). A clone selection algorithm for the open vehicle routing problem. In *2009 Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing* (pp. 786-790). IEEE.
- [18] Dabrowski, J. (2008, May). Clonal selection algorithm for vehicle routing. In *2008 1st International Conference on Information Technology* (pp. 1-4). IEEE.
- [19] Ogiolda, M. (2017). The use of clonal selection algorithm for the vehicle routing problem with time windows. In *Symposium for Young Scientists in Technology, Engineering and Mathematics* (pp. 68-74).
- [20] Toğan, V., & Daloğlu, A. T. (2008). An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping. *Computers & Structures*, 86(11-12), 1204-1218.
- [21] Bin, Z., & Xiao-Jun, L. (2015). Study on logistics distribution route optimization based on clustering algorithm and ant colony algorithm. *The Open Cybernetics & Systemics Journal*, 9(1).

- [22] Wang, J., Ji, Z., Shi, M., Huang, F., Zhu, C., & Zhang, D. (2015). Scenario analysis and application research on big data in smart power distribution and consumption systems. *Proceedings of the CSEE*, 35(8), 1829-1836.
- [23] Zhao, Z., Wang, J., & Liu, Y. (2017, December). User electricity behavior analysis based on K-means plus clustering algorithm. In *2017 International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)* (pp. 484-487). IEEE.
- [24] Syakur, M. A., Khotimah, B. K., Rochman, E. M. S., & Satoto, B. D. (2018, April). Integration K-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 336, p. 012017). IOP Publishing.

NESNEYE YÖNELİK PROGRAMLAMADA SINIF TEST ÜRETİMİ İÇİN OLAY TEMELLİ BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ

Tuğkan TUĞLULAR^{1*}

¹İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İzmir, 35430, Türkiye
Geliş Tarihi/Received Date: 28.09.2023 Kabul Tarihi/Accepted Date: 30.12.2023 DOI: 10.54365/adyumbd.1368061

ÖZET

Nesneye yönelik programlamada yaşam döngüsü bulunan nesnelere temsil eden sınıfların test edilmesi önemlidir. Sınıf testleri, metot testleri ile hata bulunmadığı aşamada çalıştırılması gereken testlerdir. Metot testleri bir metodun beklendiği gibi çalıştığını doğrularken, sınıf testleri bir sınıfın farklı metot çağruları karşısında geçerli bir durumda kaldığını ve beklendiği gibi yanıt verdiğini teyit eder. Metotlarının doğru çalışması bir sınıfın doğru çalıştığını göstermeyeceği için sınıf testleri önemlidir. Bu çalışmada sınıf testleri için olay temelli bir yaklaşım önerilmiştir. Bu öneri içinde formel Olay Sıra Çizgesi (OSÇ) kullanılmıştır. OSÇ'ler, Sonlu Durum Makineleri (SDM) üzerinden üretilebilen yönlü çizgeler olup çizge teorisinin algoritmalarını SDM'lerden farklı olarak doğrudan kullanabilmektedir. Bu avantajına ek olarak kodlama tarafında yine bu çalışmada önerilen şablonların kullanılması durumunda OSÇ'ler ile sınıf metotların eşleşmesi doğrudan ve hızlıca sağlanabilmektedir. OSÇ'ler için otomatik test üreten bir aracın varlığı ise bu çalışmayı doğrudan kullanılabilir kılmaktadır. Önerilen yaklaşım karmaşık bir yaşam döngüsüne sahip klima kontrol ünitesi sınıfı üzerinde doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nesneye yönelik programlama, Sonlu durum makineleri, Olay sıra çizgeleri, Olay temelli test üretimi, Sınıf testleri

PROPOSAL OF AN EVENT-BASED APPROACH FOR CLASS TEST GENERATION IN OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING

ABSTRACT

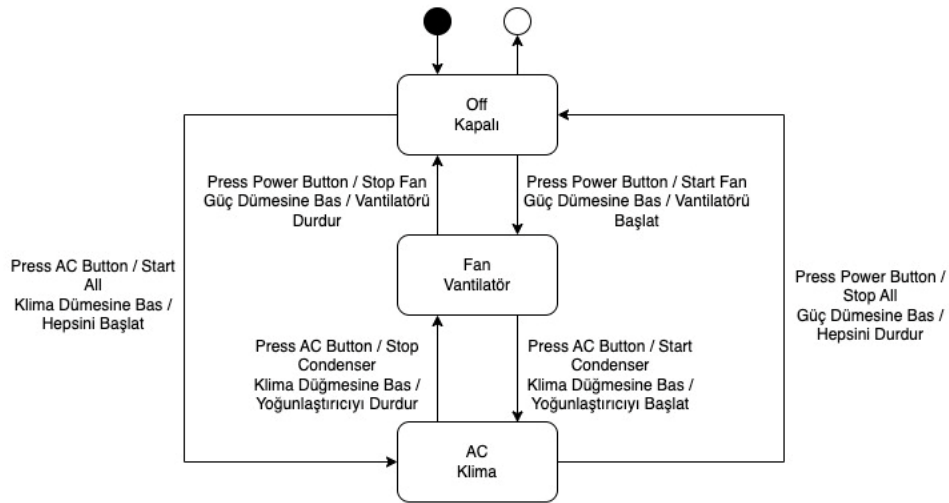
Testing classes with lifecycles is crucial in object-oriented programming. Class tests should be performed after method tests are error-free. Method tests check that a method operates as expected, while class tests verify that a class remains valid and reacts as expected throughout method calls. Class tests are crucial because method tests do not necessarily show class functionality. In this work, event-based class testing is proposed. Our concept uses formal Event Sequence Diagrams (ESGs). ESGs are directed graphs that may be created from Finite State Machines (FSMs) and use graph theory techniques directly. Additionally, using the templates provided in this study on the code side allows direct and fast mapping of ESGs and class methods. A tool that generates automatic ESG testing makes this study usable. The proposed method was validated on an air-conditioning control unit class with a complex lifecycle.

Keywords: Object-oriented programming, Finite state machines, Event sequence graphs, Event-based test generation, Class tests

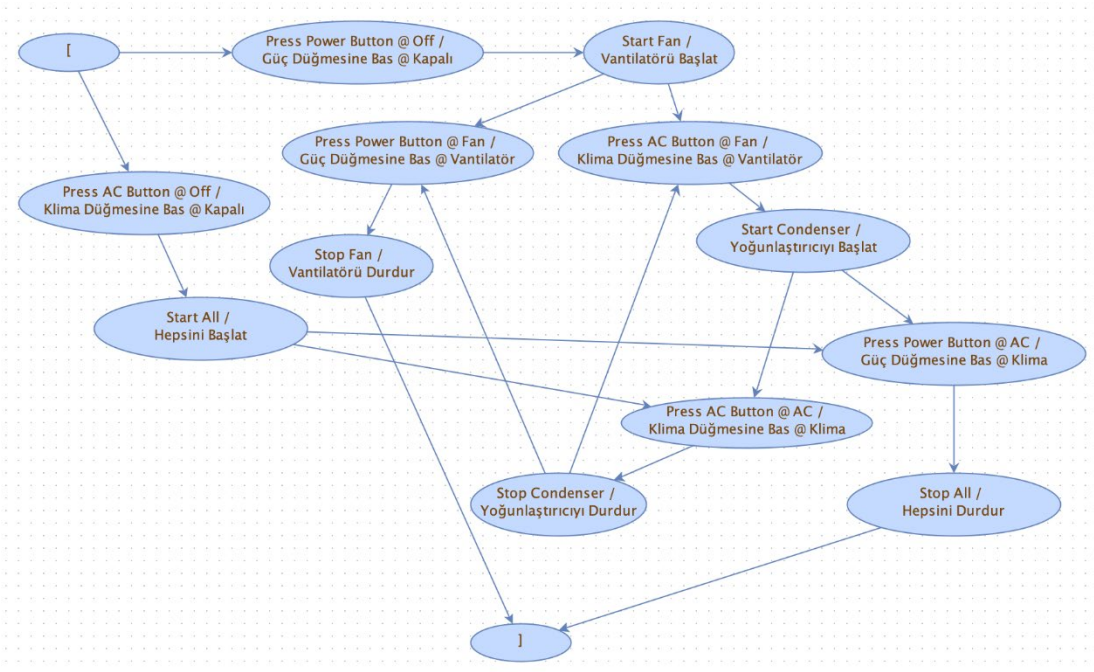
* e-posta¹ : tugkantuglular@iyte.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6797-3913> (Sorumlu Yazar)

1. Giriş

Nesneye yönelik programlamada yaşam döngüsü bulunan nesnelere bu yaşam döngüsü nesnenin oluşturulması ile başlar, genellikle kendisine gelen metot çağrıları ile devam eder, bu çağrılar nesnenin durumunu değiştirir ve nesne, kullanımı bittiğinde geri dönüşüme uğrar. Bu yaşam döngüsü, sonlu durum makinesi [1] veya olay sıra çizgesi [2] ile temsil edilebilir (bakınız Şekil 1 ve Şekil 2). Sonlu durum makinesi (SDM) bir nesnenin içinde bulunabileceği durumları ve bunlar arasındaki geçişleri temsil eder. Durumlar nesne yaşam döngüsünün çeşitli aşamalarını temsil ederken geçişler nesneyi bir durumdan diğerine taşıyan eylemleri/olayları temsil eder. Olay sıra çizgeleri (OSC) ise düğümlerin "takip eder" ilişkisini sağladığı kenarlarla birbirine bağlanan olayları temsil ettiği yönlü bir çizgedir. Bir SDM, durumları ve girdi/çıkıtları birleştirerek bir OSC'ne dönüştürülebilir. OSC'ler anlamsal olarak zenginleştirilmiş Myhill çizgeleridir [3]. Hem sonlu durum makineleri hem de olay sıra çizgeleri olay temelli formel modelleme yöntemleridir [4].



Şekil 1. Klima kontrol ünitesi sonlu durum makinesi ([7] den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2. Klima kontrol ünitesi olay sıra çizgesi

SDM ve OSÇ gibi formel modeller sayesinde model tabanlı sına (test) mümkün olmaktadır. Model tabanlı sına (test) modeller sına (test) durumlarının iki ana problemini çözmektedir. İlk olarak formel modellerden sına (test) durumlarını otomatik üretmek için algoritmalar ve bu algoritmaların kullanıldığı yazılım araçları bulunmaktadır. İkinci olarak yazılım sına (test) durumlarındaki kâhîn problemini, bir sonraki aşamayı, ki bu bir durum ya da olay olabilir, doğal olarak içinde barındırdığı için ortadan kaldırmaktadır. Model tabanlı sına (test) ile üretilen sına (test) durumları işletilebilmek için test kodlarına dönüştürülmelidir. Ayrıca bunlar, metot (birim) testi, sınıf testi, bileşen testi, servis testi, uygulama/sistem testi ve kullanıcı kabul testi gibi farklı seviyelerde test kodlarına çevrilebilirler.

Nesneye Yönelik Programlama (NYP) birim testi uygulaması, bir sınıf içinde yer alan metotların çevredeki yazılımdan bağımsız olarak düzgün işlediğini doğrulamak amacıyla incelenmesidir. NYP bağlamında, sınıflar içindeki metotlar, nesnelere sergilediği belirli davranışların uygulanmasıyla görevlidir. Nesneye yönelik programlamada bir sınıf işletildiğinde nesneye dönüşür [5]. Bu açıdan bakıldığında bir sınıf, nesnenin taslağıdır. Bu taslak, nesneye yönelik programlamada, genellikle değişkenlerle ifade edilen özelliklerden ve işlevleri temsil eden metotlardan oluşur. Sınıf testi, sınıfın temsil ettiği nesnenin yaşam döngüsünü doğrulamayı amaçlar [6]. Bu bağlamda sınıf testi hiyerarşik olarak metot (birim) testinin hemen üstündedir. Birim testi, bir sınıf metodunun birlikte çalıştığı olduğu diğer sınıf ve metotlardan bağımsız olarak düzgün işlediğini doğrular. Sonraki aşama sınıf testidir. Bir nesnenin yaşam döngüsü içinde metotları hem nesne içinden hem de nesne dışından çağrılabilir. Sınıf testinde bir nesnenin yaşam döngüsü içinde gelen metot çağrıları karşısında beklediği gibi çalıştığını doğrulamak için sınıf testi gerçekleştirilir. Bu çalışmada olay temelli OSÇ'ler kullanılarak sınıf testi için bir yaklaşım önerilmektedir. Bu makalede örnek uygulama olarak klima kontrol ünitesi sınıfı ve nesnesi kullanılacaktır. Java kodu İngilizce olduğu için şekillerde hem İngilizce hem de Türkçe karşılıkları verilmiştir.

Sonlu durum makineleri üzerinden sına (test) durumları veya test üretmek üzere geliştirilmiş yazılımlar bulunmaktadır. Ancak bunlar nesne güdümlü programlama yaklaşımı ile sorunsuz olarak örtüşmemektedir çünkü NYP'da metot çağrıları birer olaydır, durum değildir. Dolayısı ile bir diğer olay temelli modelleme yöntemi olan olay sıra çizgelerinin sınıf testi için daha uygun olduğu düşünülmektedir. Şekil 2'de klima kontrol ünitesi OSÇ'si gösterilmektedir. Bu OSÇ Şekil 1'de çizilmiş olan SDM'nin sadece olaylar temsil edilecek şekilde dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Bu şekilde sadece olaylardan ibaret yönlü bir çizge olmasından dolayı sına (test) durumlarını üretmek çizge teorisi algoritmalarını kullanarak mümkün olmaktadır [8]. Hatta bu algoritmalar kullanılarak Test Suite Designer (TSD) isimli bir yazılım aracı bilimsel çalışmalar için üretilmiştir [4]. Şekil 2 de bu TSD aracı kullanılarak çizilmiştir. TSD aracının en önemli özelliği OSÇ'lerden sına (test) ardışık sıralarını otomatik üretebilmesidir. Ancak TSD aracı bu çalışma ile ilk defa sınıf testi için kullanılacaktır.

Makale şu şekilde yapılandırılmıştır. Bölüm 2'de ilgili çalışmalar verilmiştir. Bölüm 3 makalede önerilen yaklaşımı detayları ile ortaya koymaktadır. Bölüm 4'te önerilen yaklaşım bir örnek üzerinde doğrulanmış ve önerilen yaklaşımın avantajları tartışılmıştır. Sonuç bölümü ile makale tamamlanmıştır.

2. İlgili Çalışmalar

Bu çalışmada kullanılan OSÇ'lere ilişkin tanımlar [1] ve [8] den aynen alınmıştır:

Tanım 1: Bir olay sıra çizgesi (OSÇ) (V, E) bir yönlü çizgedir; öyle ki $V \neq \emptyset$ sonlu bir olaylar (ya da düğümler) kümesi ve $E \subseteq V \times V$ sonlu bir kenarlar kümesidir. Olay sıra çizgelerinde “[” ve “]” sözde olayları sırasıyla başlangıç ve bitiş olaylarını işaretlemek için kullanılır [1].

Şekil 2'de görüldüğü üzere klima kontrol ünitesi OSÇ “[” düğümü ile başlamakta ve “]” düğümü ile bitmektedir. Her düğüm bir olayı temsil etmektedir. Yönlü kenarları tanımlayan olay ikilileri (İng. event-pairs) içinde ikinci olay ilk olayı izler diye yorumlanır.

Tanım 2: Tanım 1’de verilen V, E kümeleri ve OSC için herhangi bir ardışık olay dizisi $\langle v_0, \dots, v_k \rangle_{i=0, \dots, k-1}$ için $(v_i, v_{i+1}) \in E$ ise sıralı olay dizisi olarak adlandırılır [8].

Sıralı olay dizisi; olay ikilileri, olay üçlüleri vb. testin kapsama gücünü ifade etmek için kullanılır. Şekil 2’de verilen OSC için $\langle \text{Press Power Button @ Off} / \text{Güç Düğmesine Bas @ Kapalı, Start Fan} / \text{Vantilatörü Başlat} \rangle$ bir olay ikilisi, $\langle \text{Press Power Button @ Off} / \text{Güç Düğmesine Bas @ Kapalı, Start Fan} / \text{Vantilatörü Başlat, Press Power Button @ Fan} / \text{Güç Düğmesine Bas @ Vantilatör} \rangle$ bir olay üçlüsü olarak örneklendirilebilir. Bu çalışmada sadece olay ikilileri kapsamı dikkate alınmıştır, ancak kolayca olay üçlüleri ve olay dördüleri şeklinde genişletilebilir.

Tanım 3: Tam ardışık olay dizisi (İng. Complete Event Sequence) ise, OSC’nin başlangıç olayı ile başlar ve bitiş olayı ile sona erer [8].

Böylece bir nesneyi yaşam döngüsünün başından sonuna kadar test etmek mümkün olmaktadır. Eğer bir test için bir OSC’deki tüm olay ikilileri kapsanmak isteniyorsa tüm tam ardışık olay dizileri çıkarılmalıdır. Bunun için Chinese Postman Problem çözümü kullanılır [9]. Chinese Postman Problem çözümünün hedefi bir çizge için minimum uzunlukta kenar kaplama turunu bulmaktır. Bunun için geliştirilen algoritma kısaca bir güçlü bağlantılı çizgenin kenarlarını kapsayan minimal bir tur belirler. Bir ESG’nin güçlü bağlantılı bir grafiğe dönüştürülmesi yöntemi de [9]’da açıklanmıştır. Tüm tam ardışık olay dizilerini çıkarmak üzere bir araç geliştirilmiştir. Detayları [4]’den elde edilebilir. OSC orijinal olarak kullanıcı arayüzü testi için kullanılmıştır. Yazılım kullanıcı arayüzlerindeki etkileşim olaylar ile kolaylıkla açıklanabildiği ve modellenilebildiği için bu alan OSC’ler yoğun olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada ise OSC’ler sınıf testi için kullanılmıştır. Kullanıcı arayüzlerine benzer bir şekilde metot çağrılarının olaylar şeklinde ifade edilebilmesi ve modellenilebilmesi OSC’leri sınıf testleri için kullanışlı kılmaktadır.

Sınıf testleri, metot (birim) testleri üzerine gerçekleştirilir. Metot testlerini oluşturma ve otomatikleştirme üzerine birçok çalışma sunulmuştur. Bunlardan biri sembolik test üretme yaklaşımıdır [10]. Bu çalışmada Giriş-Çıkış Sembolik Geçiş Sistemleri adı verilen, Giriş-Çıkış Otomatlarından [11] ve iletişim kuran ardışık süreçlerden [12] ilham alan bir genişletilmiş geçiş sistemi modeli kullanılarak test üretilmiştir. Benzer bir çalışmada Etiketli Geçiş Sistemleri’nin benzer şekilde test üretimi için kullanılabileceği gösterilmiştir [13].

NYP için durum temelli test çalışmaları 1970’lere kadar gitmektedir [14]. Bu çalışma her ne kadar metot bazlı birim testler için olsa da nesnenin durumu ile bağlantı kurulmuştur. Nesnenin durumunu dikkate alarak test üreten bir başka çalışmada test üretimi için yaklaşım ve araçlar ortaya konmuştur [15]. Sınıf testleri ile ilgili ilk çalışmalardan birinde UML Statechart kullanılarak durum temelli sınıf testleri üreten bir yöntem önerilmiştir [16]. Sınıf testleri ile ilgili en önemli çalışmalardan biri olan makalede, duruma bağlı bir davranış sergileyen sınıflar için iyi bilinen durum tabanlı test tekniklerinin maliyet etkinliği araştırılmıştır [6]. Bu makalede de nesne yönelimli programlama için sınıf test üretiminde sonlu durum makineleri kullanılması önerilmiştir.

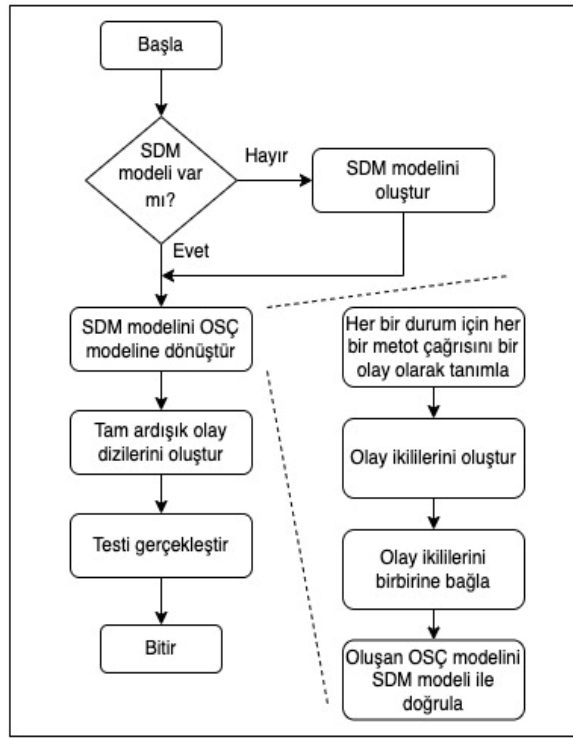
3. Olay Temelli Sınıf Test Üretimi için Bir Yaklaşım Önerisi

Çalışmada örnek olarak klima kontrol ünitesi sınıfı ve bu sınıftan üretilen nesne kullanılmıştır. Şekil 1’de de görüldüğü üzere klima kontrol ünitesi nesnesi üç durumdan birinde olacaktır: Kapalı (Off), Vantilatör (Fan) ve Klima (AC). Geçerli durum Kapalı ise ve güç düğmesine basılma olayı gerçekleşirse, vantilatör çalıştırılacak ve durum Vantilatör olarak değişecektir. SDM açısından bu şekilde ifade edilen iki durum arası geçiş Java sınıf kodunda güç düğmesine bas metodu ile gerçekleşmektedir. Formel model ile Java sınıf kodu arasındaki eşleme üretilen sınıfların durumlarının hızlıca ve kolayca çalıştırılması için önemli bir hale gelmektedir. Önerilen OSC temelli yaklaşım bunu sağlamaktadır. OSC içinde bulunan her düğüm klima kontrol ünitesi sınıfı içindeki bir metoda karşılık geldiği için klima

kontrol ünitesi nesnesinin yaşam döngüsünün olası akışları TSD aracı ile üretilebilmekte ve kolayca test koduna dönüştürülebilmektedir.

Geçerli durum Vantilatör ise ve güç düğmesine basılma olayı gerçekleşirse, vantilatör durdurulacak ve durum Kapalı olarak değişecektir. Geçerli durum Vantilatör ise ve klima düğmesine basılma olayı gerçekleşirse, yoğunlaştırıcı çalıştırılacak ve durum Klima olarak değişecektir. Geçerli durum Klima ise ve klima düğmesine basılma olayı gerçekleşirse, yoğunlaştırıcı durdurulacak ve durum Vantilatör olarak değişecektir. Geçerli durum Klima ise ve güç düğmesine basılma olayı gerçekleşirse, her şey kapatılacak ve durum Kapalı olarak değişecektir. Geçerli durum Kapalı ise ve klima düğmesine basılma olayı gerçekleşirse, her şey çalıştırılacak ve durum Klima olarak değişecektir.

Olay temelli sınıf test üretimi için SDM-OSÇ temelli yaklaşım Şekil 3'te verilmiştir. Yukarıda örnek üzerinde açıklanan yaklaşım burada bir akış diyagramı olarak verilmiştir. Eğer sınıf için bir SDM yok ise öncelikle bir SDM oluşturulur. Oluşturulan ya da var olan SDM, OSÇ'ne dönüştürülür. Bu dönüştürme işlemi, her bir durum için her bir metot çağrısını bir olay olarak tanımlayarak başlar. Ardından biri peşi sıra gelen olay ikilileri oluşturulur. Bu olay ikilileri olaylar tekrar etmeyecek şekilde birbirine bağlanarak OSÇ modeli elde edilir. OSÇ modeli SDM modeline bakılarak doğrulanır.



Şekil 3. Olay temelli sınıf test üretimi için SDM-OSÇ temelli yaklaşım

Çalışmada kullanılan klima kontrol ünitesi örneği tipik bir nesne yaşam döngüsünü temsil etmektedir. Bu makalede klima kontrol ünitesi nesnesine ait yaşam döngüsü hem çok iyi bilinen SDM ile hem de çalışmada ifade edilen kolay ve hızlı test koduna dönüştürme farkını ortaya çıkaran OSÇ ile modellenmiştir. Klima kontrol ünitesi gibi yaşam döngüsüne sahip nesnelerin Java sınıf kodunun sayılabilir sonlu liste (İng. enumeration) yaklaşımı ile kodlanması gerçekleştirilmiştir. Klima kontrol ünitesi Java sınıfı çekirdeğinde durumlar ve olaylar için birer sayılabilir sonlu listesi barındırmaktadır. Java, sayılabilir sonlu listelerin içinde işlev ve veri üyelerinin bulunmasına izin verir. Böylece her olay karşısında gerçekleştirilecek işlev ve değişecek veriler tanımlanmış olur. Klima kontrol ünitesi Java sınıfı çekirdeğini saran ve sınıf dışından çağrılara izin veren bir programlama arayüzü bulunmaktadır. Bu arayüz sayesinde klima kontrol ünitesi nesnesi hem kendi içinden hem de diğer nesnelere çağrılar alabilmektedir. Bu çağrılara ilişkin yetki denetimi “public” ve “private” tanımları ile sağlanmaktadır.

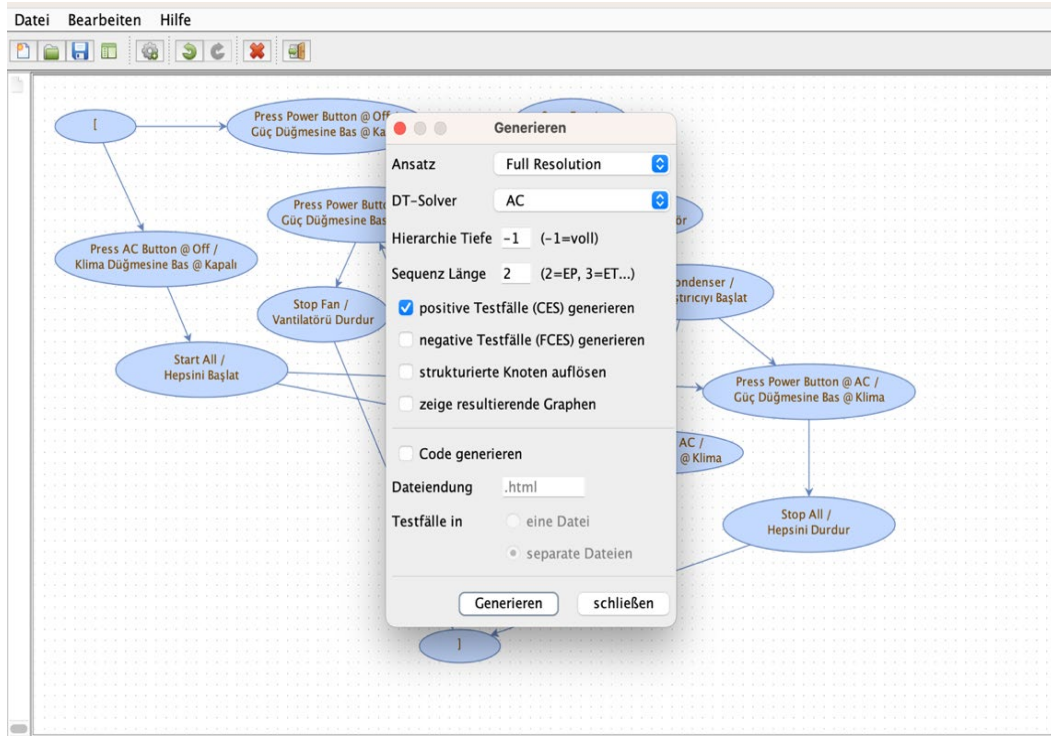
“Public” metotlar nesne dışından çağrılabilirken “private” metotlar sadece nesne içinden çağrılabilir.

Bu bölümde şu ana kadar anlatılan yöntem makalede önerilen yaklaşımın bir parçası olup yaşam döngüsü olan sınıfların kodlanması için bir şablon ortaya koymaktadır. Bu şablonun özelliği olay temelli sınıf testleri üretme yaklaşımı ile birlikte çalıştığında test sürecini hızlandırması ve kolaylaştırmasının ötesinde bir hata bulunduğunda söz konusu hatanın hızlıca giderilmesini sağlıyor olmasıdır. Olay temelli sınamaya durumu üretimin ana avantajlarından birinin kahin problemini çözmesi olduğu yukarıda ifade edilmişti. Olay temelli sınamada kahin şöyle çalışmaktadır. OSÇ ile ortaya çıkarılan tam ardışık olay dizileri hem girdi olaylarını (örneğin, güç düğmesine basılması) hem çıktı olaylarını (örneğin, fanın başlatılması) içerdiği için bir girdi olayı sonucunda takip eden çıktı olayı gerçekleşmez ise bu hataya işaret eder. Böylece hatanın hangi noktada ortaya çıktığı da bilindiği için hata bulunma, giderme ve tekrar test etme işlemleri hızlıca gerçekleştirilebilir.

Bu çalışmada OSÇ düğümü içine durum bilgisini @ etiketi ile katarak yeni bir çözüm üretilmiştir. Bu yaklaşımın amacı doğru olay sıraları elde edilmesidir. Söz konusu @ etiketi sayesinde SDM'den OSÇ'ne çevirim işlemi de daha kolay olmaktadır. Bu makalede önerilen yaklaşımın bir diğer avantajı ise OSÇ'lerde sadece olaylar olduğu için OSÇ'ler ile olay patikalarının daha iyi gözlenmesidir. Bir nesnenin işleyişi de metot çağrıları sayesinde gerçekleştiği için ve her metot da bir olay olarak modellenebildiği için olay temelli model ile kod arasında net ve kolay bir eşleme sağlanmaktadır. Bunun bir örneği takip eden bölümde verilmiştir.

4. Değerlendirme

Bu makalede önerilen yaklaşımın doğrulaması (İng. validation) için yaklaşımın üzerinden anlatıldığı örnek olan klima kontrol ünitesi kullanılmıştır. Değerlendirme noktasında yukarıda ifade edilen şekilde klima kontrol ünitesi için OSÇ'nin ve Java sınıf kodunun hazır olduğu kabul edilmiştir. Ardından TSD aracı ile Şekil 4'te görüldüğü gibi olay ikilileri için tam ardışık olay dizileri otomatik olarak oluşturulmuştur.



Şekil 4. TSD aracı ile olay ikilileri için tam ardışık olay dizileri üretilmesi

TSD aracı tarafından üretilen 14 düğüm ve 18 yönlü kenar içeren klima kontrol ünitesi OSC için olay ikilileri için üretilen dört tam ardışık olay dizileri şöyle listelenebilir:

4: [, Press Power Button @ Off / Güç Düğmesine Bas @ Kapalı, Start Fan / Vantilatörü Başlat, Press Power Button @ Fan / Güç Düğmesine Bas @ Vantilatör, Stop Fan / Vantilatörü Durdur,],

6: [, Press AC Button @ Off / Klima Düğmesine Bas @ Kapalı, Start All / Hepsini Başlat, Press AC Button @ AC / Klima Düğmesine Bas @ Klima, Stop Condenser / Yoğunlaştırıcıyı Durdur, Press Power Button @ Fan / Güç Düğmesine Bas @ Vantilatör, Stop Fan / Vantilatörü Durdur,],

4: [, Press AC Button @ Off / Klima Düğmesine Bas @ Kapalı, Start All / Hepsini Başlat, Press Power Button @ AC / Güç Düğmesine Bas @ Klima, Stop All / Hepsini Durdur,],

10: [, Press Power Button @ Off / Güç Düğmesine Bas @ Kapalı, Start Fan / Vantilatörü Başlat, Press AC Button @ Fan / Klima Düğmesine Bas @ Vantilatör, Start Condenser / Yoğunlaştırıcıyı Başlat, Press AC Button @ AC / Klima Düğmesine Bas @ Klima, Stop Condenser / Yoğunlaştırıcıyı Durdur, Press AC Button @ Fan / Klima Düğmesine Bas @ Vantilatör, Start Condenser / Yoğunlaştırıcıyı Başlat, Press Power Button @ AC / Güç Düğmesine Bas @ Klima, Stop All / Hepsini Durdur,],

Formel ve teorik yaklaşımın avantajı burada görülmektedir. Toplam olay sayısı asgariye indirilecek şekilde tüm olay ikililerini kapsayacak tam ardışık olay dizileri otomatik olarak üretilmektedir. Kişiler test üretme sürecinden soyutlandığı için hata olasılığı olmayacak derecede azaltılmakta ve çok hızlı testler üretilmektedir. Yukarıda listelenen tam ardışık olay dizileri milisaniye düzeyinde oluşturulmaktadır. Ayrıca, toplam olay sayısı asgariye indirildiği için test süreci de kısalmaktadır. Bu avantajları açısından OSC'lerin sınıf testi için kullanılması önerilmektedir.

Dört uzunluğundaki ilk sınıma ardışık durumu için test kodu aşağıdaki örnekte görüldüğü gibi hızlıca üretilebilir ve bir test sınıfı içinde çalıştırılabilir:

```
pressPowerButton(state.Off);
checkStartFan();
pressPowerButton(state.Fan);
checkStopFan();
```

Burada dikkat edilmesi gereken iki konu vardır. Birincisi, klima kontrol ünitesi Java sınıfında argüman almayan pressPowerButton() metodu bulunmakla beraber durumu (örneğin, state.Off) argüman olarak alan bir pressPowerButton() metodu bulunmamasıdır. Bu nedenle argüman almayan pressPowerButton() metodunu saran durumu argüman olarak alan bir pressPowerButton() metodu ayrıca kodlanmalıdır. Saran metot, argüman olarak gelen durumu klima kontrol ünitesi nesnesinin durumu ile kontrol etmeli ve gelen durum ile geçerli durum aynı değil ise istisna (İng. exception) vererek çıkmalıdır. Böylece bir sorun ya da hata olduğu anlaşılacaktır. İkinci konu ise, vantilatörün çalıştırılması bir çıktı olayı olduğu için bu olayı gözleyecek "public" bir metot oluşturulması gereklidir. NYP için önemli bir özellik olan "private" metotların nesne dışından çağrılmasının mümkün olmadığını yukarıda belirtmiştik. Oysa test sınıfının oluşturduğu test nesnesi sınanan nesnenin dışında bir nesne olduğu için "private" metotları çağırılmayacaktır. Bu nedenle gözlem metotlarının "public" olarak sadece test amaçlı olsa bile hazırlanması önemlidir. Bu gözlem metotlarının gözlem beklendiği gibi ise sadece dönmesi yeterli iken gözlem beklendiği gibi değil ise istisna vererek sonlanması gereklidir. Böylece bir sorun ya da hata olduğu anlaşılacaktır.

Metot (birim) testinde olduğu gibi test edilen metodu izole etmek için ekstra kod yazılması gerektiği gibi sınıf testi için de yukarıda açıklandığı şekilde ekstra kod yazılması gerekmektedir. Her ne kadar bu kodların şablonu sabit ve içindeki kodlar basit de olsa zaman alacaktır. Bu zaman kaybını asgariye indirmek için kod üreteçleri kullanılabilir. Söz konusu kod üreteçlerinin verimli olması için yazılımın yukarıda belirtilen şablonlar kullanılarak geliştirilmesi gereklidir.

Bu makalede önerilen yaklaşım ile ilgili dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise her sınıf için bu yaklaşımın çalışmayabileceğidir. Makalenin başında ifade edildiği gibi bu yaklaşım bir yaşam döngüsü olan nesnelere içindir. Ancak NYP'da, örneğin görevi sadece veri tutmak olan veri nesnelere de bulunmaktadır. Bu tür nesnelere için bu çalışmada önerilen yaklaşım geçerli değildir.

5. Sonuçlar

Nesneye yönelik programlamada, yaşam döngüleri olan nesnelere tanımlayan sınıfların test edilmesi gerekir. Metot testlerinde hiçbir hata bulunmadığında çalıştırılması gereken sınıf testleri, hiyerarşik olarak metot testlerinin üstündedir. Metot testleri, bir metodu girdi olarak ne aldığı ve çıktı olarak ne verdiği açısından değerlendirilerek metodun beklendiği gibi çalışıp çalışmadığını doğrular. Öte yandan sınıf testleri, bir sınıfın geçerli bir durumda kalmasını ve farklı yöntemler çağrıldığında bile beklendiği gibi tepki vermesini doğrular. Sınıf testleri önemlidir çünkü kendisine ait metotların doğru çalışması sınıfın doğru çalıştığı anlamına gelmez. Bu çalışmada yaşam döngüsü olan nesnelere temsil eden sınıflar için olaylara dayalı bir test yöntemi önerilmektedir. Bu öneride Olay Sıra Çizgilerinden (OSÇ) yararlanılmıştır. OSÇ'ler, Sonlu Durum Makinelerinden (SDM) oluşturulabilen yönlü çizgilerdir ve SDM'lerin aksine, doğrudan çizge teorisi yöntemlerini kullanabilmektedir. Bu faydanın yanı sıra bu çalışmada önerilen şablonların kodlama için kullanılması durumunda OSÇ'ler ile sınıf metotlarının eşleştirilmesi kolay ve hızlı olacaktır. OSÇ'lerden otomatik olarak ve hızlı test üretebilen bir araç olması sayesinde bu çalışma hemen kullanılabilir. Önerilen yöntemi doğrulamak için karmaşık bir yaşam döngüsüne sahip bir klima kontrol ünitesi sınıfı kullanılmıştır.

Gelecek çalışma olarak iki yön belirlenmiştir. İlk olarak önerilen yaklaşımın mutasyon analizi ile değerlendirilmesi yapılacaktır. Metotlar mutasyona uğrıtılacak ve sınıf testlerinin bunları yakalama özelliği araştırılacaktır. İkinci yön olarak, sınıf testi için önerilen yaklaşım bileşen (İng. component) testi için uyarlanacaktır. Bu uyarılma sırasında bileşeni oluşturan sınıfların testlerinin bileşen testi için tekrar kullanımı değerlendirilecektir.

Kaynaklar

- [1] Wagner F, Schmuki R, Wagner T, Wolstenholme P. Modeling software with finite state machines: a practical approach. CRC Press, 2006.
- [2] Belli F. Finite state testing and analysis of graphical user interfaces. Proceedings 12th International Symposium on Software Reliability Engineering, Nov. 2001; 34–43.
- [3] Myhill J. Finite automata and the representation of events. WADD Technical Report 57. 1957: 112–137.
- [4] Belli F, Linschulte M, Tuğlular T. Karar tablosu destekli olay sıra çizgeleri temelli sınama durum üretim aracı. 10th Turkish National Software Engineering Symposium (UYMS 2016). CEUR Workshop Proceedings, 2016.
- [5] Holland IM, Lieberherr KJ. Object-oriented design. ACM Computing Surveys (CSUR). 1996; 28(1): 273-275.
- [6] Briand LC, Di Penta M, Labiche Y. Assessing and improving state-based class testing: A series of experiments. IEEE Transactions on Software engineering 2004; 30(11): 770-783.
- [7] Ali J. Using Java Enums to implement concurrent-hierarchical state machines. Journal of Software Engineering. 2010; 4(3): 215-30.
- [8] Belli F, Budnik CJ. Minimal Spanning Set for Coverage Testing of Interactive Systems. Theoretical Aspects of Computing - ICTAC 2004, Guiyang, China, 2004; 220–234.
- [9] Belli F, Budnik CJ. Test minimization for human-computer interaction. Applied Intelligence 2007; 26: 161-174.
- [10] Rusu V, Du Bousquet L, Jéron T. An approach to symbolic test generation. Proceedings of Integrated Formal Methods: Second International Conference (IFM 2000) Germany, Nov. 1–3, 2000; 338-357.
- [11] Lynch N, Tuttle M. An introduction to input/output automata. CWI Quarterly 1999; 3(2).
- [12] Hoare CAR. Communicating sequential processes. Prentice Hall International Series in Computer Science, 1985.

- [13] Frantzen L, Tretmans J, Willemsse TA. A symbolic framework for model-based testing. Proceedings of International Workshop on Formal Approaches to Software Testing, Aug 15, 2006; 40-54.
- [14] Reed HG, Turner CD, Aibel JB, Dalton JT. Practical object-oriented state-based unit testing. WIT Transactions on Information and Communication Technologies, 1970; 9.
- [15] Turner CD, Robson DJ. The state-based testing of object-oriented programs. Proceedings of IEEE Conference on Software Maintenance, Sep 27, 1993; 302-310.
- [16] Tsai BY, Stobart S, Parrington N. A Method for Automatic Class Testing (MACT) Object-Oriented Programs Using A State-based Testing Method. Proceedings of 5th European Conference Software Testing Analysis & Review, EuroSTAR, Nov. 1997; 403-415.