



Institute of Pure and Applied Sciences

International Journal of Advances  
in Engineering and Pure Sciences

# MARMARA JEPS



**In the name of Rectorate of Marmara University, Rector**  
Prof. Dr. Mustafa KURT

**In the name of Directory of Institute of Pure and Applied Sciences, Director**  
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

**Editor-in-Chief**  
Asst. Prof. Dr. Merve ER

**Associate Editors**  
Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

### Editorial Boards

Dr. Aris Quantana NEDELCOŞ,  
Materials Science

Asst. Prof. Dr. Berçem KIRAN YILDIRIM,  
Chemical Engineering

Asst. Prof. Dr. Beste TURANLI,  
Bioengineering

Prof. Dr. İsmail USTA,  
Textile Engineering

Prof. Dr. Kazım Yalçın ARĞA,  
Bioengineering, Bioinformatics

Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU  
Physics

Dr. Mohammad ALSUNAIDI,  
Electrical and Electronics Engineering

Prof. Dr. Mustafa ATMACA,  
Mechanical Engineering-Energy

Assoc. Prof. Dr. ESRA ERKEN  
Environmental Engineering

Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR,  
Mechanical Engineering- System Dynamics and Mechanics

Assoc. Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,  
Mathematics

Assoc. Prof. Dr. Ömer KORÇAK,  
Computer Science and Engineering

Assoc. Prof. Dr. Pınar ÇAĞLAYAN,  
Biology

Asst. Prof. Dr. Rosa Maria FLORES,  
Environmental Engineering

Dr. Sergey V. DOROZHKIN,  
Bio-Materials (Ceramics)

Prof. Dr. Uğur YAHŞI,  
Physics

Prof. Dr. Yahya BOZKURT,  
Material Sciences

Assoc. Prof. Dr. Yeşim GÜRTUĞ,  
Architectural and Civil Engineering

**Publishing Editor**  
Oğuz Eren SÜSLÜ

#### Correspondance and Communication

**Merve ER**  
Industrial Engineering, Faculty of  
Engineering, M5-233 Maltepe  
/ISTANBUL

Tel: +90 216 777 0 777  
[merve.er@marmara.edu.tr](mailto:merve.er@marmara.edu.tr)

#### Publisher

Marmara University Press  
Göztepe Kampusu 34722  
Kadıkoy/ISTANBUL

Tel: +90 216 777 1408  
[yayinevi@marmara.edu.tr](mailto:yayinevi@marmara.edu.tr)

**Marmara Üniversitesi Rektörlüğü adına, *Rektör***  
Prof. Dr. Mustafa KURT

**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü adına, *Müdür***  
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

**Editör**

Dr. Öğr. Üyesi Merve ER

**Yardımcı Editörler**

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

**Editörler Kurulu**

Dr. Aris Quantana NEDELCO,  
Malzeme Bilimleri

Dr. Öğretim Üyesi Berçem KIRAN YILDIRIM,  
Kimya Mühendisliği

Dr. Öğretim Üyesi Beste TURANLI,  
Biyomühendislik

Prof. Dr. İsmail USTA,  
Tekstil Mühendisliği

Prof. Dr. Kazım Yalçın ARĞA,  
Biyomühendislik, Biyoinformatik

Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU  
Fizik

Dr. Mohammad ALSUNAIDI,  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Prof. Dr. Mustafa ATMACA,  
Makine Mühendisliği- Enerji

Doç. Dr. ESRA ERKEN  
Environmental Engineering

Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR,  
Makine Mühendisliği- Sistem Dinamiği ve Mekanığı

Doç. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,  
Matematik

Doç. Dr. Ömer KORÇAK,  
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği

Doç. Dr. Pınar ÇAĞLAYAN,  
Biyoloji

Dr. Öğretim Üyesi Rosa Maria FLORES,  
Çevre Mühendisliği

Dr. Sergey V.DOROZHKIN,  
Biyomalzemeler (Seramikler)

Prof. Dr. Uğur YAHŞI,  
Fizik

Prof. Dr. Yahya BOZKURT,  
Malzeme Bilimleri

Doç. Dr. Yeşim GÜRTUĞ,  
Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği

**Yayın Editörü**  
Oğuz Eren SÜSLÜ

**Yazışmalar ve İletişim**

**Merve ER**  
Endüstri Mühendisliği,  
Mühendislik Fakültesi, M5-  
233 Maltepe /İSTANBUL  
Tel: +90 216 777 0 777  
[merve.er@marmara.edu.tr](mailto:merve.er@marmara.edu.tr)

**Yayıncı**

Marmara Üniversitesi Yayınevi  
Göztepe Kampusu 34722  
Kadıköy/İSTANBUL  
Tel: +90 216 777 1408  
[yayinevi@marmara.edu.tr](mailto:yayinevi@marmara.edu.tr)

## İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

### Araştırma Makaleleri/ Research Articles

1. Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımlı Helisel Yay Dizaynı: Vaka Çalışması

**Mehmet Akif KARTAL, Ahmet FEYZİOĞLU**

Sayfa/Page: 1 - 10

2. Savaş Uçağı Geliştirme Projesinde Test ve Üretim Aktivitelerine Bağlı Proje Süresi Tahmini

**Ahmet Atıl ÇETİN, Esra DİNLER**

Sayfa/Page: 11 - 22

3. Determination of Subcontractor Selection Criteria from the View of Occupational Health and Safety in the Construction Industry

**Sefa ÇEKÜÇ, Gürkan Emre GÜRCANLI, Fırat Doğı AKIN, Özge AKBOĞA KALE**

Sayfa/Page: 23 - 32

4. Electrothermal Simulation of the Production of Alumina by Spark Plasma Sintering

**Mustafa Guven GOK**

Sayfa/Page : 33 - 38

5. Exploiting Eye Colors for Better Iris Segmentation in Visible Wavelength Environments

**Shaaban SAHMOUD**

Sayfa/Page : 39 - 49

6. Effects of Thermo-Mechanical Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of  $\beta$ -Type Titanium Alloys

**Hakan YILMAZER, Muhammed Enes İLGAZİ**

Sayfa/Page : 50 - 58

7. A Complete LTspice Simulation Model for SAW Devices

**Alper ŞİŞMAN**

Sayfa/Page : 59 - 69

8. 2024 Alüminyum Alaşımının Dövülmesinde Ortaya Çıkan Katlanma Hatasının İyileştirilmesi İçin Tasarım Geliştirilmesi ve Simülasyonu

**Ali SAMANCI, Hakan COŞKUN, Gökhan ATAY**

Sayfa/Page : 70 - 78



## İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

### Araştırma Makaleleri/ Research Articles

9. Mikroyapı Gelişiminin Temellerini Gerçek Zamanlı Olarak İncelemek için Mikroskop ve Katılaştırma Ekipmanı Tasarımı

**Melis ŞEREFÖĞLU**

Sayfa/Page : 79 – 92

10. Optimization of a Mission-Based Flight Priority System

**Emine YAYLALI, Feride Şüheda YILDIZ, Sena KOÇAK**

Sayfa/Page : 93 – 102

### Derleme Makaleleri/ Review Articles

11. Atıklardan Grafen ve Türevlerinin Sentezlenmesi Üzerine Bir Değerlendirme

**Mahmut ÖZTÜRK, Aysun ÖZKAN, Zerrin GÜNKAYA, Müfide BANAR**

Sayfa/Page : 103 – 115

## Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımli Helisel Yay Dizaynı: Vaka Çalışması

### *Helical Spring Design with Axiomatic Design Approach: Case Study*

Mehmet Akif KARTAL<sup>1</sup> , Ahmet FEYZİOĞLU<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi

10200 Bandırma, Balıkesir

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Üretim Planlama ve Kontrol Bölümü 34722

Kadıköy, İstanbul

#### Öz

Aksiyomatik Tasarım yaklaşımı, farklı nesnelere vaka çalışması yapılarak gerçekleştirilmektedir. Bu vaka çalışmasında ki gerçekleştirilen ana hedef; tasarım aşamasında göz önüne alınan dayanımı da hesaba katarak yaydaki kütleyi ve üzerinde oluşan kesme gerilmelerini en aza indirmektedir. Bu yay problemi; Aksiyomatik Tasarım metodolojisinin bağımsızlık aksiyomu kullanılarak incelenmektedir. Ayrıca, semangularity (anlamsallık) ve reangularity (doğrusallık) kavramları kullanılmaktadır. Bu kavramlarla birleşik ve ayrışık çözümleri bulmak amacıyla tasarım matrisleri oluşturuldu. Aksiyomatik tasarımda bir takım kabul edilebilir tasarım parametreleri değerleri gözlemlenmiştir. Bu parametreler uygun toleranslar verilerek kabul edilmiştir. Grafikselleştirilmiş sonuçların birbiriyle uyumlu olup olmadığını görmek amacıyla kontrol edilmiştir. Sonuç olarak; tasarım için kabul edilebilir özellikli, minimum maliyetli, dayanıklı ve sağlam bir yay tasarımı gerçekleştirilerek farklı sınır değerlerindeki değişimler irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aksiyomatik Tasarım, Mekanik Yay, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

#### Abstract

The Axiomatic Design approach was carried out by making case studies with different objects. The main goal achieved in this case study is; to minimize the mass in the spring and the shear stresses that occur on it, taking into account the strength considered along the design phase. This spring problem; is examined using the independence axiom of the Axiomatic Design methodology. In addition, the concepts of semangularity and reangularity were used. Design matrices were created to find unified and separate solutions for these concepts. Some acceptable values of design parameters were observed in the decoupled design. These parameters have been accepted by giving appropriate tolerances. Graphical and numerical results were checked to see if they were compatible with each other. In conclusion; For the design, the changes in different limit values were examined with performing an acceptable, minimum cost, durable and robust spring design.

**Keywords:** Axiomatic Design, Mechanical Spring, Multi-criteria Decision Making Methods

## I. GİRİŞ

Günümüzde üretim sektöründe yer alan firmalar ürün tasarımı aşamasında birçok hedeflerin karşılanmasını gereklilik olarak görmektedir. Birçok çok amaçlı yaklaşımlar bu nedenle kullanılmaktadır ve aktif bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Ürün tasarımı esnasında, yeni metotlar karar verme sürecinde yardımcı olmak için geliştirilmiştir. Suh'un Aksiyomatik Tasarım modeli en çok kabul görenlerindedir. Ayrıca ürün tasarımı esnasında, dayanımın tasarım hesaplarına dahil edilmesi ideal bir çözüm olarak kabul edilir. Bu kabullenmelere karşın birçok girişim, ürünün sağlamlığını arttırmakla beraber ürün geliştirme ve test aşamalarını da etkileyerek pozitif katkılarda bulunmaktadır. Tasarımcılar tarafından parçaların tasarımı gerçekleştirilirken; bütün boyutlara tolerans değerleri atanmalı ve buna ek olarak bütün girdi ve çıktılarının değişkenlikleri dikkate alınmalıdır. Atanan toleranslar, en azından istatistiksel açıdan sistemin girdilerinin varyasyonlarına rağmen beklenen sonuçlara yönelik

çalışmaları sağlamak zorundadır. Genellikle tolerans değerlerinin atamasını sağlayan tasarım mühendisleri ile üretimin kontrolünü sağlayan üretim mühendisleri arasında tolerans kaynaklı bir tür çatışmalar gerçekleşmektedir. Bu çatışmanın çözümü ancak tasarım mühendislerinin atanacak toleransları optimizasyon probleminde kullanmasıyla bulunabilmektedir. Üretim toleranslarına bağlı kalınarak, diğer toleranslarda esneklikler sağlanabilmektedir. Böylelikle sistemin çıktısını nasıl etkilediği anlaşılabilir.

Bu çalışmada, tasarım aşamasında matematiksel modellemenin sağlamlık ve dayanıma entegrasyonu ile birlikte bir yay tasarımı problemi çözülecektir. Bu problem çözümünde Aksiyomatik Tasarım yaklaşımı yeni belirlenen çoklu hedefler ile tamamlayıcı bir şekilde formüle edilecektir.

### 1.1. Literatür Araştırması

Aksiyomatik Tasarım; 20. Yüzyılın son çeyreğinde ilk zamanlarda ürün tasarımına yönelik gelişmelerle ilgili olarak ortaya atılmıştır. Ürünlerin yanı sıra sistemi, organizasyonları, imalat, esnek üretim sistemlerini, hücreli üretim ve ergonomi gibi birçok alana etki etmiştir ve çalışmalar yapılmaya başlamıştır [1]. Cochran ve Reynal; imalat sistemlerinin tasarımlarını gerçekleştirmek amacıyla Aksiyomatik Tasarım kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada Aksiyomatik Tasarım iki farklı işlevsel gereksinim, farklı üretim sistemleri için performans analizini gerçekleştirmek amacıyla kullanılmıştır [2]. Suh ve arkadaşları; endüstriyel anlamda müşteri talepleri sonucunda alternatif bir üretim sisteminin tasarımını Aksiyomatik Tasarım (AD) metodu kullanılarak gerçekleştirmişler [3]. Babic; Suh' un geliştirdiği Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla Flexible Manufacturing System (FSM-Esnek İmalat Sistemi-EİS) tasarımı amacıyla geliştirilen bir zekâ sistemini (FLEXY) içeren çalışmalar gerçekleştirmişler [4]. Bröte ve diğerleri hücreli üretim çalışmalarında Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlar [5]. Cochran ve arkadaşları; üretim konusunda organizasyon yapısında yalın yönetim ve değişim yönetimi prensiplerini kullanarak Aksiyomatik Tasarım metodu yöntemi ile oldukça faydalı bir üretim sistemi tasarımı hedeflemiştir. Gerçekleştirilen çalışmada üretim sistemi küçük, hareket kabiliyeti yüksek ve tek merkezden yönetilme gereksinimi duyulmayan üretim sistemlerine dönüştürülebilen bir çalışma ortaya koymuşlardır [6]. Chen ve diğerleri; hücreli üretim performansını iyileştirmek adına bir tür simülasyon aracılığı ile Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla bir tür karar destek sistemi geliştirmişler [7]. Werneman ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığıyla operasyonel gelişim prototipi geliştirmişler [8]. Cha ve Moon; AD metodu aracılığıyla hava değişim-dağıtım sistemi tasarlamışlardır [9]. Engelhardt; sistem ve ürün geliştirilmesi hususunda Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlar [10].

Suh; Aksiyomatik Tasarım amaç ve uygulamaları içerisinde tasarımı gerçekleştiren kişilere mantıksal ve teoriksel fikir verme süreçleri sunmuştur. Yapılan çalışmada tasarım hususunda gerçekleştirilen çalışmalara bilimsel anlamda bir yapı taşı olmuştur [11]. Cotoia ve Johnson; gerçekleştirdiği araştırmada sistemlerin belirli bölgelerinde problem oluşturan bir prosesi incelemiş ve prosesi AD metodu prensiplerinden faydalanarak çözmeye çalışmışlardır [12]. Baxter ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım metodu kuralları aracılığı ile tedarik zincirinin birçok parçalarının ekonomik değerlerinin ve ulaştırılma süreçlerinin analizlerinin yorumlanmasını gerçekleştirmişler [13]. Housmand ve Jamshidnezhad; Yalın Üretim Sisteminin kavramsal tasarımı ile ilgili yaptığı çalışmada Aksiyomatik Tasarım metodunu kullanmıştır [14]. Hwang ve diğerleri; AD yönteminin fonksiyonel ihtiyaçlarını karşılaştırılarak bu ihtiyaç kriterlerinin bağımsızlığının, tasarım kalitesinin etkilerinin belirlenmesine yönelik önem kriterlerinin belirlenmesini incelemiş ve çalışmalar yürütmüştür [15].

Kim; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile üretim sistemlerinin tasarımı ve ürün tasarımının geliştirilmesini amaçlamıştır. Yapılan çalışmada yeni ürün gelişimi prosesinde tasarımı olumsuz etkileyen problemleri tasarımın iyileştirilmesi adına belirlemeye çalışmış, bu problemleri en aza indirmek ve oluşabilecek sorunları çözmeyi hedeflemiştir [16]. Durmuşoğlu ve Kulak; hücreli üretim tasarımı için aksiyomatik tasarım yönteminden faydalanmış ve bu alanda geliştirmeleri içeren bir rehber sistem ortaya çıkarmışlardır [17].

Pappalardo ve Naddeo; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile hata etkileri analizi hususunda çalışmalar gerçekleştirmişler [18]. Yaşar ve diğerleri; Bilgi Yönetimi konusunda Aksiyomatik Tasarım metodunu kullanmış olup bilgi yönetim sistemi geliştirmişler [19]. Kulak ve diğerleri; hücreli üretim sistemi kurulumu için çok kapsamlı bir yol haritasını Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla gerçekleştirmişler [20]. Kabadurmuş ve Durmuşoğlu; yalın üretim sistemi türlerinden birisi olan kanban (çekme) üretim kontrol sisteminin tasarımı için Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlar [21]. Tarcan; bir grup dizüstü bilgisayar sistemi oluşturmuş ve seçimini gerçekleştirmek adına Aksiyomatik Tasarımın Bilgi Aksiyomunu kullanmıştır [22].

Thielman ve Ge; mühendislik sistemlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi konusunda Aksiyomatik Tasarım metodunu uygulamışlardır [23]. Birgün; yalın üretime geçiş aşamalarında değer akışını haritalandırmak adına AD metodundan faydalanmıştır. Yapılan çalışmada endüstriyel fayda sağlayan firmalara üretimin daha verimli ve sistematik çalışmasını gerçekleştirecek bir rehber sistem oluşturmuştur [24]. Yılmaz; yaptığı çalışmada kent içi toplu taşıma

sisteminin tasarımının oluşturulmasında AD metodundan faydalanmıştır [25]. Özel ve Özyörük; beyaz eşya faaliyet gösteren firmalar için ısı rezistansı üretimi gerçekleştiren tedarikçiler arasından seçim yapmışlardır. Bu seçimi gerçekleştirmek adına analitik hiyerarşi prosesi ve aksiyomatik tasarım metodundan faydalanmıştır [26]. Özyiğit; yaptığı çalışmada belirlenmiş değerler ışığında bir grup kontrol sistemi belirlemiş ve bunlar içerisinde en iyi kontrol sistemi seçimini ve tasarımını AD metodu kullanarak gerçekleştirmiştir [27].

Özel ve Özyörük; hiyerarşik tedarikçi firma seçimine yönelik yapılan çalışmada Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmış olup, bu seçimi gerçekleştirmek adına bilgi aksiyomunu kullanmışlardır. Yapılan çalışmada bir tür karar destek sistemi oluşturmuşlardır ve tedarikçiler arasında en az bilgi içeriğine sahip tedarikçi firmayı seçmeye yönelik bir sistem oluşturmuşlardır [28]. Gülen ve Birgün; Key-Value Store olarak adlandırılan veri depolama paradigması modeli için kurumsal bilgi sistemi alanında Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlardır [29]. Birgün ve Kulaklı; müşteri merkezli bilgi yönetimi oluşturmak adına Aksiyomatik Tasarım metodundan faydalanmışlardır [30].

Kanbur ve Birgün; yeni kariyere geçiş danışmanlığının geliştirilmesi adına bilimsel anlamda bir yapı taşı oluşturmak adına kavramsal bir modeli Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile incelemişlerdir [31]. Çebi ve diğerleri; bütünleşmiş bakım ve onarım sisteminde Aksiyomatik Tasarım metodunun Bilgi Aksiyomu aracılığıyla incelemişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada endüstriyel fayda sağlayan gemiler için daha geniş kapsamlı ve daha etkin bakım-onarım sistemi oluşturmuşlardır [32]. Urbanic ve diğerleri; tersine mühendislik yöntemiyle üretilmesi planlanan bir parçanın üretiminde Aksiyomatik Tasarım metodu kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada çoklu üretim için tasarım değişkenlerini belirleyen ve tasarımı iyileştiren, çok fonksiyonlu, sağlıklı, güvenilir, data devşirmek amacıyla oluşturulmuş bir sistem tasarımı geliştirilmişlerdir [33]. Çelik ve Er; Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla model seçim dizilimini gerçekleştirmişlerdir [34]. Çelik ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım ve bulanık TOPSIS sistemi vasıtasıyla deniz taşımacılığı şebekesinde rekabetçi ve yarışmacı sistem kurmayı hedeflemişlerdir [35]. Bang ve diğerleri; Aksiyomatik Tasarım metodu vasıtasıyla parça üretimi aşamasında kullanılan soğutma sıvılarının güçlendirilmesinde nanoakışkan materyal tasarımının yeniden oluşturulmasını gerçekleştirmişlerdir [36].

Özbek; Aksiyomatik Tasarım metodu aracılığı ile plastik enjeksiyon makinelerinin seçimini incelemiştir [37]. Yavuz; yaptığı çalışmada makine ekipman seçimine yönelik araştırmalarını Aksiyomatik Tasarım aracılığı ile tamamlamıştır [38]. Güngör; endüstride

oldukça geniş bir alana sahip olan sızdırmaz conta malzemesinin seçimine yönelik yaptığı çalışmada Aksiyomatik Tasarım metodundan yararlanmıştır [39]. Ulutürk ve diğerleri; savunma alanında yaptığı çalışmada yenilikçi ürün gelişimini Aksiyomatik Tasarım metoduna bağlı olarak incelemiş ve ürün geliştirme anlamında bir sistem tasarımı ortaya koymuştur [40].

Çözümlere göre kütle ve kayma gerilimi arasında bir denge vardır. Yayın kütlesi bobin sayısı arttıkça artar. Öte yandan kayma gerilmesi bobin sayısı arttıkça azalmaktadır. Kısıtlamaları karşılayan en iyi tasarım çözümü 9 bobinden oluşmaktadır. İki metodoloji N = 9'a göre karşılaştırıldığında, çok amaçlı aksiyomatik ve gürbüz tasarım çözümü, elde edilen tolerans aralığı ile daha optimal ve sağlam çözüm seti vermektedir. Gelecekteki iyileştirmeler için aksiyomatik tasarım yaklaşımına farklı metodolojiler entegre edilebilir. Bu sayede sistem gürültü faktörlerine karşı daha sağlam ve dayanıklı olacaktır.

## II. MATERYAL VE METOD

### 2.1. Metodoloji- Çoklu Hedef Tasarımı

Gerçek hayatta karşılaşılan mühendislik problemlerinde, çözümler nadiren tek bir amaca yöneliktir. Optimize edilmesi gereken birçok hedef mevcuttur. Bunlardan sadece birinin optimize edilmesi hedefin zayıflamasına yol açabilir [41]. Tüm hedeflerin karşılandığı bir çözüm elde edebilmek için farklı kriterleri göz önünde tutmak gerekir. Çok amaçlı tasarım yaklaşımı, her tasarım kriterine dayalı bir ölçütün atanmasını sağlar [42]. Mühendislik problemlerinde her çözüm bu şekilde değerlendirilir.

### 2.2. Aksiyomatik Tasarım

Aksiyomatik Tasarım; tasarımı yapan kişilerin kötü tasarımlarda meydana gelen problemlere odaklanmasını sağlamayı hedefleyen bir yöntemdir. Bu yöntemde asıl amaç; tasarımı gerçekleştirecek kişileri daha yaratıcı hale getirmek, yapılan araştırmaları daha verimli hale getirmek, yapılan deneme-yanılma oranlarını en aza çekmek, en iyi dizayna karar verebilmektir. Doğruluğu ispat edilmeyen veya ispat edilmeye gerek duyulmayan doğruluğu kabul edilen önermelere aksiyom ya da postulat denilmektedir. Aksiyomatik Tasarım metodunun kökeninde iki temel aksiyoma dayanmaktadır ve bu aksiyomlar bağımsızlık ve bilgi aksiyomu olarak bilinmektedir. Bağımsızlık aksiyomu fonksiyonel ve fiziksel alandaki karar verme sürecinde önem arz etmektedir. Bilgi aksiyomu ise üretimsel faaliyetlerde daha çok seçim amaçlı kullanılmaktadır. Bu tasarım yönteminde, müşteri ihtiyaçları fonksiyon gereksinimlerine çevrilir (Functional Requirements-FRs). Daha sonra her bu fonksiyon gereksinimlerine (FR) uygun bir tasarım parametresi (Design Parameter-DP) atanır [1]. Bu atama aksiyomatik tasarım yaklaşımının bağımsızlık aksiyomuna göre yapılır. Bağımsızlık aksiyomunda; tasarım parametrelerinin ve fonksiyonel

gereksinimlerinin, diğer fonksiyonel gereksinimleri etkilemeden karşılık gelen fonksiyonel gereksinimleri karşılamak için tasarım parametrelerinin ayarlanabileceği şekilde ilişkili olduğunu belirtmektedir. Zikzak çizmek; fonksiyon gereksinimlerini tasarım parametrelerine dönüştürmede sıralı bir şekilde kullanılan bir sistemdir. Burada fonksiyon hiyerarşileri kullanılır. Dönüşüm en yüksek kademeden en alt kademeye doğru ayrı ayrı ağaç fonksiyonunun her kademesinde yapılır. Tasarım parametreleri ve fonksiyonel gereksinimler arasındaki etki alanları arasındaki bu değişim herhangi bir karışıklık yaratmadan veya gereksiz öğeleri azaltarak gerçekleşir.

Bilgi aksiyomunda; en iyi tasarım ve en az bilgi içeriğine sahip bir işlevsel ayrışık tasarım olduğunu bildiren temel aksiyomlardan biridir. Asgari bilgi demek; üretim, dağıtım ve ürünle ilgili diğer işlemleri takip etmenin nispeten daha kolay olduğu anlamına gelmektedir. Buna ek olarak simetrisinin olması da bilgi içeriğini azaltabilmektedir. Bu yöntemde; matematiksel hesaplamalar en iyi tasarımı bulmak için yapılır. Bu hesaplamalar, yay örneğinde bir sonraki bölümlerde sunulacaktır.

### 2.3. Yay Tasarım Örneği

Aksiyomatik Tasarım yaklaşımında, probleme yönelik üç tasarım parametresi ile sıkıştırma yayı tasarlanacaktır. Probleme yönelik üç tasarım parametresi (DP); tel çapı (d), bobin çapı (D), ortalama ve aktif rulo (Na) sayısıdır. Burada 62.3 N çalışma yükü (P) altında 12.7 mm sapma ( $\delta_{max}$ ) ile 44.45 mm' lik serbest uzunluğu (Lf) olması gereken uygulamada bu yay kullanılması planlanmıştır. Tasarım gerilimi ( $\tau_d$ ) en az 896.31 MPa olmalıdır ve yayın katı uzunlukta izin verilen maksimum gerilimi ( $\tau_a$ ) de 1034.21 'den daha az olmamalıdır. Yay 15.24 mm çaplı (D) bir deliğe monte edilecek ve yay için aşırı gerilim dalgalarının ( $f_n$ ) sıklığı en az 100 Hertz (Hz) olması gerekmektedir. İnaktif bobin sayısı; Q 2' dir. Aynı zamanda, uygun rulo açıklık ve eğim açısının  $\alpha$  temin edilmesi istenir. Yukarıda belirtilen diğer şartları sağlayan, kütle ve işletim yükü altında kesilme baskısı en az olacak şekilde yay tasarlanmalıdır. Bu problemi formüle etmek için, aşağıda yer alan malzeme özellikleri, Goel ve Singh sabitlerine dayalı olarak kullanılmıştır [43]. Bunlar; kayma modülü G(80.85 GPa); kütle yoğunluğu  $\rho$ (7888.77 kg/m<sup>3</sup>); yerçekimi sabiti g(9.81 m/s<sup>2</sup>) ve özgül ağırlığı  $\gamma$  (77.389kN/m<sup>3</sup>) olarak atanmıştır.

İleride ki hesaplamalarda kullanılan ve Shigley 'den alınan yay formülleri [44]:

Yay İndeksi (C)

$$C = \frac{D}{d} \quad (1)$$

Eğim (p)

$$p = \frac{(L_f - 2d)}{N} \quad (2)$$

Kayma Modülü (G)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

Bobin Açıklığı (cc)

$$cc = \frac{(L_0 - L_s)}{N_a} \quad (4)$$

Yay Sabiti (k)

$$k = \frac{G d^4}{8D^3 N_a} \quad (5)$$

Maksimum Sapma ( $\delta_{max}$ )

$$\delta_{max} = L_f - L_s \quad (6)$$

Maksimum Yük ( $P_{max}$ )

$$P_{max} = k \cdot \delta_{max} \quad (7)$$

Kayma Gerilmesi ( $\tau_{max}$ )

$$\tau_{max} = \frac{8DP}{\pi d^3} \quad (8)$$

Wahl Düzeltme Faktörü ( $K_w$ )

$$K_w = \frac{4D - d}{4D - 4d} + \frac{0.615d}{D} \quad (9)$$

Düzeltilmiş Maksimum Kayma Gerilmesi ( $\tau_{max}'$ )

$$\tau_{max}' = K_w \tau_{max} \quad (10)$$

Yay Kütleli (M)

$$M = \frac{1}{4(N + Q)\pi^2 D d^2 \rho} \quad (11)$$

Doğal Frekans ( $f_n$ )

$$f_n = \frac{d}{2\pi D^2 N_a} \sqrt{\frac{G}{2\rho}} \quad (12)$$

Eğim Açısı ( $\alpha$ )

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{p}{\pi D} \right) \quad (13)$$

Son olarak; problem açıklamalarındaki kısıtlamalar:

$$\frac{8PD^3 N}{G d^4} = 12.7, \quad (14)$$

$$\frac{d}{2\pi D^2 N} \sqrt{\frac{G}{2\rho}} \geq 100 \quad (15)$$

$$\frac{L_0 - L_s}{N} \geq \frac{d}{10} \quad (16)$$

$$\frac{8PD}{\pi d^3} \left( \frac{(4D - d)}{(4D - 4d)} + \frac{0.651d}{D} \right) \leq 896.31 \text{ N/m}^2 \quad (17)$$

$$\frac{d G (L_f - dN)}{\pi D^3 N} \left( \frac{(4D - d)}{(4D - 4d)} + \frac{0.651d}{D} \right) \leq 1034.21 \quad (18)$$

$$\frac{(N + Q)\pi^2 D d^2 \rho}{4} \leq 385 \quad (19)$$

$$D + \left( \frac{11}{10} \right) d \leq 15.24 \text{ mm} \quad (20)$$

$$\frac{D}{d} \geq cc \quad (21)$$

N negatif tamsayı olduğunda. Buna ek olarak;

$$d > 1.27 \text{ mm} \quad (22)$$

$$2d < D < 25.4 \text{ mm} \quad (22)$$

Yukarıdaki kısıtlamalardan kaynaklı olarak; üç adet Fonksiyonel Gereksinimler (FRs) çizilir.

Bunlar: Kütle (M); Kayma Gerilmesi ( $\tau_{max}$ ) ve Sapma ( $\delta$ )'dır.

#### 2.4. Denklemlerin Türetilmesi

Bu bölüm içerisinde matematiksel modeller sunulacaktır. Bu modellerle Fonksiyonel Gereksinimlere (FRs) bağlı olarak kesme gerilmesi ve kitle denklemleri yanı sıra reangularity ve semangularity ilişkileri elde edilmiştir.

Yukarıda belirtilen üç adet fonksiyonel gereksinimlerden, iki tanesi oldukça önem arz etmektedir. Bunlardan ilki yay kütesidir. Yay kütesi maliyeti doğrudan etkileyen bir faktördür. İkinci olarak kayma gerilmesidir. Kayma gerilmesi herhangi bir kopmaya yol açacak olan bükülmeden kaynaklı olarak meydana gelebilmektedir. Yukarıda belirtilen sapma ise tolere edilebilmektedir.

Bu iki önemli Fonksiyonel Gereksinimler (FRs): Kütle (M) ve Kayma Gerilmesidir.

( $\tau_{max}$ );

$$M = \frac{1}{4N_T \pi^2 D d^2 \rho} \quad (23)$$

$$\tau'_{max} = \frac{8PD}{\pi d^3} \left( \frac{(4D-d)}{(4D-4d)} + \frac{0.651d}{D} \right) \quad (24)$$

Bu iki fonksiyonel gereksinimler için, iki adet Tasarım Parametresi ( $DP_1$ ) ve  $DP_2$  seçildi.

Bunlar; Bobin Çapı (D) ve Tel Çapı (d) 'dır.

$$DP_1 = D \quad (25)$$

$$DP_2 = d \quad (26)$$

Aksiomatik denklem olarak;

$$\begin{Bmatrix} M' \\ \tau'_{max} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (27)$$

Yukarıda yer alan denklemde sol taraf; boyutsuz formda fonksiyonel gereksinimleri belirtir. "x" ve "y" sırasıyla kablo çapı ve sargı çapının boyutsuz formlarıdır.

Denklemin sağ tarafında yer alan 2x1 matrisi, boyutsuz formda tasarım parametrelerini belirtir.

Denklemden yer alan 2x2 matrisi ise tasarım matrisidir, A; Lineer olmayan fonksiyonel gereksinimler ve tasarım parametreleri olarak yer alır. A matrisinin Aij elemanları olarak ifade edilebilir;

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (28)$$

Bu A matrisinin elemanlarını;

$$A_{11} = y^2 z \quad (29)$$

$$A_{12} = 2xyz \quad (30)$$

$$A_{21} = \frac{K'_w(X,Y)}{y^3} \quad (31)$$

$$A_{22} = -3x \frac{K'_w(X,Y)}{y^4} \quad (32)$$

Bu bağıntılara ek olarak tasarım parametreleri (DP) ve fonksiyonel gereksinimler (FRs) arasındaki ilişkinin boyutsuz formları şu şekilde hesaplanabilmektedir:

$$M' = xy^2 \quad (33)$$

$$\tau'_{max} = \frac{x}{y^3} K_w(X,Y) \quad (34)$$

Denklemlerde yer alan "x" ve "y" değerleri atanmasının amacı; A tasarım matrisinin bir diagonal (uncoupled) ya da üst veya alt üçgen (deuncoupled) matrisine indirgenmesidir [45].

Problemde optimum çözüm bulma konusunda yardımcı olmak için, fonksiyonel parametrelerin bağımsızlığını kuantize edebilmek için iki temel kavram yer almaktadır. Bu kavramlar reangularity ve semangularity olarak adlandırılır. Reangularity, R, aşağıda yer alan denklem aracılığı ile elde edilir [1].

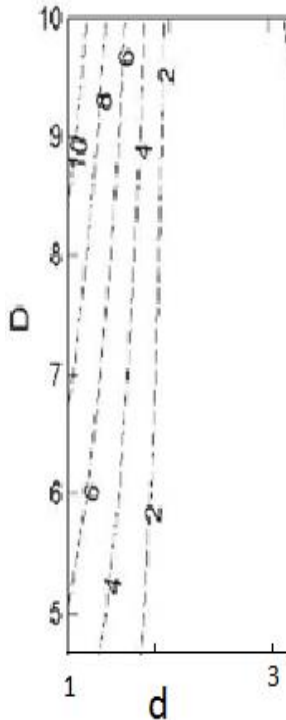
$$R = \left[ 1 - \frac{(A_{11}A_{12} + A_{21}A_{22})^2}{(A_{11}^2 + A_{21}^2) \cdot (A_{12}^2 + A_{22}^2)} \right]^{1/2} \quad (35)$$

Ek olarak, Semangularity, S,

$$S = \frac{|A_{11}|}{(A_{11}^2 + A_{21}^2)^{1/2}} \cdot \frac{|A_{22}|}{(A_{12}^2 + A_{22}^2)^{1/2}} \quad (36)$$

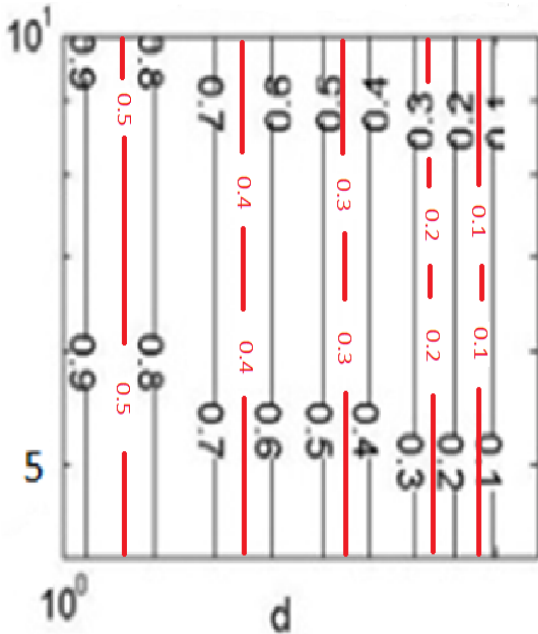
Eğer R ve S, 1'e eşit ise; tasarım uncoupled tasarımdır. Uncoupled tasarım çözümü en iyi ve verimli çözümdür. Buna rağmen nadiren elde edilebilmektedir. Bu çözüm için tasarım matrisine karşılık gelen matris; diagonal matristir. Eğer R, S'ye eşit olduğunda ve 1'e eşit olmamak kaydıyla; tasarım yaklaşımı decoupled tasarımdır. Decoupled tasarım yaklaşımı da kabul edilebilir bir çözüm türüdür. İlgili tasarım matrisi üst ve alt üçgen matrisidir [45]. Kütle dizini ve tasarım parametrelerinin (DP) şekli çözüm yaklaşımları uncoupled ve decoupled tasarım yaklaşımları olduğu durumlarda alanları görmek adına kullanılabilir (Şekil 1).

Eğer fonksiyonel gereksinimler (FRs) çizgileri (contour) birbirlerine dikey olup, tasarım parametreleri (DP) eksenine paralel ise, burada bir tür uncoupled tasarım yaklaşımı çözümü olduğu anlamına gelmektedir [1]. Şekil 1 'de de görüldüğü gibi bu problem adına bir çözüm bulunmamaktadır.



Şekil 1: MATLAB’de çizilmiş kütle hatları (kg)

MATLAB ‘de eksen olarak kullanılan tasarım parametreleri (DP) ile açısallık ve anlamsallık konturları çizildi (çizgileri oluşturuldu) (Şekil 2.).



Şekil 2: Doğrusallık ve Anlamsallık Kontörleri

Şekil 2’de Reangularity (Doğrusallık) siyah çizgiler ile; Semangularity (Anlamsallık) kırmızı çizgiler ile; D ve d log- ölçeğinin çizgileri [mm] ölçülerde belirtilmiştir. Şekil 1’ de belirtildiği üzere; 2 adet fonksiyonel gereksinimler (FRs) genel olarak coupled tasarım yaklaşımıdır. Bununla beraber şekil 2 ve 3 ‘den tasarım parametreleri (DP) alanında S ve R 1 ‘e yaklaşırken

belirli alanlar görülebilmektedir. Bu alanlar; iki kritik fonksiyonel gereksinimlerin (FRs) decoupled tasarım olduğu alanlardır. Görüldüğü gibi, S=1.778 mm ve R=15.24 mm R çapında d ve D değerlerine yakındır.

Denklem 27’de Fortran’ da tasarım matrisi (A) ile kontrol edildiğinde, iki adet decoupled çözüm değeri verir. Bir sonraki adım olarak; sapma ( $\delta$ ) ve aktif bobinler sayısı (N); sırası ile üçüncü fonksiyonel gereksinimler (FRs) ve tasarım parametreleri (DP) olarak eklenir.

$$z = N \quad (37)$$

Sapma ( $\delta$ ) ‘nın boyutsuz formu;

$$\delta' = \frac{x^3 z}{y^4} \quad (38)$$

şeklinde hesaplanır.

Aksiyomatik tasarım denklemin karşılık gelen eşitlik;

$$\begin{Bmatrix} M' \\ \tau_{max}' \\ \delta' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \quad (39)$$

Buradan sonuçla;

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (40)$$

$$A_{11} = y^2 z \quad (41)$$

$$A_{12} = 2xyz \quad (42)$$

$$A_{13} = xy^2 \quad (43)$$

$$A_{21} = \frac{K'_w(X, Y)}{y^3} \quad (44)$$

$$A_{22} = -3x \frac{K'_w(X, Y)}{y^4} \quad (45)$$

$$A_{23} = 0 \quad (46)$$

$$A_{31} = \frac{3x^2 z}{y^4} \quad (47)$$

$$A_{32} = -\frac{4x^3 z}{y^5} \quad (48)$$

$$A_{33} = \frac{x^3}{y^4} \quad (49)$$

Denklem 39’da yer alan tasarım matrisini;

$$x=5$$

$$y=7$$

$$z=9 \text{ değerleri ile Fortran’ da çözümler, olası}$$

decoupled tasarım çözümleri elde edilmiştir.

$$[A] = \begin{bmatrix} X & X & X \\ 0 & X & 0 \\ X & X & 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

X sıfır olmayan değerler. Boyutsuz x, y, z, değerleri dönüştürmede DP;

D=12.7 mm

d=1.778 mm

N=9 değerlerini vermektedir.

Eğer Denklem 39 daha sembol bir şekilde yazılırsa;

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ 0 & X & 0 \\ X & X & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (51)$$

Buna ek olarak fonksiyon gereksinimler aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$FR_1 = C_1 DP_1 + C_2 DP_2 + C_3 DP_3 \quad (52)$$

$$FR_2 = C_2 DP_2 \quad (53)$$

$$FR_3 = C_1 DP_1 + C_2 DP_2 \quad (54)$$

Tasarım parametreleri (DP) ve fonksiyonel gereksinimler (FRs) arasındaki bağımsızlığı Denklem 51; Denklem 52 ve Denklem 53 göstermektedir. Denklem 51' de kütle, tasarım parametrelerinin üç faktörden de etkilendiği belirtilmiştir. Sapma, tel çapı ve bobin çaplarını etkiler. Bununla beraber, aktif rulo sayısı (Denklem 53) bağımsızdır. Çözüm için gerçekleştirilen analiz aracılığıyla kazanılan bağımsızlıklar; tasarım açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Sırasıyla FR2, FR3 ve FR1 sağlanarak tasarım gerçekleştirilebilmektedir.

### III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma için çözümler; Aksiyomatik Tasarım ve çok amaçlı bir tasarım yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir. Aksiyomatik Tasarım çalışmasında; tasarım parametreleri ve fonksiyonel gereksinimler için optimum değerler Tablo 1' de belirtilmiştir. Çözümlenelerde Denklem 50, Denklem 51, Denklem 52 ve Denklem 53'ten yararlanılmıştır.

**Tablo 1:** Aksiyomatik Tasarım yaklaşım çözümü

D [m]	d [m]	N #	Def. [mm]	Mass [g]	Stres [MPa]	Frekans [Hertz]	Spr. Höl [m]	Spr. İndex
12.7	1.778	9	11.684	22.226	432.92	302.5	14.65	7.14

Genel olarak; yay indeksi oranı 6 ile 12 arasında değişim gösterir ve bu kısıtlama karşılandı. Frekans değerinin 100 Hertz' den fazla olması arzulanan bir değişkendir ve bu kısıtlama da karşılandı. Son olarak, en önemli kısıt; yay delik çapı  $\bar{D} = 15.24 \text{ mm}$  'den küçük olmalıdır.

Uygun toleransları bulmak adına güçlü tasarım çözümleri ile desteklemeler sağlandı. Farklı tolerans aralıkları her aralık için maksimum ve minimum kütle ve kayma gerilmesi değerleri hesaplanarak denemeler

gerçekleştirildi. İstenen %95'lik güvenilirlik nedeni ile; nominal fonksiyonel gereksinim değerlerinden uygun sapmayı sağlayan en küçük tolerans aralığı hesaplandı. Nominal tasarım parametreleri ile beraber bu tolerans aralığı Tablo 2' de verilmiştir. Eğer bu tasarım parametrelerin değerleri bu aralıkta kalırsa, fonksiyonel gereksinimleri oluşturan değerler gürültü faktörü için yeterli duyarsızlık göstermektedir.

**Tablo 2:** Çok amaçlı Aksiyomatik Tasarım yaklaşımı çözümleri

ÇOK AMAÇLI TASARIM YAKLAŞIMI									
$T_D = 0.1$ $T_d = 0.02$ [mm]	D [m]	d [m]	N #	Def. [m]	Mass [g]	Stres [MPa]	Freq. [Hertz]	Spr. Höl [m]	Spr. İnd.
Nom.	12.70	1.78	9	11.68	22.226	432.922	302.50	14.656	7.14
Min.	12.60	1.75	9	11.94	21.318	447.883	303.02	14.526	7.19
Max.	12.80	1.80	9	11.17	23.133	418.718	301.98	14.785	7.10

Ayrıca, Tablo 3'te çok amaçlı ve aksiyomatik tasarım durumlarının gürbüzlük entegre çözümleri karşılaştırılmıştır.

**Tablo 3:** Çok amaçlı aksiyomatik ve sağlam parametre yaklaşımlarının çözümleri

Çok Amaçlı Aksiyomatik Tasarım ve Sağlam Parametre Yaklaşımları									
$T_D = 0.5$ $T_d = 0.05$ □m	D m	d m	N #	Def. mm	Mass g	Stress MPa	Freq. Hertz	Spr. Höl mm	Spr. İndex
Nominal	12.7	1.778	9	11.684	22.226	432.92	302.5	14.656	7.14
Min	12.192	1.722	9	11.43	19.958	454.36	318.866	14.092	7.05
Max	13.208	1.828	9	11.684	24.494	412.858	287.679	15.22	7.22
Tablo 3 Devamı - Çok Amaçlı Sağlam Parametre Yaklaşımları $T_D = 0.15$ □m, $T_d = 0.05$ □m									
	D m	d m	N #	Def. mm	Mass g	Stress MPa	Freq. Hertz	Spr. Höl mm	Spr. İndex
Nominal	13.030	1.752	9	13.208	22.226	460.363	283.267	14.935	7.43
Min	12.877	1.701	9	14.478	20.865	495.319	281.605	14.732	7.31
Max	13.182	1.803	9	12.192	23.587	428.785	284.777	15.164	7.57



İkinci Yaklaşım Çözümü $T_D = 0.12$ mm, $T_d = 0.025$ mm									
	D mm	d mm	N #	Def. mm	Mass g	Stress MPa	Freqency Hertz	Spring Hole mm	Spring Index
No minimal	13.106	1.930	13	13.208	36.741	352.529	308.387	15.24	6.79
Min	12.98	1.905	13	13.462	35.833	363	310.314	15.087	6.77
Max	13.233	1.955	13	12.954	38.102	342.462	306.476	15.392	6.82
Üçüncü Yaklaşım Çözümü $T_D = 0.1$ mm, $T_d = 0.025$ mm									
	D mm	d mm	N #	Def. mm	Mass g	Stress MPa	Freqency Hertz	Spring Hole mm	Spring Index
No minimal	13.03	1.981	13	11.684	38.555	326.329	320.215	15.21	6.58
Min	13.132	2.006	13	11.938	37.194	336.188	321.098	15.34	6.61
Max	12.928	1.955	13	11.43	39.916	316.814	319.321	15.08	6.55

Tablo 3'e göre, çok amaçlı ve aksiyomatik tasarım yöntemleri entegre olduğunda; bobin çapı için tasarım toleransı ( $T_D$ ) 0.1 mm ve tel çapı için ( $T_d$ ) 0.025 mm'dir. Bir diğer ifade ile; fonksiyonel gereksinimlerde eğer bobin çapı (D) 12.6 mm ve 12.8 mm arasında; tel çapı (d) 1.753 mm ve 1.803 mm arasında ise burada hızlı bir değişim olmadığıdır. Böylece sistemin sağlamlığı ve dayanıklılığı geliştirilmiş olup, gürültü faktörlerine duyarlılıkta azalmış olur.

Ayrıca, tasarıma çok yönlülük katan bağımsız aksiyom tasarımı, karşılandı. Bunlar; bobinin metodolojik seçimi, tel boyutları ve bobin sayısı tarafından sağlanan en az üretim maliyetleri ile birlikte bütün avantajlı özellikleridir.

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, çok amaçlı aksiyomatik tasarım yaklaşımı, mekanik yay tasarımı araştırması ile örneklendirildi. Aksiyomatik Tasarım, sağlam parametre tasarımı ve çok amaçlı tasarım yaklaşımları, tasarım aşamasında sağlamlık ve dayanıklılık entegrasyonu ile yayın kütle ve kayma gerilmesinin en aza indirilmesi ile bağlantı kurulmuştur.

Aksiyomatik bir tasarım probleminde, eğer tam sistem matrisi üçgen bir matris oluşturacak şekilde yeniden sıralanabiliyorsa, yüksek seviyeli birleştirilmiş tasarım, ayrıştırılmış bir tasarım olarak ele alınabilir. Bu, yüksek düzeyde bir miktar bağlantı sergileyen sistemlerin bazı aralıklarda ayrıştırılabilmeleri için bir

çözüm yolunu açıklamaktadır. Bu çalışmada olduğu gibi bazı düzeylerde ayrıştırılmış az sayıda tasarım alternatifi bulunmaktadır. Daha sonra etkili bir şekilde ayrıştırılmış tasarım için uygun aralık seçilir ve tasarım çözümü için kullanılabilir.

Gürültü faktörlerine karşı sistem sağlamlığının geliştirilmesine yönelik bazı tasarım metodolojilerinin aksiyomatik tasarım yöntemine entegre edilmesi isteniyorsa, iki strateji ile açıklanabilir. İlk olarak, tüm FR'lerin uygun DP'ler tarafından karşılanması koşuluyla, gürültü faktörlerine duyarlılığı azaltan veya gözlemlenen gürültü faktörü değişimini azaltan FR'lerle birlikte bir dizi FR'nin artırılmasıyla sistem sağlamlığı artırılır. İkinci olarak, gürültü faktörlerindeki değişiklikleri karşılayan tasarım parametreleri eklenerek sistem sağlamlığı artırılır. Bu stratejiler, gürültü faktörlerine duyarlılığı kontrol eden ve dolayısıyla sistem tasarımcısının sistem geliştirilirken istenen ilişkileri sürdürmesine yardımcı olan tasarımın önemli özelliklerini vurgulamaktadır.

Aksiyomatik tasarıma ilişkin bu çalışma, aksiyomatik sistem tasarımına yönelik yöntemlerin geliştirilmesinde başarıya ulaşmış olsa da sunulan teoremlerin kullanımı, tasarım araçlarına entegre edilmeleri halinde büyük ölçüde artacaktır.

Önerilen yöntemlerin etkinliğini ölçmek için, FR sağlamlığını sağlayacak değişken DP'lere sahip bir sistem tasarlamak gerekir. Diğer bir olasılık ise sağlamlık yöntemlerini kullanarak ve kullanmadan bir sistem tasarlamak ve ardından Taguchi yöntemleri gibi bir parametre optimizasyon yöntemiyle ilerlemektir. Bu nedenle olayın çözümü çok amaçlı sağlam tasarım metodolojisi kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra farklı metodolojilerin çözümleri birbirleriyle karşılaştırıldı. Çözümlere göre kütle ve kayma gerilimi arasında bir denge vardır.

**Tablo 4:** Yapılan Çok Amaçlı Aksiyomatik Tasarım Çalışması ile Literatür Çalışmalarının Karşılaştırılması

D mm	d mm	N #	Def. mm	Mass g	Stress MPa	Freqency Hertz	Spring Hole mm	Spring Index
12.7	1.778	9	11.684	22.226	432.921	302.5	14.656	7.14
12.192	1.7272	9	11.43	19.958	454.364	318.866	14.092	7.05
13.208	1.8288	9	11.684	24.494	412.858	287.679	15.22	7.22

Yayın kütlesi bobin sayısı arttıkça artar. Öte yandan kayma gerilmesi bobin sayısı arttıkça azalmaktadır. Kısıtlamaları karşılayan en iyi tasarım çözümü 9 bobinden oluşmaktadır. İki metodoloji N = 9'a göre

karşılaştırıldığında, çok amaçlı aksiyomatik ve gürbüz tasarım çözümü, elde edilen tolerans aralığı ile daha optimal ve sağlam çözüm seti vermektedir. Gelecekte yapılacak iyileştirmeler için, farklı metodolojiler aksiyomatik tasarım yaklaşımına entegre edilebilir. Daha sonra yapılacak çalışmaların katkılarıyla, sistem; gürültü faktörlerine karşı daha sağlam ve duyarısız olacaktır. Yapılan çok amaçlı aksiyomatik tasarım çalışması ile literatür çalışmalarının karşılaştırılması Tablo 4'te verilerek çalışmaya aktarılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümünde hazırlanmış "Multiobjective Axiomatic And Robust Design Approaches To Mechanical Spring Design" adlı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Suh, N.P.; *"The Principles of Design"*, Oxford University Press, New York, USA(1990).
- [2] Cochran, D. S.; Reynal, V. A.: "Axiomatic Design of Manufacturing Systems", *The Lean Aircraft Initiative Report Series*, RP96-05-14, Mass. Institute of Technology (1996).
- [3] Suh, N.P.; Cochran, D.S.; C.L. Paulo.: "Manufacturing System Design", *Annals of the CIRP*, 47, 2 (1998) 627–639.
- [4] Babic, B.: "Axiomatic Design of Flexible Manufacturing Systems", *International Journal of Production Research*, 37, 5 (1999) 1159-1173.
- [5] Bröte, S.; Cochran, D. S.; Mierzejewska, A.; Carrus, B.; Rupp, S.; Smith, J.: "Integrating the Production Information System with Manufacturing Cell Design A Lean, Linked Cell Production System Design Implementation, Global Mobility Database", *Society of Automotive Engineers Inc.*, USA. 13 (1999).
- [6] Cochran, D. S; Eversheim, W.; Kubin, G.; Sesterhenn, M. L.: "The Application of Axiomatic Design and Lean Management Principles in the Scope of Production System Segmentation", *The International Journal of Production Research*, 38, 6 (2000) 1377-1396.
- [7] Chen S.J.; Chen.; L.C.; Lin,L.: "Knowledgebased Support for Simulation Analysis of Manufacturing Cells", *Computers in Industry*, 44 (2001) 33-49.
- [8] Werneman, A.; Kjellberg, A.; Adman, M.: "Application of Axiomatic Design in Operational Development", Proceedings of ICAD 2000, First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD 020) (2000)1-8.
- [9] Cha, S. W.; Moon, Y. R.: "Using Axiomatic Approach for Development of New Concept Design and Manufacturing", Proceedings of ICAD 2000, First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD 035) (2000) 83-86.
- [10] Engelhardt, F.: "Improving Products and Systems by Combining Axiomatic Design", Quality Control Tools and Designed Experiments, Proceedings of ICAD 2000, First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA, (ICAD037), (2000) 93-105.
- [11] Suh, N.P.: *"Axiomatic Design: Advances and Applications"*, Oxford University Press, New York, USA (2001).
- [12] Cotoia, M.; Johnson S.: "Applying the Axiomatic Approach to Business Process Redesign", *Business Process Management Journal*, 7, 4, (2001) 304 – 322.
- [13] Baxter, J. E.; Agouridas, V.; McKay, A.; Pennington, A.: "Supply Chain Design: An Application of Axiomatic Design", Proceedings of ICAD2002, Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD012) (2002). 1-7.
- [14] Houshmand, M.; Jamshidnezhad, B.: "Conceptual Design of Lean Production Systems through an Axiomatic Design", Proceedings of ICAD 2002, Second International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA (ICAD 033) (2002) 1-12.
- [15] Hwang, Y. D.; Cha, S. W. ; Kang, Y. J.: "Tool Development for Evaluation of Quantitative Independency Between FRs in Axiomatic Design", *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 3, 2 (2002) 52-60.
- [16] Kim, Y.: "A Decomposition Based Approach To Integrate Product Design And Manufacturing System Design", Proceeding of Third International Conference on Axiomatic Design, Haziran 11 – 24 (2004) Seul.
- [17] Kulak, O.; Durmuşoğlu, B.; Tüfekçi, I.: "A Complete Cellular Manufacturing System Design Methodology Based On Axiomatic Design Principles", *Computers & Industrial Engineering*, 48, 4 (2005) 765–787.
- [18] Pappalardo, M.; Naddeo, A.: "Failure Mode Analysis Using Axiomatic Design And Non-Probabilistic Information", *Journal of Materials Processing Technology*, (2005) 1423-429.
- [19] Yasar, E. A.; Durmuşoğlu, M. B.; Dinçmen, M.: "Design of a Knowledge Management System Based on Axiomatic Design Principles", 35. International Conference on Computers and Industrial Engineering (2005) 2115-2130.
- [20] Kulak, O.; Durmuşoğlu, B.; Tüfekçi, I.: "A Complete Cellular Manufacturing System Design Methodology Based On Axiomatic Design Principles", *Computers & Industrial Engineering*, 48, 4 (2005) 765–787.
- [21] Kabadurmuş, Ö.; Durmuşoğlu, M. B.: "Aksiyomlarla Tasarım İlkelerini Kullanarak Çekme/Kanban Üretim Kontrol Sistemlerinin

- Tasarımı”, V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, Ticaret Üniversitesi, İstanbul (2005) 313-317.
- [22] Tarcan E.: “*Evaluation Of Sub-Component Alternatives In A Product Design*”, Yüksek Lisans Tezi, MÜ İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2005).
- [23] Thielman, J.; Ge, P.: “Applying Axiomatic Design Theory to the Evaluation and Optimization of Large-Scale Engineering Systems”, *Journal of Engineering Design*, 17, 1 (2006) 1-16.
- [24] Birgün, S.: “Aksiyomlarla Tasarım Yoluyla Değer Akışı Haritalandırma”, Yöneyem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği XXVI. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı (2006) 35-40.
- [25] Yılmaz, E.: “Aksiyomlarla Tasarım İlkeleri Yardımıyla Kentiçi Toplu Taşıma Sistemlerinin Tasarımı”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11, 1, (2006) 9-26.
- [26] Özel, B.; Özyörük, B.: “Aksiyomatik Tasarım ve Analitik Hiyerarşi Prosesi ile Tedarikçi Seçimi”, VI. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul Kültür Üniversitesi (2006) 189-203.
- [27] Özyiğit, A.: “*Axiomatic Design Approach To Control Systems Design*”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2006).
- [28] Özel, B.; Özyörük, B.: “*Bulanik Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı İle Hiyerarşik Bir Tedarikçi Seçim Modeli*”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2007).
- [29] Gülen, K. G.; Birgün S.: “Creating Value in Enterprise Information System: KVS Model”, State of the Art & Business Management a Handbook for Educators, Consultants and Practitioners, Tectum Verlag (2007) 148-176.
- [30] Birgün, S.;Kulaklı, A.: “*Aksiyomlarla Tasarım İlkeleriyle Müşteri Merkezli Bilgi Yönetimi Stratejisinin Oluşturulması*”, Sıtkı Gözölü’ye Armağan, Çağlayan Basımevi (2007) 245-255.
- [31] Kanbur, F.; Birgün, S.: “Yeni Kariyere Geçiş Danışmanlığı İçin Kavramsal Bir Model: Fatra”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*,7,13 (2008) 117-137.
- [32] Çebi, S.; Çelik, M.; Kahraman, C.: “Gemi Sistemleri İçin Entegre BakımOnarım Yönetimi Gereksiniminin Analizi”, *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Temmuz, 3, 4 (2008) 17-24.
- [33] Urbanic R. J.; Maraghy, W.H.: “Using Axiomatic Design With The Design Recovery Framework To Provide A Platform For Subsequent Design Modifications”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1 (2009) 165–171.
- [34] Metin Celik, M.; Er, I.D.: “Fuzzy Axiomatic Design Extension For Managing Model Selection Paradigm In Decision Science”, *Expert Systems with Applications* 36 (2009a) 6477–6484.
- [35] Metin Celik, M.; Cebi, S.; Kahraman, C.; Er, I.D.: “Application Of Axiomatic Design and TOPSIS Methodologies Under Fuzzy Environment For Proposing Competitive Strategies On Turkish Container Ports In Maritime Transportation Network”, *Expert Systems with Applications* 36 (2009b) 4541–4557.
- [36] Bang, I.C.; Heo, G.: “An Axiomatic Design Approach In Development Of Nanofluid Coolants”, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 75–90.
- [37] Özbek, İ., “*Plastik Enjeksiyon Makinesi Seçiminde Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı*”, Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [38] Yavuz, M., “*Makine Ekipman Seçimine Aksiyomatik Tasarım Yaklaşımı*”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010
- [39] GÜNGÖR, F., "Sızdırmaz Conta Malzemesinin Aksiyomatik Tasarım Metoduyla Seçilmesi," *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol.4, pp.1-10, 2017
- [40] Ulutürk, İ., Yurdakul, M. ve İç, Y.T., “Aksiyomatik tasarım yöntemi ile yenilikçi ürün geliştirilmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 987-1002, (2020).
- [41] Rao, S.S.: *Engineering Optimization – Theory and Practice*. Wiley (1996).
- [42] Deb, K.: Multi-objective optimization. In: Burke, E.K.; Kendall, G. (eds.) – *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*, pp.403-449. Springer, New York (2005).
- [43] Goel, P.S.; Singh, N.: A modeling approach for integrated durability engineering and robustness in product design. *Computers Ind. Eng.* (1997). doi:10.1016/S0360 8352(97)00110-1
- [44] Shigley, J.E.; Mischke, C.R.: *Mechanical Engineering Design*, 6th edn. McGraw-Hill, Singapore, (2001).
- [45] Suh, N.P.; Rinderle, J.R.: Qualitative and quantitative use of design and manufacturing axioms. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* (1982). doi:10.1016/S00078506(07)63323-X

## Savaş Uçağı Geliştirme Projesinde Test ve Üretim Aktivitelerine Bağlı Proje Süresi Tahmini

### *Project Duration Estimation Based on Test and Production Activity in Fighter Jet Development Project*

Ahmet Atıl ÇETİN<sup>1</sup>, Esra DİNLER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Ana Bilim Dalı, Ankara, Türkiye.

<sup>2</sup>Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

#### Öz

Geliştirme faaliyetlerinin uzun zaman aldığı savaş uçağı projelerinde, projenin hedeflenen sürede bitirilmesi ve proje dahilinde gerçekleştirilecek aktivitelerin kendinden sonra gelen aktiviteleri destekleyecek şekilde ilerleyebilmesi adına proje başında yapılan takvimsel öngörülerin doğruluğu çok önemlidir. Bu tarz büyük ölçekli bir proje, özellikle ilk defa gerçekleştiriliyor ise aktivite sürelerinin gerçeğe en uygun şekilde tanımlanması, aktivitelerin öncüllük ilişkilerinin belirlenmesi projenin başarısı adına önemlidir. Bu çalışmada, ülkemizde ilk defa gerçekleştirilen beşinci nesil savaş uçağı geliştirme projesi dahilindeki aktiviteler arasında öncüllük ilişkilerinin tanımlanması ilk adım olarak görülmüştür. Öncüllük ilişkilerinin tanımlanması ile birlikte, gerçekleştirilecek aktivitelerin önceden öngörülemez sebepler ile gecikmesi veya beklenenden çok daha erken bitmesi gibi durumlar da hesaba katılarak iyimser, kötümser ve olası süreler tanımlanmıştır. Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (Program Evaluation and Review Technique-PERT) ile proje aktivitelerinin beklenen süreleri hesaplanmıştır. Doğrusal karar modeli ile kritik aktiviteler bulunmuş ve projenin beklenen tamamlanma süresi elde edilmiştir. Bulunan bu süre, geçmişte hayata geçirilen diğer beşinci nesil savaş uçağı projelerinin ilk uçuş ve proje gerçekleşme süreleri ile karşılaştırılarak, yapılan öngörülerin ne kadar uyumlu olduğu konusunda bir çıkarım yapılmıştır. Bununla beraber, müşterinin ihtiyaç tarihini öne çekmesi durumunda farklı süreler için proje gerçekleşme olasılıkları hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Beşinci Nesil Savaş Uçakları, PERT, CPM, Proje Yönetimi

#### Abstract

In fighter jet development projects, where development activities take a long time, the accuracy of the calendar predictions made at the beginning of the project is very important in order to complete the project within the targeted time and the activities to be carried out within the project to progress in a way that supports the activities that follow it. Especially if such a large-scale project is carried out for the first time, defining the activity durations in the most realistic way and defining the precedence relations of the activities are important for the success of the project. In this study, defining the predecessor relations among the activities within the fifth-generation fighter jet development project, which was carried out for the first time in our country, was seen as the first step. Along with the definition of precedence relations, optimistic, pessimistic and most likely durations were defined by considering situations such as delays of the activities to be carried out due to unforeseen reasons or ending much earlier than expected. The expected duration of project activities was calculated with the Program Evaluation and Review Technique (PERT). With the mathematical model based on linear programming, critical activities were found and the time for the project to be realized was reached. By comparing this time with the first flight and project realization times of other fifth generation fighter jet projects succeeded in the past, an inference was made about how compatible the predictions were. In addition, the project realization probabilities have been calculated for different duration in case the stakeholder's date of need bring forward.

**Keywords:** Fifth Generation Fighter Jets, PERT, CPM, Project Management

## I. GİRİŞ

Askeri sistem geliştirme projeleri, müşterinin, ülke iç ve dış tehdit algılamalarına bağlı olarak gereksinimlerini belirlediği, belirli bir zaman diliminde hayata geçirilmesi gereken maliyet etkin projelerdir. Askeri sistem geliştirme projeleri, geliştirildiği ülkenin tehdit algılamalarına cevap verecek şekilde, yeni ve/veya henüz ispatlanmamış teknolojilerin kullanıldığı, birbirleri ile tam bir uyum içerisinde çalışması beklenen birçok alt sistemden oluşan ve buna bağlı olarak birçok yüklenicinin dahil olduğu takvim ve maliyet anlamında yüksek riskli projelerdir [1]. Genel olarak kavramsal tasarım süreci ile başlayan askeri sistem geliştirme projeleri, ilgili askeri sistemin envantere alınarak kullanıcıya teslim edilmesi ile sonuçlandırılır. Bazı durumlarda bu kapsam ilgili sistemin idamesi, bakımları ve envanterden çıkarılmasını da kapsayabilir. Bu süreçte projenin kapsamına, ihtiyaç duyulan sistemin karmaşıklığına, sistemin operasyonel konseptine ve müşterinin gereksinimlerine göre birçok farklı aktivite sıralı ve paralel şekilde ilerletilmelidir.

Günümüzde operasyonel olarak kullanılan ve geliştirme süreçleri devam eden savaş uçakları, ülkelerin askeri operasyon kabiliyetlerini ciddi anlamda arttıran en önemli unsur olmuştur. Bu tarz projelerin başarılı olarak gerçekleştirilmesi ülke havacılık endüstrisinin ilerletilmesine, genel anlamda temel bilimlerde ve teknolojilerde gelişimin de önünü açması açısından önemlidir. Ancak savaş uçağı geliştirme projelerinde ön görülemeyen farklı problemler ile karşılaşmış ve çoğu problem geliştirme sürecinin uzamasına sebep olmuştur [2].

Bu noktada aktivitelerin başlama zamanlarının, aktivite sürelerinin ve önceliklerinin, aktivitelerde yaşanacak gecikmelerin genel proje takvimini nasıl etkileyeceği gibi bilgilerin olabildiğince erken aşamalarda bilinmesi ve belirlenmesi savaş uçağı geliştirme projelerinin başarılı olması için önemlidir. Ayrıca savaş uçağı geliştirme projelerinde çok yeni veya hiç kullanılmamış teknoloji ve çözümler ile ilerleniyor olması belirtilen cevaplara olan ihtiyacı arttırmaktadır. Projenin bir savaş uçağı olması ile birlikte havacılık endüstrisinin kendine has katı kurallarının da proje üzerinde ek bir baskı oluşturması planlama süreçlerinin önemini arttırmaktadır.

Bir savaş uçağı geliştirme projesini, özellikle sektörde gerçekleştirilecek ilk savaş uçağı projesi ise, sadece bir savaş uçağı geliştirme projesi olarak görmek yanlış olacaktır. Sektörün bir savaş uçağını geliştirebilecek alt yapıları edinmesi, test ve üretim tesislerini hayata geçirmesi de projenin başarısı için önemlidir. Bu sebeple proje dahilinde hangi testlerin hangi

zamanlarda yapılacağına bilinmesi, kullanılacak altyapıların belirlenmesi, eksik altyapıların inşası, alt seviye üretim ve test planlarının yapılabilmesi konusunda da sektöre destek sağlayacaktır.

Bu çalışmada Türk Savunma Sanayisine hizmet veren bir şirketin geliştirmekte olduğu beşinci nesil savaş uçağı projesinde proje gerçekleştirme süresinin tahmin edilmesi ve yukarıda anlatılan üretim ve test planlama faaliyetlerine katkıda bulunacak bir proje yönetimi konusu ele alınmıştır. Projenin ilk defa gerçekleştiriliyor olması, üretim ve özellikle test süreçlerindeki olası aksaklıkların belirlenememesi süre anlamında gecikmelere sebebiyet verebilir. Bu sebeple kötümser süre tanımı yapılması projenin başarısına katkı sağlayacaktır. Ayrıca projenin ilerleyen süreçlerde yapılabilecek fazla mesai uygulamaları ile üretim ve test teknolojilerindeki gelişmelerin de iyimser anlamda etkileri olacağından iyimser süre tanımlaması da önem arz etmektedir. İyimser ve kötümser anlamda proje aktivitelerine zaman ataması yapmak ve bu tanımlardan bir sonuç çıkarabilmek adına proje yönetimi ve planlama için PERT tekniği kullanılmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizini gerçekleştirmek amacı ile bu süreler üçgenel bulanık süreler olarak ele alınarak bulanık proje süresi ve kritik yol, Alfa kesme yöntemi ile hesaplanmış ve daha sonra Alanların Merkezi Yöntemi kullanılarak durulaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonucunda elde edilen proje gerçekleştirme süresi, geçmişte hayata geçirilen diğer beşinci nesil savaş uçağı projelerinin gerçekleştirme süreleri ile karşılaştırılarak, yapılan öngörülerin ne kadar uyumlu olduğu konusunda bir çıkarım yapılmıştır.

Yapılan bu çalışma ile bir savaş uçağı geliştirme projesi kapsamında uygulanması gereken belli başlı yönetsel, üretim ve test aktiviteleri ile bu aktiviteler arasındaki öncüllük ilişkileri anlamında literatüre bir referans kazandırmak en önemli amaçtır. Bununla beraber yapılan süre öngörülerini de ilerleyen zamanlarda hayata geçirilecek benzer projeler için bir ilk referans olarak kullanılabilir. Çalışmada proje sürelerinin belirlenmesinde PERT tekniğinin kullanılmasının temel amacı proje süreçlerini daha iyi planlamak ve proje zaman çizelgesini daha doğru bir şekilde tahmin etmektir. Bunun yanında PERT, belirsizlikleri ve muhtemel gecikmeleri dikkate alarak projenin zaman çizelgesini daha güvenilir bir şekilde oluşturmak için kullanılmıştır. Bu, projenin daha güvenilir bir zaman çizelgesine sahip olmasına katkı sağlar. Ayrıca PERT tekniği, farklı senaryoları değerlendirme yeteneği sunar. Bu, olası risklerin ve

değişkenlerin dikkate alınarak çeşitli değerlendirmelerin yapılabilmesine olanak tanır.

Çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan çözüm yöntemlerinin farklı sektör ve projeler ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde bu çalışmada kullanılan veriler ve yöntemler ile ilgili bilgilere, dördüncü bölümde uygulanan yöntem sonucu çıktılarına ve son bölümde ise çalışmanın sonucu ile ilgili değerlendirme ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

### 1.1. Literatür Araştırması

Literatürde birçok farklı konuda ve birçok farklı sektörde Proje yönetimi konusunda uygulamalar yapan çalışmalar bulunmaktadır.

Aksoy vd. [3], otomotiv sektörüne montaj ekipmanları üreten bir firmada, proje teslim sürelerinde ve maliyetlerde oluşan sapmaların sebeplerini belirlemek ve olası sapmaları en aza indirmek adına aktivite sürelerini ve bütçeyi aynı anda takip edebilen bir proje yönetim aracı ortaya koymayı hedeflemişlerdir. Farida ve Anenda [4], Endonezya'da 114 gün içerisinde hayata geçirilmesi gereken bir asfaltlama projesinde, kritik yolların bulunması ve olasılık kavramı kullanılarak optimum tamamlama süresinin belirlenebilmesi adına PERT yöntemi kullanılmıştır. Farklı senaryoların ortaya çıkarıldığı uygulamada optimal sonuca ulaşılarak proje başarıyla sonuçlandırılmıştır. Bintang vd. [5], kapalı devre televizyon projesini zamanında ve bütçe dahilinde tamamlamak adına proje başında yapılan çizelgeleme, planlama ve maliyet öngörülerini gibi aktiviteleri ele almışlardır. Budiawati ve Sarno [6], kablolu cihaz tedariki yapan bir firmanın, garanti süresi boyunca ürünleri için verdiği değişim, onarım ve geri ödeme süreçlerinin zaman ve maliyet açısından etkinliğini tartışmış ve PERT metodu kullanılarak sürelerde ve maliyetlerde iyileşmeler elde etmişlerdir. Agyei [7], bu çalışmada Gana'da yapılan bir inşaat projesinin tamamlanma süresinin ve proje maliyetinin tahmini için PERT metodu kullanmıştır. Ayrıca projenin hızlandırılması durumunda oluşacak maliyet değişimleri de ele almıştır. Kutlu [8], çalışmasında bir hastane inşaatı projesi kapsamında oluşabilecek problemlerin tanımlanması ve alternatif çözümlerin araştırılması adına kritik faaliyetlerin bulunması, projenin gecikmesine sebep olabilecek farklı kritik yolların araştırılmasını ele almıştır. Karahan ve Ezin [9], çalışmalarında 52 haftada bitmesi öngörülen bir inşaat projesinin gerçekleştirme süresinin kısaltılmasına ve bütçenin olabildiğince minimize edilmesi adına bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Coşkun ve Ekmekçi [10], çalışmalarında bir yol ve kavşak inşaatı projesine gelen teklifin maliyet ve süre açısından irdelenerek proje sonunda gerçekleşen maliyetler ile karşılaştırılmasını konu almışlardır. Bu sırada projenin maliyet sapmalarının önceden belirlenmiş sınır

değerlere uyumunu irdelenmişlerdir. Daniel ve Gabriela [11], çalışmalarında bir projenin gerçekleşmesi için gereken proje adımlarının belirlenmesi, Avrupa fonlarıyla gerçekleşen projeler için özel olarak tasarlanmış bir projeyi hayata geçirilmesi ve süre minimizasyonu yapmayı amaçlamışlardır. Ashadi vd. [12], Indonesian Sunda Strait köprüsü çalışmalarında proje süresi tahmini için PERT ve PERT'in farklı bir yorumu olan M-PERT yöntemlerini kullanarak çıkan sonuçların simülasyonlar sonucu çıkan sonuçlar ile karşılaştırılmasına yer vermişlerdir. Ahmad vd. [13], çalışmalarında proje takvimi oluşturma sürecini PERT metodu ve Gantt Şeması ile entegre edecek bir teknik üzerine yoğunlaşmışlar ve özellikle üretim planlaması için iyi bir yöntem olarak tavsiye etmişlerdir. Ahmed vd. [14], ürün geliştirme projelerinde risk yönetimini destekleyen tekniklerin bir incelemesini sunmayı amaçlamadıkları çalışmalarında PERT yönteminin proje süresini tahminine katkısı sebebiyle kritik yol yöntemi ile birlikte kullanılması durumunda proje yönetimine katkısını değerlendirmişlerdir.

Yapılan bu çalışmaların yanında askeri alanda gerçekleştirilen proje yönetimi çalışmaları da incelenmiştir ancak kısıtlı sayıda çalışmanın literatürde yer aldığı gözlemlenmiştir. Sadow [15], herhangi bir süre hesabının yapılmadığı bu çalışmada askeri bir uçak geliştirme projesinde PERT yönteminin nasıl kullanıldığı, farklı ağlarla yönetilen ve birçok farklı adımın olduğu büyük bir projede PERT entegrasyonunun nasıl organize edildiği ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Desticioğlu [16], çalışmasında savunma sanayisi alanında çalışmalar yürüten bir şirketin ilk defa geliştirdiği bir proje kapsamındaki genel planlama sürecini ele almış, aktivite sürelerinin ilk kez hayata geçirilecek bir projede tahmininin zor olması sebebiyle PERT yöntemini kullanmıştır ancak daha önce başka ülkeler tarafından gerçekleştirilmiş benzer projeler ile karşılaştırma yapılmamıştır.

Literatür araştırması sırasında araştırmacıların birçok farklı sektör için proje planlaması çalışmalarına katıldığı görülmüştür. Ancak bu araştırma sonucunda savunma sanayisi ve askeri havacılık alanında yapılan çalışmaların çok kısıtlı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle savaş uçağı geliştirme projesi kapsamında, aktivitelerin planlanması, aktiviteler arası öncüllük ilişkilerinin ve kritik aktivitelerin belirlenmesi ile projenin gerçekleştirilme süresinin öngörülmesi adına bu çalışma ortaya konulmuştur. Ayrıca genel olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer projeler ile bir karşılaştırma yapılmaması da bu çalışmanın yapılmasında bir çıkış noktasıdır ve bulunan sonuçların yakınsadığı ve ayrıştığı noktalar üzerine yorum yapılarak literatüre katkı sağlanmaya çalışılmıştır.

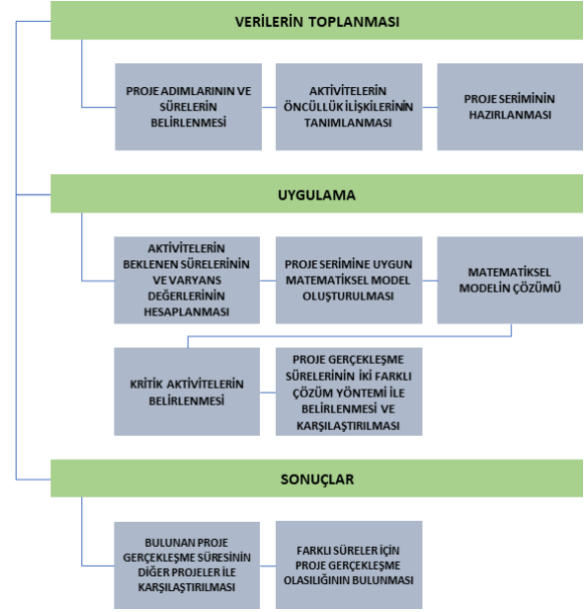
## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Türk Savunma Sanayisine hizmet veren bir şirketin ilk defa geliştirmekte olduğu savaş uçağı projesinin indirgenmiş aktiviteleri ve bu aktivitelerin öncüllük ilişkileri üzerinden proje gerçekleşme süresi tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çalışmada ilk olarak, projenin ilk bloğu için oluşturulan ve on binlerce farklı aktiviteden oluşan detay takviminin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu takvim adımları, alanında uzman bir ekip tarafından 63 adımlık genel bir aktivite listesine indirgenmiştir. Bu aktiviteler yönetsel, analiz, test, üretim gibi farklı disiplinleri içermekte olup savaş uçağı geliştirilmesi için yapılması zorunlu aktiviteler olarak belirlenmiştir. Genel aktivitelerin belirlenmesinden sonra, gerçekleştirilmesi gereken aktiviteler arasındaki öncüllük ilişkileri tanımlanmış ve öncüllük ilişkilerinin tanımlanması ile birlikte, gerçekleştirilecek aktivitelerin önceden belirlenemeyen sebepler ile gecikmesi veya beklenenden çok daha erken bitmesi gibi olgular da hesaba katılarak iyimser, kötümser ve olası süreler tanımlanmıştır. Her aktivite için belirlenen iyimser, kötümser ve olası süreler bir araya getirilerek, iki farklı çözüm yöntemi ile proje aktivitelerinin süreleri hesaplanmıştır. Bu noktadan sonra aktiviteler arası öncüllük ilişkileri de göz önünde bulundurularak proje serimi oluşturulmuş ve bu serim üzerinden matematiksel model oluşturularak kritik aktiviteler ve beklenen proje gerçekleşme süresi elde edilmiştir. Bulunan bu süre, geçmişte hayata geçirilen diğer beşinci nesil savaş uçağı projelerinin gerçekleşme süreleri ile karşılaştırılarak, yapılan öngörülerin ne kadar uyumlu olduğu konusunda bir çıkarım yapılmıştır. Bu karşılaştırma proje başlangıcından ilk uçuşa kadar geçen süre ve ilk uçuştan envantere girişe kadar geçen süre olarak iki parametre üzerinden yapılmıştır. Bununla beraber, müşterinin ihtiyaç tarihini öne çekmesi durumunda farklı süreler için proje gerçekleşme olasılıkları hesaplanmıştır. Bulunan sürenin dünyadaki benzer uçakların geliştirme süreleri ile ne kadar örtüştüğü irdelenmiştir. Ayrıca bu sürenin kısaltılması durumunda proje başarı oranı hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen uygulamanın adımları Şekil 1’de verilmiştir.

### 2.1. Verilerin Toplanması

Savaş uçağı geliştirme projeleri tasarım, üretim, test ve doğrulama aktiviteleri gibi birçok farklı disiplinden aktivitenin bir arada yürütüldüğü projelerdir. Projenin geneline bakıldığında gerçekleştirilen aktivitelerin sayısı yüzbinleri bulmaktadır. Ancak böyle bir aktivite sayısı üzerinden çalışma gerçekleştirmek ve öngörü yapmak çok anlamlı olmayacağı için, savaş uçağı



Şekil 1. Çalışma adımları

projesinde çalışan konusunda uzman kişiler ile görüşülerek indirgenmiş aktiviteler belirlenmiştir. Bu aktiviteler belirlendikten sonra her bir aktivite için iyimser, kötümser ve olası süreler ile her bir aktivite için öncül aktiviteler belirlenmiştir.

Her bir aktivitenin olası süresi ve diğer aktiviteler ile olan öncüllük ilişkisi göz önünde bulundurularak proje serimi hazırlanmıştır.

### 2.2. Proje Yönetimi İçin Doğrusal Programlama Modeli

Proje serimi üzerinden farklı yollarla kritik aktivitelere ve kritik yol süresine ulaşılabilir. Ancak bu durum daha az aktivitenin oluşturduğu serimler için geçerli iken birçok aktiviteden oluşan karmaşık serimlerde, kritik aktivitelerin ve kritik yol süresinin bulunabilmesi için doğrusal programlamadan yararlanılabilir. Bu sayede herhangi bir bilgisayar programı ile kritik aktivitelere ve kritik yola ait süreye kolayca ulaşabiliriz.

Çalışmada matematiksel modelin oluşturulmasında kritik yol analizi için önerilen matematiksel model kullanılmıştır. Doğrusal programlama ile kritik yol analizinde kullanılan matematiksel modele ait karar değişkeni ve parametreler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

Karar değişkeni

$$x_j \quad j \text{ olayının başlama zamanı} \quad j = 1, \dots, n$$

Parametreler

$$t_{ij} \quad (i, j) \text{ faaliyetinin süresi}$$

Matematiksel modelin genel hali ise aşağıda verildiği gibidir:

$$Enk z = x_n - x_1 \quad (1)$$

$$x_j \geq x_i + t_{ij} \quad \forall (j, i) : i, j' \text{ nin öncülü} \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Kritik yol analizinde kullanılan matematiksel modelde **Eşitlik (1)** ile verilen amaç fonksiyonu projenin tamamlanma süresinin en küçüklenmesidir. **Eşitlik (2)** ile verilen kısıtlar her bir öncüllük ilişkisi için bir görevin tamamlanmadan diğer görevin başlamayacağını garanti etmektedir. **Eşitlik (3)** ile verilen kısıtlar ise karar değişkenlerinin negatif olmamasını sağlamaktadır.

### 2.3. Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği

PERT, herhangi bir sebeple projede gecikmelere sebep olabilecek aktiviteleri belirlemek için aktivitelerin gerçekleşme sürelerindeki belirsizliği, iyimser ( $t_a$ ), olası ( $t_b$ ) ve kötümser ( $t_c$ ) şeklinde tanımlanmış tahminler üzerinden hesaplamak için kullanan bir yöntemdir [4]. Bu tahminler sonucunda proje gerçekleşme olasılığı için gereken beklenen süre ( $t_e$ ), varyans ( $\sigma^2$ ) ve standart sapma (S) değerlerine ulaşılır [17].

$$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \left[ \frac{t_c - t_a}{6} \right]^2 \quad (5)$$

$$S = \frac{t_c - t_a}{6} \quad (6)$$

$$\sigma_{proje}^2 = \sum_{i \in \text{Kritik Aktiviteler}} \sigma_i^2 \quad (7)$$

$$S_{proje} = \sqrt{\sigma_{proje}^2} \quad (8)$$

Ayrıca PERT ile projenin hedeflenen bir sürede ( $t_d$ ) tamamlanması olasılığı ile ilgili bir hesaplama da yapılabilir. Bu sebeple Z'ye ihtiyaç duyulur.

$$Z = \frac{t_d - t_e}{S} \quad (9)$$

### 2.4. Bulanık Kritik Yol Metodu

Problem parametrelerinin belirsiz olması durumunda bu değerleri bulanık sayılar olarak ele almak ve buna uygun çözüm yöntemleri kullanarak çözmek uygun olacaktır. Buna göre bu çalışmada proje aktivitelerine ait belirlenen iyimser, olabilir ve kötümser süreler üçgensel bulanık sayılar olarak ele alınmış ve bulanık

kritik yol metodu ile çözümü gerçekleştirilmiştir. Bunun için Chen (2006) tarafından önerilen bulanık kritik yol metodu kullanılmış ve sonuçlar elde edilmiştir [18]. Bunun için ilk olarak Alfa kesme yöntemi kullanılarak bulanık proje toplam süresi ve kritik yolu hesaplanmıştır. Sonrasında net değer dönüşümü için Durulaştırma yöntemlerinden Alanların merkezi yöntemi kullanılmıştır. Alfa kesme aralık değerleri  $\alpha \in [0,1]$  aralığında 0'dan 1'e doğru 0,1 artırımlarla yapılmış ve her bir değer için süreler ve kritik yol belirlenmiştir. Net değer dönüşümüyle elde edilen proje toplam süresi ve kritik yolunun alfa kesim seviyesi belirlenmiştir. Bu yöntemde kullanılan eşitlikler aşağıda anlatılmaktadır.

Üçgen sayılı bulanık bir küme  $T_{ij} = (a, m, b)$  olarak tanımlanır ise, Alfa kesme yöntemi ile elde edilecek yeni bulanık sayılar kümesi aşağıda verilen **Eşitlik (10)** ile tanımlanır [19]. Tam üyelikli küme elemanı "m" ile gösterilirken, "a" en küçük olası değeri, "b" ise en büyük olası değeri tanımlar.

$$(T_{ij})_\alpha = [a^\alpha, b^\alpha] = [(m - a)\alpha + a, (m - b)\alpha + b], \alpha \in [0,1] \quad (10)$$

Her alfa kesme değeri için proje süresi farklılaşmakta olup bu sebeple proje toplam süresinde de değişiklikler olacaktır ve her bir belirsiz proje adımı "D" için üyelik işlevi tanımı  $\mu D((T_{ij})_\alpha) \geq \alpha$  şeklinde tanımlanır [18].

**Eşitlik (11)** ile bulanık değerler ve üyelik fonksiyonları kullanılarak, net sayı dönüşümü yapılır ve bu işlem durulaştırma olarak tanımlanır.  $\mu_c(z)$  üyelik derecesini, z her bir aktivitenin bulanık süresini ve z \* ise durulanan çıkarım değerini gösterir.

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(z) * z}{\sum \mu_c(z)} \quad (11)$$

## III. UYGULAMA

Proje adımlarının, aktivite sürelerinin ve öncüllük ilişkilerinin belirlenmesi için Türk Savunma Sanayisine hizmet veren bir şirketin geliştirdiği beşinci nesil savaş uçağı projesinde uygulanacak ana plan incelenmiştir. Yüzbinlerce farklı aktiviteden oluşan bu plan alanında uzman kişilerin yorumlarına ve görüşlerine de başvurularak 63 aktiviteye indirgenmiştir. Aynı ekip ile her aktivite için iyimser, olası ve kötümser aktivite süreleri belirlenmiş ve aktiviteler arası öncüllük ilişkileri kurulmuştur. İlgili bilgiler **Tablo 1**'de verilmiştir. Belirlenen aktiviteler ve öncüllük ilişkisine göre proje serimi hazırlanmıştır ve **Şekil 2**'de verilmiştir.



**Tablo 1.** Aktiviteler ve diğer bilgiler

Aktivite #	Aktivite	Öncül Aktiviteler	İyimsen Süre-t <sub>a</sub> (Ay)	Olası Süre-t <sub>b</sub> (Ay)	Kötümser Süre-t <sub>c</sub> (Ay)	Aktivite #	Aktivite	Öncül Aktiviteler	İyimsen Süre-t <sub>a</sub> (Ay)	Olası Süre-t <sub>b</sub> (Ay)	Kötümser Süre-t <sub>c</sub> (Ay)
1	Konsept Belirleme	-	4	6	8	27	Tam Boy Statik Yükleme Testleri	25	1	2	3
2	Farklı Alternatiflerin Analizi	1	6	8	12	28	Alt Sistem Entegrasyonu	25	1	2	3
3	Sözleşme İmzası	2	1	2	4	29	Elektrik Sistemi Testleri	28	1	2	3
4	Planform Seçimi	3	1	3	6	30	Yakıt Sistemi Testleri	29	1	2	3
5	Uçak Seviyesi Teknik Çizimler	4	6	6	8	31	Hidrolik Sistem Testleri	30	2	3	4
6	Rüzgâr Tüneli Testleri	5	8	12	14	32	Mekanik Sistem Testleri	31	3	6	8
7	Malzeme Testleri	3	9	12	15	33	Radar Sistemi Testleri	28	6	6	9
8	Detay Analizler	6	14	18	24	34	İletişim Sistemleri Testleri	33	3	4	6
9	Alt Sistem Tedarik Anlaşmaları	1	3	6	9	35	Elektro-Optik Testleri	28	4	6	8
10	Hammadde Tedariki	7, 8	9	12	18	36	Uçuş Kontrol Sistemleri Testleri	28	4	6	8
11	Teknik Çizimlerin Yayınlanması	8, 9	4	6	9	37	İniş Takımı Testleri	32	2	4	5
12	Montaj Ekipmanlarının Tedariki	11	4	6	8	38	Silah Sistemi Testleri	32	2	3	4
13	Alt Seviye Komponent Üretimleri	10	2	3	4	39	Motor Testleri	24	6	6	9
14	Kalite Kontrol	13	1	1	2	40	Kuş Çarpması Testleri	7, 15	1	2	2
15	Ön Gövde Montajı	12, 14	2	3	4	41	İklimlendirme Testleri	39	2	3	4
16	Ön Orta Gövde Montajı	15	2	3	4	42	İlk Enerjilendirme Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	30	1	1	2
17	Orta Gövde Montajı	16	3	4	5	43	Entegre Uçak Sistemleri Testleri	36, 37, 42	6	9	10
18	Ana Gövde Fuselage Montajı	17	2	3	4	44	Entegre Aviyonik Sistem Testleri	34, 35, 38, 41, 43	6	9	10
19	Kanat Birimlerinin Montajı	18	1	1	2	45	İlk Motor Çalıştırma Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	44	1	1	1
20	Arka Gövde Montajı	19	3	4	5	46	Kızıl-Ötesi Görünürlük Testleri	45	1	2	3
21	Gövde Birleşimi	20	1	1	1	47	Radar İzi Testleri	46	3	6	8
22	İniş Takımı Montajı	21	1	1	1	48	Yıldırım Testleri	47	1	2	3
23	Stabilizatör Montajı	22	1	1	1	49	Yerde Titreşim Testleri	45	1	1	2
24	Motor Entegrasyonu	23	1	1	1						
25	Montaj Hattı Testleri	24	1	2	3						
26	Tam Boy Yorulma Testleri	25	84	96	120						

Aktivite #	Aktivite	Öncül Aktiviteler	İyimsir Süre- $t_a$ (Ay)	Olası Süre- $t_b$ (Ay)	Kötümsir Süre- $t_c$ (Ay)
50	Yağmur Testleri	25	1	1	2
51	Ağırlık Ve Balans Testleri	28	1	1	2
52	İlk Uçuş Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	40, 48, 49, 50, 51	1	2	2
53	Taksi Testleri	52	1	1	2
54	Sensor Kalibrasyon Uçuş Testleri	53	1	2	2
55	Güvenli Uçuş Testleri	54	2	3	4
56	Çevresel Koşullar Uçuş Testleri	55	1	2	3
57	Uçak Sistemleri Uçuş Testleri	56	4	4	6
58	Performans Uçuş Testleri	57	4	6	8
59	Yük Uçuş Testleri	27, 58	6	8	10
60	Aviyonik Sistemler Uçuş Testleri	57	8	8	12
61	Silah Sistemleri Uçuş Testleri	59, 60	18	24	24
62	Düşük Görünürlük Testleri	61	4	4	5
63	Kabul Uçuş Testleri	26, 62	3	3	4

PERT ile proje genelinde ve her bir aktivite için aktivite gerçekleşme süresi anlamında tahminler yapılabilir. **Tablo 1**'de verilen süreler göz önünde bulundurularak aktivite sürelerinin beklenen değerleri ve varyansları hesaplanmıştır ve ilgili değerler **Tablo 2**'de verilmiştir.

**Şekil 2**'de verilen serim üzerinden matematiksel model oluşturulmuş ve modelin çözümü CPLEX IBM ILOG 20.1.0 programı ile gerçekleştirilmiştir. Çözümler Intel Core 2 Duo 2.0 GHz CPU özelliğinde bilgisayarda elde edilmiştir. Beklenen proje tamamlanma süresi 202,17 olarak bulunmuş ve proje kritik aktiviteleri elde edilmiştir. Kritik ve kritik olmayan aktiviteler **Tablo 2**'de gri (kritik aktiviteler) ve beyaz (kritik olmayan aktiviteler) renk kodları ile belirtilmiştir.

**Tablo 2.** Proje aktivitelerinin beklenen süre / varyans değerleri

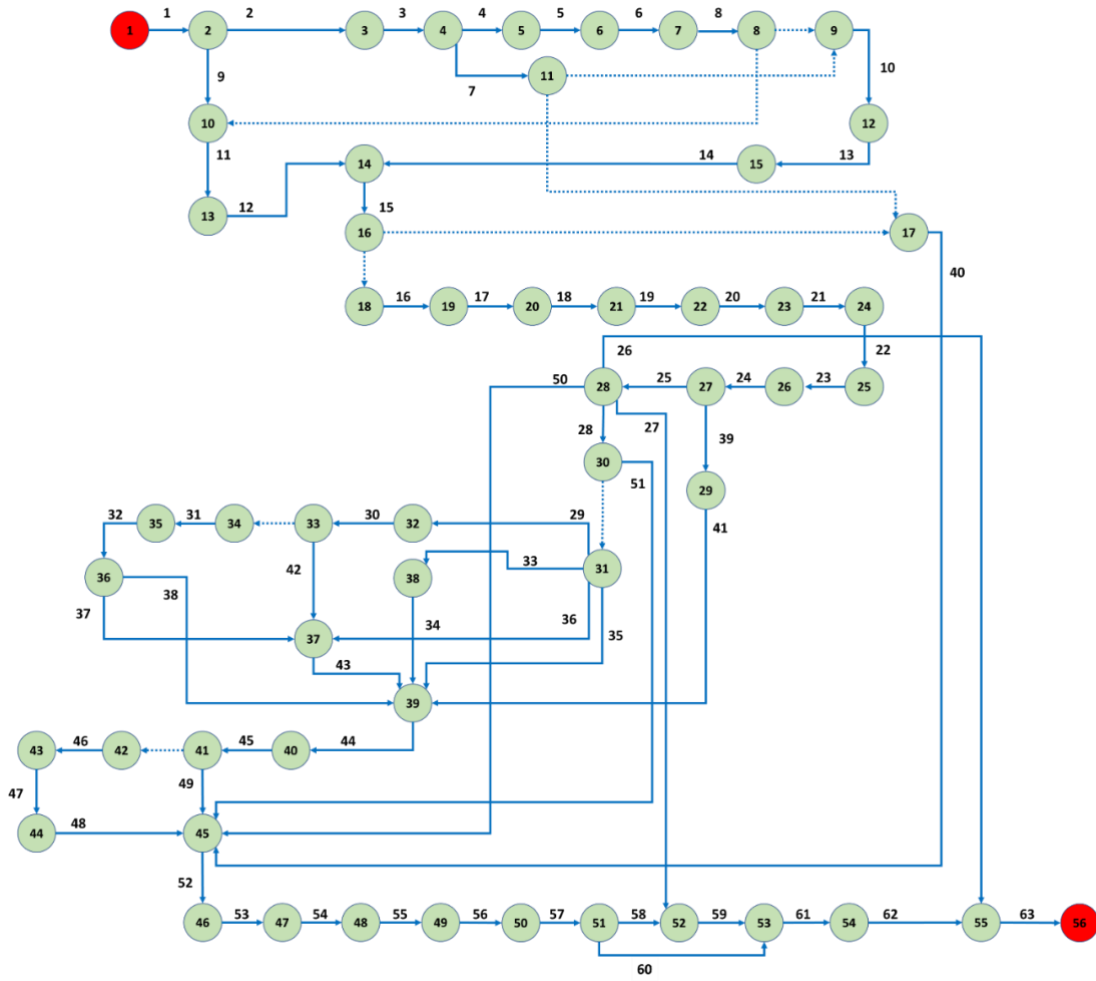
Aktivite #	Aktivite	Beklenen Süre (Ay)	Varyans
		$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6}$	$\sigma^2 = \left[ \frac{t_c - t_a}{6} \right]^2$
1	Konsept Belirleme	6,00	0,44
2	Farklı Alternatiflerin Analizi	8,33	1,00
3	Sözleşme İmzası	2,17	0,25
4	Planform Seçimi	3,17	0,69
5	Uçak Seviyesi Teknik Çizimler	6,33	0,11
6	Rüzgâr Tüneli	11,67	1,00
7	Malzeme Testleri	12,00	1,00
8	Detay Analizler	18,33	2,78
9	Alt Sistem Tedarik Anlaşmaları	6,00	1,00
10	Hammadde Tedariki	12,50	2,25
11	Teknik Çizimlerin Yayınlanması	6,17	0,69
12	Montaj Ekipmanlarının Tedariki	6,00	0,44
13	Alt Seviye Komponent Üretimleri	3,00	0,11
14	Kalite Kontrol	1,17	0,03
15	Ön Gövde Montajı	3,00	0,11
16	Ön Orta Gövde Montajı	3,00	0,11
17	Orta Gövde Montajı	4,00	0,11
18	Ana Gövde Fuselage Montajı	3,00	0,11
19	Kanat Birimlerinin Montajı	1,17	0,03
20	Arka Gövde Montajı	4,00	0,11
21	Gövde Birleşimi	1,00	0,00
22	İniş Takımı Montajı	1,00	0,00
23	Stabilizatör Montajı	1,00	0,00
24	Motor Entegrasyonu	1,00	0,00
25	Montaj Hattı Testleri	2,00	0,11
26	Tam Boy Yorulma Testleri	98,00	36,00

Aktivite #	Aktivite	Beklenen Süre (Ay)	Varyans
		$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6}$	$\sigma^2 = \left[ \frac{t_c - t_a}{6} \right]^2$
27	Tam Boy Statik Yükleme Testleri	2,00	0,11
28	Alt Sistem Entegrasyonu	2,00	0,11
29	Elektrik Sistemi Testleri	2,00	0,11
30	Yakıt Sistemi Testleri	2,00	0,11
31	Hidrolik Sistem Testleri	3,00	0,11
32	Mekanik Sistem Testleri	5,83	0,69
33	Radar Sistemi Testleri	6,50	0,25
34	İletişim Sistemleri Testleri	4,17	0,25
35	Elektro-Optik Testleri	6,00	0,44
36	Uçuş Kontrol Sistemleri Testleri	6,00	0,44
37	İniş Takımı Testleri	3,83	0,25
38	Silah Sistemi Testleri	3,00	0,11
39	Motor Testleri	6,50	0,25
40	Kuş Çarpması Testleri	1,83	0,03
41	İklimlendirme Testleri	3,00	0,11
42	İlk Enerjilendirme Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	1,17	0,03
43	Entegre Uçak Sistemleri Testleri	8,67	0,44
44	Entegre Aviyonik Sistem Testleri	8,67	0,44
45	İlk Motor Çalıştırma Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	1,00	0,00
46	Kızıl-Ötesi Görünürlük	2,00	0,11

Aktivite #	Aktivite	Beklenen Süre (Ay)	Varyans
		$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6}$	$\sigma^2 = \left[ \frac{t_c - t_a}{6} \right]^2$
	Testleri		
47	Radar İzi Testleri	5,83	0,69
48	Yıldırım Testleri	2,00	0,11
49	Yerde Titreşim Testleri	1,17	0,03
50	Yağmur Testleri	1,17	0,03
51	Ağırlık Ve Balans Testleri	1,17	0,03
52	İlk Uçuş Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	1,83	0,03
53	Taksi Testleri	1,17	0,03
54	Sensor Kalibrasyon Uçuş Testleri	1,83	0,03
55	Güvenli Uçuş Testleri	3,00	0,11
56	Çevresel Koşullar Uçuş Testleri	2,00	0,11
57	Uçak Sistemleri Uçuş Testleri	4,33	0,11
58	Performans Uçuş Testleri	6,00	0,44
59	Yük Uçuş Testleri	8,00	0,44
60	Aviyonik Sistemler Uçuş Testleri	8,67	0,44
61	Silah Sistemleri Uçuş Testleri	23,00	1,00
62	Düşük Görünürlük Testleri	4,17	0,03
63	Kabul Uçuş Testleri	3,17	0,03

Kritik Aktiviteler  
 Kritik Olmayan Aktiviteler

Elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizini gerçekleştirmek amacı ile bulanık kritik yol metodu ile sonuçlar elde edilmiştir. Alfa kesme yöntemi ile [0,1] aralığında farklı  $\alpha$  değerleri için elde edilen sonuçlar ve bulanık süreli proje tamamlanma sürelerinin durulaştırma yöntemi ile elde edilen veriler **Tablo 3**'te sunulmuştur.



Şekil 2. Proje serimi

Tablo 3. Bulanık kritik yol metodu ile elde edilen sonuçlar

A	Proje Gerçekleşme Süresi	Durulaştırma yöntemi ile elde edilen süre $z^* = \frac{\sum \mu_c(z) * z}{\sum \mu_c(z)}$
0,0	202,5	202,15
0,1	202,45	
0,2	202,4	
0,3	202,35	
0,4	202,3	
0,5	202,25	
0,6	202,2	
0,7	202,15	
0,8	202,1	
0,9	202,05	
1,0	202	

Tablo 3'te elde edilen süreler incelendiğinde proje gerçekleşme süresi 202,15 olarak elde edilmiş ve bu değer alfa kesim aralığında 0,7 değerine karşılık gelmektedir. Ayrıca her bir  $\alpha$  değerinde elde edilen

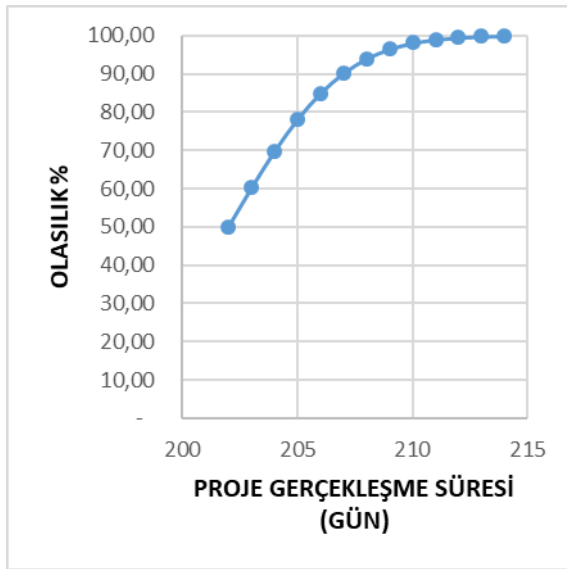
kritik yollar aynıdır ve PERT yönteminde bulunan kritik yola karşılık gelmektedir. Her iki yöntem ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde aynı kritik yol elde edilmesi ile birlikte projenin gerçekleşme sürelerinin çok yakın olduğu görülmektedir.

Müşterinin ihtiyaç tarihini öne alması veya proje süresinin uzaması gibi bir durumda projenin gerçekleşme olasılığının nasıl değişeceğini bulmak için farklı güven düzeylerine (0,99-0,50) ait sonuçlar hesaplanmış ve Tablo 4 ile verilmiştir. Ayrıca bu farklı güven düzeylerine göre grafiksel gösterimi ise Şekil 3'te verilmiştir.

Yapılan öngörüler diğer beşinci nesil savaş uçağı projeleri ile karşılaştırmak adına dünyada mevcut durumda operasyonel olarak kullanılan ve beşinci nesil olarak kabul edilebilecek tek uçak olan Amerika Birleşik Devletleri'nin geliştirdiği F-22 ve F-35 uçakları ile Rusya Federasyonu'nun geliştirdiği SU-57 savaş uçakları incelenmiştir.

**Tablo 4.** Süreye bağlı proje gerçekleştirme olasılıkları

Proje gerçekleştirme Süresi (Ay)	Olasılık (%)
202	50,00
203	60,21
204	69,77
205	78,13
206	84,98
207	90,22
208	93,98
209	96,50
210	98,08
211	99,01
212	99,52
213	99,78
214	99,91

**Şekil 3.** Süreye bağlı proje gerçekleştirme olasılıkları

ABD hava kuvvetleri ilerleyen süreçte F-15 ve F-16 savaş uçaklarının yerini alacak ve dünyadaki tehdit algılamalarına cevap verebilmesi amacıyla önceliği hava üstünlüğü sağlayabilecek bir savaş uçağı geliştirilmesi için konsept belirleme çalışmalarına 1983 yılında başlamıştır. 2 yılın ardından 1985 yılında konsept geliştirme faaliyetlerini bitirerek F-22 projesini başlattı. İlk uçuşunu Eylül 1997 yılında yapan F-22 savaş uçağı, Aralık 2005 yılında ABD hava kuvvetlerine teslim edilerek envantere girmiştir. F-22 projesi Konsept belirleme çalışmaları ile başlayıp envantere giriş ile son bularak toplamda yaklaşık 22 yıl sürmüştür [20].

ABD hava kuvvetleri 1993 yılında devam eden Çok Rollü Avcı Uçağı ve Gelişmiş Savaş Uçağı projelerini iptal ederek Ortak Gelişmiş Saldırı Teknolojisi programını başlattı. Bu projede amaç yeni bir uçak geliştirmek değil, uygun teknolojileri daha da

geliştirmek ve gelişmiş taarruz savaş konseptlerini göstermekti. Bu kapsamda ortaya çıkarılan F-35 savaş uçağı ilk uçuşunu Aralık 2006'da yapmış olmasına rağmen Temmuz 2015 yılında envantere girebilmiştir. F-35 projesi 1993 yılında başlatılan JAST programı dahil edilerek toplamda yaklaşık 22 yıl sürmüştür [21].

Rusya Federasyonu'nun geliştirdiği SU-57 savaş uçağı ile ilgili ilk çalışmalar 1980'lerin sonunda Sovyetler dönemine dayanmaktadır ancak siyasi gelişmeler bu projenin 2000'lere kadar başlatılmamasına sebep olmuştur. 2003 yılında başlatılan proje kapsamında Ocak 2010 yılında ilk uçuş yapılmış ve ilk uçak Aralık 2020 yılında envantere girmiştir. SU-57 projesi 2003-2020 yılları arasında toplam 18 yıl sürmüştür [22].

Dünyada gerçekleştirilmiş diğer projelerin ilk uçuş için ihtiyaç duyduğu sürelerden F-22'nin 165 aylık süresini kötümser ( $t_c$ ), SU-57'nin 84 aylık süresini iyimser ( $t_a$ ) ve F-35'in 155 aylık süresini olası ( $t_b$ ) süre olarak kabul eder ve **Eşitlik (4)** kullanırsa  $t_c$  değerine yaklaşık 145 ay olarak ulaşırız. Bu süre **Tablo 5**'te görüleceği üzere Türkiye'de geliştirilen savaş uçağı projesi ile ilgili olarak 146 ay olarak öngörülmüştür. Aynı şekilde ilk uçuştan envantere giriş için geçen süre için ilgili hesaplamalar tekrarlandığında ise 102 aylık bir  $t_c$  değerine ulaşılır. **Tablo 5**'te de görüleceği üzere Türk savaş uçağı projesinde bu süre 56 ay olarak görece daha kısa bir süre olarak tahmin edilmektedir.

**Tablo 5.** Savaş uçağı projelerinde süreler

AKTİVİTELER	F-22	F-35	SU-57	$t_c$ (F-22/F-35/SU-57)	Türk Savaş Uçağı Öngörü
Proje Başlangıcından İlk Uçuşa Kadar Geçen Süre	165 Ay	155 Ay	84 Ay	145 Ay	146 Ay
İlk Uçuştan Envantere Girişe Kadar Geçen Süre	99 Ay	90 Ay	131 Ay	102 Ay	56 Ay

Türkiye'de geliştirilen beşinci nesil savaş uçağı projesi incelendiğinde, proje gerçekleştirme süresi 202 ay olarak bulunmuştur. Kritik aktiviteler incelendiğinde ise genellikle üretim ve test aktivitelerinin proje süresi üzerinde yüksek etkisinin olduğu görülmüştür. Böyle büyük kapsamlı ve bazı teknolojilerin ilk defa kullanılacağı bir projede test süreçlerinde tahmin edilemeyecek hataların alınması ve bu süreçlerde beklenen sürelerin üzerine çıkılabileceği sürelerin kısaltılmaya çalışılması her ne

kadar mümkün görülsede riskleri attıracağı görülmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi sektörde bu tarz bir proje daha önce gerçekleştirilmediği için kurulacak alt yapıların ve ilk defa gerçekleştirilecek aktivitelerin de proje süresi üzerinde sonucu belirsiz etkileri olacaktır.

Konsept belirleme çalışmalarına 2011 tarihinde başlanan Türk savaş uçağı projesinde; ilk uçuş için yaklaşık 12 yıl, ilk uçuş sonrası envantere giriş için ise 56 aylık bir süre öngörülmektedir. Bu öngörülere göre ilk uçuşun 2023 yılı içerisinde yapılması beklenmekte olup, envantere giriş için ise 2027 yılı hedef gösterilmektedir.

Dünyada diğer ülkeler tarafından gerçekleştirilmiş projeler ile karşılaştırıldığında Türkiye’de geliştirilen savaş uçağı projesinin 146 aylık bir süre içerisinde uçurulması öngörüsü, ABD ve Rusya Federasyonunun geçmişte hayata geçirdiği birçok savaş uçağı projesi olduğu da göz önünde bulundurulduğunda, Türk Savunma Sanayisi için gayet iyimser ve zorlu bir hedefdir.

Diğer projelerin ilk uçuş sonrası genel doğrulama faaliyetlerini ve envantere giriş sürecini incelediğimizde diğer projelerde 91 aylık bir süre değerine ulaşılmakta olup, Türk savaş uçağı projesinde bu süre 56 ay olarak görece daha kısa bir süre olarak tahmin edilmektedir. Bu sürenin diğer projelerden çok daha kısa olmasına Türk Savunma Sanayisinin, savaş uçağı geliştirme stratejisinde kullandığı bloklandırma bakış açısı etkili olmuştur. Blok yaklaşım; projenin tüm ihtiyaç ve isteklerinin tek seferde karşılanması yerine birden fazla fazda, peyderpey ihtiyaç ve isteklerin yerine getirilmesini amaçlar. Bu strateji özellikle ilk defa geliştirilen projelerde çokça kullanılan ve başarı getiren bir stratejidir.

#### IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Savaş uçağı geliştirme projeleri sadece bir tasarım, üretim veya test aktivitesi olarak görülmemelidir. Bu tarz projelerde birbirleri ile etkileşimli, birbirleri ile bağlantılı ve öncül ardıl ilişkileri olan birçok aktivitenin belirli bir takvim ve plan çerçevesinde ilerletilmesi gerekmektedir. Hatta proje ile direkt olarak ilgisi olmayan alt yapıların inşası, o altyapılarda kullanılacak olan ekipmanların tedariki ve yıllar sonra yapılması planlanan testler için iş gücü ve bilgi birikiminin planlanması gibi çok farklı konuların da projeyi destekler nitelikte gerçekleştirilebilmesi için proje yönetimi çok önemlidir.

Bu çalışmada, Türkiye’nin geliştirdiği ilk savaş uçağı projesi kapsamında gerçekleştirilmesi gereken

aktiviteler üzerinden yapılan süre öngörülerinin muadil projelerin gerçekleşme süreleri ile uyumu irdelenmiş uyumlar ve uyumsuzluklar üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

Türk Savunma Sanayisi tarafından geliştirilmekte olan beşinci nesil savaş uçağının tasarım, üretim ve test faaliyetlerini kapsayan, proje başlangıcından ilk uçuşa kadar öngörülen sürenin daha önce gerçekleştirilmiş savaş uçağı projeleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. ABD ve Rusya Federasyonu gibi daha önce birçok proje geliştirmiş ülkeler ile uyumlu takvim tahmini yapılabilmesi Türk Savunma Sanayisi için bir risk olarak görülsede gelişen üretim, tasarım ve analiz metotlarının geçmişe göre daha etkin olması bu noktada pozitif etki yaratmıştır.

İlk uçuş sonrası gerçekleştirilen aktivitelerde de aynı etki pozitif olarak sürelerin kısaltılmasında etkili olsa da asıl büyük etki blok yaklaşımı ile operasyonel kabiliyetlerin peyderpey artırılarak ilk etapta müşterinin isteklerine en etkin ve en hızlı çözümü sunma stratejisidir.

Bu çalışmada herhangi bir kaynak kısıtı olmadan proje gerçekleşme süresi hesaplanmıştır. Gelecek çalışmalarda maliyet, kaynak kısıtı vb. durumlarda modellere entegre edilebilir, farklı noktalarda optimizasyonlar yapılabilir

#### KAYNAKLAR

- [1] Korkmaz, G. (2022). Gelecek Öngörülleri ve Alınan Dersler Çerçevesinde Savunma Tedarik Projeleri. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 1(41), 163-204.
- [2] Ercan Erşahin, N. (2019). *Sivas uçağı geliştirme programlarını olumsuz etkileyen faktörlerin önem derecelerinin belirlenmesi* (Master's thesis, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [3] Aksoy, A., Akansel, M., Atalay, C., Çamlıbel, A. M., Yaşar, D., Keseroğlu, D., & Vanlıoğlu, S. (2019). Proje Yönetiminde Zaman ve Maliyet Odaklı Bütünleşik Planlama Yaklaşımı ve Bir Uygulama. *Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, 8(1), 1-20.
- [4] Farida, Y., & Anenda, L. P. (2022). Network Planning Analysis on Road Construction Projects by CV. X Using Evaluation Review Technique (PERT)-Critical Path Method (CPM) and Crashing Method. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4), 377-390.
- [5] Bintang, M. R., Sungkono, K. R., & Sarno, R. (2019). Time and cost optimization in feasibility test of CCTV project using CPM and PERT. In *2019 International Conference on Information*

- and Communications Technology (ICOIACT) (pp. 678-683). IEEE.
- [6] Budiawati, G. I., & Sarno, R. (2019). Time and cost optimization of business process RMA using PERT and goal programming. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 17(2), 781-787.
- [7] Agyei, W. (2015). Project planning and scheduling using PERT and CPM techniques with linear programming: case study. *International journal of scientific & technology research*, 4(8), 222-227.
- [8] Temiz Kutlu, N. (2001). Proje planlama teknikleri ve PERT tekniğinin inşaat sektöründe uygulanması üzerine bir çalışma.
- [9] Karahan, M., & Ezin, Y. (2014). PERT-CPM Tekniğiyle Bir İnşaatın Yapım Süresi ve Maliyetlerinin Optimizasyonu. *Bartın University Journal of Faculty of Economics & Administrative Sciences/Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5(10).
- [10] Coşkun, O., & Ekmekçi, İ. (2012). Bir inşaat projesinin evreleri ile zaman ve maliyet analizinin proje yönetim teknikleri vasıtasıyla incelenmesi. *İstanbul ticaret üniversitesi fen bilimleri dergisi*, 10(20), 39-53.
- [11] Daniel, D. P., & Gabriela, N. (2013). Estimating the Duration of a Project Using PERT Technique. *Ovidius University Annals, Series Economic Sciences*, 13(2).
- [12] Ashadi, R. F., Husin, A. E., & Guntorojati, I. (2022). Infrastructure Construction Projects Scheduling Using Manual-Program Evaluation and Review Technique (M-PERT) Method, *Jurnal Teknik Sipil*, 29(2), 125-132.
- [13] Ahmad, S. H., Bon, A. T., Rasi, R. Z. R. M., Kek, S. L., Raja, P., & Pahat, B. Project Management Scheduling through Integrated PERT and Gantt Chart.
- [14] Ahmed, A., Kayis, B., & Amornsawadwatana, S. (2007). A review of techniques for risk management in projects. *Benchmarking: An International Journal*, 14(1), 22-36.
- [15] Sadow, R. M. (1964). How PERT was used in managing the X-20 (Dyna-Soar) program. *IEEE Transactions on Engineering Management*, (4), 138-154.
- [16] Desticioğlu, B. (2022). Project planning with CPM and PERT methods: Example of defence industry. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 18(2), 363-385.
- [17] Alharkan, I. M. (2005). Algorithms for sequencing and scheduling. *Industrial Engineering Department, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia*.
- [18] Chen, S. P. (2007). Analysis of critical paths in a project network with fuzzy activity times. *European Journal of Operational Research*, 183(1), 442-459.
- [19] Elizabeth, S., & Sujatha, L. (2013). Critical path problem under fuzzy environment. *International Journal of Computer Applications*, 75(1), 7-11.
- [20] Jenkins, D. R. (2001). *Lockheed secret projects: Inside the skunk works*. Zenith Imprint.
- [21] Steidle, C. E. (1997). The joint strike fighter program. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 18(1), 7.
- [22] Butowski, P. (2021). *Su-57 Felon*, Key Publishing.

## Determination of Subcontractor Selection Criteria from the View of Occupational Health and Safety in the Construction Industry

Sefa ÇEKÜÇ<sup>1</sup>, Gürkan Emre GÜRCANLI<sup>2</sup>, Fırat Doğu AKIN<sup>3</sup>, Özge AKBOĞA KALE<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

<sup>2</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

<sup>3</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

<sup>4</sup>*İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye*

### Abstract

Construction industry is characterized by labor-intensive workforces, subcontractor-based production, diverse activities, and related hazards. Given the commonality of contingent forms of contracting, the majority of construction work is carried out by subcontractors. Unlike main contractors, subcontractors are typically smaller or medium-sized companies. Their awareness, practice, and compliance with health and safety legislation can be problematic. Furthermore, establishing and implementing a safety management system for a specific project requires coordination and management of multiple subcontractors. In this paper, a model has been created for selecting the most suitable subcontractor through an evaluation of their occupational health and safety (OHS) management implementation. The selection criteria have been determined based on a literature review focused on OHS, followed by the development of a questionnaire that assesses the importance of the criteria with the support of five occupational safety experts. Three shopping mall projects were chosen for implementation based on expert evaluations using scores calculated through the Analytical Hierarchy Process. Importance rates for each criterion were calculated, allowing for the identification of the most significant subcontractor selection criteria. Fifteen on-site subcontractors were evaluated using the proposed method. The research suggests that in the absence of qualification-based selection criteria for subcontractors, unskilled personnel could be selected. Consequently, this could impede the safety oversight mechanism, the execution of OHS measures, as well as the mitigation and/or prevention of potential risks, while jeopardizing compliance with the applicable legislation throughout the project. Therefore, it is imperative to choose only competent subcontractors to guarantee the welfare of workers.

**Keywords:** Construction Industry, Subcontractor Selection, Occupational Health and Safety, Analytical Hierarchy Process

### I. INTRODUCTION

The construction industry in Turkey has acquired noteworthy experience and the capacity to execute intricate projects in various domains and regions globally. Although there have been positive developments in various areas, the industrial sector still has inadequate labour rights and poor levels of occupational safety and health. There have been some new legislative measures and on-site practices implemented in the industry. However, work-related accidents in construction have caused significant issues in several countries [1-3]. Occupational accidents, particularly those resulting in fatalities, continue to rise. The rate of fatal occupational injuries in Turkey is considerably higher in comparison to other European countries [4-6]. Technical term abbreviations, if any, have been explained accordingly.

According to Social Security Institution (SSI) statistics, in 2021, a total of 511,084 accidents occurred in all sectors, resulting in 3,123 individuals receiving incapacity benefits and 1,382 fatalities [7]. Out of these, 967 individuals from the construction sector received incapacity benefits, and 386 lost their lives due to occupational accidents. The language used is formal with a balanced approach and precise word choice to maintain objectivity. The text adheres to conventional academic structure, citation style, and grammatical correctness, with logical progression in sentence structuring. In other words, the construction industry accounts for a significant number of occupational accidents resulting in fatalities, with 31% and 28% of all accidents attributed to this sector (Table 1). These statistics suggest that current safety measures may be inadequate in reducing the overall incidence of such



accidents. In other words, the construction industry accounts for a significant number of occupational accidents resulting in fatalities, with 31% and 28% of all accidents attributed to this sector (Table 1).

**Table 1: Occupational Accident Statistics for Turkey, 1992-2021**

Year	Total accidents			Fatality		
	All industries		Construction Industry	All industries		Construction Industry
	Frequency	Frequency	%	Frequency	Frequency	%
1992	139414	22863	16.40	1776	559	31.48
1993	109563	17535	16.00	1516	464	30.61
1994	92087	13991	15.19	1191	421	35.35
1995	87960	12809	14.56	798	348	43.61
1996	86807	11784	13.57	1296	555	42.82
1997	98318	14703	14.95	1282	437	34.09
1998	91895	12355	13.44	1094	380	34.73
1999	77955	10278	13.18	1165	407	34.94
2000	74847	7845	10.48	1167	379	32.48
2001	72367	8459	11.69	1002	341	34.03
2002	72344	7982	11.03	872	319	36.58
2003	76668	8198	10.69	810	274	33.83
2004	83830	8106	9.67	841	263	31.27
2005	73923	6480	8.77	1072	290	27.05
2006	79027	7143	9.04	1592	397	24.94
2007	80602	7615	9.45	1043	359	34.42
2008	72963	5574	7.64	865	297	34.34
2009	64316	7924	12.32	1171	170	14.52
2010	62903	7102	11.29	1444	507	35.11
2011	69227	8543	12.34	1700	597	35.12
2012	74871	10002	13.36	744	285	38.31
2013	191389	26967	14.09	1360	542	39.85
2014	221366	29699	13.42	1626	501	30.81
2015	241547	33361	13.81	1252	473	37.78
2016	286068	44552	15.57	1405	496	35.30
2017	359653	62802	17.46	1633	587	35.95
2018	430985	77157	17.90	1541	591	38.35
2019	422463	47701	11.29	1147	368	32.08
2020	384262	44304	11.53	1231	347	28.19
2021	511084	58107	11.37	1382	386	27.93

It is notable that subcontracting is a widespread practice in the construction industry, observed globally including in Turkey. Ninety-nine percent of Hong Kong's housing sector relies on subcontracting, with only one percent being direct employment. According to a report, many countries, including Japan and the United Kingdom, rely heavily on subcontracting [8]. Turkey is among the countries where the use of subcontractors is widespread due to the specificity of the sector [9]. Subcontractors are a crucial aspect of a successful project, and selecting the appropriate subcontractor is key to achieving that success. However, research indicates that choosing the right subcontractor can significantly enhance project success [10]. Subcontractors are a crucial aspect of a successful project, and selecting the appropriate subcontractor is key to achieving that success. Despite the importance

of this selection process, it is often overlooked or undervalued.

Subcontractor legislation in Turkey is generally determined by legal regulations such as the Turkish Commercial Code, General Specifications for Construction Works, Occupational Health and Safety Law. The Turkish Commercial Code contains general provisions on labour relations and regulates commercial law. The General Specification for Construction Works, which determines the general conditions applied in construction projects, includes the relations and contractual provisions between the subcontractor and the main contractor. The Occupational Health and Safety Law regulates occupational health and safety standards in the construction industry and sets out the rules that subcontractors must comply with. The Turkish Code of

Obligations regulates contracts and the obligations arising from these contracts, and contracts between the subcontractor and the main contractor are handled within the framework of this law. In addition, the Code of Ethics on Contractor-Subcontractor Relations set by the Turkish Employers' Association of Construction Industries (INTES) and the Turkish Contractors Association (TMB) sets out the standards of ethical behaviour in the sector. Within the framework of this legislation, construction companies operating in Turkey are obliged to comply with these regulations and fulfil their obligations in their subcontractor relations.

As working with subcontractors offers several benefits, owners typically prefer to do so. Eccles (1981) outlines advantages of subcontracting such as reducing the management burden, solving complex problems more easily, risk-sharing, and lowering material costs [11]. Costantino et al. (2001) outlined the benefits of employing subcontractors, which include reduced responsibility for the owner/main contractor, decreased overheads and costs for construction and equipment, market flexibility, decreased construction time, and improved quality of labour work [12]. Winch (1998) suggests that although safety regulations can be challenging to implement, especially when dealing with subcontractor workers, they face a lower risk of fatality than those employed by major contractors [13]. Working with subcontractors has several advantages, but it can make it challenging to maintain proper occupational health and safety (OHS) practices at the construction site [14]. This is because employers often prioritize criteria such as cost, quality, and experience when selecting subcontractors, instead of giving adequate importance to OHS. Factors such as Communication and Coordination, OHS Training, Contractual Arrangements, Monitoring and Enforcement, Risk Assessment, Penalties for Non-Compliance can be listed as problems that may be encountered in terms of occupational safety when working with subcontractors [15].

As subcontractors carry out the majority of the work, the selection process should prioritize OHS to ensure that owners make it one of their main concerns. The research aims to introduce a method to aid employers in subcontractor selection with a focus on Occupational Health and Safety (OHS) evaluation. The study presents a subcontractor selection approach using Analytic Hierarchy Process (AHP) to lessen occupational accidents.

## 2. MATERIAL AND METHODOLOGY

Since the purpose of this study is to furnish employers with a method for selecting subcontractors based on Occupational Health and Safety standards, the initial stage involved the identification of the top 20 most commonly experienced criteria. The Analytical Hierarchy Process (AHP) was utilised to ascertain the

significance of these criteria. Analytical Hierarchy Process (AHP) is a mathematical technique employed by decision-makers to assess criteria and make informed decisions in complex processes [16]. Introduced by Myers and Alpert in 1968 and later developed by Thomas Saaty in 1977, AHP is a methodology based on individuals' intuition that solves issues relating to multiple variables. It is applied across several industries today [17-18].

The Analytical Hierarchy Process (AHP) is a mathematical theory that allows users to measure both quantifiable and non-physical criteria. The AHP process is based on the modelling of the human brain in terms of experience and knowledge, thus enabling its application in decision theory [16]. Researchers have long been concerned with evaluating physical and psychological events related to decision-making. Physical evaluations rely on objective measurements, whereas psychological evaluations involve subjective assessments based on concepts like ideas, beliefs, and feelings. AHP (Analytic Hierarchy Process) is a theory that bridges the gap between these two worlds [17]. Pairwise comparison is the basis of AHP, with a predetermined decision scale and percentage of importance guiding the final outcome.

The data analyse procedure involves the following steps. First the pairwise comparison matrix which is called matrix A is extracted from the data collected from the interviews. The principal right eigenvector of the matrix A is computed as 'w'[19].

If  $a_{ik} \cdot a_{kj} = a_{ij}$  is not confirmed for all k, j, and i the Eigenvector method is selected [20].

If the matrix is incompatible and in case of incomplete consistency, pair comparisons matrix cannot be used normalizing column to get Wi.

For a positive and reversed matrix, Eigenvector technique can be used which in it:

$$e^t = (1, 1, \dots, 1)$$

$$W = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{A^k \cdot e}{e^T \cdot A^k \cdot e} \quad (1)$$

To reach a convergence among the set of answers in to successive repetition of this process, calculation should be repeated several times in order to take a decision when facing an incompatible matrix. Then, the following formula is applied to transform the raw data into meaningful absolute values and normalized weight  $w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$ :

$$Aw = \lambda_{\max} w, \lambda_{\max} \geq n$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum a_{ij} w_j - n}{w_1} \quad (2)$$

$$A = \{a_{ij}\} \text{ with } a_{ij} = 1/a_{ji} \quad (3)$$

A: pair wise comparison  
 w: normalized weight vector  
 $\lambda_{max}$  : maximum eigen value of matrix A  
 $a_{ij}$ : numerical comparison between the values i and j  
 The decision scale utilised in this investigation can be found in Table 2.

Prior to assessing the hierarchy, it is crucial to establish a goal and then outline the primary and secondary categories to facilitate decision-making. Subsequently, relationships are established and pairwise comparisons are conducted in accordance with the hierarchy table. Decision makers evaluate the criteria and determine their relative importance.

**Table 2.** The Scale of Importance.

Intensity of Importance	Definition
1	Equal Importance
3	Moderate Importance
5	Strong Importance
7	Very Strong or Demonstrated Importance
9	Extreme Importance
2,4,6,8	Intermediate Values

Once the pairwise comparison matrices have been completed, the same criteria are assigned an importance degree of 1. Each value in each column is then divided by the sum of its own column. This process is repeated for each component of the comparison matrix. An average of each row is taken to obtain a priority vector, which indicates the percentage of importance for each

criterion. Despite the consistency of the AHP method, it is still necessary to measure its consistency. To assess the consistency of the approach, one should evaluate the Consistency Rate (CR) by multiplying the comparison matrix and priority vector. In order to validate the results of the AHP, the consistency ratio (CR) is calculated using the formula,  $CR = CI/RI$  in which the consistency index (CI) is, in turn, measured through the following formula:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{4}$$

After obtaining a new vector, each of its components is divided by the components of the priority vector. The resulting values are then averaged to calculate the  $\lambda$  value, which is later used to calculate the Consistency Indicator (CI). The calculated CI values are then divided by the Random Indicators (RI) according to the number of criteria (n). To ensure necessary contingency, the CR value must be less than 0.1.

A hierarchical model was devised to assess 20 criteria, obtained as a result of literature review and expert opinions, achieved through AHP. The model comprises three principal categories: Training, OHS Management and Planning. The OHS Management has two sub-categories: Site Operation Management and General Management. The selection criteria are displayed in Table 3.

**Table 3.** Frequency of Criteria Presence in Literature.

No	Criteria	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	Frequency
1	Fall Prevention and Trainings	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100%
2	Construction Machinery - Equipment Inspection, Maintenance	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100%
3	Material Loading / Unloading / Lifting Trainings	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100%
4	First aid training	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	90%
5	Emergency Action Plan	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	90%
6	Personal Protective Equipment	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	90%
7	OHS Monitoring and Inspection System	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	90%
8	Planning of Site Traffic	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	90%
9	Job Description, Duties and Responsibilities of OHS Personnel	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	90%
10	Standards related to scaffolding, installation, maintenance, inspection	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	90%
11	OHS Management System			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	80%
12	Machinery - Equipment Use Trainings	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	80%
13	Trainings Related to Electrical Installation	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	80%
14	Health Screening	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	80%
15	Construction Method	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓		70%
16	OHS Registration and Reporting			✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	70%
17	The Participation of OHS Policies in Management			✓	✓		✓		✓	✓	✓	60%
18	Site Planning and Planning of Social Units	✓	✓						✓	✓	✓	50%
19	OHS Budget	✓		✓					✓	✓		40%
20	Arranging the entrance to the job site				✓			✓		✓	✓	40%

A survey was administered to nine occupational safety experts, all actively working engineers with at least 5 years of experience. They also have at least one certificate related to occupational health and safety. All respondents provided feedback, and the results were accepted. Of those, 5 meet the 0.1 consistency threshold and the remainder were excluded. The number of respondents required for the AHP depends on the complexity of the problem, the availability of data, and the desired level of accuracy and reliability. There is no definitive answer to this question, but some general guidelines can be followed. According to Saaty (1980), the minimum number of respondents should be at least three, and preferably more than five [21]. However, this number may vary depending on the nature and scope of the problem, and the degree of consensus among the respondents. Some studies have suggested using larger sample sizes, such as 10, 15, or 20, to increase the validity and robustness of the results. However, larger sample sizes also increase the complexity and cost of the data collection and analysis and may introduce more inconsistency and noise in the judgments. Therefore, a trade-off between quality and quantity should be considered when choosing the number of respondents for the AHP.

The Superdecision Packaged Program was utilized to apply the Analytic Hierarchy Process (AHP) Method. Survey responses were fed into the program to generate pairwise comparisons. Five significance levels were obtained for each criterion and their geometric mean was used to determine the level of significance. An evaluation method was developed by occupational safety specialists through generating a success scale categorized as "successful", "adequate", "average", "below the average", and "unsuccessful". Finally, a case study was conducted to assess five subcontractors at three shopping malls.

**Table 4: CR Values According to Specialist.**

Main Headings	#1	#2	#3	#4	#5
Training	0.055	0.02	0.098	0.015	0.109
Site Operation Management	0.071	0.085	0.112	0.0833	0.097
General Management	-	0.099	-	0.043	0.099
Planning	0.022	0.029	0.135	0.028	0.026

Upon analysis of Table 5, it becomes apparent that these rankings offer the owner insights into appropriate actions to be taken against subcontractors regarding OHS. Table 5 clarifies that "Successful" means the subcontractor has fulfilled OHS obligations and is deemed suitable for OHS standard selection, while "Capable" denotes that the subcontractor has fulfilled its obligations but ought to improve OHS performance. An "average" subcontractor may have some deficiencies, therefore it is imperative to assess their experience before choosing and signing a construction contract. The term "below average" indicates that the subcontractor poses significant risks to occupational health and safety, hence the selection process should be

### 3. QUESTIONNAIRE AND CASE STUDY

The data used in the AHP method were obtained from three successive questionnaire studies. Pairwise comparison questionnaires were sent to nine seasoned OHS experts. Only five experts were considered qualified as four of them had a consistency rate below 0.1. Table 4 shows that all CRs, except the three CR values of two experts, are below 0.1. A consistency ratio of just over 0.1 is generally an acceptable level, but this value depends entirely on acceptability. A lower consistency ratio may raise concerns about the reliability of decisions, in which case the decision matrix should be revised [22].

In the second phase of the study, a distinct survey was conducted by sending questionnaires to three OHS specialists actively involved in three distinct shopping mall projects located in Turkey. All of the respondents who expressed opinions are Class A occupational safety specialists with 4, 6 and 7 years of experience in large-scale construction projects, respectively. The first mall flaunts a capital budget of 100 million euros and occupies a construction area of 180,000 square meters, while the second has a capital budget of 60 million euros, covering an area of 120,000 square meters. The final project, with a capital budget of 25 million euros, encompasses a construction area of 45,000 square metres. Fifteen subcontractor companies were selected based on their specialty in areas such as rough works, electrical works, and mechanical works. The companies were then rated by a Specialist on a scale of 100. In the third section, Table 6 was sent to the Specialist, along with pairwise comparison surveys. By averaging these surveys, a success scale was determined.

approached with caution and it may be more sensible to consider another subcontractor. "Unsuccessful" refers to the subcontractor being unsuitable for further consideration due to their insufficient performance and problematic conduct, which is unacceptable.

**Table 5: OHS Success Point Evaluation Scale Survey**

When a firm evaluated in compliance with Scores OHS on the scale of 100, how much point the firm should take?

Successful
Capable
Average
Below Average
Unsuccessful

After conducting a questionnaire study, we developed a hierarchy model for the SuperDecision programme by categorising criteria. The model comprises main headings and subheadings, which are illustrated in Figure 1. Using the SuperDecision programme, we calculated the weights of criteria by comparing the pairwise matrices according to the hierarchy model. Using the SuperDecision programme, we calculated the weights of criteria by comparing the pairwise matrices according to the hierarchy model. Using the SuperDecision programme, we calculated the weights of criteria by comparing the pairwise matrices according to the hierarchy model. The programme then presented the weights and order of importance, as shown in Table 6. The total of average criterion weights is 4. Each criterion weight is normalised (divided by 4). The most important criterion is the first one with a weight of 9.35%, followed by the fourth criterion at 8.23%, and the fifth criterion at 7.30%. As demonstrated in Table 6, the first 7 criteria represent half of the total importance level. Respondents to whom the pairwise comparison questionnaires were sent were also asked about the minimum scores that a subcontractor should receive in order to be "Successful", "Capable", "Average", "Below Average" and "Unsuccessful". The questionnaire was completed by an OHS Specialist and the findings are displayed in Table 7. To determine the

performance of five primary subcontractors across three shopping malls based on OHS standards, we calculate the average of expert values. OHS assessments based on value ranges are used, including "successful," "capable," and others. These ranges are defined as follows: 86-100: Successful, 74-85: Capable, 58-73: Average, 42-57: Below Average, and 0-41: Unsuccessful.

After assessing the three shopping centres, success points are assigned based on the evaluation scores given by OHS specialists who work on site and the normalized criteria weights in Table 6. This process is applied to all criteria and each subcontractor, with points being calculated by multiplying the scores on a scale of 100. The review of subcontractors is conducted based on success points, and the findings are outlined in Table 8. The 5 subcontractors to be taken into consideration in this assessment are identified as Rough Construction, Mechanical Works, Electrical Works, Fine Works and Facade Works subcontractors with high work volumes and number of workers. The initial shopping mall receives the least favourable score in the category of facade works. When compared to the two other malls, this shopping mall also records the poorest score for rough works, which is the category in which on-site accidents take place.

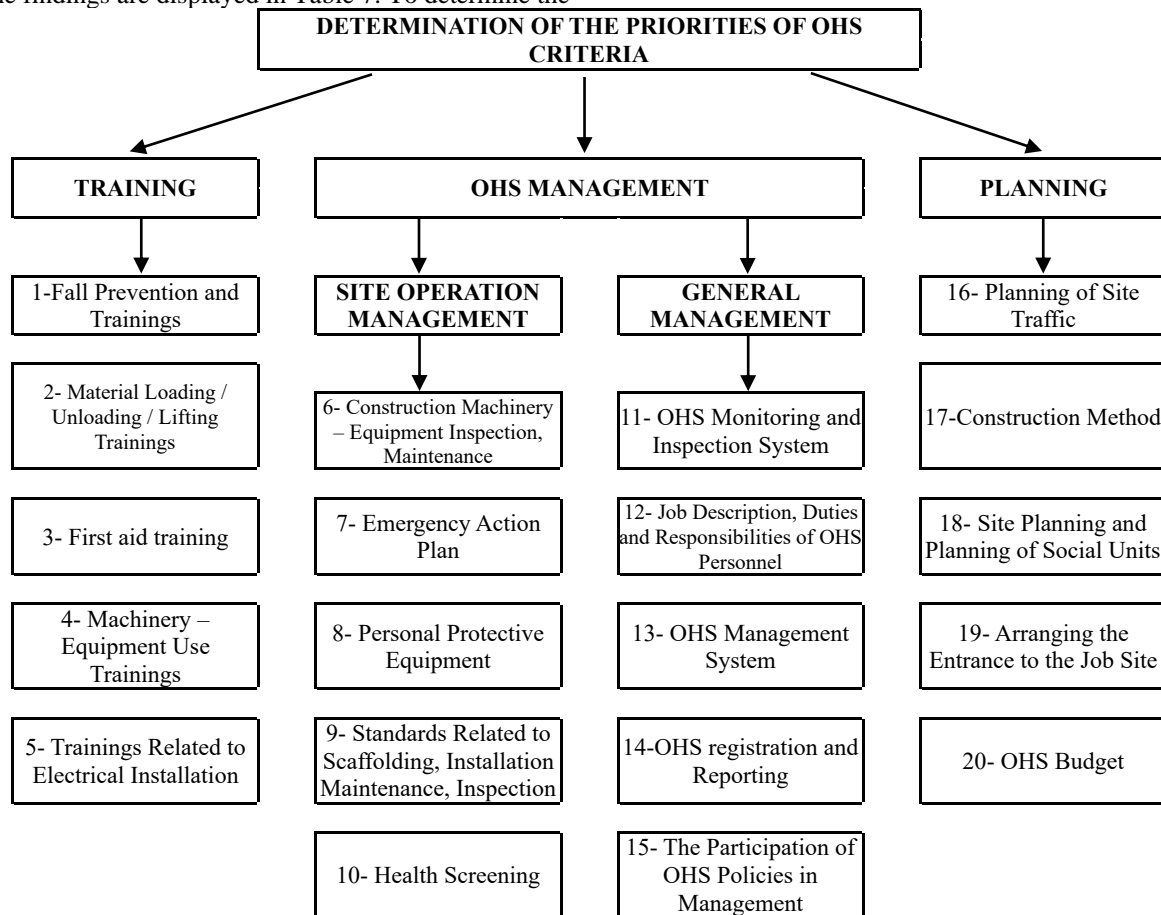


Figure 1. System of Hierarchy Model of SuperDecision Program

**Table 6: Weights and Order of Importance and Importance Rate of Criteria**

Criteria	Criteria Weight					Av.	Order of Importance					Importance Rate	
	Expert #1	Expert #2	Expert #3	Expert #4	Expert #5		Expert #1	Expert #2	Expert #3	Expert #4	Expert #5	Average	Priority Rate
#1	0,5826	0,3777	0,5055	0,3159	0,089	0,3741	1	2	2	4	11	0,0935	9,35%
#2	0,168	0,0837	0,1401	0,2238	0,1523	0,1536	7	16	15	9	8	0,0384	8,23%
#3	0,0372	0,0793	0,0362	0,0425	0,0573	0,0505	20	17	19	20	17	0,0126	7,30%
#4	0,0621	0,0935	0,1632	0,2958	0,0342	0,1298	18	15	12	5	18	0,0325	6,54%
#5	0,1501	0,3657	0,1551	0,122	0,6673	0,292	10	4	13	15	1	0,073	6,42%
#6	0,3059	0,2834	0,5956	0,3935	0,0666	0,329	5	6	1	1	15	0,0823	6,08%
#7	0,0839	0,0486	0,0367	0,0915	0,4199	0,1361	17	19	18	18	3	0,034	5,90%
#8	0,187	0,1831	0,1412	0,1365	0,0271	0,1349	6	10	14	13	20	0,0337	5,84%
#9	0,338	0,4446	0,1927	0,2665	0,0666	0,2617	4	1	11	7	15	0,0654	5,02%
#10	0,0853	0,0403	0,0339	0,112	0,4199	0,1383	16	20	20	16	3	0,0346	4,85%
#11	0,4286	0,2763	0,2	0,1854	0,0888	0,2358	3	7	6	10	12	0,059	4,33%
#12	0,1429	0,168	0,2	0,1405	0,1662	0,1635	12	11	6	12	7	0,0409	4,09%
#13	0,1429	0,1214	0,2	0,2447	0,5071	0,2432	12	12	6	8	2	0,0608	3,92%
#14	0,1429	0,2284	0,2	0,1065	0,1053	0,1566	12	8	6	17	10	0,0392	3,84%
#15	0,1429	0,206	0,2	0,3228	0,1326	0,2009	12	9	6	3	9	0,0502	3,55%
#16	0,0608	0,0614	0,3685	0,0672	0,4129	0,1941	19	18	3	19	5	0,0485	3,46%
#17	0,1446	0,3736	0,1063	0,172	0,0703	0,1734	11	3	16	11	13	0,0434	3,40%
#18	0,1571	0,1109	0,2409	0,1299	0,0703	0,1418	8	14	5	14	13	0,0355	3,37%
#19	0,1571	0,1141	0,2412	0,3595	0,4129	0,257	8	13	4	2	5	0,0643	3,24%
#20	0,4804	0,34	0,0431	0,2714	0,0337	0,2337	2	5	17	6	19	0,0584	1,26%

**Table 7: OHS Success Point Evaluation Scale Survey Results**

Expert	#1	#2	#3	#4	#5	Av.
Successful	85	90	81	85	90	86
Capable	70	80	71	70	80	74
Average	50	60	51	60	70	58
Below the Average	30	40	31	50	60	42
Unsuccessful	0	30	0	40	50	24

**Table 8: Scores of shopping malls According to OHS Experts**

	Rough Construction	Mechanical Works	Electrical Works	Fine Works	Facade Works
First Shopping Mall	44	71	70	45	30
Second Shopping Mall	54	87	78	72	93
Third Shopping Mall	65	69	69	68	63

The findings demonstrate the significance of the suggested method of choosing subcontractors. "Fall Prevention and Trainings" was the most important criterion with 9.35%. The 2nd most important criterion is "Construction Machinery – Equipment Inspection, Maintenance" with an importance level of 8.23% and the 3rd most important criterion is "Trainings related to Electrical Installation" with an importance level of 7.30%. There are 9 criteria with an importance level above 5%. The sum of the importance of the first 5 criteria is 37.84%, the sum of the importance of the first 7 criteria is 50%, the sum of the importance of the first 10 criteria is 65.54%, and the sum of the importance of the first 15 criteria is 85.26%.

To comply with current health and safety legislation and implement safety management on site, subcontractors must fulfil twenty requirements before

tendering, allowing the prime contractor to pick the most suitable candidate. Nevertheless, the field study discloses that the majority of subcontractor firms (12 out of 15) were incapable of fulfilling the "successful" and "competent" criteria. The professionals at these three construction sites also noted that had this selection method been applied before the commencement of projects, not only safety concerns but also project management practices would have been enhanced.

#### IV. DISCUSSION AND CONCLUSION

Construction is a collaboration of businesses spanning various sectors, working together to complete a project within a specified timeframe. Each project presents unique challenges as a result of its individual characteristics. Multiple objectives are anticipated to be

met simultaneously, including timely delivery to the owner, adhering to budget constraints, achieving desired standards of quality, and ensuring the absence of any workplace incidents. Every subcontractor that enters this intense environment must be carefully selected. If we consider the construction process as a machine, the gears in every part must run smoothly. Any issues within a single part of the machine can result in problems throughout the entire system, just as issues with a subcontractor can cause problems for not only themselves but also for other subcontractors. Thus, subcontracting is noted for its adverse health and safety (H&S) influence in construction [23]. Loosemore and Andonakis (2007) also mentioned that subcontracting has also created many management problems for principal contractors which have been widely recognised as contributing to inefficiencies in the industry, because of the complex contractual relationships which can confuse responsibilities for OHS management and reporting [15]. To avoid such problems, it is imperative that subcontractors are thoroughly evaluated and selected during the bidding process.

This study presents a method for assessing subcontractors' compliance with occupational health and safety standards, both during the selection process and throughout the project. Subcontractors can be evaluated based on these criteria during selection, and their performance can be regularly assessed for continuous improvement following globally recognised standards. The aim of this study was to create a projection for Turkey by examining three shopping centre construction projects from different provinces, which were selected as examples. A hierarchy model was created by dividing 20 criteria found through literature review into main and sub-headings, and "Binary Comparison Questionnaires" were formulated based on this model for OHS experts. AHP was applied in the study. The hierarchy was constructed using the Superdecision program. Participants' responses were entered in the program to generate paired comparison tables.

The study found that due to unique project characteristics, OHS practices are not amenable to standardization. A management system ought to be put in place at the outset of a project, taking into account its particular characteristics. Throughout the implementation, this system should be closely monitored and controlled. Interestingly, this matter has also been highlighted by Öztaş and Ökmen (2005) and Chinyio and Akintoye (2007) [24-25].

When carrying out bidding processes, it is necessary to enquire whether the subcontractor employs occupational safety personnel, assess the staff's OHS competencies, and ascertain if a management-approved job description exists. Additionally, Çiftçioğlu (2013) emphasizes the significance of selecting the most

appropriate subcontractor for the subcontracting works during the bidding process [26]. An OHS organization lacking systematic management will not yield effective outcomes [27]. Marzok et al. (2013) also took into account safety consciousness on the job site while identifying the most important factors that influence the selection of sub-contractors [28].

The initial aspect to consider when assessing a subcontractor is the presence of an OHS management system. Ross (2002) identified that an OHS management provided the basis for improved OHS performance appraisal of a construction project [29]. The subcontractor employees must operate under an OHS Management System to ensure adequate comfort levels and minimize the risks to an acceptable degree. This system of management ought to oversee the processes of follow-up, audit, reporting, evaluation, and improvement while also being sustainable and meeting various needs.

Following the transfer of work to the subcontractor, a Health and Safety Recording and Archiving System must be implemented by the Employer's subcontractor and its subcontractors [30]. All relevant data and documents, including training records, meeting minutes, practice reports, accident documentation, signed personnel documents, employment records, and health reports, must be entered into this recording and archiving system.

In addition, both the company and its subcontractors must maintain accident records, utilizing them to investigate causes and prepare detailed reports. Based on the report findings, it is necessary to implement measures against the identified risk factors that led to the accident. These reports must be archived by the company and factored into the development of a by learning from the past, the occurrence of accidents could be prevented [31]. These records serve as invaluable tools for investigating the root causes of accidents and preparing detailed reports. The systematic documentation of accidents enables organizations to identify patterns, trends, and areas of concern, facilitating informed decision-making and the implementation of preventive measures. By consistently analysing accident records, both the company and subcontractors can proactively address safety issues, continuously improve safety protocols, and mitigate the risk of future incidents. This commitment to thorough record-keeping not only enhances overall safety performance but also demonstrates a proactive approach to ensuring

OHS awareness should be promoted at all levels within the construction hierarchy. Thus, the selected company should not restrict training solely to on-site personnel but implement a dedicated OHS Training Program for management. The increased OHS knowledge at the main level of sanction power, the management, will

enhance the efficacy of OHS Practices. Implementing a dedicated Occupational Health and Safety (OHS) Training Program for management is essential for fostering a culture of safety within a company. By extending training beyond on-site personnel to include managerial staff, organizations can leverage leadership influence to prioritize safety [32]. This approach not only ensures compliance with legal requirements but also equips managers with the knowledge and skills needed for effective risk management, decision-making, and emergency preparedness. Furthermore, OHS training for management contributes to improved communication, employee morale, and productivity, as well as a commitment to continuous improvement. Integrating safety into the daily operations and decision-making processes of management establishes a foundation for a robust safety culture, ultimately creating a safer and healthier work environment for all employees [33].

It is preferable for the subcontractor to carry out the work in-house, rather than outsourcing to other subcontractors, as the long chain of subcontractors can lead to weakened and lengthened inspection and control mechanisms in all areas. If the subcontractor intends to engage other subcontractors in the work, they must select their own subcontractors while considering OHS. Therefore, the employer should specify the criteria and training determined when selecting its own subcontractor for the other subcontractors to follow. When assessing the employer's preferred company, they must specify that all established criteria shall apply to subcontractors. In construction, occupational health and safety also incurs a cost. Budgeting for OHS should be a priority during the project planning stage, accounting for project characteristics, risk assessment, personnel, and other relevant factors. This aligns with Cingilloğlu's findings [34]. Manu et al. (2013) suggests to restrict the layers of subcontractors on projects and to work with a regular chain of subcontractors [23].

When selecting a subcontracting company, it's crucial to take into account whether the proposal includes OHS expenses. In Turkey, these expenses aren't usually discussed during the proposal phase and are typically classified under general expenses. Subcontractors may cut costs in other areas in order to accommodate for unforeseen overhead expenses such as project extensions and additional personnel. When planning the OHS budget for the subcontractor company, it is important to avoid aiming to save money at the end of the work. Mayhew et al. (1997) specifically indicated that a large building contractor, using dozens if not hundreds of subcontractors, will find it extremely difficult to put an effective OHS control system in place, especially when competition in the tendering process makes cost minimisation the overriding criteria for survival [35].

The findings indicate that if selection criteria for qualified subcontractors is not conducted, unqualified subcontractors may end up being chosen. This, in turn, will have a direct impact on the safety management process, implementation of health and safety measures, risk mitigation and/or abatement and ensuring compliance with current legislation throughout the project. Therefore, it is crucial to select only qualified subcontractors to ensure the safety of workers and compliance with all legal requirements. The paper's approach illuminates how prime contractors can incorporate safety management into construction management practices on-site with qualified subcontractors.

## REFERENCES

- [1] Unsar, S., Sut, N. (2009). General assessment of the occupational accidents that occurred in Turkey between the years 2000 and 2005. *Safety Science*. (47), 614–619.
- [2] Akboğa Kale, Ö., Baradan, S. (2020). Identifying Factors that Contribute to Severity of Construction Injuries using Logistic Regression Model. *Teknik Dergi*. 31(2): 9919- 9940.
- [3] Eskişar, T., Akboğa Kale, Ö. (2020). Evaluation of pile driving accidents in geotechnical engineering. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/10803548.2019.1685195>.
- [4] Gürcanlı G. E, Müngen U. (2013). Analysis of construction accidents in Turkey and responsible parties. *Industrial Health*, 51: 581-595.
- [5] Winge S, Albrechtsen E. (2018). Accident types and barrier failures in the construction industry. *Safety Science*, 10: 158-166.
- [6] Tözer, K. D., Çelik, T., Gürcanlı, G. E. (2018). Classification of Construction Accidents in Northern Cyprus. *Teknik Dergi*, 29(2), 8295-8316.
- [7] Sosyal Güvenlik Kurumu, İstatistik Yıllıkları. (2022). <http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik> (Accessed: 01.10.2022)
- [8] Choudhry R. M, Hinze J. W., Arshad M, Gabriel H. F. (2012). Subcontracting Practices in the Construction Industry of Pakistan, *Journal of Construction Engineering and Management ASCE*, 138: 1353-1359.
- [9] Çınar, S. (2014). Taşeron Çalışma İlişkilerinde İnşaat İşçileri. *Journal of Sociological Research*, 17(2), 37-70.
- [10] Demirci G. Ayar B. Kıvrak S. Arslan G. (2009). Contractor Selection in the Housing Sector Using "the Simple Multi-Attribute Rating Technique". In: The CRIOCM2009 International Symposium on "Advancement of Construction Management and Real Estate", 29-31 October 2009; Nanjing, China.
- [11] Eccles R. G. (1981). Bureaucratic versus craft administration: the relationship of market



- structure to the construction firm. Administrative science quarterly, 26: 449-469.
- [12] Costantino N, Pietroforte R, Hamill P. (2001). Subcontracting in commercial and residential construction: an empirical investigation. *Journal of Construction Industry Economics and Management*, 19: 439-447.
- [13] Winch G. (1998). The growth of self-employment in British construction. *Construction Management and Economics*, 16, 531-542.
- [14] Baradan, S., Dikmen, S.Ü., Akboğa Kale, Ö. (2019). Impact of human development on safety consciousness in construction. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 25(1), 40-50.
- [15] Loosemore, M., Andonakis, N. (2007). Barriers to implementing OHS reforms – The experiences of small subcontractors in the Australian Construction Industry. *International Journal of Project Management*, 25(6), 579-588.
- [16] Vargas L. G. (1990). An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research*, 48: 2-8.
- [17] Saaty T. L, Vargas L. G. (2006). The Analytic Hierarchy Process: wash criteria should not be ignored. *International Journal of Management and Decision Making*, 7: 180-188.
- [18] Kaplan, R. (2010). AHP yönetimde tedarikçi seçimi: Perakende sektöründe bir uygulama. İstanbul Teknik University, Master Thesis.
- [19] Taherdoost, H. (2017). Decision Making Using the Analytic Hierarchy Process (AHP); A Step by Step Approach. *International Journal of Economics and Management System*, hal-02557320.
- [20] Jalaliyoon, N., Bakar, N. A., Taherdoost, H. (2012). Accomplishment of Critical Success Factor in Organization; Using Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Academic Research in Management*, Helvetic Editions Ltd, 1(1); 1-9.
- [21] Saaty, T. L. (1980). The Analytical Hierarchy Process, Mc Graw Hill, New York.
- [22] Raharjo, H., Endah, D. (2007). Evaluating Relationship of Consistency Ratio and Number of Alternatives on Rank Reversal in the AHP. *Quality Engineering*, 18 (1), 39-46.
- [23] Manu, P., Ankrah, N., Proverbs, D., Suresh, S. (2013). Mitigating the health and safety influence of subcontracting in construction: The approach of main contractors. *International Journal of Project Management*, 31(7), 1017-1026.
- [24] Öztaş, A., Ökmen, Ö. (2005). Judgmental risk analysis process development in construction projects. *Building and Environment*, 40(9), 1244-1254.
- [25] Chinyio, E.A. Akintoye, A. (2007). Practical approaches for engaging stakeholders: findings from the UK. *Construction Management and Economics*, 26(6), 591-599.
- [26] Çiftçioğlu, B. (2013). İnşaat Sektöründe AHP Yöntemi İle Alt Yüklenici Seçimi: Bir Konut Projesinde Uygulama, İstanbul Teknik University, Master Thesis.
- [27] Metinsoy T. A. (2010). Method of Evaluation of Relationship Between the Safety Management and Overall Safety Performance in Construction Industry. PhD, Bosphorus University, Istanbul.
- [28] Marzouk M.M, El Kherbawy, A.A., Khalifa, M. (2013). Factors influencing sub-contractors selection in construction projects. *HBRC Journal*, 9(2), 150-158.
- [29] Ross, T. (2002). Influences on subcontractor OHS management outcomes in construction. University of New South Wales, School of Safety Science, PhD Thesis, 407 p.
- [30] Ng, S. T., Luu, C. D. T. (2008). Modeling subcontractor registration decision through case-based reasoning approach, *Automation in Construction*, 17, Sf. 876.
- [31] Akboğa Kale, Ö. (2018). İnşaat sektöründe iş kazaları ve alandaki iyileşmeleri etkileyen faktörlerin analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9(2), 895-906.
- [32] Moraru, R.L., Babut, G.B. (2012). On the Culture – Learning – Participation Triad in Occupational Health and Safety Management. *Quality*, 13(131), 99.
- [33] Kontogiannis, T., Leva, M.C., Balfe, N. (2017). Total Safety Management: Principles, processes and methods. *Safety Science*, 100, 128-142.
- [34] Cingilhoğlu Ş. (2012). Health and Safety Cost Evaluation in Construction Projects Case Study: Oman DMIA Project. PhD, Istanbul Technical University, Istanbul.
- [35] Mayhew, C., Quintan, M., Ferris, R. (1997). The effects of subcontracting/ outsourcing on occupational health and safety: Survey evidence from four australian industries. *Safety Science*, 25(1-3), 163-178.

# Electrothermal Simulation of the Production of Alumina by Spark Plasma Sintering

Mustafa Guven GOK 

<sup>1</sup>Gaziantep University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Gaziantep, Turkiye

## Abstract

Although the spark plasma sintering (SPS) method is a very advantageous technique in many aspects, the inability to clearly read the temperature formed on the material during sintering and heterogeneous temperature distributions are the biggest problems of this process. Therefore, it is a common situation that samples taken from different regions of the produced material have different densities and mechanical properties. In this study, the temperature distributions, current density and joule heating effect of the entire setup consisting of the alumina ( $Al_2O_3$ ) sample to be sintered, inconel electrodes, graphite dies, punches and spacers, as well as the critical regions in this setup, are modeled by using finite element software. According to the results, the temperature is maximum at the centre of the  $Al_2O_3$  sample and the temperature gradient along its radius is  $22.4^\circ C$ . The temperature difference between the inner wall of the hole which is opened in the graphite mold to measure the sintering temperature and the centre of the  $Al_2O_3$  sample is around  $40^\circ C$ . In addition, during the SPS process,  $Al_2O_3$  is not heated directly by the joule effect and the temperature gradient in the sample occurs due to mold surface radiation.

**Keywords:** Finite Element Analysis, Spark Plasma Sintering, Alumina, Powder Metallurgy

## I. INTRODUCTION

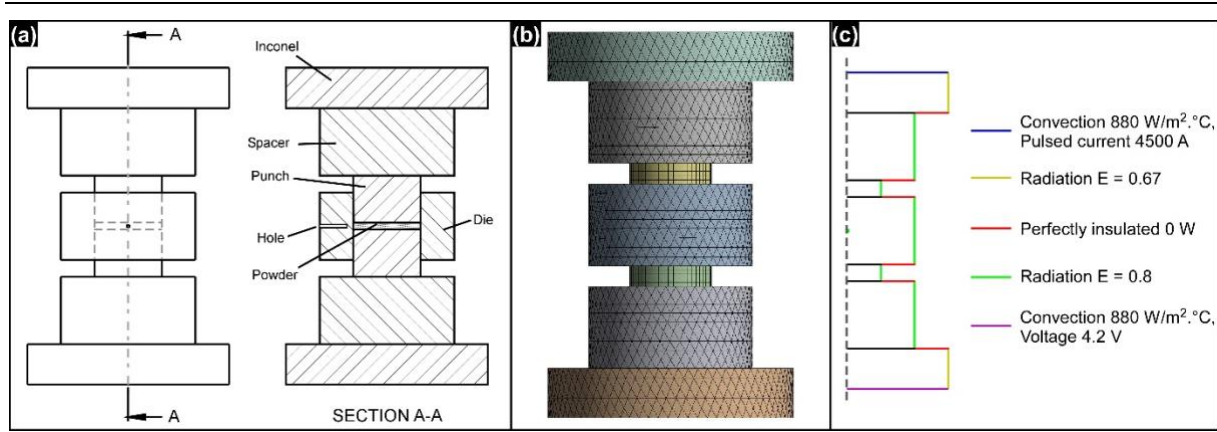
Although the production of materials from powder by the traditional sintering method (moulding/pressure and sintering processes are done separately) has been known for many years, the most important progress in this regard began with the development of technologies in which molding-pressure and heating processes are performed simultaneously [1]. In the powder metallurgy process, simultaneous application of temperature and pressure offers great advantages for sintering various materials. Spark plasma sintering (SPS) and Hot pressing (HP) are the best examples of processes where temperature and pressure are applied simultaneously [2]. In fact, SPS and HP processes are similar to each other. But the main difference is the mechanisms involved in generating heat and transmitting it to the material to be sintered. An external heating source is used in the HP process. However, in the SPS process, a direct current is provided to pass through the sample to be sintered and/or the conductive (usually graphite) die. This direct current is pulsed and controllable. In this way, the direct current, which has a pulsed character, creates an electric field during the SPS process and the powders are heated up both internally and externally [2–5]. The heat is generated directly in the material to be sintered or in the molds, and in very short periods of time, the temperature of the sample can be equalized to the sintering temperature values. Thanks to this high heating rate, the microstructure of the material (eg grain size) can be easily kept under control [5–10].

A typical SPS machine consists of a DC pulse generator, electrodes, uniaxial press, vacuum chamber, and some measuring components. Thanks to the spark plasma, DC pulse discharge, Joule heating and the diffusion effect of an electric field are created. In addition, simultaneous pressure application creates plastic flow in the material. The sintering temperature is kept under control by adjusting the pulse duration, ramp rate, voltage and pulse current before or during the process. In the first stage of the process, the gases are removed and a vacuum environment is created. Then, pressure and resistance heating are applied respectively and cooling process is carried out in the last step. When a discharge of the spark occurs during the process at the contact point of the particles of the material or in the space between the particles, the temperature in these areas can rise to thousands of degrees celsius momentarily. Thus, melting and evaporation occur on the surface region of the particles and sintering necks are come into existence between the particles. In addition, the concurrent application of current and pressure causes an increase in the rate of heating. This decreases both the sintering temperature and time, allowing consolidation without excessive grain growth. In addition to these advantages, there is no need to use binders in the SPS process and does not require a pre-compression process. The material powder to be sintered is directly filled into a graphite mold and a material with high theoretical density values with superior mechanical properties can be produced [11,12].

However, in addition to all these advantages, heterogeneous temperature distribution in the SPS process is a very common problem. Since the sintering temperature is read from the graphite die surface, it is significant to know how the temperature is distributed throughout the sintered material section.

**Corresponding Author:** MUSTAFA GUVEN GOK, Tel: 0342 360 12 00-dahili-3931, e-mail: mggok@gantep.edu.tr

**Submitted:** 25.11.2023, **Revised:** 09.12.2023, **Accepted:** 07.02.2024



**Figure 1.** (a) assembly of system, (b) meshes and (c) boundary conditions.

Because the temperature distribution during sintering has a significant impact on the mechanical properties, homogeneity and microstructure of the produced material. For example, Sahin et al. [13] produced B<sub>4</sub>C-based ceramic materials with the SPS method and determined that there were density differences between the edges and centers of the samples they produced. One way to predict the temperature distribution across the material cross section during sintering is through finite element analysis (FEA). Therefore, in this study, finite element modeling (FEM) of the SPS technique was made to understand the temperature distributions along the cross section of the mold and sintered material in the production of monolithic alumina by SPS method.

## II. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Definition of geometry

In this study, the simulation of the heating process of an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample during the SPS process was performed using Thermal-Electric module of the ANSYS® software. The technical drawing of the assembly consisting of graphite dies, punches, spacers, electrodes and the material to be sintered is given in Figure 1 (a). Dimensional values of these parts were given in Table 1. As can be understood from the system, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder is placed in the mold cavity of the graphite mold.

**Table 1.** Dimensions of the SPS system.

Part	Dimensions (mm)	
	Diameter	Height
Specimen	50	5
Punch	50	35
Die	100	50
Spacer	100	50
Inconel	150	30

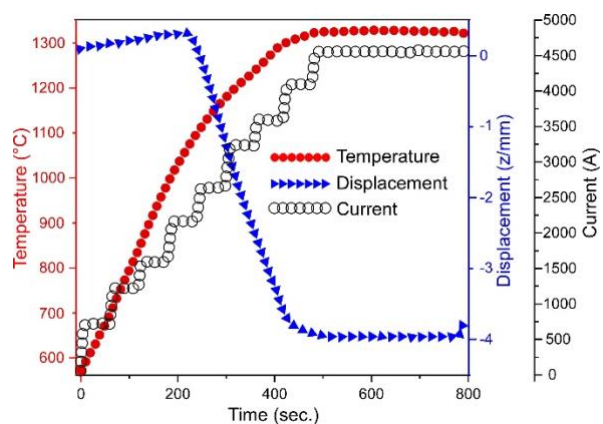
There were two graphite punches above and below the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder. At both ends of the system were Inconel (a kind of nickel-chromium alloy) electrodes in contact with a liquid at constant temperature. Graphite spacers were placed between the electrodes and the punches. In addition, a hole having a diameter of 2 mm and a depth of 20 mm was drilled in the

middle of the graphite mold so that the temperature could be read during sintering.

### 2.2. Mesh and Boundary conditions

In this study, the simulation of SPS process of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample was performed using Thermal-Electric module of the ANSYS® software. The assembly created after the solid modeling drawings was transferred to Ansys Workbench finite element analysis (FEA) software. Different mesh sizes and shapes were tried to achieve mesh independence and accordingly 3D tetrahedral (in inconel, graphite molds and spacers) and hexahedral (in punch and sample) were used. The total mesh nodes and elements numbers were 186172 and 116720, respectively. After the meshing process, the finite element model of the system is given in Figure 1 (b). It was assumed that radiative heat transfer occurred between the atmosphere of the SPS chamber and the surfaces.

On the other hand, convective heat transfer on the vertical walls was ignored. Additionally, the contact resistance between the interfaces of the constituents was neglected. The applied boundary conditions are schematically summed up in Figure 1 (c).



**Figure 2.** Graphs of experimental results showing the measured temperature, displacement, and applied electric current during the SPS process of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

To calculate the temperature distribution during the process of SPS, 4500A pulsed electrical current

**Table 2.** Temperature dependent material properties (T=Kelvin).

Material	Inconel [14,15]	Graphite [15–17]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [14,15]
Thermal conductivity (W/m·K)	$10.03 + 0.0157 \times T$	$82.85 - 0.06 \times T + 2.58 \times 10^{-5} \times T^2$	$39500 \times T^{-1.26}$
Electric resistivity ( $\Omega \cdot m$ )	$9.82 \times 10^{-7} + 1.6 \times 10^{-7} \times T$	$2.14 \times 10^{-5} - 1.34 \times 10^{-8} \times T + 4.42 \times 10^{-12} \times T^2$	$8.7 \times 10^9 \times T^{-4.82}$
Density (kg/m <sup>3</sup> )	8430	$1904 - 0.01414 \times T$	3899

directly applied to the system. Because in the experimental study using a 20000A capacity SPS device (SPS Syntex Inc., 7.40 MK-VII), approximately 4500A electric current was applied to reach the sintering temperature of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (see Figure 2). The sintering temperature (approximately 1300°C) was the temperature at which shrinkage was completed.

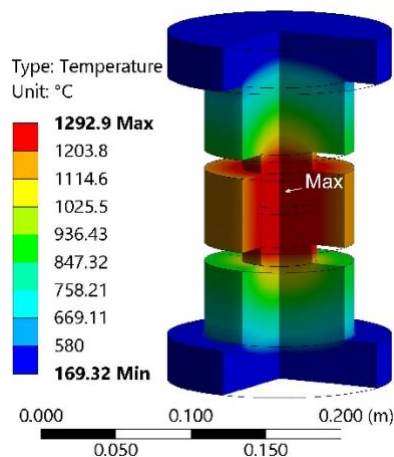
### 2.3. Material Properties

Thermoelectric analyzes are directly related to electrical and thermal properties. The change in the properties of the material in this case is a function of temperature. Therefore, the formulas regarding the physical properties of the materials in the assembly are presented in Table 2. In addition, all graphite elements in this study were assumed to be isotropic, that is, all physical properties were the same in all directions.

## III. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Temperature distribution analyses

Figure 3 shows the temperature contours for the system consisting of inconel electrodes, graphite dies, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample during the spark plasma sintering process.

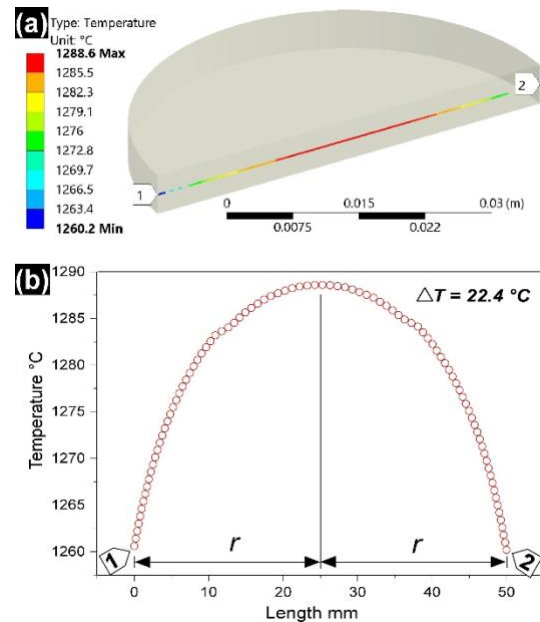


**Figure 3.** Temperature distribution inside the all components of system.

This figure is given as a partial cross-sectional view in order to determine the temperature distributions inside the all components of the system. As can be understood, under the defined boundary conditions, the maximum temperature of the system was 1292.9 °C. This maximum temperature point was at the centre of the upper graphite punch. Under the next heading,

by explaining the joule heating and current density phenomena, it will be understood why the maximum temperature is in the graphite punch. as a matter of fact, when the counter is examined in detail, it can be understood that the centre of the sintered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample is almost at the maximum temperature value. It is also seen that the temperature distribution is highest in the central regions of all system parts.

The distribution of temperature along the diameter of the alumina sample is seen in the Figure 4 (a) and (b). The maximum temperature on the sample was about 1288.6 °C. Additionally, the center of the sample was at the maximum temperature value. As seen in the Figure 4 (b), the minimum temperature was 1260.2 °C and it was at the edges of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample close to the graphite die. Temperature gradient ( $\Delta T$ ) on the specimen was 22.4 °C. Also, there was no important temperature difference across the sample height.

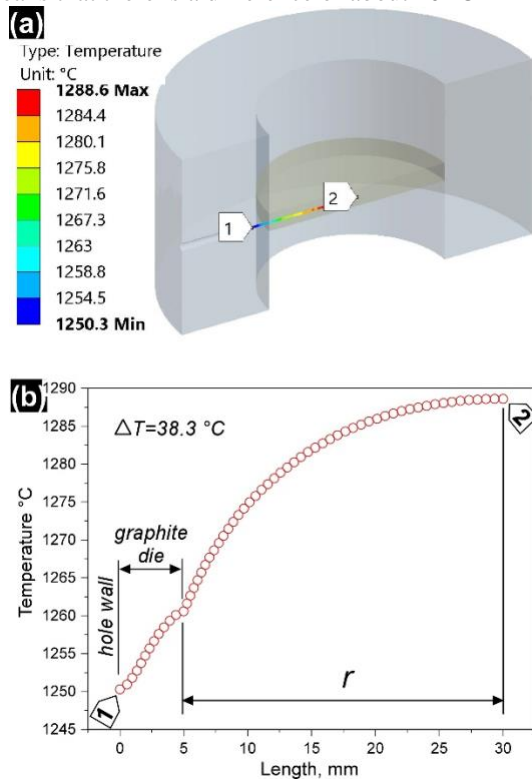


**Figure 4.** Temperature distribution along the diameter of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sample as (a) contours and (b) graph.

When the temperature gradient between the inner wall of mold hole and the centre of sample is examined, it can be figured out that the temperature on the inner wall of mold hole which is opened to measure the sintering temperature is 1250.3 °C (see Figure 5 (a) and (b)). The mentioned temperature gradient is more clearly understood in the graph given in Figure 5 (b). The temperature gradient from the inner wall of the



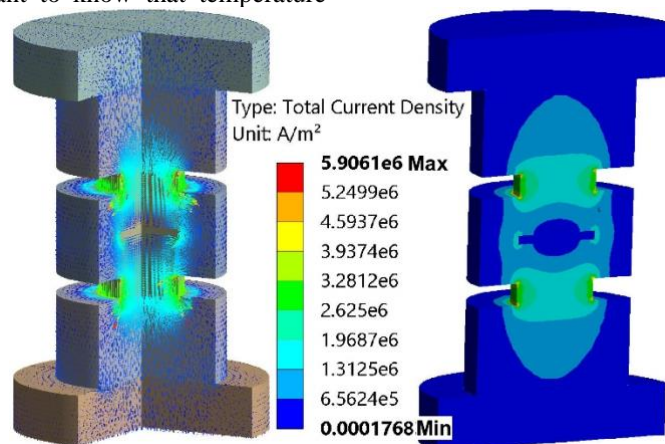
mold hole to the center of the sample is 38.3 °C. This means that there is a difference of about 40 °C in



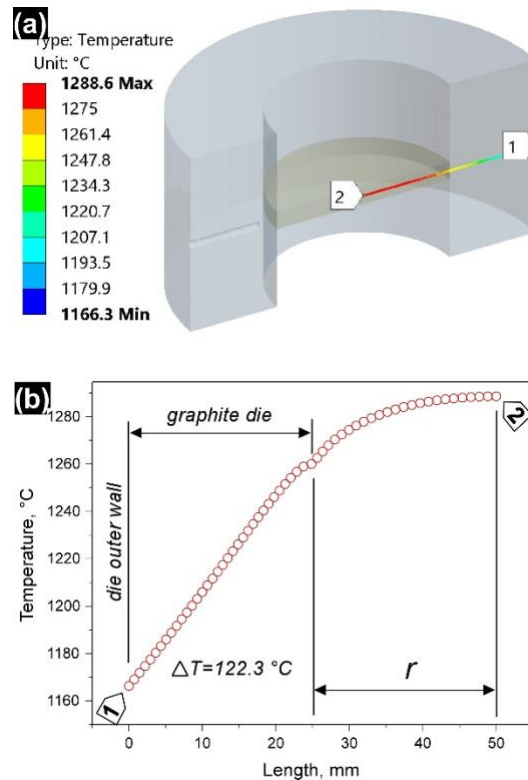
**Figure 5.** Temperature distribution from the inner wall of the die hole to the center of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as (a) contours and (b) graph.

between the actual temperature at the center of the sample and the sintering temperature read from the SPS device. This difference has great importance. Because during spark plasma sintering, the temperature measured from this inner wall of the hole is considered as the sintering temperature.

During experimental procedures, an optical pyrometer is usually placed outside the SPS chamber, and thanks to this pyrometer, the sintering temperature data on the wall surface of the hole opened in the graphite mold is read through a window on the chamber wall. Therefore, it is important to know that temperature

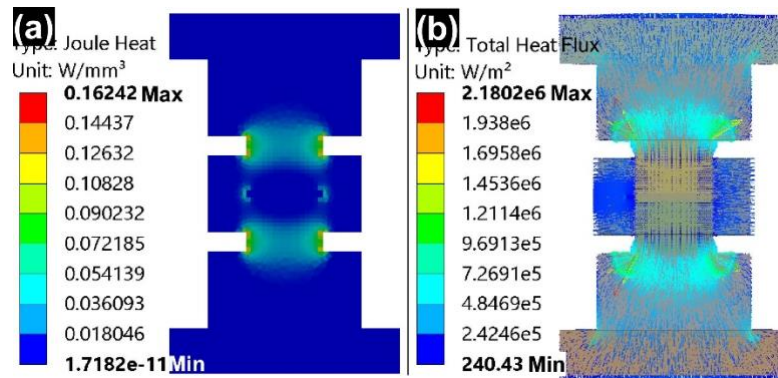


**Figure 7.** Total current density in the all components of system.



**Figure 6.** Temperature distribution from the outermost wall of the die to the center of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as (a) contours and (b) graph.

difference between the observed sintering temperature and the actual temperature during the sintering of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using the SPS method is about 40°C. The temperature difference from the outer wall of the mold to the center of the sample during SPS process of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is given in Figure 6 (a) and (b). Clearly, in this case the temperature difference ( $\Delta T$ ) is approximately 122.3 °C. Moreover, there is a temperature difference of around 94 °C in between the outer (on the sintered sample side) and inner wall of the graphite die. These significant temperature differences are caused by heat flow from the outermost wall of the graphite die to the spark plasma chamber or carbon belt.



**Figure 8.** (a) Joule heating and (b) total heat flux distributions in the all components of system.

### 3.2. Current density, joule heating and total heat flux analyses

Figure 7 shows the total current density ( $A/m^2$ ) on the Inconel electrodes, graphite die, spacer, punches, and  $Al_2O_3$  sample. It is immediately obvious that the electric current does not exhibit a uniform distribution. Since alumina is an electrically non-conductive material, no electric current flows through the  $Al_2O_3$  sample. An almost identical situation was shown in the study by Sakkaki et al [15]. The electric current density was maximum ( $5.96 \times 10^6 A/m^2$ ) in the graphite punch. Therefore, this explains why the maximum temperature ( $1292.9^\circ C$ ) occurs in the graphite punch.

On the other hand, as seen in Figure 8 (a), joule heating was at the maximum level ( $0.1624 W/mm^3$ ) in the graphite punch. This situation, together with those mentioned above, explains why graphite punch failure often occurs during SPS process of non-conductive ceramic material. If an electrically conductive material were produced with the SPS process, the maximum joule heat and maximum current density would most likely occur in the sample. Additionally, another high joule heat region is formed in the graphite die-edge region of  $Al_2O_3$  sample. In this case, as expected, there was no direct joule heating during SPS process of the alumina sample. Instead, the heat generated in the punches and graphite die was quickly and efficiently transferred to the alumina sample by conduction. In fact, it is reported that this phenomenon creates less thermal gradient in the material during the SPS process of non-conductive materials compared to conductive ones [15,18]. In addition, it can be easily understood from Figure 8 (b) that there is an intense heat flux from the graphite die surface to the chamber due to radiation. Therefore, heat loss occurred due to surface radiation of the graphite die. This phenomenon cooled the edge region of the  $Al_2O_3$  sample and a temperature gradient was formed.

### IV. CONCLUSIONS

In this study, FEM study was performed to better understand the temperature distributions during the production of  $Al_2O_3$  with the SPS technique. As a result, when the defined boundary conditions and

4500A electric current were applied to the system, the following important results were obtained.

- The maximum temperature occurring in the  $Al_2O_3$  sample is at the center of the sample and is  $1288.6^\circ C$ .
- The temperature gradient across the  $Al_2O_3$  sample is  $22.4^\circ C$ .
- There is a difference of around  $40^\circ C$  between the center  $Al_2O_3$  sample and inner wall of the die hole.
- The temperature difference from the outermost surface of the graphite die to the center of the  $Al_2O_3$  sample is approximately  $122^\circ C$ .
- Total current density and joule heating effect are maximum in graphite punches.
- During spark plasma sintering,  $Al_2O_3$  is heated not directly by the Joule effect but by thermal conduction. The temperature in the  $Al_2O_3$  sample increases due to heat conduction from the graphite die and punches.
- Heat loss occurs at the edges of the sample due to mold surface radiation, resulting in a temperature gradient in the  $Al_2O_3$  sample.

### REFERENCES

- [1] Laszkiewicz-Łukasik, J., Putyra, P., Klimczyk, P., Podsiadło, M., Bednarczyk, K., (2021). Spark Plasma Sintering/Field Assisted Sintering Technique as a Universal Method for the Synthesis, Densification and Bonding Processes for Metal, Ceramic and Composite Materials. *Journal of Applied Materials Engineering*. 60(2): 53–69.
- [2] Cavaliere, P., Sadeghi, B., Shabani, A., (2019). Spark Plasma Sintering: Process Fundamentals. Spark Plasma Sintering of Materials, *Cham: Springer International Publishing* p. 3–20.
- [3] Anselmi-Tamburini, U., (2021). Spark Plasma Sintering. Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses, *Elsevier* p. 294–310.
- [4] Bubesh Kumar, D., Selva babu, B., Aravind Jerrin, K.M., Joseph, N., Jiss, A., (2020). Review of Spark Plasma Sintering Process. *IOP*

- Conference Series: Materials Science and Engineering*. 993(1): 012004.
- [5] Gok, M.G., (2021). Spark Plasma Sintering of Nano Silicon Carbide Reinforced Alumina Ceramic Composites. *European Mechanical Science*. 5(2): 64–70.
- [6] Razavi, M., Farajipour, A.R., Zakeri, M., Rahimpour, M.R., Firouzbakht, A.R., (2017). Production of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiC nano-composites by spark plasma sintering. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 56(4): 186–94.
- [7] Álvarez, I., Torrecillas, R., Solis, W., Peretyagin, P., Fernández, A., (2016). Microstructural design of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiC nanocomposites by Spark Plasma Sintering. *Ceramics International*. 42(15): 17248–53.
- [8] Cetinbag, A., Ormanci, O., Goller, G., (2022). Production of B<sub>4</sub>C reinforced TZM alloy and boriding its surface in one step by spark plasma sintering (SPS). *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 106: 105860.
- [9] Danisman, C.B., Goller, G., (2023). Spark plasma sintered mn-al (magnets) production and characterization with experimental design. *Archives of Metallurgy and Materials*. 68(4): 13571367.
- [10] Kaplan Akarsu, M., Akin, I., Sahin, F., Goller, G., (2022). Comparative study of reactive and nonreactive spark plasma sintering routes for the production of TaB<sub>2</sub>-TaC composites. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 19(1): 332–43.
- [11] Saheb, N., Iqbal, Z., Khalil, A., Hakeem, A.S., Al Aqeeli, N., Laoui, T., et al., (2012). Spark Plasma Sintering of Metals and Metal Matrix Nanocomposites: A Review. *Journal of Nanomaterials*. 2012: 1–13.
- [12] Akin, I., (2010). ZrB<sub>2</sub> esaslı kompozitlerin spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu / Production and characterization of ZrB<sub>2</sub> based composites prepared by spark plasma sintering. Istanbul Technical University, (2010).
- [13] Çınar Şahin, F., Mansoor, M., Cengiz, M., Apak, B., Yanmaz, L., Balazsi, K., et al., (2022). B<sub>4</sub>C Composites with a TiB<sub>2</sub>-C Core–Shell Microstructure Produced by Self-Propagating High-Temperature Synthesis-Assisted Spark Plasma Sintering. *The Journal of Physical Chemistry C*. 126(47): 20114–26.
- [14] Pavia, A., Durand, L., Ajustron, F., Bley, V., Chevallier, G., Peigney, A., et al., (2013). Electro-thermal measurements and finite element method simulations of a spark plasma sintering device. *Journal of Materials Processing Technology*. 213(8): 1327–36.
- [15] Sakkaki, M., Sadegh Moghanlou, F., Vajdi, M., Shahedi Asl, M., Mohammadi, M., Shokouhimehr, M., (2020). Numerical simulation of heat transfer during spark plasma sintering of zirconium diboride. *Ceramics International*. 46(4): 4998–5007.
- [16] Manière, C., Pavia, A., Durand, L., Chevallier, G., Afanga, K., Estournès, C., (2016). Finite-element modeling of the electro-thermal contacts in the spark plasma sintering process. *Journal of the European Ceramic Society*. 36(3): 741–8.
- [17] Molénat, G., Durand, L., Galy, J., Couret, A., (2010). Temperature Control in Spark Plasma Sintering: An FEM Approach. *Journal of Metallurgy*. 2010: 1–9.
- [18] Vanmeensel, K., Laptev, A., Hennicke, J., Vleugels, J., Vanderbiest, O., (2005). Modelling of the temperature distribution during field assisted sintering. *Acta Materialia*. 53(16): 4379–88.

## Exploiting Eye Colors for Better Iris Segmentation in Visible Wavelength Environments

Shaaban SAHMOUD 

*Fatih Sultan Mehmet Vakif University (FSMVU), Computer Engineering Department, İstanbul, Türkiye*

### Abstract

Iris segmentation is a crucial step in iris recognition systems. Iris segmentation in visible wavelength and unconstrained environments is more challenging than segmenting iris images in ideal environments. This paper proposes a new iris segmentation method that exploits the color of human eyes to segment the iris region more accurately. While most of the current iris segmentation methods ignore the color of the iris or deal with grayscale eye images directly, the proposed method takes benefits from iris color to simplify the iris segmentation step. In the first step, we estimate the expected iris center using Haar-like features. The iris color is detected and accordingly, a color-convenient segmentation algorithm is applied to find the iris region. Dealing separately with each iris color set significantly decreases the false segmentation errors and enhances the performance of the iris recognition system. The results of testing the proposed algorithm on the UBIRIS database demonstrate the robustness of our algorithm against different noise factors and non-ideal conditions.

**Keywords:** Iris Segmentation, Visible Wavelength Iris Images, Color-based Iris Segmentation, Eye Color Classification, Unconstrained Iris Recognition

### I. INTRODUCTION

With the increasing attention to iris biometrics, the need for an accurate and fast recognition system has increased [1]. The human iris has many features which make it a highly reliable biometric. Examples of these features are the constancy of iris patterns over the years, the high complexity and randomness patterns, and the exceptional amount of entropy, enabling the avoidance of false match and false reject errors [2]. As a result, iris recognition has a wide use range from border authentication systems [3], to forensics applications [4], to ATM systems [5].

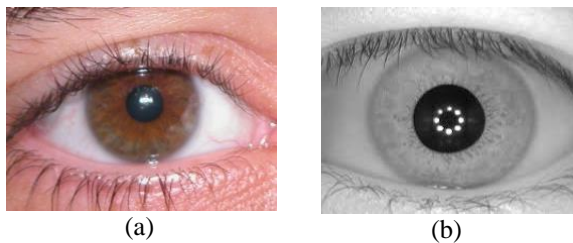
A classical iris recognition system commonly consists of four main steps: iris region segmentation, iris region normalization, features encoding from the normalized iris image, and iris code matching [6]. The first step (iris region segmentation) is considered the most critical of these four steps. In this stage, researchers confront numerous noise elements, especially within dynamic and non-ideal contexts. Moreover, making an error in this step by adding non-iris pixels to the real iris region or by removing some iris pixels from the real iris region, significantly affects/degrades the resulted iris template and consequently leads to false accept or false reject errors [7].

Iris recognition systems are categorized as constrained and unconstrained depending on the applicable circumstances. Some research mentions it as cooperative and non-cooperative [8]. When working with noisy iris images acquired in non-cooperative environments and under non-ideal imaging conditions, the iris identification methods proposed to deal with cooperative environments may not operate well. This is because iris images may include more difficult-to-separate noise factors in unconstrained environments that cannot be handled using traditional iris segmentation algorithms. Examples of such factors are specular reflections, luminance, high occlusions by eyelashes and eyelids, eyeglasses, and focusing problems. Fig. 1 gives two sample iris images. The first one was captured in visible wavelength and under an unconstrained environment, and the second image was captured in ideal conditions (constrained environment) with Near-infrared cameras (NIR).

In the iris segmentation step, the iris's inner and outer circular or uncircular boundaries are localized, and the regions that belong to other factors and cover or degrade the iris region should be removed. The upper and lower eyelashes, the eyelids, the eye pupil, and the iris regions that are affected by specular reflections are examples of these factors that should be detected and isolated from the iris region [13]. In the second step, the segmented iris



region is converted/normalized to a rectangular region to simplify the process of feature extraction. The third step called feature encoding or feature extraction is carried out on the segmented and normalized iris region by applying a convenient filter or feature extraction technique to produce the first version of the iris biometric template. Normally, the output of this step is two identical size arrays called iris template/code and iris mask. The iris code represents the unique features of the considered person, and the mask array is used to enhance the hamming distance results by excluding the non-iris pixels. In the fourth and last step, the extracted iris code is compared with one (verification) or more (identification) different iris codes to determine if they belong to the same person or not. The comparing process is usually done by calculating the Hamming Distance (HD) between the two compared iris codes [15]. Of the four steps of iris recognition, the second step which is iris segmentation is the hardest and most studied step in literature. This is because this step processes directly the noisy iris image that may be affected by many real-world noise sources and dynamic environments. Moreover, all other iris recognition steps rely on its result. Consequently, if any error occurs in the segmentation step, it will directly affect the feature extraction step and cause degradation in the iris code [14].



**Figure 1:** Two iris images. (a) from the UBIRIS database, and (b) from the CASIA database.

Since the first automated iris recognition was proposed in 1997 [7], many algorithms have been developed in this field where most of them focus on cooperative systems under controlled conditions. Recently, there has been increasing research attention to non-cooperative and unconstrained iris recognition systems that can work in non-ideal conditions. By reviewing the related work in iris recognition, we noted that most of the current iris segmentation methods ignore the color of the iris and prefer to deal with grayscale eye images directly [9,10,11]. Our main motivation in this work is that many false iris segmentation cases occur due to the wide color ranges of human iris regions and trying to deal with these heterogeneous colored irises using one methodology. Based on these observations, a new fast segmentation method that utilizes the iris color to boost the robustness and efficiency of the iris segmentation step is proposed. We believe that exploiting the color of the iris can significantly contribute to enhancing and simplifying the segmentation step, especially in

unconstrained environments. The main contributions of this study are summarized as follows:

1. A novel color-based iris segmentation algorithm for images captured in unconstrained environments is proposed. It first detects the color of the iris/eye and then deals with each eye class independently using different parameters.
2. A fast new method to estimate the pupil and iris centers using a Haar-like feature is proposed. It can quickly and efficiently search for the candidate center of the iris and significantly reduces the region of interest for the next steps in the segmentation process.
3. A new method to detect the color of the iris is proposed using the K-means clustering algorithm.
4. More convenient methods for unconstrained environments to find and isolate non-iris regions such as eyelashes, eyelids, and specular reflections are proposed and utilized.

To the best of our knowledge, this paper is the first research that detects the iris color and utilizes it in the iris segmentation step. Our experimental results confirm the significance of classifying irises based on their colors where it enables the detection of complex and challenging noise regions that cannot be detected by most of the existing segmentation methods.

This paper is organized as follows: Section 2 provides a brief overview of research on iris segmentation in unconstrained environments. A detailed description of the proposed color-based segmentation method is given in Section 3. In Section 4, we present and discuss the results of our experimental study. Section 5 concludes the paper and gives some future work directions.

## II. RELATED WORK

This section provides a brief overview of the literature on iris segmentation in unconstrained and non-cooperative environments. Over the past two decades, many algorithms have been proposed to deal with iris segmentation in non-ideal environments where most of which are developed by enhancing the traditional iris segmentation algorithms or adding more pre-processing steps before segmentation starts. Segmentation methods can be classified into many categories using different criteria such as if the model is boundary-based or pixel-based [9] if the model starts by searching for iris, pupil, or sclera [10], and depending on the primary segmentation operator or approach [10].

One of the first methods used in iris segmentation is the integrodifferential operator. It was proposed by Daugman in his fully proposed iris recognition system [11]. This operator obtains excellent results in ideal conditions where its performance significantly degrades in noisy environments. In [12], the authors proposed an enhancement version of the integrodifferential operator of the former model to perform more efficiently in unconstrained environments. A multi-step clustering-based

segmentation mechanism was proposed in [13] to obtain better results in noisy environments. In [14], the Hough transform was combined with the integrodifferential operator to overcome the problems of both methods and achieve better results. The authors in [15] focused on minimizing the execution time of the integrodifferential operator by utilizing the average square shrinking method.

Circular Hough Transform (CHT) is one of the most popular methods used in iris segmentation in noisy environments [16]. Usually, it is used after applying a suitable edge detection method. Although CHT performs very well in unconstrained environments, it does have a high computational cost and assumes that the iris is circular [17]. In literature, many researchers have been working to address these two problems [18-20] using several approaches. One technique is to reduce the search region of the iris to decrease the computational time of CHT [10]. One problem with this model is dealing with the off-angle scenarios that generate uncircular iris borders. In another interesting research [42], the authors used a new color segmentation method to exclude the affected regions by visible light from the iris region. After that, the iris and pupil are localized by applying two circular edge detection.

To deal with the uncircular borders of the iris, the active contour is a common technique proposed to segment iris regions. For example, in [21], the outer and inner boundaries of the iris are estimated using a technique called geodesic active contours. In another work [22], an adaptive iris segmentation method was proposed using an updated geodesic active contours model. In literature, many other iris segmentation methods were presented by using different versions of the active contours model [23], [24]. The main problem of active contours algorithms is the high sensitivity to noise which reduces their performance in unconstrained environments.

As with many other image processing and computer vision applications, deep learning and Convolutional Neural Networks (CNNs) [25, 39, 40, 41, 43, 44] have been effectively used in the iris segmentation step. IrisParseNet [26] is one of the first attempts to propose a deep learning-based framework to solve the iris segmentation problem. The correlations between the iris, sclera, and pupil were utilized to boost the iris segmentation process. In [27], the authors proposed a general deep learning method for all steps of iris recognition (including iris segmentation) by designing a fully convolutional neural network. The DeepIrisNet [28] is another deep learning-based model that uses highly deep architecture to detect the iris region accurately.

As discussed in the previous section, all the current iris segmentation methods deal with all types and classes of the iris using one methodology which causes many errors in the segmentation step because of the wide possible color ranges of the human iris. At the same time, most of the proposed iris segmentation

methods require a long execution time, which makes it slows down the execution in real-time scenarios.

### III. PROPOSED METHODOLOGY

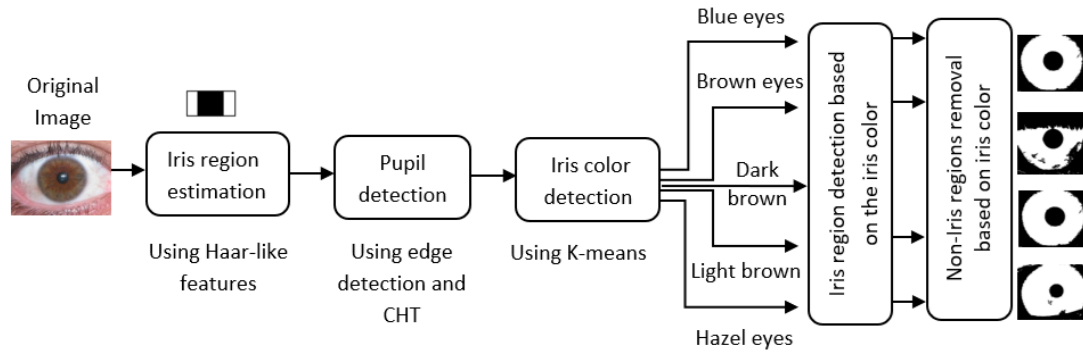
This section describes the steps of our proposed color-based segmentation algorithm. As described in Section 2, common iris segmentation methodologies are designed to either deal with grayscale iris images directly or convert the colored iris image to grayscale image first then apply the remaining segmentation steps. In both situations, the color of the iris is ignored, and no more benefits are gained from the different available color spaces. One of the most common sources of segmentation errors is the high color variations of human irises. Most of the current iris segmentation algorithms that deal with unconstrained iris images are designed to work for normal and common human irises and they face some difficulties when dealing with very high or very low color intensities in the iris region. Figure 2 shows two samples of iris images from the UBIRIS v1 database [32] that have a high difference in color information. In dark color iris, it becomes very difficult to determine and remove the dark color noise factors such as pupil and eyelashes, whereas in light color iris, it is difficult to detect and remove specular reflections that may occur in a visible wavelength environment.



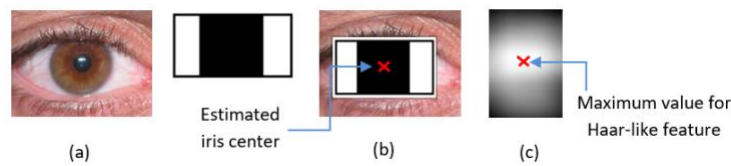
**Figure 2:** Two sample iris images from the UBIRIS v1 database with light and dark colors.

The proposed segmentation algorithm is designed to exploit the color information of the iris to achieve more robust and accurate segmentation with low execution time. The segmentation process begins with the estimation and detection of the color of the eye or iris, and then different segmentation and noise removal techniques are applied according to the detected iris color. Figure 3 shows the block diagram of the proposed segmentation algorithm.

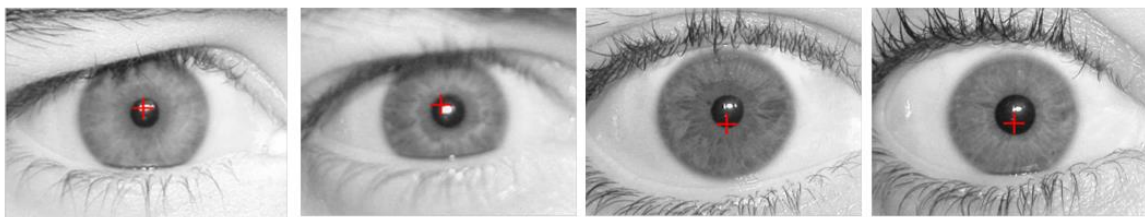
The essential point consists of determining the iris color and dealing with each iris color/type more specifically to accurately find the iris region pixels and remove the non-iris pixels. The process starts by searching for the expected iris region in the image then; the pupil of the eye is localized by applying the circular Hough transform on the output image of the previous step. Estimating the expected iris region is an essential step to eliminate a large portion of non-iris regions which helps in avoiding errors that occur in non-iris regions as well as reducing the searching time



**Figure 3:** The block diagram of the proposed color-based iris segmentation algorithm.



**Figure 4:** The selected Haar-like feature to estimate the iris center.



**Figure 5:** Determine the estimated iris centers for four sample images using our proposed Haar-like feature method.

of the next steps. After removing the pupil region, the color of the iris is detected using the k-means algorithm. Based on the color of the iris, several color-specific techniques are applied to accurately classify iris pixels and remove the non-iris regions. The color-specific techniques enable higher accuracy of pixel classification and eliminate the noise sources with minimal computations. In the following subsections, we explain the steps of the proposed algorithm in detail.

### 3.1 Iris Region Estimation

Searching for the iris region can face two types of errors which are errors inside the iris region (such as pupil, luminance, and eyelashes), and errors outside the iris region (such as eyelashes, eyebrows, and glass frame). Dealing directly with the entire eye image exposes the segmentation algorithm to both error types. Therefore, many segmentation algorithms employ different pre-segmentation methods to delete the skin and sclera regions such as the k-means algorithm and thresholding techniques [10] [29]. In

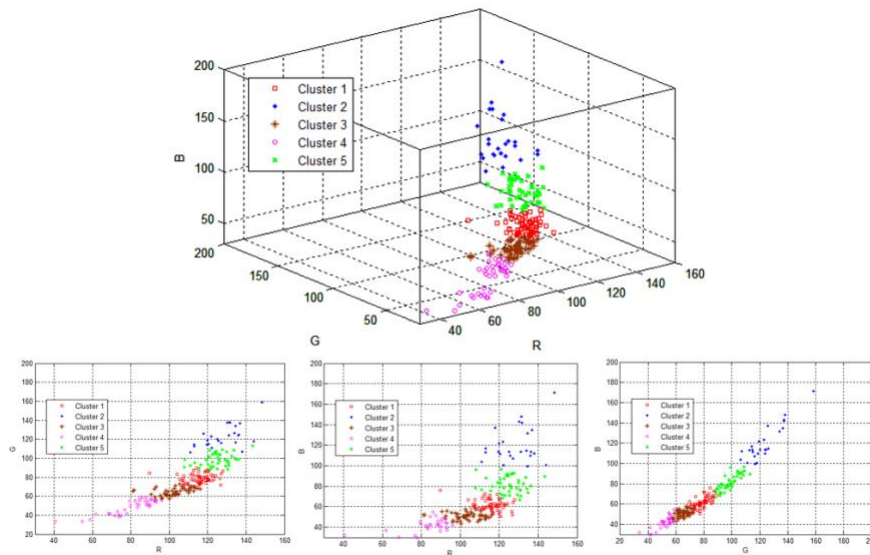
this paper, a new method inspired by Haar-like features is proposed to quickly search for the expected iris center [30]. Haar-like features are widely used in many object recognition algorithms such as the well-known Viola-Jones face detection algorithm. The key advantage of Haar-like features over other techniques is its low computational cost since it can be calculated in constant time regardless of the used feature size. To find the estimated center of the iris, a Haar-like feature is applied to the iris image as shown in Fig. 4. The selected feature measures the difference in intensity between the iris region and regions around the iris from the two sides. This feature is selected based on observing that the iris region is often darker than its two sides which usually represent the sclera region. Another advantage of using this feature is that it is relatively insensitive to iris size and iris location.

The Haar-like feature is moved over the input iris image, and it is calculated by subtracting the sum of the pixels that lie within the white rectangles from the sum of pixels in the black rectangle. We assume that





**Figure 6:** One sample iris image from each type of the five considered color classes.



**Figure 7:** Distribution of the colors of iris images in the RGB color space. Clusters 1, 2, 3, 4, and 5 represent the light brown, blue, brown, dark brown, and hazel irises.

the location where the Haar-like feature obtains the maximum value represents the expected iris center. Figure 4.c shows the resulting image after applying this step on a sample iris image. As expected, the feature obtains small values in the image edges and large values around the center of the image while moving over the iris. Note that this step is used to only decrease the search space for the next steps and the obtained iris center may not be exactly the real iris center. Figure 5 shows the detected iris center of some sample images from the UBIRIS database.

### 3.2. Pupil Region Isolation

Detecting and removing the pupil region in non-cooperative environments is not a simple task as in controlled environments. This is because of the low contrast between the color intensities of the pupil region and the iris region, mostly in dark-colored eyes (see Fig. 3). Therefore, removing the pupil region in those environments needs more effort and specific handling. To address this issue, we used our previously proposed pupil isolating method [10], [6], which primarily employs the Canny edge detection and the circular Hough transform. This method is characterized by its high speed and low influence on other error factors in unconstrained environments. The following steps summarize this method: The iris image is enhanced by applying image-adjusting

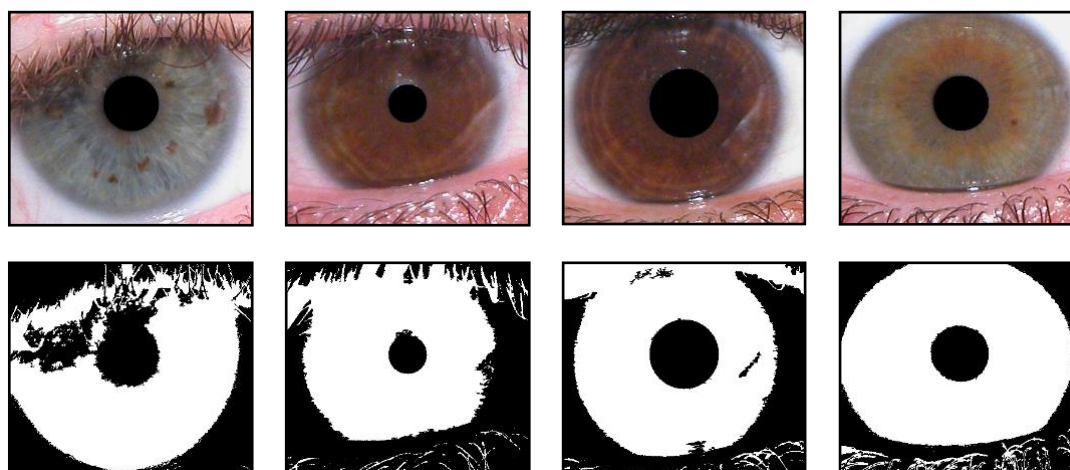
techniques to increase the contrast between the iris and pupil regions.

1. The pupil searching area is minimized by restricting the search region to only a small square. The center of this square is equal to the expected iris center obtained from the previous step.
2. The Canny edge detection is applied [31] to obtain the binary edge image.
3. The circular Hough transform is applied to localize the pupil region.

### 3.3. Iris Color Detection

Detecting the iris color is a crucial step of our proposed segmentation algorithm since the remaining steps will be significantly affected by the obtained result from this step. By analyzing the iris images of the UBIRIS v1 database [32], we classified irises into five classes according to their colors. In the real world, there are more than five iris color types, but since our experimental results are conducted using the UBIRIS database only five iris colors are considered. The five classified colors are blue, mixed blue/green, and red (hazel), light brown, brown, and dark brown.

Fig. 6 shows one sample image from each of the five color classes. As seen in the figure, the blue irises have the highest intensity values since they are closer to the white color. Hazel irises usually consist of two colors as described in the previous section. The other



**Figure 8:** Segmented iris images using the proposed color-based algorithm.

three iris types in the UBIRIS database are the three different levels of brown color. We divided them into three types since the intensity difference between them is very high. To understand the overall perspective of iris colors, we experimented to view the average color of each iris image in the UBIRIS v1 database. The 241 considered iris pictures for 241 persons are selected from the UBIRIS v1 database [32]. The irises are manually segmented, and all non-iris regions are removed, then we computed the average intensity of each iris for the three-color components of RGB color space which are red, green, and blue. After that, the iris images are classified into five clusters using the K-mean algorithm. Fig. 7 shows the distribution of iris image colors in the RGB color space.

By examining Figure 7, we can see that there is a wide variation in the color intensity levels of the considered irises. Intuitively, dealing with each color level separately in the segmentation process is much better than dealing with all these high ranges of colors as one class. Furthermore, dealing with each class differently enables us to solve the problems of each class without affecting on results of other classes which addresses the shortcomings of many existing segmentation algorithms. It is important here to remember that the proposed algorithm is scalable which means that we can simply extend it to be able to handle other types of irises such as green, red, and violet irises.

**Table 1** Low and high threshold values for the five considered color classes.

Color		Light brown	Brown	Dark brown	Blue	Hazel
<b>R</b>	L	75	52	5	85	80
	H	150	140	74	175	170
<b>G</b>	L	43	30	4	80	55
	H	120	95	65	178	143
<b>B</b>	L	22	20	1	65	35
	H	115	95	48	195	140

### 3.4. Iris Region Localization

Our iris region segmentation uses the RGB three color components to accurately characterize the pixels of the iris region from the other eye and noise pixels. For each color component, we calculated the minimum and maximum thresholds that can characterize the five different color classes. The limits of each color component are calculated by performing a preliminary experiment using the method presented in [5]. The difference in our proposed algorithm is that we estimate the minimum and maximum thresholds for each color class separately. To do this, a total of 241 iris images for different 241 human eyes are used. By addressing each color independently, the algorithm becomes able to precisely find the iris pixels and exclude the non-iris pixels without struggling with the segmentation issues that appear in other segmentation algorithms [29]. The irises are manually segmented, and all non-iris regions are removed, then we computed the histogram of intensities for each color class using the three-color components of RGB color space. The thresholds are computed using  $1.5\alpha$ , such that  $\alpha$  denotes the standard deviation of the intensity's histogram for each color component. The lower and upper thresholds of each color class are given in Table 1. A pixel is classified as an iris pixel if its red, green, and blue intensity values fall within the range determined by the minimum and maximum thresholds of each color component for this color class.

The results of applying this step on a sample set of iris images obtained from the previous step are shown in Figure 8. By examining the segmented images in this figure, it is noted that the proposed segmentation algorithm can efficiently find and recognize iris pixels from different color levels and accurately isolate the sclera, eyelashes, and specular reflection pixels. Although the proposed algorithm can isolate most of the non-iris and noise regions without any extra effort, there are still small regions that require to be removed in some situations such as lower and upper eyelashes. These situations occur normally when the iris color is

dark as in brown and dark brown images where it becomes more difficult to separate the small regions of eyelashes from the iris region. For that reason, another step of noise cleaning is required to completely remove all non-iris regions from the iris region.

### 3.5. Non-Iris Pixels Removal

As described in the previous step, for some dark irises, the upper and lower eyelashes still need handling to be completely removed. In unconstrained environments, determining and removing the eyelash regions that cover some parts of the iris is one of the most critical and hard tasks since it occurs very often. The proposed segmentation algorithm utilizes our previously proposed eyelash removal technique to delete the remaining non-iris pixels from the obtained image in the previous step [10]. This technique is especially proposed to robustly deal with eyelashes in unconstrained and visible wavelength environments, and as a result, it was applied in many other segmentation methods [29], [33]. The efficiency of this technique is due to the detection of eyelashes from the sclera region rather than the iris region as other algorithms do. Consequently, it can successfully isolate the eyelashes since the intensity difference between the sclera region and eyelashes region is very high and provides much better results than trying to isolate them from inside the iris region. The following steps summarize how the eyelash removal technique works:

1. Two rectangles in the sclera region are localized from the two sides of the iris region.
2. The horizontal Canny edge detection is applied on the two rectangle images to discover the edges between the sclera and eyelashes/eyelids, and then the resulting edge images are enhanced by morphological operations to delete the small noise points.
3. Locate the edge points on each side that represent eyelashes/eyelids and draw the arc that connects these two points to represent the eyelid location. To draw this arc its radius and center are calculated as explained in [4]. For the upper eyelid, all points after this arc are considered noise points that may belong to the upper eyelashes or eyelids.

In some rare cases, we get some blocks inside the iris region that are considered noise or non-iris regions where they are part of the iris region in real. To handle such cases, we conduct another adaptive process to correct the classification of these blocks by using again the iris color. This process simply checks if the considered iris has a dark or light color. If it has a dark color like brown or dark brown and these blocks have large intensity values, then these blocks are considered specular reflections. Conversely, if the iris has a light color like the blue and these blocks have large intensity values, then these blocks are considered as parts of the iris region.

## IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we give a brief description of the UBIRIS database that we used to test our segmentation algorithm, and then present the obtained results of comparing our color-based segmentation algorithm with other methodologies.

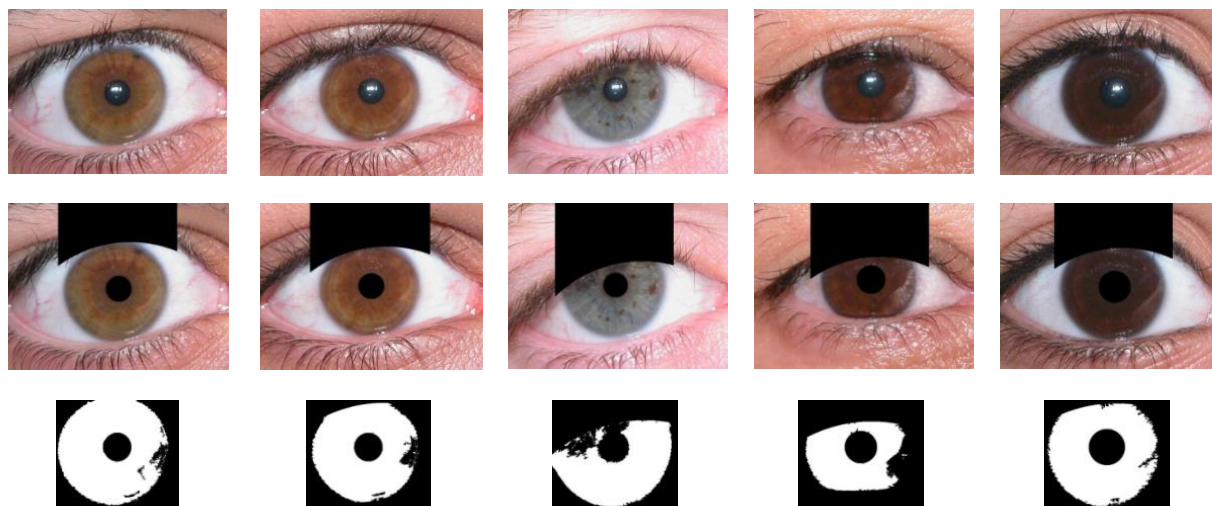
### 4.1. UBIRIS iris database

The UBIRIS [32] database is one of the most popular databases for iris recognition in visible wavelength and unconstrained environments. It is a publicly available database with 1877 images taken from 241 persons. It simulates the unconstrained imaging conditions by providing different types of noise factors such as eyelid and eyelash iris obstruction, specular reflections, contrast, and different focus levels. The images of UBIRIS can be classified into different classes based on three parameters focus, reflections, and the visibility of the iris using three scale levels which are good, average, and bad. To investigate the performance of our algorithm, we considered all the 1877 images of the UBIRIS v1 database that have 800/600 resolution. Figure 1 and Figure 6 give some examples of the images of this database. As shown from these figures, UBIRIS v1 includes a diverse set of irises with different features and colors which makes it suitable for training and testing our proposed algorithm.

### 4.2. Results

The proposed segmentation algorithm is implemented using MATLAB software. As we described in the previous section, the iris region is estimated first using Haar-like features then the pupil is localized and removed. After that, the color of the iris is detected using the k-means algorithm, and accordingly, a set of different thresholding techniques are applied to determine the pixels of each iris type. Finally, a set of robust techniques is conducted to clean the remaining non-iris pixels.

Figure 9 shows a sample of segmented iris images after applying our iris segmentation algorithm. The first row represents the original iris images; the second row shows the images after removing the pupil and upper eyelids regions and marking them with black pixels. In the third row of the figure, we give the binary images after detecting the color of the iris and classify its pixels accordingly. The segmented images confirm the high efficiency of our proposed methodology in both determining the iris regions and isolating the noise regions especially those that occur as a result of specular reflections and upper eyelashes. While our algorithm can accurately isolate the specular reflection regions, many proposed segmentation algorithms fail or face some difficulties in dealing with such challenging tasks especially when



**Figure 9:** A sample set of segmented irises using the proposed color-based algorithm where the third row represents the binary image of the segmented iris region.

**Table 2:** Performance summary of the proposed segmentation algorithm concerning other methods.

Method	Tested Images	Iris (%)	Pupil (%)	Eyelashes and eyelids (%)	Time (s)
Daugman [10]	UBIRIS v1	95.22	95.22	-	3.20
Wildes [14]	UBIRIS v1	98.60	96.60	95.32	2.31
Sahmoud et al. [4]	UBIRIS v1	98.12	96.52	96.12	1.90
Fast Multi-Models [5]	600	96.75	96.25	96.75	1.12
Fourier spectral [35]	UBIRIS v1	98.49	94.47	-	-
Proposed Algorithm	UBIRIS v1	98.92	98.01	98.76	1.64

working under visible wavelength environments. The results show that our algorithm can detect all types of specular reflections and shadows that most other algorithms fail to detect. We found that even in the binary truth table images that are used in testing the performance of segmentation methods or training the models to deal with iris segmentation, there are some undetected regions for shadow and specular reflections that our proposed algorithm can detect.

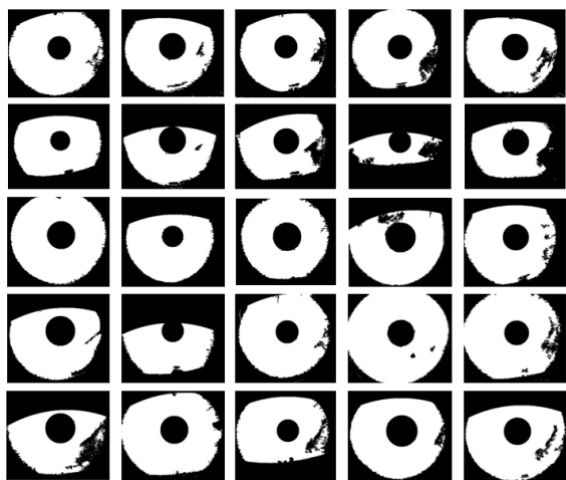
Table 2 summarizes the results of our comparative study to investigate the segmentation performance between the proposed algorithm and other previously proposed algorithms. To assess the performance of algorithms in detail, four performance metrics are considered to measure the efficiency of algorithms, iris segmentation accuracy, pupil isolation accuracy, eyelashes and eyelids isolation accuracy, and average execution time in seconds. For the iris, pupil, and eyelashes the accuracy is obtained by visual inspection of each iris image as done in [10], [35]. A correct segmentation is considered when the detected iris, pupil, and eyelid borders fall exactly into the real borders of these objects. While some researchers use the ground truth of manually segmented iris images to

compare their proposed segmentation algorithms, we prefer not to use it for two reasons. First, there is no full ground truth available for the UBIRIS v1 database and second, most of the available ground truth binary images ignore some noise factors such as specular reflections and shadows which causes unfair comparison. The average segmentation time is obtained by considering the mean processing time of 100 iris images. All the algorithms except the Fourier spectral algorithm were implemented and tested in Matlab where implementations are not perfectly optimized for fast execution speed. Since there is no available public code for the Fourier spectral method, we report the result presented in [34].

From the results of Table 2, it is observed that the proposed segmentation algorithm performs better than most of the other compared algorithms even in the presence of noise factors under non-ideal conditions. It obtained the best segmentation accuracy in the pupil, eyelashes, and eyelids, the second-best results regarding time, and the third-best results for the iris. Wildes' method [7] achieved the best results with a slightly better result than the proposed algorithm, but it faces some difficulties in dealing with eyelashes and



pupil regions where its performance decreases to 95.3 and 96.6 respectively. Moreover, it spends 40% more time on average than the proposed algorithm. On the other hand, Daugman's algorithm [3] which was originally developed for cooperative environments was significantly affected by existing noise factors in the UBIRIS database and obtained around 4.8% percentage of false segmentation. One reason for this is the low image quality of noisy images which is considered insufficient for the integrodifferential operator to work efficiently. Sahnoud et al. [10] algorithm performs well in iris and pupil segmentation, but it is observed that it fails in some complex eyelashes and shadow situations. Moreover, both Sahnoud et al. [10] algorithm and Wildes' [7] algorithm assume that the iris is circular which causes some inaccurate results in the off-angle iris images. The fast multi-model method [29] needs both training and testing sets; therefore, we tested it under 600 images only. It achieved acceptable results, but it is still not as good as other algorithms since it concentrates on execution speed more than segmentation accuracy. For mPA metrics results, our proposed algorithm obtained the second-best results whereas the DFCN algorithm achieved the best results. One reason for this is the high efficiency of the



deep learning approach used in DFCN which is one of our future work points.

**Figure 10:** A sample set of binary images that represent the segmented irises using the proposed color-based algorithm.

Note that the iris color can be also important in soft biometrics where the color and the size of the eye are included in the features for human identification and verification processes. Fig. 10 shows the binary images for a set of segmented irises using the proposed color-based algorithm. The binary images clearly demonstrate the ability of the proposed

algorithm to deal with different levels of eyelids and eyelash occlusions. Furthermore, the specular reflections and shadows are accurately isolated from the iris regions. According to our results, most UBIRIS iris images are exposed to specular reflections from the right sides of the irises more than the left sides.

Regarding the execution time of the compared algorithms, we observed that the fast multi-models method [29] is the fastest. This result is reasonable since it utilizes a multi-thresholding mechanism to detect iris pixels in different color spaces. The proposed method's computation time is the second-best one followed by Sahnoud et al. method. Note that the implementation of these algorithms is not optimized well to have low computation time, we believe that with more code optimization and by implementing our method using C++ the computation time can be significantly enhanced. On the other hand, the proposed algorithm sometimes fails in segmenting iris images in special cases. Fig. 11 shows some examples of failed or non-accurate classified iris images. The main issue of the proposed algorithm is when we have two high and low-intensity colors in the same iris as shown in Fig. 11. In this case, the proposed algorithm may exclude some iris regions and consider them as specular reflections or noise. In addition, our algorithm may face some difficulties when handling images of individuals with glasses especially when the glasses frame includes diverse colors that interfere with the iris colors.

The high speed of the proposed algorithm compared to other algorithms enables it to be used efficiently in real-time or online applications without affecting the segmentation efficiency. Dealing with each iris color level separately can enhance the segmentation results (as shown in Table 2) and reduce the iris regions that are excluded falsely during noise-cleaning techniques. Moreover, the proposed algorithm can be used as a first processing step for other medical or eye-tracking algorithms.

## V. CONCLUSION

In this paper, we proposed a new robust iris segmentation algorithm that utilizes the color information of human eyes to enhance the iris segmentation step in unconstrained and non-cooperative environments. While most of the current iris segmentation methods ignore the iris color, the proposed algorithm benefits from it and uses it to deal with each color separately more specifically during segmentation. In the first step, the expected iris center is estimated using Haar-like features, and then the iris



color is detected by using k-means clustering. Accordingly, a color-convenient segmentation algorithm is applied to classify the pixels of the candidate region into iris and non-iris pixels. To remove the other noise factors such as eyelids, eyelashes, luminance, and shadows, several robust noise removal techniques are applied. Our experimental results on the UBIRIS database demonstrated the robustness of our algorithm against different noise factors and non-ideal conditions. Moreover, the results prove the efficiency of dealing with each iris color set separately which significantly decreases the false segmentation errors and enhances the performance of the iris recognition system. The results confirmed the efficiency of the proposed approach compared to other state-of-the-art algorithms from different approaches. In addition, the proposed algorithm showed promising results regarding the execution time since the results showed that the proposed method is faster than other approaches by 23% on average while still obtaining competitive accuracy results.

In future work, we are planning to extend our work by including other iris colors that do not exist in the UBIRIS database such as green and red iris colors. In addition, optimizing the code of our algorithm and merging it with current CNN algorithms is another planned research work [38].

## REFERENCES

- [1] Kak, N., Gupta, R., & Mahajan, S. (2010). Iris recognition system. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 1(1), 34-40.
- [2] Daugman, J. (2001). Statistical richness of visual phase information: update on recognizing persons by iris patterns. *International Journal of computer vision*, 45(1), 25-38.
- [3] Daugman, J. (2004). Iris recognition border-crossing system in the UAE. *International Airport Review*, 8(2).
- [4] Chen, J., Shen, F., Chen, D. Z., & Flynn, P. J. (2016). Iris recognition based on human-interpretable features. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 11(7), 1476-1485.
- [5] Thepade, D. S., & Mandal, P. R. (2014). Novel iris recognition technique using fractional energies of transformed iris images using haar and kekre transforms. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(4).
- [6] Sahnoud, S. A. I. (2011). Enhancing iris recognition.
- [7] Wildes, R. P. (1997). Iris recognition: an emerging biometric technology. *Proceedings of the IEEE*, 85(9), 1348-1363.
- [8] Bowyer, K. W., Hollingsworth, K. P., & Flynn, P. J. (2013). A survey of iris biometrics research: 2008–2010. In *Handbook of iris recognition* (pp. 15-54). Springer, London.
- [9] Liu, N., Li, H., Zhang, M., Liu, J., Sun, Z., & Tan, T. (2016). Accurate iris segmentation in non-cooperative environments using fully convolutional networks. In *2016 International Conference on Biometrics (ICB)* (pp. 1-8). IEEE.
- [10] Sahnoud, S. A., & Abuhaiba, I. S. (2013). Efficient iris segmentation method in unconstrained environments. *Pattern Recognition*, 46(12), 3174-3185.
- [11] Daugman, J. (2009). How iris recognition works. In *The Essential Guide to Image Processing* (pp. 715-739). Academic Press.
- [12] Tan, T., He, Z., & Sun, Z. (2010). Efficient and robust segmentation of noisy iris images for non-cooperative iris recognition. *Image and vision computing*, 28(2), 223-230.
- [13] Proença, H., & Alexandre, L. A. (2007). The nice. i: noisy iris challenge evaluation-part i. In *2007 First IEEE International Conference on Biometrics: Theory, Applications, and Systems* (pp. 1-4). IEEE.
- [14] Tisse, C. L., Martin, L., Torres, L., & Robert, M. (2002). Person identification technique using human iris recognition. In *Proc. Vision Interface* (Vol. 294, No. 299, pp. 294-299).
- [15] Shamsi, M., Saad, P. B., Ibrahim, S. B., & Kenari, A. R. (2009). Fast algorithm for iris localization using Daugman circular integro differential operator. In *2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition* (pp. 393-398). IEEE.
- [16] Pedersen, S. J. K. (2007). Circular hough transform. *Aalborg University, Vision, Graphics, and Interactive Systems*, 123(6).
- [17] Uhl, A., & Wild, P. (2012). Weighted adaptive hough and ellipsopolar transforms for real-time iris segmentation. In *2012 5th IAPR international conference on biometrics (ICB)* (pp. 283-290). IEEE.
- [18] Huang, J., Wang, Y., Tan, T., & Cui, J. (2004, August). A new iris segmentation method for recognition. In *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.* (Vol. 3, pp. 554-557). IEEE.
- [19] Kong, W. K., & Zhang, D. (2001). Accurate iris segmentation based on novel reflection and eyelash detection model. In *Proceedings of 2001 International Symposium on Intelligent Multimedia, Video and Speech Processing. ISIMP 2001* (IEEE Cat. No. 01EX489) (pp. 263-266). IEEE.
- [20] Ma, L., Wang, Y., & Tan, T. (2002). Iris recognition using circular symmetric filters. In *Object recognition supported by user interaction for service robots* (Vol. 2, pp. 414-417). IEEE.

- [21] Banerjee, S., & Mery, D. (2015). Iris segmentation using geodesic active contours and grabcut. In *Image and Video Technology* (pp. 48-60). Springer, Cham.
- [22] Shah, S., & Ross, A. (2009). Iris segmentation using geodesic active contours. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 4(4), 824-836.
- [23] Ouabida, E., Essadique, A., & Bouzid, A. (2017). Vander Lugt Correlator based active contours for iris segmentation and tracking. *Expert Systems with Applications*, 71, 383-395.
- [24] Ross, A., & Shah, S. (2006). Segmenting non-ideal irises using geodesic active contours. In *2006 Biometrics Symposium: Special Session on Research at the Biometric Consortium Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- [25] Badrinarayanan, V., Kendall, A., & SegNet, R. C. (2015). A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. *arXiv preprint arXiv:1511.00561*, 5.
- [26] Wang, C., Zhu, Y., Liu, Y., He, R., & Sun, Z. (2019). Joint iris segmentation and localization using deep multi-task learning framework. *arXiv preprint arXiv:1901.11195*.
- [27] Zhao, Z., & Kumar, A. (2017). Towards more accurate iris recognition using deeply learned spatially corresponding features. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 3809-3818).
- [28] Gangwar, A., & Joshi, A. (2016). DeepIrisNet: Deep iris representation with applications in iris recognition and cross-sensor iris recognition. In *2016 IEEE international conference on image processing (ICIP)* (pp. 2301-2305). IEEE.
- [29] Sahnoud, S., & Fathee, H. N. (2020). Fast Iris Segmentation Algorithm for Visible Wavelength Images Based on Multi-color Space. In *International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems* (pp. 239-250). Springer, Cham.
- [30] Viola, P., & Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition. CVPR 2001* (Vol. 1, pp. I-I). Ieee.
- [31] Bao, P., Zhang, L., & Wu, X. (2005). Canny edge detection enhancement by scale multiplication. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 27(9), 1485-1490.
- [32] Proença, H., & Alexandre, L. A. (2005). UBIRIS: A noisy iris image database. In *International Conference on Image Analysis and Processing* (pp. 970-977). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [33] Gragnaniello, D., Poggi, G., Sansone, C., & Verdoliva, L. (2014, November). Contact lens detection and classification in iris images through scale invariant descriptor. In *2014 Tenth International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems* (pp. 560-565). IEEE.
- [34] Puhan, N. B., Sudha, N., & Sivaraman Kaushalram, A. (2011). Efficient segmentation technique for noisy frontal view iris images using Fourier spectral density. *Signal, Image and Video Processing*, 5(1), 105-119.
- [35] Proença, H., & Alexandre, L. A. (2006). Iris segmentation methodology for non-cooperative recognition. *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing*, 153(2), 199-205.
- [36] Bazrafkan S, Thavalengal S, Corcoran P. (2018). An end-to-end deep neural network for iris segmentation in unconstrained scenarios. *Neural Networks*. 106:79-95.
- [37] Chen Y, Wang W, Zeng Z, Wang Y. (2019). An adaptive CNNs technology for robust iris segmentation. *IEEE Access*. 7:64517-64532
- [38] Fathee, H., & Sahnoud, S. (2021). Iris segmentation in uncooperative and unconstrained environments: State-of-the-art, datasets and future research directions. *Digital Signal Processing*, 118, 103244.
- [39] Li, Xi, Tian Li, Shaoyi Li, Bin Tian, Jianping Ju, Tingting Liu, and Hai Liu. (2023). "Learning fusion feature representation for garbage image classification model in human-robot interaction." *Infrared Physics & Technology* 128: 104457.
- [40] Liu, Tingting, Jixin Wang, Bing Yang, and Xuan Wang. (2021). "NGDNet: Nonuniform Gaussian-label distribution learning for infrared head pose estimation and on-task behavior understanding in the classroom." *Neurocomputing* 436: 210-220.
- [41] Liu, Tingting, Bing Yang, Hai Liu, Jianping Ju, Jianyin Tang, Sriram Subramanian, and Zhaoli Zhang. (2022). "GMDL: Toward precise head pose estimation via Gaussian mixed distribution learning for students' attention understanding." *Infrared Physics & Technology* 122 (2022): 104099.
- [42] Jeong, D.S., Hwang, J.W., Kang, B.J., Park, K.R., Won, C.S., Park, D.K. and Kim, J., (2010). A new iris segmentation method for non-ideal iris images. *Image and vision computing*, 28(2), pp.254-260.
- [43] Toizumi, Takahiro, Koichi Takahashi, and Masato Tsukada. (2023). "Segmentation-free direct iris localization networks." In *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*, pp. 991-1000.
- [44] Chen, Ying, Huimin Gan, Huiling Chen, Yugang Zeng, Liang Xu, Ali Asghar Heidari, Xiaodong Zhu, and Yuanning Liu. (2023) "Accurate iris segmentation and recognition using an end-to-end unified framework based on MADNet and DSANet." *Neurocomputing* 517: 264-278.

## Effects of Thermo-Mechanical Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of $\beta$ -Type Titanium Alloys

Hakan YILMAZER <sup>1</sup> , Muhammed Enes İLGAZI <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>*Yıldız Technical University (YTU), Faculty of Chemistry and Metallurgy, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Istanbul, Türkiye*

### Abstract

This study investigates the microstructural evolution and mechanical behavior of severe cold-rolled  $\beta$ -type Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) alloys under systematic solution heat treatments (ST) at 1063°K for durations ranging from 5 to 60 minutes. This comprehensive analysis provides valuable insights into the microstructural and mechanical characteristics of TNTZ alloys under varying solution heat treatment durations, offering a foundational understanding for optimizing their application in engineering contexts. Microstructural analysis reveals that both solution-treated (ST) and cold-rolled (CR) samples exhibit a predominant single body-centered cubic (BCC)  $\beta$  phase, while cold-rolled and solution-treated (CST-Q) samples display a combination of  $\beta$  and martensite orthorhombic  $\alpha''$  phases. ST samples demonstrate equiaxed grains with an average diameter of  $\sim 72 \mu\text{m}$ , albeit with limited clarity. In contrast, CST-Q samples treated for over 10 minutes exhibit finer equiaxed grains within the 7-14  $\mu\text{m}$  range. Hardness values increase with prolonged solution heat treatment, reaching approximately  $\sim 183 \text{ HV}$  for ST and  $\sim 234 \text{ HV}$  for CR. Moreover, hardness continues to rise with increasing treatment duration, reaching  $\sim 204 \text{ HV}$  for CST10Q,  $\sim 229 \text{ HV}$  for CST30Q, and  $\sim 242 \text{ HV}$  for CST60Q. Mechanical properties, including tensile strength, yield strength, and elongation, vary across samples. ST shows values of  $\sim 710 \text{ MPa}$ ,  $\sim 610 \text{ MPa}$ , and  $\sim 25\%$ , CR with  $\sim 1305 \text{ MPa}$ ,  $\sim 395 \text{ MPa}$ , and  $\sim 17.5\%$ , CST5Q with  $\sim 1042 \text{ MPa}$ ,  $\sim 440 \text{ MPa}$ , and  $17.5\%$ , CST10Q with  $\sim 1010 \text{ MPa}$ ,  $\sim 650 \text{ MPa}$ , and  $21\%$ , and CST60Q with  $\sim 930 \text{ MPa}$ ,  $\sim 660 \text{ MPa}$ , and  $\sim 21\%$ . Fracture surfaces of all samples exhibit dimple structures and microvoid nucleation, indicative of ductile failure.

**Keywords:** Titanium alloys, Thermomechanical processing, Heat treatments, Mechanical properties.

### I. INTRODUCTION

Titanium (Ti) alloys find extensive application in the aircraft and bioimplant sectors owing to their superior resistance against corrosion and high specific strength.[1-5] Beta ( $\beta$ )-type Ti alloys having body centered cubic (BCC) structure are considered the most versatile group due to their remarkable combination of strength, toughness, and resistance to fatigue.[4] The  $\beta$ -type metastable Ti alloys have been advanced to enhance the mechanical behaviors of  $\beta$ -type Ti alloys, including great strength, low and moderated Young's modulus, and large ductility.[6] Recent research studies have provided evidence to support the idea that metastable alloys hold great promise for marine applications due to their exceptional cold formability and relatively favorable resistance to corrosion. These advantageous properties not only enhance their long-term durability in marine environments but also offer significant advantages in terms of processing, thanks to their ease of shaping and forming.[7] Over the past decade, there has been a significant increase in the widespread adoption of  $\beta$ -type metastable Ti alloys due to their ability to simultaneously exhibit all these properties.[8] Furthermore, the heat-treatable characteristics of metastable alloys have significantly increased their utilization in a wide array of applications.[9]

The Ti-29Ta-13Nb-4.6Zr (TNTZ) alloys having sensitive the  $\beta$  stability balance which classified metastable leads to heat treatability and martensite transformations to improve static and cyclic strength, ductility, and rigidity.[10-14] Metastable phases comprise hexagonal close-packed (HCP)  $\alpha'$ , orthorhombic  $\alpha''$  and hexagonal  $\omega$  phase. Solution treatment at 1063°K following by aging processes at temperatures below 400°C lead to longer fatigue life and high strength by controlling of these precipitates and martensites.[12,13] Heat treatment is commonly employed to achieve high strength in  $\beta$ -type metastable Ti alloys. [14,15] The strengthening process utilized for  $\beta$ -type metastable Ti alloys involves the steps of solution treatment (ST) and aging treatment (AT).[15] This processes have been utilized to optimize the microstructure and phase structure, leading to improved mechanical properties.[8] The application of ST and AT for  $\beta$ -type metastable Ti alloys can be carried out at different temperatures and durations, depending on the specific chemical composition of the alloys and the desired properties to be achieved.[16] Furthermore, severe deformed microstructure having high dislocation density leads phase transition due to the diffusion rate. The ST for  $\beta$ -type metastable Ti alloys can be conducted either in the  $\alpha/\beta$  region below the  $\beta$  transition temperature ( $T_\beta$ ) or in the  $\beta$  region at temperatures above the  $T_\beta$ . [17] The main objectives of the ST are indeed to dissolve the alloying elements into the  $\beta$  phase, create  $\beta$  phase solid solution, and achieve  $\alpha$  supersaturated  $\beta$  solid solution at room temperature. These goals are accomplished by heating the material to the  $\beta$  phase region, holding it at this temperature for  $\alpha$  suitable duration, and then rapidly quenching it to room temperature.[18]

p

This study researches into unexplored territories by investigating the profound impact of ST on both the microstructure and mechanical properties of TNTZ alloy under the rigors of severe cold rolling. What sets this research apart is the meticulous examination of phase construction, microstructural control, and mechanical properties in the context of severely deformed TNTZ. This alloy exhibits exceptional characteristics, marked by high stored energy and distortion owing to an unprecedentedly high dislocation density. The groundbreaking aspect of this study lies in

unraveling the intricate interplay between severe deformation and the resulting microstructural and mechanical transformations in TNTZ, shedding new light on materials science and engineering.

## II. MATERIALS AND METHODS

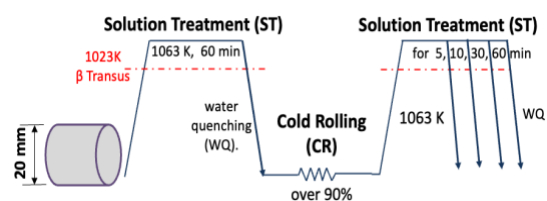
### 2.1. Materials Preparation

The present study utilized TNTZ bars having a diameter of 25 mm. The chemical composition of TNTZ is given in Table 1.

**Table 1.** Chemical composition (mass %) of the hot-forged Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr

Ti	Nb	Ta	Zr	Fe	C	N	O	H
Bal	28.6	12.3	4.75	0.22	0.02	0.01	0.09	0.04

Figure 1 shows the sample preparation in this study. The TNTZ bars underwent a solution treatment at 1063°K for 60 minutes under vacuum conditions. Subsequently, they were quenched in iced water. The solution-treated TNTZ sample is henceforth referred to as the ST samples. The ST samples were subjected to severe cold rolling with a reduction rate of exceeding 90% to increase the density of dislocations. The cold rolled ST samples are henceforth referred to as the CR samples. The CR samples were subjected to solution treatment (ST) at 1063°K for various durations of 5, 10, 30, and 60 minutes under vacuum atmosphere. Then they are quenched in the iced water. Hereafter, these samples referred as CST-Q. The CST-Q samples were denoted as CST5Q, CST10Q, CST30Q, and CST60Q, respectively.



**Figure 1.** Schematic drawing of the TNTZ sample preparation.

## 2.2. Microstructural Characterization

The microstructures of the samples were examined using the metallurgical optic microscopy (OM) and X-Ray Diffraction (XRD) analysis. The specimens were prepared metallographically for the microstructural examination that their surfaces were wet grinded using the water resistant emery papers of #320- #2500 and then buff polished with the diamond solution having particles of 1  $\mu\text{m}$ . In the end, they were etched in an etching HF solution with a composition of 5% HF and 95%  $\text{H}_2\text{O}$ .

The microstructures of the samples, polished mirror like and then etched, were examined using an optical microscope integrated with a digital camera with image analysis techniques (NIS-Elements Version 4.3). The average grain diameters of the samples were calculated according to ASTM E112.

The phase constructions of the samples having a wet polished surface were characterized by X-ray diffraction (XRD, Bruker Discovery D8) with a  $\text{Cu-K}\alpha$  radiation at 40 kV and 40 mA. Diffraction patterns were acquired using a continuous scanning mode with a scan step of 0.02 degrees per second spanning the  $2\theta$  range of  $30^\circ$  to  $80^\circ$ .

## 2.3. Mechanical Tests

The Vickers hardness measurements of all samples were conducted utilizing the Vickers micro hardness instrument (HVS-1000), with a load of 1000g for a dwell time of 10 seconds. The average hardness value was calculated using 10 individual measurements.

Tensile testing of the TNTZ specimens was conducted using a tensile machine (Instron-type) with a 25 kN capacity. Prior to the test, the surfaces of the TNTZ samples were wet polished using emery papers with a grid of up to #2500. Three samples with identical dimensions were prepared for each condition for the tensile testing.

Scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the fracture surfaces of the samples after the tensile testing by a Zeiss EVO LS 10 SEM, equipped with a field emission cathode (FEG), operating at an accelerating voltage of 7.5 Kv.

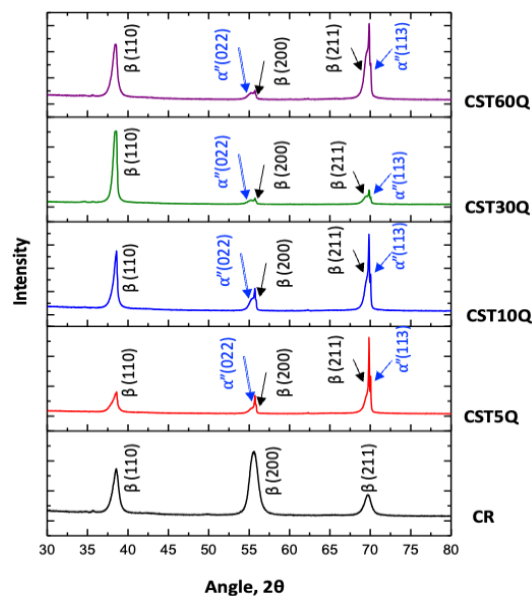
## III. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. XRD Results

The microstructure of the ST sample consists of a single BCC ( $\beta$ ) structure as reported in the previous study.[19,20] Figure 2 presents the XRD profiles of various TNTZ alloys, including CR, CST5Q, CST10Q, CST30Q, and CST60Q. The relative intensities and widths of all primary and secondary peaks, calculated by OriginLab from the profiles of CR and CST-Q samples in Table 2. The CR samples also exhibits a single  $\beta$  phase, which is consistent with previous studies. [13,21] While ST samples has a strong texture of  $\beta(110)$  [13,21], CR reveals a dominant  $\beta(200)$  orientation in its microstructure.

**Table 2.** Relative intensities of  $\beta$  peaks in XRD profiles of the CR and CST-Q samples

Peaks	Sample	Angle	Intensity	FWHM	Relative Intensity
$\beta(110)$	CR	38.541	6665.575	0.947	0.272
$\beta(200)$		55.597	14112.47	1.275	0.577
$\beta(211)$		69.688	3690.023	1.089	0.151
$\beta(110)$	CST5Q	38.541	5027.88	1.072	0.247
$\beta(200)$		55.743	208.97	0.148	0.010
$\beta(211)$		69.863	10548.86	0.894	0.518
$\alpha''(022)$		55,382	1719,313	1,043	0,225
$\alpha''(113)$		70,049	2858,273	0,418	0,225
$\beta(110)$		38.541	18803.8	0.437	0.746
$\beta(200)$	CST10Q	55.743	415.898	0.204	0.016
$\beta(211)$		69.903	3397.879	1.792	0.135
$\alpha''(022)$		55,382	1719,313	0,979	0,062
$\alpha''(113)$		70,049	849,157	0,007	0,103
$\beta(110)$		38.541	16757.47	0.333	0.752
$\beta(200)$	CST30Q	55.743	987.407	0.244	0.044
$\beta(211)$		69.834	2985.02	0.526	0.134
$\alpha''(022)$		55,382	1438,585	0,600	0,070
$\alpha''(113)$		70,049	115,983	0,005	0,070
$\beta(110)$		CST60Q	38.5413	17761.49	0.358
$\beta(200)$	55.743		452.841	0.230	0.020
$\beta(211)$	69.834		2029.061	0.592	0.045
$\alpha''(022)$	55,236		1247,846	1,162	0,103
$\alpha''(113)$	70,049		1046,033	6,969	0,051



**Figure 2.** XRD profiles of the CR, CST5Q, CST10Q, CST30Q, and CST60Q sample

The results indicate a more intense  $\beta(200)$  peak on the surface during cold rolling [7], but this changes after solution treatment of CR, suggesting a change in textures due to solution treatment. Additionally, as consistent with a previous study [21], the TNTZ alloys shows stress-induced orthorhombic  $\alpha''$  martensite transformation due to their delicate  $\beta$  stability.[21]

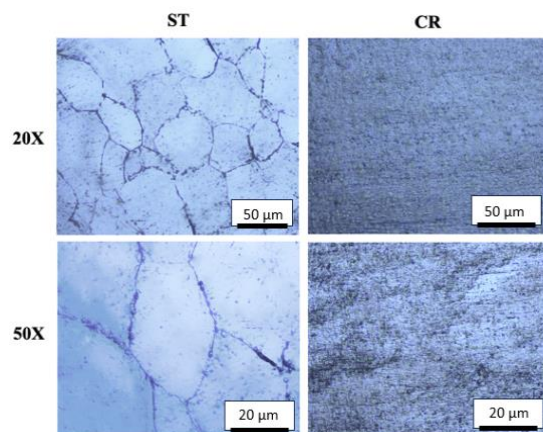
The XRD profiles of the CST-Q samples provide evidence of the presence of martensite phase ( $\alpha''$ ) formed within the  $\beta$  matrix. The XRD patterns show the main peaks of the  $\beta$  phase, including (110), (200), and (211). After solution treatment of CR, the microstructure displays firstly a texture of  $\beta(211)$  for CST5Q. Furthermore, the  $\beta(110)$  peak exhibits a strong intensity as the treatment time increases from 10 to 60 minutes, while the relative intensity decreases.

The XRD line profile shown in Fig. 2, where the  $\beta(200)$  and  $\alpha''(022)$  peaks, as well as the  $\beta(211)$  and  $\alpha''(113)$  peaks, are distinctly observed for the solution-treated CST-Q alloys. While the initial solution treatment did not lead martensite transformation but second treatment of the severe cold rolled TNTZ microstructure shows  $\alpha''$ -martensitic transformation. It is considered that such transformation is very depending on the severe cold rolling having high dislocation density.[22]

### 3.2. Optical Micrograph

Figure 3 depicts the optical micrographs of ST and CR samples. The ST sample reveals an equiaxed coarse grains surrounding geometrical defined larger misoriented grain boundaries. Also ST grains do not show any secondary phases. The optical micrographs of CR show that the grain boundaries are not clearly visible due to severe cold rolling with a reduction ratio exceeding 90%. The microstructure exhibits a strong contrasts due to a high dislocation density along the rolling direction, making it impossible to distinguish the grain boundaries.

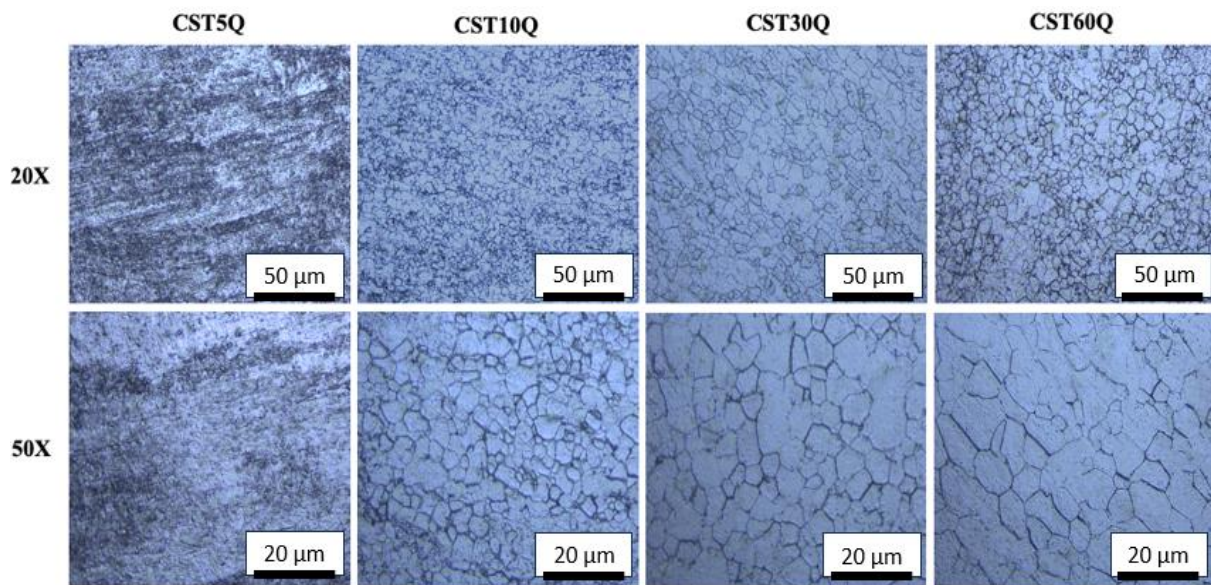
The optical micrographs of CST5Q, where no grain boundaries are observed, as shown in Figure 4. The microstructures of CST-Q samples shows the well-defined grains surrounding distinguishable from 10 to 60 minutes due to the increased quenching time providing sufficient duration for recrystallization.



**Figure 3.** Optical micrographs of ST and CR at 20X and 50X

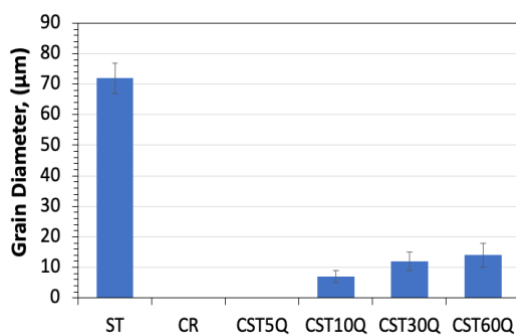
A result of the prolonged treatment time, allowing for further grain growth. Furthermore, the secondary  $\alpha''$  shown in the XRD profiles of the CST-Q samples does not distinguishable in the newly recrystallized grains in the optical. This results indicates. The formation of the  $\alpha''$  passes is too small to detect by Optical microscope and scanning electron microscope was reported another martensite phase hexagonal  $\omega$  phase in TNTZ.[12]





**Figure 4.** Optical micrographs of the cold rolled TNTZ subjected to solution treatment at various durations: CST5Q, CST10Q, CST30Q, and CST60Q.

Figure 5 provides an overview of the grain diameter values measured using the ImageJ application from optical micrographs of the ST, CR, CST5Q, CST10Q, CST30Q, and CST60Q. The ST sample reveals an equiaxed coarse grains having a diameter of  $\sim 72 \mu\text{m}$ . While CST5Q samples show a grain with an average diameter of around  $\sim 7 \mu\text{m}$ , the further increased treatment time increased the grain diameter to CST30Q ( $\sim 12 \mu\text{m}$ ) and CST60Q ( $\sim 14 \mu\text{m}$ ), respectively.



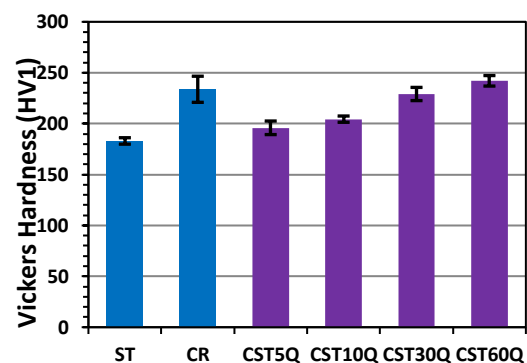
**Figure 5.** Average grain size of ST, CR, CST5Q, CST10Q, CST30Q, and CST60Q

### 3.3. Hardness Test

Figure 6 illustrates the average hardness (HV) values of the ST, CR, and CST-Q samples. The hardness of CR surpasses that of ST ( $\sim 183\text{HV}$ ), with average hardness values of  $\sim 234 \text{HV}$  respectively. The hardness values of TNTZ improved with rising the

intensity and networks of dislocations by severe distortion of the cold rolling.[12,20]

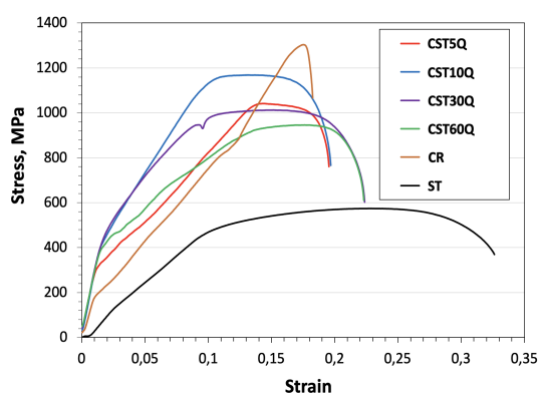
Upon solution treatment followed by ice-water quenching after severe cold rolling, the hardness of CST5Q experiences a significant decrease to  $\sim 196 \text{HV}$ , dislocation recovery and partial recrystallization.[23] The solution treatment after cold rolling leads to a gradual increase in the hardness values of TNTZ with an increase in the duration of the solution treatment due to the martensite phases.[24] The HV values are,  $\sim 204 \text{HV}$  for CST10Q,  $\sim 229 \text{HV}$  for CST30Q, and  $\sim 242 \text{HV}$  for CST60Q, respectively.



**Figure 6.** Average Vickers hardness values of the ST, CR, and CST-Q samples

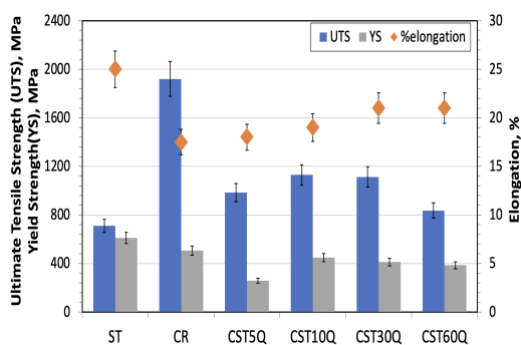
### 3.4. Tensile Strength

Figure 7 depict the stress-strain curves obtained from tensile tests of all TNTZ samples. Each stress-strain curve exhibits a distinct shape. According to the curves in the elastic regions of the stress-strain curves, the CR and CST-Q samples show similar elasticity. It is considered that the CR samples have both  $\beta$  and  $\alpha'$  phases which it was reported about the stress induced martensite transformation.[12]



**Figure 7.** Stress-strain curves of the ST, CR, CSTQ samples after tensile tests.

Figure 8 shows the mechanical properties measured by tensile tests of all TNTZ samples. While the ST samples show lowest UTS and YS values ( $\sim 710$  and  $\sim 610$  MPa) and largest elongation% ( $\sim 25\%$ ) until rupture, the CR samples shows highest UTS ( $\sim 1305$  MPa) and lowest (17,5%). The highest difference between YS and UTS indicated the strain hardening for the CR sample.[13]



**Figure 8.** Mechanical properties measured by tensile tests of the ST, CR, CST5Q, CST10Q, CST30Q, and CST60Q.

The stress-strain curves of CST-Q samples indicates CST-Q samples have higher elasticity comparing those of ST and CR due to the martensite phase. CST10Q samples exhibits an highest YS of  $\sim 670$  MPa and an UTS of  $\sim 1129$  MPa among CST-Q samples. On the other hand, the CST5Q samples shows the lowest YS of  $\sim 440$  MPa but a high UTS of  $\sim 1042$  MPa. Such large differences between YS and UTS caused by strain hardening due to the high dislocation and martensite phase. Furthermore, while CST30Q has a UTS of  $\sim 1010$  MPa and a YS of  $\sim 650$ MPa, the CST60Q has a UTS of  $\sim 930$  MPa and a YS of  $\sim 660$ MPa. They show the largest elongation of  $\sim 21\%$  among the CST-Q samples.

The SEM fractography observations of the tensile tested samples in Figure 9 and Figure 10 indicates that all fractures exhibit ductile behavior. The CR fractographs show smaller dimples than those of CST-Q samples and micro voids on the surface of the fracture. The various sizes of dimples and void nucleations are observed on the CST5Q fracture due to the undefined grain boundaries in the middle of recovery and starting recrystallization proses.[25] Similarly, with increasing solution treatment duration, the dimples in CST-Q appear to be more uniform, and the tearing ridges are wider and shorter. After solution treatment at 30 minutes, tearing ridges are observed in both CST-Q, and they become more pronounced with an increase in solution treatment time to 60 minutes.

At high magnification, voids and deep fractures are visible. The elongated parts in the fractographs indicate ductile fracture, and the elongation percentage under these experimental conditions was approximately 16-40%. This suggests that the fractures mainly consist of ductile fracture.



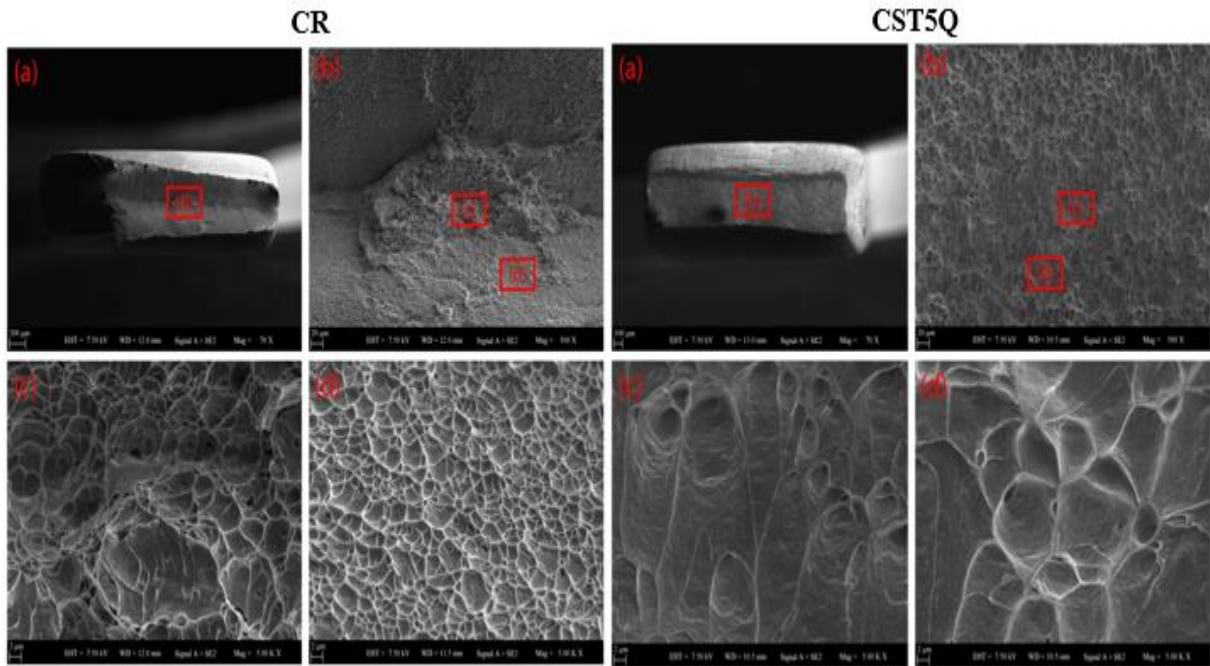


Figure 9. SEM images of the fracture surfaces of the CR and CST-5Q samples

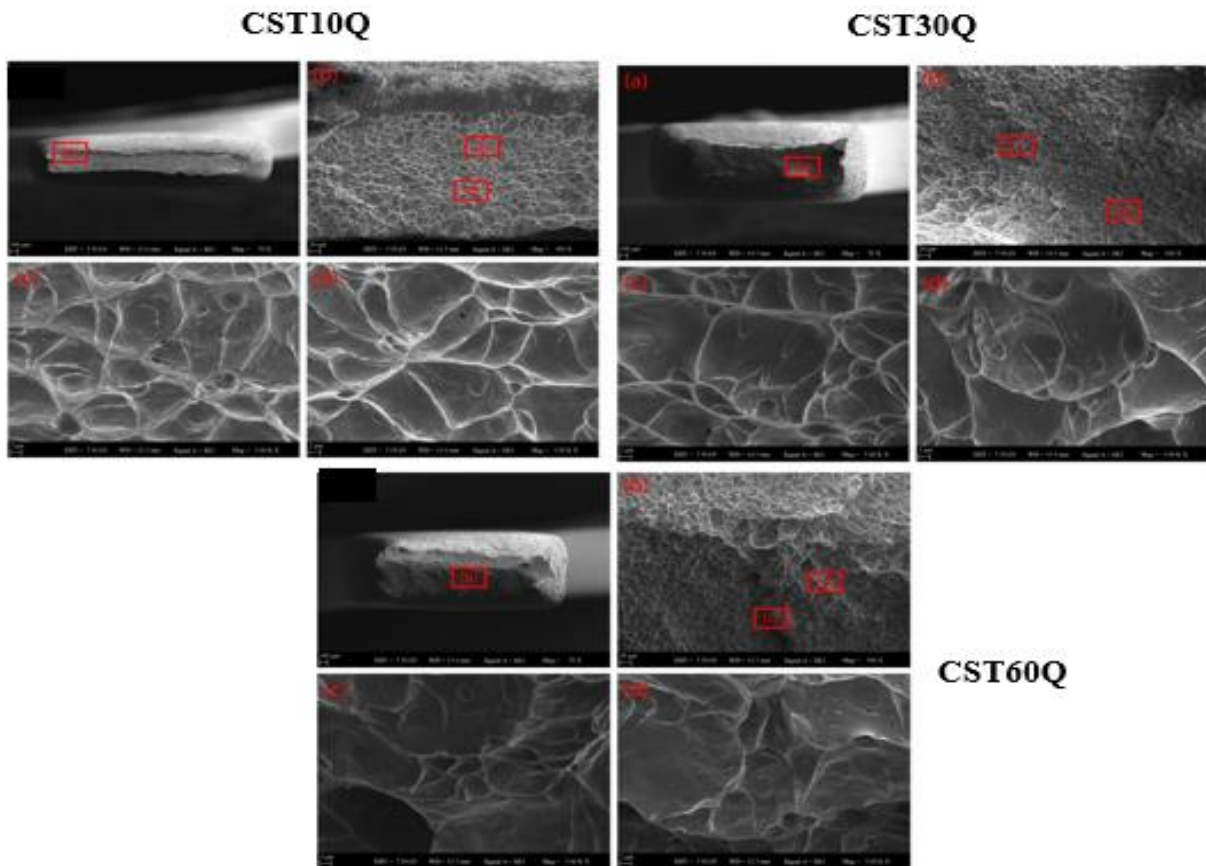


Figure 10. SEM images of the fracture surfaces of the CST-10Q, CST30Q, and CST60Q samples.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express great thanks to Professor Mitsuo Niinomi (Tohoku University (Sendai, Japan), (Osaka University, Osaka Japan) and Masaaki Nakai (Kindai University, Osaka, Japan) for providing hot-rolled TNTZ alloys in this study.

## IV. CONCLUSION

In this study, the microstructural features and mechanical behaviors of the severe cold rolled  $\beta$ -type Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) alloys subjected to ST at 1063°K for systematical increasing duration as 5, 10, 30, and 60 minutes. The following conclusions were obtained:

1. The microstructure of ST and CR samples consists of a single BCC ( $\beta$ ) phase. The microstructure of CST-Q samples have  $\beta$  and martensite orthorhombic  $\alpha'$  phases. While the microstructure of ST have an equiaxed grains having 72  $\mu\text{m}$ ., the grains has not been shown clearly. Also, the microstructures of CST-Q at over 10 min show equiaxed grains having diameters 7-14  $\mu\text{m}$ .
2. The hardness values of ST and CR are  $\sim 183\text{HV}$  and  $\sim 234\text{HV}$ , respectively. In addition, the HV values are,  $\sim 204\text{HV}$  for CST10Q,  $\sim 229\text{HV}$  for CST30Q, and  $\sim 242\text{HV}$  for CST60Q, respectively.
3. The tensile, yield strengths and elongation(%) values of the TNTZ samples are  $\sim 710\text{MPa}$ ,  $\sim 610\text{MPa}$ , 25% for ST;  $\sim 1305\text{MPa}$ ,  $\sim 395\text{MPa}$ , 17.5% for CR;  $\sim 1042\text{MPa}$ ,  $\sim 440\text{MPa}$ , and 17.5% for CST5Q,  $\sim 1010\text{MPa}$ ,  $\sim 650\text{MPa}$ , 21% for CST10Q, for CST30Q,; and  $\sim 930\text{MPa}$ ,  $\sim 660\text{MPa}$ , 21% for CST60Q.
4. In the scanning electron microscopy (SEM) images observed subsequent to the application of tensile tests, a dimple structure and micro-voids are discernible throughout the entirety of the fractured surfaces

## V. REFERENCES

[1] Long, M., & Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement: A materials science perspective. *Biomaterials*, 19(18), 1621-1639. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10243-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10243-4).  
 [2] Welsch, G., Boyer, R., & Collings, E. W. (1994). *Materials properties handbook: Titanium alloys* (1st ed.). ASM International.

[3] Singh, P., Pungotra, H., & Kalsi, N. S. (2017). On the characteristics of titanium alloys for aircraft applications. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8971-8982.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.249>

[4] Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. John Wiley and Sons. <https://doi.org/10.1002/3527602119>

[5] Lütjering, G., & Williams, J. C. (2000). *Titanium* (2nd ed.). Springer: Berlin, Germany.

[6] Pesode, P., & Barve, S. (2023). A review—metastable  $\beta$  titanium alloy for biomedical applications. *Biomedical Journal*, 46(3), 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2023.07.001>

[7] Lan, C., Wu, Y., Guo, L., & Chen, F. (2017). Effects of cold rolling on microstructure, texture evolution and mechanical properties of Ti-32.5Nb-6.8Zr-2.7Sn-0.3O alloy for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 690, 170-176. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.045>

[8] Cotton, J. D., Briggs, R. D., Boyer, R. R., Tamirisakandala, S., Russo, P., Shchetnikov, N., et al. (2015). State of the art in beta titanium alloys for airframe applications. *JOM (J Occup Med)*, 67, 1281-1303. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1442-4>

[9] Yumak, N. & Kayali, Y. (2022). Effect of Aging Applied with the Ultra-Low Heating Rate after CRYO Treatment on the Corrosion Resistance of Metastable  $\beta$  Titanium Alloy's. *Physics of Metals and Metallography*, 14. <https://doi.org/10.1134/s0031918x22100052>

[10] Niinomi, M. (2002). Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and materials transactions A*, 33(3), 477-486. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0109-2>

[11] Niinomi, M., Hattori, T., Morikawa, K., Kasuga, T., Suzuki, A., Fukui, H., & Niwa, S. (2002). Development of low rigidity  $\beta$ -type titanium alloy for biomedical applications. *Materials Transactions*, 43(12), 2970-2977.

[12] Nakai, M., Niinomi, M., & Oneda, T. (2012). Improvement in fatigue strength of biomedical  $\beta$ -type Ti-Nb-Ta-Zr alloy while maintaining low Young's modulus through optimizing  $\omega$ -phase precipitation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43A, 294-302. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0860-3>

[13] Yilmazer, H., Niinomi, M., Nakai, M., Hieda, J., Todaka, Y., Akahori, T., & Miyazaki, T. (2012). Heterogeneous structure and mechanical hardness of biomedical  $\beta$ -type Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr subjected to high-pressure torsion. *Journal of the Mechanical*

Behavior of Biomedical Materials, 10, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.02.022>

[14] Kumar, G.L.G.S.B.S., Chinara, S., Sreetam, D., Tiwari, C., & Prakash, R. G.V.S. N. (2019). Studies on Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr alloy for use as a prospective biomaterial. *Materials Today: Proceedings*, 15(1), 11-20.

[15] Yumak, N., Aslantaş, K. (2020). A review on heat treatment efficiency in metastable  $\beta$  titanium alloys: the role of treatment process and parameters. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 15360-15380. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.003>

[16] Srinivasu, G., Natraj, Y., Bhattacharjee, A., Nandy, T. K., & Rao, G. V. S. N. (2013). Tensile and fracture toughness of high strength  $\beta$  Titanium alloy, Ti-10V-2Fe-3Al, as a function of rolling and solution treatment temperatures. *Materials & Design*, 47, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.053>.

[17] Kolli, R., & Devaraj, A. (2018). A review of metastable beta titanium alloys. *Metals (Basel)*, 8, 506. <https://doi.org/10.3390/met8070506>

[18] Kirthika, A. M. A., Rao, M. N., & Manivasagam, G. (2022). Duplex aging of metastable beta titanium alloys: A Review. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(12), 2985-2996. <https://doi.org/10.1007/s12666-022-02696-1>.

[19] Tiyyagura, H. R., Kumari, S., Mohan, M. K., Pant, B., & Rao, M. N. (2019). Degradation behavior of metastable  $\beta$  Ti-15-3 alloy for fastener applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 775, 518-523. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.366>

[20] Yilmazer, H., Niinomi, M., Nakai, M., Hieda, J., Todaka, Y., Akahori, T., & Miyazaki, T. (2013). Mechanical properties of a medical  $\beta$ -type titanium alloy with specific micro- structural evolution through high - pressure torsion. *Materials Science and Engineering: C*, 33(5): 2499-2507. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.01.056>

[21] Akahori, T., Niinomi, M., Fukui, H., Ogawa, M., & Toda, H. (2005). Improvement in fatigue characteristics of newly developed beta type titanium alloy for biomedical applications by thermo-mechanical treatments. *Materials Science and Engineering: C*, 25(3), 248-254. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2004.12.007>

[22] Song, Z. Y., Sun, Q. Y., Xiao, L., Liu, L., & Sun, J. (2010). Effect of prestrain and aging treatment on microstructures and tensile properties of Ti-10Mo-8V-1Fe3.5Al alloy. *Materials Science and Engineering A*, 527, 691-698. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.046>

[23] Ertorer, O., Topping, T., Lii, Y., Moss, W., & Lavernia, E.J. (2009). Enhanced tensile strength and high ductility in cry milled commercially pure titanium. *Scripta Materialia*, 60, 586-589. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.12.017>

[24] Jawed, S. F., Rabadia, C. D., Azim, F., & Khan, S. J. (2021). Effect of Nb on  $\beta \rightarrow \alpha''$  martensitic phase transformation and characterization of new biomedical Ti-xNb-3Fe-9Zr alloys. *Scanning*, 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2021/8173425>

[25] Bhattacharjee, A., Varma, V.K., Kamat, S.V., Gogia, A.K., & Bhargava, S. (2006). Influence of  $\beta$  grain size on tensile behavior and ductile fracture toughness of titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37, 1423-1433. <https://doi.org/10.1007/s12666-008-0071-9>

## A Complete LTspice Simulation Model for SAW Devices

Alper ŞİŞMAN <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

### Abstract

A complete circuit model of Surface Acoustic Wave (SAW) devices with straight interdigital transducers is presented. This equivalent circuit can be implemented in LTspice and contains variable design characteristics that can be easily changed to see their effect on the electrical response of the final SAW device design. Later a two port Surface Acoustic Wave device with 13-finger-IDT electrodes is fabricated and its electrical characterization is examined using a vector network analyzer. The test results are then compared with the equivalent circuits' simulation output results for the verification. The results show an acceptable agreement between the experimental and simulation results for a wide frequency range. This paper offers an easy method to create an equivalent LTSpice model to determine the electrical response of a SAW device before fabrication. The model can also be used to simulate the behaviour of the circuits containing SAW devices using LTSPICE tool.

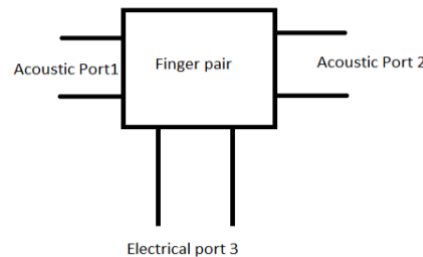
**Keywords:** SAW Device, LT Spice model, SAW Filter, Equivalent Model.

## I. INTRODUCTION

Surface acoustic wave devices have found their applications in many fields of science and technology [1-4]. Since it is imperative to optimize the design parameters before fabrication, having a model to simulate the design accurately offers numerous advantages. Modeling the device opens the path to examining electrical behavior and clarifies whether the design satisfies the expectations. The models in the literature works fine around the resonance frequency and it is difficult to use them with circuit simulation softwares like LTSpice [5, 6]. As a result, it is of a great importance to have a model that is completely electrical and has the capacity to be implemented in electrical simulation programs [7]. Another important point to note is that the equivalent circuit must be able to explain the performance of the device in a wide frequency range [8]. Three important approaches were reported to model the piezo electric based devices: 1-Mason equivalent circuit model, 2-Butterworth Van-Dyke equivalent circuit model. 3- frequency response approach. Other methods employ finite element modeling techniques, which prove beneficial for simulating both sensors and actuators [9,10].

### 1.1. Mason equivalent circuit model

Most of the equivalent circuit methods for modeling the SAW devices are based on the equivalent circuit theory of Mason [11] where each finger of an IDT device is modeled as a 3-port network [12] shown in Figure 1.



**Figure 1.** Three port network representation of a finger pair in an IDT

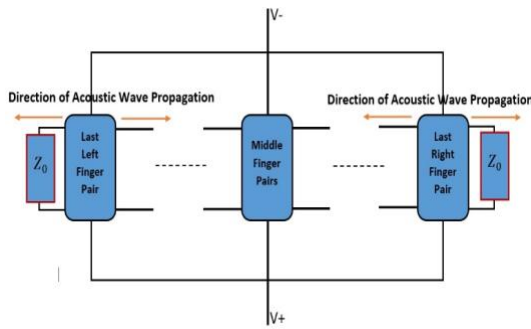


Each finger pair is considered as a 3-port unit that receives and propagates acoustic wave from acoustic ports and is connected to the source through the electrical port. For each IDT pair, these 3-port networks are connected to each other, and the connection is in series configuration acoustically and in parallel configuration electrically. A resistance terminates the last two fingers of the IDT from both left and right sides. This resistance ( $Z_0$ ) represents the piezoelectric material resistivity to the acoustic wave and the fact that the produced acoustic wave propagates out of or into the IDT from left and right.

The value of that resistor [13] can be determined by (1),

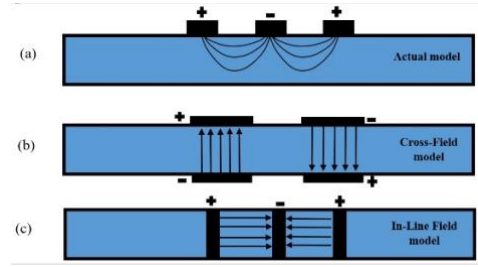
$$Z_0 = \frac{1}{f_0 C_s k^2} \quad (1)$$

Here,  $f_0$ ,  $C_s$  and  $k$  shows operation frequency, capacitance per length of the piezoelectric material and wave number respectively. When a number of finger pairs are connected to each other, the resulting network is shown in figure 2.



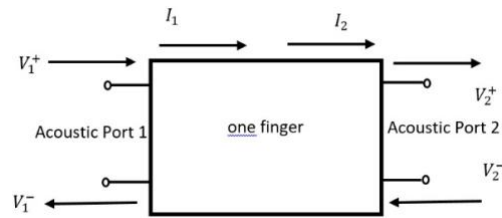
**Figure 2.** The 3-port networks connected to each other. Acoustic ports are connected in cascade and electrically each block is parallel to the other.

The equivalent circuit of each unit (finger pair) is given by Mason solving for the boundary conditions of each port. Basically, it must be possible to find the admittance matrix of each port however the two-dimensional nature of the problem complicates the calculations, and two approximations are suggested. In the first approximation the electric field is applied in the direction of acoustic wave propagation called the “in line” model and in the next approximation, the electric field is applied perpendicular to the acoustic ports and the direction of acoustic wave propagation called the “crossed field” model. Real electric field and the approximations [14] are shown in figure 3.



**Figure 3.** a) Field patterns in a saw device, side view. b) Crossed field approximation. c) In-line approximation

Considering the cross-filed approximation, one can solve [15] the resulting two port linear network of a finger in figure 4, where  $V^+$  and  $V^-$  represents transmitted and reflected voltages for input and output sides.  $I_1$  and  $I_2$  are the input and output currents.



**Figure 4.** Two port representation of a finger with its voltages and currents.

The expressions (2)-(4) are written according to the network theorem for the two-port networks (figure 4). Here,  $Z_0$  shows the corresponding impedance (note that, port-1 and port-2 are identical).  $V^+$  and  $V^-$  represents transmitted and reflected voltages. ‘I’ shows the current and the indices ‘1’ and ‘2’ represents input and output parameters respectively in all equations.  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  and  $S_{22}$  show the ‘s parameters’ for the two-port network.

$$V_1 = V_1^+ + V_1^- \quad (2a)$$

$$V_2 = V_2^+ + V_2^- \quad (2b)$$

$$I_1 = \frac{1}{z_0} (V_1^+ - V_1^-) \quad (3a)$$

$$I_2 = \frac{1}{z_0} (V_2^+ - V_2^-) \quad (3b)$$

Using network theorem:

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^- \end{bmatrix} \quad (4)$$

If the ports of the network are assumed to be perfectly matched, then  $S_{11} = S_{22} = 0$ .

Assuming no attenuation between the ports and only taking the phase change between ports into consideration  $S_{12} = S_{21} = e^{-jkl}$ , where  $k$ ,  $l$  and  $j$  represents wave number, the distance between two adjacent fingers and the square root of minus one respectively.

as a result,  $S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-jkl} \\ e^{-jkl} & 0 \end{bmatrix}$  and

$$V_1^- = e^{-jkl} V_2^- \quad (5)$$

$$V_2^+ = e^{-jkl} V_1^+ \quad (6)$$

Since we know that  $V_2 = V_2^+ + V_2^-$  (2b) then:

$$V_2 = e^{-jkl} V_1^+ + e^{jkl} V_1^- \quad (7)$$

Use expressions (2a) and (3a),

$$V_2 = V_1 \cos kl - jZ_0 I_1 \sin kl \quad (8)$$

From equation (3b),  $I_2 Z_0 = V_2^+ - V_2^-$ ,

$$I_2 Z_0 = V_2^+ - V_2^- = e^{-jkl} V_1^+ - e^{jkl} V_1^-$$

Use equations (2a) and (3a),

$$I_2 Z_0 = I_1 Z_0 \cos kl - jV_1 \sin kl \quad (9)$$

The matrix is then formed as:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & -jZ_0 \sin kl \\ \frac{-j \sin kl}{Z_0} & \cos kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix}$$

By arranging the matrix to connect voltage and current variables, ( $[Z]$  matrix),

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = Z_0 \begin{bmatrix} -j \cot kl & j \csc kl \\ -j \csc kl & j \cot kl \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{Where } [Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

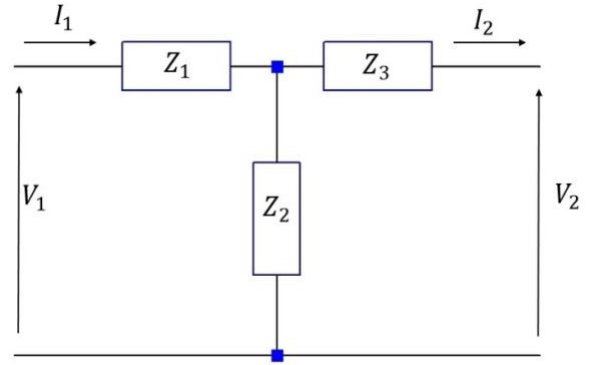
Having this  $Z$  matrix, we can design a 2-port network with 3 impedances to represent the system. Later when the values of the impedances are calculated and the 2-port network approximation is done, the third port can be added to the system.

The simplest two-port network has three impedances in the form of a T network shown in figure 5. Using network theory and the  $Z$  matrix, the value of the network elements are calculated as follows:

when  $V_2$  is open circuited ( $I_2 = 0$ ) according to the  $Z$  matrix:

$$V_1 = Z_{11} I_1 \quad (10)$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 \quad (11)$$



**Figure 5.** The simplest 2port network with T configuration representing 1-finger model. Here  $Z_1$ ,  $Z_2$  and  $Z_3$  represents the impedances in the 1-finger model.

According to figure 5:

$$V_1 = (Z_1 + Z_2) I_1 \quad (12)$$

$$Z_{11} = Z_1 + Z_2 \quad (13)$$

$$-j Z_0 \cot kl = Z_1 + Z_2 \quad (14)$$

$$V_2 = Z_2 I_1 \quad (15)$$

Then according to (11):

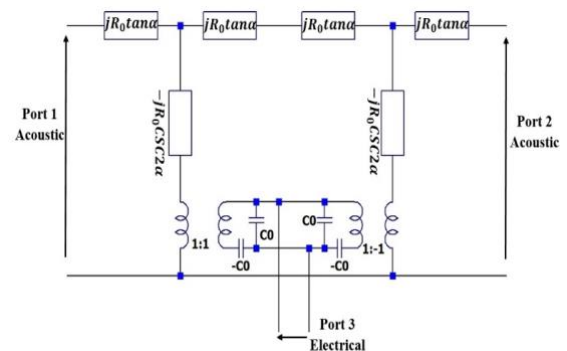
$$Z_{21} = Z_2 = -j Z_0 \csc kl \quad (16)$$

Putting it into (13) then:

$$Z_1 = j Z_0 \csc kl - j Z_0 \cot kl = j Z_0 \tan kl / 2 \quad (17)$$

Because of the symmetry of the system  $Z_3 = Z_1$ .

Now that the two-port network is completed by combining two T-models and a third port is inserted into the system as an electrical port (Figure 6).



**Figure 6.** Mason equivalent circuit for each finger pair as a 3-port network. For In-Line approximation  $-C_0$  is involved, for crossed-field model, it is short-circuited.

The model developed includes both “in-line” and “Cross-field” approximations in figure7 [12,14].

The only difference between the “in-line” and “crossed-field” model is that in the “crossed field” model –C0 is short circuited.

With  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  and  $l = \frac{\lambda}{2}$  we can define the following quantities, which were used on the model (Figure 6) ( $\lambda$ ,  $\omega$ ,  $\omega_0$  shows wavelength, design frequency and the frequency of excitation signal respectively).

$$\alpha = \frac{kl}{2} \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\pi}{2} \frac{\omega}{\omega_0} , R_0 = Z_0, C_0 = \frac{C_s}{2}$$

$C_s$  is the capacitance per length of the piezoelectric material.

For the ease of calculations, in-line model model was not preferred, we worked with the crossed field model. To come up with an equivalent circuit for the mathematical functions in the model, “Foster” method [16] was used. This approach involves creating a frequency versus impedance function by leveraging the positions and characteristics of zeros and poles in a network to formulate a circuit model. The objective is to design a circuit model that emulates the behavior of a SAW device. The equivalent circuit contains lumped (L, C) elements, which makes it perfect to use this model in an LTspice simulation.

### 1.2. Oscillator model (butterworth vandyke)

Considering the fact that the region of interest for a SAW device is around the resonance frequency, *Parker. Montress. el* [17] provided an equivalent circuit for the resonance behavior of the SAW device based on the mechanical behavior of the piezo electric material. This circuit perfectly describes the performance of a SAW device around resonance region. The mentioned equivalent circuit can be used only around resonance frequency and it could be used in a circuit to examine the oscillatory behavior of the circuit. Since SAW devices act as an LC tank, they are used in oscillator circuits as frequency determiner and such equivalent circuits make it easy to analyze the circuits using simulation software. Figure 7 shows the equivalent circuit for the resonance.

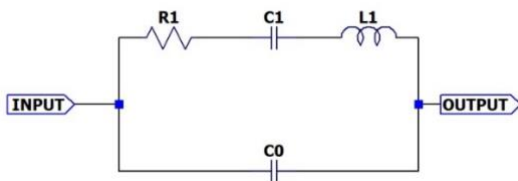


Figure 7. SAW device equivalent circuit

The values of the lumped elements can be easily calculated from experimental data to design an equivalent circuit.

The input admittance ( $Y_i$ ) [18] is:

$$Y_i = \frac{j\omega^2 C_1 R_1 C_0 - (\omega C_0)(\omega^2 L_1 C_1 - 1) + \omega C_1}{R_1 \omega C_1 + j(\omega^2 L_1 C_1 - 1)} \tag{18}$$

Here,  $R_l, C_l$  and  $L_l$  are the model parameters representing mechanical motion and  $C_0$  shows the static parameter. The whole structure models the behavior of a 1-port SAW device around the resonant region. The frequency variable is depicted by  $\omega$ .

The equivalent circuit shows two resonances. At the series resonance  $f_s$ , the magnitude of  $Y_i$  is max. This gives us an equation where the imaginary part of the denominator is zero:

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \tag{19}$$

Putting this into the  $Y_i$  will result:

$$Y_i(\omega_s) = \frac{1}{R_l} + j\omega_s C_0 \tag{20}$$

Given the input admittance at the series resonance frequency ( $\omega_s$ ) the resistance value of the equivalent circuit becomes:

$$R_1 = \frac{1}{Re(Y_i(\omega_s))} \tag{21}$$

Similarly,  $C_0$  can be separated from the imaginary part of the input admittance at the resonance frequency.

$$C_0 = \frac{1}{2\pi f_s} imag(Y_i(\omega_s)) \tag{22}$$

At the parallel resonance ( $\omega_p$ : the parallel resonance frequency), the input impedance of the circuit is maximum so the admittance is minimum. Setting the real part of the numerator in input admittance equation, to zero helps in finding the capacitance  $C_0$ .

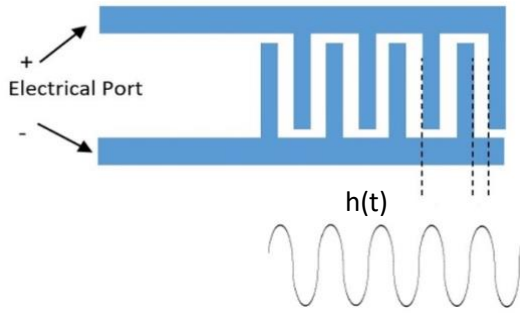
$$C_1 = C_0(\omega_p^2 L_1 C_1 - 1) = C_0 \left( \frac{\omega_p^2}{\omega_s^2} - 1 \right) \tag{23}$$

The value of the inductor  $L_1$  from (11) is now easy.

Though the circuit gives a decent estimation of the behavior of a SAW device at resonance frequency it best suits the simulation of a SAW device in an oscillator circuit and is not designed to give any information about the number of fingers, length of the fingers and other design parameters.

### 1.3. Impulse response method

Instead of analyzing fingers using network models, the impulse response method works with the frequency response of the fingers due to their sizes [19-20]. Figure 8 shows that each gap between two fingers creates a half wave cycle and they add up together and create a whole wave that travels through the delay line to get to the receiver IDT.



**Figure 8.** Geometry and impulse response

We know that the frequency response of this device is the Fourier transform of the impulse response :

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-j\omega t} dt \quad (24)$$

In other words, the desired frequency response can be used to find the corresponding impulse response and design the fingers accordingly by using the inverse Fourier transform:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega)e^{j\omega t} dt \quad (25)$$

taking  $h(t)$  to be a sinusoidal function for simplifying the calculations, when an electrical impulse is given to the system, the amplitude of each half cycle is multiplied by  $f_i^{\frac{3}{2}}$  where  $f_i$  is the instantaneous frequency [20]. So far, the impulse response is:  $h(t) = f_i^{\frac{3}{2}} \sin\theta$ . Here  $\theta$  is the angle representing phase of the propagating wave at time  $t$ ,

$$\theta(t) = 2\pi \int_0^t f_i(\tau) d\tau \quad (26)$$

Where  $t = \frac{x}{v}$  and  $v$  is the speed of wave in piezoelectric media. When there are  $N$  fingers involved then,

$$\theta = \omega_0 t \text{ and } f_i = f_0 \quad (27)$$

The amplitude  $h(t)$  must be multiplied by a constant of the per finger capacitance  $C_s$  and the electromechanical coupling  $k$ :

$$h(t) = 4k\sqrt{C_s}f_0^{\frac{3}{2}} \sin\omega_0 t, \quad (28)$$

for  $0 \leq t \leq \frac{N}{f_0}$

Performing the Fourier transform to get the frequency response, results in:

$$H(\omega) = 2k\sqrt{C_s}f_0 N \frac{\sin X}{X} e^{-j\frac{\omega N}{2f_0}}, \quad (29)$$

$$X = \frac{N\pi(\omega - \omega_0)}{\omega_0}$$

Once frequency response is determined, radiation conductance  $G_a(\omega)$  and acoustic susceptance  $B_a(\omega)$  are found respectively:

$$G_a(\omega) = 8k^2 C_s f_0 N^2 \frac{\sin^2 X}{X} = G_0 \frac{\sin^2 X}{X} \quad (30)$$

$$B_a(\omega) = \frac{G_0(\sin 2X - 2X)}{2X^2} \quad (31)$$

Having the acoustic conductance and susceptance can help finding the total admittance [21] of the IDT:

$$Y_i = G_a + j(2\pi f C_T + B_a) \quad (32)$$

$C_T$  is the total capacitance which is the multiple of the number of finger pairs times the length of the fingers times the per length capacitance:

$$C_T = N_p \times C_s \times W_a \quad (33)$$

These relations can give the optimum length for the fingers to achieve the impedance matching between the IDT and input resistance [22]:

$$W_a = \frac{1}{R_{in}} \left( \frac{1}{2N_p C_s f_0} \right) \frac{(4k^2 N_p)}{(4k^2 N_p)^2 + \pi^2}, \quad (34)$$

where  $R_{in}$  shows the input resistance to be matched

## II. BACKGROUND

LTspice is widely accessible and more importantly flexible in running AC analysis for lumped-element circuits with high precision and speed. Furthermore, the program allows the user to create blocks out of repeating parts, which perfectly suits circuits containing huge number of repeating parts. This in fact makes it a lot easier to draw the circuit and run analysis. At the end of each analysis, it is possible to save the data and later transfer them to any other program for further examination. All these and the user-friendly interface make LTspice a suitable option for the simulation.

A complete sender/receiver IDT pair simulation that clearly compares analytical and experimental results on a free access platform has not been available. This paper provides a full two IDT sender/receiver analysis where the number of finger pairs, length of fingers and



piezoelectric substrate are taken into consideration. We put the equivalent network of mathematical functions ( $jZ_0 \tan \alpha$  and  $-jZ_0 \csc \alpha$ ) into blocks and those blocks are easily called from the directory of the simulation file by the names TANEQ and CSCEQ. The equivalent circuits are shown in figure 9 and figure 10 [23]. These equivalent LC networks are calculated using “foster” method which was discussed in introduction section.

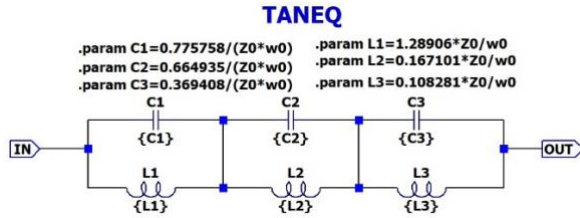


Figure 9. Equivalent circuit for  $jZ_0 \tan \alpha$

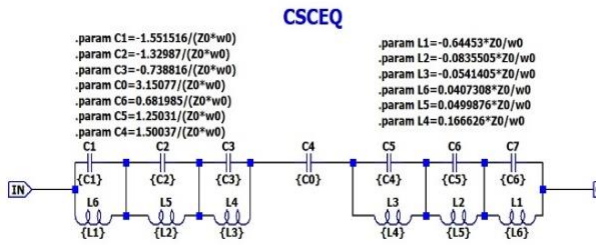


Figure 10. Equivalent circuit for  $-jZ_0 \csc \alpha$

The blocks are useful to model the periodic fingers in the SAW devices. Mason model allows to model this periodicity by using each finger pair as a building block. The Mason equivalent circuit allows us to approximate the behavior of an IDT sender/Receiver pair within an acceptable margin. This model assumes that the finger overlap is constant; the width of every finger and the distance between neighboring fingers is constant and  $\frac{\lambda}{4}$  as shown in figure 11. With this in mind, the center frequency of each device becomes  $f_0 = \frac{v}{\lambda}$  where  $v$  is the wave speed in the piezoelectric material. The model also assumes that the metallization between fingers and spaces is 50%.

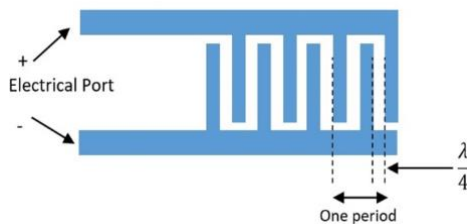


Figure 11. One period, one finger pair

### 2.1. Finger pairs

Every finger pair as shown in figure 11 is considered one period. The implementation of a finger pair in LTspice is demonstrated in figure 12. According to the Masons model, these fingers are acoustically in series connection and electrically parallel to each other. A 1:1 transformer shows the conversion from electrical energy to mechanical acoustical energy for each finger. Transformers are not defined in the LTspice as independent elements; however, inductors can be programmed to act as a transformer. To add to the overall Mason’s model, we added a resistor to the electrical input/output port of every finger of the both sender and receiver IDT to represent the ohmic losses due to the flow of current in the metal parts of the fingers. Since LTspice does not assume any resistance for the wires, this addition takes care of sudden spikes on the frequency response graph of the simulation result that does not appear in the actual network analyzer readings. The added resistances also help in stabilizing the phase, which resembles the experimental models more with the added resistance.

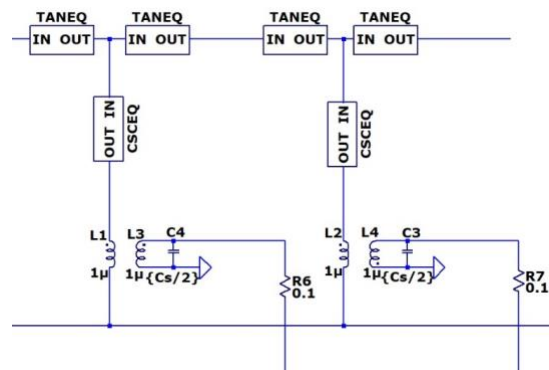
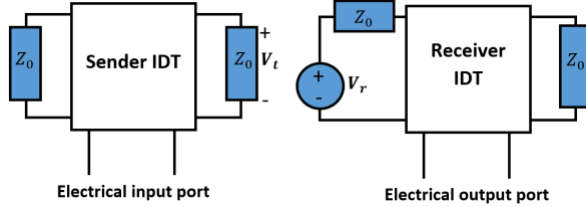


Figure 12. A finger pair in LTspice

## III. THE COMPLETE MODEL, FABRICATION AND TEST

A complete equivalent system includes a sender and receiver IDT pair that are connected to each other. The mechanical output of the transmitter IDT is directly connected to the mechanical input of the receiver IDT block. The transmitter IDT model gives a voltage ( $V_t$ , Figure 13) representing the mechanical response of the IDT. Similarly, receiver IDT has input voltage source ( $V_r$ , Figure 13) depending on the mechanical vibrations coming from transmitter IDT (these vibrations are modeled using  $V_t$  voltage). The  $V_r$ - $V_t$  relationship is a function of the frequency of the system, capacitance per length and coupling factor of the piezoelectric material. *Krairojananan and Redwoodthan et* [24] offers such

function for the receiver (detector) IDT shown on figure 13 that shows a satisfactory compatibility with the experimental data. This function is easily implemented in LTspice using the dependent voltage source.



**Figure 13.** Two port SAW Device IDT

$$V_r = V_t \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{9k^2}{4\pi} \right) (\omega_0 C_s Z_0) \right\}^{0.5} \quad (35)$$

The electrical ports of all receiver IDT fingers are connected at the end and grounded with a 50-ohm resistance that acts like the ports of a network analyzer to provide a node for LTspice to plot the output voltage from that node. Receiver IDTs have the same configuration as the sender IDTs that are terminated by intrinsic impedances and LTspice allows copying the design. Based on the number of finger pairs in the design the corresponding circuit could be created and LTspice performs the AC analysis.

### 3.1. The simulation and fabrication parameters

The model is tested through the LT spice simulations and the results are verified by the experimental data. A system containing transmitter and receiver IDTs with 13 pairs of fingers on each was used. The IDTs were grown on a LiNbO3 y-z cut substrate material because of its relatively better electromechanical coupling capability. The design wavelength is  $\lambda=100 \mu\text{m}$  that results in the operation frequency around 39.9 MHz. The length of each finger is about  $27\lambda$  ( $2748.22\mu\text{m}$ ) to ensure that the generated wave is flat enough. The distance between two IDTs was chosen as 1.2 mm, to have a reasonable attenuation (Table-1).

**Table 1.** Simulation and fabrication parameters

Parameter	Value
Saw Speed(m/s)	3990 m/s
Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	100
Frequency(MHz)	39.9
Aperture size (mm)	2.75
Metallization Factor	50%
Delay Line Length (mm)	1.2
Number of Fingers	13
Substrate Material	lithium niobate y-z cut

Cs (capacitance per length) for Lithium Niobate is obtained using tensile dielectric constants described by *Engen et al* [25]. In this method, a parameter containing both capacitance per length and dielectric constants of the material is related to the metallization factor of the design. For the metallization factor of 0.5 in our design, the parameter is 20. Putting it into the relation defined in [25]:

$$20 = \frac{C_s}{0.5(1+\epsilon_r \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0})} \quad (36)$$

$$\text{With } \epsilon_r = \sqrt{\frac{\epsilon_{11} - \epsilon_{13}^2}{\epsilon_{33} - \epsilon_{33}^2}} \quad (37)$$

Here,  $\epsilon_r$  is relative permittivity and  $\epsilon_{ij}$  are relative permittivity in different directions in the material. The values of dielectric constants are provided by *R. S. Weis and T. K. Gaylord et al* [26]. One must be careful in selecting the correct value of the dielectric constant with respect to the nature of the wave propagated in the medium as lithium niobate has shear and tensile dielectric constants. Since our device is propagating Rayleigh waves, then tensile dielectric constants are used which results in the capacitance per length of 512 pf/m. The simulation was performed between 20-60MHz interval with 400 points per decade.

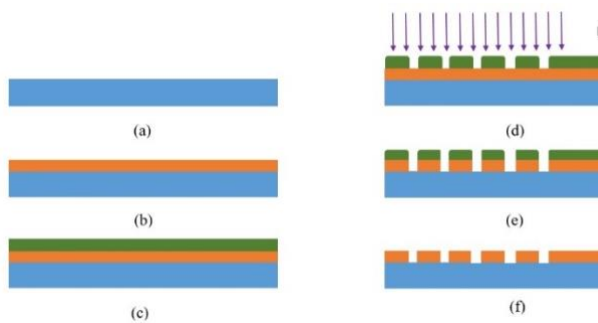
### 3.2. Fabrication

Several piezo electric substrates are used to fabricate SAW devices such as ST-Quartz, Lithium Niobate and Lithium tantalite. Depending on the application of the sensor, whether it is designed to produce Rayleigh wave or shear-horizontal waves, different cuts of the materials are used. Among those Lithium niobate offers a good electromechanical coupling and fair price. Higher electromechanical coupling means that the piezoelectric material is more responsive to the electrical signal and this makes working with lithium niobate easier.

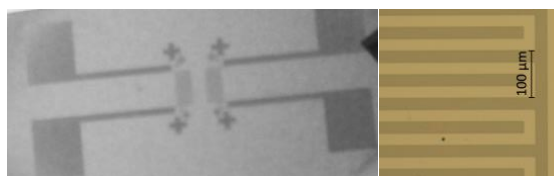
The parameters have selected to meet the same device properties as in the LTspice model for fair comparison. Since the SAW velocity on LiNbO3 substrate is about 3990 m/s, the finger-finger distance of an IDT electrode is selected as  $100 \mu\text{m}$  to have a resonance frequency around 39.90 MHz. The design wavelength is  $100 \mu\text{m}$ , which defines the aperture length and the width of each IDT electrode fingers. The fingers' width is  $25 \mu\text{m}$  that corresponds to 50% metallization ratio (Fig. 11). The aperture length is used as 50-wavelengths to generate plane waves. The distance between the transmitter and receiver IDT electrodes is 1.2 mm, providing a mechanical-wave attenuation around 12 dB (Fig. 16a).

The fabrication of the SAW device uses a six-step process (Figure 14). The LiNbO<sub>3</sub> wafer is meticulously washed with acetone and later with distilled water and methanol to clean the surface then the wafer is placed into ultrasonic washing bath device for 10 minutes to be sure the surface cleanness. In the second step chrome is deposited on the surface using DC sputtering device for 30 minutes at 500 mA current to have 200 nm chromium film on the substrate. After depositing chrome on the surface of the lithium niobate wafer, the photoresist AZ5214E is placed on the wafer and then the wafer is spun for 45 seconds with the speed of 4000 rpm and the acceleration of 1500 rpm/sec. The photoresist thickness is 1  $\mu$ m. The wafer is baked for 50 seconds at 105  $^{\circ}$ C before UV exposure. The wafer is put the developer solution after 7 seconds UV exposure; the exposed parts separate and leave the chrome on the surface. Then, the wafer is put inside the chromium etch solution (Cr01), to etch away the chromium that exposed to UV light. After this step, the electrodes are ready, however on top of them there are still some photoresist materials that should also be washed away with acetone. The fabricated SAW device can be seen in Figure 15.

The fabricated device is then connected to the network analyzer to examine its frequency response. Before connecting the device to a network analyzer, the network analyzer is calibrated around the center frequency.



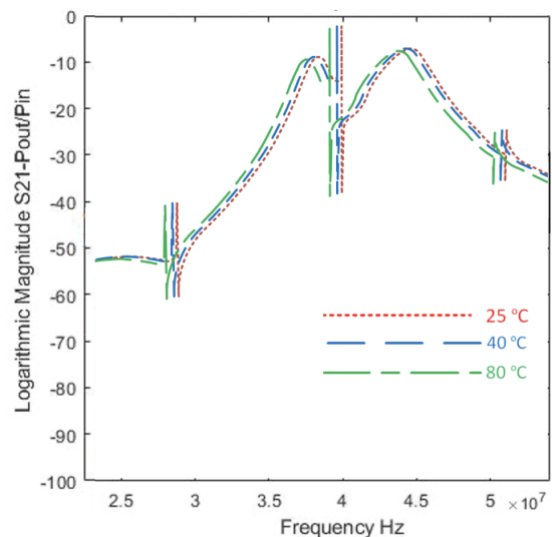
**Figure 14.** Fabrication steps: a) Clean the substrate. b) Chromium sputtering, c) photoresist layer, d) Lithography, e) Developer, f) Acetone rinse



**Figure 15.** a. Fabricated 2-port SAW device, b. magnified view of the electrode fingers.

### 3.3. Stability Analysis

The stability of a specific parameter in a Surface Acoustic Wave (SAW) device becomes critical if the device is not explicitly designed to sense some physical or chemical quantity. Usually, it is essential to maintain stability in the resonance frequency under diverse environmental conditions, including variations in temperature, pressure, chemical exposure, and mechanical stress.



**Figure 16.** The temperature stability analysis of the fabricated device.

Temperature stability is typically a critical factor, as piezoelectric materials often exhibit variations in their electrical response with fluctuating temperature conditions. In this study, the temperature stability for the fabricated SAW device was analyzed by measuring its frequency response ( $s_{21}$  parameter) under three different temperature conditions. The SAW device is placed within a oven (Despatch LCC1-16-3 HEPA) while connected to a vector network analyzer (Copper Mountain, Indianapolis, USA), capturing the frequency response in the vicinity of the resonance region. The frequency response is recorded following a 30-minute period to ensure a consistent temperature. Three frequency responses have provided for 25 $^{\circ}$ C, 40 $^{\circ}$ C and 80 $^{\circ}$ C temperatures values.

## V. RESULTS AND DISCUSSION

The  $S_{21}$  parameter was measured under various temperature conditions using a vector network analyzer (Copper Mountain, Indianapolis, USA). An analysis of temperature stability revealed that the resonance frequency slightly decreased with rising temperatures (Figure 16). Additionally, there was a negligible increase in the attenuation value. Specifically, the

resonance frequencies were observed at 39.915 MHz, 39.886 MHz, and 39.835 MHz at temperatures of 25°C, 40°C, and 80°C, respectively. The observed frequency shift between 25°C and 80°C is 0.2%, which corresponds to temperature coefficient of frequency value (TCF) of -36.4 ppm/°C (38).

$$TCF \left( \frac{ppm}{^{\circ}C} \right) = \frac{f_{ri} - f_r}{\Delta T \times f_r} \times 10^6 \quad (38)$$

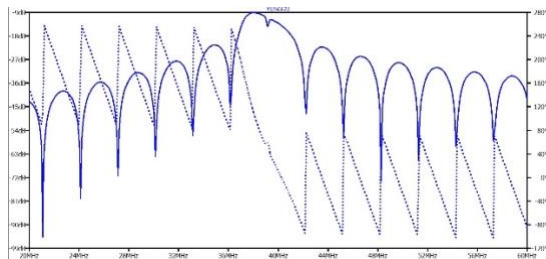
,where  $f_r$  and  $f_{ri}$  are the resonance frequencies measured at 25 °C and 25 °C+ $\Delta T$ , respectively. The temperature difference is given by  $\Delta T$ . The value that is experimentally found aligns closely with findings in the literature [27,28].

The frequency response result from the LTSpice model is represented in Figure 17, here the resonance peak can be clearly seen at 38.405 MHz in the magnitude response. The phase change around the resonance frequency also shows the resonance at the same frequency.

Another result involves a comparison of the frequency responses between the fabricated device and the LTSpice model, both sharing identical design parameters. The frequency responses of the manufactured SAW device and the LTSpice model are illustrated in Figure 18a, revealing resonance peaks at 39.915 MHz and 38.405 MHz, respectively. Furthermore, the phase responses are agreed and the phase change around the resonance frequency shows the resonance at the same frequency (Figure 18b).

The experiments and the Ltpice model have the same magnitude peaks at the resonance frequency and the phase change occurs in the resonance frequency for both results.

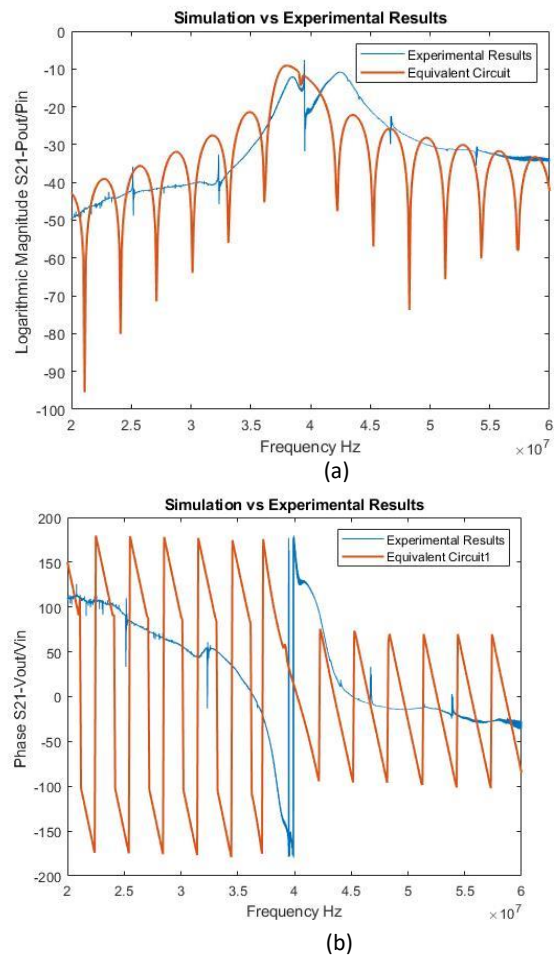
LTSpice provides easy to use environment to test the electronic circuits before the production of prototypes. The results shows that the Ltpice model for the SAW device has the same behavior and it allows complete simulation of the circuits with SAW devices.



**Figure 17.** Output readings of the sender/Receiver IDT pair from simulation.

## VI. CONCLUSION

In this study, a complete model simulation of a 13-finger pair transmitter/Receiver IDT was run on LTspice and compared with the fabricated device. The results show a conspicuous agreement between the simulated LTspice model and experimental data. As a result, the model can be used to accurately predict the response of a design before fabrication to achieve the optimum desired performance. The capability to simulate any SAW device in a circuit (such as an oscillator) using the LTspice model is also demonstrated in the study.



**Figure 18.** a) Log Mag comparison of experimental and simulation results b) Phase comparison of experimental and simulation results

## REFERENCES

- [1] Rayleigh, L. (1885). On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. Proceedings of the London Mathematical Society, s1-17(1), 4–11. <https://doi.org/10.1112/plms/s1-17.1.4>
- [2] Stoneley, R. (1924). Elastic waves at the surface of separation of two solids. Proceedings of the



- Royal Society of London, 106(738), 416–428. <https://doi.org/10.1098/rspa.1924.0079>
- [3] Ingebrigsten K.A.,(1967). Elastic surface waves in piezoelectrics and their coupling to carriers in an adjoining semiconductor. *Elab Rept TE-94* Norwegian Institute of technology, Trondheim, Norway., 1(1).
- [4] Strauss, W. A. (1965). Magnetoelastic waves in yttrium iron garnet. *Journal of Applied Physics*, 36(1), 118–123. <https://doi.org/10.1063/1.1713856>
- [5] Fall, D., Duquennoy, M., Ouafthouh, M., Piwakowski, B., & Jenot, F. (2018). Effective and rapid technique for temporal response modeling of surface acoustic wave interdigital transducers. *Ultrasonics*, 82, 371–378. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.018>
- [6] Kamal, A., Ali, M. a. A., Faris, M., Monzer, O., & Mostafa, H. (2020). Design and analysis of Multi-Port SAW MEMS resonators. 2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST),1-4. <https://doi.org/10.1109/mocast49295.2020.9200258>
- [7] Pennuri, D., et al. (2003). A Circuit Simulation Component Model For RF Surface Acoustic Wave Devices. In *S3 2003 Symposium (Motorola)*.
- [8] Hagmann, M. J. (2019). Analysis and equivalent circuit for accurate wideband calculations of the impedance for a piezoelectric transducer having loss. *AIP Advances*, 9(8), 085313.
- [9] Yazdani, M. A., & Sisman, A. (2020). A novel numerical model to simulate acoustofluidic particle manipulation. *Phys. Scr.*, 95, 095002.
- [10] Elsherbini, et al. (2016). Finite Element Method Simulation for SAW Resonator-Based Sensors. *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, 7(2), 2167-2172.
- [11] Mason, W. P. (1942). *Electromechanical Transducers and Wave Filters*. New York.
- [12] Smith, W. R., Gerard, H. M., Collins, J. H., Reeder, T. M., & Shaw, H. J. (1969). Analysis of Interdigital Surface Wave Transducers by Use of an Equivalent Circuit Model. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-17(11).
- [13] Berlincourt, D. A., Curran, D. R., & Jaffe, H. (1964). In W. P. Mason (Ed.), *Physical Acoustics* (Vol. 1A, pp. 233-242). New York: Academic Press.
- [14] Hoang, T. (2011). SAW Parameters Analysis and equivalent circuit of SAW device. In *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/19910>
- [15] Mishra, D., Hussain, D. M. A., Dhankar, M., Singh, A., & Dabas, S. (2016). Interdigital Transducer Modeling through Mason Equivalent Circuit Model Design and Simulation.
- [16] Ryder, J. D. (1964). *Networks, Lines, and Fields*. Asia Publishing House, pp. 80-88.
- [17] Parker, T. E., Montress, G. K. (1988, May). Precision Surface Acoustic Wave (SAW) Oscillator.
- [18] Huang, H., Paramo, D. (2011, December). Broadband Electrical Impedance Matching for Piezoelectric Ultrasound Transducer.
- [19] Fall, D., Duquennoy, M., Ouafthouh, M., Piwakowski, B., & Jenot, F. (2015). Modelling based on Spatial Impulse Response Model for Optimization of Inter Digital Transducers (SAW Sensors) for Non Destructive Testing. *Physics Procedia*, 70, 927–931. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.192>
- [20] Hartmann, C. S., Bell, D. T., & Rosenfeld, R. C. (1973). Impulse Model Design of Acoustic Surface-Wave Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 21(4), 162-175. doi:10.1109/TMTT.1973.112
- [21] Lakin, K. M., Joseph, T., & Penunuri, D. (1974, November). Planar Surface Acoustic Wave Resonator. *Ultrasonic Symposium Proceedings, IEEE*, 1, 263-267.
- [22] Wilson, W. C., & Atkinson, G. M. (2006, October). Mixed modeling of a SAW delay line using VHDL.
- [23] Fu, Q., Fischer, W., & Stab, H. (2003, May). Simulate Surface Acoustic Wave Devices Using VHDL-ALM.
- [24] Krairojananan, T., & Redwood, M. (1971, February). Equivalent electrical circuits of interdigital transducers for piezoelectric generation and detection of Rayleigh waves. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 118(2), 305-310.
- [25] Engen, H. (1969, April). Excitation of Elastic Surface Wave by Spatial Harmonics of Interdigital Transducers. Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- [26] Weis, R. S., & Gaylord, T. K. (1985, March). *Lithium Niobate: Summary of Physical Properties and Crystal Structure*. School of Electrical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- [27] Hage-Ali, C. S., et al. (2020). FEM Modeling of the Temperature Influence on the Performance of SAW Sensors Operating at GigaHertz Frequency Range and at High Temperature Up to 500°C. *Sensors*, 20(15), 4166. doi:10.3390/s20154166.

- 
- [28] Hickemell, F. S., et al. (1995). The surface acoustic wave propagation characteristics of  $64^\circ$  Y-X LiNbO<sub>3</sub> and  $36^\circ$  Y-X LiTaO<sub>3</sub> substrates with thin-film SiO<sub>2</sub>. In 1995 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Vol. 1, pp. 345-348).



## 2024 Alüminyum Alaşımının Dövülmesinde Ortaya Çıkan Katlanma Hatasının İyileştirilmesi İçin Tasarım Geliştirilmesi ve Simülasyonu

*Design Development and Simulation to Improve the Folding Defect in the Forging of 2024 Aluminum Alloy*

Ali SAMANCI<sup>1\*</sup>, Hakan COŞKUN<sup>1,2</sup>, Gökhan ATAY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Torun Metal A.Ş., GOSB, İhsan Dede St. Gebze, Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup>Marmara Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

### Öz

Al 2024 alaşımları hafif malzemeler oldukları için çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Sıcak dövme işlemi, bu malzemeleri oluşturmak için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada Al 2024 alaşımlarının sıcak dövme işlemiyle elde edilen spesifik bileşenlerinde meydana gelen dövme kusurları incelenmiştir. Ayrıca, dövme kusurlarının üstesinden gelmek için alternatif bir tasarım önerisinde bulunmaktadır. Bununla birlikte, Al 2024 alaşımının sıcak dövme işleminin sonlu elemanlar modellemesi ve simülasyonunu içermektedir. Al 2024'ün belirlenen sıcaklıktaki malzeme tepkisini modellemek için çekme numunesi hazırlanmış ve dövme sıcaklığında test edilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar simülasyonu, dövme bileşenlerde gerilme konsantrasyonu nedeniyle yüzey kusurunun meydana geldiğini göstermiştir. Bu kusur, deneysel çalışmalarda da gözlemlenmiş ve doğrulanmıştır. Bu çalışmada önerilen kusurun olduğu bölgeye destek eklenmesini içeren alternatif tasarım, yüzey kusurunun azaltılmasında etkili olmuştur. Solidworks ve Simufact Forming yazılımları kullanılarak geliştirilen ve simüle edilen alternatif tasarım çalışması, bu destek yapısının bindirme kusurunun gözlemlendiği alandaki gerilim konsantrasyonunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** 2024 Alüminyum, Sıcak Dövme, Tasarım, Sonlu Elemanlar Analizi, Katlanma Hatası

### Abstract

Al 2024 alloys are used in various industries due to their lightweight properties. Hot forging process is one of the commonly used methods to fabricate these materials. This study investigates the forging defects occurring in specific components produced by hot forging of Al 2024 alloys. Additionally, it proposes an alternative design to overcome these forging defects. Furthermore, it encompasses the finite element modeling and simulation of the hot forging process of Al 2024 alloy. Tensile specimens were prepared to model the material response of Al 2024 at the determined temperature and tested at forging temperature. The finite element simulation revealed that surface defects occur in forged components due to stress concentration. This defect was observed and verified in experimental studies as well. The alternative design proposed in this study, involving the addition of support to the region where the defect occurs, proved to be effective in reducing surface defects. The alternative design, developed and simulated using Solidworks and Simufact Forming software, demonstrated a significant reduction in stress concentration in the area where the defect was observed.

**Keywords:** 2024 Aluminum, Hot forging, Design, Finite Element Analysis, Overlap defect

### 1. GİRİŞ

Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde, dövme parçaların kullanımı yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu parçalar yüksek verimlilik, düşük maliyet ve iyi performans avantajları sağlamaktadır. Alüminyum alaşımları, özellikle yüksek mukavemetli yapısal uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Dövme yöntemiyle şekillendirilen alüminyum alaşımları, havacılık, otomotiv ve savunma endüstrileri gibi birçok

sektörde hafifliği sebebiyle öne çıkan ve tercih edilen alaşımlardır. Ancak, dövme işlemi sırasında hatasız ve yüksek geometrik doğruluk, iyi bir yüzey kalitesi ve hedeflenen mikroyapı özelliklerinin sağlanması gerekmektedir, çünkü iyi montaj ve servis performansı bu faktörlere bağlıdır. Alüminyum alaşımları arasında, 2xxx serisi alaşımlar özellikle dikkat çekmektedir. Bu alaşımlar, bakırın ana alaşım katkısı olarak bulunduğu yüksek mukavemetli alaşımlardır ve genellikle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, 2024 alaşımı, en yüksek mukavemetli 2xxx alaşımlarından biridir. 2xxx serisi alaşımlar, genellikle iyi işlenebilirlik sağlarlar ancak diğer ısıl işlem görebilen alüminyum alaşımlarına göre daha az şekillendirilebilir özelliklerine sahiptirler. Ayrıca, diğer alüminyum alaşımlarına kıyasla korozyon direnci biraz daha düşüktür. Bununla birlikte, birçok 2xxx alaşımı yüksek sıcaklık mukavemetine sahiptir, bu da yüksek sıcaklıkta uygulamalarda avantaj sağlar. Bu özellikler, dövme işlemi için seçim yaparken dikkate alınmalıdır[1]. Dövme süreci, bir malzeme parçasının sabit bir alt kalıp üzerine yerleştirilip, hareketli üst kalıp tarafından baskı uygulanarak şekil verildiği bir işlemdir. Ancak, karmaşık deformasyonlar nedeniyle dövme işleminde bazı şekillendirme kusurları ortaya çıkabilir. Bu kusurlardan biri olan katlanma, malzeme akışındaki bozulmalardan kaynaklanır ve parçanın yüzey kalitesi, mekanik özellikleri ve işlevselliği üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Dövme işlemi sırasında malzeme akışının homojen olmaması, deformasyon sıcaklığının düşük olması ve dövme parametrelerinin uygun şekilde ayarlanmaması gibi faktörler, katlanma kusurunu ortaya çıkmasına katkıda bulunabilir. Bu kusur, ürünün geometrisine, hammadde şekline, sürtünmeye ve dövme sıcaklığına bağlıdır [2], [3], [4]. Dövülebilirlik, hammaddelerin sıcaklığındaki değişikliklere karşı çok hassastır. Deformasyon sıcaklığının düşük olması durumunda, yeniden kristalleşme tamamen gerçekleşmez ve istenmeyen mikroyapısal dağılım meydana gelebilir. Ek olarak, homojen olmayan yapıdaki büyük taneler, dövme parçada zayıf mekanik özelliklere yol açabilir. Özellikle dövme sırasında deformasyon hızındaki değişim, dövme parçanın mukavemetini de arttırmaktadır[5]. Çeşitli araştırmacılar, dövme işlemi sırasında ortaya çıkan katlanma kusurunu önlemek için çeşitli çalışmalar geliştirmişlerdir. Ancak, katlanma kusurunu önlenmesi ve dövme operasyonlarının iyileştirilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Hawryluk ve Jakubik, çalışmalarında sonlu elemanlar analiz programı kullanarak hammadde konumunun dövme kusurları üzerindeki etkisini araştırmış ve farklı pozisyonlarla deneyler yaparak dövme kusurlarını önlemiştir[6]. Prasad ve Panigrahi de benzer şekilde sıcak dövme işlemi sırasında ortaya çıkan kusurları incelemek için bir araştırma yürütmüşlerdir. Çalışmada, özellikle deneysel çalışmalar ve sayısal modelleme kullanılmışlardır. Ayrıca, dövme işlemlerinde billetin

doğru konumlandırılmasının ve malzemenin düzgün akışının kritik önemde olduğunu vurgulamışlardır[7]. Petrov, yaptığı bir çalışmada, katlama kusurunun ürünün geometrisine ve incelediği alüminyum ürünlerdeki dövme parametrelerine bağlı değişimi incelemiştir[8]. Wang, dövme işlemindeki katlama kusurunu sonlu elemanlar analizi ile inceleyip, homojen olmayan malzeme akışını yorumlamıştır[9], [10]. Dövme işleminin sırasında yaygın şekilde meydana gelen katlanma, ürün kalitesini ve mukavemetini olumsuz etkileyip, dövme parçaların kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilmektedir. Bu nedenle dövme operasyonlarında katlanma problemi kapsamlı şekilde anlamak ve etkili bir şekilde önlemek için sürekli olarak araştırma ve iyileştirme çalışmalarına katkı sunma zorunluluğu kaçınılmazdır. Bu çalışmada kullanılan yöntemler, dövme işlemlerinde ortaya çıkan katlanma kusurunu anlamak ve önlemek için belirli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Literatürde benzer çalışmaların varlığı, ancak dövme işleminde katlanma kusurunu önlenmesi konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışma, dövme işlemlerinde katlanma kusurunu önleme konusunda daha derinlemesine bir anlayış geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, dövme işlemi sırasında ortaya çıkan katlanmayı önlemek için sonlu elemanlar analizi kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarına dayanarak, katlanma bölgesinde homojen olmayan malzeme akışı ve yüksek dövme gerilmeleri tespit edilmiştir. Malzeme akışının katlama bölgesindeki keskin geometriden kaynaklandığı görülmüştür. Homojen malzeme akışını sağlamak için kalıp tasarımı değiştirilip, keskin köşeye destek (feder) eklenmiştir. Tasarım değişikliğinin etkilerinin incelenmesi için farklı parametrelerde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilip, elde edilen sonuçlar gerçek koşullarda yapılan denemeler ile karşılaştırılıp analiz edilmiştir. Ayrıca eklenen desteğin parça üzerindeki etkisi Von-mises gerilme analizi ile incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırıldığında destek bölgesindeki gerilmelerin önemli oranda azaldığı görülmüştür.

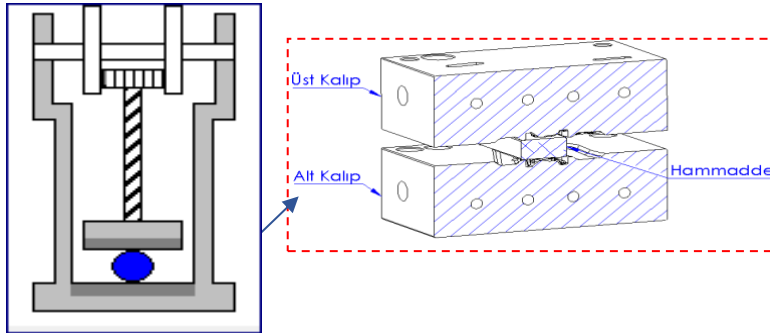
## II. MATERYAL VE METOD

Simülasyon için kullanılan deneysel değişkenler Tablo 1'de sunulmuştur. İlk olarak kalıbın doldurma durumuna yani parçanın dövülebilirlik durumunu ve şekillendirme için en uygun dövme sıcaklığını belirlemek için üç farklı dövme sıcaklığı seçilmiştir. Literatürde Al 2024 alaşımlarına yakın malzemeler için ortalama 370-430 °C dövme sıcaklıkları önerildiğinden bu sıcaklık aralığında parametreler seçilmiştir[11]. Analizlerdeki kurs (strok) durumuna göre katlanmayı kapsamlı bir şekilde gösterebilmek için üç farklı kurs mesafesinde sonuçlar paylaşılmıştır. Destekli ve desteksiz tasarıma uygun kalıplar üretilerek, dövme sürecinde denenmiştir ve bu iki farklı tasarımın simülasyonları gerçekleştirilip, aralarındaki farklılıklar ortaya konulmuştur.

**Tablo 1.** Deneysel Parametreler

Dövme Sıcaklığı(°C)	Tasarım	Kurs(strok) mesafesi (mm)
375	Destekli Tasarım	15
400	Desteksiz Tasarım	20
425	-	28

Simülasyondan alınacak verilerle seri imalat koşullarında yapılacak deneylerde öncelikle hammadde ve kalıp ısıtılmıştır. Alüminyumun ergime noktası düşük olduğu için sıcaklık daha hassas ısıtma sağlayan indüksiyonlu bobin fırınlarında yapılmıştır. Kalıp sıcaklığının kontrolü için kalıbın bağlandığı plakalara termoregülatör düzeneği kurulmuştur. Numune üretiminde kullanılan Al 2024 alaşımı hammadde indüksiyonlu fırında sırasıyla deney planındaki 375-425°C arasındaki farklı sıcaklıklara ısıtılmış, hammadde sıcaklık aralığını sabit tutmak için fırın çıkışındaki sensörler yardımıyla otomatik olarak ölçülmüştür. Hammaddeler robot ile kalıba yerleştirildikten sonra DELLAVIA-Tarvisio marka 1250 Ton Vidalı (Friksiyon) preste dövülmüştür. Vidalı presin şematik gösterimi Şekil 1'de gösterilmiştir. Temel sıcak dövme adımları, istenilen şeklin elde edilmesi için fırında ısıtılan hammaddenin (yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde) kalıba yerleştirilip presin ezmesi ile oluşur. Metal yapıyı şekillendirmek için yüksek basınç uygulanır. Şekil

**Şekil 1.** Vidalı (Friksiyon) pres ve dövme kalıpları

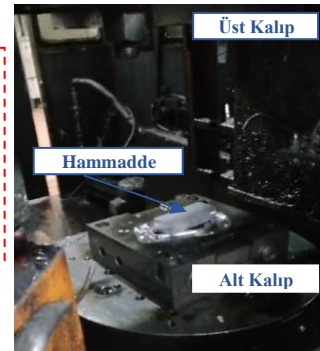
2024 Alüminyum alaşımı, yüksek mukavemeti ve yorulmaya karşı direnci nedeniyle en iyi bilinen yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından biridir [1]. Tablo 2'de Al 2024 alüminyum alaşımı için kimyasal bileşim değerleri verilmiştir.

**Tablo 2.** EN AW 2024 alaşım profilinin kimyasal bileşimi [14]

	Cu	Al	Fe	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti-Zi	Diğer	Si
Değer (%)	3,8-4,9	Kalan	0,5	1,2-1,8	0,3-0,9	0,1	0,25	0,15	0,15	0,5

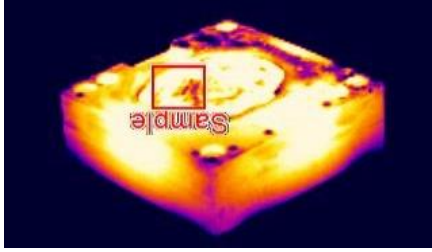
Alüminyum alaşımlarının dövülmesinde kullanılan kalıp malzemeleri dövmede uygulanan kuvvetler ve üretilen parçaların karmaşıklığı dışında; kalıpların

verilen parçalar sıcak kalıp setinden iticiler yardımı ile çıkarılır. Bu işlem adımları, kalıpların sıcaklığını yükseltir ve kalıpların sıcaklığını düşürmek için yağlayıcılar kullanılır bu işlemde kalıpta termal yüklemeye neden olur. Aşırı yağlama, kalıp ve hammadde sıcaklığının fazla olması ürünlerde dövme hatasına yol açmaktadır. Dövme prosesinde yağlamanın doğru yapılması gerekmektedir. Yağlama sürecinin dövme operasyonunda metal akışını kontrol edebilmesi, kalıp sürtünmesini azaltması ve kalıbın dolmasına yardımcı olması, dövülen parçanın kalıptan çıkarılması ve dövme yüklerini azaltmak gibi avantajları bulunmaktadır[12]. Dolayısıyla yağlama sürecinin istenen şekilde ayarlanmaması çok değişken dövme problemlerine sebebiyet verebilmektedir. Dövme işlemlerinde su bazlı akışkanlar, yağ bazlı akışkanlar ve katılar üç ana yağlayıcı gruptur [13]. Su bazlı grafit, alüminyum dövmede yağlayıcı olarak en yaygın yağlayıcıdır. Numune üretiminde su bazlı grafit yağlayıcı (SUMIDERA® W 50) kullanılmıştır. Ancak grafit siyah bir renge sahip olduğu için dövmeden kolayca temizlenemez. Yağlayıcı uygulaması kalıplar preste monte edilirken ve dövmeden hemen önce kalıplara yağlayıcı püskürtülerek yapılmıştır. Kalıpların yağlanmasında genellikle basınçlı hava veya havasız püskürtme sistemi kullanılmaktadır[12].



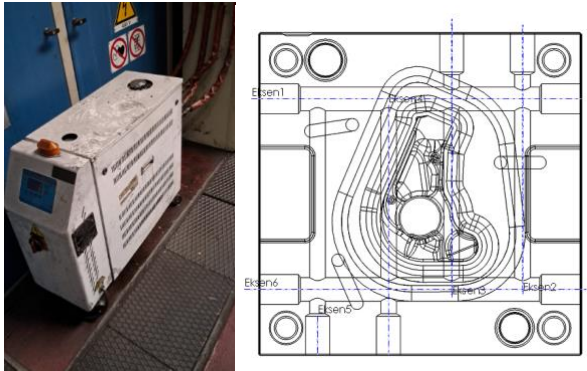
tokluklarını geliştirmek için daha düşük sertlik seviyeleri tercih edilir. Sıcak iş takım çelik serilerinden olan DIN 1.2343 ve 1.2344, DIN 1.2606 veya bu takım çeliklerinin tescilli varyantları, alüminyum dövme sürecinde genellikle 44 ile 50 HRC sertlik değerleri aralığında yaygın olarak kullanılır [15]. Numune üretiminde 47 HRC sertlik değerinde 1.2344 çelik malzemeden üretilmiş dövme kalıbı kullanılmıştır. Dövme işleminde kalıpların ısıtılması çok önemlidir. Şekil 1'de gösterildiği üzere, hammadde kalıba konumlandırılır kalıp ve hammadde arasındaki ısı iletimi nedeniyle kalıplar ısıtılmazsa, enerjinin korunumu kuralından dolayı dövme hammaddesi çok hızlı soğur. Kalıpların ısıtılması, metal plastisite seviyesini ve akış özelliklerini başarıyla yükseltebilir, metal akışının homojenliğini iyileştirebilir, kalıbın soğumasını ve malzeme

üzerindeki dövme basıncını azaltır [12]. Kalıp sıcaklığı termoregülatör sistemi ile yaklaşık 200°C sıcaklığa ısıtılıp, sabit bırakılmıştır. Kalıp sıcaklıkları, termal kamera ile Şekil 2’de gösterildiği üzere kontrol edilmiştir.



**Şekil 2.** Termal kamera ile kalıpların sıcaklıklarının ölçülmesi

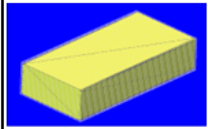
Dövme kalıplarında sıcaklık kontrolü, yağ kanalları aracılığıyla gerçekleştirilen termoregülatör sistemleri ile sağlanmaktadır. Bu sistemler, büyük ölçekli dövme işlemlerinde kullanılmakta olup malzeme akışını kolaylaştırmak ve istenilen dövme şeklini elde etmek için kritik öneme sahiptir. Yağ kanalları, dövme kalıbının içine entegre edilerek bir serpantin veya labirent yapısıyla düzenlenir, bu sayede ısı homojen bir şekilde dağıtılır. Isıtma sistemi, yağ kanallarına bağlanarak kalıbın iç yüzeyini ısıtarak sıcaklık kontrolünü sağlar. Sistemi uygun sıcaklıkta tutmak için bir ısıtma veya soğutma sistemindeki soğutucu akışı gibi bir kontrol sinyalinin değiştirilerek çalışır. Kontrol birimi aracılığıyla işlem sırasında sıcaklık değişimleri sensörler aracılığıyla izlenir. Şekil 3’de deneylerde kullanılan termoregülatör sistemi sunulmuştur.



**Şekil 3.** Termoregülatör sistemi ve yağlama kanalları

Dövme işlemi sonrası destekli ve desteksiz tasarım için X-Ray analizleri YXLON marka CT cihazında

gerçekleştirilmiştir. ASTM E8/E8M–09 standardına uygun olarak hazırlanmış çekme numunelerinin Instron 5569 cihazında testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri üç kere tekrarlanmak üzere gerçekleştirilmiştir. Dövme işleminin modellenmesi ve simülasyonu, sonlu elemanlar analizi yazılımı olan Simufact Forming’de gerçekleştirilmiştir. Katlanma görülen bölgenin incelenmesi için destekli ve desteksiz tasarımlara örgü (mesh) tanımlaması yapılmıştır ve her iki simülasyon modeli için aynı mesh değerleri kullanılmıştır. Hexahedral örgü modeli, Simufact Forming gibi 3D işlemler için kullanılan bir örgüleme yöntemidir. Genel olarak, hexahedral öğeler, en iyi doğruluğa ve tetrahedral öğelere kıyasla daha az sayıda öğeye sahiptir. Ancak, her geometri hexahedral öğeler kullanılarak örgülenemez. Analizlerde parçaların hassasiyetini artırmak için Hexahedral tipi örgü model elemanı tercih edilmiştir. Bu tipte kullanılan elemanlarla, daha az eleman kullanılarak aynı sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır. Eleman sayısındaki bu azalma ile analiz süresini ve sonrasındaki işlem süresi de belirgin bir şekilde azaltılmıştır. Ayrıca, çalışmada kullanılan dövme kalıbı, ısı iletkenliği olan rijit malzeme olarak tanımlanmıştır. Sürtünme geriliminin büyüklüğü, deformasyon modelini, sıcaklık artışını ve metal şekillendirmede oluşan toplam kuvveti etkilemektedir [12]. Hammade malzemesi ve dövme kalıbı arasındaki sürtünme modeli olarak Coulomb sürtünme modeli tanımlanmıştır. Programın malzeme veri tabanından kalıplara ait ısıl iletkenlik ve sürtünme gibi özellikleri alınmıştır. Sabit sürtünme modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan iş parçası 40x20x80 mm ve mesh değerleri Şekil 4’de gösterilmiştir. Element boyutu 1 mm, toplamda 76 element kullanılarak simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan alüminyum alaşım malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4’de sunulmuştur.

	Element boyutu (mm)	1
	Element sayısı	76

**Şekil 4.** Simülasyon hammadde özellikleri

**Tablo 3.** EN AW 2024 Fiziksel Özellikler [14]

Fiziksel Özellikler	Değer
Yoğunluk	2.78 (g/cm <sup>3</sup> )
Erime Sıcaklığı	502 (°C)
Isıl Genleşme	23 x (10 <sup>-6</sup> /°K)
Elastiklik Modülü	72.4 (GPa)
Termal Kapasite	151 (W/m.k)

**Tablo 4.** EN AW 2024 Mekanik Özellikler [10]

Mekanik Özellikler	Değer
Akma Mukavemeti	315- 390 (MPa)
Çekme Mukavemeti	415- 480 (MPa)
Uzama	%5 - %10

### III. BULGULAR

#### 3.1 Simülasyon Girdi Parametrelerinin Belirlenmesi

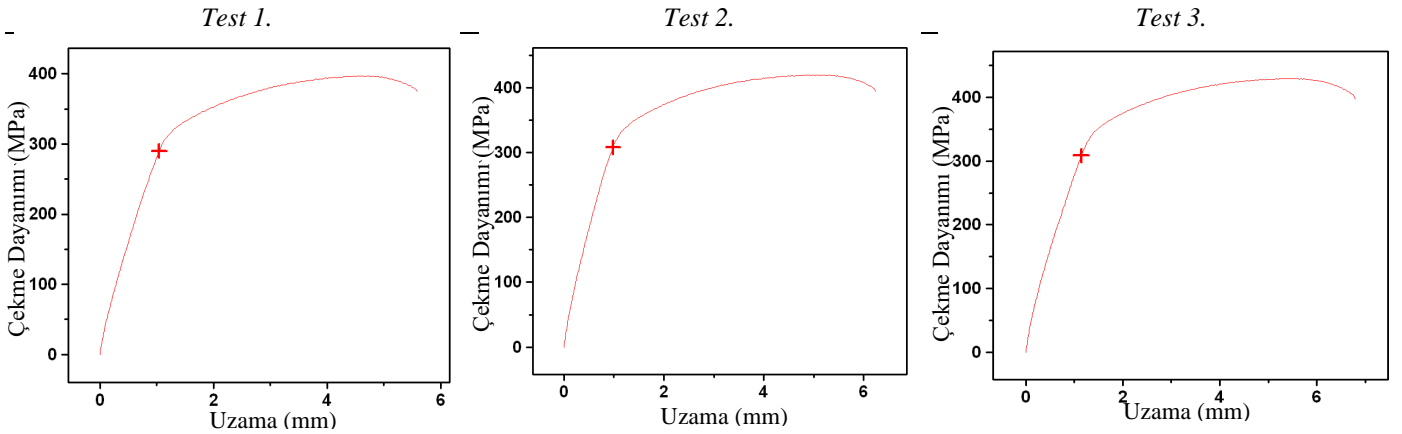
Dövülen numunelere proses parametrelerinin tutarlılığı ve simülasyon çalışmalarında kullanılan parametrelerin kontrolü için çekme testi yapılmıştır. Test sonuçları Şekil 5 ve Tablo 5'de gösterilmiştir. Al 2024 alaşımının dövülmüş haldeki akma dayanımı ortalama 315,3 MPa iken, çekme dayanımı ortalama 406 MPa civarındadır. Ortalama 125 HB sertlik değerine sahip olan bu malzemenin yüzde uzama değerleri ortalama 6 mm olarak ölçülmüştür.

**Tablo 5.** Çekme numunesi sonuçları

Değer	Uzama (mm)	Akma Dayanımı(MPa)	Çekme Dayanımı(MPa)	Sertlik (HB)
Test 1.	5.6	312	397	120
Test 2.	6.23	324	420	125
Test 3.	6.6	310	402	130
Ort.	6.1	315.3	406.3	125.0

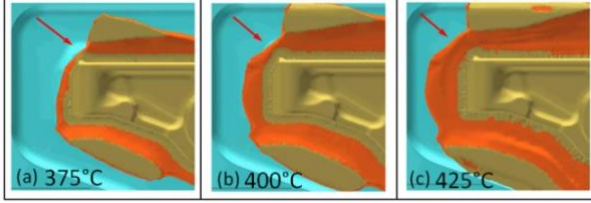
Kapalı kalıp dövme için alüminyum dövme işlemi sırasında kalıpların sıcaklığı 150 °C ila 260 °C olarak önerilmektedir [1]. Bu nedenle, analiz sırasında kalıpların başlangıç sıcaklığı 200 °C olarak kabul edilmiştir. Hammadde sıcaklıkları 375°C, 400°C, 425°C olarak alınmış ve bu sıcaklık değerleri ile simülasyon deneyleri yapılmıştır. Farklı sıcaklık aralıkları ile yapılan deneme sonucunda Şekil 6'da görüldüğü üzere 425°C ile yapılan denemede malzeme kalıba daha iyi yayılmıştır. Dövme sıcaklığının artmasıyla malzemenin akışı kolaylaşarak deformasyon direnci azalmıştır. Dövülebilirlik açısından elde edilen bu sonuca göre simülasyon denemelerinde hammadde sıcaklığı 425°C olarak ayarlanmıştır. Proses parametrelerinin nihai ürünün mukavemeti üzerinde büyük etkisi vardır, bu nedenle yüksek mukavemetli dövme ürünlerinde mekanik özelliklerin hassasiyetle sağlanması için proses parametreleri belirlenmiş olan aralıklarda sabitlenmelidir [8]. Özellikle dövme sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının bu durumu etkileyen önemli parametreler olduğunu söylemek mümkündür.

Kapalı kalıp dövme için alüminyum dövme işlemi sırasında kalıpların sıcaklığı 150 °C ila 260 °C olarak önerilmektedir [1]. Bu nedenle, analiz sırasında kalıpların başlangıç sıcaklığı 200 °C olarak kabul edilmiştir. Hammadde sıcaklıkları 375°C, 400°C, 425°C olarak alınmış ve bu sıcaklık değerleri ile simülasyon deneyleri yapılmıştır. Farklı sıcaklık aralıkları ile yapılan deneme sonucunda Şekil 6'da görüldüğü üzere 425°C ile yapılan denemede malzeme kalıba daha iyi yayılmıştır. Dövme sıcaklığının artmasıyla malzemenin akışı kolaylaşarak deformasyon direnci azalmıştır.

**Şekil 5.** Çekme numunesi sonuç grafikleri



Dövülebilirlik açısından elde edilen bu sonuca göre simülasyon denemelerinde hammadde sıcaklığı 425°C olarak ayarlanmıştır. Proses parametrelerinin nihai ürünün mukavemeti üzerinde büyük etkisi vardır, bu nedenle yüksek mukavemetli dövme ürünlerinde mekanik özelliklerin hassasiyetle sağlanması için proses parametreleri belirlenmiş olan aralıklarda sabitlenmelidir [8]. Özellikle dövme sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının bu durumu etkileyen önemli parametreler olduğunu söylemek mümkündür.

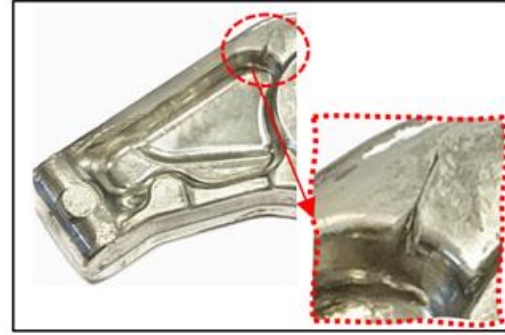


Şekil 6. Dövme sıcaklığının dövülebilirliğe etkisinin simülasyon sonuçları

### 3.2 Tasarımda Desteğin (Feder) Parçada Oluşan Gerilmeye ve Dövülebilirliğe Etkisinin Simülasyonu

Çalışmanın bu bölümünde dövme işleminde katlanma hatasının simülasyon sonuçları analiz edilmiş ve katlanmanın giderilmesi için yapılan tasarımın sonucu değerlendirilmiştir. Numune parçada katlanma problemi görülmüştür. Sıcak dövme sürecinde karşılaşılan önemli bir problem olan katlanma, dövme işlemi esnasında dövülen malzemenin istenmeyen şekilde ikiye ayrılması veya kırılması anlamına gelir. Dövülen malzemenin belirli bölgelerinin fazla deformasyona veya gerilme birikmesine maruz kalması sonucunda oluşur. Dövme sürecinde sıkça karşılaşılan katlanma kusurunun temel nedenleri çeşitli faktörlere dayanmaktadır. Bu faktörlerden ilki, hammadde profilinin etkisidir. Dövme sürecinde kullanılan hammadde, deformasyon oranını minimumda tutacak şekilde seçilmelidir; zira yüksek deformasyon, dövme esnasında kusurlara yol açabilir. Hammadde profili, dövme için belirlenen geometriye uygun olarak seçilmeli ve aşırı deformasyonun meydana geldiği bölgelere özel dikkat gösterilmelidir. İkinci etken ürün tasarımıdır; keskin köşelerin kullanılması, homojen malzeme akışını engelleyebileceğinden tasarımda bu tür unsurlardan kaçınılmalıdır. Bununla birlikte, kalıp ve elemanlarının seçimi de tasarımın başarısını etkileyen önemli unsurlardır. Üçüncü olarak, proses parametrelerinin etkisi göz ardı edilmemelidir. Dövme işlemi için uygun parametrelerin belirlenmesi, malzemenin alaşımı ve ürün geometrisine bağlıdır. Uygun olmayan proses parametreleri, çeşitli süreç problemlerine sebep olabilir; bu nedenle dövme

sürecinde metalin uygun sıcaklığa erişmesi ve homojen bir şekilde ısınması son derece önemlidir[1]. Dövmede keskin köşeleri düzgün bir şekilde bağlamak için genellikle radyus kullanılır, radyus veya yuvarlatılmış köşeler ani açılı bağlantı yerine düzgün kademeli bağlantıya yardımcı olur. Oluşabilecek stres konsantrasyonları sonucu meydana gelebilecek çatlak ve kırılma riskini minimize eder. Köşe ve iç köşe yarıçaplarının seçimi aynı zamanda tane akışını, kalıp aşınmasını ve işlemede çıkarılacak malzeme miktarını etkiler [1]. Bu yüzden kalıplarının işlenmesi esnasında keskin köşelerin dikkatlice işlenmesi gerekebilir. Dövme sürecinde kalıpların bakım ihtiyacını artırabilir. Desteksiz tasarımda ve yuvarlatılmış köşelerin normale nazaran daha keskin olduğu durumda üretim sürecinde incelenen dövme örneğinde oluşan katlanma Şekil 7'de sunulmuştur. Üretilen parçanın kusurlu olduğu net bir şekilde görülmektedir. Karşılaşılan bu durumu farklı bir malzeme/alaşım veya yöntem kullanmaksızın iyileştirebilmek için tasarımda değişikliğe gidilmesi zorunlu olmaktadır.

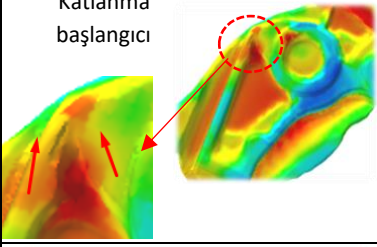
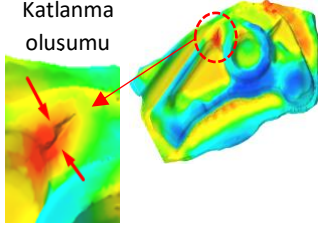
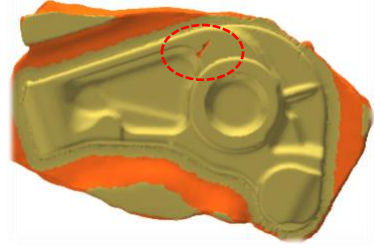

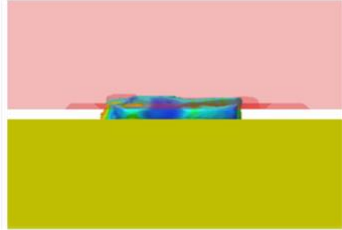

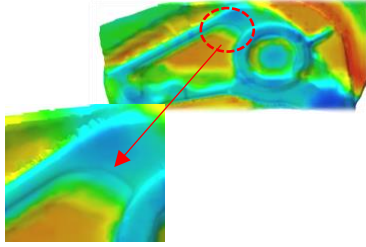
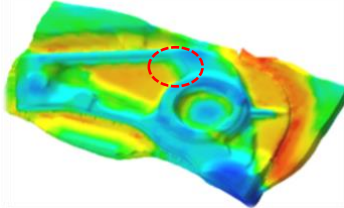
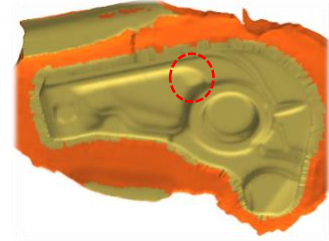


Şekil 7. Katlanma Kusuru (Desteksiz Tasarım)

Dövme örneğinde, katlanmanın görüldüğü alandaki iki köşeyi birleştirmek için yarıçap kullanılmıştır. Köşe yarıçapları, plastik deformasyon sırasında malzeme akışını rahatlatmak ve yüksek dövme gerilmelerini azaltmak için mümkün olduğunca büyük seçilir. Küçük yarıçap kullanımında, gerilmeler yüksek olacağından katlanmanın meydana gelmesi daha olasıdır[16]. İncelenen örnekte parçanın fonksiyonunu etkilemeden kullanılacak maksimum yarıçap değerleri kullanılmıştır. Simufact sonlu analiz programı ile yapılan simülasyon sonuçlarında Şekil 8'de farklı kurs mesafesi seviyelerinde katlanma oluşumu görülmektedir. Analiz edilen numunenin gerilme değerlerinde beklendiği gibi, kırmızı renk malzemede oluşan en yüksek gerilme değerini, mavi renk ise en düşük değeri temsil etmektedir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde katlanma bölgesinde gerilme değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Uygun olmayan kalıp tasarımı, malzemenin istenmeyen akışına ve dolayısıyla geometrik kusurlara yol açmaktadır. Şekil 8

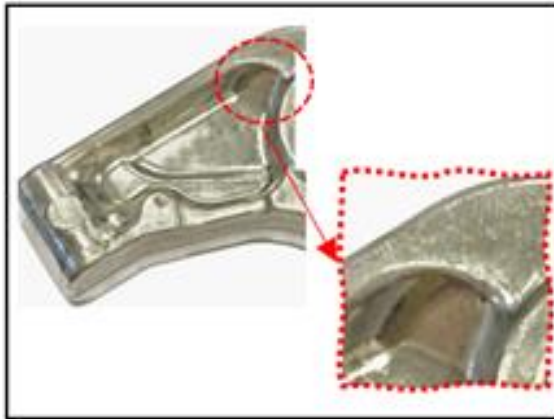


incelendiğinde katlanma oluşumu net şekilde görülmektedir. Katlama bölgesinde yarıçap geometrisi oluşmadan malzeme kalıp dışına akıp, yarıçap geometrisi homojen malzeme akışını bozmakta ve katlanmaya neden olmaktadır. Şekil 8'de yapılan analiz sonuçlarında keskin köşede kullanılan yarıçap değerinin malzemenin akışını bozduğu ve katlanmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Katlama bölgesindeki malzeme akışını rahatlatmak ve gerilmeleri azaltmak için katlama bölgesine destek eklenmiştir. Simülasyon sonuçlarında destekli bölgedeki gerilmelerin azaldığı ve katlanmanın giderildiği görülmüştür.

	Kurs (Strok) Mesafesi (mm)		
	15 mm	20 mm	28 mm
DESTEKSİZ TASARIM			
Kurs Görüntümü			
DESTEKLİ TASARIM			

Şekil 8. Tasarımdaki Destek durumuna bağlı katlanma oluşumunu gösteren simülasyon görüntüleri

Simülasyon parametreleri ile gerçek ortamda yapılan deneme aynı sonucu vermiş ve üretilen numune parçanın görsel kontrolünde katlanmanın giderildiği görülmüştür. (Şekil 9)

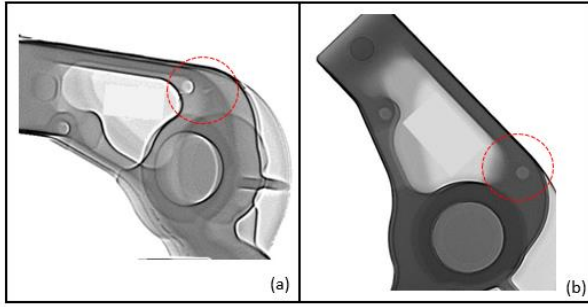


Şekil 9. Destekli Tasarım (Destek Bölgesi)

### 3.3 Numune parçalarının muayenesi

Ürünlerin üretimi sırasında oluşabilecek katlanma, çatlama, eksik doldurma gibi dövme kusurları ürünün kullanılacağı yere göre büyük maddi kayıplara neden olabilir. Bu kaybı önlemek için belirli zaman aralıklarında tahribatsız test yöntemleri veya tahribatlı test yöntemleri kullanılarak arızalı alanlar önceden tespit edilebilmektedir. Bu çalışmada örnekler X-ray inceleme yöntemi ile kontrol edilmiştir.

X-ray muayenesi yöntemi tahribatsız inceleme yöntemlerinden biri olup, parçaların hacimsel olarak incelendiği, kusurların tipinin, yerinin ve boyutunun belirlenebildiği bir yöntemdir. X-ray cihazı ile yapılan kontrollerin sonuçlarının görüntülerinde katlanma problemi olan numune Şekil 10.(a)'da, tasarım değişikliği sonrası problem giderilerek katlanma kusurunun olmadığı numune ise Şekil 10.(b) görselinde kırmızı halkalar içerisinde görülmektedir.



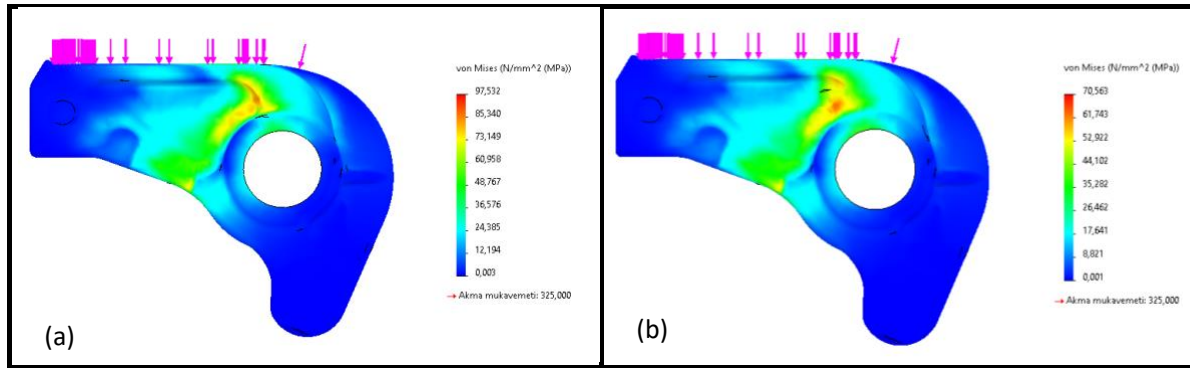
Şekil 10. X-RAY görseli, (a) Desteksiz tasarım, (b) Destekli tasarım

### 3.4 Desteğin Tasarım Üzerindeki Mekanik Etkisinin İncelenmesi

Bu çalışmada kullanılan numune bir otomotiv bileşenidir. Bu nedenle ilgili şartnamelerde yer alan mekanik ve fiziksel testlere tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada, numunenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Von-Mises gerilme analizi kullanılmıştır. Von-Mises gerilme değeri, belirli bir kuvvetin uygulandığı malzemedeki gerilme direncini

belirlemek için kullanılan, malzemenin deformasyon prensiplerine dayanarak elde edilen bir değerdir. Bu analiz, numunenin mekanik dayanıklılığını belirlemek ve tasarım değişikliklerinin etkisini incelemek için gerçekleştirilmiştir[17]. Analizde, numunenin fiziksel çalışma yönüne paralel olarak 20N kuvvet uygulanmıştır.

Analiz, SOLIDWORKS programı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve en yüksek gerilme değerlerinin desteksiz keskin köşelerde olduğu tespit edilmiştir. Şekil 11'de görülen analiz sonuçlarına göre, desteksiz keskin köşelerde yaklaşık olarak 97,5 MPa bir gerilme oluşmuştur. Bu analizde destek eklenmesi durumunda, oluşan gerilmenin yaklaşık %30 oranında azalarak ilgili bölgede 70,5 MPa civarında bir gerilme meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, numunenin seri imalat koşullarındaki gerçek performansını desteklemekte ve tasarım sürecini doğrulamaktadır. Von-Mises gerilme analizi, numunenin mekanik dayanıklılığını değerlendirmek ve tasarım değişikliklerinin etkisini incelemek için önemli bir araç olarak kullanılmıştır.



Şekil 11. Von Mises simülasyon sonucu, (a) Desteksiz tasarım, (b) Destekli tasarım

## IV. SONUÇ

Normal şartlarda alüminyum alaşımları arasında Al 2024 malzeme yüksek mukavemeti nedeniyle plastik deformasyonu zor olan malzemelerin arasındadır. Deneyle gerçekleştirildiği parça normal şartlarda döküm yöntemiyle üretilmektedir. Ancak döküm sonrası malzemenin mukavemeti yeterli seviyelere ulaşamamaktadır. Döküm yöntemi yerine dövme operasyonu kullanılması ekstra mukavemet kazandırmaktadır. Bu araştırma dövme sürecinde oluşan katlanma kusurunun analizini ve giderilmesini amaçlamıştır. Çalışma, öncelikle simülasyon girdi parametrelerinin belirlenmesi üzerine odaklanmış ve dövme işlemi için uygun proses parametrelerinin belirlenmesine yönelik önemli bulgular ortaya koymuştur. Hammadde sıcaklığının artmasıyla malzemenin akışının kolaylaşması ve deformasyon direncinin azalması gibi faktörler, dövme işlemi için

optimum sıcaklık aralığının belirlenmesine katkı sağlamıştır. Daha sonra, destek kullanımının tasarım üzerindeki mekanik etkisinin incelenmesiyle katlanma kusurunun giderilmesi amacıyla yapılan çalışmalar sunulmuştur. Destek eklenmesinin, keskin köşelerde oluşan gerilmeleri azalttığı ve katlanma kusurunu önlediği gözlemlenmiştir. Bu tasarım değişikliği, dövme sürecindeki keskin köşelerin yarattığı gerilme konsantrasyonlarını azaltarak ürün kalitesini artırmıştır.

Son olarak, numunelerin muayenesi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan analizlerle ilgili bulgular sunulmuştur. X-ray muayenesi ile belirlenen katlanma kusurlarının, destek eklenmesiyle giderildiği gözlemlenmiştir. Von-Mises gerilme analizi ise desteksiz keskin köşelerdeki gerilme değerlerini azaltarak numunenin mekanik dayanıklılığını artırmıştır. Bu çalışmanın literatüre

önemli bir katkı sağladığı düşünülmektedir. Özellikle dövme sürecinde katlanma kusurunun analizi ve giderilmesi üzerine yapılan detaylı çalışmalar, endüstrideki üretim süreçlerinin iyileştirilmesine ve kalitenin artırılmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, destek kullanımının dövme tasarımında önemli bir rol oynadığı ve mekanik analizlerin tasarım sürecindeki kararları destekleyici bir araç olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, dövme süreci ve benzeri üretim süreçlerinde tasarım ve üretim kalitesinin artırılması için değerli bir rehber sağlayabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] J. R. Davis, *Aluminum and aluminum alloys. ASM international*, 1993.
- [2] M. W. Fu and M. W. Fu, “Flow-Induced Defects in Multiscaled Plastic Deformation,” *Des. Dev. Met.-Form. Process. Prod. Aided Finite Elem. Simul.*, pp. 131–180, 2017.
- [3] M. Sedighi and S. Tokmechi, “A new approach to preform design in forging process of complex parts,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 197, no. 1–3, pp. 314–324, 2008.
- [4] X. Ge, Y. Yu, H. Yu, and G. Wang, “Study on Folding Defect Elimination Method of Track Link Forging Based on Preforming Design,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 24, no. 1, pp. 61–71, 2023.
- [5] D. B. Shan, W. C. Xu, and Y. Lu, “Study on precision forging technology for a complex-shaped light alloy forging,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 151, no. 1–3, pp. 289–293, 2004.
- [6] M. Hawryluk and J. Jakubik, “Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 59, pp. 396–409, 2016.
- [7] S. G. Prasad and N. Panigrahi, “Review of the Study of Hot Forging Process Defects,” *Stainl. Steel*, vol. 1300, p. 920.
- [8] P. Petrov, V. Perfilov, and S. Stebunov, “Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of aluminium alloy A92618,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, no. 1–3, pp. 218–223, 2006.
- [9] J. L. Wang, M. W. Fu, and J. Q. Ran, “Analysis and avoidance of flow-induced defects in meso-forming process: simulation and experiment,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, pp. 1551–1564, 2013.
- [10] J. L. Wang, M. W. Fu, and J. Q. Ran, “Analysis of size effect on flow-induced defect in micro-scaled forming process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, pp. 1475–1484, 2014.
- [11] A. M. Handbook, “Forging of Aluminum Alloys,” in *Volume 14: Forming and forging*, Company of America, 1996, p. 533.
- [12] H. Öztürk, “Analysis and Design for Aluminum Forging Process,” *Degree Master Science Mechanical Engineering METU*, p. 189, 2008.
- [13] Y. Birol, “The effect of processing and Mn content on the T5 and T6 properties of AA6082 profiles,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 173, no. 1, pp. 84–91, 2006.
- [14] “Aluminium and aluminium Alloys-Sheet, Strip and Plate, Part 2: Mechanical properties,,” *BS EN 485-2, British Standard.*, 2007.
- [15] C. R. Keeton, “ASM Metals handbook: forming and forging,” *Met. Park OH ASM Int.*, pp. 108–127, 1988.
- [16] C.-Y. Wu and Y.-C. Hsu, “The influence of die shape on the flow deformation of extrusion forging,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 124, no. 1–2, pp. 67–76, 2002.
- [17] E. Eyere, O. Larry, and O. Peter, “Development of a Mechanical Puller,” *Int J Innov Sci Res Technol*, vol. 3, no. 7, pp. 284–289, 2018.

## Mikroyapı Gelişiminin Temellerini Gerçek Zamanlı Olarak İncelemek için Mikroskop ve Katılaştırma Ekipmanı Tasarımı

*Microscope and Solidification Equipment Design to Study in Real Time the Fundamentals of  
Microstructure Evolution*

Melis ŞEREFÖĞLU <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Marmara University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 34854 Maltepe, Istanbul, Turkey  
Marmara Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 34854 Maltepe, İstanbul, Türkiye

### Öz

Katılma mikroyapısı, döküm, eklemeli imalat ve kaynak yoluyla üretilen malzemelerde malzeme özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Mikroyapıyı kontrol etmek ve optimize etmek için öncelikle mikroyapı evrim dinamiklerinin anlaşılması gerekir. İşlem sonrası (post-mortem) çalışmalarla mikroyapıyı anlamak için birçok girişimde bulunulmasına rağmen, büyüme hızı gibi mikroyapıyı belirleyen bir parametre değiştiğinde ne olacağını anlamak için gerçek zamanlı araştırmalar gereklidir. Gerçek zamanlı inceleme, özellikle hız, kompozisyon, sıcaklık gradyanı vb. gibi katılma parametrelerinin işlem sırasında değiştiği döküm, katmanlı imalat ve kaynak gibi endüstriyel uygulamalarda katılma mikroyapısının ve dolayısıyla malzeme özelliklerinin belirlenmesi için çok önemlidir.

Bu çalışmada, katılma dinamiklerini ve mikroyapı gelişimini gerçek zamanlı olarak incelemek amacıyla özel bir mikroskop ve katılma düzenekleri tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yönlü katılma deney düzenekleri ile birlikte mikroskopi sisteminin detayları sunulmaktadır. Sıcaklık gradyanı ölçümleri, tipik kontrol parametreleri ve mikroyapılar dahil olmak üzere bu tekniğin örnek çıktıları raporlanmıştır. Bu özel üretim ekipmanın, metalik sistemlerde dahi katılma dinamiklerini ve mikroyapı gelişimini üç boyutlu olarak anlamının ve böylelikle malzeme özelliklerini belirlemenin yolunu açtığı gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Katılma, Mikroyapı Evrimi, Mikroskopi, Fiziksel Metalurji, Tek Yönlü Katılma

### Abstract

Solidification microstructure is the decisive parameter in determination of all kinds of properties in materials produced by casting, additive manufacturing, and welding. In order to control and optimize the microstructure, first, the microstructure evolution dynamics has to be understood. Although there have been many attempts to understand microstructure with post-mortem studies, real-time investigation is necessary to apprehend what happens when a microstructure decisive parameter such as growth velocity changes. Real-time investigation is especially important for determination of microstructure in industrial applications such as casting, additive manufacturing, and welding, where the solidification parameters such as velocity, composition, temperature gradient etc. change during the process.

In this work, in order to investigate solidification dynamics and microstructure evolution in real time, a special microscope and solidification setups were designed, and get manufactured. The details of the microscopy system are given along with the directional solidification setups. Example outputs of this technique including temperature gradient measurements, typical setting parameters, and microstructures are reported. It is shown that this unique equipment opens the way to understand the solidification dynamics and microstructure evolution even in metallic systems in three dimensions, and hence the material properties.

**Keywords:** Solidification, Microstructure Evolution, Microscopy, Physical Metallurgy, Directional Solidification

## I. GİRİŞ

Katılma mikroyapısı, döküm, eklemeli imalat ve kaynak ile üretilen malzemelerin özelliklerini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Metallerin çoğu, alaşım oluşturulduktan hemen sonra sürekli döküm veya külçe döküm ile üretildiğinden, nihai şekli plastik deformasyon veya işleme gibi diğer imalat teknikleriyle üretilen parçalar için bile, katılma mikroyapısının parmak izleri son ürün özellikleri üzerinde önemli rol oynar. Bu nedenlerden ötürü, katılma mikroyapısının temellerini anlamak ve hangi koşullar altında nasıl mikroyapılar oluşacağını bilmek çok önemlidir.

Katılma mikroyapısını belirleyen en önemli faktör ise katı/sıvı arayüzeyinin dinamikleridir. Daha spesifik olmak gerekirse, katı/sıvı arayüzeyinde oluşan dinamiklerin katıda bıraktığı izlere katılma mikroyapısı denir. Katılma dinamikleri çok değişken olduğundan ve lokal dalgalanmalardan çok fazla etkilendiğinden, bu dinamikleri anlamak ve neye göre değiştiğini belirlemek için gerçek zamanlı deneyler yapılması gerekmektedir. Klasik yöntem olarak bilinen, tüm prosesler bittikten sonra, numune kesilip metalografik hazırlıktan geçtikten sonra elde edilen mikroyapı, katılma dinamikleri konusunda pek bilgi vermez. Daha spesifik olmak gerekirse, tüm prosesler bittikten sonra elde edilen mikroyapı, birbirinden farklı oluşum mekanizmalarından herhangi birinin etkinliği ile oluşmuş olabilir. Bu nedenle; katılma mekanizmalarını anlayabilmek için gerçek zamanlı deneylere ihtiyaç vardır. Gerçek zamanlı yapılan deneyler bir film iken, metalografik hazırlık sonrası elde edilen ve sadece katılma ile oluşmuş (katı hal dönüşümlerinden geçmemiş) mikroyapı, o filmde elde edilmiş bir görüntüdür sadece; öncesi ve sonrası hakkında bilgi vermez. Aynı zamanda, klasik yöntem ile, büyüme hızı gibi mikroyapıyı önemli şekilde etkileyen bir parametrenin katılma dinamiklerini nasıl etkilediği anlaşılabilir. Bu nedenlerden ötürü, mikroyapı gelişimini gerçek zamanlı incelemek bir zorunluluktur.

Mikroyapı gelişimini gerçek zamanlı olarak incelemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kronolojik olarak, ilk gerçek zamanlı deneyler ışık (optik) mikroskopları kullanılarak 20. yüzyılın ortalarında yapılmıştır [1-3]. Zamanla, optik çözünürlük pek değişirse de, ışık kaynaklarının LED'e çevrilmesi ve farklı yöntemlerin ortaya çıkarılmasıyla elde edilen görüntü kalitesi ve çeşitliliği önemli ölçüde artmıştır [4]. Bu deneylerde genellikle, metal gibi katılma, kristal yapıya sahip, metal analog sistemler olarak bilinen transparan organik malzemeler kullanılmıştır [2, 5-9]. Transparanlık özelliklerinden dolayı, numunenin kalınlığı boyunca katı/sıvı arayüzeyinin

nasıl evrildiği, büyüme dinamikleri ve katılma parametrelerinde yapılan değişikliklere alaşımın nasıl tepki verdiği görülebilmektedir. Katılmanın temel prensipleri, malzemenin organik veya metal olmasına göre değişmediğinden, organik malzemeler bu prensipleri anlamak amacıyla elliye aşkın senedir kullanılmaktadır. Fakat, organik malzemeler, yüksek enerjili X-ışını ve elektron demeti gibi ışınlar ile degrade olduğundan, bu alaşımların kimyasal kompozisyonları, dokuları, kristalografik yönelimleri vb. özellikleri belirlenmemektedir. Elde edilen çözünürlük ve gözlemlenebilirlik açılarından organik malzemeler katılma dinamiklerini çalışmak için çok elverişli olsa da ileri karakterizasyon yöntemleri uygulanamadığından, bu tür çalışmalarda metallerin kullanılması bir zorunluluktur.

Temel olarak tahribatsız muayenede kullanılan X-ışını teknikleri, teknolojinin gelişmesiyle, metallerde mikroyapı gelişimini gerçek zamanlı incelemek için kullanılmaya başlanmıştır. 2000'lerin başından itibaren X-ışını ile gerçek zamanlı gözlemler katılma için de kullanılmaya başlanmıştır [10] fakat laboratuvar ortamında X-ışını ile elde edilen görüntülerin çözünürlüğü oldukça kısıtlıdır [11]. Çözünürlükteki bu sınırdan dolayı, sadece dendrit gibi, ötektik mikroyapılara kıyasla çok daha büyük olan yapılar bu yöntem ile incelenebilmektedir. X-ışını kaynağı senkrotron olduğunda ise, çözünürlük çok daha iyi değerlere ulaşabilmektedir [12]. X-ışını tomografisi veya mikro-tomografi olarak bilinen bu yöntemde dahi, oldukça yavaş hızlarda (<1 µm/s) büyütülen üç fazlı ötektik mikroyapısının detayları görülebilmektedir. Senkrotron kullanımı ile gelinen en son nokta nanotomografidir [13]. Bu yöntem ile, düşük hızlarda katılaştırılmış üç fazlı ötektikler ayrıştırılabilmekte ve arayüzey dinamiklerinin detayları net bir şekilde görülebilmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı göreceli olarak üç boyutlu (3B) olan numunelerin incelenebilmesidir. Başlıca dezavantajı ise X-ışınının numuneden geçmesi gerektiğinden, numune çapının oldukça küçük, 30 µm seviyelerinde, tutulmak zorunda olmasıdır. Bir diğer önemli dezavantajı ise, bu yetiye sahip senkrotronların dünyada sadece birkaç tane olması ve bu nedenle kullanılabilirliklerinin çok düşük olmasıdır. Maalesef, ülkemizde senkrotron bulunmamaktadır. Son olarak, X-ışını temel olarak metalik numunelerde kullanılmakta ve organik numunelerde (yüksek enerjiden dolayı moleküller degrade olduğu için) kullanılmamaktadır. Bu nedenlerden ötürü, Mikroyapı Evrim Laboratuvarında (MEL), katılma dinamiklerini gerçek zamanlı incelemek için optik mikroskop kullanılmıştır. Bu yöntem halihazırda çoğunluğu Amerika ve Avrupa'da bulunan birçok üniversitede ve araştırma merkezinde kullanılmaktadır [6, 7, 14-30]. Bu yöntemin yaygın

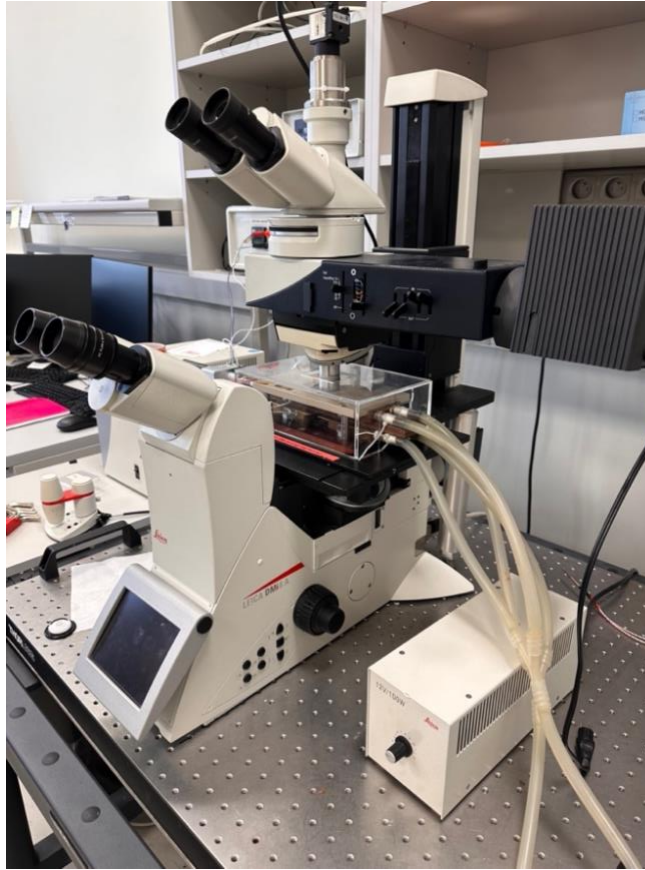


olarak kullanılma sebepleri ise **(i)** Optik mikroskop ve katılma sisteminin diğer yöntemlerden çok daha ucuz ve kolay erişilebilir olması, **(ii)** Numune eninin X-ışını nanotomografisine göre onlarca kat daha büyük olması ve böylelikle istatistiksel olarak geçerli gözlemlerin ve ölçümlerin yapılabilmesi **(iii)** Elde edilen çözünürlüğün X-ışını mikro-tomografiden çok daha iyi ve nanotomografi seviyelerinde olması ve **(iv)** Hem organik hem de metalik numunelerin incelemesidir. Optik mikroskop sistemlerinin, gerçek zamanlı deneylerin yapılabildiği nanotomografi sistemlerine göre tek dezavantajı, metalik alaşımlarda numunenin sadece tek bir yüzeyi görülebildiğinden, mikroyapı hakkında 3B bilgi elde edilememesidir. Bu nedenle, numunenin sadece bir yüzeyine bakıp numunenin geneli konusunda sadece yorum yapılabilmektedir. MEL’de kullanılan sistem, tam da bu dezavantajı ortadan kaldırmak için tasarlanmış ve başarıyla üretilmiştir. Detayları *Materyal ve Yöntem* kısmında verilen bu sistemde, yukarıda sıralanan avantajlara ek olarak, katılma dinamikleri hem alttan hem de üstten incelenebildiğinden, metal numunelerde dahi gerçek zamanlı olarak mikroyapı hakkında 3B bilgiye ulaşılabilmektedir. “Çift taraflı mikroskopi sistemi” olarak adlandırdığımız bu sistem kullanılarak hem

metalik hem de organik alaşımların katılma dinamikleri gerçek zamanlı olarak incelenebilmektedir. Böylelikle, mikroyapı gelişiminin temelleri gerçek zamanlı olarak araştırılabilmekte ve bu sayede anlaşılabilir. Bu anlayışın gelişmesiyle, mikroyapının kontrol edilebilirliği artmakta ve böylelikle istenilen özelliklere sahip malzeme üretiminin önündeki en büyük engellerden biri olan mikroyapı heterojenliği sorununun ortadan kalkması için önemli adımlar atılmış olmaktadır.

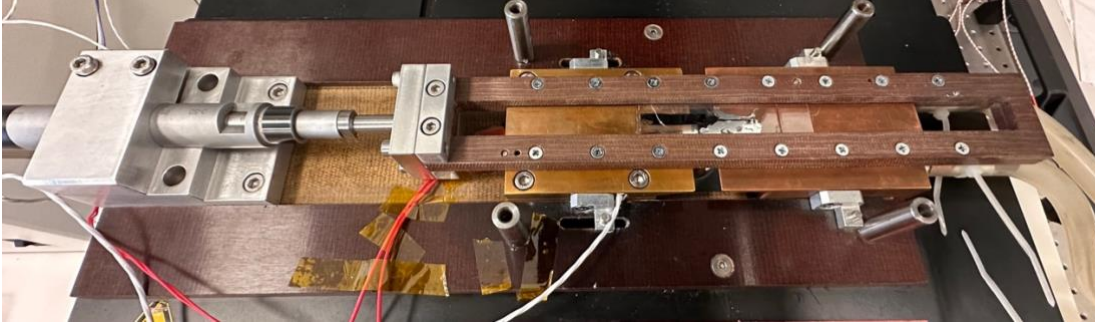
## II. MATERYAL VE YÖNTEM

Katılma dinamiklerini gerçek zamanlı incelemek için çift taraflı mikroskopi sistemi (Şekil 1) olarak adlandırdığımız optik mikroskop, Bridgman-tipi tek yönlü katılma (Şekil 2) ve dönen tek yönlü katılma (Şekil 3) ekipmanları kullanılmıştır. Çift taraflı mikroskopi sistemi ve katılma ekipmanlarının tümü özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Sistem, göreceli olarak karmaşık olduğundan, öncelikle tek yönlü katılma ekipmanı aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümün sonunda da dönen tek yönlü katılma ekipmanından farkları belirtilmiştir.

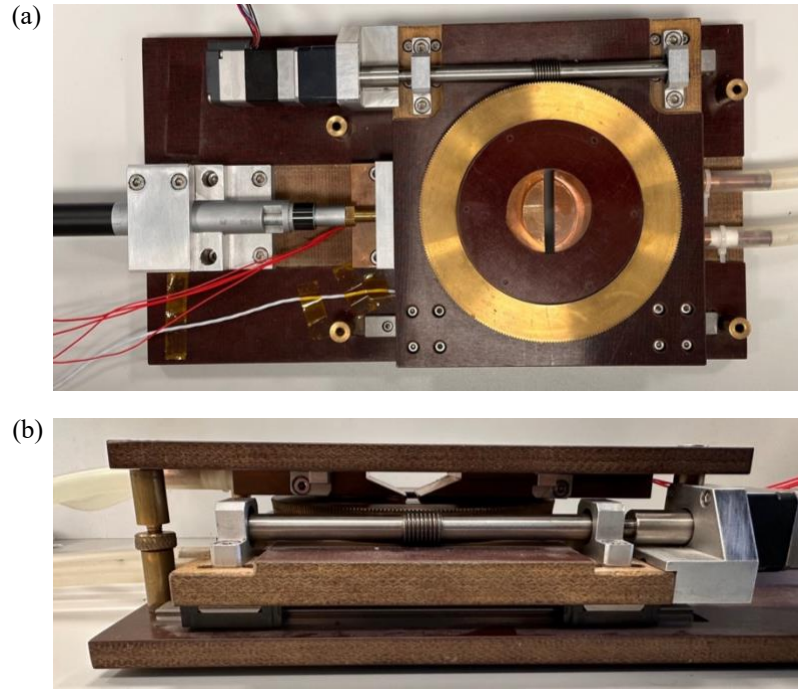


Şekil 1. Bridgman-tipi tek yönlü katılma ekipmanı içeren çift taraflı mikroskopi sistemi





Şekil 2. Bridgman-tipi tek yönlü katılma ekipmanı (sistemin görülebilmesi açısından üst bakır bloklar kaldırılmıştır)



Şekil 3. Bridgman-tipi dönen tek yönlü katılma ekipmanı (a) Üstten görünüş (sistemin görülebilmesi açısından üst bakır bloklar kaldırılmıştır), (b) Yandan görünüş

Tek yönlü katılma ekipmanı düşük erime noktalı alaşımların yönlü katılma deneyleri için kullanılır. Bu deney düzeneği, katı/sıvı arayüzeyinin numunenin her iki tarafından gözlemlenmesini sağlamak için çift taraflı mikroskopi sistemi üzerine monte edilir. Tüm sistem, altı ana parçadan oluşur:

1. Tek yönlü katılma ünitesi (bakır bloklar, ısıtıcılar, PT-100'ler ve su dolaşımı için tüpler)
2. Tek yönlü katılma motoru ve kontrol ünitesi
3. Dolaşım pompası
4. Sıcaklık kontrol ünitesi
5. Çift taraflı mikroskop
6. Diğer parçalar

Her bir sistemin detayı aşağıdaki kısımlarda açıklanmıştır.

### 2.1 Tek Yönlü Katılma Ünitesi

Tek yönlü katılma ünitesi, mikroyapı evrimini gerçek zamanlı analiz edebilmek için özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir. Tasarım aşamasında, Amerika ve Avrupa'da kullanılan birçok tek yönlü katılma ekipmanında belirlenen dezavantajların ortadan kaldırılmasına özen gösterilmiştir. Ünite, şu ana parçalardan oluşur:

1. Alt ve üst yalıtkan plakalar
2. Bakır bloklar

### 2.1.1 Alt ve üst yalıtkan plakalar

Bu plakaların temel olarak iki fonksiyonu vardı. Biri, bakır blokların sıcaklıklarını mikroskop tablasına iletmemek. Diğeri ise, sistem bileşenlerinin monte edilebileceği bir baz oluşturmak. Alt plaka, tüm sistem parçaları ile birlikte mikroskop tablası üzerine yerleştirilir. Mikroskop tablasının ısıdan etkilenmemesi için yalıtkan plakanın kalınlığı, uygulanacak sıcaklığa göre seçilmeli ve belli bir kalınlığın üzerinde tutulmalıdır. Alt plaka fenol fiberden yapılırken, üst plaka PEEK'ten üretilmiştir. Alt plakada, sistem parçalarını mikroskop tablasında sabitlemek ve ünitenin, mikroskop tablasıyla birlikte X ve Y yönlerine hareket etmesini sağlamak için altı vidalama yeri bulunur. Üst plaka, alt plakanın üzerine, alt plakaya sabitlenmiş dört silindir ile konumlandırılır. Kullanılan numune kalınlığına bağlı olarak, bakır bloklar arasındaki mesafeyi artırmak/azaltmak için, bu silindirlerin uzunlukları ayarlanabilmektedir.

Yalıtkan plakalarda, soğuk bakır bloklar sabit bir konuma sahiptir. Sıcak bakır bloklar ise, istenilen sıcaklık gradyanı değerine göre farklı mesafelere yerleştirilir. Üst ve alt sıcak bakır blokları tam olarak aynı mesafeye yerleştirebilmek ve aynı zamanda sıcak ve soğuk bakır bloklar arasındaki mesafeyi tam olarak belirleyebilmek için mesafe ayarlayıcılar kullanılır (Şekil 4). Sıcak ve soğuk bakır bloklar arasındaki mesafenin değişimi ile farklı adiabatik bölge uzunluklarına sahip olunabilmektedir. Adiabatik bölgenin uzunluğu, deneylerde istenen sıcaklık gradyanına bağlı olarak ayarlanabilir. Şu anda, bu mesafeyi ayarlamak için kullanılabilen dört mesafe ayarlayıcı bulunmaktadır. Mesafe ayarlayıcılar Şekil 4'te gösterildiği gibi 5, 10, 15 ve 20 mm genişliğine sahiptirler.



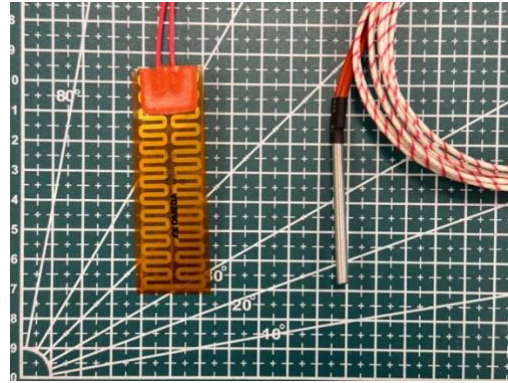
**Şekil 4.** Sıcak ve soğuk bakır bloklar arasında kalan adiabatik bölgenin uzunluğunu belirlemek için kullanılan mesafe ayarlayıcılar.

### 2.1.2 Bakır bloklar

Sıcak ve soğuk bakır bloklar olmak üzere iki set bakır blok bulunmaktadır. Her sette üst ve alt bloklar bulunur. Numune tutucu ve numune, üst ve alt bakır bloklar arasında sandviç edilir. Sıcak ve soğuk bakır blokların sıcaklıkları belirlenerek bu bloklar arasında sıcaklık gradyanı oluşturulur. Alt bloklar, alt yalıtkan plakaya

sabitlenmiştir; üst bloklar ise üst yalıtkan plakaya sabitlenir. Sıcak blokların konumu (yukarıda açıklandığı gibi) ayarlanabilir ve bu sayede sıcak ve soğuk bölgeler arasında farklı mesafeler oluşturularak farklı sıcaklık gradyanları elde edilebilir.

Sıcak bloklar, Şekil 5'de gösterilen ince dirençli ısıtıcılar (solda) veya fişek rezistanslar (sağda) ile ısıtılır. İnce dirençli ısıtıcılar daha ince bakır blokların üretilmesini sağlarken, fişek rezistanslar daha yüksek sıcaklıklara ve daha hızlı bir şekilde ısıtılmayı sağlar. Optimize edilmek istenilen özelliğe ve kullanılacak alaya göre ısıtıcı seçimi yapılmalıdır. Bakır blok sıcaklıkları, oda sıcaklığından 150 °C'ye kadar çıkabilmekte ve böylelikle erime sıcaklıkları 50 ila 80 °C arasında olan malzemelerin katılaşma dinamikleri incelenebilmektedir. Fişek rezistans ve farklı bir izolasyon malzemesi kullanılarak bakır blok sıcaklıklarının 250 °C'ye çıkarılması ve böylelikle, erime sıcaklıkları 150 °C'ye kadar olan alaşımların da gerçek zamanlı incelenmesi planlanmaktadır. Sıcak blokların sıcaklıkları, 0.1 °C'lik farkları ölçebilmek amacıyla yüksek hassasiyete sahip PT100'ler tarafından ölçülür ve sıcaklık kontrol ünitesi tarafından kontrol edilir. Bu nedenle, ısıtıcıların ve PT100'lerin konumlarına, kurulum, montaj ve demontaj sırasında ekstra özen gösterilmelidir. PT100'ler, sıcak bakır bloklar içerisine ısı iletken macun ile birlikte yerleştirilir ve yalıtkan plakalara yüksek sıcaklığa dayanıklı Kevlar bantlar kullanılarak sabitlenir.



**Şekil 5.** Sıcak bakır blokları ısıtmak için kullanılan ısıtıcılar. Solda: ince dirençli ısıtıcı, sağda: fişek rezistans.

Soğuk blokların içine, su döngüsü için "U" şeklinde boşluklar açılmıştır ve bakır bloğun sağ tarafına bu boşluklara açılan bakır borular vidalanmıştır. Bu borular, silikon tüpler ile su dolaşım pompasına bağlanır. Her soğuk bloğun bir su girişi ve bir su çıkışı vardır. Soğuk blokların boruları, su sızıntısını önlemek için Teflon bant ile sarılmalı, ardından silikon tüp, kelepçelerle sıkıca sabitlenmelidir.

## 2.2 Tek Yönlü Katılaştırma Motoru

Yüksek çözünürlüklü bir motor, numune tutucu ve numuneyi tek yönlü olarak hareket ettirmek için kullanılmaktadır. Motorun ucu, lineer bir şekilde 0.0035 – 750  $\mu\text{m/s}$  aralığındaki hızlarda hareket edebilmektedir ve seyahat aralığı 50 mm'dir. Bu sayede, hem termodinamik olarak lokal denge koşullarında hem de hızlı katılma koşullarında deneyler yapılabilmektedir. Tek yönlü katılaştırma motoru, bir adaptör kullanılarak alt plakaya sabitlenir. Daha sonra motor, numune tutucuya vidalar ve özel üretilmiş adaptörler kullanılarak bağlanır.

## 2.3 Dolaşım Pompası

Dolaşım pompası, soğuk blokların sıcaklığını istenilen bir sıcaklıkta sabit tutmak için kullanılır. Dolaşım pompası kullanılarak, soğuk blokların "U" şeklindeki boşluklarında sabit bir sıcaklıkta bulunan sıvı dolaştırılır. Şu ana kadar yapılan deneylerde dolaşım pompası içerisinde su kullanılmıştır. Silikon yağı, alkoller vb. sıvılar kullanılarak -90 ila 200  $^{\circ}\text{C}$  aralığındaki sıcaklıklara ulaşmak da mümkündür. Dolaşım pompasında da sıcaklık 0.1  $^{\circ}\text{C}$ 'lik hassasiyette ayarlanabilmektedir.

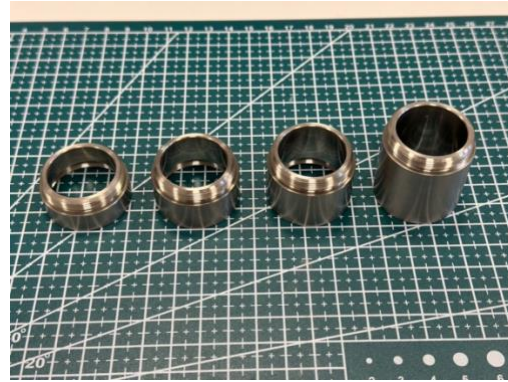
## 2.4 Sıcaklık Kontrol Ünitesi

Sıcaklık kontrol ünitesi, sıcak blokların sıcaklığını kontrol etmek için kullanılır. Üst ve alt blok sıcaklıkları ayrı ayrı olarak Proportional–Integral–Derivative (PID) olarak bilinen kontrol cihazlarıyla kontrol edilir. Bu sayede, üst ve alt bakır blokların sıcaklıkları da farklı belirlenerek tek yönlü katılma eksenini olan Z eksenindeki sıcaklık gradyanına ek olarak numunenin kalınlığına tekabül eden Y eksenini boyunca da sıcaklık gradyanı oluşturmak mümkündür. PID sıcaklık kontrol ünitesine girdi sağlamak için PT100'ler kullanılırken, PT100'den elde edilen girdi ile erişilmek istenen sıcaklık arasındaki farka göre, kontrol ünitesi ısıtıcılara güç yollamaktadır. PID parametreleri kontrol edilerek istenilen sıcaklığa ne kadar sürede ve nasıl ulaşılacağı kontrol edilebilmektedir.

## 2.5 Çift Taraflı Mikroskop

Çift taraflı mikroskop, metal alaşımlarında katılma dinamiklerini gerçek zamanlı gözlemlemek için özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş bir mikroskopi sistemidir. Bir dik (upright) ve bir çevrik (inverted) mikroskoptan ve mikrometre çözünürlüğünde hareket edebilen bir tabladan oluşur. Bu yenilikçi kurulum ve tek yönlü katılma ekipmanları sayesinde, metal numuneler, her iki taraftan da gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmektedir. Yüksek çözünürlüklü tabla, tek seferde 1  $\mu\text{m}$  kadar küçük mesafeler dahi gidilebilmektedir. Bu sayede, panoramik veya mozaik olarak bilinen, birçok ufak görüntüyü birleştirilerek elde edilen büyük görüntüler oluşturularak numunenin

tümünün mikroyapısı gözlemlenebilmektedir. Panoramik görüntüler, katı/sıvı arayüzeyini ve numune katılma geçmişini gözlemlemek için bir zorunluluktur. Dik ve çevrik mikroskopların her ikisi de 7 lense sahiptir ve lens büyütmeleri 2.5 ila 100 kat arasında değişmektedir. Her bir deneyde, gözlemlenecek bölge ve o bölgedeki ilgi alanına bağlı olarak uygun lens ve büyütme oranı seçilir. Numune, doğrudan mikroskop tablasının üzerinde olmadığı için, bir başka deyişle bakır bloklar arasına yerleştirildiği için, numuneye odaklanabilmek için farklı yüksekliklere sahip halka adaptörler üretilmiştir. Şekil 6'da gösterilen bu adaptörlerin uzunlukları sırasıyla 10, 15, 20 ve 30 mm'dir. Mikrometre/saniye mertebelerindeki hızlarda büyütülen tipik bir ötektik mikroyapının incelenmesi için 10x lens ve 25 (10+15) mm halka adaptörler kullanılmaktadır. Lenslerin çalışma uzaklığı oldukça yüksek olmasına rağmen, örneğin 10x lens için 11 mm, yalıtkan plaka ve bakır bloğun kalınlığından dolayı halka adaptör kullanımı bir zorunluluktur.



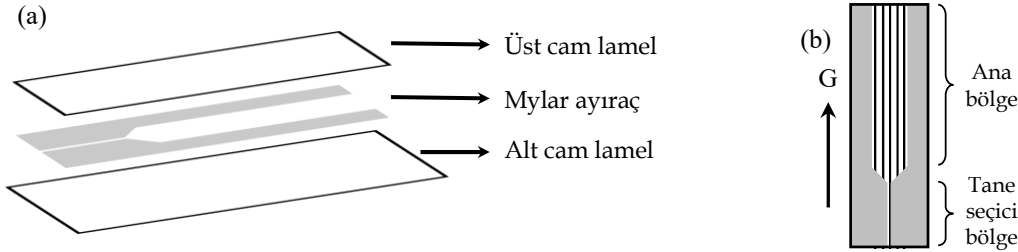
Şekil 6. Lenslerin pozisyonunu artırmak için kullanılan halkalar. 10, 15, 20 ve 30 mm yüksekliklerde 2 set halka bulunmaktadır.

## 2.6 Diğer Parçalar

### 2.6.1 Numune ve numune tutucu

Numune, yaklaşık olarak 300  $\mu\text{m}$  kalınlığında olan iki adet düz dikdörtgen cam lamel ve bu lamelleri ayırmak için Mylar ayıraç kullanılarak üretilmektedir (Şekil 7 (a)). Mylar ayıraç ve lameller arasında kalan boşluğa alıştırma malzemesi doldurulur. İstenen alıştırma kalınlığına bağlı olarak Mylar ayıracının kalınlığı seçilir. Laboratuvarında kullanılan Mylar ayıraç kalınlık değerleri 6, 13, 23, 50, 100, 250, 500  $\mu\text{m}$ 'dir. Farklı kalınlıklarda numunelerin incelenmesi hem iki boyutlu hem de üç boyutlu mikroyapı evriminin gözlemlenmesini ve karakterize edilmesini sağlamaktadır. Mikroyapılardan istatistiksel ölçümler alabilmek için geniş taneler oluşturmak gerekmektedir. Bu nedenle, genellikle, ayıraçta tane seçici olarak kullanılmak üzere ince bir kanal kesilir. İnce kanalda, kanalın darlığından dolayı, sadece birkaç tane

bulunabilir ve katılma bu ince kanaldan başlatılır (Şekil 7 (b)). Tanelerin büyüme dinamikleri, kristal yönelimlerine göre değişiklik gösterdiğinden, tane seçici bölgesinde bulunan ve kristal yönelimi sıcaklık gradyanıyla en çok uyuşan tane veya taneler, diğer taneleri elerler. Bu sayede, katılan tane sayısı önemli ölçüde azaltılır. Katı/sıvı arayüzeyi, tane seçici bölgenin sonuna geldiğinde, genellikle sadece bir veya birkaç tane kalmıştır. Burada taneler, Şekil 7 (b)'de gösterilen ana bölgenin tamamını kaplayacak şekilde enine doğru yayılırlar. Böylelikle, ana bölge olarak isimlendirilen bölgede istatistikî ölçümler yapmaya elverişli geniş taneler elde edilir. Cam lameller,



**Şekil 7.** Numunenin şematik gösterimi (a) Numuneyi oluşturan parçalar, (b) Tane seçici ve ana bölge (ok büyüme yönünü göstermektedir), G: sıcaklık gradyanı.

### 2.6.2 Kapak

Mikroskop tablası ve lensler çok yüksek ısıya dayanıklı olmadığından, katılaştırılan malzemeler düşük erime noktasına sahip alaşımlardan seçilir. Erime sıcaklıkları düşük olduğundan, oda sıcaklığında olan ufak bir hareket bile termal dalgalanmalara sebebiyet vermektedir. Termal dalgalanmalar mikroyapıyı önemli ölçüde etkilediğinden, bu dalgalanmaları mümkün olduğunda minimize etmek gerekmektedir. Bu amaçla pleksiglastan yapılmış bir kapak bakır blokları ve yalıtkan plakayı kapsayacak şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu kapak kullanımı sayesinde, ünitenin üstünde oluşabilecek termal dalgalanmalar önemli ölçüde azaltılmaktadır. Alt kısımda ise, lenslerin etrafı cam yünü gibi yalıtkan malzemelerle çevrilerek termal dalgalanmalar minimize edilir.

### 2.6.3 Optik masa

Çift taraflı mikroskopi ve katılma sistemlerinin düz bir zeminde olması gerektiği için ve yeryüzünde meydana gelen titreşimlerden etkilenmemesi için, mikroskoplar ve katılma ekipmanları optik masa üzerine yerleştirilmiştir. Optik masa, basınçlı hava girişi sayesinde, kalibre edildikten sonra, düzlemselliği bozulduğunda hızlıca eski halini alabilmektedir. Bu sayede, sistemin düzlemselliğinden emin olunmaktadır.

Dönen tek yönlü katılma ekipmanının, tek yönlü katılma ekipmanından en önemli farkı, numune, Z eksenindeki tek yönlü hareketin yanı sıra XY

aralarına ayırıcı yerleştirildikten sonra, yapıştırıcı kullanılarak birbirine yapıştırılır. Numune camları hazırlandıktan sonra, istenen alaşım ile doldurulur ve numune tutucuya sabitlenir. Numuneyi içinde barındıran tutucu, alt sıcak ve soğuk bakır blokların üzerine yerleştirilir (Şekil 2). Daha sonra üst sıcak ve soğuk bloklar numunenin üzerine konularak numune üst ve alt bakır bloklar arasında sandviç edilir. Tutucunun işlevi, numuneyi sağlam bir şekilde tutmak ve numunenin sadece sıcaklık gradyanı ekseninde (Z yönünde) hareket etmesini sağlamaktır. Numune tutucu, motora birkaç adaptör ile sabitlenir.

düzleminde döndürülebilmektedir. Bu dönme hareketi için ek bir motor bulunmaktadır. Ayrıca, genellikle numuneler dikdörtgen şeklinde değil, daireseldir. Şekil 3'de gösterilen dişli sisteminden dolayı bakır blokların tasarımı da oldukça farklıdır fakat işlevleri tamamen aynıdır. Dönen tek yönlü katılma ekipmanı ile yapılan deneylerde amaç, sabit sıcaklık gradyanı içerisinde numune döndürülerek kristal/kristal arayüzey yönünü sürekli bir şekilde değiştirmektir. Bu sayede, mikroyapının farklı açılarda nasıl büyüdüğü incelenmekte, kristal/kristal arayüzey enerjisinin fonksiyonu [22] ve kristaller arasındaki denge şekli belirlenebilmektedir [17, 30].

## III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Her bir parçası özel olarak tasarlanmış çift taraflı mikroskopi sistemi başarıyla çalışmıştır. Bunun en önemli göstergesi, numunenin aynı bölgesini mikron çözünürlükle görebilmektir. Dik (upright) mikroskop olan üst ve çevrik (inverted) mikroskop olan alt mikroskopların numunedeki aynı bölgeyi görüntülediği Şekil 8'de gösterilmektedir. Her iki mikroskop ve 10x lens kullanılarak elde edilen 100  $\mu\text{m}$ 'lik grid görüntüleri Şekil 9'da sunulmuştur. Görsellerde aynı yerin gözlemlendiğini gösterebilmek için özellikle gridin köşesine odaklanılmıştır. Bu görüntülerden görüldüğü üzere mikrometre mertebesinde aynı yer üst ve alt mikroskoplar ile görüntülenebilmektedir. Mikroskoplar farklı olduğundan, kullanılan kamera sistemi, c-mount ve lens büyütme birimleri birebir aynı olsa

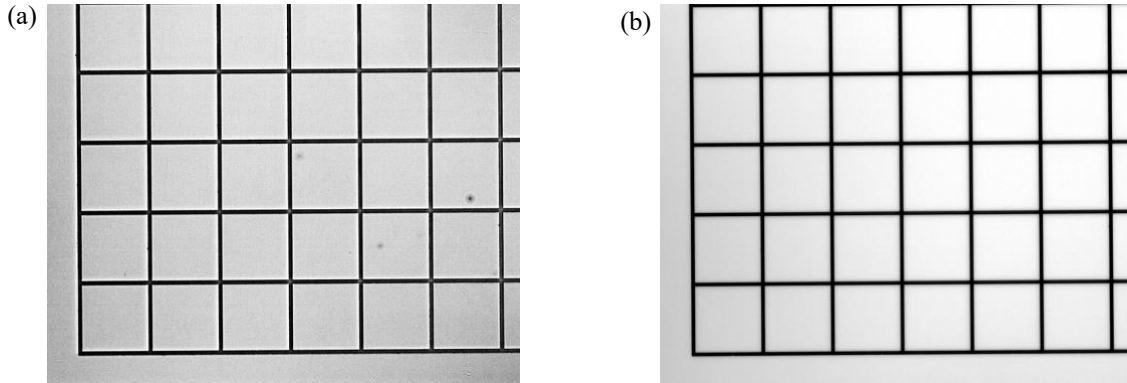


da görüntülerde ufak da olsa farklı piksel/mikrometre oranları elde edilmektedir. Daha spesifik olunmak gerekirse 10x büyütmede piksel/ $\mu\text{m}$  oranı üst mikroskopta 1.908 iken bu değer alt mikroskopta

1.894'tür. Bir başka deyişle, üst ve alt mikroskoptan elde edilen görüntülerin alanları arasında % 0.1'den az olan çok ufak bir fark bulunmaktadır.



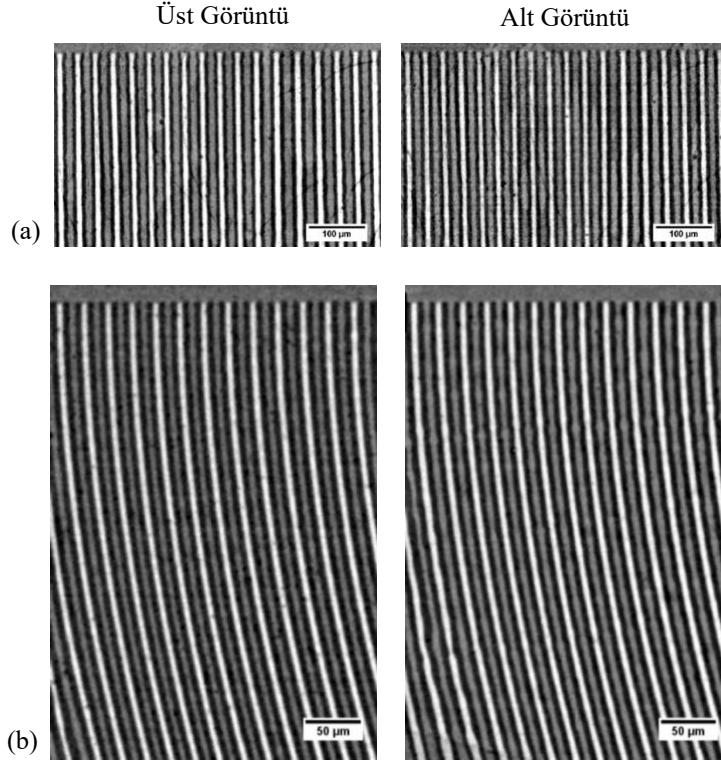
**Şekil 8.** Dik (üst) ve çevrik (alt) mikroskoplardan numunedeki aynı bölgeyi görüntülediği gösteren fotoğraf.



**Şekil 9.** Sırasıyla (a) üst ve (b) alt mikroskoptan 10x lens ile alınan 100  $\mu\text{m}$ 'lik grid görüntüsü.

Lenslerin yukarıda gösterildiği üzere tamamen aynı yeri gösterdiğinden emin olunduktan sonra deneyler başlatılır. Tek yönlü katılma ve dönen tek yönlü katılma ekipmanları kullanılarak numunenin aynı bölgesinde bulunan mikroyapının üst ve alt mikroskoptan elde edilen görüntüleri Şekil 10'da gösterilmektedir. Kristal/kristal arayüzey enerjileri izotropik olan tanelerde, tek yönlü katılma ekipmanı kullanılarak elde edilen mikroyapı görüntülerinde katı fazlar arasındaki sınır sıcaklık gradyanına paralelken,

dönen tek yönlü katılma ekipmanında elde edilen sınırlar, numunenin dönme hareketinden dolayı daireseldir. Şekil 10'da sunulan görüntülerde mikroyapı tamamen iki boyutlu olduğundan, üst ve alt mikroskoptan elde edilen mikroyapılar neredeyse tamamen aynıdır. Fakat üç boyutlu oluşumlar olduğunda, üst ve alt mikroyapı farklılıklar gösterir. Çift taraflı mikroskopi sistemi sayesinde, bu farklılıklar ve mikroyapı gelişim dinamikleri, üç boyutlu ve metalik numunelerde bile gözlemlenebilmektedir.



**Şekil 10.** Çift taraflı mikroskopi sistemi ile elde edilen numunenin üst ve alt mikroyapıları (a) Tek yönlü ve (b) dönen tek yönlü katılaşma ekipmanlarıyla elde edilen görüntüler.

Sıcaklık – mesafe ölçümleri, katılaşma dinamiğini anlamayı amaçlayan çalışmalar için çok kritiktir. Çünkü, sabit bir alaşım kompozisyonunda, mikroyapıyı belirleyen en önemli etmen soğuma hızıdır ( $\dot{C}$ ). Soğuma hızı ise, temel olarak iki etmenden oluşur: sıcaklık gradyanı ( $G$ ) ve katılaşma/büyüme hızı ( $V$ ). Aralarındaki bağlantı, birimleriyle beraber, Eşitlik (1)'de verilmiştir:

$$\dot{C} \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}} \right) = G \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\mu\text{m}} \right) \times V \left( \frac{\mu\text{m}}{\text{s}} \right) \quad (1)$$

Soğuma hızını belirleyen bu iki ayrı faktörün, mikroyapı üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, iki etmenin ayrı ayrı kontrol edilebildiği Bridgman-tipi tek yönlü katılaşma ekipmanları mikroyapı gelişimini incelemek için kullanılabilir en iyi sistemlerdir. Sıcaklık gradyanı değeri, tek yönlü katılaşma ekipmanında bir termokuplun herhangi bir ortamda aldığı sıcaklık ölçüm değeri değildir. Bu ölçümü doğru yapabilmek için, deney yapılacak malzemede ve hatta kompozisyonda olan alaşımın içerisine daldırılmış termokuplardan ölçüm alınması gerekir. Çünkü ancak bu değer malzemenin hissettiği değerdir ve malzemenin hissettiği değer mikroyapıyı belirleyen etmendir. Bir başka deyişle, organik alaşım ile deney yapılacaksa, termokupl organik malzemeye,

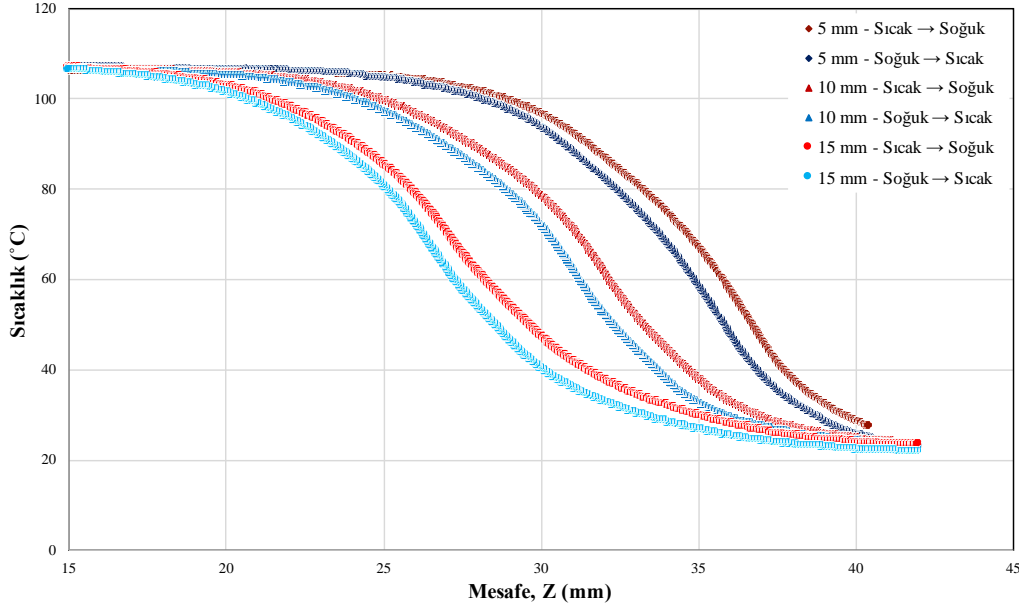
metalik alaşım ile yapılacaksa, metalik malzemeye daldırılarak sıcaklık ölçümleri yapılmalıdır.

Sıcak ve soğuk bakır bloklar arasındaki mesafe değiştirilerek farklı sıcaklık gradyanları elde edilebilmektedir. Benzer şekilde, sıcak ve soğuk blokların sıcaklıkları değiştirilerek de gradyan değiştirilebilir. Bakır bloklar arasındaki mesafe sırasıyla 5, 10 ve 15 mm yapılarak hem sıcak bloktan soğuk bloğa hem de soğuk bloktan sıcak bloğa giderken alınan sıcaklık – mesafe ölçümleri Şekil 11'de gösterilmektedir. Sıcaklık ölçümleri, yine özel olarak tasarlanmış ve ürettirilmiş sıcaklık okuyucu ile elde edilmektedir. Bu sıcaklık okuyucusu bilgisayara bağlıdır ve sıcaklık okuma sıklığı kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Elde edilen sıcaklık değerleri ve ölçümün yapıldığı zaman, bilgisayara otomatik olarak aktarılmaktadır. Şekil 11'de gösterilen grafiklerde okuma sıklığı 1 saniye olarak belirlenmiştir. Burada belirtmek gerekir ki bu grafiklerde çizgi grafik kullanılmamış, sadece veri noktaları kullanılmıştır. Buna rağmen, grafiğin sürekli olmasının sebebi alınan verilerin sıklığıdır. Sıcaklık – mesafe ölçümlerinden görüldüğü üzere, bakır bloklar arasındaki mesafe sabitken, adiabatik bölge ve etrafında, belli bir  $Z$  değerinde ( $Z$  katılaşma eksenidir), sıcaktan soğuğa giderken elde edilen sıcaklık değeri, soğuktan sığağa giderken elde edilen değerden farklıdır. Bir başka



deyişle, sıcaklık – mesafe değerlerinde bir histerezis görülmektedir (Bakır bloklar arasındaki mesafe sabitken mavi ve kırmızı ölçümler arasındaki fark). Bu histerezisin genişliği, numunenin hareket hızına bağlıdır. Çalışmalarımızda kullandığımız hız değerleri genellikle 10  $\mu\text{m/s}$  değerinden az olduğundan, sıcaklık ölçümleri için numune hareket hızı 10  $\mu\text{m/s}$  olarak

seçilmiştir. 10  $\mu\text{m/s}$ 'de elde edilen sıcaklık – mesafe grafiğinden de görüldüğü üzere, elde edilen histerezis oldukça ufaktır ve yok sayılabilir. Bakır bloklar arasındaki mesafe değişmesine rağmen benzer sıcaklıklarda benzer histerezis olması da bir diğer önemli gözlemdir.



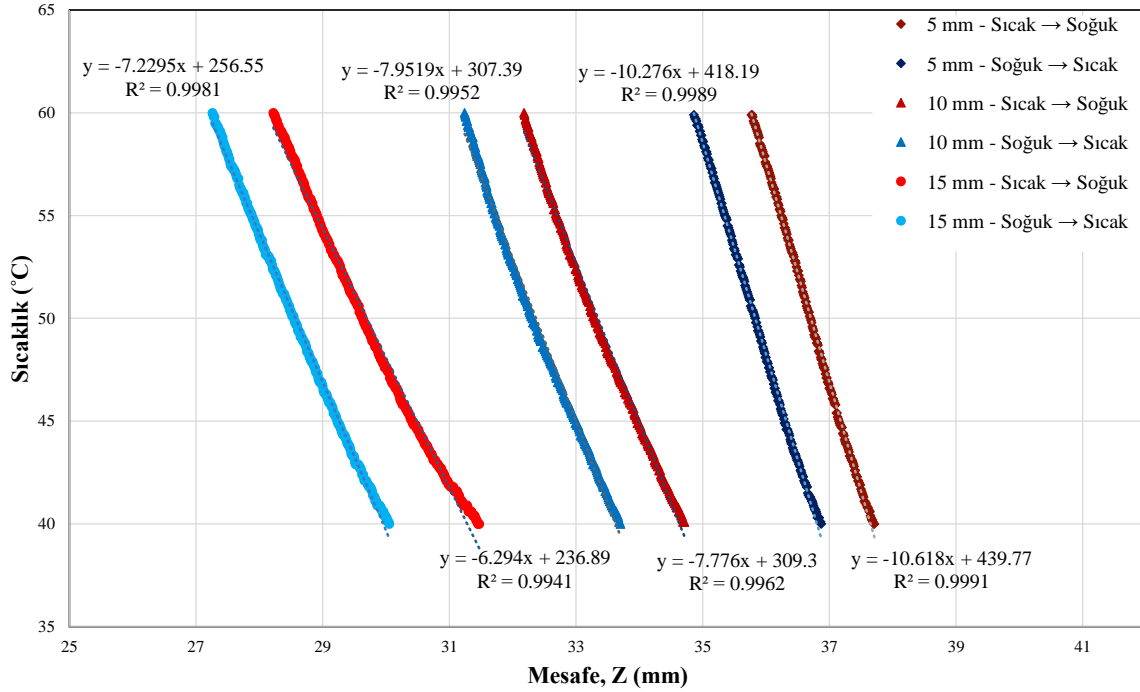
**Şekil 11.** Tek yönlü katılma ekipmanından adiabatik bölge genişliği 5, 10, 15 mm olduğunda alınan sıcaklık - mesafe ölçümleri. Sıcak ve soğuk kısma giderken alınan ölçümlerde histerezis görülmektedir.

Gradyan ölçümlerinin, katı/sıvı arayüzeyinin bulunduğu sıcaklıkta yapılması gerekir. Bu çalışmanın amacı mikroskopi sisteminin ve katılma ekipmanlarının yetilerini anlatmak olduğundan, herhangi bir alaşım seçilmemiş ve gradyan ölçümleri örnek olarak 50 °C için yapılmıştır. Herhangi bir sıcaklıktaki gradyanı belirlemek için farklı sıcaklık aralıklarındaki ölçümlere doğrusal fitler yapılmalı ve en yüksek determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) elde edilen sıcaklık gradyan değeri en iyi değer olarak kabul edilmelidir. Örneğin, 50 °C'deki gradyan ölçümü için, 40 – 60 °C, 45 – 55 °C, 48 – 53 °C gibi, ortası 50 °C'ye tekabül eden aralıklarda bulunan verilere doğrusal fitler yapılabilir. Fakat aralık çok dar olursa, örneğin 49.5 – 50.5 °C gibi, istatistiki olarak çok fazla veri elde edilemediğinden fit yanlış bilgiler verebilir. Optimum aralık verilerek sıcaklık gradyanı belirlenmelidir. 40 – 60 °C aralığında sıcaklığın mesafeye göre nasıl değiştiği gösteren ölçümler ve bu ölçüm değerlerine doğrusal fit uygulanarak elde edilmiş fonksiyonlar ve  $R^2$  değerleri Şekil 12'de gösterilmektedir. Veri noktalarının üst kısmında verilen fonksiyonlar, soğuktan sıcağa giderken elde edilen verilere uygulanan fitin fonksiyonu iken, alt kısmında verilen

fonksiyonlar, sıcağın soğuğa giderken elde edilen verilere uygulanan fitin fonksiyonudur. Bu fonksiyonlarda eğim, yani x değerinin başındaki katsayının mutlak değeri, sıcaklık gradyanıdır. Sıcaktan soğuğa giderken sırasıyla 5, 10 ve 15 mm aralıklar için elde edilen gradyan değerleri 10.618, 7.776 ve 6.294'dür. Bir başka deyişle, bakır bloklar arasındaki mesafe arttıkça, beklendiği üzere sabit bir sıcaklıkta elde edilen sıcaklık gradyanı düşmektedir.  $R^2$  değerlerine bakıldığında, bakır bloklar arasındaki mesafe arttıkça,  $R^2$  değerinin düştüğü görülmektedir. Doğrusal fitin çok iyi uymadığı grafikten de anlaşılmaktadır. Böyle bir durumda, daha dar bir sıcaklık aralığında daha yüksek bir  $R^2$  değeri elde edilmelidir.

Soğuktan sıcağa giderken de benzer bir tablo vardır, sırasıyla 5, 10 ve 15 mm aralıklar için elde edilen gradyan değerleri 10.276, 7.9519 ve 7.2295'dir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, sıcağın soğuğa ve soğuktan sıcağa doğru gidişte elde edilen gradyanların farklı olmasıdır. Bir başka deyişle, belli bir sıcaklıkta, katılma ve erime sırasında elde edilen gradyanlar farklı olabilmektedir. Bu husus, özellikle erime

çalışmalarının ivme kazandığı şu günlerde kayda değer ve dikkat edilmesi gereken bir bulgudur.



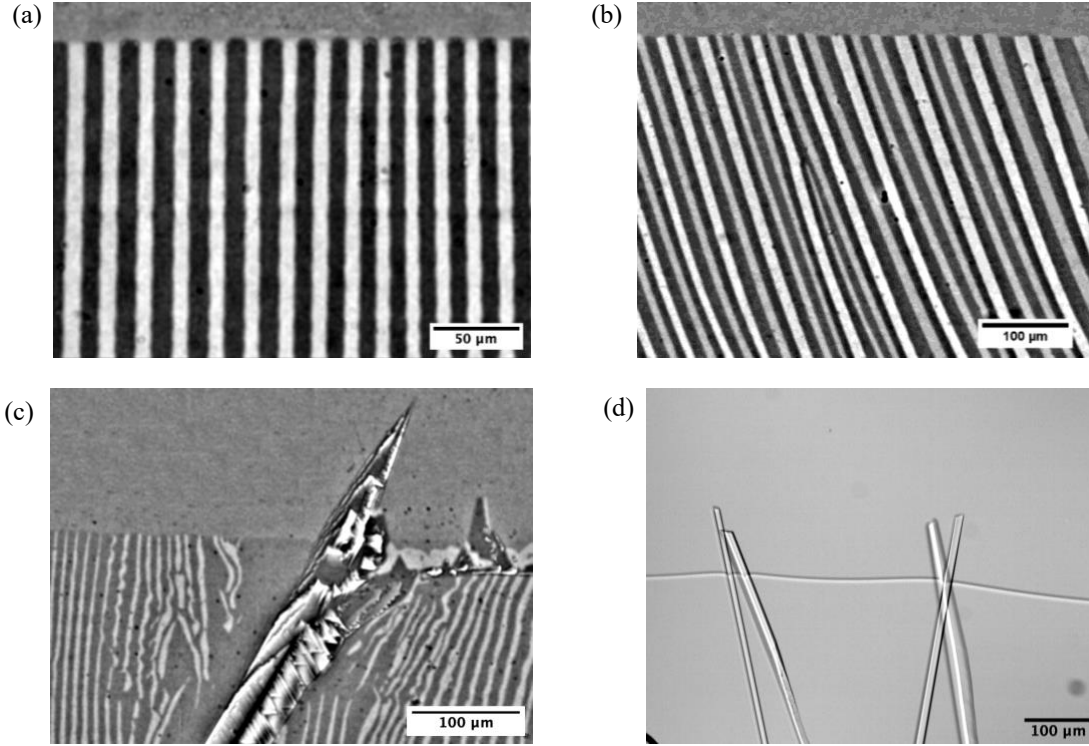
**Şekil 12.** Tek yönlü katılma ekipmanından adiabatik bölge genişliği 5, 10, 15 mm olduğunda 50 °C için alınan sıcaklık gradyanı ölçümleri.

Tek yönlü katılma sistemleri kullanılarak farklı ötektik alaşım sistemleri katılaştırılmıştır. Kullanılan sistemler ve parametreler Tablo 1’de sunulmuştur. Farklı alaşım sistemlerinden elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 13’de gösterilmektedir. Burada, metal

numunelerde mikroskoplardan gelen ışığın numuneden yansımaları sonucu elde edilen görüntü kullanılırken, organik numunelerde, numune içerisinden geçerek diğer mikroskopun lensine gelen görüntü kullanılmaktadır.

**Tablo 1.** Farklı alaşım sistemlerinde kullanılan kompozisyon, bu kompozisyonun ötektik sıcaklığı ( $T_{\text{ötektik}}$ ), tek yönlü katılma deneylerinde kullanılan sıcak ve soğuk bakır blokların sıcaklık değerleri ( $T_{\text{sıcak}}$  ve  $T_{\text{soğuk}}$ ) ve bakır bloklar arasındaki mesafe değeri.

Alaşım	Kompozisyon (at%)	$T_{\text{ötektik}}$	$T_{\text{sıcak}}$	$T_{\text{soğuk}}$	Mesafe (mm)
In – Bi – Sn E1	35.94% In, 39.34% Bi, 24.72% Sn	76.4 °C	142 °C	25 °C	5 mm
			133 °C	25 °C	10 mm
In – Bi – Sn E2	60.2% In, 20.7% Bi, 19.1% Sn	59 °C	95 °C	28 °C	5 mm
					10 mm
In – Bi	77.78% In, 22.22% Bi	72.7 °C	110 °C	25 °C	10 mm
AMPD – SCN	97.4% SCN, 2.6% AMPD	52.5 °C	90 °C	20 °C	5 mm



**Şekil 13.** Farklı alaşım sistemlerinde elde edilen görüntüler. Metalik (a) In – Bi, (b) In – Bi – Sn E2, (c) In – Bi – Sn E1 ve (d) Organik AMPD – SCN sistemi.

Temel olarak yatay ve dikey olmak üzere iki tip tek yönlü katılaşma ekipmanı kullanılmaktadır. Dikey cihazlarda, alaşımı oluşturan elementlerden ağır olanlar, yer çekiminden dolayı, sıvının alt kısımlarında birikmektedir. Sıvı içerisinde oluşan bu kompozisyonel gradyan, katılaşma ile oluşan mikroyapıda da farklılıklara sebep olur. Bir başka deyişle, örneğin, ötektik kompozisyona sahip bir alaşım katılaştırmak isterken, büyüme boyunca önce hipoötektik, sonra ötektik ve numunenin en sonunda da hiperötektik alaşım katılaştırılmış olur. Yatay sistemlerde de yer çekimi etkisi olabilir. Fakat kullanılan numune kalınlıkları mikrometre mertebesindeyken numunenin büyüme eksenindeki boyutu santimetre mertebesinde olduğundan, yatay sistemlerde çökeltme etkisi yok denecek kadar azdır. Katılaşma sisteminin yatay olmasının en önemli avantajlarından biri budur. Sıvıdaki kompozisyonu ve böylelikle mikroyapıyı değiştiren bir diğer etmen de sıvıdaki ısı farklılıklarından dolayı oluşan termosolütal konveksiyondur. Burada kullanılan numune kalınlıkları genellikle oldukça ince ( $< 50 \mu\text{m}$ ) olduğundan, Rayleigh-Bénard konveksiyonunun olup olmayacağını belirleyen Rayleigh sayısı hesabında kullanılan yükseklik değeri oldukça küçüktür. Bu nedenle ince numunelerde konveksiyon görülmemektedir. Sonuç olarak, yatak ekipman ve ince numune kullanılarak,

sıvıda oluşabilecek kompozisyonel değişimler minimuma indirilmiştir.

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, katılaşma dinamikleri ve mikroyapı evrimini gerçek zamanlı olarak incelemek için özel bir mikroskop ve katılaşma düzenekleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Mikroskopi sistemi ve yönlü katılaşma düzenekleri hakkında kapsamlı bir genel bakış sunulmaktadır. Ayrıca, bu teknikte elde edilen örnek sonuçlar, sıcaklık gradyanı ölçümleri, tipik parametreler ve mikroyapılar dahil olmak üzere raporlanmıştır. Çalışma, bu özel olarak üretilmiş ekipmanın kullanımının, katılaşma dinamikleri ve mikroyapı evriminin, üç boyutlu metal sistemlerde bile, derinlemesine anlaşılması için bir yol açtığı göstermiştir. Bu sayede, döküm, katmanlı üretim ve kaynak gibi yöntemlerle üretilen malzemelerin tüm özelliklerini belirleyen mikroyapı evrimi konusunda önemli adımlar atılmaktadır. Bu ekipman kullanılarak büyük oranda ötektik büyüme dinamikleri araştırılmıştır. Önümüzdeki dönemlerde, aynı temel prensiplere sahip ekipmanlar tasarlanıp üretilerek peritektik büyüme ve erime üzerine çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

## TEŞEKKÜR

Mikroyapı görüntülerini alan Samira Mohagheghi ve Didem Kaplan'a teşekkür ederim. Samira Mohagheghi, dönen tek yönlü katılaşma ekipmanının kurulmasına da önemli katkılar yapmıştır. Kendisine teşekkürü bir borç bilirim. Sıcaklık gradyan ölçümleri için Didem Kaplan'a teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

- [1] Akamatsu, S., Bottin-Rousseau, S., Serefoglu, M., & Faivre, G. (2012). A theory of thin lamellar eutectic growth with anisotropic interphase boundaries. *Acta Materialia*, 60(6-7), 3199-3205.
- [2] Akamatsu, S., Bottin-Rousseau, S., Şerefoğlu, M., & Faivre, G. (2012). Lamellar eutectic growth with anisotropic interphase boundaries: Experimental study using the rotating directional solidification method. *Acta Materialia*, 60(6-7), 3206-3214.
- [3] Akamatsu, S., Moulinet, S., & Faivre, G. (2001). The formation of lamellar-eutectic grains in thin samples. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 32A, 2039-2048.
- [4] Akamatsu, S., & Nguyen-Thi, H. (2016). In situ observation of solidification patterns in diffusive conditions. *Acta Materialia*, 108, 325-346.
- [5] Bottin-Rousseau, S., Şerefoğlu, M., Yüçetürk, S., Faivre, G., & Akamatsu, S. (2016). Stability of three-phase ternary-eutectic growth patterns in thin sample. *Acta Materialia*, 109, 259-266.
- [6] Caroli, B., Caroli, C., Faivre, G., & Mergy, J. (1992). Lamellar eutectic Growth of  $CBr_4-C_2Cl_6$ : effect of crystal anisotropy on lamellar orientations and wavelength dispersion. *Journal of Crystal Growth*, 118, 135-150.
- [7] Ginibre, M., Akamatsu, S., & Faivre, G. (1997). Experimental Determination of the Stability Diagram of a Lamellar Eutectic Growth Front. *The American Physical Society- Physical Review E*, 56(1), 780.
- [8] Glicksman, M. E. (1984). Free Dendritic Growth. *Materials Science and Engineering*, 65(1), 45-55.
- [9] Hunt, J. D., & Hurle, D. T. J. (1968). The Structures of Faceted/Nonfaceted Eutectics. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 242, 1043.
- [10] Jackson, K. A., & Hunt, J. D. (1965). Transparent Compounds That Freeze Like Metals. *Acta Metallurgica*, 13, 1212.
- [11] Jackson, K. A., & Hunt, J. D. (1966). Lamellar and Rod Eutectic Growth. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 236(8), 1129.
- [12] Lindemann, G. R., Chao, P., Nikitin, V., De Andrade, V., De Graef, M., & Shahani, A. J. (2024). Complexity and evolution of a three-phase eutectic during coarsening uncovered by 4D nano-imaging. *Acta Materialia*, 266, 119684.
- [13] Mathiesen, R. H., Arnberg, L., Ramsøskar, K., Weitkamp, T., Rau, C., & Snigirev, A. (2002). Time-resolved x-ray imaging of aluminum alloy solidification processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 33(4), 613-623. doi:10.1007/s11663-002-0041-2
- [14] Mohagheghi, S., Bottin-Rousseau, S., Akamatsu, S., & Serefoglu, M. (2020). Decoupled versus coupled growth dynamics of an irregular eutectic alloy. *Scripta Materialia*, 189, 11-15.
- [15] Mohagheghi, S., Bottin-Rousseau, S., & Şerefoğlu, M. (2023). In-situ investigation of the solidification dynamics in an irregular eutectic alloy. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- [16] Mohagheghi, S., & Serefoglu, M. (2019). On the Growth Dynamics of Nearly-Locked Grain in the Three-Phase In-Bi-Sn Eutectic System. *Metallurgical and Materials Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*, 50A(11), 5221-5233.
- [17] Mohagheghi, S., & Şerefoğlu, M. (2017). Dynamics of spacing adjustment and recovery mechanisms of ABAC-type growth pattern in ternary eutectic systems. *Journal of Crystal Growth*, 470, 66-74.
- [18] Mohagheghi, S., & Şerefoğlu, M. (2018). Quasi-isotropic and locked grain growth dynamics in a three-phase eutectic system. *Acta Materialia*, 151, 432-442.
- [19] Napolitano, R. E., & Serefoglu, M. (2012). Control and Interpretation of Finite-Size Effects and Initial Morphology in Directional Solidification of a Rod-Type Eutectic Transparent Metal-Analog. *JOM*, 64(1), 68-75.
- [20] Reinhart, G., Manginck-Noël, N., Nguyen-Thi, H., Schenk, T., Gastaldi, J., Billia, B., Baruchel, J. (2005). Investigation of columnar-equiaxed transition and equiaxed growth of aluminium based alloys by X-ray radiography. *Materials Science and Engineering: A*, 413-414, 384-388.
- [21] Salvo, L., Suéry, M., Marmottant, A., Limodin, N., & Bernard, D. (2010). 3D imaging in material science: Application of X-ray tomography. *Comptes Rendus Physique*, 11(9), 641-649.
- [22] Serefoglu, M., Bottin-Rousseau, S., & Akamatsu, S. (2023). Lamella-rod pattern transition and confinement effects during eutectic growth. *Acta Materialia*, 242.
- [23] Serefoglu, M., & Napolitano, R. E. (2008). On the selection of rod-type eutectic morphologies: Geometrical constraint and array orientation. *Acta Materialia*, 56(15), 3862-3873.

- 
- [24] Şerefoğlu, M., & Napolitano, R. E. (2009). Onset of rod eutectic morphology in directional solidification. *International Journal of Cast Metals Research*, 22(1-4), 228-231.
- [25] Şerefoğlu, M., & Napolitano, R. E. (2011). On the role of initial conditions in the selection of eutectic onset mechanisms in directional growth. *Acta Materialia*, 59(3), 1048-1057.
- [26] Sturz, L., Witusiewicz, V. T., Hecht, U., & Rex, S. (2004). Organic alloy systems suitable for the investigation of regular binary and ternary eutectic growth. *Journal of Crystal Growth*, 270, 273-282.
- [27] Witusiewicz, V. T., Hecht, U., Sturz, L., & Rex, S. (2006). Phase Equilibria and eutectic growth in ternary organic system (D) Camphor-Neopentylglycol-Succinonitrile. *Journal of Crystal Growth*, 286, 431-439.
- [28] Witusiewicz, V. T., Sturz, L., Hecht, U., & Rex, S. (2004a). Thermodynamic description and unidirectional solidification of eutectic organic alloys: I. Succinonitrile-(D)camphor System. *Acta Materialia*, 52, 4561-4571.
- [29] Witusiewicz, V. T., Sturz, L., Hecht, U., & Rex, S. (2004b). Thermodynamic description and unidirectional solidification of eutectic organic alloys: II.  $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_2$ - $(\text{NH}_2)(\text{CH}_3)\text{C}(\text{CH}_2\text{OH})_2$  system. *Acta Materialia*, 52(17), 5071-5081.
- [30] Witusiewicz, V. T., Sturz, L., Hecht, U., & Rex, S. (2004c). Thermodynamic description and unidirectional solidification of eutectic organic alloys: III. Binary systems neopentylglycol-(D)camphor and amino-methyl-propanediol-(D)camphor. *Acta Materialia*, 52(19), 5519.

## Optimization of a Mission-Based Flight Priority System

Emine YAYLALI<sup>1</sup> , Feride Şüheda YILDIZ<sup>2</sup> , Sena KOÇAK<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

<sup>2</sup>*Boğaziçi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

<sup>3</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Elektrik Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

### Abstract

**Purpose:** The purpose of this study is to develop a mission-based flight priority system that decides which aircraft would match with which airborne operation, and determines a sequence of take-off for those airplane-operation peers. Both peers and take-off orders are specified by minimizing total operation cost which includes fuel cost, waiting cost and penalty cost for missed missions. The aim of this system is to create a cost effective, fast and efficient decision-making tool for allocating operation-aircraft assignments and determining the sequence of take-off, especially in emergency cases.

**Methodology:** An integer programming model that minimizes the total cost are formulated. Four scenarios are designed to assess the performance of the system. The system, which includes five aircrafts and ten airborne operations, was revealed in the study. Integer programming is used while modeling the system and the Branch-and-Bound algorithm is used as the solution algorithm. The optimization algorithm was developed in MATLAB.

**Findings:** Both emergency scenarios and normal scenarios are maintained with the purpose of examining the behaviors and the result of the system under different conditions. It is believed that system have given the appropriate sequence and matchup for air vehicle-operation peers.

**Originality:** Since the integration of airplane-mission assignment and determining take-off sequence is rare in the literature, our study may be considered as a new approach. Therefore, in order to bring a new perspective, an optimization system related to the determination of flight priority and mission assignment was brought in this study.

**Keywords:** Optimization, Flight priority, Integer programming, Mission-based flight system

## I. INTRODUCTION

Air traffic management has firstly emerged in the first decade of the 20<sup>th</sup> century. The term defines a service with an objective of preventing collisions which include longitudinal, vertical, and lateral separation minima of air vehicles from each other. At the beginning of each flight, the pilot is informed about wind direction and speed, condition of the runway, the existence of other air vehicles in the area by using flashing lights, flags, and radio communications. Due to the rapid increase in air traffic, pilots are needed to be informed about departing and landing processes as well. A sequence for departure and getting permission to take-off from the tower were established in order to make air traffic flow systematically [1]. Nowadays, air traffic control is managed by international rules and procedures.

Air traffic system is a complex system although it has some deterministic features such as having specific flight schedules and defined flight routes. The complexity of the system is coming from unpredictable demand in civil aviation, special flights, instantaneous change in weather conditions and air traffic, and unusual cases resulting from human nature or regulations, etc. In order to deal with the complexity of system, various methods are used in different sections of air traffic management. Taxiing process [2], use of runway [3], landing process [4], flight routes [5], departure trajectories [6], hangar management [7] are examples of improvable parts of air traffic management which are affected by demand uncertainty.



The aim of our study is to develop an optimization model which gives the optimal assignment for airborne operations and aircrafts, and determines the flight priority for air vehicles by minimizing cost and penalties. A mission-based system is used in order to construct a system for air vehicles with different missions and to assign airborne operations to proper aircrafts. Another goal of this study is to provide a take-off order for determined aircraft-airborne operation peers. Although there are some studies on mission prioritization and flight priority, our study is unique in terms of integrating these topics. For any company or hangar, the number of aircrafts, their characteristics and possible operations that each aircraft can handle are known a prior.

Therefore, we developed a deterministic model using integer programming (IP). It is possible to extend the model to a stochastic system to incorporate uncertainty in the type and timing of the operations. Although such system would be better representation of reality, it would be more complex, time-consuming and data required for such model is limited. As a result, the objective of the IP model is to create a useful, cost effective, fast and efficient decision-making tool for the determination of operation-aircraft assignment and sequence of take-off, especially in emergency cases.

In our study, a new approach that combines mission prioritization and flight priority is proposed. This study aims to construct an optimization system that decides both assignment of missions and air vehicles and a departure sequence for those mission-air vehicle sets by minimizing cost. Our tool could be used for air vehicles like unmanned aerial vehicles, airplanes, or helicopters. However, an aircraft is used as a reference case for scenario analysis. Literature review on the air traffic management is conducted and relevant studies with different and similar approaches have been summarized in Section 2. Problem formulation, methodology and specifications of the reference plane are presented in Section 3. Results and case studies are reported in Section 4 and finally, conclusions of our study are summarized in Section 4.

## II. LITERATURE REVIEW

Air traffic control is an important and popular topic since it allows to minimize aircraft accidents and cost of air operations. Due to rapid growth in the cargo volume and passenger traffic, air traffic became a more complicated system. The complexity of the system leads to a rise in the number of studies that aims to solve problems in air traffic control [8]. A multi-level model was developed to examine optimization models and algorithms about air traffic in the terminal area. The authors concluded that optimization and control algorithms could be improved with real-life data [9].

Data based control, command techniques, and operator experience are also important components in air traffic management applications. Examples of these applications were explained and classified detail in [10]. Raj and Sheela preferred the neural network concept to construct a model in the air traffic control system [11]. In addition, intelligent prediction and planning algorithms were proposed to prevent airborne delays, provide more-automated air traffic management, and support real-time decisions by using the concept of neural network and machine learning [12].

Air traffic control systems have been studied for improving the traffic flow. Schultz and Reitmann developed an algorithm for forecasting aircraft boarding to ensure better boarding operations via a periodic neural network [13]. Neural networks have been employed in various problems in the air traffic control literature such as runway problem and landing scheduling. Efficient use of runway became more crucial due to the increase in demand. A study that was conducted at Tokyo International Airport focused on predicting landing runways based on actual runway assignment strategy by considering the capacity of airport and workload of controllers with the help of a neural network model [14]. Air traffic, and departure, a simulator via neural network was designed to control air traffic and landing clearance. In a similar study, artificial neural networks have been applied to maintain the optimal distance between two airplanes during landing [15].

An alternative simulation model was constructed by Netjasov et. al to measure the accurate performance of safety and give essential information in terms of safety feedback. This model, which showed reliable results in different scenarios and air traffic levels, was developed as a network-based model [16]. An advanced smart hybrid model that employed machine learning was developed to deal with the problem of the short-term trajectory prediction which occurs in the terminal maneuvering area [17]. Accurately gathering data on air traffic and weather conditions is a crucial element in decision-making within air traffic management. A study identifying useable and correct information on weather and air traffic was conducted by Gorriparty et. al. In this study, a similarity measure was developed in order to provide reliable data in terms of weather conditions and air traffic by determining similar previous days for the management decisions taken on those days [18].

A fuzzy based approach could also be a good choice for managing the complex air traffic problem. In one of the earlier works, the fuzzy system determined the duration of the waiting time before entering an airport approach corridor [19]. Another study examined the control problem for the airplane speed by using the fuzzy approach with the purpose of improving safety and

decreasing the stress level of the controller [20]. An intelligent fuzzy based model was designed to prevent airplane accidents and to develop advanced air traffic control by Idika and Baridam [21]. Furthermore, the fuzzy management of different air vehicles types was conducted by Jenab and Pineau [22].

Optimization techniques were adapted for problems in different areas of air traffic control. A mixed integer programming was developed for minimizing the time that a passenger spends while catching connection flights by Xu. Xu also used a tabu search algorithm for solving this MIP model [23]. Dell' Olmo & Lulli improved a new two-level hierarchical architecture for optimizing air traffic management problems via mixed integer programming and heuristic algorithm [24].

One of the major challenges in air traffic management is the struggle to keep up with increasing demand due to the rapid growth in air traffic. An integer optimization model was proposed to handle the situation of meeting the increasing demand in air traffic management by using Dantzig-Wolfe decomposition and a heuristic approach [25]. Another study suggested that developing a new combinatorial optimization model for air traffic management gives a more realistic view of parameters like air sector configuration and penalizations [26].

Our study is closely related to the mission and flight priority-based literature and cost-effective models. One study that is close to our work is about mission prioritization in unmanned aerial vehicles, where an optimization system was built in order to give UAVs flight permission according to their missions by considering weather risk analysis [27]. For the flight priority problem, a collaborative optimization model was improved and a genetic algorithm was used for finding a better taxi route for aircraft [28].

Flight priority problem can be extended to a hangar management system as suggested by Qin et al in 2018. In this system, a cost-based maintenance priority for aircrafts which are located in a constant capacity hangar was modeled. The model and parking stand allocation problem was solved by proposing a two-stage mixed integer programming model [29]. In terms of mission-based systems, Peng et al. proposed a model for determining optimal routing of missions while minimizing the cost of unvisited targets and experiencing shocks in unmanned aerial vehicles [30].

Numerous studies have explored into various aspects of air traffic management, including flight planning, flight and taxi route optimization, maintenance scheduling, parking allocation, and more, employing a variety of algorithms and modeling techniques. However, the existing body of literature predominantly focuses on optimizing civil aviation flights. In contrast, limited

research has been conducted on the allocation of tasks to aircraft and the prioritization of takeoff procedures. Thus, our objective is to shed light on this research gap by developing a flight takeoff decision-making system that can be applied to a diverse range of aircraft types including unmanned aerial vehicles.

### III. METHODOLOGY

The objective of the problem is to find the best aircraft-operation peers and to provide a proper take-off order for the peers by minimizing the total cost which includes fuel cost, a penalty cost for missed missions and idle cost (i.e., waiting cost for aircrafts in the hangar). The problem is formulated as an integer programming model.

Constraints, parameters, and the objective function of the system are summarized below. The related parameters are estimated from data for Cessna 172S which is selected as a representative aircraft in this study due to its common use in mission-related operations such as firefighting, training and emergency work [31]. Table 1 indicates the characteristics of Cessna 172S.

**Table 1:** Specifications of Cessna 172S Skyhawk

Feature	Value
Empty Weight	761.8 kg
Gross Weight	1162.7 kg
Usable fuel quantity	213 liters
Cruise Speed	229 km/h
Stall Speed	89 km/h
Never exceed speed	302 km/h
Maximum range	6.7 s
Range	1182 km
Service ceiling	4267.2 m
Rate of climb	3.86 m/s
Wing Loading	71.77 kg/m <sup>2</sup>
References: (Cessna, 1998)	

Missions are selected from real airborne operations of Cessna 172S Skyhawk [31]. The representative aircraft has 10 operations that can be performed. Furthermore, we classified all operations to have a mission number that represents priority level of the operation for the aircrafts. For instance, the most crucial mission is air ambulance service while the least essential one is aerial survey. Therefore, operation priority level (OPL) of air ambulance service is 10, while operation priority level of aerial survey is 1. The list of airborne operations and their importance level are displayed at Table 2.

**Table 2.** Airborne Operations and Importance Level

Airborne Operation	OPL
Aerial survey	1
Parachute operation	2
Float operation	3
Training	4
Surveillance and reconnaissance	5
Utility/Transport	6
Carrying ammunition	7
Search and rescue	8
Firefighting	9
Air ambulance service	10

**3.1 Model Formulation**

We formulated an integer programming model for a flight priority system with 5 air vehicles and 10 missions. Constraints, parameters and objective function of the model are presented in the below subsections.

**3.1.1 Constraints**

(a) There are  $i=5$  aircrafts and  $j=10$  operations in the system, and only 1 plane- mission peer is matched in each run.

(b) Only one air vehicle can take-off for each run.

(c) All air vehicles may not be able to perform all missions because of design and properties required for each mission. For instance, firefighting air vehicles require additional design features to store water and chemicals. Therefore, we determined a mission matrix that provides information on which operation(s) can be performed by which plane(s). However, due to unbalance between the number of missions and planes, we assumed that all planes can perform 4 missions.

(d) The fuel of the air vehicle should be equal to or greater than the required amount of fuel for the mission. Otherwise, the air vehicle is not allowed to take-off.

**3.1.2 Parameters**

$i$  denotes the number of air vehicle,  $i = 1,2,3,4,5$

$j$  denotes the number of missions,  $j = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10$

$G_{ij}$  denotes the mission matrix where 1 represents that  $i^{th}$  plane can perform  $j^{th}$  mission and vice versa.

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$ALT_{ij}$  = Average altitude  $i^{th}$  plane uses while performing  $j^{th}$  mission

$RPM_{ij}$  = Average revolution per minute  $i^{th}$  plane uses while performing  $j^{th}$  mission

$OH_{ij}$  = Operation hour of  $i^{th}$  plane for  $j^{th}$  mission

$UFQ_{ij}$  = Usable fuel quantity of  $i^{th}$  plane (liter)

$RFQ_{ij}$  = the required amount of fuel of  $i^{th}$  plane in order to perform one hour of  $j^{th}$  mission. This parameter is found by using the altitude-rpm-fuel amount equation. The equation is constructed by performing regression analysis on a given set of real-life data. The regression line is multiplied by a constant in order to transform galloon to liter and by operation hour to find the total required fuel quantity of the selected airborne operation. The equation for RFQ is

$$RFQ_{ij} = [-9.38043 - 0.00018 * ALT_{ij} + 0.00779 * RPM_{ij}] * OH_{ij} * 3.78541 \tag{1}$$

$DSH_i$  = waiting time of  $i^{th}$  plane in the hangar (hr.)

$OPL_j$  = operation priority level of mission  $j$ , same with  $j$  index; if  $j$  is 1 it means OPL of that mission is also 1.

$K$  = fuel price per gallon.

**3.1.3 Costs**

Costs included in the model are (a) mission penalty cost, (b) fuel cost of a mission, and (c) cost of spending time in the hangar (i.e., idle cost). Due to magnitude difference among these three types of costs, we normalized each cost.

**3.1.3.1 Mission Penalty Cost**

This cost represents the penalty of missing missions which could be missed due to impracticality of the mission or lack of airplanes to perform the mission. Unperformed mission means that an air vehicle has the ability to perform this mission but does not operate this mission. Since OPL can take at most 10, which is highest priority level, the penalty cost of that type of mission is formulized by dividing OPL by 10 for normalization. Impracticable mission means that an air vehicle does not have the ability to perform this mission. It is denoted by  $P_{ij}$  which is the cost of the plane  $i$  for not going to mission  $j$ .

The penalty cost is where mission prioritization is put into practice. By utilizing operation priority levels (OPL) and the formulated penalty cost for unperformed missions as described below, we ensure that missions with higher priority, characterized by a higher OPL, are seldom overlooked.

Penalty cost of impracticable missions:

$$P_{1j} = M \text{ for } j \quad (2)$$

$$\neq \{1, 2, 5, 8\}$$

$$P_{2j} = M \text{ for } j \quad (3)$$

$$\neq \{3, 4, 6, 8\}$$

$$P_{3j} = M \text{ for } j \quad (4)$$

$$\neq \{2, 6, 7, 10\}$$

$$P_{4j} = M \text{ for } j \quad (5)$$

$$\neq \{4, 6, 7, 9\}$$

$$P_{5j} = M \text{ for } j \quad (6)$$

$$\neq \{1, 4, 5, 10\}$$

where M is a very large number

Penalty cost of unperformed missions:

$$P_{1j} = OPL_j/10 \text{ for } j \quad (7)$$

$$= \{1, 2, 5, 8\}$$

$$P_{2j} = OPL_j/10 \text{ for } j \quad (8)$$

$$= \{3, 4, 6, 8\}$$

$$P_{3j} = OPL_j/10 \text{ for } j \quad (9)$$

$$= \{2, 6, 7, 10\}$$

$$P_{4j} = OPL_j/10 \text{ for } j \quad (10)$$

$$= \{4, 6, 7, 9\}$$

$$P_{5j} = OPL_j/10 \text{ for } j \quad (11)$$

$$= \{1, 4, 5, 10\}$$

**3.1.3.2 Fuel Cost**

Fuel cost is calculated by multiplying required fuel quantity by the amount of dollars per gallon (K). However, as mentioned earlier, that all costs are normalized. Therefore, to normalize it, fuel cost is divided by maximal usable fuel quantity of plane since the required amount of fuel cannot exceed the maximal usable fuel quantity. Since K is placed in both nominator and denominator of the equation it is eliminated.  $F_{ij}$  means fuel cost of  $i^{\text{th}}$  plane performing  $j^{\text{th}}$  mission.

$$F_{ij} = \frac{RFQ_{ij}}{UFQ_{max}} \quad (12)$$

**3.1.3.3 Waiting Cost (Idle Cost)**

An airplane that spends much more time in the hangar than the other planes have priority over mission assignments and possible take-off. To represent this intangible cost, we decreased total cost with time spent in the hangar. In other words, the total cost of an airplane is reduced if this plane is not assigned to a mission and stays idle in the hangar. We used a normalization constant of 15 to enable mission cost to have a higher weight in the total cost than the waiting cost. That means we prefer to perform the more important missions than allowing idle planes to be

assigned to missions.  $W_i$  denotes the waiting cost of plane  $i$ .

$$W_i = \frac{DSH_{ij}}{15} \quad (13)$$

**3.2 Integer Programming Model**

$x_{ij}$  is the decision variable where 1 denotes that plane  $i$  takes off for mission  $j$ .

Objective function of the model is to minimize the total cost as formulated below.

$$\min z = \sum_i \sum_j [(1 - x_{ij}) * P_{ij} + F_{ij} * x_{ij} - W_i * (1 - x_{ij})] \quad (14)$$

Constraints of the IP model are presented below.

- Constraint (1) enables to assign every mission to only one airplane:

$$\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{10} (x_{ij}) = 1 \quad (15)$$

- Constraint (2) enables to assign missions to planes according to the mission matrix, i.e., if a plane cannot conduct a type of mission, it will never be assigned that type of mission:

$$G_{ij} \geq x_{ij} \quad \forall i, j \quad (16)$$

- Constraint (3) allows the model to assign planes to the mission if they have enough fuel for the mission:

$$RFQ_{ij} * x_{ij} \leq UFQ_i \quad \forall i, j \quad (17)$$

- Binary constraint is defined as:

$$x_{ij} = \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (18)$$

**3.3 Altitude-RPM-fuel Equation and Regression Analysis**

One of the constraints in the system defines the relationship between altitude-operation time-fuel consumption. This relationship is important in our model because air vehicle that is out of the range cannot get permission to take off. Therefore, we need to define an appropriate relationship between those three values. A relationship for altitude-operation time-fuel is shown in Figure 1. The table includes altitude values between 2000 and 12000 (units). Each altitude is matched with RPM values which are represented by multiples of 100 between the ranges of 2300 and 2500 (units). Figure 1 gives necessary fuel quantity that an air vehicle should have under the condition of an altitude, RPM, and temperature.

Sub-values for altitude (i.e., ALT = 2500 or 3000) and RPM (i.e., 2550) that are not in the table are interpolated. We utilized regression analysis to develop a relationship between altitude, RPM and fuel use. Using 105 data points that connect galloon per hour (GPH) values for each RPM-ALT peer, the following regression line was determined. This equation has been used in the equation (1) which is a part of the objective function.

$$G = [-9.38043 - 0.00018 * ALT + 0.00779 * RPM] \tag{19}$$

PRESS ALT FT	RPM	20°C BELOW STANDARD TEMP			STANDARD TEMPERATURE			20°C ABOVE STANDARD TEMP		
		% BHP	KTAS	GPH	% BHP	KTAS	GPH	% BHP	KTAS	GPH
2000	2550	83	117	11.1	77	118	10.5	72	117	9.9
	2500	78	115	10.6	73	115	9.9	68	115	9.4
	2400	69	111	9.6	64	110	9.0	60	109	8.5
	2300	61	105	8.6	57	104	8.1	53	102	7.7
	2200	53	99	7.7	50	97	7.3	47	95	6.9
	2100	47	92	6.9	44	90	6.6	42	89	6.3
4000	2600	83	120	11.1	77	120	10.4	72	119	9.8
	2550	79	118	10.6	73	117	9.9	68	117	9.4
	2500	74	115	10.1	69	115	9.5	64	114	8.9
	2400	65	110	9.1	61	109	8.5	57	107	8.1
	2300	58	104	8.2	54	102	7.7	51	101	7.3
	2200	51	98	7.4	48	96	7.0	45	94	6.7
6000	2100	45	91	6.6	42	89	6.4	40	87	6.1
	2650	83	122	11.1	77	122	10.4	72	121	9.8
	2600	78	120	10.6	73	119	9.9	68	118	9.4
	2500	70	115	9.6	65	114	9.0	60	112	8.5
	2400	62	109	8.6	57	108	8.2	54	106	7.7
	2300	54	103	7.8	51	101	7.4	48	99	7.0
2200	48	96	7.1	45	94	6.7	43	92	6.4	

Figure 1. Cessna 172S Performance Table (Kaynak: [32])

### 3.4 Solution Algorithm

The IP model was created in MATLAB primarily using “intlinprog” function and Branch-and-Bound technique. Two main input parameters of the IP are plane and mission. Planes are identical and have a constant number of 5, while there are 10 possible missions in the system. Since there are only 5 planes in the system, the maximum number of missions that can be completed in short-time intervals could be at most 5 missions. In this study, four case scenarios are determined and missions in each scenario were input to the IP model. Scenarios and the selection of the related missions are explained in Section 4 in detail.

Parameters such as ALT, RPM, OH and UFQ could take any values within given intervals. These intervals vary according to the type of air vehicle. Therefore, we determined intervals for these parameters according to the specification of the sample plane. Then, the model utilizes uniform random distribution for selected intervals of RPM, OH and UFQ. For ALT values, we categorized four sub-intervals as high-altitude (HA), medium-altitude (MA), low-altitude (LA) and no limit (NL) with respect to the operation type. The reason behind this categorization is that different operations require different flight altitudes. For instance, a float operation requires low-altitude while carrying ammunition operation requires high-altitude.

Operations and corresponding ALT values are given in Table 3. While we used uniformly distributed parameters in our model for simplicity, other probability distributions could also be utilized.

Table 3. Operations and Corresponding ALT Values

Operations and ALT intervals	Operation Type	Max ALT	Min ALT
HA	Aerial survey	9000	12000
HA	Parachute operation	9000	12000
LA	Float operation	2000	5000
NL	Training	2000	12000
MA	Surveillance and reconnaissance	5000	9000
MA	Utility/ Transport	5000	9000
HA	Carrying ammunition	9000	12000
LA	Search and rescue	2000	5000
MA	Firefighting	5000	9000
MA	Air ambulance service	5000	9000

The ranges of DSH are assumed to be 0 to 5 (units). The initial DSH values for all planes are uniformly distributed. DSH is updated every 30 minutes for every plane. The algorithm increases the DSH of the plane that does not take-off by 0.5 hours. DSH has a negative effect on the cost. It means that if the plane has been in the hangar more than other planes, then it has more priority than others.

The algorithm works iteratively, i.e., if the system has n missions, then the algorithm runs n times. In each run, the algorithm results one mission-plane peer which has the lowest cost. If remaining missions and planes cannot be paired-off due to infeasibility, the algorithm results with no solution.

### IV. FINDINGS

The application section is constructed by conducting various scenarios. Scenarios, which are made according to different circumstances, are conducted to analyze and interpret relationships between parameters and results of the model. Tables are built in order to represent the value of parameters clearly, however, all parameters are not given in the table to prevent the complexity and to increase the clarity of scenarios. ALT, RFQ, UFQ, DSH, and missions are indicated in the tables. While determining scenarios, it is considered whether they can be observed and applied in real life. Scenarios may be listed as; dispatching soldiers, fire

outbreak, combination of different scenarios, and earthquake disaster.

#### 4.1 Scenario 1: Dispatching Soldiers

In dispatching soldiers scenario, the operations that will be required are determined as parachute operation, carrying ammunition and surveillance & reconnaissance. Parachute operation is needed to land the soldiers into the area, carrying ammunition provides transportation of required ammunition and utility, and thanks to surveillance & reconnaissance operation area control and security are ensured. Mission numbers, which are 2, 7, and 5 respectively, are entered into the system. Table 4 gives the required parameters and their values. The system gives the result one by one as:

- Plane 4 takes-off to perform mission 7.
- Plane 1 takes-off to perform mission 5.
- Plane 3 takes-off to perform mission 2.

**Table 4.** Information for Scenario 1

Air Vehicle	RFQ			UFQ	DSH
	2	5	7		
1	128.04	134.74	1000	179	4.11
2	1000	1000	1000	103	3.92
3	65.15	1000	172.63	131	3.83
4	1000	1000	96.43	105	1.10
5	1000	156.02	1000	110	1.62

When Table 4 is analyzed, it is seen that  $RFQ_{3,2}$  is less than first and second aircraft-operation peers and  $DSH_3$  is relatively high, so plane 3-mission 2 peer has the cost decreasing features. Nevertheless, it gets permission to take-off lastly since in such a match operation priority level, which is 2, is extremely small to take-off firstly. Therefore, despite the presence of cost-decreasing factors, the cost of the last peers is still higher than that of the first and second peers. The 4<sup>th</sup> aircraft takes off firstly with operation 7, since  $RFQ_{4,7}$  is less and operation number is greater than other peers, so that match has the least cost. In addition, when a real dispatching soldiers scenario appears, surveillance & reconnaissance operation would probably be performed before parachute operation to provide safety of the area. Accordingly, the relationship between operation priority level and other parameters, and impact of OPL, in a different meaning mission cost, on the result is clearly seen. Also, the system gives logical results in terms of take-off order.

#### 4.2 Scenario 2: Fire Outbreak

In a fire outbreak case, the need for firefighting operation is obvious. Air ambulance may also be required in the case of injury or death. Lastly, utility/transport airborne operation could be used in

order to carry medical stuff and humanitarian needs. Mission numbers 9, 10, and 6, respectively, were entered into the system. The values of the parameters are demonstrated in Table 5 and the result was received as:

- Plane 5 takes-off to perform mission 10.
- Plane 4 takes-off to perform mission 9.
- Plane 3 takes-off to perform mission 6.

**Table 5.** Information for Scenario 2

Air Vehicle	RFQ			UFQ	DSH
	6	9	10		
1	1000	1000	1000	139	2.06
2	76.78	1000	1000	193	2.65
3	21.79	1000	142.81	166	0.60
4	224.82	36.19	1000	162	1.73
5	1000	1000	74.31	203	4.05

In this system, RFQ has a crucial impact due to directly affecting fuel cost. Thereby, the system tends to give priority aircraft-operation peers that have least RFQ values. Nevertheless, since there are other parameters influencing the cost, impact of RFQ could be decreasing in some cases.  $RFQ_{3,6}$  is the least one among other peers, however aircraft 3-mission 6 peer takes-off lastly. The result of that is DSH of the third plane is extremely small and OPL of the sixth mission is the least. When first and second mission-plane peers are examined, it is seen that although the importance of missions is close and RFQ for the first peer is greater than the second peer, plane 5 takes-off first with mission 10. The reason behind this is DSH of the first peer is much greater than the second peer. Therefore, the effect of DSH on RFQ and OPL are shown in that scenario.

#### 4.3 Scenario 3: Combination of Different Cases

This scenario is different from the others in terms of not requiring more than one plane for one case. One circumstance, like fire outbreak, includes more than one operation, like firefighting, transportation, and air ambulance, and thereby requires more than one aircraft in the previous two scenarios. Nevertheless, in this scenario, it is assumed that only one plane can be operated and there is no need for multiple planes simultaneously on the air for any scenarios. Those circumstances are training, fishery survey, that is performed by aerial survey operation, and agriculture irrigation being fulfilled by firefighting plane. As a result, 4, 1, and 9 operation numbers were given to the system. While parameters are indicated in Table 6, the result is determined as:

- Plane 2 takes-off to perform mission 4.



- Plane 4 takes-off to perform mission 9.
- Plane 1 takes-off to perform mission 1.

**Table 6.** Information for Scenario 3

Air Vehicle	RFQ			UFQ	DSH
	Mission				
	1	4	9		
1	128.04	1000	1000	139	0.87
2	1000	24.84	1000	193	3.83
3	1000	1000	1000	166	1.30
4	1000	124.94	103.08	162	0.71
5	114.92	156.31	1000	203	3.23

There is a noticeable difference between operation importance level in this scenario. Hence, it is expected that agriculture irrigation operation, which has operation number 9, gets permission to take-off firstly according to mission prioritization. Nevertheless, operation 9 can be performed by only aircraft 4, and there is extremely high difference of RFQ values among peers (for example, RFQ<sub>4,9</sub> is 103.0787 while RFQ<sub>2,4</sub> is 24.84). Since the system was also constructed based on minimizing cost, the least fuel cost and highest waiting time have caused the cost to decrease in the case of mission 4-aircraft 2 peer. Furthermore, plane 2 has permission to the first departure for mission 4, then plane 4 with mission 9, and lastly the combination of plane 1 and mission 1. Finally, according to this scenario the importance and the impact of RFQ on operation priority level is revealed.

**4.4 Scenario 4: Earthquake**

An earthquake requires air ambulance in order to arrive quickly in the area in case of injury and death, search and rescue operation in case of missing and being trapped in the wreckage, and utility/transport for receiving humanitarian aids and medical stuff. Operation numbers for those missions are 10, 8, and 6, respectively. After mission numbers are entered into the system, the solution appeared as

- Plane 1 takes-off to perform mission 8.
- Plane 5 takes-off to perform mission 10.
- Plane 4 takes-off to perform mission 6.

**Table 7.** Information for Scenario 4

Air Vehicle	RFQ			UFQ	DSH
	Mission				
	6	8	10		
1	1000	138.21	1000	184	4.54
2	76.81	161.82	1000	125	1.90
3	187.19	1000	199.82	107	2.24
4	99.43	1000	1000	186	3.59
5	1000	1000	162.45	175	2.64

The required value for parameters is indicated in Table 7. The effect of duration spent in the hangar on the operation priority level can be seen in this scenario. While mission 10 exhibits a higher OPL than mission 8 and their RFQs are in closer proximity due to the significantly reduced waiting time for operation 10 - Plane 5 compared to operation 8 - Plane 1, resulting in the former receiving takeoff permission sooner. Search and rescue plane take-off firstly, then air ambulance goes after it, and lastly utility/transportation operation makes departure. The flight order determined by the system closely mirrors real-world logic. In the event of an earthquake, both air ambulance and search and rescue planes may need to take off first. However, our system carefully analyzes all available data to determine the initial departure sequence.

**V. CONCLUSION AND DISCUSSION**

Air traffic management is a complex system which consists of various fields such as ground control, air control, landing and departure process, mission assignments, aircraft maintenance arrangement, determining flight schedule, etc. While our study reviewed numerous existing studies, it's worth noting that flight priority and mission assignment, in comparison to other areas, have received relatively limited attention. Therefore, our study brings a new approach to air traffic management in terms of integrating mission assignment and flight priority.

A decision-making tool is developed in order to assign the airborne operation to an aircraft and to determine an appropriate take-off order for assigned aircraft-operation peers. The objective of the optimization system while performing processes is minimizing cost. Different kinds of costs and parameters were selected in the modeling phase of the system. Cessna 172S Skyhawk was selected as sample aircraft in order to clearly specify the parameters and to provide real airborne operations. Five planes and ten operations were selected for the construction of the optimization system. The decision variable of the system is composed of binary variables, thereby pure integer programming was selected as the modeling technique of the system. We utilized MATLAB to construct the solution algorithm, employing the “intlinprog” function with a Branch-and-Bound solution algorithm during this phase.

We generated scenarios to analyze, evaluate, and provide recommendations on the system's ability to meet expectations. These scenarios involve actual airborne operations and could potentially manifest in real-life situations. Dispatching soldiers, fire outbreak, the combination of different cases that are fishery survey, agriculture irrigation and training, and earthquake disaster are the constituted scenarios. The value of the parameters and results have been indicated

by tables in the application phase. Scenarios have shown the relationship between parameters, and how those parameters and costs affect the decision of the system. It is thought that applications have given the logical results, and have met the expectations. Therefore, we expect that our model can be used as a decision-making tool in emergency cases.

While the model has been demonstrated for one type of aircraft, it is possible to use this model for other aircrafts and unmanned aerial vehicles. The usage of unmanned aerial vehicles is dramatically increased in recent years and swarm drone concepts are commonly used for defense and surveillance operations. There is a potential for drone-related applications of our model and the benefit of our model would be providing a fast, reliable and quantitative decision-making system for the flight takeoff problem. Limitations of our model includes the lack of a time dimension, deterministic nature of mission information (requiring prior knowledge of all missions and their OPLs) and, the absence of support for simultaneous takeoffs.

Since this study is a new approach in its field there also exist some improvements in the study. The number of aircraft might be increased to provide more balance between the number of operations and aircrafts. Furthermore, weather conditions, damaged, and maintenance of aircrafts can be considered to apply this study in real life. Nevertheless, we believe that the objective being identified at the beginning of the study has been accomplished.

### Acknowledgements

This study is supported by Turkish Aerospace Industries LIFT UP '20 programme. We would like to thank Turkish Aerospace Industries (TAI) for their support and contribution to our study.

### REFERENCES

- [1] "History of Air Traffic Control | USCA." <https://www.usca.es/en/profession/history-of-air-traffic-control/> (accessed Jul. 02, 2020).
- [2] Y. Zhang and Q. Wang, "Methods for determining unimpeded aircraft taxiing time and evaluating airport taxiing performance," *Chinese J. Aeronaut.*, 2017, doi: 10.1016/j.cja.2017.01.002.
- [3] H. Feuser Fernandes and C. Müller, "Optimization of the waiting time and makespan in aircraft departures: A real time non-iterative sequencing model," *J. Air Transp. Manag.*, 2019, doi: 10.1016/j.jairtraman.2019.101686.
- [4] A. Salehipour, "An algorithm for single- and multiple-runway aircraft landing problem," *Math. Comput. Simul.*, 2020, doi: 10.1016/j.matcom.2019.10.006.
- [5] V. Ho-Huu, S. Hartjes, H. G. Visser, and R. Curran, "An optimization framework for route design and allocation of aircraft to multiple departure routes," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.10.003.
- [6] M. Zhang, A. Filippone, and N. Bojdo, "Multi-objective optimisation of aircraft departure trajectories," *Aerosp. Sci. Technol.*, 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.05.032.
- [7] V. Karpov, A. Panin, and A. Semenov, "Calculation of Reliability of Hangars for Parking and Maintenance of Vehicles," 2017, doi: 10.1016/j.trpro.2017.01.014.
- [8] L. Bianco and M. Bielli, "Air traffic management: Optimization models and algorithms," *J. Adv. Transp.*, vol. 26, no. 2, pp. 131–167, 1992, doi: 10.1002/ATR.5670260205.
- [9] H. Balakrishnan, "Control and optimization algorithms for air transportation systems," *Annu. Rev. Control*, 2016, doi: 10.1016/j.arcontrol.2016.04.019.
- [10] H. Idris, "Human-Centered Automation of Air Traffic Control Operations in the Terminal Area," MIT, 1994.
- [11] N. Raj and G. Sheela K, "Intelligent Air Traffic Control using Neural Networks," *IJSTE - International J. Sci. Technol. Eng.*, 2016.
- [12] J. Nogami, S. Nakasuka, and T. Tanabe, "Real-Time Decision Support For Air Traffic Management, Utilizing Machine Learning," *Control Eng. Pract.*, vol. 4, no. 8, pp. 1129–1141, 1996.
- [13] M. Schultz and S. Reitmann, "Machine learning approach to predict aircraft boarding," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 2019, doi: 10.1016/j.trc.2018.09.007.
- [14] Y. Nakamura, R. Mori, H. Aoyama, and H. Jung, "Modeling of Runway Assignment Strategy by Human Controllers using Machine Learning," 2017, doi: 10.1109/DASC.2017.8102099.
- [15] V. B. Kulkarni, "Intelligent air traffic controller simulation using artificial neural networks," *2015 Int. Conf. Ind. Instrum. Control. ICIC 2015*, pp. 1027–1031, Jul. 2015, doi: 10.1109/IIC.2015.7150897.
- [16] F. Netjasov, D. Crnogorac, and G. Pavlović, "Potential safety occurrences as indicators of air traffic management safety performance: A network based simulation model," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 102, no. March, pp. 490–508, 2019, doi: 10.1016/j.trc.2019.03.026.
- [17] Z. Wang, M. Liang, and D. Delahaye, "A hybrid machine learning model for short-term estimated

- time of arrival prediction in terminal manoeuvring area,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.07.019.
- [18] S. Gorripaty, Y. Liu, M. Hansen, and A. Pozdnukhov, “Identifying similar days for air traffic management,” *J. Air Transp. Manag.*, vol. 65, pp. 144–155, 2017, doi: 10.1016/j.jairtraman.2017.06.005.
- [19] J. R. Clymer, “Induction of fuzzy rules for air traffic control,” *Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, vol. 2, pp. 1495–1502, 1995, doi: 10.1109/icsmc.1995.537984.
- [20] A. V. Lovato, J. D. S. Silva, and E. Araujo, “Airplane Speed Control: A Fuzzy Logic Approach,” 2004, Accessed: Jun. 22, 2020. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/249783005\\_Airplane\\_Speed\\_Control\\_A\\_Fuzzy\\_Logic\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/249783005_Airplane_Speed_Control_A_Fuzzy_Logic_Approach).
- [21] N. Idika and B. B. Baridam, “(PDF) An Intelligent Air Traffic Control System using Fuzzy Logic Model,” *Int. J. Appl. Inf. Syst.*, vol. 12, no. 11, 2018, Accessed: Aug. 21, 2021. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/340166411\\_An\\_Intelligent\\_Air\\_Traffic\\_Control\\_System\\_using\\_Fuzzy\\_Logic\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/340166411_An_Intelligent_Air_Traffic_Control_System_using_Fuzzy_Logic_Model).
- [22] K. Jenab and J. Pineau, “Automation of Air Traffic Management Using Fuzzy Logic Algorithm to Integrate Unmanned Aerial Systems into the National Airspace,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 5, p. 3169, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i5.pp3169-3178.
- [23] J. Xu and G. Bailey, “The Airport Gate Assignment Problem: Mathematical model and a tabu search algorithm,” *Proc. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, 2001, doi: 10.1109/HICSS.2001.926327.
- [24] P. Dell’Olmio and G. Lulli, “A new hierarchical architecture for air traffic management: Optimisation of airway capacity in a free flight scenario,” *Eur. J. Oper. Res.*, 2003, doi: 10.1016/S0377-2217(01)00394-0.
- [25] X. Diao and C. H. Chen, “A sequence model for air traffic flow management rerouting problem,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, 2018, doi: 10.1016/j.tre.2017.12.002.
- [26] D. García-Heredia, A. Alonso-Ayuso, and E. Molina, “A Combinatorial model to optimize air traffic flow management problems,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 112, 2019, doi: 10.1016/j.cor.2019.104768.
- [27] D. M. (Grand F. Salentiny and N. Mewes, John S. (Mayville, “Mission Prioritization and Work Order Arrangement for Unmanned Aerial Vehicles and Remotely-Piloted Vehicles,” 2016.
- [28] Y. Jiang, Z. Liao, and H. Zhang, “A collaborative optimization model for ground taxi based on aircraft priority,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1155/2013/854364.
- [29] Y. Qin, F. T. S. Chan, S. H. Chung, T. Qu, and B. Niu, “Aircraft parking stand allocation problem with safety consideration for independent hangar maintenance service providers,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 91, pp. 225–236, 2018, doi: 10.1016/j.cor.2017.10.001.
- [30] R. Peng, “Joint routing and aborting optimization of cooperative unmanned aerial vehicles,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2018, doi: 10.1016/j.res.2018.05.004.
- [31] P. A. Bedell, “Cessna Skyhawk SP,” 1998. AOPA. <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/1998/september/pilot/cessna-skyhawk-sp>
- [32] “Cessna 172 S ( PH-HBW ) Difference Training document compared to C172R ( OOCVE ) model,” [Online]. Available: [http://www.ebzt.be/wp-content/uploads/2018/07/APCK\\_differences\\_Cessna\\_172\\_S\\_and\\_R\\_document.pdf](http://www.ebzt.be/wp-content/uploads/2018/07/APCK_differences_Cessna_172_S_and_R_document.pdf).

# Atıklardan Grafen ve Türevlerinin Sentezlenmesi Üzerine Bir Değerlendirme

## *Synthesis of Graphen and Its Derivatives From Waste: A Review*

Mahmut ÖZTÜRK <sup>1</sup>, Aysun ÖZKAN <sup>1</sup>, Zerrin GÜNKAYA <sup>1</sup>, Müfide BANAR <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

### Öz

Grafen, 2004 yılında grafitten başarılı bir şekilde izole edilmesinden bu yana en ilginç karbon nanomalzemelerden birisi olarak kabul edilmektedir. Karbon-karbon sigma bağı ile birbirine bağlanmış iki eşdeğer alt kafes (sublattice) karbon atomundan oluşan petek çerçevesine sahip atom kalınlığında bir tabaka olan grafen ve grafenin türevleri, olağanüstü fizikokimyasal özellikleri nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmüş, geleceğin sistemleri ve cihazları için yeni fırsatlar yaratmış ve bu da çok sayıda uygulamada kullanılmak üzere grafen talebinin artmasına neden olmuştur. Doğal kaynakların kullanımı yerine atıklardan grafen ve türevlerinin eldesi hem bu talebi karşılayabilmek hem de atıkların döngüsel ekonomi yaklaşımıyla yönetilmesi açısından önemli bir adımdır. Bu noktadan hareketle, bu derleme makalede grafen ve türevlerinin sentezlenme yöntemleri ve sentezlenmesinde kullanılan atıklar üzerinde durulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Atık kaynakları, grafen sentezi, karbon kaynakları, sentez yöntemleri

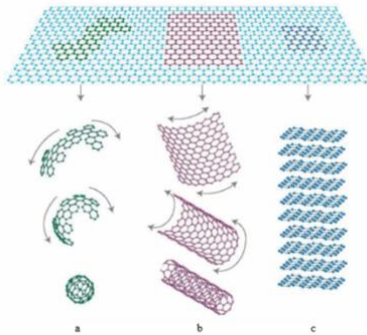
### Abstract

Graphene has been recognized as one of the most interesting carbon nanomaterials since its successful isolation from graphite in 2004. Graphene, an atom-thick layer with a honeycomb frame consisting of two equivalent sublattice carbon atoms connected by a carbon-carbon sigma bond and its derivatives, have recently attracted great attention due to their outstanding physicochemical properties, creating new opportunities for future systems and devices, which has led to an increased demand for graphene for use in a multitude of applications. Obtaining graphene and its derivatives from wastes instead of using natural resources is an important step in terms of both meeting this demand and managing wastes with a circular economy approach. From this point of view, in this review article, the synthesis methods of graphene and its derivatives and the wastes used in their synthesis are emphasized.

**Keywords:** Carbon sources, graphene synthesis, synthesis methods, waste precursors

## I. GİRİŞ

Grafen, iki boyutlu (2D) altıgen bir kafes yapısında, yoğun bir şekilde paketlenmiş karbon atomlarından oluşan düz tek bir tabakaya verilen addır. Grafenin kristal yapısı, grafit, karbon nanotüpler ve fullerenler gibi karbon malzemelerin yapı taşı olarak görülebilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi diğer grafit malzemeler için yapı taşı görevi gören grafen levhalar, küresel bir şekilde kesilip katlanarak fulleren (C60) (a), silindirik şekilde yuvarlanarak karbon nanotüp (CNT) (b), birbiri üzerine yapıştırılarak grafiti (c) oluştururlar [1].



Şekil 1. Grafen levhaların farklı şekil yapılarına göre isimlendirilmeleri

(a) fulleren (C60), (b) CNT, (c) grafit

Grafen kristalleri ilk olarak, Andre Geim ve Konstantin Novoselov adındaki iki bilim insanı tarafından, 2004 yılında basit ve etkili bir yöntem olan 'selo bant (scotch tape)' yöntemi kullanılarak keşfedilmiş ve bu keşifleri sonucunda 2010 yılında Nobel Fizik Ödülü'nü almışlardır [1, 2]. İdeal olarak grafen tek bir katmandan oluşsa da 10 atom karbon kalınlığına kadar olan yapılara da grafen denilmektedir. Grafen genellikle tek katmanlı grafen (single-layer, SG), çift katmanlı grafen (bi-layer, BG), birkaç katmanlı grafen (3-5 katmanlı, few layers graphene FLG) ve çok katmanlı grafen (5-10 katmanlı, multi-layer graphene, MLG) olarak da bulunabilir [2, 3].

Grafen, oda sıcaklığında 250.000 cm<sup>2</sup>/V.s'lik yük taşıma hareketliliği ile bilinen diğer malzemelerden elektriksel olarak daha iletken, mekanik mukavemeti (~1 TPa) ağırlığının altıda biri olan çeliğinkinden 200 kat daha fazladır. Geniş teorik spesifik yüzey alanına (2630 m<sup>2</sup>/g) ve optik geçirgenliğe (%97,7) sahiptir. Termal iletkenliği (500 W/mK) ise elmadan daha fazladır [4]. Sonuç olarak grafen bu özellikleri sayesinde aerojeller, piller, enerji depolama, ısı yönetimi, su arıtımı, giyilebilir elektronik vb. birçok ileri teknolojik uygulamada kullanım için araştırılmaktadır. Aşağıda grafen ve türevlerinin kullanıldığı bazı uygulama alanları ile ilgili örnek çalışmalara yer verilmiştir.

Mi vd. [5] çalışmalarında grafeni, çift yönlü dondurarak kurutma yöntemi ile üç boyutlu yüksek oranda sıkıştırılabilir, elastik, anizotropik, selüloz/grafen aerojeller üretmek için kullanmışlardır. Esnek selüloz, sert grafen ve çift yönlü hizalanmış özel gözenekli yapı, olağanüstü geri kazanılabilirlik sağlamakta ve aerjel absorpsiyon kapasitesi, ağırlığının 80-197 katına ulaşmaktadır. Wu vd. [6] yaptıkları çalışmada azot katkılı gözenekli karbon ve grafen kompoziti lityum-kükürt piller için kükürt iskelesi (scaffold) olarak kullanmışlardır. sp<sup>2</sup> hibritleştirilmiş grafenden ve sp<sup>3</sup>-hibritleştirilmiş aktif karbondan elde edilen 3D heteroatom katkılı karbon çerçeve, enerji dönüşümünde ve depolamada yüksek performans sağlamıştır. Yanik vd. [7], grafeni süper kapasitör elektrotları için kullanılan iletken mürekkebi elde etmek için polipirol veya manyetik polipirol ile karıştırmışlardır. Sonuç olarak 255 F g<sup>-1</sup>'lik spesifik kapasitans elde edilmiştir. Xu vd. [8], çiplerin termal yönetiminin iyileştirilmesi için parafin/genişletilmiş grafit/grafen kompoziti hazırlamışlardır. Parafin ve genişletilmiş grafit arasındaki uyumluluğu geliştirmek için de grafen kullanılmıştır. Parafin/genişletilmiş grafit/grafen kompozitinin termal iletkenliği ve ısı yönetiminin, parafin/genişletilmiş grafit kompozitinden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Chacra vd. [9] çalışmalarında sudan emülsifiye edilmiş

yağın uzaklaştırılması için grafenin manyetit bir türevini kullanmışlardır. Grafen nanoplateletler (nanoplatelets) ve grafen manyetit, sırasıyla %90 ve %72,2 yağ giderim verimliliği göstermiştir. Xu vd. [10] çalışmalarında, grafen kuantum nokta kaplı Ag nanoteller kullanarak kendi kendine çalışan, akıllı triboelektrik (sürtünme ile elektriklenen) elektronik cilt olarak adlandırılan yapay parmak geliştirmişlerdir. Grafen kuantum nokta kaplı Ag nanotellerin dış hareketlerde duyarlılığı artırdığı görülmüştür.

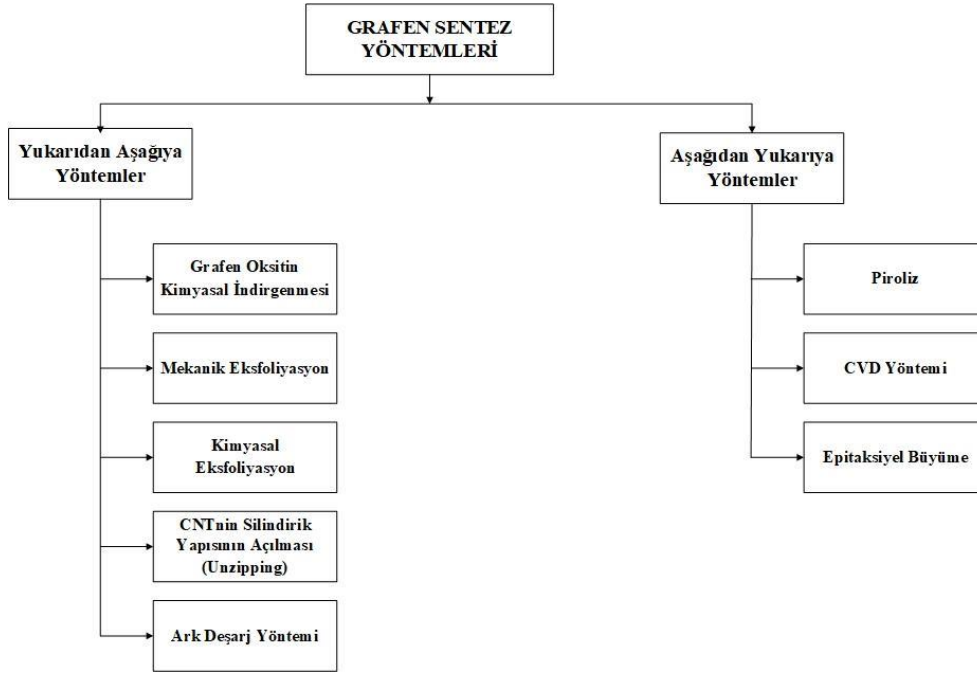
Grafenin olağanüstü özellikleri ve birçok kullanım alanı olmasından ötürü ilerleyen yıllarda artan bir grafen talebi olacağı düşünülmektedir. Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği'ne göre, grafen üretiminde de kullanılan grafit, hem endüstri hem de ulusal güvenlik için kritik bir malzeme olarak görülmektedir. Grafenin dışında lityum-iyon piller, yakıt hücreleri, elektronik ve diğer yapısal malzeme teknolojilerinde gelecekte olabilecek talepler düşünülünce, grafit malzemelere olan ilginin artması kaçınılmaz olacaktır. 2015-2016 yıllarında dünyadaki toplam grafit üretimi yaklaşık 2,5 milyon tondur ve grafit talebinin önümüzdeki yıllarda yaklaşık %4 artması beklenmektedir [11]. Grafen üretilebilecek farklı kaynakların bulunmasının önemi giderek artmakta olup, üretimde kullanılacak kaynaklardan birisi de atıklardır.

Dünyada bir yılda toplam 1,3 milyar ton atık üretilmekte ve evsel ve çeşitli endüstrilerden kaynaklanan bu atıklar, olumsuz çevresel etkilere neden olmaktadır. Mevcut tüketimdeki gelişmeler ve nüfus artış hızı ile birlikte atık miktarının 2025 yılına kadar 2,2 milyar tona yükseleceği tahmin edilmektedir [12]. Bu durum ve grafenin çoğunlukla yenilenemez bir kaynak olan grafitten üretilmesi göz önüne alındığında, atıklardan katma değerli ürünler sentezlemenin önemi giderek artmakta ve bu noktada atıkları kaynak olarak kullanarak grafen bazlı malzemelerin sentezlenmesiyle ilgili çalışmalar da önem kazanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada öncelikle grafen ve özellikleri ile grafenin kullanım alanlarına değinilmiş, takip eden bölümlerde ise grafen sentez yöntemleri, sentez sırasında karbon kaynağı olarak kullanılan atık türleri üzerinde durulmuştur.

## II. GRAFEN SENTEZ YÖNTEMLERİ

Grafen sentezi, yukarıdan aşağıya (top-down) (yıkım) ve aşağıdan yukarıya (bottom-up) (inşa) olmak üzere iki ana yaklaşımla, farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir [12, 13]. Şekil 2'de bu yaklaşımlar doğrultusunda gerçekleştirilen grafen sentez yöntemleri gösterilmektedir.



Şekil 2. Grafen sentez yöntemleri [14]

## 2.1 Yukarıdan Aşağıya (Top-Down) Yöntemler

Bu yaklaşım, yığılı (stacked) grafit katmanları arasındaki van der Waals kuvvetlerini kırmak için yığın (bulk) grafitin eksfoliyasyonu (exfoliating) veya soyulması (peeling) yoluyla grafen üretilmesini içermektedir. Yığın grafit, tek katmanlı, birkaç katmanlı veya çok katmanlı grafit, grafit oksit veya indirgenmiş grafit oksit levhaları gibi farklı grafit bazlı malzemeler elde edilmesi için başlangıç malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yukarıdan aşağıya yaklaşımda, mekanik eksfoliyasyon, kimyasal eksfoliyasyon, ark deşarjı, grafit oksit kimyasal indirgenmesi ve CNT'nin silindirik yapısının açılması gibi yöntemler bulunmaktadır. Yukarıdan aşağıya yöntemler farklı ölçeklere uygun ve düşük maliyetli olmaları açısından tercih edilmektedir. Diğer yandan bu yöntemlerin, tutarlı özelliklere sahip grafen ve türevlerini sentezlemenin zor olması, grafen sentezleme veriminin düşük olması ve sentezin gerçekleşebilmesi için gerekli olan ve doğada sınırlı olarak bulunan grafit hammaddesine büyük ölçüde gereksinim duyulması gibi dezavantajları bulunmaktadır [12, 13].

### 2.1.1 Grafen oksit kimyasal indirgenmesi

Bu yöntem, grafeni büyük miktarlarda sentezlemek için kullanılan geleneksel tekniklerden birisidir. Grafen oksit yaygın olarak, literatürde Hummers, Staudenmaier ve Brodie yöntemleri olarak geçen kimyasal eksfoliyasyon yöntemlerinde belirtildiği gibi potasyum permanganat, nitrik asit ve konsantrasyonlu sülfürik asit içeren bazı oksidanlar veya hidrazin ve türevleri, hidrokinon ve C vitamini kullanılarak grafit oksit oksidasyon işleminden elde edilir. Hidrazin veya hidrazin hidrat, yüksek indirgeme etkinlikleri nedeniyle kabul görmüş indirgeyici maddelerdir.

Fakat bunların kullanımıyla hazırlanan grafenin içindeki azot katkısı, saf ve iletken grafen elde etmeyi zorlaştırmaktadır. Ayrıca hidrazin, çok zehirli ve patlayıcıdır [12, 15, 16].

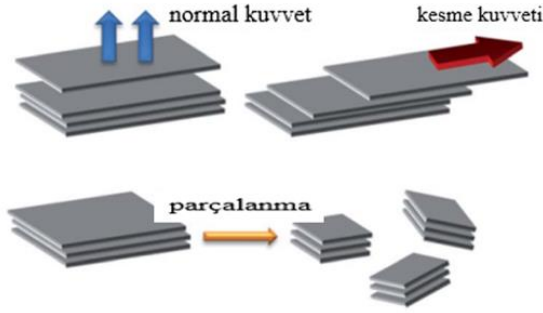
### 2.1.2 Mekanik eksfoliyasyon

Eksfoliyasyon, grafen sentezi için grafit veya diğer karbon kaynaklarının kullanıldığı basit ve yaygın bir tekniktir. Mekanik eksfoliyasyon, kimyasal eksfoliyasyon ve/veya elektrokimyasal eksfoliyasyon gibi çeşitli eksfoliyasyon türleri vardır. Tek katmanlı grafit pullarını tercih edilen substratlar üzerinde sentezlemek için kullanılan yaygın yaklaşımlardan birisi olan mekanik eksfoliyasyon, grafen sentezlemenin ekonomik bir yolu olarak kabul edilen ve en erken bulunan yöntemlerden birisidir [12, 15, 17].

Genel olarak, grafitin grafit pullarına eksfoliyasyonunda, normal kuvvet ve yanal kuvvet olmak üzere iki tür mekanik yol vardır. Selo bant ile mikromekanik bölünmede olduğu gibi iki grafit tabakasını birbirinden ayırırken, van der Waals çekiminin üstesinden gelmek için normal kuvvet uygulanmaktadır. Yanal yönde grafitin kendi kendini yağlama (self-lubricating) yeteneği sayesinde, iki grafit tabakası arasındaki bağıl hareketi desteklemek için yanal kuvvet de uygulanabilmektedir. Diğer bir yardımcı yol ise Şekil 3'te gösterildiği gibi, eksfoliyasyon sırasındaki parçalanma etkisidir. Eksfoliyasyon tekniği tarafından üretilen kuvvet büyük grafit partiküllerini veya grafit katmanlarını daha küçük olanlara parçalayabilmektedir. Bu parçalanma etkisi iki farklı etkiye sahiptir. Bir yandan, grafenin yan boyutunda azalma meydana gelebilir ki bu durum geniş alanlı grafen elde etmek için arzu edilmez. Öte yandan, küçük grafit pullarındaki katmanlar arasındaki daha



küçük birleşik van der Waals etkileşim kuvvetleri bulunması nedeniyle eksfoliyasyon işlemi kolaylaşır (Şekil 3). Bu nedenle, mekanik eksfoliyasyon tekniği kullanılarak monokristal grafen, yüksek derecede düzenli pirolitik grafen, doğal grafen gibi çeşitli grafit malzemeler ve farklı kalınlıktaki grafen levhaların sentezi gerçekleştirilebilmektedir. Son olarak grafeni banttan ayırmak için aseton kullanılır [18, 19].



Şekil 3. Farklı mekanik yollara dayalı grafenin mekanik eksfoliyasyonu [13]

### 2.1.3 Kimyasal eksfoliyasyon

Mekanik eksfoliyasyon gibi, kimyasal eksfoliyasyon da grafen üretimi için yaygın kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntem, çözelti içinde dağılmış olan grafit katmanları arasına büyük miktarda alkali iyonlarının eklenmesi ilkesine dayanmaktadır. Yöntem iki adımdan oluşmaktadır. Grafit katmanları arasındaki zayıf van der Waals bağları, grafit katmanları arasına giren alkali iyonları tarafından kırılır. Ardından, sonikasyon veya hızlı ısıtma uygulanarak grafit tek veya çok katmanlı grafene eksfoliyasyon edilir. Genellikle, tek katmanlı grafen veya grafen oksit eldesi için ultrasonikasyon işlemi kullanılırken, çok katmanlı grafen/grafen oksit eldesi için çoğunlukla dereceli ultra santrifüjleme kullanılmaktadır. Bu yöntemin, kullanılan kimyasal eksfoliyasyon metoduna göre (Brodie, Staudenmaier, Hummers, modifiye edilmiş Hummers ve geliştirilmiş Hummers) çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Grafen ve türevleri, kimyasal eksfoliyasyon yoluyla büyük miktarlarda üretilebilir. Epitaksiyel büyüme veya kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD) gibi aşağıdan yukarıya yöntemlerle karşılaştırıldığında nispeten uygun maliyetlidir. Ham grafit, genişletilmiş grafit ve grafit oksit dahil olmak üzere farklı tipte yığın grafit çeşitleri kaynak olarak kullanılabilir. Elde edilen grafen pullarının özellikleri, eksfoliyasyon koşulları ve çözücü veya kimyasal ajanların seçimi değiştirilerek belirli uygulamalara göre ayarlanabilir. Ancak seçilen çözücüye, kimyasal maddelere ve eksfoliyasyon koşullarına bağlı olarak, bu yöntemle üretilen grafenin kalitesinde büyük değişiklikler olabilmektedir. Kullanılan kimyasallar sonucunda sentezlenen grafen ürününde kimyasal kalıntılar veya safsızlıklar olabileceğinden, ek saflaştırma adımları gerekebilir. Yine süreçte kullanılan bazı çözücüler ve kimyasallar

(sülfirik asit, nitrik asit vb.) tehlikeli olduklarından doğru şekilde kullanılmazlarsa olumsuz sağlık ve çevresel etkileri de olabilir [12, 20-22].

### 2.1.4 CNT'nin silindirik yapısının açılması (unzipping)

CNT'nin silindirik yapısının açılması, karbon tabakayı tek, iki veya birkaç katmanlı grafene düz bir şekilde yerleştirmek için silindirik yapının kesilmesini içerir. Genel olarak, CNT'nin silindirik yapısının açılması, C-C bağı eksenel veya boyuna yönde kırmak için yüksek bir gerinim oranı (high strain rate) gerektirir. Ayrıca bu yöntem, hem tek duvarlı hem de çok duvarlı CNT'ler için geçerli olup, yöntem sonucunda grafen nanoribbon olarak adlandırılan farklı sayıda grafen levha tabakaları elde edilir. CNT'den grafen ve türevlerini üretmek için kimyasal saldırı (attack), plazma aşındırma, interkalasyon, eksfoliyasyon ve metal katalizörlü kesim gibi çok sayıda sıkıştırma yöntemi bulunmaktadır [13, 15]. CNT'nin silindirik yapısının açılması yöntemi mevcut CNT sentez teknikleriyle entegre edilebileceğinden CNT'lerden grafen nanoribbon elde edilmesini nispeten kolaylaştırmaktadır. Başlangıç malzemesi olarak kullanılan CNT'lerin boyutuna ve kiralitesine bağlı olarak, elde edilen grafen nanoribbonların genişliği de istenilen aralıklarda ayarlanabilir. Ancak sentezlenen grafen nanoribbonlarda istenen genişlik ve kenar yapısına ulaşılması, reaksiyon koşullarının hassas bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. Ayrıca bu yöntem CNT gibi pahalı bir başlangıç maddesi gerektirdiğinden ve karmaşıklığından dolayı diğer bazı grafen sentez yollarına göre üretim maliyetlerinde artışa sebep olabilmektedir [12, 13, 15, 23, 24].

### 2.1.5 Ark deşarj yöntemi

Grafen üretimi için kullanılan yukarıdan aşağıya yöntemlerden bir diğeri de ark deşarj yöntemidir. Bölüm 2.2.2'de detayları verilen CVD ile karşılaştırıldığında ark deşarj yöntemi ile üretilen grafen, yüksek plazma sıcaklığının yerinde hata giderme (in situ defect-elimination) veya iyileştirici etkisi ve H<sub>2</sub>'nin istenmeyen amorf karbon üzerindeki aşındırma etkisi nedeniyle iyi kristallenme derecesi ve yüksek termal stabiliteye sahiptir [14]. Reaksiyon odası, bir gaz veya sıvı ortama batırılmış bir anot (karbon kaynağı) ve bir katottan (grafit çubuk) oluşur. Uygulanan elektrik akımı, 3727-5727 °C'ye ulaşan yüksek sıcaklıklı bir plazma üretmek için ortamı ayrıştırır, bu da karbon kaynağını sublimleştirmek için yeterlidir [13, 15]. Ark deşarj yöntemi ile, kontrollü koşullar altında az kusurlu ve yüksek kaliteli grafen sentezi gerçekleştirilebilmektedir. Yöntemde kullanılan gerekli hammaddeler, grafit elektrotlardan ve inert bir gazdan oluştuğundan, nispeten ucuzdur. Bu sayede ark deşarj yöntemi küçük ölçekli grafen üretimi için uygun maliyetli bir yaklaşım haline gelmektedir. Ancak bu yöntem kullanılarak gerçekleştirilen grafen sentezinin verimi düşüktür. Süreç genellikle grafene ek olarak CNT'lerin ve diğer karbon yapılarının

oluşumuyla sonuçlanır ve bu da üretim sürecinin genel verimliliğini azaltır. Ayrıca ark deşarj sürecine dahil olan yüksek sıcaklıklar, önemli miktarda karbonlu atık üretebilmekte ve iyi yönetilmediği takdirde bu durum potansiyel çevre sorunlarına yol açabilmektedir [25, 26].

## 2.2 Aşağıdan Yukarıya (Bottom-Up) Yöntemler

Bu yaklaşımda, farklı kaynaklardan gelen karbon molekülleri yapı taşları olarak kabul edilmektedir. Grafen, piroliz, CVD, epitaksiyel büyüme ve yöntemleri ile karbon atomlarının moleküler büyümesi sonucu üretilmektedir. Aşağıdan yukarıya yöntemler ile neredeyse hatasız ve geniş yüzey alanına sahip grafen ürünleri üretilebilse de, bu yöntemler genellikle yüksek üretim maliyeti ve karmaşık operasyonel kurulum gerektirmektedir [13, 15].

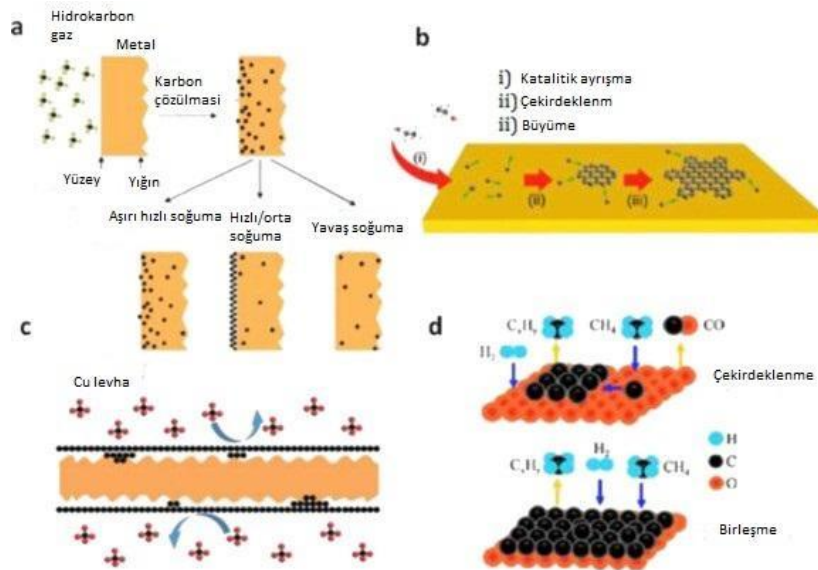
### 2.2.1 Piroliz

Piroliz, yüksek oranda grafitli karbon malzemeleri elde etmek için kullanışlı bir yöntemdir. Prensip olarak, yüksek sıcaklık ve oksitleyici olmayan bir ortamda grafen türevlerinin hazırlanması için kullanılan bir tekniktir. Çeşitli atık kaynakları kullanılarak yapılan piroliz işlemleri ile grafen ve türevlerinin üretimi gerçekleştirilmiş olup son çalışmalar, endüstriyel atıkların grafenli malzemelere dönüştürülmesi üzerinde yoğunlaşmıştır [27]. Örneğin Wang vd. [28] yaptıkları çalışmada, metanın tek aşamalı ark plazma pirolizi ile birkaç katmanlı grafen tozu sentezlemişlerdir. Metot, argon taşıyıcı gazıyla belirli oranlarda karıştırılan metanın ve hidrojenin plazma bölgesinden geçirilmesi sonucu grafen üretimini içermektedir. Üretilen grafen tozları LiFePO<sub>4</sub> pilin performansının geliştirilmesinde kullanılmıştır. Thangaraj vd. [29] şeker kamaşı bitkisinin kuru yapraklarını karbon kaynağı olarak kullanarak demir (III) sitrat katalizöründe, iki

aşamalı piroliz ile grafen oksit sentezi gerçekleştirmişlerdir.

### 2.2.2 CVD yöntemi

CVD, farklı cihazlarda kullanılmak üzere yüksek yapısal kalitede tek katmanlı grafen hazırlamak için en kullanışlı yöntemlerden birisidir. Bir metali yüksek sıcaklıklarda farklı hidrokarbon kaynaklarına maruz bırakarak geniş alanlı grafen numuneleri hazırlanabilir. Plazma ile güçlendirilmiş CVD, termal CVD, sıcak/soğuk duvarlı CVD gibi farklı CVD yöntemleri mevcuttur. Grafen oluşumunun kesin mekanizması büyüme substratına bağlıdır, fakat tipik olarak, hidrokarbonların ayrışmasından sonra metal üzerinde çekirdeklenen karbon atomlarının büyümesiyle başlar ve çekirdekler daha sonra büyük alanlara genişler. Metan, etilen veya asetilen gibi gaz halindeki hidrokarbonların yanı sıra, heksan veya pentan gibi sıvı kaynaklar da kullanılırken, CVD’de grafen üretimi için kullanılacaklar arasında gıda, böcekler ve atıklar gibi oldukça çeşitli malzemeler bulunur. Grafenin büyüme substratından, ilgilenilen bir substrata aktarılması, grafenin kimyasal inertliği nedeniyle zor olabilir ve termal dalgalanmalar da üretilen malzemenin stabilitesini etkileyebilir. Ayrıca, CVD sürecinin karmaşıklığı ve spesifik yöntem için yüksek enerji talepleri bu yöntemin zorluklarından, ancak CVD hala geniş alan grafen üretimi için en başarılı yöntemlerden biri olmaya devam etmektedir [19]. Katı maddelerin buharlaştırılması ve katıların bir substrat üzerine yoğunlaşma yoluyla birikmesi Şekil 4’te örneklerinin verildiği gibi (a) metal yüzeyde karbon ayrışması [30], (b) bakır (Cu) folyo üzerinde grafenin büyümesi [31], (c) Cu levha üzerinde grafenin büyümesi [32] ve (d) safir (sapphire) üzerinde grafen için büyüme modeli [33] gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 4.** CVD’de grafen üretimi: (a) metal yüzeyde karbon ayrışması, (b) bakır (Cu) folyo üzerinde grafenin büyümesi, (c) Cu levha üzerinde grafenin büyümesi ve (d) safir (sapphire) üzerinde grafen için büyüme modeli [30-33]

### 2.2.3 Epitaksiyel büyüme

Tek bir kristal silisyum karbür (SiC) yüzeyinde epitaksiyel termal büyüme, en çok kullanılan grafen sentez yöntemlerinden birisidir. Epitaksi terimi, tek kristalli bir filmin tek bir kristalli substrat üzerinde biriktirilmesine izin veren bir yöntem olarak tanımlanabilir. Biriken film epitaksiyel film veya tek kristalli substrat üzerindeki epitaksiyel tabaka olarak adlandırılır ve süreç epitaksiyel büyüme olarak bilinir. Epitaksiyel grafen büyümesi, yüksek kristalli grafeni tek kristalli SiC substratlar üzerine üretme işlemidir. Bir substrat üzerinde biriken film aynı malzemeden olduğunda, homo-epitaksiyel tabaka olarak bilinir ve eğer film ve substrat farklı malzemelerse, buna hetero-epitaksiyel tabaka denir [34]. Bu yöntem kullanılarak mükemmel kristal yapıya ve düşük kusur yoğunluğuna sahip yüksek kaliteli grafen üretilmektedir. Grafen kafesinin bütünlüğü, alt tabaka ve kafes eşleşmesi ile korunur. SiC substratı üzerinden sentezlenen grafenler, yüksek frekanslı elektronikler, radyasyona dayanıklı cihazlar ve ışık yayan cihazların üretiminde kullanılabilir. Ancak substrat üzerinde büyütülen grafenin diğer yüzeylere aktarılması zor olabilir ve aktarım işlemi sırasında kusurlar veya safsızlıklar ortaya çıkabilir. Epitaksiyel olarak büyütülmüş grafenin geniş alanları üzerinde homojenliğin sağlanması zor olabilir ve substrat boyunca kalitede farklılıklar meydana gelebilir. Epitaksiyel büyüme süreci tipik olarak yüksek sıcaklıklar gerektirir ve bu da sıcaklığa duyarlı bazı malzemeler ve cihazlarla uyumluluğunu sınırlayabilir. Ek olarak yüksek kaliteli grafen üretebilmesi için

proseste SiC gibi belirli bir substrat kullanılması gerekmektedir. Diğer grafen üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında bu, farklı uygulamalar için mevcut olan substrat çeşitliliğini sınırlamaktadır [12, 13, 35].

### III. GRAFEN SENTEZİ İÇİN ATIKLARIN KULLANIMI

Grafen ve türevlerinin seri üretimi, karbon kaynağının sürekli teminini gerektireceğinden, hammadde türü, grafen ve türevlerinin sentezinin ekonomik fizibilitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Grafit, yukarıdan aşağıya grafen sentezi için en yaygın kullanılan hammaddedir. Grafit hammaddesinin yanı sıra, grafen sentezi için hem yukarıdan aşağıya hem de aşağıdan yukarıya işlemlerde organik atıklar, atık plastikler gibi daha sürdürülebilir karbon kaynakları ile çalışmalar yapılmıştır. Yapılan literatür taraması sonucunda grafen ve türevlerinin sentezinde karbon kaynağı olarak atıkları kullanan çalışmaların özetleri Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1 incelendiğinde en fazla kullanılan sentez prosesinin piroliz olduğu, bunu CVD prosesinin takip ettiği görülmektedir. Piroliz ve CVD proseslerinde karbon kaynağı olarak çoğunlukla atık plastikler kullanılmış ve elde edilen grafen türü genellikle grafen nanolevha olmuştur. Tablo 1’den de görüldüğü üzere, oldukça geniş bir spektrumda atık türünün karbon kaynağı olarak kullanılıp, farklı grafen türevlerinin elde edilebilmesi mümkündür. Bu durum, döngüsel ekonomi ve sürdürülebilir atık yönetimi ilkeleri açısından da atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlayacak önemli bir noktadır.

**Tablo 1.** Atıklardan grafen ve türevlerinin sentezi

Proses Adı	Karbon Kaynağı	Ürün	Referans
Piroliz	Polipropilen (PP), Polietilen (PE) ve polietilen tereftalat	Grafen nanolevha	Garg vd. [36]
Piroliz	Atık plastik	Grafen nanolevha	Karakoti vd. [37]
Piroliz	Atık plastik	Grafen nanolevha	Tatrari vd. [38]
Piroliz	Kafur yaprağı	Grafen nanolevha	Liu vd. [39]
Piroliz	Atık plastikler (PP, PE, Polistiren (PS))	Grafen nanolevha	Pandey vd. [40]
Piroliz	Üre, kristal şeker	Azot katkılı grafen	Pan vd. [41]
Piroliz, sonokimya			Danafar vd. [42]
Atmosferik basınçta kimyasal buhar biriktirme yöntemi (AP-CVD)	Atık plastik	Grafen kristalleri	Sharma vd. [43]
AP-CVD	PS	Milimetre boyutlu grafen	Wu vd. [44]

CVD	Polimetil metakrilat (PMMA)	Grafen	Li vd. [45]
CVD	Kurabiye, çikolata, çimen, plastik, hamamböceği ve köpek dışkısı	Grafen	Ruan vd. [46]
Karbonizasyon, KOH aktivasyonu	Kahverengi pirinç kabuğu	Grafen nanotoz	Sankar vd. [47]
KOH aktivasyonu	Pirinç kabuğu	Birkaç katmanlı grafen	Singh vd. [48]
Mikrodalga destekli hidrotermal işlem, sonikasyon ve HNO <sub>3</sub> ile muamele	Atık kâğıt	Grafen oksit kuantum noktaları	Adolfsson vd. [49]
Kül fırını	Şeker kamışı küspesi, portakal kabuğu	Grafen oksit nanopartikülleri	Hashmi vd. [50]
Otoklav	Ekmek	Yüksek kaliteli tek katmanlı grafen	Panahi-Kalamuei vd. [51]
One-pot redoks sentezi	Atık grafit	İndirgenmiş grafen oksit	Li vd. [52]

### 3.1 Tarımsal Atıklar

1900'lü yılların ikinci yarısından itibaren dünya genelinde tarımsal üretim, ekilebilir alanların genişlemesi ve hızla artan dünya nüfusunun gıda gereksinimini karşılamak üzere üç katına çıkmıştır. Günümüzde tarım sektörü günde ortalama 23,7 milyon ton gıda üretmektedir. Dünya genelinde birincil mahsül üretimi 2000-2020 yılları arasında %52 artarak 9,3 milyar tona ulaşmıştır. Toplam üretimin yaklaşık üçte biri ile tahıllar üretilen ana ürün grubu olurken, bunu %23 ile şeker bitkileri, her biri %12 olmak üzere sebzeler ve yağ bitkileri takip etmiştir. Et üretimi ise 104 milyon ton artışla 337 milyon tona ulaşmıştır. Bu gıdaların üretimi sırasında toprak, hava ve su kaynakları üzerinde olumsuz etkilere sebep olarak çevre üzerinde büyük bir baskı oluşturan tarımsal üretim sektörü ekosistemlerin sürdürülebilirliğini ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Her yıl, tüm sera gazı emisyonlarının %21'inden sorumlu yaklaşık 998 milyon ton tarımsal atık üretildiği tahmin edilmektedir [53, 54, 55]. Hayvandan kaynaklanan veya tarımsal kökenli çok çeşitli atıklar çevreye atılmaktadır. Bu atıklar biyolojik olarak etkin bir şekilde parçalanabilseler de, karbon kaynağı olarak grafen üretiminde kullanılmaları, katma değerli ürün olarak kullanıma potansiyelleri açısından önemlidir [12].

Grafen ve türevlerinin üretiminde kullanılan tarımsal atıklar incelendiğinde kristal şeker ve üre [41], kahverengi pirinç kabuğu [47], pirinç kabuğu külü [48], şeker kamışı küspesi [50], portakal kabuğu [50], kafur yaprakları [39] ve soğan kabuğu [42] gibi atıkların karbon kaynağı olarak kullanıldığı görülmüştür. Pan vd. [41], gelişmiş oksijen indirgeme reaksiyonu

(oxygen reduction reaction, ORR) elektrokatalizörlerinin tasarlanması için tek adımlı piroliz yöntemi ile azot katkılı grafen (nitrogen-doped graphene, NG) sentezi gerçekleştirmek için *kristal şeker ve üreden* oluşan homojen bir karışım kullanmışlardır. Karışımı argon (Ar) gaz akışı altında 3,5 °C/dk hızında farklı sıcaklık değerlerine (800 °C, 900 °C ve 1000 °C) ısıtmış ve üç farklı ürün elde etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda 1000 °C sıcaklığa kadar ısıtılarak elde edilen ürünün, -0,25 V'da 21,33 mA cm<sup>-2</sup>'lik yüksek kinetik akım yoğunluğu, dört elektronlu reaksiyon süreci, yüksek seçicilik ve uzun çalışma dayanıklılığı dahil olmak üzere alkali ortamda mükemmel ORR performansı sergilediği görülmüştür. 1000 °C'lik tavlama sıcaklığında ulaşılan düşük azot katkı konsantrasyonu, yüksek grafitleşme derecesi, gelişmiş iletkenlik, yüksek yüzey alanı ve gözenek hacminin etkileri sayesinde azot katkılı grafenin ORR'ye yönelik dikkate değer bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Sankar vd. [47], sürdürülebilir bir elektrokimyasal enerji depolama elektrotunun tasarımı için *kahverengi pirinç kabuklarının (rice husks, RH)* karbonizasyonu ve ardından tek aşamalı KOH aktivasyon işlemi yoluyla grafen nanolevha sentezlemişlerdir. Kahverengi-RH, pirinç kabuğu külü elde etmek için 500°C'de yakılmış ve elde edilen kül, bir kül-KOH karışımı üretmek için KOH ile karıştırılıp, 700°C'de tavlansak akive edilmiştir. Yapılan mikroyapısal analizler sonucunda, sentezlenen grafen nanolevhaların kenarları ve bir dizi katlanmış bölgesi olan, levha benzeri bir yapı sergilediği görülmüştür. Raman analizi sonucunda elde edilen, D ve G bantlarının yoğunluk oranı (I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub>) grafen bazı numunelerin kusurlarını tahmin etmeye yardımcı

olur; daha yüksek bir oran grafen üzerinde daha fazla kusur olduğu anlamına gelmektedir. 2D ve G bantlarının yoğunluk ( $I_{2D}/I_G$ ) oranının ise grafen katmanlarının sayısına bağlı olduğu bilinmektedir.  $I_{2D}/I_G \sim 2-3$  oranı tek katmanlı grafene,  $2 > I_{2D}/I_G > 1$  çift katmanlı grafene ve  $I_{2D}/I_G < 1$  çok katmanlı grafene denk gelmektedir. Raman analizinden elde edilen  $I_D/I_G$  ve  $I_{2D}/I_G$  oranları sırasıyla 0,953 ve 0,36 olarak bulunmuş, bunun da birkaç katmanlı grafen nanolevhaların varlığını kanıtladığı anlaşılmıştır. Daha sonra, sentezlenen grafen nanolevhalar ile birlikte poliviniliden diflorür ve karbon siyahı kullanılarak elektrot hazırlanmıştır. Hazırlanan bu elektrota uygulanan elektrokimyasal ölçümler sonucunda, elektrotun  $0,5 \text{ mA cm}^{-2}$  akım yoğunluğunda  $115 \text{ F g}^{-1}$  spesifik kapasitans ve mükemmel döngüsel stabilite ile  $36,8 \text{ W h kg}^{-1}$  yüksek enerji yoğunluğu sergilediği ve elektrokimyasal süperkapasitörlerin üretiminde uygun maliyetli ve sürdürülebilir elektrotlar olarak tarımsal bir atıktan sentezlenen grafen nanolevhaların kullanılabilme potansiyelinin olduğu ortaya koyulmuştur. Singh vd. [48], yaptıkları çalışmada birkaç katmanlı grafeni, *pirinç kabuğu külü (RHA)* ve potasyum hidroksit (KOH) kullanarak sentezlemişlerdir. 3 g RHA ve 15 g KOH ile karıştırılıp bir dizi işlemde geçirildikten sonra karışım kül fırınında (muffle furnace)  $900^\circ\text{C}$ 'de 2 saat tavlansmıştır. Bu aktivasyon işleminden sonra, fazla KOH'u uzaklaştırmak için karışım birkaç kez distile su ile yıkanmıştır. Sentezlenen ürünün analiz sonuçları grafen ve sentez işlemleri öncesi RHA'nın safsızlıklarının yeteri kadar giderilememesinden kaynaklanan silika nanopartiküllerin varlığını göstermiştir. Raman analizleri sonucunda  $I_D/I_G$  ve  $I_D/I_{2G}$  oranları sırasıyla 0,55 ve 0,67 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, RHA kullanılarak sentezlenen grafende daha fazla grafitik yapının mevcut olduğunu ve numunenin birkaç katmanlı grafen içerdiğini göstermektedir. Son olarak yapılan elektrokimyasal analizde grafenin özgül kapasitansı  $500 \text{ mV s}^{-1}$ 'de  $86 \text{ F g}^{-1}$  bulunmuş ve silika varlığından dolayı yavaş elektron transfer sürecine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen kapasitans değerinin düşük olmasına rağmen, yapılan literatür çalışması sonucunda nano boyutlu silikanın varlığının Li-ion pil kullanan enerji depolama cihazları için faydalı olabileceği, silika ilavesinin kapasiteyi, döngüsel kararlılığı ve elektrot verimliliğini artırdığı bulunmuştur. Hashmi vd. [50] *şeker kamışı küspesi, portakal kabuğu* gibi tamamen tarımsal atıklar kullanarak grafen oksit (GO) nanopartikülleri üretmişlerdir. Şeker kamışı küspesi kalıntısı, portakal kabuğu ve pirinç kepeği toz haline getirildikten sonra ayrı ayrı ferrosen ile karıştırılıp  $300^\circ\text{C}$ 'de 15 dakika boyunca kül fırınına yerleştirilmiştir. Aynı işlem şeker kamışı küspesi kalıntısı, portakal kabuğu tozu ve pirinç kepeği tozu karışımı için  $400^\circ\text{C}$ 'de 15 dakika olarak tekrar edilmiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizler sonucunda üç farklı tarımsal atığın karışımından elde edilen grafen oksitin pul benzeri yapıya sahip saf grafit levhalara

benzediği, ortalama partikül boyutunun 1–4 nm olduğu ve  $734^\circ\text{C}$  sıcaklıkta yaklaşık %15'lik ağırlık kaybı ve %85'lik kararlılık ile en iyi termal kararlılığı gösterdiği görülmüştür. Liu vd. [39], *kafur yapraklarından* grafen nanolevha elde etmek için KOH destekli yerinde katalizleme yöntemini kullanmışlardır. Kafur yaprakları,  $3^\circ\text{C}/\text{dk}$ 'lık bir ısıtma hızında 1 saat boyunca  $600^\circ\text{C}$ 'de azot atmosferi altında sabit yataklı bir reaktörde piroliz işlemine tabii tutulmuştur. Elde edilen karbonize toz, KOH ile homojen bir şekilde karıştırılmış ve karışım, azot atmosferi altında bir tüp fırınında önceden ayarlanmış sıcaklıklarda ( $700, 800, 900$  ve  $1000^\circ\text{C}$ )  $2^\circ\text{C}/\text{dk}$  ısıtma oranıyla 1 saat süreyle aktive edilmiştir. Elde edilen ürünler ardarda HCl çözeltisi ve damıtılmış su ile iyice yıkanmış ve  $110^\circ\text{C}$ 'de gece boyunca kurutulmuştur. Daha sonra, üretilen grafenli malzemelerin elektrokimyasal özelliklerini araştırmak için 6 M KOH sulu üç elektrotlu bir sistem kullanılmıştır. Üretilen grafen nanolevhaların raman analizi sonucundan elde edilen  $I_D/I_G$  oranı  $700^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$  ve  $1000^\circ\text{C}$  sıcaklıklar için 1,04, 0,93, 0,54 ve 0,40 değerlerini vermiştir, bu da TEM sonuçlarıyla uyumlu olarak aktivasyon sıcaklığı ne kadar yüksekse grafitik derecenin de o kadar yüksek olduğunu göstermiştir. Yapılan diğer analizler snucu elde edilen grafenlerinin yüksek iletkenlik, hızlı iyon taşıma, düşük iç direnç ve sağlam yapı iskelesi (robust scaffolding) gibi özelliklerinden dolayı süper kapasitörlerde kullanıldığında mükemmel bir kapasitif davranış sağlayabileceği gözlemlenmiştir. Danafar vd. [42], sonokimya ile birleştirilmiş piroliz yoluyla *soğan kabuklarından* nano boyutlu grafen oksit pulları sentezlemişlerdir. Yüzey tozunu gidermek için soğan kabukları deiyonize su ile yıkanmış ve hava yardımıyla kurutulmuştur. Ardından, azot gazı atmosferinde  $700^\circ\text{C}$ 'de pirolize tabii tutulmuştur. Elde edilen grafen oksit benzeri karbon pulları, kalan yan ürünleri ortadan kaldırmak için su ve etanol ile yıkanmış, ardından tek tip boyutta nano boyutlu pullara dönüştürmek için deiyonize suda sonikasyona tabii tutulmuştur. Sonikasyondan önce ve sonra grafen oksit benzeri pulların yapısını incelemek için X-ışını kırınımı kullanılmıştır. Elde edilen ürün,  $2\theta = 23,14^\circ$ 'de bir pik ve  $30-70^\circ$  bölgesinde bir dizi pik göstermiştir.  $2\theta = 43,43^\circ$ 'deki kırınım piki grafitik yapının pikine karşılık gelmektedir. Nano boyutlu grafen oksit benzeri pulların XRD deseninde gözlemlenen keskin (002) ve (100) pikleri ise düzenli olarak istiflenmiş grafitik bir yapıya karşılık gelmektedir. Yapılan biyogüvenlik çalışmalarında, sentezlenen nano boyutlu grafen oksit benzeri karbon pullarının ilaç taşıyıcıları ve radyoprotektif ajanlar gibi biyomedikal uygulamalarda kullanım potansiyelleri olabileceğini göstermiştir.

### 3.2 Plastik Atıklar

Son 50 yılda, plastiğin AB ekonomisindeki rolü büyük ölçüde artmıştır. Avrupa, her yıl %40'ı ambalaj olmak üzere 58 milyon ton plastik üretmektedir [56]. Bu nedenle AB, plastik ürünlerin AB'de tasarlanma, kullanılma, üretilme ve geri dönüştürülme şekli

değiştirmek için Ocak 2018'de Döngüsel Ekonomi Kapsamında ilk Avrupa Plastik Stratejisini geliştirmiştir. Strateji ile plastik ürünlerin daha iyi tasarımı, geri dönüşüm oranlarının yükseltilmesi, geri dönüştürülmüş plastiklerin endüstride yeniden kullanımı öngörülmektedir.

Plastikler, dünya çapında üretilen ve sonuçta büyük miktarda atık oluşumuna yol açan ve yaşamın her alanında kullanılan bir malzemedir. Zengin bir karbon kaynağı olan plastik atıklar sürdürülebilir geri dönüşüm ve bu atıklardan üretilen grafen türevli malzemelerin çeşitli uygulamalarda kullanılmaları açısından önerilmektedir [12]. Literatürde, tek tip veya plastik karışımların grafene dönüştürülmesi ile ilgili çalışmalara odaklanıldığı görülmüştür.

Atık plastik kullanılarak grafen ve türevlerinin sentezlendiği çalışmalar incelendiğinde, piroliz ve CVD metodlarının ön plana çıktığı görülmektedir. Yapılan tüm piroliz çalışmalarında yavaş ve hızlı ısıtmanın kullanıldığı iki aşamalı bir yöntem tercih edilmiş olup, yavaş ısıtmanın kullanılan atık plastiklerdeki katma değerli yakıtların, vaksların ve gazların ayrıştırılmasıyla grafen nanolevhaların çekirdeklenmesinde önemli bir adım olduğu belirtilmiştir. Pandey vd. [40], yaptıkları çalışmada 35 kg *PP, PE ve PS* karışımından oluşan atık plastiği bentonit nanokil katalizörlüğünde ve azot gazı atmosferinde 5 °C/dk ısıtma hızında 400 °C'ye ardından 10 °C/dk ısıtma hızında 750 °C'ye kadar piroliz etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda grafen nanolevha elde edildiği doğrulanmıştır. Tek seferde yapılan bu piroliz işlemi ile 5,25 kg saf grafen nanolevha üretilerek %15'lik bir ürün verimi elde etmişlerdir. Sentezlenen üründe  $I_D/I_G$  oranı 0,90 olarak bulunmuştur. Sentezlenen grafenin termodinamik kararlılık, kuantum kapasitesi ve elektronik özelliklerini belirlemek için yapılan hesaplamalarla enerji depolama uygulamaları için uygun olduğu öngörülmüştür. Ayrıca, sentezlenen grafen güneş pilleri, yakıt hücreleri, ilaç dağıtımı, polimer nanokompozitler vb. gibi çeşitli diğer uygulamalar için de kullanılabilirliğine yer verilmiştir. Tatrari, vd. [38] de yaptıkları çalışmada yaklaşık 35 kg *atık plastiği* inert atmosfer ve bentonit nanokil katalizörlüğünde iki aşamalı piroliz etmişlerdir. Piroliz 8 °C/dk, 400 °C ve 10 °C/dk, 800 °C'de gerçekleştirilmiştir. Raman analizi sonucu  $I_D/I_G$  oranı 0,87 olarak bulunmuştur. TEM görüntüsü sonuçlarından da yüksek sıcaklığın karbon katmanlarının grafen levhalarına benzer yapıları ayrılmasına yardımcı olduğu bulunan kusurlu bölgelerin varlığının, saflaştırma işlemi sırasında asidik işlemlerden kaynaklanabileceğini göstermektedir. Yaptıkları çalışmada Karakoti vd. [37], iki farklı katalizör (montmorillonit kil ve çinko oksit) kullanarak *atık plastikten* grafen nanolevha sentezlemişlerdir. İki aşamalı pirolizi 400 °C ve 920 °C'de gerçekleştirmişlerdir. Montmorillonit kil kullanılarak sentezlenen grafen nanolevhaların verimi yaklaşık %15

iken, çinko oksit kullanılanların verimi yaklaşık %13 olarak bulunmuştur. Farklı verimler elde edilmesi iki farklı katalizör kullanılmasına bağlanmıştır. Çinko oksit kullanılarak sentezlenen grafen nanolevhaların  $I_D/I_G$  oranı 1,001 olarak bulunmuştur. Gerçekleştirilen diğer analizler sonucunda montmorillonit kil ile sentezlenen grafen nanolevhaların daha saf ve uygun yüzey morfolojisine sahip olduğu ve bunlar sayesinde daha yüksek elektrokimyasal davranış performansı gösterdiği sonucuna varılmıştır. Garg vd. [36] çalışmalarında atık *PP, PE ve PET karışımını* kullanmışlardır. Alüminyum oksitin katalizör görevi gördüğü çalışmada iki aşamalı pirolizi 400 °C ve 850 °C'de gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen grafen nanolevhaların 3-4 nm kalınlığında ve kenar kusurlarına sahip olduğu ve bu kenar kusurları sebebiyle yarı iletken özelliklerin olduğu görülmüştür. Raman analizi sonucu  $I_D/I_G$  oranı 0,84 olarak bulunmuştur. Ayrıca sentezlenen grafen nanolevhaların, termoelektrik özellikleri incelenmiş, elde edilen sonuçlardan yola çıkarak çeşitli termoelektrik cihazlarda kullanılan termoelektrik malzemelerinde kullanılabilirliğini görülmüştür. Atık plastiklerin pirolizi ile elde edilen grafen çalışmalarını genel olarak incelediğinde, sıcaklığın ve kullanılan katalizörün nihai ürün eldesi ve kalitesinde önemli etkileri olduğu görülmektedir.

Sharma vd. [43], malzeme ambalajlamada kullanılan, PE ve PS bazlı polimer bileşenleri açısından zengin *atık plastikten* grafen kristalleri üretmişlerdir. Grafen sentezi için substrat Cu folyo kullanılmıştır. Cu folyo temizlendikten sonra Cu substratı, tane boyutunu büyütme, kafes uyumsuzluklarını ve çekirdeklenme alanlarının sayısını sınırlamaya yardımcı olan dislokasyonları azaltmak için besleme stoğu uygulanmadan önce 1020°C'de H<sub>2</sub> atmosferinde 30 dakika boyunca tavlama yapılmıştır. Grafen sentezi 3 mg atık plastik kullanılarak sırasıyla 98 ve 2,5 sccm akış hızına sahip bir Ar ve H<sub>2</sub> gaz karışımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan optik analiz ve SEM analizi, altıgen şekilli grafen büyümesini göstermiştir. Raman analizi sonucu grafitik G ve ikinci dereceden 2D pikleri sırasıyla 1588 ve 2695 cm<sup>-1</sup>'de gözlenmiştir. Raman spektrumları, tek grafen kristali içinde çift katmanlı bir yapının oluştuğunu doğrulamaktadır. Katı karbon kaynağı olarak *PS* kullanan Wu vd. [44], AP-CVD ile milimetre boyutlu grafen tanelerini sentezlemişlerdir. Substrat olarak Cu folyo kullanılmıştır. Cu folyo, H<sub>2</sub> ve Ar gazı karışımında 1050°C'de 60 dakika tavlama tabi tutulmuştur. Grafen sentezi, Ar ve H<sub>2</sub> karışımı kullanılarak 30-80 dakika boyunca 950-1050 °C arasında değişen sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Çekirdeklenme yoğunluğu ve grafen tanelerinin büyüme hızının PS sıcaklığı ve H<sub>2</sub> akış hızı ayarlanarak optimize edilen çalışmada ~100 çekirdek/cm<sup>2</sup> kadar düşük çekirdeklenme yoğunluğu elde edilmiş ve 5000-8000 cm<sup>2</sup> V<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup> arasında değişen alan etkisi hareketliliği ile 1,2 mm'ye kadar altıgen şekilli tek kristal tane elde



edilmiştir. Raman analizi sonucunda  $I_{2D}/I_G$  oranının 2-3 olduğu bulunmuştur. Grafendeki kusurların bir ölçüsü olan D bandı piki ( $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ ) spektrumunda gözlenmemiştir. Elde edilen oran, izole edilen altıgen şekilli grafen tanelerinin çoğunun tek katmanlı grafen olduğunu göstermektedir. Li vd. [45], yaptıkları çalışmada **PMMA** kullanarak grafen sentezlemiştir. Grafen sentezi, iki ayrı bölmeyle sahip CVD fırınında gerçekleştirilmiştir. PMMA, ısıtma bölgesinin hemen dışında, kuvars tüpün gaz giriş tarafına yerleştirilmiştir. Daha sonra Cu folyolar, 20 dakika boyunca  $\text{H}_2$  atmosferinde  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye tavllanmış ve istenen büyüme sıcaklığına ( $1000, 800, 700$  ve  $400^\circ\text{C}$ ) soğutulmuştur. Ardından PMMA, toplam basınç 8 ila 15 Torr arasında tutulurken,  $\text{H}_2$  akışı  $50 \text{ sccm}$ 'ye düşürülerek bir ısıtma bandı ile ısıtılmıştır. Tipik büyüme süresi yaklaşık 45 dakikadır. Büyümeden sonra, fırın açılarak hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulmuş ve büyütülen grafen filmler,  $300 \text{ nm}$  kalınlığında bir oksit kaplama tabakası ile bir Si alt-tabakası üzerine aktarılmıştır. Raman analizleri tek katmanlı grafenin tipik özelliklerini göstermektedir: 2D piki  $\sim 2682 \text{ cm}^{-1}$ 'de görülmektedir ve G bandının 2D bandına yoğunluk oranı ( $I_G/I_{2D}$ ) yaklaşık 0,5 olarak bulunmuştur. D bandının ( $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ ) spektrumunda bulunmaması PMMA kullanılarak sentezlenen grafen filmlerin yüksek kalitede olduklarını göstermektedir. Optik geçirgenlik ölçümü sonucunda sentezlenen grafen filmin  $550 \text{ nm}$ 'deki geçirgenliği tek katmanlı grafen (%97,1) için bildirilen değerle uyumlu olarak %97,2 olarak bulunmuştur. Atık plastiklerden CVD metodu kullanılarak grafen ve türevlerinin sentezlendiği çalışmalar incelendiğinde genel olarak piroliz metoduna göre daha yüksek sıcaklıkların tercih edildiği görülmüştür. Tüm çalışmalarda substrat olarak Cu folyo ve beslene gaz olarak  $\text{H}_2$  tercih edilmiştir. Raman analizi sonucunda grafendeki kusurların bir ölçüsü olan D bandı pikinin spektrumlarında bulunmaması, pirolize kıyasla CVD ile sentezlenen grafenlerin daha yüksek kalitede olduğuna işaret eder.

### 3.3 Diğer Atıklar

Yukarıda verilen çeşitli organik atık ve plastik atıkların yanı sıra, son zamanlarda düşük maliyetli ve bol miktarda bulunan atıklar da grafen üretimi için kullanılmıştır [12]. Bu atıklar arasında yiyecek, böcek vb. farklı atıklar [46], selüloz veya atık kâğıt [49], lityum iyon bataryalardaki atık grafit [52] ve ekmek atığı [51] gibi atıklar bulunmaktadır.

Ruan vd. [46] yaptıkları çalışmada  $\text{H}_2/\text{Ar}$  akışı altında  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir Cu folyonun arka yüzeyinde doğrudan grafen sentezlemek için ön saflaştırma olmadan kullanılan, kolay elde edilen, düşük veya negatif değerli ham karbon içeren altı malzeme (**kurabiye, çikolata, çimen, atık plastik, hamamböcekleri ve köpek dışkı**) kullanarak daha ucuz bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Proses genelinde  $10 \text{ mg}$  kuru karbon kaynağı bir Cu folyonun üzerine ve folyo,  $1050^\circ\text{C}$ 'lik bir tüp fırına yerleştirilmiştir. Numune,  $\text{H}_2$  ve Ar ile

düşük basınç altında 15 dakika süreyle tavlansmıştır. Sentezlenen grafenler Cu folyonun ön tarafından kazanarak alındıktan sonra raman spektroskopisi, X-ışını fotoelektron spektroskopisi, ultraviyole görünür ışık spektroskopisi ve transmisyon elektron mikroskobu ile analizleri yapılmıştır. Sentezlenen tüm grafen örneklerinin raman spektrumlarındaki küçük D pikleri elde edilen ürünlerde az sayıda kusurun bulunduğu bir göstergesidir. Büyük 2D/G oranı ise sentezlenen grafenlerin yüksek kaliteli tek katmanlı grafen olduğunu göstermektedir. Genel olarak G ve 2D pikleri sırasıyla  $1585,5-1591,4 \text{ cm}^{-1}$  ve  $2682,6-2693,9 \text{ cm}^{-1}$ 'de yer almıştır. X-ışını fotoelektron spektroskopisi analizi sonucu  $284,5 \text{ eV}$ 'de elde edilen keskin pikler sp<sup>2</sup> grafitik pike işaret etmektedir. Ultraviyole görünür ışık spektroskopisi ve transmisyon elektron mikroskobu analizleri ile de grafenin tek tabakalı yapısı varlığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu karbon kaynaklarından sentezlenen tek katmanlı grafenin yüksek kalitede olduğu görülmüştür. **Selüloz veya atık gazete** kâğıdının karbon kaynağı olarak olarak kullanıldığı çalışmalarında Adolffson vd. [49], biyobazlı grafen oksit kuantum noktaları (graphene oxide quantum dots, GOQD) ve ara ürünler olarak karbon nanoküreler (carbon nanospheres, CN) sentezlemiştir. Atık gazeteden elde edilen selüloz, katalizör olarak  $\text{H}_2\text{SO}_4$  kullanılarak mikrodalga destekli hidrotermal işlem yoluyla CN hazırlamak için kullanılmıştır. GOQD'nin hazırlanması için,  $\text{HNO}_3$  ve CN'den hazırlanan bir çözelti, sonikasyon banyosunda  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika sonikasyona tabi tutulmuştur. GOQD-30 ve GOQD-60, manyetik karıştırma ile  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir yağ banyosunda sonikasyonlu çözeltilerin 30 ve 60 dakika ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Sentezlenen nihai GOQD boyutunun ısıtma süresi ile ayarlanabildiği, 30 ve 60 dakikalık ısıtmanın sırasıyla  $\sim 3$  ve  $\sim 1 \text{ nm}$  çaplarında GOQD ürettiği bulunmuştur. Li vd. [52] yaptıkları çalışmada, ömrünü tamamlamış **lityum iyon bataryalardaki atık grafiti** kullanarak one-pot redoks reaksiyonu ile indirgenmiş grafen oksit (rGO) hazırlamışlardır. Bir behere  $5 \text{ g}$  atık grafit ve konsantre  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ilave edilmiştir. Ardından behere  $\text{KMnO}_4$  yavaş yavaş eklenerek karışım su banyosuna aktarılmıştır. Daha sonra heterojen bir bulamaç oluşturmak için karışıma damla damla deiyonize su ilave edilmiştir. Hemen ardından, karışıma peroksiasetik asit ilave edilmiştir. Süspansiyon, hiçbir kabarcık oluşmayana kadar gece boyunca oda sıcaklığında tutulmuştur. Süzülen karışımdan reaksiyona girmemiş metal iyonları, %5 hidroklorik asit ile çıkarılmıştır. Elde edilen katı madde, L-rGO (atıktan sentezlenen rGO) elde etmek için  $80^\circ\text{C}$ 'de 24 saat kurutulmuştur. Karşılaştırma yapabilmek için, rGO ticari grafit (C-rGO) ile de hazırlanmış ve yukarıda açıklanan aynı prosedür kullanılarak saflaştırılmıştır. XRD analizi sonucunda hem atık grafit hem de ticari grafit kullanılarak sentezlenen rGO'lar,  $25^\circ$  civarında grafenin karakteristik geniş pikini göstermiştir. Raman analizinden L-rGO'nun D bandı ve G bandı sırasıyla  $1332$  ve  $1597 \text{ cm}^{-1}$ 'de ve C-rGO'nun

D bandı ve G bandı sırasıyla 1342 ve 1600  $\text{cm}^{-1}$ 'de görülmüştür. L-rGO ve C-rGO'nun  $I_D/I_G$  değerleri sırasıyla 1,04 ve 1,05 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin birbirine çok yakın olmaları, bu işlem ile hazırlanan L-rGO ve C-rGO'nun benzer kusurlara sahip olduğunu göstermektedir. XPS sonuçları, L-rGO ve C-rGO'da nikel veya kobalt kalıntısı olmadığını ve bu işlemin etkili bir şekilde yüksek kaliteli rGO üretebileceğini göstermektedir. Peroksiasetik asidin oksidasyon sistemi ile reaksiyona girmesi uzun süreli bir süreç olduğundan, bu yöntem ile grafen üretiminin uzun süre alması, yöntemin bir eksisi olarak düşünülebilir. Ancak, sentezlenen L-rGO örneğinin kalitesi C-rGO ile birbirine yakın olduğundan bu işlemle seri olarak grafen üretimi gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir. Panahi-Kalamuei vd. [51], çalışmalarında *ekmek atığından* yüksek kaliteli tek katmanlı grafen üretmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Jel benzeri bir süspansiyon oluşturmak için 70–80 °C'de deiyonize suya öğütülmüş ekmeğin ilave edilmiştir. Daha sonra elde edilen jel, teflon kaplı paslanmaz otoklava aktarılmış ve 180 °C'de 12 saat ısıtılmıştır. Son olarak çözelti, çöken materyalleri ayırmak için cam filtrelerle süzülmüştür. pH, konsantrasyon, reaksiyon süresi ve sıcaklık gibi farklı parametrelerin sentez adımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda ekmeğin 3.0 g'dan az kullanıldığı durumlarda grafit oluşumu gözlenmemiştir. Düzgün, yuvarlak, tek katmanlı grafen levhaların sentezi için optimum konsantrasyonun 50 mL deiyonize suya 0,1 g ekmeğin eklendiğinde elde edildiği bulunmuştur. pH'ı değiştirerek aromatikleşme sürecini kontrol edilmiştir. Nötr pH aralığında, daha düzgün tek katmanlı grafen oluştuğu, bazik pH aralığında ise aromatikleşme oranının arttığı görülmüştür. Bu artıştan dolayı gözenekli grafen, birkaç mikrometre uzunluğunda grafen levhaları ve grafen quantum noktaları gibi farklı grafen türevlerinin gözlemlendiği düşünülmektedir.

#### IV. SONUÇ

Bu derleme makalede, grafen ve türevlerinin sentez yöntemleri ve sentezleme sürecinde karbon kaynağı olarak kullanılacak farklı atık türleri hakkında bilgiler özetlenmiştir. Grafen ve türevleri, çeşitli alanlarda uygulamaları kolaylaştıran mükemmel kimyasal ve termal stabilitenin yanı sıra yüksek spesifik yüzey alanı gibi üstün fizikokimyasal özellikleri ile de dikkat çekmektedir. Sentez süreçleri, yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yöntemler olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Grafit oksitinin kimyasal indirgenmesi, mekanik eksfoliyasyon, kimyasal eksfoliyasyon, CNT'nin silindirik yapısının açılması ve ark deşarjı gibi yukarıdan aşağıya yöntemler, genellikle grafit katmanlarını tek, çift ve birkaç katmanlı grafen olarak izole eder ve katmanlar halinde ayırır. Bu yöntemlerin düşük verim, proseslerde kullanılan kimyasalların toksik etkisi ve yüksek maliyet gibi etkenlerden dolayı bazı dezavantajları vardır. Piroliz, CVD ve epitaksiyel

büyüme gibi aşağıdan yukarıya yöntemler ise yüksek verimde grafen üretebilme kapasitesine sahiptirler. Grafen ve türevlerinin sentezi için kullanılan atıklar, tarımsal atıklar, plastikler ve diğer atıklar olarak sınıflandırılmıştır. Üre, pirinç kabukları, kafur yaprağı gibi tarımsal atıkların, PE, PP, PS, PMMA, PET gibi çeşitli plastik atıkların ve evsel atık ve organik atık gibi farklı atıkların karbon kaynağı olarak kullanıldığı prosesler sonucu elde edilen grafen ve türevlerinin farklı cihazlarda ve uygulamalarda kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca atıkların grafen sentezinde kullanıldıklarında atık bertarafı sorunlarını azaltacağı ve grafen üretimi için gereken fosil yakıt maliyeti ve tüketimini de düşüreceği düşünülmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu 22ADP327 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. In *Nanoscience and technology: a collection of reviews from nature journals* (pp. 11-19).
- [2] Raghavan, N., Thangavel, S., & Venugopal, G. (2017). A short review on preparation of graphene from waste and bioprecursors. *Applied Materials Today*, 7, 246-254.
- [3] Khan, M., Tahir, M. N., Adil, S. F., Khan, H. U., Siddiqui, M. R. H., Al-warthan, A. A., & Tremel, W. (2015). Graphene based metal and metal oxide nanocomposites: synthesis, properties and their applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(37), 18753-18808.
- [4] Xu, Z. (2018). Fundamental Properties of Graphene. *Graphene*, 73–102.
- [5] Mi, H. Y., Jing, X., Politowicz, A. L., Chen, E., Huang, H. X., & Turg, L. S. (2018). Highly compressible ultra-light anisotropic cellulose/graphene aerogel fabricated by bidirectional freeze drying for selective oil absorption. *Carbon*, 132, 199-209.
- [6] Wu, H., Xia, L., Ren, J., Zheng, Q., Xie, F., Jie, W., ... & Lin, D. (2018). A multidimensional and nitrogen-doped graphene/hierarchical porous carbon as a sulfur scaffold for high performance lithium sulfur batteries. *Electrochimica Acta*, 278, 83-92.
- [7] Yanik, M. O., Yigit, E. A., Akansu, Y. E., & Sahmetlioglu, E. (2017). Magnetic conductive polymer-graphene nanocomposites based supercapacitors for energy storage. *Energy*, 138, 883-889.
- [8] Xu, T., Li, Y., Chen, J., Wu, H., Zhou, X., & Zhang, Z. (2018). Improving thermal management of electronic apparatus with paraffin (PA)/expanded graphite (EG)/graphene (GN) composite material. *Applied Thermal Engineering*, 140, 13-22.

- [9] Abou Chacra, L., Sabri, M. A., Ibrahim, T. H., Khamis, M. I., Hamdan, N. M., Al-Asheh, S., ... & Fernandez, C. (2018). Application of graphene nanoplatelets and graphene magnetite for the removal of emulsified oil from produced water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3018-3033.
- [10] Xu, Z., Wu, C., Li, F., Chen, W., Guo, T., & Kim, T. W. (2018). Triboelectric electronic-skin based on graphene quantum dots for application in self-powered, smart, artificial fingers. *Nano Energy*, 49, 274-282.
- [11] Jara, A. D., Betemariam, A., Woldetinsae, G., & Kim, J. Y. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(5), 671-689.
- [12] Ikram, R., Jan, B. M., & Ahmad, W. (2020). Advances in synthesis of graphene derivatives using industrial wastes precursors; prospects and challenges. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 15924-15951.
- [13] Lee, X. J., Hiew, B. Y. Z., Lai, K. C., Lee, L. Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., & Rigby, S. (2019). Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 98, 163-180.
- [14] Guo, S., & Dong, S. (2011). Graphene nanosheet: synthesis, molecular engineering, thin film, hybrids, and energy and analytical applications. *Chemical Society Reviews*, 40(5), 2644-2672.
- [15] Kumar, N., Salehiyan, R., Chauke, V., Botlhoko, O. J., Setshedi, K., Scriba, M., ... & Ray, S. S. (2021). Top-down synthesis of graphene: A comprehensive review. *FlatChem*, 27, 100224.
- [16] Chen, W., Yan, L., & Bangal, P. R. (2010). Chemical reduction of graphene oxide to graphene by sulfur-containing compounds. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(47), 19885-19890.
- [17] Whitener Jr, K. E., & Sheehan, P. E. (2014). Graphene synthesis. *Diamond and related materials*, 46, 25-34.
- [18] Yi, M., & Shen, Z. (2015). A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(22), 11700-11715.
- [19] Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 90, 75-127.
- [20] Liu, J., Poh, C. K., Zhan, D., Lai, L., Lim, S. H., Wang, L., ... & Lin, J. (2013). Improved synthesis of graphene flakes from the multiple electrochemical exfoliation of graphite rod. *Nano energy*, 2(3), 377-386.
- [21] Lonkar, S. P., Deshmukh, Y. S., & Abdala, A. A. (2015). Recent advances in chemical modifications of graphene. *Nano Research*, 8(4), 1039-1074.
- [22] Whitener Jr, K. E., & Sheehan, P. E. (2014). Graphene synthesis. *Diamond and related materials*, 46, 25-34.
- [23] Song, Z., Mu, X., Luo, T., & Xu, Z. (2015). Unzipping of carbon nanotubes is geometry-dependent. *Nanotechnology*, 27(1), 015601
- [24] Wang, H., Wang, Y., Hu, Z., & Wang, X. (2012). Cutting and unzipping multiwalled carbon nanotubes into curved graphene nanosheets and their enhanced supercapacitor performance. *ACS applied materials & interfaces*, 4(12), 6827-6834.
- [25] Wang, Z., Li, N., Shi, Z., & Gu, Z. (2010). Low-cost and large-scale synthesis of graphene nanosheets by arc discharge in air. *Nanotechnology*, 21(17), 175602.
- [26] Subrahmanyam, K. S., Panchakarla, L. S., Govindaraj, A., & Rao, C. N. R. (2009). Simple method of preparing graphene flakes by an arc-discharge method. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(11), 4257-4259.
- [27] Kong, X., Zhu, Y., Lei, H., Wang, C., Zhao, Y., Huo, E., ... & Ruan, R. (2020). Synthesis of graphene-like carbon from biomass pyrolysis and its applications. *Chemical Engineering Journal*, 399, 125808.
- [28] Wang, F., Wang, F., Hong, R., Lv, X., Zheng, Y., & Chen, H. (2020). High-purity few-layer graphene from plasma pyrolysis of methane as conductive additive for LiFePO<sub>4</sub> lithium ion battery. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10004-10015.
- [29] Thangaraj, B., Mumtaz, F., Abbas, Y., Anjum, D. H., Solomon, P. R., & Hassan, J. (2023). Synthesis of Graphene Oxide from Sugarcane Dry Leaves by Two-Stage Pyrolysis. *Molecules*, 28(8), 3329.
- [30] Yu, Q., Lian, J., Siriponglert, S., Li, H., Chen, Y. P., & Pei, S. S. (2008). Graphene segregated on Ni surfaces and transferred to insulators. *Applied physics letters*, 93(11), 113103.
- [31] Zhao, P., Kumamoto, A., Kim, S., Chen, X., Hou, B., Chiashi, S., ... & Maruyama, S. (2013). Self-limiting chemical vapor deposition growth of monolayer graphene from ethanol. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(20), 10755-10763.
- [32] Zhao, Z., Shan, Z., Zhang, C., Li, Q., Tian, B., Huang, Z., ... & Cai, W. (2015). Study on the diffusion mechanism of graphene grown on copper pockets. *Small*, 11(12), 1418-1422.
- [33] Hwang, J., Kim, M., Campbell, D., Alsalman, H. A., Kwak, J. Y., Shivaraman, S., ... & Spencer, M. G. (2013). van der Waals epitaxial growth of graphene on sapphire by chemical vapor deposition without a metal catalyst. *Acs Nano*, 7(1), 385-395.
- [34] Bhuyan, M., Alam, S., Uddin, M., Islam, M., Bipasha, F. A., & Hossain, S. S. (2016). Synthesis

- of graphene. *International Nano Letters*, 6(2), 65-83.
- [35] Riedl, C., Coletti, C., & Starke, U. (2010). Structural and electronic properties of epitaxial graphene on SiC (0 0 0 1): a review of growth, characterization, transfer doping and hydrogen intercalation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43(37), 374009.
- [36] Garg, K. K., Pandey, S., Kumar, A., Rana, A., Sahoo, N. G., & Singh, R. K. (2022). Graphene nanosheets derived from waste plastic for cost-effective thermoelectric applications. *Results in Materials*, 13, 100260.
- [37] Karakoti, M., Pandey, S., Tatrari, G., Dhapola, P. S., Jangra, R., Dhali, S., ... & Sahoo, N. G. (2022). A waste to energy approach for the effective conversion of solid waste plastics into graphene nanosheets using different catalysts for high performance supercapacitors: a comparative study. *Materials Advances*, 3(4), 2146-2157.
- [38] Tatrari, G., Tewari, C., Bohra, B. S., Pandey, S., Karakoti, M., Kumar, S., ... & Sahoo, N. G. (2021). Waste plastic derived graphene sheets as nanofillers to enhance mechanical strength of concrete mixture: An inventive approach to deal with universal plastic waste. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100275.
- [39] Liu, H., Chen, W., Zhang, R., Xu, C., Huang, X., Peng, H., ... & Miao, Z. (2021). Bioinspired in situ self-catalyzing strategy towards graphene nanosheets with hierarchical structure derived from biomass for advanced supercapacitors. *Applied Surface Science*, 566, 150692.
- [40] Pandey, S., Karakoti, M., Dhali, S., Karki, N., SanthiBhushan, B., Tewari, C., ... & Sahoo, N. G. (2019). Bulk synthesis of graphene nanosheets from plastic waste: an invincible method of solid waste management for better tomorrow. *Waste management*, 88, 48-55.
- [41] Pan, F., Jin, J., Fu, X., Liu, Q., & Zhang, J. (2013). Advanced oxygen reduction electrocatalyst based on nitrogen-doped graphene derived from edible sugar and urea. *ACS applied materials & interfaces*, 5(21), 11108-11114.
- [42] Danafar, H., Mohammadi, A., Mousazadeh, N., Ghaffarlou, M., Mollasalehi, A., Sharafi, A., ... & Nosrati, H. (2021). An innovative green approach to the production of bio-sourced and nano-sized graphene oxide (GO)-like carbon flakes. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100200.
- [43] Sharma, S., Kalita, G., Hirano, R., Shinde, S. M., Papon, R., Ohtani, H., & Tanemura, M. (2014). Synthesis of graphene crystals from solid waste plastic by chemical vapor deposition. *Carbon*, 72, 66-73.
- [44] Wu, T., Ding, G., Shen, H., Wang, H., Sun, L., Jiang, D., ... & Jiang, M. (2013). Triggering the continuous growth of graphene toward millimeter-sized grains. *Advanced Functional Materials*, 23(2), 198-203.
- [45] Li, Z., Wu, P., Wang, C., Fan, X., Zhang, W., Zhai, X., ... & Hou, J. (2011). Low-temperature growth of graphene by chemical vapor deposition using solid and liquid carbon sources. *ACS nano*, 5(4), 3385-3390.
- [46] Ruan, G., Sun, Z., Peng, Z., & Tour, J. M. (2011). Growth of graphene from food, insects, and waste. *ACS nano*, 5(9), 7601-7607.
- [47] Sankar, S., Lee, H., Jung, H., Kim, A., Ahmed, A. T. A., Inamdar, A. I., ... & Kim, D. Y. (2017). Ultrathin graphene nanosheets derived from rice husks for sustainable supercapacitor electrodes. *New Journal of Chemistry*, 41(22), 13792-13797.
- [48] Singh, P., Bahadur, J., & Pal, K. (2017). One-step one chemical synthesis process of graphene from rice husk for energy storage applications. *Graphene*, 6(3), 61-71.
- [49] Adolfsson, K. H., Hassanzadeh, S., & Hakkarainen, M. (2015). Valorization of cellulose and waste paper to graphene oxide quantum dots. *RSC Advances*, 5(34), 26550-26558.
- [50] Hashmi, A., Singh, A. K., Jain, B., & Singh, A. (2020). Muffle atmosphere promoted fabrication of graphene oxide nanoparticle by agricultural waste. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 28(8), 627-636.
- [51] Panahi-Kalamuei, M., Amiri, O., & Salavati-Niasari, M. (2020). Green hydrothermal synthesis of high quality single and few layers graphene sheets by bread waste as precursor. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 2679-2690.
- [52] Li, B., Wu, C., Xu, J., Hu, D., Zhang, T., Fang, X., & Tong, J. (2020). One-pot redox synthesis of graphene from waste graphite of spent lithium ion batteries with peracetic acid assistance. *Materials Chemistry and Physics*, 241, 122397.
- [53] Obi, F. O., Ugwuishiwu, B. O., & Nwakaire, J. N. (2016). Agricultural waste concept, generation, utilization and management. *Nigerian Journal of Technology*, 35(4), 957-964
- [54] Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Cortés-García, F. J., & Camacho-Ferre, F. (2020). Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00902.
- [55] FAO, Strategic Work of FAO For Sustainable Food and Agriculture, in: F.a.A.O.o.t.U.N. (FAO) (Ed.), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2022.
- [56] European Commission. Changing the way we use plastic; (<https://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/pan-european-factsheet.pdf>).