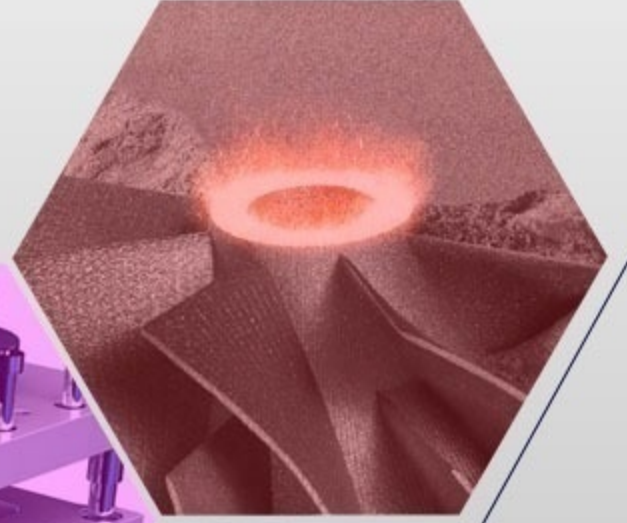




# İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:4 SAYI:3 YIL: 2023

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:4 ISSUE:3 YEAR:2023



# İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Manufacturing Technologies and Applications (MATECA)

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

## Honoray Editör (Honorary Editor)

Prof. Dr. Ulvi Şeker, Gazi Üniversitesi

## Baş Editor (Editor in Chief)

Prof. Dr. Mustafa Günay, Karabük Üniversitesi

## Yardımcı Editör (Associate Editor)

Prof. Dr. Alaattin Kaçal, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

## Alan Editörleri (Editors)

Prof. Dr. Turgay Kıvak, Düzce Üniversitesi  
Prof. Dr. Murat Sarıkaya, Sinop Üniversitesi  
Doç. Dr. Yakup Turgut, Gazi Üniversitesi  
Assist. Prof. Dr. Serkan Apay, Düzce Üniversitesi  
Dr. Munish Kumar Gupta, Opole University of Technology

## Dil Editörü (Language Editor)

Doç. Dr. Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi

## Teknik Editörler (Technical Editors)

Assist. Prof. Dr. Ramazan Özmen, Karabük Üniversitesi  
Arş. Gör. Gürşah GÜRÜF, Karabük Üniversitesi

## Danışma Kurulu (Advisory Board)

Prof. Dr. Can Çoğun, Çankaya Üniversitesi  
Prof. Dr. Serdar Salman, Marmara Üniversitesi  
Prof. Dr. Grzegorz M. Królczyk, Opole University of Technology  
Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır, Uludağ Üniversitesi  
Prof. Dr. Teyfik Demir, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Prof. Dr. İhsan Korkut, Gazi Üniversitesi  
Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce Üniversitesi  
Prof. Dr. Ramazan Kaçar, Karabük Üniversitesi  
Prof. Dr. Ulaş Çaydaş, Fırat Üniversitesi  
Prof. Dr. Ayhan Erol, Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Prof. Dr. İbrahim Çiftçi, Çankırı Karatekin Üniversitesi  
Doç. Dr. Mohd Fathullah Ghazali, University of Malaysia Perlis  
Doç. Dr. Gültekin Uzun, Gazi Üniversitesi  
Doç. Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım, Erciyes Üniversitesi  
Doç. Dr. Nafiz Yaşar, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi  
Assist. Prof. Dr. Mozammel Mia, Ahsanullah University of Science and Technology  
Assist. Prof. Dr. Üyesi Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi  
Assist. Prof. Dr. Nimel Sworna ROSS, University of Johannesburg  
Assist. Prof. Dr. Leonardo Rosa Ribeiro Da Silva, Federal University of Uberlândia  
Dr. Catalin Pruncu, University of Strathclyde



Cilt (Volume) : 4  
Sayı (Issue) : 3  
Yıl (Year) : 2023  
e-ISSN: 2717-7475

**Yayıncı (Publisher)**  
Mustafa GÜNAY

**Web Sayfası (Web Page)**  
<http://dergipark.gov.tr/pub/mateca>

**Yayın Tarihi (Publication Date)**  
Aralık 2023 (December 2023)

**Yayın Dili (Publication Language)**  
Türkçe / İngilizce (Turkish/English)

**Yayın Aralığı (Publication Frequency)**  
Yılda üç kez yayınlanır (Tri-annual)

**Yayın Türü (Publication Type)**  
Sürekli yayın (Periodical)

**Kapak Tasarımı (Cover Design)**  
Ozan YETKİN

### **İletişim**

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editör)  
Telefon: +90 370 4187400  
E-posta: [matecajournal@gmail.com](mailto:matecajournal@gmail.com), [mgunay@karabuk.edu.tr](mailto:mgunay@karabuk.edu.tr)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca> adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

### **Contact**

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editor)  
Phone: +90 370 4187400

E-mail: [matecajournal@gmail.com](mailto:matecajournal@gmail.com), [mgunay@karabuk.edu.tr](mailto:mgunay@karabuk.edu.tr)

Instructions for authors and all articles in this journal can be reached at  
<https://dergipark.org.tr/en/pub/mateca>

## İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

<b>Araştırma Makalesi (Research Article)</b>	<b>Sayfa (Page)</b>
<b>Kafes Yapıda Etkin Soğutmalı Fren Diskinin Eklemeli İmalat için Tasarımı ve Analizi</b> ( <i>Design and Analysis of Active Cooled Brake Disc in Lattice Structure for Additive Manufacturing</i> ) Abdülcelil BAYAR, Ümit AYTAR, Abdullah DURAN	120-128
<b>Investigation of the Effect of Micronized Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EDPM) Powder Wastes on Physical and Mechanical Properties in EPDM Mixtures</b> ( <i>Mikronize Etilen-Propilen-Dien Monomer (EDPM) Atıklarının EPDM Karışımlarındaki Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması</i> ) Çağrı ÇOKAÇAR, İker KÖPRÜ, Hakan Salih YETGİN	129-136
<b>Ultrasonik Atomizasyon Esasına Dayalı Minimum Miktar Yağlama (UMMY) Sistemi İle Tornalamada UMMY Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Talaş Büzüşme Katsayısı Üzerine Etkisi</b> ( <i>Effect of UMQL Parameters on Cutting Force and Chip Compression Coefficient in Turning with Minimum Quantity Lubrication Based on Ultrasonic Atomization System (UMQL)</i> ) Ramazan MERGEN, Fırat KAFKAS	137-154
<b>Tel Erozyonla Kesmede Çoklu Kesim Yöntemi Kullanılarak Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu</b> ( <i>Optimization of Surface Roughness Using Multiple-Cut Method in Wire Electrical Discharge Machining</i> ) Salih GÜVERCİN, Eren KOCAOĞLU	155-166
<b>AISI 52100 Rulman Çeliğinin Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Sıcaklığı ve Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi</b> ( <i>Investigation of the Effects of Machining Parameters on Surface Roughness, Cutting Temperature and Cutting Force in Turning AISI 52100 Bearing Steel</i> ) Havva DEMİRPOLAT, Kübra KAYA, Rüstem BİNALİ, Mustafa KUNTOĞLU	179-189
<b><u>Derleme Makale (Review Article)</u></b>	
<b>Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 Alüminyum Alaşımli Sacların Mekanik Özellikler Yönünden İncelenmesi</b> ( <i>Investigation of Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Sheets Welded by Friction Stir Welding</i> ) Çetin BATUK, Hüseyin DEMİRTAŞ	167-178



## Kafes Yapıda Etkin Soğutmalı Fren Diskinin Eklemeli İmalat için Tasarımı ve Analizi

Abdülcelil BAYAR<sup>1,\*</sup> , Ümit AY TAR<sup>1</sup> , Abdullah DURAN<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 17.10.2023

**Kabul:** 19.11.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat

Kafes yapılar

Fren disk

Etkin soğutma

Fren mesafesi

### ÖZET

Otomotiv, havacılık ve raylı sistemlerde şüphesiz en önemli parçalarından biri fren diskleridir. İlk olarak 1950'li yıllarda kullanılmaya başlanılan diskli fren sistemleri günümüz teknolojisine gelene kadar birçok gelişme gösterse de hala geliştirilmesi devam eden sistemlerdir. Sürtünmeli fren sistemlerinde ısı açığa çıkar. Bu sıcaklık belli bir düzeyin üzerine çıktığında sürtünme elemanı olan balataların özellikleri sebebi ile sürtünme katsayıları azalır. Uzun frenleme (ağır tonajlı araçlarda yokuş aşağı ya da spor araçlarında zorlu parkurlarda) taşıtın durma mesafesini arttırmakta, fren ve teker grubu ekipmanlarının kullanım ömürlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebepten hem sürüş emniyeti hem de taşıt güvenliği açısından fren soğutma yapısı önem arz etmektedir. Bu çalışmada, bir spor arabada kullanılmak üzere geleneksel imalat metotlarına göre tasarlanmış örnek bir fren diskinin soğutma performansının artırılması ve ağırlık olarak hafifletilmesi için kafes yapı modelleme yaklaşımı uygulanmıştır. Tüm tasarım yaklaşımları, eklemeli imalat teknolojilerinin sunduğu yenilikçi imkân ve kabiliyetler göz önünde bulundurularak ele alınmıştır. İterasyonlar sonucu elde edilen model eklemeli imalat metotlarından seçici lazer ergitme yöntemi ile imal edilecek şekilde ele alındığında kütlece %20 daha hafif, Von-mises gerilmeleri bakımından da %35 daha düşük gerilmeye sahip bir model ortaya çıkmıştır. Ele alınan standart ve kafes yapıda disklerle eşit ısı yüklemesinde standart disk yüzeyinde 440 °C sıcaklık bulunurken yapılan optimum tasarımda 213 °C sıcaklık belirlenmiştir.

## Design and Analysis of Active Cooled Brake Disc in Lattice Structure for Additive Manufacturing

### ARTICLE INFO

**Received:** 17.10.2023

**Accepted:** 19.11.2023

#### Keywords:

Additive manufacturing

Lattice structures

Brake disc

Effective cooling

Braking distance

### ABSTRACT

One of the most important parts in automotive, aviation, and rail systems are brake discs. Disc brake systems, which were first introduced in the 1950s, have undergone much advancement to reach the current technology, but they are still systems that continue to be developed. In frictional braking systems, heat is generated. When this temperature exceeds a certain level, the friction coefficient decreases due to the properties of the frictional element, which is the brake pads. This situation increases the stopping distance of the vehicle in long braking situations (such as downhill for heavy-tonnage vehicles or challenging tracks for sports cars) and reduces the service life of the braking and wheel group equipment. Therefore, the cooling structure of the brakes is crucial for both driving safety and vehicle security. This study aims to reduce the heating of the brake disc during prolonged use in sports cars and heavy-tonnage vehicles, improve the brake performance, achieve shorter stopping distances, and ensure driving and vehicle safety. In this study, a cage structure modeling approach was applied to enhance the cooling performance and reduce the weight of a sample brake disc designed for use in a sports car compared to traditional manufacturing methods. All design approaches were considered in light of the innovative possibilities and capabilities offered by additive manufacturing technologies. As a result of iterations, a model was obtained that would be manufactured using the selective laser melting method, resulting in a 20% lighter mass and 35% lower Von-Mises stresses. For the standard and cage structure discs subjected to equal heat loading, the standard disc surface had a temperature of 440 °C, while the optimized design resulted in a temperature of 213 °C.

\*Sorumlu yazar, e-posta: celilbayar@gmail.com

To cite this article: A. Bayar, Ü. Aytar, A. Duran, Kafes Yapıda Etkin Soğutmalı Fren Diskinin Eklemeli İmalat için Tasarımı ve Analizi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(32),120-128, 2023.

https://doi.org/10.52795/mateca.1376655, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv, havacılık ve raylı sistemlerdeki en önemli parçalardan biri de fren diskleridir. İlk olarak 1950’de kullanılmaya başlanılan disk frenlerindeki gelişmeler de teknolojik gelişmelere bağlı olarak günümüz kadar birçok gelişme göstermiştir. Sürtünmeli fren sistemlerinde frenleme esnasında ısı açığa çıkar. Bu durum sürtünme elemanı olan balataların özellikleri sebebi ile belli bir sıcaklıktan sonra sürtünme katsayısını azaltır. Bu da uzun frenlemeli yerlerde (ağır tonajlı araçlarda yokuş aşağı ya da spor araçlarında zorlu parkurlarda) taşıtın durma mesafesini artırmaktadır. Hatta fazla ısınmada balataların alev almasına neden olabilir ki; bu durum fren ve teker grubu ekipmanların kullanım ömrünün azaltmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı hem sürüş emniyeti hem de taşıt güvenliği için fren soğutma önem arz etmektedir.

Otomotiv fren sistemleri, araç tasarımı ve işletmesinde büyük önem taşır [1]. Bu, yeni araç geliştirmede önemli bir öncelik olarak kabul edilen güvenlik yönüyle ilgilidir. Otomotiv fren sisteminin temel parçalarından biri, dönen fren disk rotorudur. Bu parça, sabit fren pedi ile birlikte optimal fren performansına ulaşmada temel öneme sahiptir. Bir araçta fren disk rotoru, araç fren kapasitesini elde etmede büyük bir rol oynar. Frenleme sırasında, mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesi yoluyla bir retardar torku oluşur. Bu, frenleme sırasında meydana gelen göreceli kayma sonucu rotor-ped arayüzünde yapılan sürtünme çalışmasından kaynaklanır [2]. Son zamanlarda, hafif araçlarda fren rotorlarının önemli uygulamaları olmuş ve bu, hafif fren disk rotorları geliştirme ihtiyacını zorunlu hale getirmiştir [3,4]. Bir aracın gücü ve niteliği, fren sisteminin performansına dayanarak ölçülebilir. Uzun süre tekrarlayan frenleme ile birçok aracın fren bileşenleri önemli bir sıcaklık artışı yaşayabilir ve bu, araç fren performansının azalmasına neden olabilir. Yüksek sıcaklık, fren kaybına, fren sıvısı buharlaşmasına, rulman arızasına, erken aşınmaya, termal olarak uyarılmış titreşime ve termal çatlaklara neden olabilir [5]. Bu nedenle, bir fren sisteminin sıcaklık artışını tahmin etmek ve tasarımın erken aşamalarında verilen bir fren sisteminin termal performansını değerlendirmek son derece önemlidir.

Frenlerin etkin bir şekilde soğutulması için de çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Örneğin, fren disklerinin içine yerleştirilen kanallar, disklerin yüzeyine hava akışını artırarak frenlerin soğumasını hızlandırır. Ayrıca, bazı fren sistemleri, fren sıvısını soğutmak için özel bir soğutma sistemi kullanır. Bu sistemler, yüksek sıcaklıkta çalışan frenlerin aşınmasını azaltır ve fren performansını artırır [6].

Disk frenler üzerine geliştirmeler devam etmektedir. Özellikle otomobil sporlarında yüksek hızlar, kısa duruş mesafesi ve uzun turlardan dolayı diskler daha fazla ısınmakta ve soğumak için yeterli zamanı bulamamaktadır. Otomobil sporlarında diskler geliştirilmeye çalışılsa da geleneksel imalat yöntemlerinin limitlerinden yeterli soğutma sağlanamamaktadır. Eklemeli imalatta yapılan son gelişmeler ile eklemeli imalat tezgahlarındaki üretim boyutları, lazer güçleri ve proses kontrol entegrasyonu sayesinde güvenilir ve tekrarlanabilir kalitede ürünler elde edilmeye başlandı. Eklemeli imalatın sağladığı tasarım özgürlüğü sayesinde de özellikle ısı değiştiricilerde kullanılan yüzey alanı çok fazla ve karmaşık yapıda ürünlerin yanında yapısal parçaların kafes yapıda üretimi sayesinde konvansiyonel üretim metotları ile üretilebilen yapısal parçalara nazaran çok daha hafif olarak daha fazla yükler taşıyabilmektedir. Parçanın hafifletilmesi sayesinde otomobil sporlarında ayrıca araçta performans artışı sağlanacaktır. Eklemeli imalatın diğer bir avantaj ise üretim adetleri maliyeti dramatik olarak düşürmediğinden stok tutma ihtiyacı olmadan talebe göre üretim yapılabilmesidir. Otomobil sporlarında farklı ve özel otomobiller için en iyi performansı sağlayacak konfigürasyonlar oluşturularak üretimler yapılabilmektedir [7].

Literatürdeki fren diskleri üzerine yapılan araştırma çalışmaları genellikle termomekanik ve titreşimle ilgili konulara odaklanmaktadır. Belhocine ve Bouchetara, bir akışkan analizi olan ANSYS/CFX kullanarak katı bir fren rotorunun ve havalandırılmalı bir rotorun termal davranışını analiz etmiştir ve fren rotorlarının yüzeylerindeki ısı transfer katsayılarını çıkarmak için bunları sınırlayıcı koşul olarak rotora uygulamıştır. Bunun ardından geçici termal iletim simülasyonunda bu katsayıları kullanmıştır [8,9]. Kim [10], bir fren diskinin sıcaklık dağılımını ve termal

deformasyonunu tahmin etmek için sonlu eleman analizi gerçekleştirmiştir. Jung ve diğerleri [11,12], çeşitli frenleme koşulları ve disk ve pabuçların özelliklerini dikkate alarak havalandırılmalı disklerin sıcaklık artışını ve termal deformasyonunu tahmin etmek için bir analiz tekniği önermiştir. Frenleme sırasında oluşan frenleme gücünün analitik süreci matematiksel olarak türetilmiştir. Thilak ve arkadaşları [13], sert frenleme koşulları altında bir fren rotorunda geçici termal ve yapısal analiz yapmıştır ve disk rotor tasarımına yardımcı olmak için performansını değerlendirmiştir. Güteryüz ve Karadeniz [14], çeşitli havalandırma açıklıklı fren rotorları üzerine bir dizi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ve geçici termal analiz gerçekleştirmiştir. CFD analizleri, rotor-pabuç ve rotor-pabuç-tekerlek montajları için konvektif ısı transfer katsayılarını çıkarmak için yapılmıştır. Çıkarılan konvektif ısı transfer katsayıları daha sonra termal iletkenlik ve radyasyon etkileriyle birlikte sonlu eleman modellerine sınırlayıcı koşul olarak eklenmiş ve geçici termal analiz yapılmıştır. CFD sonuçlarının doğruluğunu sağlamak ve hesaplama maliyetini düşük tutmak için 14 farklı ağ oluşturularak bir ağ bağımsızlık çalışması da gerçekleştirilmiştir. Yeni entegre tasarımın temel model üzerinde ortalama konvektif ısı transfer katsayılarında, soğuma süresinde ve maksimum tekerlek rulmanı sıcaklığında önemli iyileştirmeler gözlemlendiği belirtilmiştir. Son bir çalışmada, Zhang ve diğerleri [15], mega-watt ölçekli rüzgar türbini frenleri için fren diskleri ve pabuçlarının termal ve yapısal etkileşimlerini frenleme sürecinde incelemiştir.

Yapısal optimizasyon, fren disklerinin analizi ve tasarımının doğal bir uzantısıdır. Literatürde, geometrik karmaşıklıkları nedeniyle fren disklerinin yapısal optimizasyonu genellikle ticari yazılımları içerir ve tekrarlanan analizleri gerektirir. Bu analizler genellikle ya sonlu eleman yöntemini kullanarak statik, dinamik veya model problemleri çözmekte ya da CFD problemlerini çözmek için sonlu hacim yöntemini kullanmaktadır. Galindo-Lopez ve Tirovic [16], demiryolu araçlarına monte edilen fren disklerinin konvektif ısı transferini maksimize etmeyi amaçlamışlardır ve çeşitli fren disk tasarımları için konvektif soğutmadaki etkinliği ölçmek için ortalama konvektif ısı transfer katsayısı ile disk ıslak alanın çarpımı olan özgül güç dağılımını önermişlerdir. Yazarlar, disk modellerinin performansını değerlendirmek için akışkan dinamik yazılımı ANSYS CFX'i benimsemişlerdir ve mevcut diskle karşılaştırıldığında konvektif soğutma gücünde %10'dan fazla artış sağlayan yeni bir disk tasarımı oluşturduğunu belirtmişlerdir. Roy ve Bharatish [17], havalandırılmalı bir fren diskinin beş geometrik parametresini kullanarak modelin maksimum toplam deformasyonunu ve eşdeğer stresini minimize etmek için ANSYS yazılımını ve yanıt yüzeyi metodolojisini kullanmışlardır ve yaklaşık %10'luk bir deformasyon ve stres azalması elde ettiklerini belirtmişlerdir. Topouris ve Tirovic [18], dökme demir bir fren diskinin parmak yapılarındaki maksimum ana gerilmeleri minimize etmek için şekil optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir ve ardından disk kütlesini azaltmak için topoloji optimizasyonu yapmışlardır. Sonlu eleman analizi ve optimizasyon paketleri olan Abaqus ve OptiStruct kullanmışlardır. Başka bir yakın zamandaki çalışmada, bir fren rotorunun sürtünme yüzeyindeki deliklerin ve yarıkların şekli ve deseni, rotor modelindeki maksimum stresi ve sıcaklığı minimize etmek için optimize edilmiştir [19].

Bu çalışma, fren sistemlerinin güvenliği, performansı ve dayanıklılığı açısından kritik olan fren diskine odaklanarak, otomotiv endüstrisindeki teknolojik gelişmelerin ve özellikle eklemeli imalatın ürüne entegre edilebilmesi için önemli bir örnektir. Bu gelişmeler, sürücü güvenliği ve taşıt performansı açısından önemli bir ilerleme sağlamaktadır.

## 2. EKLEMELİ İMALAT İÇİN TASARIM (DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING)

Tasarım sürecinin ilk adımı, kullanıcıların ihtiyaçlarını ve taleplerini belirlemektir. Bu, frenin kullanım amacı, aracın türü, hızı, ağırlığı, vb. faktörleri içerir. İhtiyaçların belirlenmesinden sonra, tasarımcılar genellikle bir dizi farklı konsept tasarımı oluştururlar. Bu konseptler, bir araya getirilerek en iyi performansı sağlayacak olanı seçmek için değerlendirilir [20].

Konsept tasarımından sonra, seçilen konsept detaylı tasarıma dönüştürülür. Bu aşamada, disk frenin boyutları, malzemeleri, bileşenleri ve diğer detaylar belirlenir. Detaylı tasarımdan sonra, bir

prototip üretilir ve test edilir. Test sonuçlarına göre tasarım revize edilebilir. Prototip başarıyla test edildikten sonra, seri üretim için üretim süreci başlar.

Disk fren tasarımı, birçok mühendislik disiplini içeren karmaşık bir süreçtir. Tasarımın doğru yapılması, fren sisteminin güvenliği ve performansı açısından önemlidir [21].

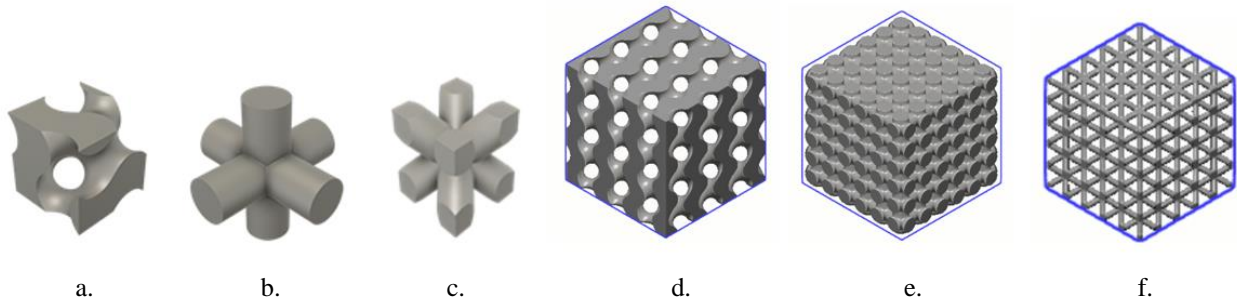
Disk frenler, bir rotor (disk) ve sabit bir kaliperden oluşur. Rotor, dönen tekerlek üzerinde monte edilirken, kaliper tekerleğin üst kısmında yer alır ve frenleme işlemini gerçekleştirir. Disk fren tasarımı, rotorun çapı, kaliperin boyutu ve malzemesi, fren balatasının malzemesi ve diğer faktörlerin belirlenmesi gibi unsurları içerir.

316L çelik, krom ve nikel içeriği sayesinde yüksek düzeyde korozyon direncine sahiptir. Bu özellik, fren disklerinin su, tuzlu su, nem ve diğer aşındırıcı ortamlarda kullanılabilmesini sağlar. 316L çelik, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır. Bu, fren disklerinin aşırı ısınma durumunda bile şeklini korumasını sağlar ve performansını etkilemez [22]. 316L çeliğin mükemmel mekanik özellikleri vardır. Yüksek tokluk, mukavemet ve sertlik sağlar. Bu, fren disklerinin yüksek sıcaklıkta bile dayanıklı olmasını ve yoğun kullanımda deformasyon riskini azaltır. 316L çelik, paslanmaz bir malzemedir ve fren disklerinin paslanma veya korozyona uğramasını engeller. Bu özellik, fren disklerinin uzun ömürlü olmasını sağlar [23, 24].

Tablo 1. 316L Çeliğinin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of 316L Steel)

	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	C	S	N
<b>Minimum</b>	Denge	16.00	10.00	2.00	-	-	-	-	-	-
<b>Maksimum</b>		18.00	14.00	3.00	2.00	1.00	0.045	0.030	0.030	-

Fren diski çekirdek kısmı tasarımı için kafes yapı kullanılarak etkin soğutma avantajları hedeflenerek tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Etkin soğutma sağlama amacı ile Cross, Gyroid ve Xcell olarak üç farklı kafes yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Diskin çekirdek kısmı kafes yapı ile tasarlanırken eklemeli imalat ile yapılacak üretim kısıtının 1 mm olmasından dolayı her bir kafes yanın kiriş kalınlığı 1 mm olarak seçilmiştir. Kafes yapı tipleri Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kafes yapı tipleri a) Gyroid kafes hücresi b) Cross kafes hücresi c) Xcell kafes hücresi a) Gyroid kafes birimi b) Cross kafes birimi c) Xcell kafes birimi

Kafes yapıli çekirdek tamamlandıktan sonra frenleme bölgesi ile birleştirilmesi ile oluşturulan nihai tasarım Şekil 2’de gösterilmektedir.





Şekil 2. Tasarım renderi (Design rendering)

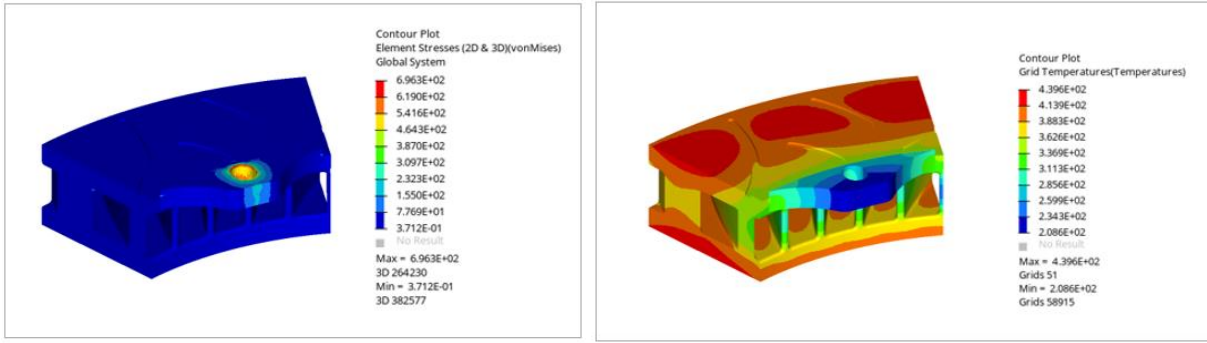
### 3. TERMAL VE STRES ANALİZLERİ (THERMAL AND STRESS ANALYSIS)

Yapılan konvansiyonel tasarım ile üç farklı kafes yapıdaki tasarım analiz koşturularak karşılaştırma yapılmıştır. Model analizleri için Hypermesh ve Optistruct yazılımları kullanılmıştır. Analiz girdileri ve eleman değerleri tüm tasarımlar için aynı olup değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

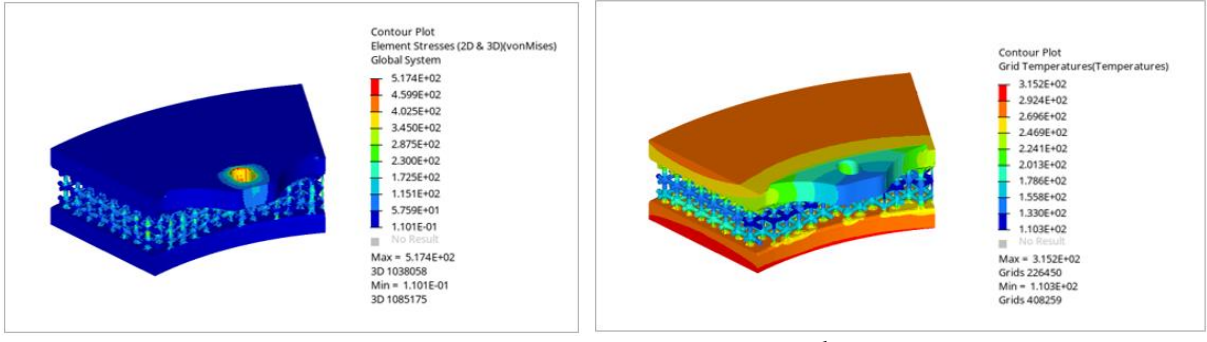
Tablo 2. Analiz girdileri (Analysis inputs)

Kararlı Hal Isı Aktarımı		Malzeme Özellikleri	
<i>İletim</i>	0.4 W/mm <sup>2</sup>	<i>Elastiklik Modülü</i>	115000 MPa
<i>Konveksiyon</i>	Tüm serbest yüzeylerde serbest konveksiyon	<i>Poisson Oranı</i>	0.26
<i>Eleman Tipi</i>	1st Order Tetrahedral Element	<i>Termal Genleşme Katsayısı</i>	0.000009
<i>Eleman Sayısı</i>	2282538	<i>Termal İletkenlik</i>	0.071 W/mm*K
<i>Node Sayısı</i>	454595	<i>Serbest Konveksiyon Isı İletim Katsayısı</i>	0.0005
<i>Yük Tipi</i>	Heat Flux		

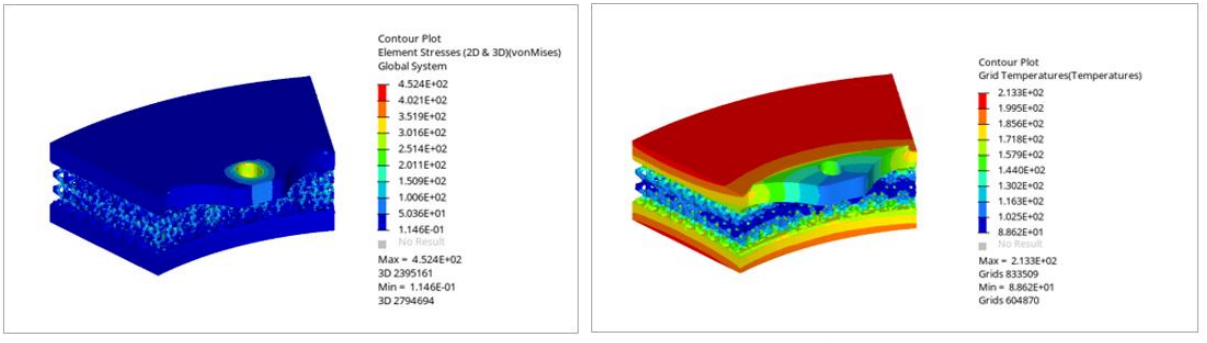
Tüm tasarımların gerilme ve ısıl analizleri tamamlanarak Tablo 3’te eşit ısı yüklemesi sonucu oluşan maksimum sıcaklık ve Von-Mises gerilme değerleri karşılaştırılmıştır.



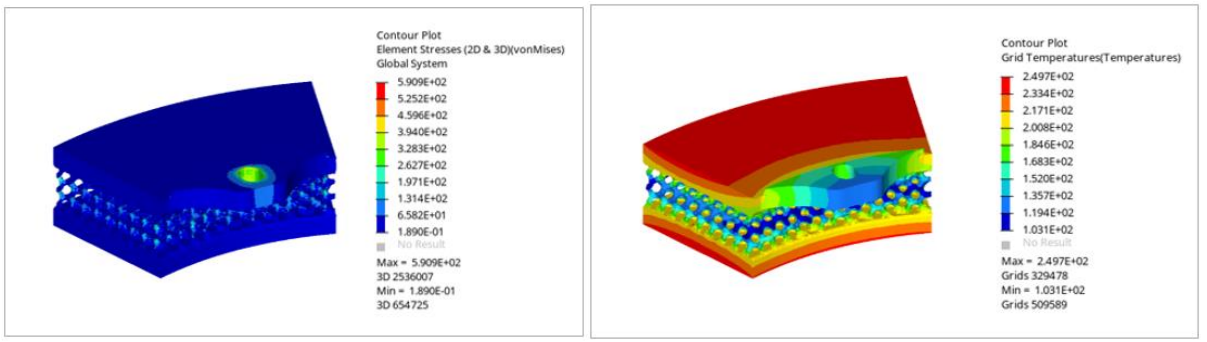
Şekil 3.Geleneksel üretime uygun tasarımın a) ısı yükleri altındaki stres durumu, b) ısı analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the design suitable for conventional production)



Şekil 4.Cross kafes yapıli disk tasarımının a) ısı yükleri altındaki stres durumu, b) ısı analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the cross lattice structured disc design)



Şekil 5.Xcell kafes yapıli disk tasarımının a) ısı yükleri altındaki stres durumu b) ısı analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the Xcell lattice structured disc design)



Şekil 6.Gyroid kafes yapıli disk tasarımının a) ısı yükleri altındaki stres durumu b) ısı analizi (a) Stress state under thermal loads b) thermal analysis of the gyroid lattice structured disc design)

Tablo 3. Maksimum sıcaklık ve gerilme değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of maximum temperature and stress values)

	Standart	Cross	Xcell	Gyroid
<b>Maksimum Sıcaklık (°C)</b>	439	315	213	249
<b>Von-Mises Gerilmesi (MPa)</b>	696	517	452	590

Standart tasarımdaki fren diskinde eşit ısı yüklemesinde 439 °C ve 696 MPa gerilme ile en yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Gyroid ve Cross yapıdaki kafes yapı tasarımları standart tasarımdan daha iyi sonuçlar verirken Xcell kafes yapısındaki tasarıma göre daha kötü sonuçlar vermiştir. Tüm tasarımların gerilme ve ısı analizi değerlendirildiğinde en iyi sonuç Xcell kafes yapılı tasarım olarak değerlendirilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Yapılan çalışma sonucunda eklemeli imalat için tasarlanan disk ile geleneksel döküm yöntemiyle üretilen diskler arasında çeşitli avantajlar elde edilmiştir. Detaylandırılmış sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Eklemeli imalat yöntemi için tasarlanan disk, geleneksel döküm yöntemiyle üretilen disklerden kütlece %20 daha hafif olarak tasarlanmıştır. Bu hafiflik, özellikle hareketli sistemlerde, uçak ve otomobil parçalarında, makinelerde ve diğer ağırlık odaklı uygulamalarda enerji verimliliği açısından büyük bir avantaj sağlayacaktır.
- Standart disk yüzeyinde 440 °C sıcaklık, eklemeli imalata uygun tasarım yapılan Gyroid, Cross, Xcell kafes yapıdaki diskin yüzeyindeki bu değer sırası ile 249 °C, 315 °C ve 213 °C olarak hesaplanmıştır. Daha düşük sıcaklık, disk malzemesinin mekanik özelliklerini korumasına ve termal yorgunluğun azaltılmasına yardımcı olacaktır.
- Standart diskte ısı yüklemeyen kaynaklı 696 MPa gerilme hesaplanmıştır. Eklemeli imalata uygun tasarım yapılan Gyroid, Cross, Xcell kafes yapıdaki diskte bu değer sırası ile 590 MPa, 517 MPa, ve 452 MPa olarak hesaplanmıştır. Von-Mises gerilmeleri, malzemenin dayanma sınırının ne kadar yakınında olduğunu gösteren bir parametredir. Düşük gerilmeler, disk malzemesinin daha uzun ömürlü olmasını ve yorulma süreçlerinin etkilerini azaltmasını sağlayacaktır.
- Eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak kompleks şekillerin veya kişiselleştirilmiş parçaların üretiminde büyük bir avantajdır. Ayrıca tasarım değişikliklerini daha kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir, bu da üretim sürecinde esneklik sağlayacaktır.
- Eklemeli imalat prosesi, özel takımların kullanımını gerektirmez ve kalıp veya döküm kalıpları gibi maliyetli araçlara ihtiyaç duymaz. Bu, farklı boyut ve şekillerde disklerin seri üretiminin yapılabilmesini ve küçük ölçekte üretimin ekonomik olmasını sağlar. Aynı zamanda, yeni bir tasarımın üretimine geçmek için ek maliyetleri azaltır ve üretim sürecini hızlandıracaktır.
- Eklemeli imalat yöntemleri, döküm gibi diğer geleneksel yöntemlere göre üretim sürelerini önemli ölçüde kısaltacaktır. Tek adımda katman katman üretim yapıldığı için ara aşamalara gerek yoktur. Bu, hızlı prototipleme ve seri üretimde zaman tasarrufu sağlar. Daha kısa üretim süreleri, talebe göre üretimi ve acil durumlar için hızlı tepki verebilme yeteneğini arttıracaktır.
- Eklemeli imalat yöntemleri, kafes yapılarının üretilmesine olanak tanır. Kafes yapı tasarımını, malzemenin kullanımını optimize ederek daha hafif ve güçlü disklerin üretilmesini sağlar. Aynı zamanda bu yapı, daha etkin bir soğutma sağlar. Disklerin fren esnasında ısınmasını önlemek için etkin bir ısı dağılımı gereklidir. Kafes yapı, diskin soğutma yüzeyini artırarak daha iyi bir ısı dağılımı sağlar, böylece fren mesafesini kısaltabilir ve disklerin kullanım ömrünü uzatacaktır.

Bu sonuçlar, eklemeli imalatın geleneksel döküm yöntemine göre bir dizi avantaj sunduğunu göstermektedir. Daha hafif, daha düşük sıcaklık ve düşük gerilmelere sahip olan eklemeli imalat diskleri, endüstride daha verimli ve dayanıklı parçaların üretilmesine olanak tanır. Ancak bu sonuçlar, her uygulama için geçerli olmayabilir ve tasarım aşamasında dikkatli bir analiz ve optimizasyon gerektirebilir.




#### **KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. J.Y. Wong, Theory of ground vehicles, John Wiley & Sons, New Jersey, 2008.
2. Y. Li, D.S. Crombez, Automotive braking system, Sunderland: World Journal of Modelling and Simulation, 31-32, 2015.
3. G.W. Smolen, G. Martino, Lightweight brake rotor with a thin, heat resistant ceramic coating, Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 65-67, 1993.
4. A.A. Adebisi, M.A. Maleque, M.M. Rahman, Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 4: 471–480, 2011.
5. T. Valvano, K. Lee, An analytical method to predict thermal distortion of a brake rotor, New York: SAE Technical, 566-571, 2000.
6. F. Bagnoli, F. Dolce, M. Bernabei, Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs, Engineering Failure Analysis, 16(1): 152-163, 2009.
7. T. Wohler, Additive manufacturing and 3D printing-state of the industry annual worldwide progress report, Wohler's Associates, Fort Collins, 27-28, 2013.
8. A. Belhocine, M. Bouchetara, Thermomechanical behaviour of dry contacts in disc brake rotor with a grey cast iron composition, Transactions of the Indian Institute of Metals, 65: 231–238, 2012.
9. A. Belhocine, M. Bouchetara, Thermo-mechanical coupled analysis of automotive brake disc, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 14: 1591–1600, 2013.
10. S.M. Kim, A study on thermal analysis in ventilated brake by FEM, J. Korean Soc. Mach. Tool Eng., 18: 544–549, 2009.
11. S.P. Jung, T.W. Park, J.B. Chai, W.S. Chung, Thermo-mechanical finite element analysis of hot judder phenomenon of a ventilated disc brake system, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12:821–828, 2011.
12. S.P. Jung, Y.G. Kim, T.W. Park, A Study on thermal characteristic analysis and shape optimization of a ventilated disc, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13, 57–63, 2012.
13. V.M.M. Thilak, R. Krishnaraj, M. Sakthivel, K. Kanthavel, M.G. Deepan Marudachalam, R. Palani, Transient thermal and structural analysis of the rotor disc of disc brake, International Journal of Scientific and Engineering Research, 2(8): 1-4, 2011.
14. I.C. Güteryüz, Z.H. Karadeniz, Transient thermal analyses of an integrated brake rotor and wheel hub for heavy duty vehicles, Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Auto Eng., 236(5):971-986, 2022.
15. S. Zhang, J. Yin, Y. Liu, N. Liu, Z. Sha, Y. Wang, B. Rolfe, Thermal–structural coupling analysis of brake friction pair based on the displacement gradient circulation method, Advances in Mechanical Engineering, 10, 1–13, 2018.
16. C.H. Galindo-Lopez, M. Tirovic, Maximising heat dissipation from ventilated wheel-hub-mounted railway brake discs, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, 227, 269–285, 2013.
17. I. Roy, A. Bharatish, Optimization of ventilated brake disc rotor geometry for enhanced structural characteristics, Journal of Measurements in Engineering, 8(3): 98–106, 2020.
18. S. Topouris, M. Tirovic, Design synthesis and structural optimization of a lightweight, monobloc cast iron brake disc with fingered hub, Engineering Optimization, 51, 1710–1726, 2019.
19. S. Park, K. Lee, S. Kim, J. Kim, Brake-disc holes and slit shape design to improve heat dissipation performance and structural stability, Appl. Sci., 12, 1171, 2022.
20. S.R. Abhang, D.P. Bhaskar, Design and analysis of disc brake, International Journal of Engineering Trends and Technology, 8(4): 165-167, 2014.
21. F. Bagnoli, F. Dolce, M. Bernabei, Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs, Engineering Failure Analysis, 16(1): 152-163, 2009.
22. A.E. Sisson, Thermal analysis of vented brake rotors, Society of Automobile Engineers Transactions, 87: 1685-1694, 1978.

23. M.D. Hudson, R.L. Ruhl, Ventilated brake rotor air flow investigation, Society of Automobile Engineers Transactions, 106, 1862-1871, 1997.
24. C.B. Saiz, T. Ingrassia, V. Nigrelli, V. Ricotta, Thermal stress analysis of different full and ventilated disc brakes, Frattura ed Integrità Strutturale, 9(34): 608–621, 2015.



## Investigation of The Effect of Micronized Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) Powder Wastes on Physical and Mechanical Properties in EPDM Mixtures

Çağrı Çokaçar<sup>1</sup> , İlker Köprü<sup>1</sup> , Hakan Salih Yetgin<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup>Seçil Kauçuk San ve Tic. A.Ş. Tarsus, Mersin, Türkiye

<sup>2</sup>Tarsus University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Tarsus, Mersin, Türkiye

### ARTICLE INFORMATION

Received: 13.10.2023

Accepted: 22.11.2023

#### Keywords:

Micronized EPDM powder  
Rheological properties  
Physical properties  
EPDM rubber

### ABSTRACT

In this study, micronized-ethylene-propylene-diene monomer powders (m-EPDM) by the physical crushing method were added to EPDM rubber, and their effects on physical and mechanical properties were examined. Micronized EPDM powders were added at rates of 10-20-30%. EPDM rubber was pulped with micronized EPDM powder using a 1.5-liter laboratory type mini banbury. The obtained paste was vulcanized in the press at 180 °C for 20 min., and test plates were acquired. Rheological and fluidity properties of EPDM rubber with m-EPDM powder added were examined by pre-press rheometer (Moving Die Rheometer\_MDR) and Mooney viscosity tests. Tensile and permanent deformation tests were performed to determine mechanical properties density, Shore A hardness tests were performed to determine physical properties and dispersion analysis was performed to distribute the additives in EPDM rubber. As a result of the study, minimum torque (ML) values increased while maximum torque (MH) values decreased depending on the amount of m-EPDM. Mooney viscosity of EPDM/30m-EPDM rubber increased by 40.9%. It was observed that cure rate index (CRI) did not change depending on the amount of m-EPDM. With the addition of 30% m-EPDM, breaking strength decreased by 39.2%, and elongation at break was reduced by 9.87%.

## Mikronize Etilen-Propilen-Dien Monomer (EPDM) Atıklarının EPDM Karışımlarındaki Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 13.10.2023

Kabul: 22.11.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Mikronize EPDM tozu  
Reolojik özellikler  
Fiziksel özellikler  
EPDM kauçuğu

### ÖZET

Bu çalışmada fiziksel kırma yöntemiyle mikronize edilmiş Etilen Propilen Dien Monomer (m-EPDM) tozları EPDM kauçuğuna ilave edilerek fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Mikronize EPDM tozları %10-20-30 oranlarında ilave edilmiştir. 1.5 lt'lik laboratuvar tipi mini banbury kullanılarak mikronize-EPDM tozu ile EPDM kauçuğu hamur haline getirilmiştir. Elde edilen hamur preste 180 °C ve 20 dk. boyunca vulkanize edilerek test plakaları elde edilmiştir. Pres öncesi reometri (MDR) ve Mooney viskozite testleri ile m-EPDM tozu ilaveli EPDM kauçuğun reolojik ve akışkanlık özellikleri incelenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi ve kalıcı deformasyon testi, fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yoğunluk ve Shore A sertlik testleri, EPDM kauçuğunda mevcut olan katkıların dağılımı için ise dispersiyon analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, m-EPDM miktarına bağlı olarak minimum tork (ML) değerleri artarken maksimum tork (MH) değerleri azalmıştır. EPDM/30m-EPDM kauçuğun mooney viskozitesi %40.9 oranında artmıştır. Kür indeksi (CRI) oranlarının, m-EPDM miktarına bağlı olarak değişmediği gözlenmiştir. %30 m-EPDM ilavesi ile kopma mukavemeti %39.2, kopma uzaması ise %9.87 oranlarında azalmıştır.

\*Sorumlu yazar, e-posta: shyetgin@gmail.com

To cite this article: Ç. Çokaçar, İ. Köprü, H. S. Yetgin Investigation of The Effect of Micronized Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) Powder Wastes on Physical and Mechanical Properties in EPDM Mixtures, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3),129-136, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1375512>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Polymer and polymer composite materials are used in various applications, from simple daily applications to complex high-tech applications. The rapid consumption of polymer materials causes the waste of these materials to increase rapidly. Especially in the automotive industry, used tires and waste generated during production and after use constitute a large portion of polymer material waste [1]. Since rubber-based materials do not decompose quickly, waste disposal has become a major environmental problem for manufacturers and the state. Since most waste contains petroleum-based products, reuse and recycling are essential for protecting non-renewable resources [1-2].

Karaağaç et al. [1] stated that approximately 40% of the world's rubber consumption comes from the use of natural rubber (NR), and the majority of natural rubber is followed by general-purpose rubbers such as styrene-butadiene (SBR) rubber, butyl rubber (IIR) and ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) rubber. It has been stated that EPDM rubber, among these rubbers, contributes to approximately 12% of the world's rubber production [3]. EPDM rubber, which was first introduced commercially by the United States in 1962, is the fastest growing general-purpose rubber type with a wide range of applications due to its features such as low density, economical, high filler and process oil capacity, and superior thermal and ozone resistance [1-2, 4-5]. Two-thirds of any automobile's total amount of rubber is used in tires. The remaining rubber-based components include gaskets, sealants, hoses, anti-vibration materials, and plugs. Almost 25-50% of these non-tire rubber products are produced from EPDM rubber. Therefore, it is not surprising that EPDM-based wastes emerge in increasing amounts every day [6-9].

Rubber-based products generally do not deteriorate or melt, so traditional reprocessing techniques are unsuitable for recycling rubber [10]. Two methods are used to prepare natural or synthetic rubbers for recycling: crushing at room temperature and crushing by cooling with liquid nitrogen [1]. In the crushing process at room temperature, the particle size is larger because rubber materials are not rigid; they are as elastic as possible. Although the initial investment and operating costs are relatively high in the liquid nitrogen method, smaller grains can be obtained compared to the crushing process at room temperature. In the cracking process performed by cooling with liquid nitrogen, the embrittlement effect of low temperatures, called cryogenic, on the materials is used [1, 4, 11].

Waste recovery studies in the rubber industry have generally focused on vehicle tire rubber, both academically and industrially. The amount of waste vehicle tires has increased temporarily, reaching around 325 million annually [12]. However, since vehicle tire rubber contains different compositions, there are inefficiencies in the recycling of waste [1]. The waste powders from grinding EPDM rubber have a reinforcement effect with a low elastic modulus due to the processing oil content. High waste powder size can cause stress stresses or poor bonding between waste rubber and untreated rubber due to the smooth surfaces of waste powders [13].

There are many studies on the use of vehicle tire waste and ground EPDM waste in different rubber and polymer formulations [1-2, 4-5, 8, 14-15]. Güngör et al. [5] analyzed the vulcanization process with kinetic parameters by adding waste tire particles to EPDM and Silicone Rubber matrices. As a result of the study, it was stated that adding waste rubber to rubber products would reduce the waste problem. Still, it should be compatible so as not to affect the vulcanization process. Demirer et al. [4] examined the effect of waste EPDM powders on the bending properties of Polypropylene (PP)/EPDM mixtures. EPDM waste ground in different sizes (0-50, 50-75, 75-150, and 150-300 $\mu$ ) and different proportions (0-10-20-30 and 50%) was produced by extrusion and subsequent injection molding methods. As a result of the study, bending strength and bending modulus decreased with increasing amount of waste EPDM. The % elongation value at maximum power has increased. Since the obtained strength values are acceptable, it has been stated that waste EPDM can be used as a recycling material.

Ismail et al. [16] investigated the effect of three different GTR sizes (250–500  $\mu$ m, 500–710  $\mu$ m and 710  $\mu$ m–1 mm) on the mechanical properties of PP/GTR mixtures. Mixtures containing smaller

ground tyre rubber (GTR) particles (250-500 µm) caused high friction due to their higher surface area, which resulted in higher balance torque. However, it has been stated that the results are worsened due to the cross-linked structure of GTR particles and their weak adhesion to the PP matrix, which causes easy crack initiation and rapid crack propagation. Sonnier et al. [17] used three different rubber particle sizes (380–1200 µm) in GTR/Low Density Polyethylene (LDPE) compounds. Since no significant difference in the mechanical properties of GTR/LDPE (50/50 wt%) mixtures was obtained, they suggested that controlling the size of GTR particles is not the only parameter to improve mechanical properties. Karağağaç et al. [1] examined the effect of the amount and size of EPDM waste ground up to 35, 40, and 60 mesh at ambient temperature for automobile application. A new trial product consisting of maleated ethylene-propylene rubber (EPM) and bitumen was used to improve the interphase adhesion of waste and untreated EPDM. As a result of the study, it was stated that the reuse of waste EPDM powders caused moderate deterioration in the product's curing properties and mechanical properties. Jacob et al. [2] examined EPDM rubber's mechanical and rheological properties containing ground EPDM vulcanizate. With the addition of ground EPDM, Mooney viscosity, tensile strength, tear strength, and elongation at break were increased while scorch time decreased. Generally speaking, the most critical parameters for reusing waste powder rubbers are the waste amount and the waste powder size [18]. Munirah et al. [19] examined the effect of waste-cured EPDM rubbers added to natural rubber (NR) on mechanical properties. The amount of waste was adjusted to be 0-20-40-60 phr. The best results were obtained by incorporating up to 60 phr of cured EPDM waste into the NR. The best formulation at 60 phr showed the highest tensile strength and elongation at break with moderate hardness, modulus, degree of cracking, and cycling.

This study aims to reuse EPDM powder waste (m-EPDM) by replacing it with untreated EPDM for building and infrastructure applications. For this purpose, EPDM rubber, which was micronized-powdered by the crushing method at room temperature, was added to untreated EPDM rubber at the rates of 10, 20, and 30%, and the effect of m-EPDM powder on mechanical, rheological and physical properties was examined. The study results were evaluated regarding the suitability of EPDM rubbers with m-EPDM addition for use in blind plugs and transmission pipes of solar energy panels used in water heating systems.

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

### 2.1. Materials (Malzemeler)

In this study, a commercially available EPDM rubber was used. The additives and their ratios used in producing EPDM rubber are given in Table 1 in volumetric form. EPDM powders in the range of 80-100 mesh, obtained from breaking and micronizing the EPDM scraps produced during production at Seçil Kauçuk A.Ş., were used as filling elements. m-EPDM powders were added at rates of 10-20-30%.

Table 1. Formulation of EPDM rubbers specifications (EPDM kauçukların formülasyonu)

	EPDM	EPDM/10m-EPDM	EPDM/20m-EPDM	EPDM/30m-EPDM
EPDM	100	100	100	100
Carbon black	50	50	50	50
White fill	20	20	20	20
Oil	40	40	40	40
Zinc oxide	4	4	4	4
Stearic acid	2	2	2	2
Sulfur	1	1	1	1
MBT	0.5	0.5	0.5	0.5
TMTD	1	1	1	1
m-EPDM	0	25	55	95

## 2.2. Production Methods (Üretim Yöntemleri)

Untreated EPDM and m-EPDM powder-filled EPDM rubbers were pulped with a 1.5-liter laboratory type mini banbury. Rheometer tests of the produced m-EPDM filled EPDM rubber samples were carried out by the ASTM D5289 standard on the Alpha MDR 2000 brand rheometer device owned by Seçil Kauçuk A.Ş. The test was performed at 200 °C and 5 min.

## 2.3. Test Methods (Test Yöntemleri)

Test plates were obtained by vulcanizing the paste products in the press at 180 °C and for 20 min. Tensile tests were prepared by ASTM D638 standard. Dumb-bell type test pieces with a length of gauge section of 25mm, a total length of 75mm and an width of ends of 12.5mm were used. The tests were carried out on a Zwick-Z020 model tensile tester. Each tensile test sample was measured at least five times and averaged. Tensile tests were carried out at 200 mm/min tensile speed. Permanent deformation tests were carried out according to the DIN 53517 standard at 100 °C for 22 hours and 25% compression. Hardness tests were carried out by DIN 53505 ideal, and hardness was measured in Shore A. In hardness measurements, at least ten hardness measurements were made on each test sample. Density tests were carried out using the ISO 1183 standard using the Archimedes principle. Dispersion quality measurements, ranging from 1 to 10 depending on the number and size of agglomeration, were made according to the ISO 11345 standard.

## 3. EXPERIMENT RESULTS (DENEY SONUÇLARI)

Images of dispersion tests performed with untreated EPDM and EPDM rubber with m-EPDM addition are given in Figure 1. The dispersion test results performed to determine the distribution of carbon black and other filler particles present in EPDM rubbers are shown in Table 2. When the dispersion rates were examined, it was observed that EPDM rubbers were in the 89-93% band. According to the dispersion analysis images in Figure 1 and the test results in Table 2, a 5.5% white area is observed in EPDM/30m-EPDM rubber. This white area allows us to comment on whether the white filling materials in the mixture are mixed homogeneously with other components. The higher the dispersion rate in %, the better all the details in the mix are dispersed. The smaller the white area in % and the smaller the average agglomerate size, the more homogeneously distributed the white fillers in the combination. In line with this information, EPDM/10m-EPDM rubber was the most successful EPDM rubber in dispersion test results with 6.31% white area, 93.69% dispersion, and 2.88 average agglomerate size.

Table 2. Dispersion test results (Dispersiyon test sonuçları)

	X	Y	Z	White area, %	Dispersion, %	Average Agg. Size, [um]	Agg. Size Std. Dev [um]
EPDM	1.50	9.84	75.53	8.57	91.43	3.07	2.93
EPDM/10m-EPDM	2.07	9.63	81.97	6.31	93.69	2.88	3.00
EPDM/20m-EPDM	1.62	9.18	77.32	7.94	92.06	3.19	3.55
EPDM/30m-EPDM	1.12	8.46	68.61	10.99	89.01	3.46	4.21

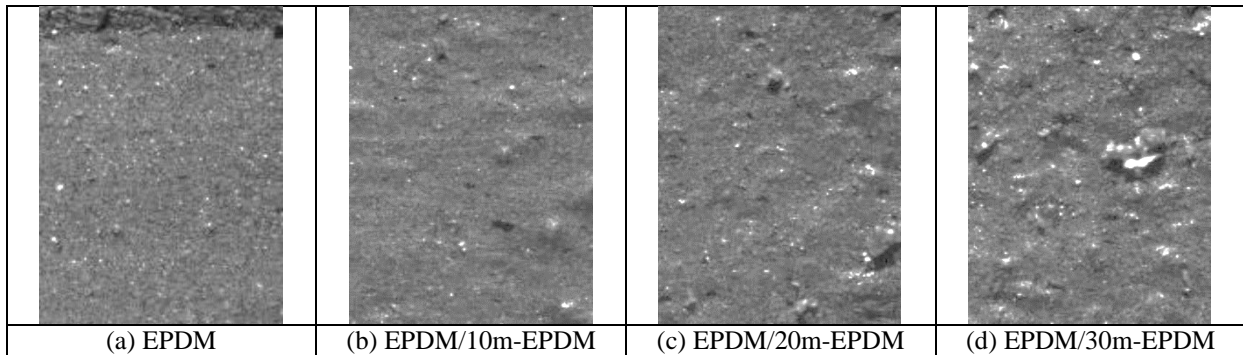


Figure 1. Dispersion images (Dispersiyon görüntüleri)

Table 3 shows the results obtained after rheological and physical tests of EPDM rubbers with different amounts of m-EPDM powder added. When the table is examined, it is determined that the minimum torque (ML) values increase with increasing m-EPDM amount while the maximum torque (MH) values decrease. The initial baking time of the pulp ( $t_{s2}$ ) and the time when the dough reached ultimate baking ( $t_{90}$ ) decreased with the addition of m-EPDM. When Shore A hardness results were evaluated, it was determined that the hardness values did not change when m-EPDM was added. In general, hardness values of EPDM rubber samples were obtained between 56-58 Shore A. When tear strength and elasticity values were examined, it was stated that tear strength and elasticity decreased significantly with m-EPDM and increasing m-EPDM amount. The study conducted by Jacob et al. [2] stated that as the amount of waste EPDM increased, the elasticity ratio decreased due to the increase in carbon black content.

Table 3. Rheological and physical test results (Reolojik ve fiziksel test sonuçları)

	EPDM	EPDM/10m-EPDM	EPDM/20m-EPDM	EPDM/30m-EPDM
ML (dNm)	0.96	1.17	1.51	1.81
MH (dNm)	13.31	12.88	12.09	11.43
$t_{s2}$ (min)	0.43	0.40	0.41	0.42
$t_{90}$ (min)	1.51	1.37	1.48	1.48
Tear strength, N/mm	79.3	56.0	62.2	53.5
Density ( $g/cm^3$ )	1.086	1.098	1.102	1.122
Hardness (Shore A)	58	58	57	56
Elasticity, %	61.22	58.84	57.88	57.38

Figure 2 shows the EPDM rubber's breaking strength and elongation at break graph with m-EPDM powder added. As seen in the figure, breaking strength and elongation at break decreased with the addition of m-EPDM to EPDM rubber and the increasing amount of m-EPDM. Compared to untreated EPDM, with the addition of 30% m-EPDM, the breaking strength decreased by 39.2%, and the elongation at breaking reduced by 9.87%. Similar results were obtained in the study conducted by Karaagaç et al. [1].

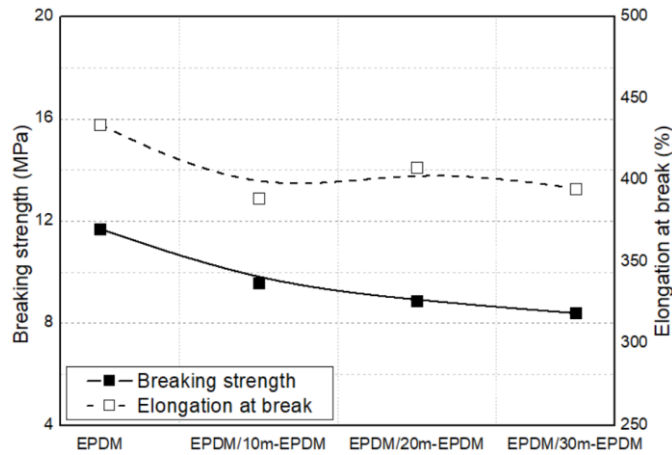


Figure 1. Breaking strength and elongation at break change (Kopma mukavemeti ve kopma uzaması değişimi)



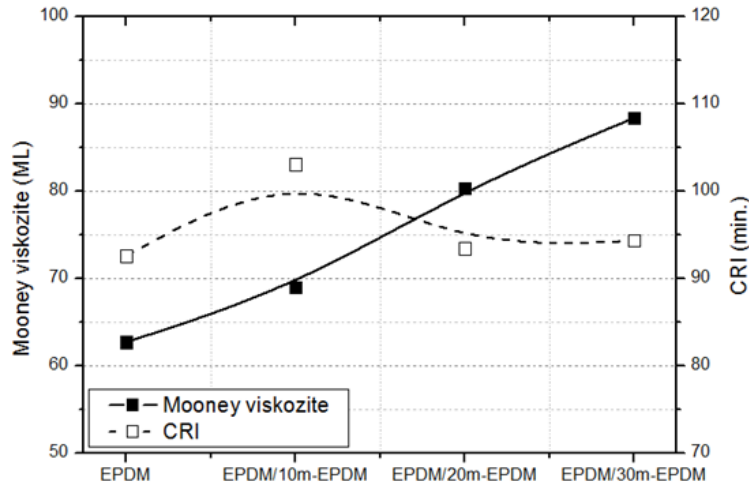


Figure 3. Breaking strength and breaking elongation change (Kopma mukavemeti ve kopma uzaması değişimi)

Figure 3 shows the change in Mooney viscosity and CRI values of untreated EPDM and EPDM rubber with m-EPDM powder added. As seen in the figure, it was determined that Mooney viscosity values increased depending on the amount of m-EPDM. At the same time, untreated EPDM rubber had a viscosity value of 62.7 MU; with the addition of m-EPDM and the increasing amount of m-EPDM, the Mooney viscosity value increased by 40.9% and reached 88.4 MU. When the CRI results defining the difference between  $t_{90}$  and  $t_{s2}$  were evaluated, it was determined that the CRI values were between 92.5 and 103.0 min, depending on the amount of m-EPDM.

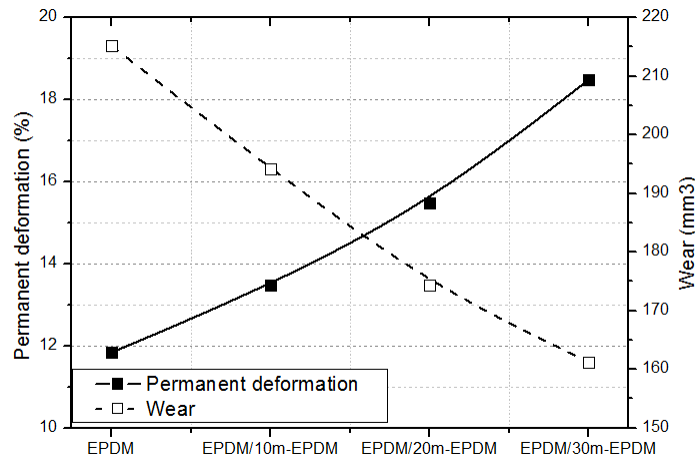


Figure 4. Change in permanent deformation and wear amounts (Kalıcı deformasyon ve aşınma miktarlarındaki değişim)

Figure 4 shows the change in permanent deformation and wear amounts of untreated EPDM and EPDM rubbers with m-EPDM powder added. As seen in the figure, the permanent deformation rate of untreated EPDM rubber, which was 11.8%, increased by 13.8% with the addition of 10% m-EPDM. Similarly, adding m-EPDM to 20% and 30%, permanent deformation rates increased by 30.7% and 56.1%, respectively. When the wear results are evaluated, the wear amounts of EPDM rubbers with m-EPDM powder added have decreased. This reduction was achieved at 9.76%, 18.99%, and 25.07% for EPDM/10m-EPDM, EPDM/20m-EPDM, and EPDM/30m-EPDM rubbers, respectively. This shows that wear resistance increases with the addition of m-EPDM.

#### 4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

As a result of the study examining the rheological and mechanical properties of EPDM rubber with the addition of EPDM powder micronized by physical crushing method.

When the MDR test results were evaluated, the minimum torque (ML) values increased, and the maximum torque (MH) values decreased depending on the amount of m-EPDM. Compared to untreated EPDM, the Mooney viscosity of EPDM/30m-EPDM rubber increased by 40.9%. It has been observed that CRI rates do not change depending on the amount of m-EPDM. Compared to untreated EPDM, with the addition of 30% m-EPDM, tensile strength decreased by 39.2%, and elongation at break reduced by 9.87%. Depending on the amount of m-EPDM, permanent deformations decreased, and wear resistance increased.



When the results are evaluated, it is thought that EPDM rubbers with m-EPDM addition will be suitable for use in blind plugs and transmission pipes of solar energy panels used in water heating systems.

## REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. B. Karaağaç, H.O. Turan, D.D. Oral, Use of ground EPDM wastes in EPDM-based rubber compounds: With and without compatibilization, *Journal of Elastomers & Plastics*, 47(2):117-135, 2015.
2. C. Jacob, A. K. Bhowmick, P.P. De, S.K. De, Recycling of EPDM waste. I. Effect of ground EPDM vulcanizate on properties of EPDM rubber, *Journal of Applied Polymer Science*, 82(13):3293-3303, 2001.
3. P. Sutanto, F.L. Laksmana, F. Picchioni, L.P.B.M. Janssen, Modeling on the kinetics of an EPDM devulcanization in an internal batch mixer using an amine as the devulcanizing agent, *Chemical Engineering Science*, 61(19):6442-6453, 2006.
4. H. Demirer, Y. Tezcan, K. Büyükkaya, İ. Kartal, Effect of addition of recycled EPDM size on the bending properties of Polypropylene, *European Journal of Science and Technology*, 15:381-386, 2019.
5. A. Güngör, İ.K. Akbay, T. Özdemir, Accumulation of recycled waste tyre within different rubbers: A kinetic study, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 37(4):1169-1179, 2019.
6. J. Yun, V.V. Yashin, A.I. Isayev, Ultrasonic devulcanization of carbon black-filled ethylene propylene diene monomer rubber, *Journal of Applied Polymer Science*, 91(3):1646-1656, 2004.
7. D.Z. Pirityi, K. Pölöskei, Thermomechanical devulcanisation of ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber and its subsequent reintegration into virgin Rubber, *Polymers*, 13(7):1116, 2021.
8. M. Sabzekar, G. Zohuri, M.P. Chenar, S.M. Mortazavi, M. Kariminejad, S. Asadi, A new approach for reclaiming of waste automotive EPDM rubber using waste oil, *Polymer Degradation and Stability*, 129:56-62, 2016.
9. A. Fazli, D. Rodrigue, Waste rubber recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers, *Materials*, 13(3):782, 2020.
10. M. Forrest, Overview of the world rubber recycling market. In *Recycling and Reuse of Waste Rubber*, 1st ed.; Potter, D., (EdS.) Smithers Rapra: Shawbury, UK, 1:17-30, 2014.
11. K. Ünlü, EPDM Atıklarının Otomotiv Endüstrisinde Degerlendirilmesi Üzerine Bir inceleme, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
12. İ. K. Akbay, A. Güngör, T. Özdemir, Optimization of the vulcanization parameters for ethylene-propylene-diene termonomer (EPDM)/ground waste tyre composite using response surface methodology, *Polymer Bulletin*, 74:5095-5109, 2017.
13. C. Jacob, A.K. Bhowmick, P.P. De, S.K. De, Utilization of powdered EPDM scrap in EPDM compound, *Rubber Chemistry and Technology*, 76(1): 36, 2003.
14. A.M. Lepadatu, S. Asaftei, N. Vennemann, Recycling of EPDM rubber waste powder by activation with liquid polymers, *Rohstoffe Und Anwendungen Raw Materials and Applications*, 41-47:2014.
15. A.B. Habieb, F. Milani, G. Milani, R. Cerchiaro, Rubber compounds made of reactivated EPDM for fiber-reinforced elastomeric isolators: an experimental study, *Iranian Polymer Journal*, 29:1031-1043, 2020.
16. H. Ismail, M. Awang, M. Hazizan, Effect of waste tire dust (WTD) size on the mechanical and morphological properties of polypropylene/waste tire dust (PP/WTD) blends, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 45:463-468, 2006.
17. R. Sonnier, E. Leroy, L. Clerc, A. Bergeret, J. Lopez-Cuesta, Polyethylene/ground tyre rubber blends: Influence of particle morphology and oxidation on mechanical properties, *Polymer Testing*, 26:274-281, 2007.

18. C. Jacob, A.K. Bhattacharya, A.K. Bhowmick, P.P. De, S.K. De, Recycling of ethylene propylene diene monomer (EPDM) waste. III. Processability of EPDM rubber compound containing ground EPDM vulcanizates, *Journal of Applied Polymer Science*, 87:2204, 2003.
19. O. Munirah, M.S. Mustafa, Z. Ahmad, N.M.A. Wahab, Performance evaluation of natural rubber filled cured ethylene propylene diene rubber (EPDM) waste reinforcement, *Solid State Science and Technology*, 26(1):186-193, 2018.

## Ultrasonik Atomizasyon Esasına Dayalı Minimum Miktar Yağlama (UMMY) Sistemi İle Tornalamada UMMY Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Talaş Büzüşme Katsayısı Üzerine Etkisi

Ramazan MERGEN<sup>1,\*</sup> , Fırat KAFKAS<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 26.10.2023

**Kabul:** 26.11.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Ultrasonik atomizasyon  
esaslı minimum miktar  
yağlama (UMMY)  
Kesme kuvveti  
Talaş büzüşme katsayısı  
Gri ilişki analizi  
AISI 1050

### ÖZET

Ultrasonik atomizasyon esasına dayalı minimum miktar yağlama (UMMY) sistemi, takım-talaş ara yüzüne etkili bir şekilde nüfuz ederek kesme bölgesini soğutmada ve işleme performansının artmasında etkinlik kazanmıştır. UMMY sisteminin performansını, kesme sıvısı konsantrasyon oranı (A), nozul orifis çapı (B), yatay nozul açısı (C), dikey nozul açısı (D), nozul mesafesi (E), hava basıncı (F), kesme sıvısı atomizasyon oranı (G) ve nozul tipi (H) gibi UMMY işleme parametreleri önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmanın amacı, UMMY işleme parametrelerinin ortalama kesme kuvveti (Fc) ve talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) üzerine etkilerini araştırmak ve optimum UMMY işleme parametrelerini belirlemektir. Bu amaçla UMMY sistemi ile AISI 1050 çeliğin tornalanması, Taguchi L27 ortogonal deney tasarımına göre CNC torna tezgâhında deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tekniklerine göre UMMY işleme parametrelerinin Fc ve  $\zeta$  üzerine etkisi varyans analizi kullanılarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, en düşük Fc ve  $\zeta$  değerleri kısa nozulla (K) yapılan işlemede elde edilmiştir. Fc üzerine en fazla %29.20 değeriyle kesme sıvısı konsantrasyon oranı katkı sağlamıştır. Nozul orifis çapı, yatay nozul açısı ve dikey nozul açısı değerlerinin artmasıyla  $\zeta$  değerinin arttığı tespit edilmiştir. Çoklu yanıt yöntemi kullanılarak yapılan gri ilişki analizinde optimum UMMY işleme parametrelerinin seviyeleri A2B1C2D3E2F3G1H2 şeklindedir.

## Effect of UMQL Parameters on Cutting Force and Chip Compression Coefficient in Turning with Minimum Quantity Lubrication Based on Ultrasonic Atomization System (UMQL)

### ARTICLE INFO

**Received:** 26.10.2023

**Accepted:** 26.11.2023

#### Keywords:

Ultrasonic atomization  
based minimum quantity  
lubrication (UMQL)  
Cutting force  
Chip compression  
coefficient  
Grey relational analysis  
AISI 1050

### ABSTRACT

Minimum quantity lubrication system based on ultrasonic atomization (UMQL) has gained effectiveness in cooling the cutting zone and increasing machining performance by effectively penetrating the tool-chip interface. UMQL machining parameters such as cutting fluid concentration ratio (A), nozzle orifice diameter (B), horizontal nozzle angle (C), vertical nozzle angle (D), nozzle distance (E), air pressure (F), cutting fluid atomization ratio (G) and nozzle type (H) significantly affect the performance of the UMQL system. The aim of this study is to investigate the effects of UMQL machining parameters on average cutting force (Fc) and chip compression coefficient ( $\zeta$ ) and to determine the optimum UMQL machining parameters. For this purpose, the turning of AISI 1050 steel with the UMQL system was carried out according to the Taguchi L27 orthogonal experimental design on a CNC lathe. The effect of UMQL machining parameters on Fc and  $\zeta$  was determined using analysis of variance according to Taguchi experimental techniques. As a result of the study, the lowest Fc and  $\zeta$  values were obtained in the machining performed with a short nozzle (K). Cutting fluid concentration ratio contributed the most to Fc with a value of 29.20 %. It was determined that the  $\zeta$  value increased as the nozzle orifice diameter, horizontal nozzle angle and vertical nozzle angle values increased. In the grey relational analysis using the multiple response method, the optimum UMMY machining parameters levels were A2B1C2D3E2F3G1H2.

\*Sorumlu yazar, e-posta: ramazan.mergen@gazi.edu.tr

To cite this article: R. Mergen, F. Kafkas, Ultrasonik Atomizasyon Esasına Dayalı Minimum Miktar Yağlama (UMMY) Sistemi İle Tornalamada UMMY Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Talaş Büzüşme Katsayısı Üzerine Etkisi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3), 137-154, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1381848>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal işlemede, kesme sıvılarının atomize edilerek takım-talaş ara yüzüne etkili bir şekilde nüfuz etmesi oldukça önemlidir [1]. Takım-talaş ara yüzünün soğutulması ve yağlanması açısından da daha çok fayda sağlamaktadır [2-4]. İşleme sırasında meydana gelen yüksek kesme sıcaklıkları, takım aşınmasının artmasına ve ürün kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Oluşan olumsuzlukların giderilmesi ve kesmede oluşan sıcaklıkların düşürülmesi için kesme sıvıları kullanılmaktadır [5]. Geleneksel sulu soğutma, yüksek basınç soğutma, kriyojenik soğutma, minimum miktarda yağlama (MMY) ve yakın zamanda önerilen ultrasonik atomizasyon esaslı kesme sıvısı püskürtme sistemleri gibi çeşitli soğutma sistemleri, işleme sırasında meydana gelen sıcaklık sorunlarını gidermek için uygulanmıştır [6,7]. Fazla miktarda kullanılan kesme sıvısının, insan sağlığı ve çevre sağlığı üzerinde olumsuz etkileri vardır [8,9]. Kesme sıvılarıyla ilgili bu tür olumsuzlukları gidermek ya da en aza indirmek için araştırmacılar, çeşitli alternatifler üzerinde sürekli olarak çalışmaktadırlar. Bunun yanında kesici takım malzemelerindeki gelişmelerle birlikte kuru işlemeye olan ilgiyi de artırmıştır [8,10]. Fakat ağır kesme koşullarında yüksek işleme verimliliği ve ürün kalite özellikleri isteniyorsa, bu durumda kuru işlemenin etkinliği azalmaktadır. Bunun yerine takım-talaş temas alanına yüksek basınçla birlikte çok az miktarda kesme sıvısının iletildiği minimum miktarda yağlama (MMY) uygun bir alternatif olarak kullanılmaktadır [11,12]. Talaşlı imalatla, MMY sisteminin etkinliğini ve verimliliğini artırmak ve bu sistemde kullanılan kesme sıvısının çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için daha çok hibrit MMY sistemlerinin geliştirilmesi ve kullanımı üzerine çalışmalar artmıştır [13,14]. Özellikle ultrasonik atomizasyon esaslı minimum miktarda yağlama (UMMY) ile soğutma, yüksek kesme sıcaklıklarının meydana geldiği işlemlerde yüksek ısı transfer kapasitesi, düşük miktarda soğutucu kullanımı gibi avantajları olan etkili bir soğutma-yağlama yöntemidir [6,15-17]. Çok az miktarda kesme sıvısı kullanılan UMMY sisteminde, işleme performansı artmaktadır. Geleneksel soğutmada kesme sıvısının kesme bölgesine yeterince nüfuz edememesi nedeniyle işleme etkisiz olmakta ve yeterince ekonomik ve çevre dostu da olamamaktadır [18,19]. UMMY sistemleri verimli ve güçlü bir soğutma sistemi olarak kabul görmüştür. Geleneksel sulu işleme, kuru işleme ve basınçlı hava ile işlemeye göre en düşük yüzey pürüzlülüğünün olduğu [20], kesme kuvvetini ve kesme sıcaklığını önemli ölçüde düşürdüğü bir sistem olarak kullanılmaktadır [21]. UMMY sisteminin verimliliğini arttırmak, daha iyi soğutma-yağlama sağlamak ve daha az sıvı tüketimi için UMMY işleme parametreleri üzerinde de çalışmalar yapılmıştır [15,17,22]. Kesme sıvısı konsantrasyon oranı, nozul orifis çapı, yatay nozul açısı, dikey nozul açısı, nozul mesafesi, hava basıncı, kesme sıvısı atomizasyon oranı ve nozul tipi şeklinde sıralanabilecek UMMY işleme parametreleri, sistem performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Uygun kesme sıvısı konsantrasyon oranının kullanılması, kesme sıcaklığını ve kesme kuvvetlerini düşürmekte, ayrıca takım ömrünün arttırılmasında da oldukça etkili olmaktadır [23]. Nozul orifis çapı, püskürtme açısını etkilemekte olup, nozul çapı büyüdükçe püskürtme açısı da büyümektedir [24]. Püskürtme açısındaki artış, daha iyi bir atomizasyon sağlamak ve soğutma-yağlama alanını arttırmaktadır [25]. Nozulun hem yatay hem de dikey düzlemde 45°'lik açısının kesici takım-iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve kesme sıcaklığını düşürmek için en iyi seçim olduğu belirtilmiştir [26, 27]. Ancak bazı çalışmalarda yatay nozul açısının talaş akış yönüne bağlı olarak performansı etkileyebileceği, bu nedenle uygun eğim açısını belirlemek için değiştirilebileceği de ifade edilmiştir [28, 29]. Nozul mesafesinin, talaş hareketini engellemeyecek şekilde seçilmesi ve yağ sisinin güçlü bir şekilde kesme bölgesine ulaştırarak şekilde konumlanması gerekmektedir [30, 31]. Atomizasyon sırasında oluşan çok küçük damlacıkların boyutu, esas olarak hava basıncına bağlı olarak değişmektedir. Hava basıncındaki artış, damlacık çapının azalmasına neden olmakta ve bu, takım-talaş temas bölgesine yağ sisinin etkili bir şekilde nüfuz etmesini kolaylaştırmaktadır [32]. Kesme sıvısı atomizasyon oranındaki artış, kesme bölgesine daha fazla yağlayıcı sağladığı için takım-talaş ara yüzündeki sürtünmeyi azaltmakta ve talaşın takım-talaş yüzeyine ve işlenmiş yüzeye yapışması azaltılmaktadır. Bunun sonucunda kesme işlemi kolaylaşmaktadır [33]. Soğutma sıvısı damlacık çapının mümkün olduğunca küçük, damlacık hızının mümkün olduğunca yüksek olduğu ve bu çok küçük



damlacıkların kesme bölgesine etkili bir şekilde nüfuzunu sağlayacak nozulların seçilmesi oldukça önem arz etmektedir [34].

Talaşlı imalat işleminde  $F_c$  ve  $\zeta$  için optimum UMMY işleme parametrelerini belirlemek için yapılan tornalama deneyleri, silindirik AISI 1050 sade karbonlu çelik malzeme kullanılarak, sabit kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinde, her bir UMMY işleme parametresi ise üçer seviyede alınarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Kafkas [35] tarafından tasarlanıp geliştirilen ve daha önce farklı soğutma koşulları ile karşılaştırılması yapılan UMMY sistemi esas alınmıştır. Taguchi L27 ortogonal deney tasarım metoduna göre planlanan tornalama deneyleri, CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına etki eden her bir UMMY işleme parametresinin etki oranını tespit etmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Optimum UMMY işleme parametrelerini belirlemek için ise, gri ilişki analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada, kesme sıvısı konsantrasyon oranı, nozul orifis çapı, yatay nozul açısı, dikey nozul açısı, nozul mesafesi, hava basıncı, kesme sıvısı atomizasyon oranı ve nozul tipi gibi UMMY işleme parametrelerinin, kesme kuvveti ( $F_c$ ) ile talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) üzerine etkisi araştırılmış ve en iyi kalite gereksinimlerini, hedeflerini karşılayacak optimum UMMY işleme parametrelerinin belirlenmesi amaç edinilmiştir. Araştırma sonucunda bulunacak optimum UMMY işleme parametreleri sayesinde, işlenen malzemeler için azami oranda kalite ve verimin elde edilebilmesi için yol gösterici olması, ayrıca daha ekonomik, kullanımı kolay, insan ve çevre sağlığına duyarlı basit bir UMMY sisteminin kullanılabilirliğini ortaya koymak amaçlanmıştır. Bunun yanında, mevcut çalışmalarda çok sayıda UMMY işleme parametresinin aynı anda etkisini değerlendirecek bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu alanda yapılacak çalışmalara da katkı sağlamak amaçlanmıştır.

## 2. İŞLEME PARAMETRELERİ VE TAGUCHI ANALİZİ (MACHINING PARAMETERS AND TAGUCHI ANALYSIS)

Taguchi L<sub>27</sub> deney tasarımı, UMMY işleme parametrelerinin en uygun seviyelerini tespit etmek için yapılmıştır. Ayrıca, en önemli değişkenleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA: Analysis of Variance) yapılmıştır. Varyans analizi ile UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkileri ve farklı seviyedeki değerlerin nasıl bir değişikliğe sebep olduğunun anlaşılması amaçlanmıştır.

Kesme parametrelerinden; kesme hızı ( $V_c=100$  m/dak), ilerleme ( $f=0.15$  mm/dev) ve kesme derinliği ( $a_p=1$  mm) sabit olarak alınmıştır. Bu değerler, takım üreticilerinin tavsiyeleri temel alınarak seçilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan UMMY işleme parametreleri ve bu parametrelerin her seviyedeki değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan UMMY işleme parametreleri ve değerleri (UMQL machining parameters and values used in the experimental study)

UMMY işleme parametreleri	Kod	Seviye		
		1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Kesme sıvısı konsantrasyon oranı (%)	A	5	10	15
Nozul orifis çapı (mm)	B	0.8	1	1.2
Yatay nozul açısı ( $^{\circ}$ )	C	15	30	45
Dikey nozul açısı ( $^{\circ}$ )	D	15	30	45
Nozul mesafesi (mm)	E	15	20	30
Hava basıncı (bar)	F	4	5	6
Kesme sıvısı atomizasyon oranı (ml/dk)	G	0.5	1	1.5
Nozul tipi*	H	U	K	V

\*U:Uzun nozul, K: Kısa nozul V: Vakum nozul

Taguchi analiz yöntemi, mühendislik analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Test sayısının azaltıldığı bu analiz yönteminde, aynı zamanda kontrol dışı faktörlerin etkileri de azaltılır. Ayrıca, işleme sürecinde basit, etkili çözümler sunarak [36], verimli ve sistematik bir yaklaşım sağlar [37, 38]. Taguchi analiz yöntemi, kayıp fonksiyon kullanarak deneysel ve istenen değerler arasındaki sapmayı hesaplayabilir. Bu kayıp fonksiyonu ayrıca bir sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülür

[38, 39]. Normal olarak, S/N oranının analizinde en düşük en iyi, en yüksek en iyi ve nominal en iyi olmak üzere üç çeşit kalite özelliği vardır [40]. Bu çalışmada ortalama değerler dikkate alınmış olup en düşük en iyi kalite özelliği kullanılmıştır. En düşük en iyi S/N için;

$$\eta = \frac{S}{N} = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

formülü kullanılmaktadır. Burada;  $y_i$ , i. deneyde gözlemlenen veri, n, deneyin gözlem sayısıdır. Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımına göre yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen  $F_c$  ve  $\zeta$  değerleri kullanılarak, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkisini ve optimum işleme parametrelerini belirlemek için Taguchi metodu ile analiz yapılmıştır. Tablo 1’de verilen UMMY işleme parametrelerine göre oluşturulan Taguchi  $L_{27}$  deney planı Tablo 2’de verilmiştir.

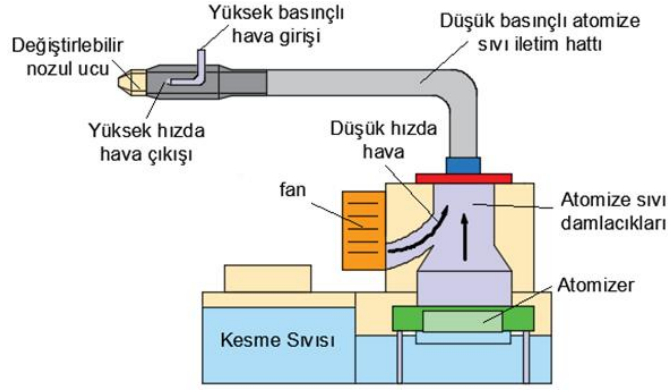
Tablo 2. Taguchi  $L_{27}$  deney düzenine göre oluşturulan deney planı (Experimental plan created according to Taguchi  $L_{27}$  experimental setup)

Deney No	Faktörler							
	A (%)	B (mm)	C (°)	D (°)	E (mm)	F (Bar)	G (ml/dk)	H
1	5	0.8	15	15	15	4	0.5	U
2	5	0.8	15	15	20	5	1	K
3	5	0.8	15	15	30	6	1.5	V
4	5	1	30	30	15	4	0.5	K
5	5	1	30	30	20	5	1	V
6	5	1	30	30	30	6	1.5	U
7	5	1.2	45	45	15	4	0.5	V
8	5	1.2	45	45	20	5	1	U
9	5	1.2	45	45	30	6	1.5	K
10	10	0.8	30	45	15	5	1.5	U
11	10	0.8	30	45	20	6	0.5	K
12	10	0.8	30	45	30	4	1	V
13	10	1	45	15	15	5	1.5	K
14	10	1	45	15	20	6	0.5	V
15	10	1	45	15	30	4	1	U
16	10	1.2	15	30	15	5	1.5	V
17	10	1.2	15	30	20	6	0.5	U
18	10	1.2	15	30	30	4	1	K
19	15	0.8	45	30	15	6	1	U
20	15	0.8	45	30	20	4	1.5	K
21	15	0.8	45	30	30	5	0.5	V
22	15	1	15	45	15	6	1	K
23	15	1	15	45	20	4	1.5	V
24	15	1	15	45	30	5	0.5	U
25	15	1.2	30	15	15	6	1	V
26	15	1.2	30	15	20	4	1.5	U
27	15	1.2	30	15	30	5	0.5	K

### 3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

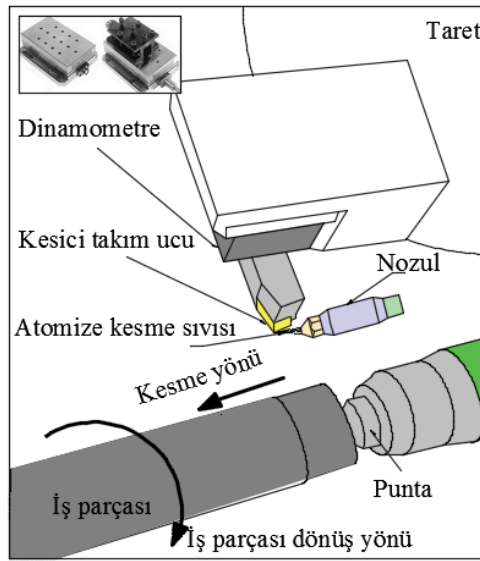
#### 3.1. UMMY Kesme Sıvısı Uygulama Sistemi (UMQL Cutting Fluid Application System)

Kafkas [35] tarafından tasarlanan ve geliştirilen UMMY uygulama sistemi şeması Şekil 1’de gösterilmektedir. Soğutma sıvısının atomizasyonu piezoseramik transdüserler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir fan tarafından oluşturulan düşük hızlı hava akışı, çok küçük sıvı damlacıklarını esnek iletim borusu aracılığıyla nozula ulaştırır. Nozulun merkezinde küçük çaplı bir borudan yüksek hızda hava jetinin uygulandığı bir meme bulunur. Sıvı damlacıklar nozula ulaştığında, yüksek hızlı hava jetine doğru çekilir ve daha sonra kesme bölgesine doğru püskürtülürler. Sistemde kullanılan nozullar değiştirilebilir olduğundan püskürtme modellerinin de farklı nozul geometrileri kullanılarak değiştirilebilir olması sağlanmıştır.



Şekil 1. UMMY uygulama sisteminin şematik görünümü (Schematic view of the UMMY application system)

İş parçasının UMMY sistemi ile işlenebilmesi için Kafkas [35] tarafından tasarlanan ve geliştirilen UMMY uygulaması sistemi deney düzeneği Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. UMMY deney düzeneği (UMMY experimental setup)

### 3.2. Malzeme (Material)

Tornalama deneylerinde iş parçası malzemesi olarak, 135 HB sertliğe sahip AISI 1050 çelik malzeme kullanılmıştır. İşlenmemiş iş parçası Ø100x500 mm boyutlarındadır. İş parçasının bir tarafına punta deliği açılmış ve iş parçası ayna-punta arasında işlenecek şekilde hazır hale getirilmiştir. 50 mm kesme işlemi yapılarak tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. AISI 1050 iş parçasının kimyasal bileşimi Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. AISI 1050 iş parçasının kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI 1050 workpiece)

% C	% Mn	% Cr	% Ni	% Si	% Cu	% S
0.43	0.73	0.07	0.09	0.21	0.29	0.04

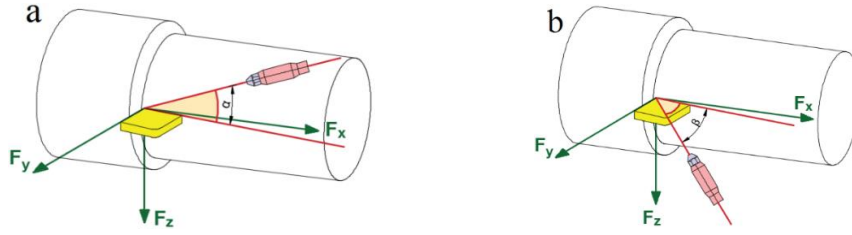
### 3.3. Deney Tezgâhı, Kesici Takım ve Takım Tutucu (Machine Tool, Cutting Tool and Tool holder)

Yapılan deneysel çalışmalarda, Fanuc kontrol ünitesi, JOHNFORD T35 CNC torna tezgâhı kullanılmıştır. İş parçasının işlenmesi için kesici takım olarak, deney şartlarına uygun, SUMITOMO üretici takım firmasının SNMG 120408-NGU tungsten karbür kesici takım seçilmiştir. Her deney için yeni bir kesici takım kullanılmış olup, eşit kesme uzunluklarında tornalama yapılmıştır. Takım tutucu olarak, yavaş açısı 75° olan PSBNR 2525M12 formunda takım tutucu kullanılmıştır.

### 3.4. Soğutma Sıvısı ve Nozul Açılıları (Coolant and Nozzle Angles)

Soğutma sıvısı olarak, suda çözünebilir özellikte yarı sentetik soğutma sıvısı kullanılmıştır. UMMY işleme parametrelerinden yatay nozul açısı (C), nozulun kesici takım talaş yüzeyi ile

yaptığı açığı (Şekil 3.(a)), dikey nozul açısı (D) ise nozulun kesici takım serbest yüzeyi ile yaptığı açığı (Şekil 3.(b)) göstermektedir.



Şekil 3. Yatay nozul açısı (a), dikey nozul açısı (b) (Horizontal nozzle angle (a), vertical nozzle angle (b))

### 3.5. Deneyleerde Kullanılan Nozul Tipleri (Nozzle Types Used in Experiments)

UMMY sisteminde, çok küçük taneciklere sahip atomize kesme sıvısını farklı püskürtme modelleri ile kesme bölgesine nüfuz ettirmek için, Kafkas'ın [35] çalışmasında kullanılan farklı geometrilere sahip değiştirilebilir nozullar kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan değiştirilebilir nozul tipleri (H) Şekil 4'te gösterilmiştir.

Nozul adı	Uzun nozul (U)	Kısa nozul (K)	Vakum nozul (V)
Nozul gösterimi			

Şekil 4. Deneyleerde kullanılan farklı geometrilere sahip nozul tipleri (Nozzle types with different geometries used in experiments) [35]

### 3.6. Kesme Kuvvetinin Ölçülmesi (Measuring Cutting Force)

Deneyleerde kesme kuvvetini ölçmek için -5...10 kN kuvvet aralığında ölçme yapabilen kuartz KISTLER 9257B tipi dinamometre kullanılmıştır.

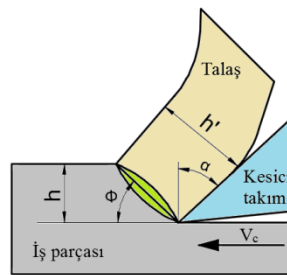
### 3.7. Talaş Büzüşme Katsayısı (Chip Compression Coefficient)

Tornalama işleminde, kesici takımın önündeki malzemeler her taraftan çok büyük kuvvetlerle sıkıştırılır ve talaş deformasyona uğrar. Talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ), işleme sırasında plastik deformasyon kolaylığının bir göstergesidir [41]. Talaş kalınlığı ( $h'$ ) her zaman kesilmemiş talaşın ( $h$ ) kalınlığından daha büyüktür. Talaş kalınlığının kesilmemiş talaş kalınlığına oranı,

$$\zeta = \frac{h'}{h} \quad (2)$$

talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) olarak bilinir (Şekil 5).

( $h = f \cdot \sin(\phi)$ ,  $f$ : İlerleme oranı (mm/dev),  $\phi$ : Takım yaklaşma açısı ( $75^\circ$ ))



Şekil 5. Metal kesme işleminde  $\zeta$ 'in şematik gösterimi (Schematic view of  $\zeta$  in metal cutting)

Deneyleerde, kesme işlemi sonucu oluşan talaşlardan rastgele 10'ar talaş seçilerek her bir talaşın üç farklı noktasından talaş kalınlıkları dijital kumpas ile ölçülmüştür. Ölçülen talaş kalınlığı değerlerinin ortalaması alınarak talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) hesaplanmıştır.

### 3.8. Gri İlişki Analizi (Grey Relational Analysis)

Taguchi tabanlı gri ilişki analizi, karmaşık yapıya sahip çoklu yanıt sistemlerinin analizinde kullanılan istatistiksel bir analiz yöntemidir. Gri ilişki analizinde, deneysel sonuçlar ilk önce sıfır ile bir arasında normalleştirilir. Ardından, gri ilişki katsayısı hesaplanır. Daha sonra, her süreç cevabına karşılık gelen gri ilişki katsayısının ortalaması alınarak gri ilişki derecesi hesaplanır. Çoklu süreç yanıtlarının genel değerlendirilmesi, gri ilişki derecesine dayalıdır. Sonuç olarak, karmaşık çoklu işlem yanıtlarının optimizasyonu, tek bir gri ilişki derecesinin optimizasyonuna dönüştürülebilir. Başka bir deyişle, gri ilişki derecesi, çoklu yanıt süreci için deneysel verilerin genel değerlendirilmesi olarak ele alınabilir [42-45].

Tornalama işlemi sırasında düşük kesme kuvveti ve talaş büzüşme katsayısı daha iyi performans sağlar. Bu nedenle gri ilişki analizi yöntemine göre referans seriler oluşturulurken minimum değerler dikkate alınır. Normalizasyon değerlerini elde etmek için Eş. 3 kullanılır.

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3)$$

$x_i^0(k)$  orijinal veri sırasını,  $x_i(k)$  normalize edilmiş veriyi belirtir.  $\max x_i^0(k)$  maksimum  $x_i(k)$ 'i temsil eder,  $\min x_i^0(k)$  minimum  $x_i(k)$  değerlerini temsil eder ve istenen hedef değeri temsil eder.

Gri ilişki analizinde, iki sistem veya iki dizi arasındaki ilişkinin ölçüsü gri ilişki derecesi olarak tanımlanır. Referans dizisi olarak yalnızca bir dizi,  $x_0(k)$  mevcut olduğunda ve diğer tüm diziler karşılaştırma dizileri olarak hizmet verdiğinde buna yerel gri ilişki ölçümü denir. Veri ön işleme yapıldıktan sonra,  $\xi_i(k)$  deneydeki k. performans karakteristikleri için gri ilişki katsayısı  $i(k)$  olarak ifade edilebilir [42-46]:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{max}} \quad (4)$$

burada  $\Delta_{0i}(k)$ , referans dizisinin ve karşılaştırılabilirlik dizisinin sapma dizisidir.

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_j(k)| \quad (5)$$

$$\Delta_{min} = \min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (6)$$

$$\Delta_{max} = \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)| \quad (7)$$

$x_0(k)$  referans sırasını ve  $x_i(k)$  karşılaştırılabilirlik sırasını belirtir.  $\xi$  ayırt edici veya tanımlama katsayısıdır.  $\xi \in [0, 1]$ .  $\xi$  değeri ne kadar küçükse ve ayırt edici yetenek o kadar büyüktür. Genellikle  $\xi = 0.5$  kullanılır. Gri ilişki katsayı türetildikten sonra, gri ilişki katsayıların ortalaması alınarak gri ilişki derecesi elde edilir [42,43,47]. Gri ilişki derecesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (8)$$

## 4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımına göre gerçekleştirilen deneyler sonucunda,  $F_c$  değerleri ölçülerek ortalaması alınmıştır. Ölçülen talaş kalınlıkları değerlerine göre de  $\zeta$  hesaplanmıştır. Deney sonuçlarına göre UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkilerinin en küçük en iyidir kalite özelliğine göre ana etki grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerle UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine etkisinin nasıl değiştiği belirlenmiştir. Varyans analizi ile UMMY işleme parametrelerinin serbestlik derecesi, kareler toplamı, kareler ortalaması, F değeri, P değeri ve % katkı oranı değerleri bulunmuştur. % katkı oranı dikkate alınarak UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  üzerine ne oranda katkısının bulunduğu, hangi parametrenin en fazla katkısının olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda, gri ilişki analizi yöntemiyle optimum UMMY işleme parametreleri belirlenmiştir. Taguchi  $L_{27}$  deney tasarımına göre gerçekleştirilen



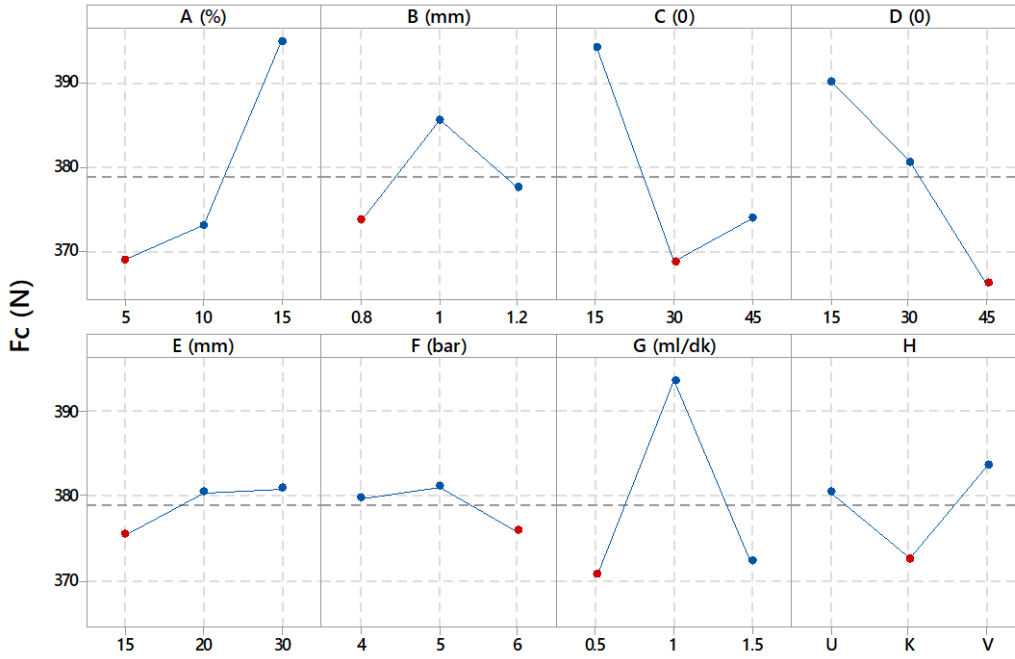
deneyler sonucunda elde edilen ortalama  $F_c$  ve  $\zeta$  deney sonuçlarını ve bu sonuçlara göre oluşan S/N oranlarını Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deney sonuçları ve S/N oranları değerleri (The results of experiments and S/N ratios values)

Deney No	Deney sonuçları		S/N oranları (dB)		Deney No	Deney sonuçları		S/N oranları (dB)	
	$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$		$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$
1	387.84	2.38	-51.77	-7.52	15	389.31	2.43	-51.81	-7.72
2	393.51	2.27	-51.90	-7.12	16	389.92	2.37	-51.82	-7.49
3	389.03	2.34	-51.80	-7.38	17	385.38	2.37	-51.72	-7.49
4	361.43	2.37	-51.16	-7.49	18	390.55	2.40	-51.83	-7.61
5	376.20	2.38	-51.51	-7.52	19	396.90	2.36	-51.97	-7.47
6	363.49	2.37	-51.21	-7.49	20	381.21	2.38	-51.62	-7.52
7	325.27	2.44	-50.24	-7.74	21	380.19	2.37	-51.60	-7.49
8	392.99	2.38	-51.89	-7.55	22	401.10	2.36	-52.07	-7.47
9	331.23	2.40	-50.40	-7.61	23	405.75	2.37	-52.17	-7.49
10	319.94	2.42	-50.10	-7.69	24	404.61	2.35	-52.14	-7.44
11	321.71	2.38	-50.15	-7.52	25	411.33	2.36	-52.28	-7.47
12	392.56	2.38	-51.88	-7.52	26	384.46	2.42	-51.70	-7.69
13	385.27	2.38	-51.72	-7.52	27	387.55	2.38	-51.77	-7.52
14	382.97	2.41	-51.66	-7.63					

#### 4.1. UMMY İşleme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Üzerine Etkileri (Effects of UMQL Machining Parameters on Cutting Force)

Deney sonuçlarına göre, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  üzerine etkilerinin en küçük en iyidir kalite özelliğine göre ana etki grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  üzerine etki grafikleri (Effect graphs of UMQL machining parameters on  $F_c$ )

Şekil 6'daki grafikler incelendiğinde, 1. seviyedeki %5 kesme sıvısı konsantrasyon oranına sahip soğutma sıvısı kullanılarak yapılan işlemede, en küçük  $F_c$  değeri oluşmuştur. Konsantrasyon oranı arttıkça  $F_c$  değerlerinin de arttığı görülmüştür. Daha düşük konsantrasyon oranına sahip kesme sıvısının atomize olma oranı, diğerlerine göre daha yüksektir. Atomize olma oranının artmasıyla, daha küçük çapta buhar tanecikleri üretilmektedir. Bu çok küçük buhar tanecikleri, takım-talaş ara yüzüne çok etkili nüfuz ederek, çok etkili soğutma sağlamakta, aynı zamanda bu bölgede daha ince akışkan filmi tabakası oluşturmaktadır. Böylece kesme bölgesinde sürtünme kuvveti azalmaktadır. Sürtünme kuvvetinin azalmasına bağlı olarak,  $F_c$  değerlerinde düşüş meydana gelmektedir. En

düşük  $F_c$  değeri, 1. seviyedeki 0.8 mm nozul orifis çapında meydana gelmiştir. Nozul orifis çapının küçülmesi, orifis ucunda basıncın artmasına ve daha küçük çapta buhar damlacıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Daha küçük buhar damlacıkları, kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmektedir. Ayrıca nozul orifis çapının küçük olması, püskürtme açısını da küçültmekte ve çok küçük buhar damlacıklarının kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmesini olumlu yönde geliştirmektedir. Bu durumda daha etkili bir soğutma-yağlama sağlanmakta ve  $F_c$  değerlerinin düşmesine neden olmaktadır.  $30^\circ$  yatay nozul açısı (2. Seviye) ve  $45^\circ$  dikey nozul açısında (3. Seviye) en küçük  $F_c$  değerleri elde edilmiştir. Bu açı değerlerinde atomize olmuş çok küçük buhar damlacıklarının, takım-talaş ara yüzüne nüfuzunun oldukça etkili olduğu anlamına gelmektedir. Nozul mesafesinin 15 mm (1. Seviye) olduğu durumda, en küçük  $F_c$  değeri elde edilmiştir. Nozul mesafesi arttıkça,  $F_c$  değerleri de artmıştır. Nozul mesafesinin damlacık hızı ve çapı üzerinde bir etkisi bulunmaktadır. Kısa mesafenin, damlacıkların takım-talaş ve takım-iş parçasının temas bölgelerine etkili nüfuz etmelerine yardımcı olduğu için fayda sağlamaktadır. Ancak nozul mesafesinin daha kısa olduğu durumlarda, sis damlacıkları kesme bölgesine etkili nüfuz edemez, ayrıca talaş hareketinde engellenmeler meydana gelir. Bu mesafe daha büyükse püskürtme açısının artmasının da etkisiyle kesme bölgesine daha az sıvı etki edecektir. Bu da soğutma ve yağlamanın yetersiz olmasına, ayrıca  $F_c$  değerlerinin artmasına neden olmaktadır. 3. seviyedeki 6 bar basınçta en düşük  $F_c$  değeri elde edilmiştir. Basıncın artması ile birlikte damlacık hızı artmış ve damlacık çapı azalmıştır. Ayrıca basınç arttıkça damlacık sayısı da artmıştır. Yüksek basınç ile elde edilen fazla miktarda oldukça küçük damlacıklar, takım-talaş ara yüzünde etkili yağlamaya katkıda bulunarak sürtünmeyi ve dolayısıyla  $F_c$  değerlerini azaltmıştır. En düşük  $F_c$  değeri, 0.5 ml/dk (1. seviye) sıvı atomizasyon oranında elde edilmiştir. Atomizasyon oranındaki artışla birlikte damlacık hızı artmakta ve damlacık çapı azalmaktadır. Yağ damlacıklarının geri esneme etkisinden dolayı ara yüze giremezler ve yeterli yağlama sağlanamaz. Böylece daha düşük yağlama için sürtünmeden kaynaklanan ısı üretilir. Sonuçta  $F_c$  değerlerinde artış gözlemlenmiştir. En düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerleri, Şekil 4'te detayı verilen kısa nozul (K) tipinin kullanımında meydana gelmiştir. Kısa nozulun kesme bölgesine göre konumu itibarıyla, spreyi belirli bir noktaya odakladığından sistemin soğutma ve yağlama performansını oldukça iyi sağladığı görülmüştür. Ayrıca, nozul geometrilerinin sprey geometrileri üzerine önemli bir etkisi bulunmaktadır. Kısa nozulla işlemede kesme sıvılarının etkili bir şekilde soğutma sağlayabilmesi için, küçük püskürtme açısının yanı sıra kesme bölgesine yüksek sıvı akışı sağlanmıştır.  $F_c$  için hesaplanan UMMY işleme parametreleri dağılımı Tablo 5'te verilmiştir. Koyu olarak ifade edilen değerler en düşük  $F_c$  değerlerini göstermektedir.

Tablo 5. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için optimum değerleri ve seviyeleri (Optimum values and levels of UMQL machining parameters for  $F_c$ )

Seviye	A (%)	B (mm)	C ( $^\circ$ )	D ( $^\circ$ )	E (mm)	F (bar)	G (ml/dk)	H
1	<b>369.0</b>	<b>373.7</b>	394.2	390.1	<b>375.4</b>	379.8	<b>370.8</b>	380.5
2	373.1	385.6	<b>368.7</b>	380.6	380.5	381.1	393.8	<b>372.6</b>
3	394.8	377.6	373.9	<b>366.1</b>	380.9	<b>375.9</b>	372.3	383.7
Mak-Min	25.8	11.9	25.4	24.0	5.5	5.2	23.1	11.1
Sıra	1	5	2	3	7	8	4	6
Optimum işleme parametreleri	A1B1C2D3E1F3G1H2							

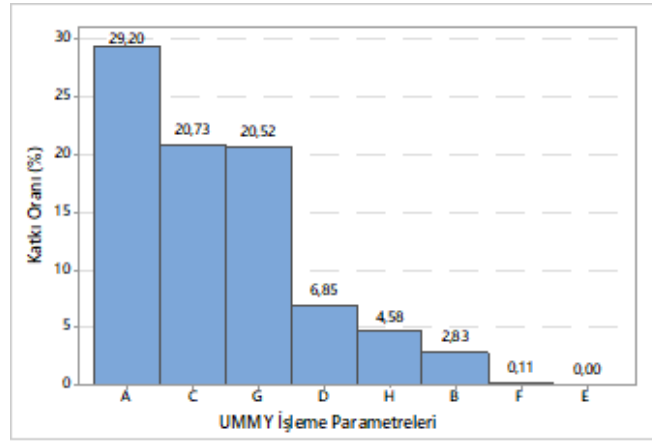
$F_c$  için ANOVA sonuçları, Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da gösterilen ANOVA sonuçlarına göre, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için etki seviyeleri belirlenmiştir. Buna göre, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi için  $P < 0.05$  olması gerekir. ANOVA tablosundan anlaşılabilceği gibi  $F_c$  için istatistiksel olarak en anlamlı UMMY işleme parametresi  $P = 0.005$  değeri ile kesme sıvısı konsantrasyon oranı (A) olmuştur.

Tablo 6.  $F_c$  için ANOVA sonuçları (ANOVA results for  $F_c$ )

UMMY İşleme Parametreleri	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	KaO (%)
A (%)	2	3331.00	1665.50	9.61	0.005	29.20
B (mm)	2	322.37	161.19	0.93	0.426	2.83
C (°)	2	2364.12	1182.06	6.82	0.014	20.73
D (°)	2	781.41	390.70	2.25	0.155	6.85
E (mm)	2	0.01	0.01	0.00	1.000	0.00
F (bar)	2	12.18	6.09	0.04	0.966	0.11
G (ml/dk)	2	2340.23	1170.12	6.75	0.014	20.52
H	2	522.84	261.42	1.51	0.268	4.58
Hata	10	1732.67	173.27			15.19
Toplam	26					100.00

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, KaO: Katkı oranı

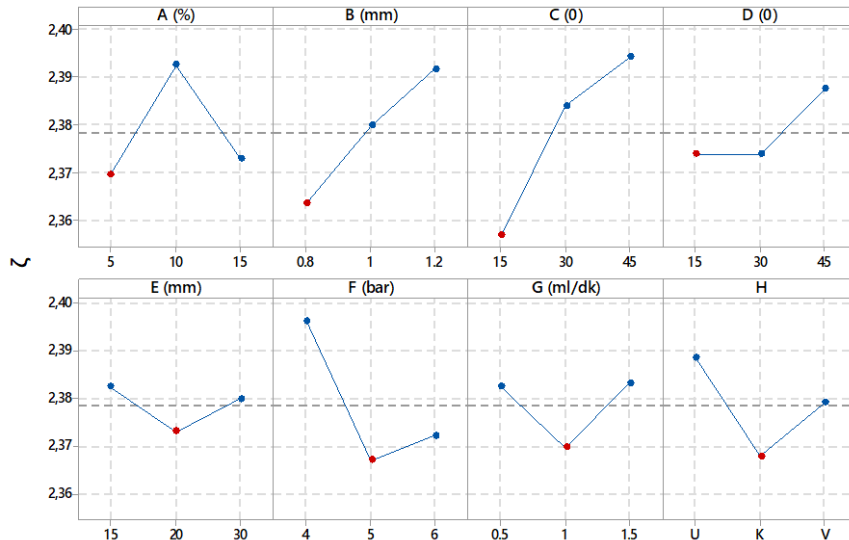
Şekil 7’de UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için katkı oranları grafiği verilmiştir. Tablo 6 ve Şekil 7’deki % katkı oranları dikkate alındığında  $F_c$  üzerinde en önemli ve etkili olan UMMY işleme parametresinin %29.20 değeriyle kesme sıvısı konsantrasyon oranının (A) olduğu görülmektedir.



Şekil 7. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  için katkı oranları grafiği (Graph of contribution ratios of UMQL machining parameters for  $F_c$ )

#### 4.2. UMMY İşleme Parametrelerinin Talaş Büzüşme Katsayısı Üzerine Etkileri (Effects of UMQL Machining Parameters on Chip Compression Coefficient)

$\zeta$ 'nin deney sonuçlarına göre hesaplanan değerleri Şekil 8’deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 8. UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  üzerine etki grafikleri (Effect graphs of UMQL machining parameters on  $\zeta$ )

%5 (1. seviye) konsantrasyon oranına sahip soğutma sıvısı ile işlemede, en düşük  $\zeta$  değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Kesme bölgesinde  $F_c$  kuvvetinin azalmasına bağlı olarak,  $\zeta$  değerlerinde düşüşün meydana geldiği görülmüştür. En düşük  $\zeta$  değerleri 0.8 mm (1. seviye) nozul orifis çapında meydana gelmiştir. Nozul orifis çapı arttıkça  $\zeta$  değerleri de artmaktadır. Nozul orifis çapının küçülmesi, orifis ucunda basıncın artmasına ve atomize olmuş kesme sıvısının kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmesine sebep olmaktadır. Ayrıca nozul orifis çapının küçük olması, püskürtme açısını da küçültmekte ve çok küçük buhar damlacıklarının kesme bölgesine daha etkili nüfuz etmesini sağlamaktadır. Bu durumda daha etkili bir soğutma ve yağlama sağlanmakta ve  $\zeta$  değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. En küçük  $\zeta$  değerleri ise  $15^\circ$  yatay nozul açısı ve  $15^\circ$  dikey nozul açısında elde edilmiştir. Bazı araştırmacılar küçük yatay nozul açılarındaki takım yan yüz aşınması bakımından en iyi performansı verdiğini ve optimum yatay nozul açısı olduğunu kaydetmişlerdir. Bu küçük yatay nozul açısının, kesme sıvısının kesme bölgesine, özellikle takım ve iş parçası arasındaki temas bölgesine en verimli şekilde püskürtülmesini sağlamanın bir sonucu olabileceğini ifade etmişlerdir [29]. Bu durum aynı zamanda  $\zeta$  değerini de azaltmaktadır. Nozul mesafesinin 20 mm olduğu durumda (2. seviye), en küçük  $\zeta$  değeri elde edilmiştir. Kısa mesafenin, damlacıkların takım-talaş ve takım-iş parçasının temas bölgelerine etkili nüfuz etmelerine yardımcı olduğu için fayda sağlamaktadır. Ancak nozul mesafesinin daha kısa olduğu durumlarda, sis damlacıkları kesme bölgesine etkili nüfuz edemez, ayrıca talaş hareketinde engellenmeler meydana gelir. Bu mesafe daha büyükse püskürtme açısının artmasının da etkisiyle, kesme bölgesine daha az sıvı etki edecektir. Bu da soğutma ve yağlamanın yetersiz olmasına, ayrıca  $\zeta$  değerlerinin artmasına neden olmaktadır. 2. seviye değeri olan 5 bar basınçta, en düşük  $\zeta$  değeri elde edilmiştir. 5 bar ve 6 bar arasında ihmal edilecek kadar az bir fark oluşmuştur. Bu durumda en düşük  $\zeta$  değerleri yüksek basınçlarda elde edildiği söylenebilir. Basıncın artması ile birlikte, damlacık hızı artmış ve damlacık çapı azalmıştır. Ayrıca basınç arttıkça damlacık sayısı da artmıştır. Yüksek basınç ile elde edilen çok küçük damlacıklar, takım-talaş ara yüzünde etkili yağlamaya katkıda bulunarak sürtünmeyi ve dolayısıyla  $\zeta$  değerlerini azaltmıştır. En düşük  $\zeta$  değeri, 1 ml/dk (2. Seviye) sıvı atomizasyon oranında elde edilmiştir. Atomizasyon oranının 0.5 ml/dk'dan (1. seviye) 1 ml/dk'ya (2. seviye) çıkmasıyla birlikte, kesme bölgesinde daha fazla yağlayıcı sağlanarak takım-talaş ara yüzündeki sürtünmenin azaltıldığı, talaşın takım yüzeyine ve işlenmiş yüzeye yapışmasının önlendiği, bunun da kesmeyi kolaylaştırdığı,  $\zeta$  değerini de düşürdüğü gözlemlenmiştir.  $\zeta$  için hesaplanan UMMY işleme parametrelerinin optimum değerlerinin dağılımı, Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  için optimum değerleri ve seviyeleri (Optimum values and levels of UMQL machining parameters for  $\zeta$ )

Seviye	A (%)	B (mm)	C ( $^\circ$ )	D ( $^\circ$ )	E (mm)	F (bar)	G (ml/dk)	H
1	<b>2.370</b>	<b>2.364</b>	<b>2.357</b>	<b>2.374</b>	2.382	2.396	2.382	2.388
2	2.393	2.380	2.384	2.374	<b>2.373</b>	<b>2.367</b>	<b>2.370</b>	<b>2.368</b>
3	2.373	2.392	2.394	2.388	2.380	2.372	2.383	2.379
Mak-Min	0.023	0.028	0.037	0.014	0.009	0.029	0.014	0.020
Sıra	4	3	1	7	8	2	6	5
Optimum işleme parametreleri	A1B1C1D1E2F2G2H2							

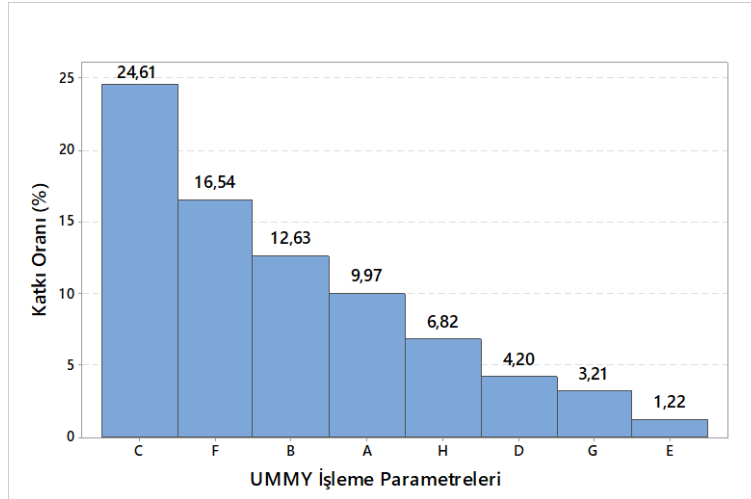
$\zeta$  için ANOVA sonuçları, Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8'de verilen ANOVA sonuçlarına göre, UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  üzerine katkı oranları belirlenmiştir. ANOVA tablosundan anlaşılacağı gibi,  $\zeta$  için istatistiksel olarak en anlamlı UMMY işleme parametresi  $P=0.020$  değeri ile yatay nozul açısı (C) olmuştur.

Tablo 8.  $\zeta$  için ANOVA sonuçları (ANOVA results for  $\zeta$ )

UMMY İşleme Parametreleri	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	KaO (%)
A (%)	2	0.002582	0.001291	2.39	0.141	9.97
B (mm)	2	0.003272	0.001636	3.03	0.093	12.63
C ( $^{\circ}$ )	2	0.006375	0.003187	5.91	0.020	24.61
D ( $^{\circ}$ )	2	0.001089	0.000544	1.01	0.399	4.20
E (mm)	2	0.000316	0.000158	0.29	0.752	1.22
F (bar)	2	0.004284	0.002142	3.97	0.054	16.54
G (ml/dk)	2	0.000832	0.000416	0.77	0.488	3.21
H	2	0.001767	0.000883	1.64	0.242	6.82
Hata	10	0.005390	0.000539			20.81
Toplam	26					100.00

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, KaO: Katkı oranı

UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  için katkı oranları grafiği Şekil 9’da verilmiştir. Tablo 8 ve Şekil 9’daki % katkı oranları dikkate alındığında,  $\zeta$  üzerinde en önemli ve etkili olan UMMY işleme parametresinin %24.61 değeriyle yatay nozul açısının (C) olduğu görülmektedir.



Şekil 9. UMMY işleme parametrelerinin  $\zeta$  için katkı oranları grafiği (Graph of contribution ratios of UMQL machining parameters for  $\zeta$ )

Ortalama UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  için optimum seviyeleri ve bu seviyelerin sayısal değerleri Tablo 9’da gösterilmiştir.

Tablo 9. UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  için optimum seviyeleri ve değerleri (Optimum levels and values of UMQL machining parameters for  $F_c$  and  $\zeta$ )

UMMY işleme parametreleri	$F_c$		$\zeta$	
	Seviye	Değer	Seviye	Değer
A (%)	1	5	1	5
B (mm)	1	0.8	1	0.8
C ( $^{\circ}$ )	2	30	1	15
D ( $^{\circ}$ )	3	45	1	15
E (mm)	1	15	2	20
F (bar)	3	6	2	5
G (ml/dk)	1	0.5	2	1
H	2	K	2	K

#### 4.3. Doğrulama Testleri (Confirmation Tests)

Bu çalışmada, optimum şartlarda üç defa doğrulama testi yapılmıştır. Doğrulama testlerinden elde edilen sonuçların %95 güven aralığında olduğu ifade edilebilir. Optimum şartlarda tahmin

edilen sonuçlar, %95 güven aralığı ve doğrulama testleri sonuçları Tablo 10’da gösterilmiştir. Yapılan üç doğrulama testi sonucunda  $F_c$  ve  $\zeta$ ’nin ortalama değerleri, sırasıyla 310.061 N ve 2.242 olarak hesaplanmıştır. Doğrulama testlerinden elde edilen sonuçlara göre, parametre etkilerinin güven aralığı sınırları içinde kaldığı ve tekrarlanabilir olduğu, aynı zamanda, deney sonuçlarının da güvenilebilir olduğu anlaşılmıştır. Başka bir ifadeyle,  $F_c$  ve  $\zeta$  için sistem optimizasyonu Taguchi yöntemiyle %95 güven aralığında yapılabilir.

Ortalama değerlere göre ve “En küçük en iyi” amaç fonksiyonuna göre, optimum UMMY işleme parametreleri  $F_c$  için A1B1C2D3E1F3G1H2 ve  $\zeta$  için A1B1C1D1E2F2G2H2 olarak belirlenmiştir. Optimal koşulda bir yanıt karakteristiğinin tahmini ortalaması,

$$\eta_{opt} = \eta_m + \sum_{i=1}^k (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad (9)$$

formülü ile belirlenir [43,44].

Sistemin optimum şartlarının doğru bir şekilde gerçekleştiğinin değerlendirilmesi yapılmalıdır. Bunun için, tahmini yanıt değişkeni güven aralığının (CI) hesaplanmasında,

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,(1,f_e)} V_e \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (10)$$

$$n_{eff} = \frac{1}{1+T_{SD}} \quad (11)$$

denklemleri kullanılmıştır [44,46].

Burada;  $F(\alpha, 1, f_e)$ : %95 güvenle F-oranı,  $\alpha$ : anlamlılık düzeyi,  $f_e$ : hata serbestlik derecesi,  $V_e$ : hata varyansı,  $n_{eff}$ : tekrar sayısı,  $R$ : doğrulama testleri tekrar sayısı,  $N$ : toplam deney sayısı ve  $T_{SD}$  toplam serbestlik derecesidir. Eş. 11’e göre  $n_{eff}=1.588$  olarak hesaplanmıştır.  $F_{0.05(1, F_0)}$  değeri, ilgili F-tablosundan bulunmuştur. Eş. 10’daki hata varyansı ( $V_e$ ), ANOVA sonuç tablolarındaki verilerden bulunmuştur. Bulunan değerler Eş. 10’a göre hesaplandığında,  $F_c$  için  $CI=28.769$  ve  $\zeta$  için  $CI=0.051$  olarak hesaplanmıştır. Tahmin değerleri ve doğrulama testi sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 11’de verilmiştir. Tablo 11’de görüldüğü gibi, doğrulama testlerinden elde edilen sonuç ile hesaplanan değerler arasındaki fark, hem  $F_c$  için hemde  $\zeta$  için bulunan CI değerinden küçük çıkmıştır. Bu sonuca göre,  $F_c$  ve  $\zeta$  için yapılan optimizasyonun uygun olduğu tasdiklenmektedir. Tahmini veriler ile deneysel veriler arasındaki hatanın %10’dan daha küçük çıkması, gerçekleştirilen istatistiksel analizin güvenilir olmasının bir göstergesidir [34,36]. Bu durumda, doğrulama testleri sonuçlarına göre başarılı bir optimizasyonun gerçekleştirildiği sonucuna varılabilir. Optimum koşullar altında  $F_c$  ve  $\zeta$  sırasıyla %3.19 ve %0.49’luk bir iyileşme göstermiştir.

Tablo 10. Doğrulama testlerinin sonuçları (Results of confirmation tests)

		Yanıt değişkeni	
		$F_c$ (N)	$\zeta$
Optimum şartlar altında tahmin edilen değer		319.579	2.294
Hata varyansı		173.27	0.00054
% 95 güven aralığı		$\pm 28.769$	$\pm 0.051$
% 95 güven aralığının	Alt sınırı	290.81	2.243
	Üst sınırı	348.348	2.345
Doğrulama test sonuçları	1	308.256	2.276
	2	315.560	2.232
	3	306.368	2.268
Doğrulama testlerinin ortalaması		310.061	2.259
Hata oranı (%)		2.98	1.53

Tablo 11. Tahmin değerleri ve doğrulama testi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of prediction values and confirmation tests results)

Parametre ve Seviyeleri	Taguchi Metodu için			
	Deneysel Veriler	Tahmin Verileri	Hata (%)	İyileşme (%)
<b>F<sub>c</sub> (N)</b>				
A1B1C2D3E1F3G1H2 (optimal)	310.061	319.579	3.07	3.19
A2B1C2D3E1F2G3H1(deneysel)*	319.937	325.248	1.66	
<b>ζ</b>				
A1B1C1D1E2F2G2H2 (optimal)	2.259	2.294	1.55	0.49
A1B1C1D1E2F2G2H2(deneysel)*	2.270	2.410	6.17	

\*Deneylemlerden elde edilen en iyi sonuçların kombinasyonu seçilmiştir.

#### 4.4. Gri İlişki Analizi Sonuçları (Grey Relational Analysis Results)

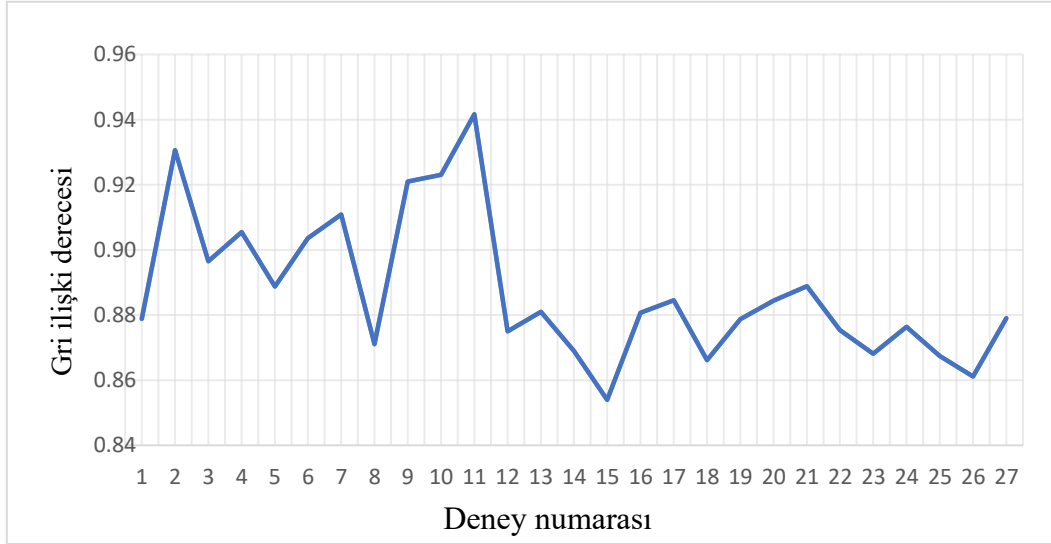
Metal işlemede, UMMY işleme parametrelerinin  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerini aynı anda en aza indirmek için çok yanıtlı optimizasyon yöntemi tercih edilmiştir. Eş.3 ile elde edilen normalizasyon değerleri, Eş.3-Eş.5 kullanılarak uzaklık matrisi, gri ilişki katsayısı ve Eş.6 ile elde edilen gri ilişki derecesi (GİD) değerleri Tablo 12'de verilmiştir. Gri ilişki derecesinin büyük değeri, normalleştirilmiş değer ve deneysel değer arasındaki ilişkinin daha iyi olması demektir. Bu yüzden, daha büyük GİD, karşılık gelen işlem parametresi kombinasyonu optimuma en yakın olduğunun bir göstergesidir.

Tablo 12. Gri ilişki derecesi ve sıralaması (Grey relational degree and ranking)

Deney No	Normalizasyon		Uzaklık Matrisi		Gri İlişki Katsayısı		Gri İlişki Derecesi	Sıralama
	$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$	$F_c$ (N)	$\zeta$	$\gamma_i$	
1	0.2570	0.3636	0.7430	0.6364	0.8706	0.8871	0.8789	16
2	0.1950	1.0000	0.8050	0.0000	0.8613	1.0000	0.9307	2
3	0.2440	0.5909	0.7560	0.4091	0.8687	0.9244	0.8965	8
4	0.5460	0.4091	0.4540	0.5909	0.9168	0.8943	0.9055	6
5	0.3844	0.3636	0.6156	0.6364	0.8904	0.8871	0.8887	10
6	0.5235	0.4091	0.4765	0.5909	0.9130	0.8943	0.9036	7
7	0.9417	0.0000	0.0583	1.0000	0.9885	0.8333	0.9109	5
8	0.2007	0.3182	0.7993	0.6818	0.8622	0.8800	0.8711	21
9	0.8765	0.2273	0.1235	0.7727	0.9759	0.8661	0.9210	4
10	1.0000	0.0909	0.0000	0.9091	1.0000	0.8462	0.9231	3
11	0.9806	0.3636	0.0194	0.6364	0.9961	0.8871	0.9416	1
12	0.2053	0.3636	0.7947	0.6364	0.8629	0.8871	0.8750	20
13	0.2851	0.3636	0.7149	0.6364	0.8749	0.8871	0.8810	13
14	0.3103	0.1818	0.6897	0.8182	0.8788	0.8594	0.8691	22
15	0.2410	0.0455	0.7590	0.9545	0.8682	0.8397	0.8539	27
16	0.2342	0.4091	0.7658	0.5909	0.8672	0.8943	0.8807	14
17	0.2839	0.4091	0.7161	0.5909	0.8747	0.8943	0.8845	11
18	0.2274	0.2273	0.7726	0.7727	0.8662	0.8661	0.8661	25
19	0.1579	0.4545	0.8421	0.5455	0.8559	0.9016	0.8787	17
20	0.3296	0.3636	0.6704	0.6364	0.8818	0.8871	0.8844	12
21	0.3407	0.4091	0.6593	0.5909	0.8835	0.8943	0.8889	9
22	0.1119	0.4545	0.8881	0.5455	0.8492	0.9016	0.8754	19
23	0.0611	0.4091	0.9389	0.5909	0.8419	0.8943	0.8681	23
24	0.0735	0.5000	0.9265	0.5000	0.8437	0.9091	0.8764	18
25	0.0000	0.4545	1.0000	0.5455	0.8333	0.9016	0.8675	24
26	0.2940	0.0909	0.7060	0.9091	0.8763	0.8462	0.8612	26
27	0.2602	0.3636	0.7398	0.6364	0.8711	0.8871	0.8791	15



Gri ilişki derecesi grafiği Şekil 10'da verilmiştir. Tablo 12'deki sıralamadan ve Şekil 10'dan açıkça görülebileceği gibi, gri ilişki derecesinin optimum değeri 11 numaralı testten (A2B1C2D3E2F3G1H2) elde edilmiştir. Elde edilen değerler içerisinde büyük olanı ideal değer olarak tanımlanır. Böylece optimum  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerini elde etmek için 11 numaralı testin işleme koşullarında ideal deneysel faktör olduğu görülmüştür. Buna göre optimum işleme koşullarının %10 sıvı konsantrasyon oranında, 0.8 mm nozul orifis çapında, 30° yatay ve 45° dikey nozul açılarında, 20 mm nozul mesafesinde, 6 bar basınçta, 0.5 ml/dk atomizasyon miktarında ve kısa nozul tipinde elde edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 10. Gri ilişki derecesi grafiği (Graph of grey relational degree)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, UMMY işleme parametrelerinden olan kesme sıvısı konsantrasyon oranı, nozul orifis çapı, yatay nozul açısı, dikey nozul açısı, nozul mesafesi, hava basıncı, kesme sıvısı atomizasyon oranı ve nozul tiplerinin, kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve talaş büzüşme katsayısı ( $\zeta$ ) üzerine etkileri araştırılmıştır. En düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerin elde edilmesi için kullanılacak olan optimum UMMY işleme parametrelerinin belirlenmesi, Taguchi deney teknikleri ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre çalışma sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- En düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerleri kısa nozulla (K) yapılan işlemede elde edilmiştir. Kısa nozul ile işlemede elde edilen değerler,  $F_c$  için 372.6 N ve  $\zeta$  için 2.368 olarak belirlenmiştir.
- En düşük  $F_c$  değerini veren UMMY işleme parametreleri, kesme sıvısı konsantrasyon oranı (% 5,  $F_c=369.0$  N), nozul orifis çapı (0.8 mm,  $F_c=373.7$  N), nozul mesafesi (15 mm,  $F_c=375.4$  N), kesme sıvısı atomizasyon oranı (0.5 ml/dk,  $F_c=370.8$  N) 1. seviye değerlerinde, yatay nozul açısı (30°,  $F_c=368.7$  N) 2. seviye değerinde, dikey nozul açısı (45°,  $F_c=366.1$  N) ile hava basıncı (6 bar,  $F_c=375.9$  N) 3. seviye değerlerinde gerçekleşmiştir.
- En düşük  $\zeta$  değeri, 3. seviyedeki değerlerde oluşmamış olup kesme sıvısı konsantrasyon oranı (% 5,  $\zeta=2.370$ ), nozul orifis çapı (0.8 mm,  $\zeta=2.364$ ), yatay nozul açısı (15°,  $\zeta=2.357$ ) ve dikey nozul açısı (15°,  $\zeta=2.374$ ) 1. seviye değerlerinde oluşmuştur. Buna karşılık nozul mesafesi (20 mm,  $\zeta=2.373$ ), hava basıncı (5 bar,  $\zeta=2.367$ ) ve kesme sıvısı atomizasyon oranı (1 ml/dk,  $\zeta=2.370$ ) 2. seviye değerlerinde oluşmuştur.
- Özellikle en düşük  $F_c$  değerlerinin elde edildiği 0.5 ml/dk kesme sıvısı atomizasyon oranı ile UMMY sisteminde oldukça düşük miktarlarda kesme sıvısının kullanıldığı görülmüştür.
- Gri ilişki analizinde elde edilen gri ilişki derecesinin optimum değeri, Taguchi  $L_{27}$  deney düzeneğindeki 11 numaralı deneyden (A2B1C2D3E2F3G1H2) elde edilmiştir.
- UMMY sisteminin en düşük  $F_c$  ve  $\zeta$  değerlerinin elde edildiği % 5 kesme sıvısı konsantrasyon oranı ile daha düşük miktarlarda yağ kullanılan bir sistem olduğu anlaşılmıştır.
- Böylece UMMY sisteminin düşük kesme sıvısı ve yağ tüketiminin bir sonucu olarak hem insan ve çevre dostu bir işleme sistemi olduğu, hem de oldukça ekonomik bir sistem olduğu sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. F. Kafkas, R. Mergen, İşleme süreçlerinde ultrasonik atomizasyon kesme sıvısı (ACF) püskürtme sistemine dayalı minimum miktar yağlama (MQL) sistemlerine genel bir bakış, Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar VI. (Edt: L. Civcik), Konya: Eğitim Yayınevi, 7-34, 2022.
2. N.A. Abukhshim, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, An investigation of the tool-chip contact length and wear in high-speed turning of EN19 steel, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 218(8): 889-903, 2004.
3. S.A. Iqbal, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 1: Investigation of contact phenomena, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221(5): 909-916, 2007.
4. I. Ghai, J. Wentz, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, J. Samuel, Droplet behavior on a rotating surface for atomization-based cutting fluid application in micromachining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 132(1), 2010.
5. V. Marinov, The tool chip contact length on orthogonal metal cutting, In 5th International Conference on Advanced Engineering and Technology, AMTECH, 99:149-155, 1999.
6. A.C. Hoyne, C. Nath, S.G. Kapoor, On cutting temperature measurement during titanium machining with an atomization-based cutting fluid spray system, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 137(2): 024502, 2015.
7. M.B. Jun, S.S. Joshi, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130(3): 031118, 2008.
8. X. Wang, C. Li, Y. Zhang, W. Ding, M. Yang, T. Gao, H.M. Ali, Vegetable oil-based nanofluid minimum quantity lubrication turning: Academic review and perspectives, Journal of Manufacturing Processes, 59:76-97, 2020.
9. S.A. Lawal, I. A. Choudhury, Y. Nukman, Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals-a review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 52(1):1-12, 2012.
10. N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel, Journal of materials processing technology, 172(2):299-304, 2006.
11. M. Hadad, B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy, Journal of Cleaner Production, 54: 332-343, 2013.
12. M.M.A. Khan, M.A.H. Mithu, N.R. Dhar, Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. Journal of materials processing Technology, 209(15-16):5573-5583, 2009.
13. Y. Shuang, M. John, D. Songlin, Experimental investigation on the performance and mechanism of graphene oxide nanofluids in turning Ti-6Al-4V, Journal of Manufacturing Processes, 43:164-174, 2019.
14. A. Shokrani, I. Al-Samarrai, S.T. Newman, Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy, Journal of Manufacturing Processes, 43:229-243, 2019.
15. H. Chen, W.L. Cheng, Y.H. Peng, W.W. Zhang, L.J. Jiang, Experimental study on optimal spray parameters of piezoelectric atomizer based spray cooling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 103:57-65, 2016.
16. M.A. Ebadian, C.X. Lin, A review of high-heat-flux heat removal technologies, Journal of Heat and Mass Transfer, 133(11), 2011.
17. A. Tanveer, D. Marla, S.G. Kapoor, A thermal model to predict tool temperature in machining of Ti-6Al-4V alloy with an atomization-based cutting fluid spray system, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 139(7): 071016, 2017.
18. C. Nath, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Design and evaluation of an atomization-based cutting fluid spray system in turning of titanium alloy, Journal of Manufacturing Processes, 14(4): 452-459, 2012.
19. C. Nath, S.G. Kapoor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Study of droplet spray behavior of an atomization-based cutting fluid spray system for machining titanium alloys, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 136(2): 021004, 2014.

20. C. Nath, S.G. Kapoor, A.K. Srivastava, Finish turning of Ti-6Al-4V with the atomization-based cutting fluid (ACF) spray system, *Journal of Manufacturing Processes*, 28: 464-471, 2017.
21. M.B. Jun, S.S. Joshi, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(3): 031118, 2008.
22. C. Nath, S.G. Kapoor, R.E. DeVor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Design and evaluation of an atomization-based cutting fluid spray system in turning of titanium alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 14(4): 452-459, 2012.
23. C. Nath, S.G. Kapoor, A.K. Srivastava, J. Iverson, Effect of fluid concentration in titanium machining with an atomization-based cutting fluid (ACF) spray system, *Journal of Manufacturing Processes*, 15(4):419-425, 2013.
24. E. Martínez-Galván, R. Antón, J. C. Ramos, R. Khodabandeh, Effect of the spray cone angle in the spray cooling with R134a, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 50:127-138, 2013.
25. E. Abd Rahim, H. Dorairaju, Evaluation of mist flow characteristic and performance in minimum quantity lubrication (MQL) machining, *Measurement*, 123:213-225, 2018.
26. R. Singh, Minimum quantity lubrication turning of hard to cut materials—A review, *Materials Today: Proceedings*, 37:3601-3605, 2021.
27. T. Ueda, A. Hosokawa, K. Yamada, Effect of oil mist on tool temperature in cutting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128:130–135, 2006.
28. A. Yassin, C.Y. Teo, Effect of pressure and nozzle angle of minimal quantity lubrication on cutting temperature and tool wear in turning, In *Applied Mechanics and Materials*, 695:676-679, 2015.
29. V. Upadhyay, P.K. Jain, N.K. Mehta, K. Branko, Minimum quantity lubrication assisted turning-an overview, *Daaam International Scientific Book*, 463-478, 2012.
30. V.S. Sharma, M. Dogra, N.M. Suri, Cooling techniques for improved productivity in turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(6):435-453, 2009.
31. T. Singh, P. Singh, J.S. Dureja, M. Dogra, H. Singh, M.S. Bhatti, A review of near dry machining/minimum quantity lubrication machining of difficult to machine alloys, *International journal of Machining and Machinability of Materials*, 18(3):213-251, 2016.
32. Z.Q. Liu, X.J. Cai, M. Chen, Q.L. An, Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti-6Al-4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(8): 1273-1279, 2011.
33. S. Masoudi, M.J. Esfahani, F. Jafarian, S.A. Mirsoleimani, Comparison the effect of MQL, wet and dry turning on surface topography, cylindricity tolerance and sustainability, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-13, 2019.
34. Y. Hou, X. Liu, J. Liu, M. Li, L. Pu, Experimental study on phase change spray cooling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 46:84-88, 2013.
35. F. Kafkas, Evaluation of the efficiency of an ultrasonic atomization-based coolant (uACF) spray system in external turning using different nozzle tips, *Journal of Manufacturing Processes*, 81:991-1004, 2022.
36. F. Kafkas, H. Gürbüz, U. Şeker, AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında takım geometrisi ve işleme parametrelerinin yüzey bütünlüğü özelliklerine etkisinin taguchi yöntemi ile analizi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 10 (3), 391-407, 2022.
37. K. Palanikumar, Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, *Measurement*, 44(10): 2138-2148, 2011.
38. I. Asiltürk, H. Akkuş, Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement*, 44(9):1697-1704, 2011.
39. O. Köksoy, F. Zehra Muluk, Solution to the Taguchi's problem with correlated responses, *Gazi University Journal of Science*, 17(1):59-70, 2004.
40. A. Gupta, H. Singh, A. Aggarwal, Taguchi-fuzzy multi output optimization (MOO) in high speed CNC turning of AISI P-20 tool steel, *Expert Systems with Applications*, 38(6):6822-6828, 2011.
41. S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufacturing engineering and technology in SI units*, 8th Edition, UK: Pearson Education Limited, 2022.
42. C.L. Lin, Use of the taguchi method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics, *Mater. Manuf. Process.* 19(2):209–220, 2004.

43. A. Acır, M.E. Canlı, İ. Ata, R. Çakiroğlu, Parametric optimization of energy and exergy analyses of a novel solar air heater with grey relational analysis, *Appl. Therm. Eng.*, 122:330–338, 2017.
44. K. Ramesh, P. Baranitharan, R. Sakthivel, Investigation of the stability on boring tool attached with double impact dampers using Taguchi based Grey analysis and cutting tool temperature investigation through FLUKE-Thermal imager, *Measurement*, 131:143–155, 2019.
45. M. Mia, A. Rifat, F. Tanvir, M.K. Gupta, J. Hossain, A. Goswami, Multi-objective optimization of chip-tool interaction parameters using Grey-Taguchi method in MQL-assisted turning, *Measurement*, 129:156–166, 2018.
46. O. Zerti, M. Yallese, A. Zerti, S. Belhadi, F. Girardin, Simultaneous improvement of surface quality and productivity using grey relational analysis based Taguchi design for turning couple (AISI D3 steel/mixed ceramic tool (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ TiC)), *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, 9(2):173–194, 2018.
47. T. Zeng, C.J. Lin, Y.H. Yang, M.C. Jeng, Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the taguchi method and grey relational analysis, *J. Mater. Process. Technol.*, 209:2753-2759, 2009.

## Tel Erozyonla Kesmede Çoklu Kesim Yöntemi Kullanılarak Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu

Salih Güvercin<sup>1,\*</sup> , Eren Kocaoğlu<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Amasya Üniversitesi, Amasya Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Mühendislik Fakültesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Amasya, Türkiye

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 04.11.2023

**Kabul:** 14.12.2023

#### Anahtar Kelimeler:

WEDM

Ana kesim

Son kesim

Yüzey pürüzlülüğü

Optimizasyon

### ÖZET

Tel erozyonla işlemede (WEDM) son kesim işlemi, ana kesim işleminden sonra elde edilen yüzeyden çok az miktarda talaş kaldırarak yüzey özelliklerini ve geometrik doğruluğu iyileştirmek için olası bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada, SAE 1080 karbon çeliğinin tel erozyon tezgâhında kesilmesi sırasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ), kuadratik ortalama pürüzlülük ( $R_q$ ) ve maksimum pürüzlülük ( $R_z$ ) kriterlerine kesme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Kontrol faktörleri, tezgâh değişkenlerinden vuruş süresi ( $T_{on}$ ), tabla ilerleme hızı ( $T_s$ ) ve vuruş bekleme süresi ( $T_{off}$ ) olarak belirlenmiştir. Deneyler, Taguchi L9 ortogonal dizisine göre yapılmıştır.  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  pürüzlülük kriterleri üzerinde kontrol faktörlerinin etki düzeylerini belirlemek amacıyla varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Ayrıca, ana kesim ve son kesim uygulamaları için “en küçük en iyi” yaklaşımı kullanılarak parametre optimizasyonu yapılmıştır. ANOVA sonuçlarına göre, değerlendirilen yüzey pürüzlülük kriterleri üzerinde en etkin kesme parametresini ana kesim ve son kesimde vuruş süresi olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, son kesim işleminin ana kesim işlemine göre  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  için sırasıyla ortalama %21.5, %10.5 ve %12.5’lik bir iyileşme elde edildiği görülmüştür.

## Optimization of Surface Roughness Using Multiple-Cut Method in Wire Electrical Discharge Machining

### ARTICLE INFO

**Received:** 04.11.2023

**Accepted:** 14.12.2023

#### Keywords:

WEDM

Main cut

Trim cut

Surface roughness

Optimization

### ABSTRACT

The trim cut process in wire electrical discharge machining (WEDM) is considered as a possible solution to improve surface properties and geometric accuracy by removing a small amount of chip from the surface obtained after main cut process. In this work, the effects of cutting parameters on the mean surface roughness ( $R_a$ ), quadratic mean roughness ( $R_q$ ) and maximum roughness ( $R_z$ ) criteria formed during the cutting of SAE 1080 carbon steel on the WEDM machine were investigated. Control factors were determined as the machine variables pulse duration ( $T_{on}$ ), table feed speed (TS) and pulse interval ( $T_{off}$ ). Experiments were performed based on the Taguchi L9 orthogonal sequence. Analysis of variance (ANOVA) was applied to define the impact levels of control factors on the  $R_a$ ,  $R_q$  and  $R_z$  roughness criteria. Additionally, parameter optimization was performed using the “smallest is best” approach for main cutting and final cutting applications. Based on the ANOVA outcomes, it was detected that the most influence cutting parameter on the considered surface roughness criteria was the pulse duration in the main cut and trim cut. As a result of the study, it was seen that an average improvement of 21.5%, 10.5% and 12.5% was achieved for  $R_a$ ,  $R_q$  and  $R_z$ , respectively, in the trim cut process compared to the main cut process.

\*Sorumlu yazar, e-posta: salih.guvercin@hotmail.com

To cite this article: S. Güvercin, E. Kocaoğlu, Tel Erozyonla Kesmede Çoklu Kesim Yöntemi Kullanılarak Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3),155-166, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1386132>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tel elektro erozyonla işleme (WEDM), geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan iş parçalarının ve karmaşık profillerin üretiminde gerçek çözümü geliştirmek için kullanıldığından, mekanik endüstrisi için çok önemli bir yer tutmaktadır. Tel erozyon işleme yüksek mekanik ve ısı özelliklerinden dolayı işlenmesi zor malzemeler olarak bilinen süper alaşımlar, metal, seramikler, ve matrisli kompozitler gibi malzemelerin işlenmesinde sıklıkla kullanılan geleneksel olmayan imalat metotlarından biridir [1,2]. Tel erozyon yönteminin çalışma prensibi temel olarak iletken iş parçasından, servo motor yardımıyla pirinç, tungsten, bakır, molibden veya kaplanmış tel kullanılarak temas yüzeyi oluşturulmadan talaş kaldırılması işlemidir. Burada, ısınma ve soğumanın tekrarlandığı karmaşık bir elektro termal süreç gerçekleşir [3-5]. Jadam vd., yapmış oldukları çalışmada bazı malzemelerin (Ti-6Al-4V vb) WEDM performansı, zayıf termal iletkenliği, sert ve kırılğan karbür/oksit açısından zengin tabakanın oluşması ve genellikle parça ürününün yorulma performansını etkileyen yüzey çatlama nedeniyle bir miktar sınırlı olduğunu ve bu nedenle çoklu kesim stratejisi, işlemeden kaynaklanan kusurları azaltmak için uyarlandığını çoklu kesim işleminin, bir ana/kaba kesimin ardından bir dizi ince/son kesimden oluştuğunu ve ana/kaba kesimden sonra ince/son kesim yaparak bu tür sorunları iyileştirdiğini tespit etmişler [6]. Rehan vd., çalışmalarında, çok pasolu işlemin işlenen yüzeydeki hasarı en aza indirmek için kanıtlanmış bir teknik olduğunu belirtmiştir.. Ancak paso sayısını arttırmak verimliliği düşürür. Bu nedenle, kesme işlemi için tel ofset değerinin dikkatli seçilmesi, proses verimliliğini korumak ve geçiş sayısını minimumda tutmak açısından çok önemli olduğunu belirlemişler [7]. Usman vd., prosesin termo-elektrik doğasından dolayı yeterli seviyede yüzey bütünlüğüne sahip olması zordur. Bu nedenle çoklu kesime ihtiyaç duyulduğunu tespit etmişler [8]. Goswami vd., son kesim uygulamasının kaba kesim uygulaması ile karşılaştırıldığında yüksek yüzey kalitesi için hassas kesim potansiyelini açıkça gösterdiğini belirlemişler [9]. Janga vd., dört farklı malzeme ile kaba kesim ve birden çok son kesim işlemleri yapmışlardır. Sonuç olarak tek ve uygun tel ofseti sayesinde son kesim uygulanmasının yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği sonucuna varmışlardır [10]. Sharma vd., kaba kesim ve iki farklı son kesim işlemi yapmışlar ve sonuç olarak son kesimin yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olduğunu tespit etmişler [11]. Rohilla vd., kaba kesim ve son kesim işlemi yapmışlar ve sonuç olarak son kesimin yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olduğunu belirlemişler [12]. Oliver vd., seramik kompozit malzemesini tel erozyon tezgâhında ana kesim, ana kesimden sonra son kesim şeklinde işlemişler sonuç olarak ana kesim sonrasında malzemede büyük çentiklerin oluştuğunu ve son kesimde yüksek deşarj verilirse çentiklerin daha da büyüebileceğini gözlemlemişler [13]. Singh vd., titanyum alaşımlı malzemeyi ana kesim ve son kesim 1. son kesim 2. şeklinde işleyerek yüzey pürüzlülüğünü ölçmüşler ve ana kesimde yüksek çatlaklar olduğu ve son kesimlerde daha düşük çatlakların olduğunu ve yaklaşık %30 azaltıldığını tespit etmişler [14]. Lia vd. Inconel 718 iş parçasını ana kesim ve son kesim olarak işlemişler ve ana kesimin yüzey pürüzlülüğünün yüksek olduğu ve daha düşük bir deşarj ile yapılan son kesimde yüzey pürüzlülük değerinin düşük olduğunu tespit etmişler [15]. Arikatla vd., bir ana kesim ve üç son kesim işlemi yapmışlar ve son kesim işlemlerinin ana kesim işlemlerinden daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü olduğunu çalışmaları sonucu tespit etmişler [16]. Liu vd., ana kesim ve son kesim deneyinde, ana kesime göre son kesim işleminde daha iyi yüzey elde ettiklerini ifade etmişler [17]. Li vd., bir ana kesim ve üç son kesim işlemi yapmışlar ve son kesim işlemlerinin ana kesim işlemlerinden daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü olduğunu ayrıca son kesim sayısı arttıkça yüzeyin daha iyi olduğunu çalışmaları sonucu belirtmişler [18]. Cao vd., iki farklı malzemeyi çoklu kesim yöntemi ile işlemişlerdir. İşleme sonuçlarına bakıldığında kesme geçişlerinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin düştüğünü ayrıca farklı malzemelerde aynı parametre kullanılmasına rağmen malzeme özelliklerinden dolayı yüzey pürüzlülük değerlerinde farklılıkların olduğunu tespit etmişler [19]. Selvakumar vd., iş parçasını çoklu kesim yöntemi kullanarak işlemişler ve düşük deşarj ile yapılan son kesimde daha düşük yüzey değeri elde ettiklerini belirtmişler [20]. Kumar vd., kaba kesim ve son kesim işleminde, ana kesime göre son kesim işleminde yüzey pürüzlülüğün düşük olduğunu tespit etmişler [21]. Kumar vd., katkılı dielektrik sıvı ile yapmış oldukları kaba kesim ve son kesim işleminde, ana kesimde deşarj yüksek olsa da son kesim işleminde yüzey pürüzlülüğün daha iyi

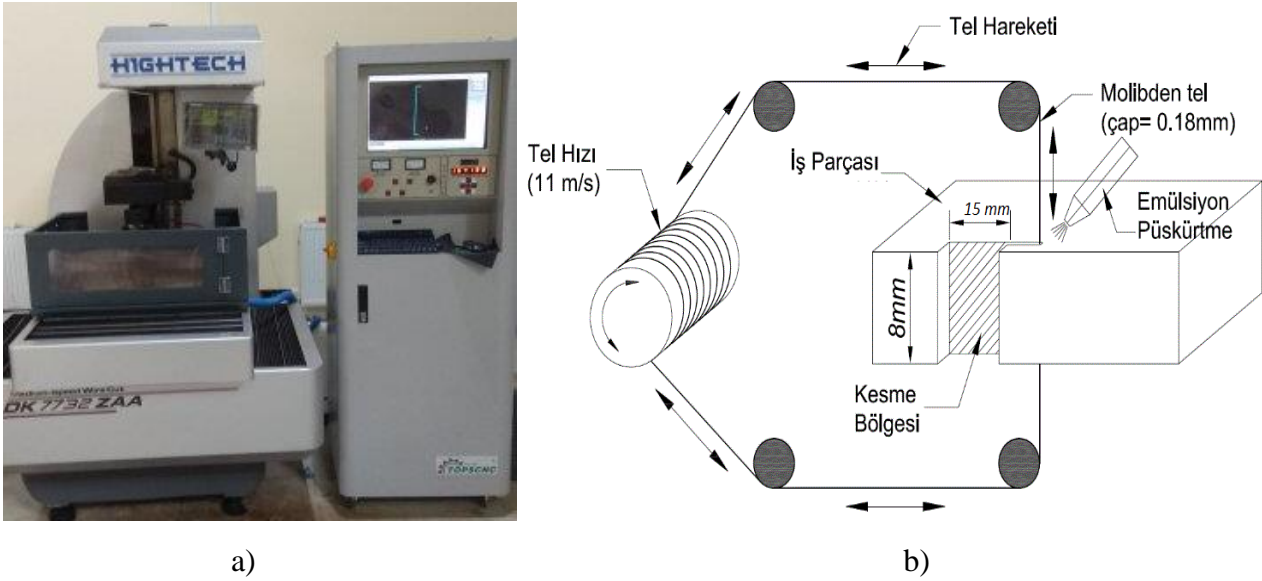
olduğunu hatta katkılı dielektrik sıvı kullanılarak yapılan son kesim işleminde çok daha iyi bir yüzey kalitesi elde ettiklerini tespit etmişlerdir [22].

Literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, işlenen parçaların tek kesim yapılarak istenilen yüzey kalitesi, yüzey sertliği, ölçü doğruluğu gibi sonuçların elde edilemediği görülmüştür. Bu nedenle, çoklu kesim yöntemleri kullanılarak istenilen ölçü tamlığı ve yüzey bütünlüğü sağlanabildiği belirtilmektedir. Çoklu kesim, ana kesim (main) ve son kesim (trim) olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, takım imalatında kullanılan yüksek karbonlu bir çeliğin tel elektro erozyon ile çoklu kesim uygulanarak kesilmesinde oluşan yüzey pürüzlülüğü için işleme parametreleri optimizasyonu hedeflenmiştir.

## 2. MALZEME VE METODOLOJİ (MATERIAL AND METHODOLOGY)

### 2.1. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Bu çalışmada, bıçak, matkap veya bazı aşınma direnci gerektiren kesme aletlerinde kullanılan iş parçası malzemesi SAE 1080 çeliği kullanılmıştır. Deneyler, Şekil 1(a)'da gösterilen Hightech DK-7732 CNC WEDM tel erozyon tezgâhında yapılmıştır. Kesici tel olarak 0.18 mm Molibden alaşım tel, tel erozyon tezgâhında dielektrik sıvı olarak saf su ve JR3A reçine 1/30-40 (kg/kg) (JR3A/pure water) oranında emülsiyonu kullanılmıştır. Molibden tel kullanan tezgâhlarda tel bir tambura sarılı olarak devamlı kullanılır. Tel hızı 11 m/s, yalıtkan emülsiyon sirkülasyon basıncı ise 1 bar seviyesinde sabit olarak uygulanmıştır. Deneysel kurulum şematik olarak Şekil 1(b)'de gösterilmiştir.



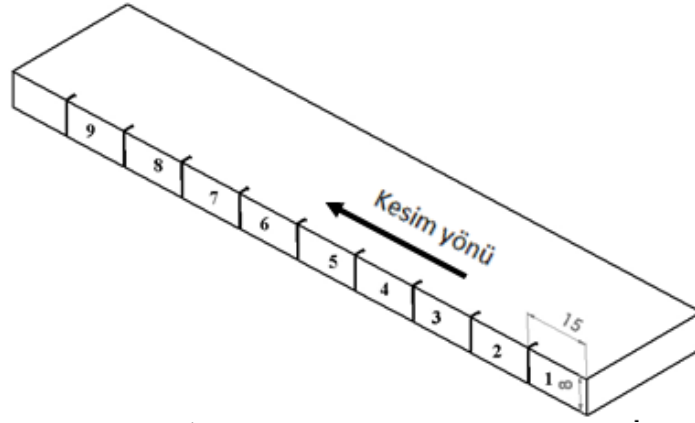
Şekil 1 a) Deneyde kullanılan Tel Erozyon Tezgâhı b) Deneysel süreç şeması (a) wire erosion machine used in the experiment, b) Experimental process diagram)

Yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo Surfes SJ-210 cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler, ISO 4288 standardına göre yapılmış olup kesim uzunluğu ( $\lambda_c$ ) 0.8 mm ve değerlendirme uzunluğu (Lt) 4 mm seçilmiştir.

### 2.2. İş Parçası Özellikleri (Workpiece Properties)

Çalışmada iş parçası olarak %0.80 C, %0.08 Mn, %0.04 P ve %0.05 S gibi içeriğe sahip yüksek karbonlu bir çelik olan SAE 1080 çelik kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan iş parçası boyutları Şekil 2'de verilmiştir. İş parçası üzerinde, gösterilen yönde 15 mm işleme uzunluğunda deney tasarımına göre ana kesim ve son kesim için 9 kesme işlemi yapılmıştır.





Şekil 2. İş parçası ölçüleri (Workpiece dimensions)

### 2.3. Deney Tasarımı ve Analizi (Experimental Design and Analysis)

İşlenen parçalarda hem istenilen yüzey bütünlüğü ve ölçü doğruluğu sağlamak hem de üretim süresince harcanan zaman ve maliyeti düşürmek için farklı optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, zaman ve maliyeti düşürerek tasarruf sağlamak adına Taguchi yöntemi tercih edilmiş olup, bu metodoloji talaşlı imalat süreçlerinde en çok kullanılan optimizasyon yöntemlerinden birisidir. Taguchi  $L_9$  ( $3^3$ ) deney tasarımı için kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 1’de verilmiştir. Deney tasarımında tercih edilen üç farklı parametre, vurum süresi ( $T_{on}$ ), vurum bekleme süresi ( $T_{off}$ ) tabla ilerleme hızı ( $T_S$ ) için üç seviye seçilmiştir. Faktörlerin/parametrelerin seviyeleri belirlenirken ön deney sonuçlarından elde edilen veriler ve tel erozyon üretici firmanın belirlemiş olduğu en uygun değerler dikkate alınmıştır. Deneysel verilerin analizinde Minitab programı kullanılmıştır.

Tablo 1. Deney tasarımı için kontrol faktörleri (Control factors for experimental design)

Faktörler	Sembol	Birim	Seviyeler		
			1	2	3
Vurum süresi	$T_{on}$	$\mu s$	12	24	48
Bekleme süresi	$T_{off}$	$\mu s$	115	208	406
Tabla ilerleme hızı	$T_S$	(mm/dk)	0.5	1	2

Taguchi optimizasyon metodolojisinde, performans kriteri (çıktı) için beklenen duruma göre “en büyük-en iyi”, “nominal-en iyi” ve “en küçük-en iyi” yaklaşımlarından birisi uygulanarak optimum faktörler bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülük kriterleri olan  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değerlerinin küçük olması istenildiğinden, bu çalışmada Taguchi optimizasyonunda “en küçük-en iyi” yaklaşımı tercih edilmiş olup, bu yaklaşım fonksiyonu Eş.1’de verilmiştir [23].

$$\eta = S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Eş. 1’de “n” deney sayısı ve “y” performans kriterini temsil etmektedir.

### 3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

Bu çalışmanın amacı; tel elektro erozyon tezgâhında kesilen iş parçası yüzeyinde oluşan pürüzlülük kriterlerinden  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değerlerinin en küçük olmasını sağlayacak faktör seviyelerini elde edebilmektir. Bu amaca ulaşmak için Taguchi deney tasarım ve optimizasyon uygulamalarından  $L_9$  ( $3^3$ ) ortogonal deney deseni tercih edilmiştir.

### 3.1 Deneysel veriler ve Taguchi optimizasyonu (Experimental data and Taguchi optimization)

Taguchi optimizasyon yönteminde analiz yapmak için yüzey pürüzlülük kriterleri olan  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  için yapılan üç ölçüm değerinin aritmetik ortalaması alınmış ve Eş.1 kullanılarak “en küçük en iyi” yaklaşımı ile ilgili cevap değişkenleri için Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır”. Dönüştürülen sonuçlarda sinyal, ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü ise ölçülen değerlerde istenmeyen faktörlerin oranını temsil eder [24]. Ana kesim sonrası ölçülen  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değerleri Tablo 2’de, son kesimde ölçülen  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değerleri ise Tablo 5’te sunulmuştur.

Tel erozyonda uygulanan çoklu kesme sürecinde (Ana kesim+son kesim)  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  kriterleri üzerinde kontrol parametrelerinin ( $T_{on}$ ,  $T_S$  ve  $T_{off}$ ) etkisi, S/N oranları tepki tablosu kullanılarak analiz edilmiş ve ana kesim için Tablo 3 ve 4’te, son kesim için Tablo 6 ve 7’de verilmiştir. Optimum seviyeler,  $L_9$  dikey dizinindeki kontrol faktörlerinin farklı seviyeleri değerlendirilerek bulunmuştur. Ayrıca, kontrol faktörleri ve seviyelerinin değerlendirilen pürüzlülük kriterlerine etkisi ana kesim için Şekil 3’te, son kesim için Şekil 4’te grafik olarak verilmiştir.

Tablo 2. Ana kesim için deney sonuçları ve S/N oranları.( Experiment results and S/N ratio for the main cut)

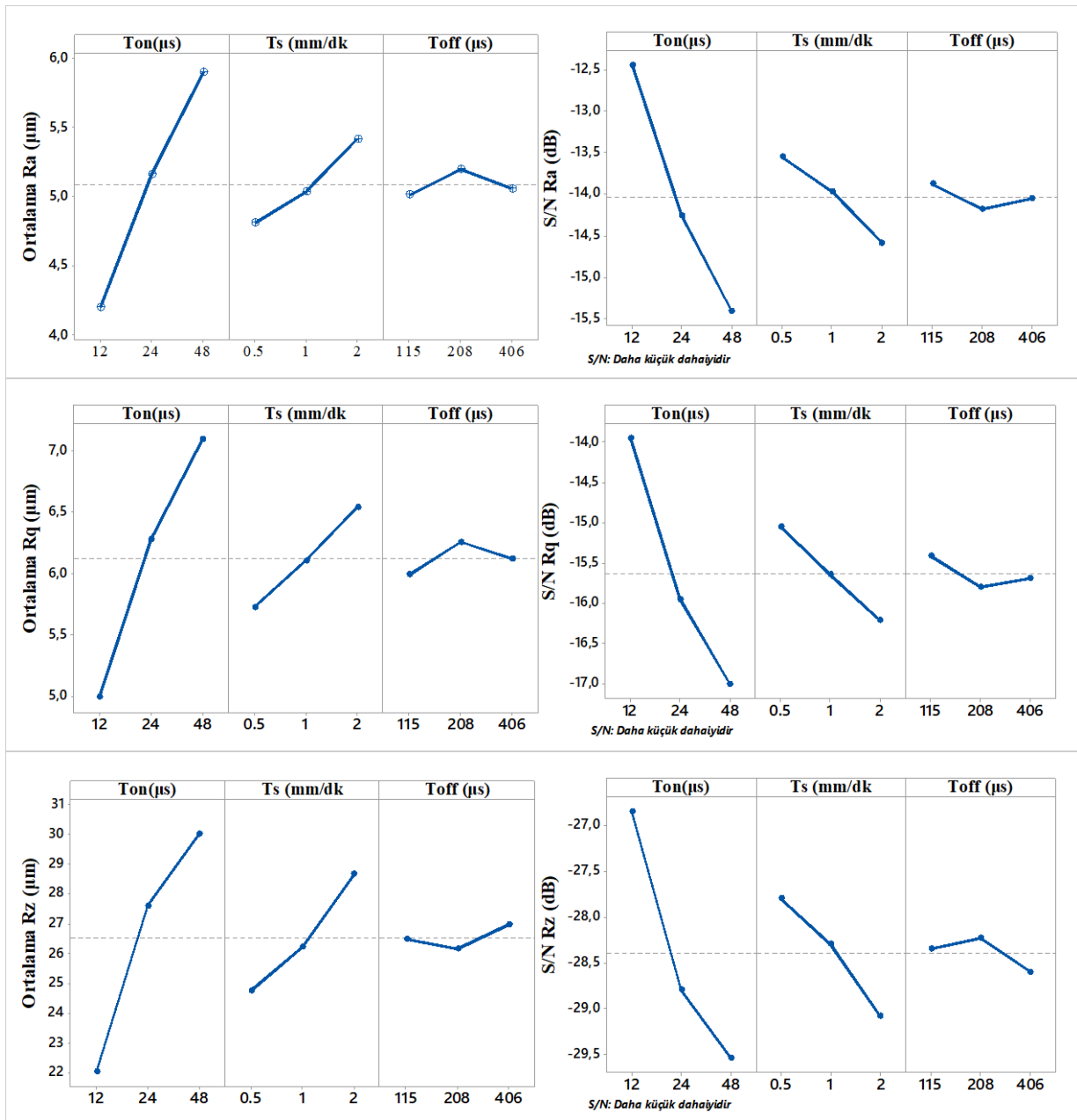
Deney no	$T_{on}$	$T_S$	$T_{off}$	$R_a$	$S/NR_a$	$R_q$	$S/NR_q$	$R_z$	$S/NR_z$
	$\mu s$	mm/dk	$\mu s$	( $\mu m$ )	(dB)	( $\mu m$ )	(dB)	( $\mu m$ )	(dB)
1	12	0.5	115	<b>3.909</b>	-11.841	<b>4.562</b>	-13.184	<b>20.698</b>	-26.319
2	12	1	208	4.183	-12.430	5.083	-14.122	21.335	-26.582
3	12	2	406	4.498	-13.060	5.331	-14.536	24.043	-27.620
4	24	0.5	208	4.997	-13.974	5.943	-15.480	24.884	-27.918
5	24	1	406	5.150	-14.236	6.354	-16.061	28.245	-29.019
6	24	2	115	5.347	-14.562	6.542	-16.314	29.666	-29.445
7	48	0.5	406	5.522	-14.842	6.666	-16.477	28.660	-29.146
8	48	1	115	5.776	-14.842	6.877	-16.748	29.091	-29.275
9	48	2	208	6.407	-16.133	7.748	-17.784	32.269	-30.176
			<b>Ortalama</b>	5.088	-13.991	6.123	-15.634	26.543	-28.388

Tablo 3. Ana kesim için pürüzlülük kriterlerine ait tepki tablosu (Response table of roughness criteria for the main cutting)

Seviye	$R_a$			$R_q$			$R_z$		
	$T_{on}$	$T_S$	$T_{off}$	$T_{on}$	$T_S$	$T_{off}$	$T_{on}$	$T_S$	$T_{off}$
	Ortalama ( $\mu m$ )			Ortalama ( $\mu m$ )			Ortalama ( $\mu m$ )		
1	4.197	4.809	5.011	4.992	5.724	5.994	22.03	24.75	26.49
2	5.165	5.036	5.196	6.28	6.105	6.258	27.6	26.22	26.16
3	5.902	5.417	5.057	7.097	6.54	6.117	30.01	28.66	26.98
Fark	1.705	0.608	0.185	2.105	0.817	0.264	7.98	3.91	0.82
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3

Tablo 4. Ana kesim için pürüzlülük kriterlerine ait S/N oranları (S/N ratios of roughness criteria for the main cutting)

Seviye	$R_a$			$R_q$			$R_z$		
	$T_{on}$	$T_s$	$T_{off}$	$T_{on}$	$T_s$	$T_{off}$	$T_{on}$	$T_s$	$T_{off}$
	S/N (dB)			S/N (dB)			S/N (dB)		
1	-12.44	-13.55	-13.88	-13.95	-15.05	-15.42	-26.84	-27.79	-28.35
2	-14.26	-13.97	-14.18	-15.95	-15.64	-15.8	-28.79	-28.29	-28.23
3	-15.4	-14.59	-14.05	-17	-16.21	-15.69	-29.53	-29.08	-28.59
Fark	2.96	1.03	0.3	3.06	1.16	0.38	2.69	1.29	0.37
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3



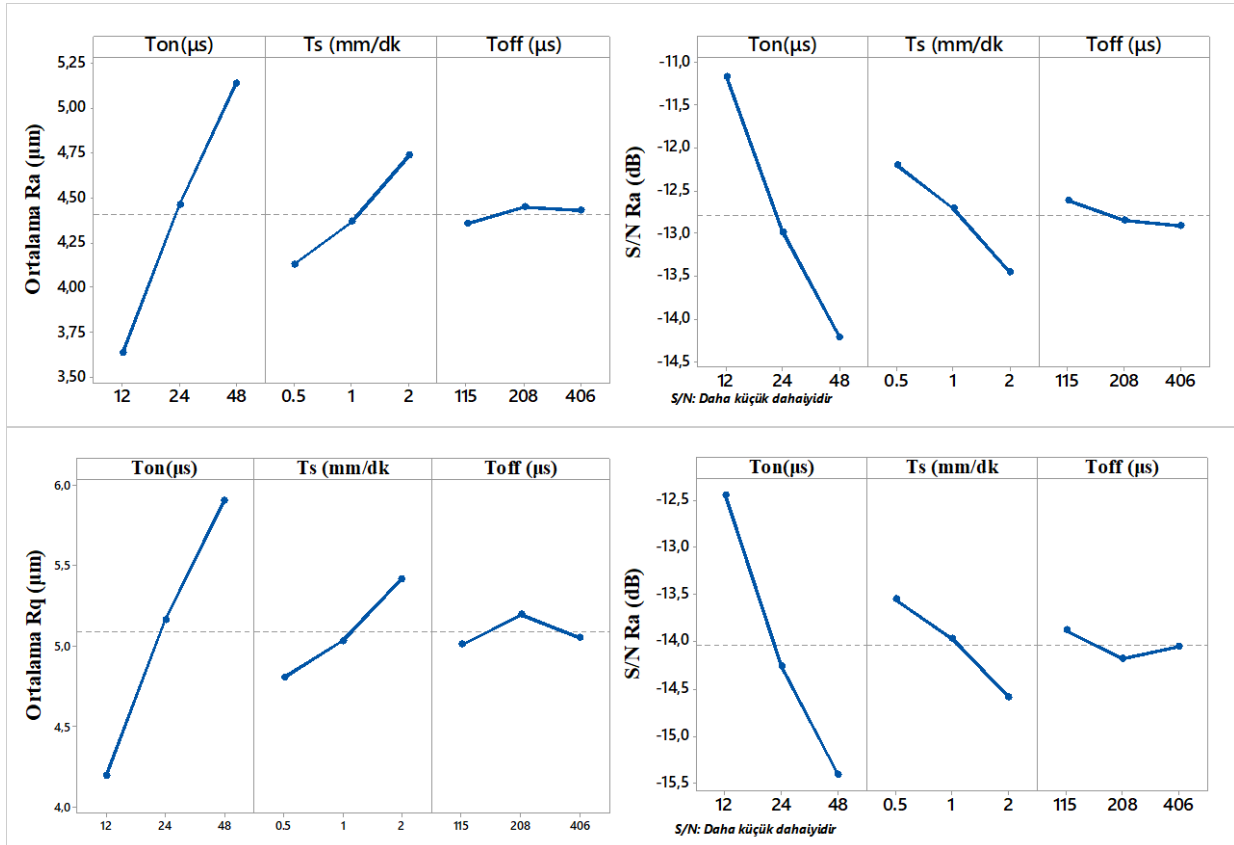
Şekil 3. Ana kesim için pürüzlülük kriterlerine ait ortalama ve S/N oranları grafikleri (Average and S/N ratio graphs of roughness criteria for the main cut)

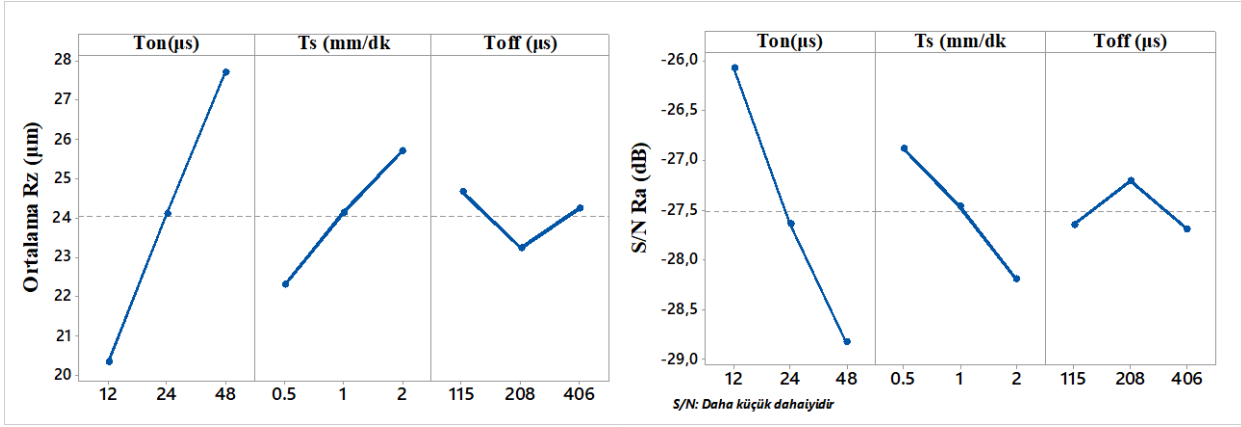
Ana kesim deneysel sonuçların analizinde,  $R_a$  ortalaması  $5,088 \mu m$ , S/N oranı ortalaması  $13,991$  dB olarak belirlenmiştir.  $R_q$  ortalama değeri  $6,123 \mu m$ ,  $R_q$  için S/N oranı  $-15,634$  dB olarak elde

edilmiştir. Maksimum pürüzlülük,  $R_z$  ortalaması 26,543  $\mu\text{m}$   $R_z$  için ortalama S/N oranı -28,388 dB olarak hesaplanmıştır.  $T_{on}$ ,  $T_s$  ve  $T_{off}$  faktörlerinin  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değerlerine etkisi, S/N oranı tepki tablosu yardımıyla belirlenmiştir (Tablo 3 ve 4). Optimum seviyeler, dikey dizideki tüm faktör kombinasyonlarına ait hesaplanan ortalama değerler ve S/N oranları analiz edilerek bulunmuştur. Ayrıca, kontrol faktörlerinin  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değerlerine etkisi Şekil 3'te gösterilmiştir.  $R_a$  ve  $R_q$  pürüzlülük kriterleri için optimum faktör seviyeleri,  $T_{on1}$ ,  $T_{s2}$ ,  $T_{off1}$  olarak ve  $R_z$  için  $T_{on1}$ ,  $T_{s1}$ ,  $T_{off2}$  olarak bulunmuştur.  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  için faktörlerin optimum seviyeleri; düşük vurum süresi (12  $\mu\text{s}$ ), düşük tabla ilerleme (0,5 mm/dk) ve orta vurum bekleme süresi (208  $\mu\text{s}$ ) olarak bulunmuştur.

Tablo 5. Son kesim için deney sonuçları ve S/N oranları (Experiment results and S/N ratio for trim cut)

Deney no	$T_{on}$	$T_s$	$T_{off}$	$R_a$	S/N $R_a$	$R_q$	S/N $R_q$	$R_z$	S/N $R_z$
	$\mu\text{s}$	mm/dk	$\mu\text{s}$	( $\mu\text{m}$ )	(dB)	( $\mu\text{m}$ )	(dB)	( $\mu\text{m}$ )	(dB)
1	12	0.5	115	<b>3.216</b>	-10.146	<b>4.083</b>	-12.220	<b>18.146</b>	-25.176
2	12	1	208	3.590	-11.102	4.118	-12.294	18.369	-25.282
3	12	2	406	4.098	-12.251	5.333	-14.539	24.436	-27.761
4	24	0.5	208	4.339	-12.748	5.206	-14.330	23.794	-27.529
5	24	1	406	4.349	-12.768	5.321	-14.520	23.354	-27.367
6	24	2	115	4.693	-13.429	5.716	-15.142	25.162	-28.015
7	48	0.5	406	4.839	-13.695	5.820	-15,298	24,916	-27,930
8	48	1	115	5.157	-14.248	6.414	-16.143	30.664	-29.733
9	48	2	208	5.420	-14.680	6.457	-16.201	27.527	-28.795
			<b>Ortalama</b>	4.411	-12.785	5.385	-14.520	24.040	-27.509





Şekil 4. Son kesi için pürüzlülük kriterlerine ait ortalama ve S/N oranları grafikleri (Average and S/N ratio graphs of roughness criteria for the trim cut)

Tablo 6. Son kesim için pürüzlülük kriterlerine ait tepki tablosu (Response table of roughness criteria for trim cut)

Seviye	R <sub>a</sub>			R <sub>q</sub>			R <sub>z</sub>		
	T <sub>on</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>off</sub>	T <sub>on</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>off</sub>	T <sub>on</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>off</sub>
	Ortalama (µm)			Ortalama (µm)			Ortalama (µm)		
1	3.635	4.131	4.355	4.511	5.036	5.404	20.32	22.29	24.66
2	4.46	4.365	4.45	5.414	5.284	5.26	24.1	24.13	23.23
3	5.139	4.737	4.429	6.23	5.835	5.491	27.7	25.71	24.24
Fark	1.504	0.606	0.094	1.719	0.799	0.231	7.9	3.42	1.43
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3

Tablo 7. Son kesim için pürüzlülük kriterlerine ait S/N (S/N of roughness criteria for trim cut)

Seviye	R <sub>a</sub>			R <sub>q</sub>			R <sub>z</sub>		
	T <sub>on</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>off</sub>	T <sub>on</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>off</sub>	T <sub>on</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>off</sub>
	S/N Oranı (dB)			S/N Oranı (dB)			S/N Oranı (dB)		
1	-11.17	-12.2	-12.61	-13.02	-13.95	-14.5	-26.07	-26.88	-27.64
2	-12.98	-12.71	-12.84	-14.66	-14.32	-14.27	-27.64	-27.46	-27.2
3	-14.21	-13.45	-12.9	-15.88	-15.29	-14.79	-28.82	-28.19	-27.69
Fark	3.04	1.26	0.3	2.86	1.34	0.51	2.75	1.31	0.48
Sıralama	1	2	3	1	2	3	1	2	3

Son kesim deneysel sonuçların analizinde, R<sub>a</sub> ortalaması 4,411 µm S/N oranı ortalaması -12.785 dB olarak belirlenmiştir. R<sub>q</sub> ortalama değeri 5,385 µm, R<sub>q</sub> için S/N oranı -14.520 dB olarak elde edilmiştir. Maksimum pürüzlülük, R<sub>z</sub> ortalaması 24,080 µm, R<sub>z</sub> için ortalama S/N oranı -27.509 dB olarak hesaplanmıştır. T<sub>on</sub>, T<sub>s</sub> ve T<sub>off</sub> faktörlerinin yüzey pürüzlülük kriterlerine etkisi, S/N oranı tepki tablosu yardımıyla belirlenmiştir (Tablo 6 ve 7). Ek olarak, kontrol faktörlerinin R<sub>a</sub>, R<sub>q</sub> ve R<sub>z</sub> değerlerine etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. R<sub>a</sub> pürüzlülük kriterleri için optimum faktör düzeyleri, T<sub>on1</sub>, T<sub>s1</sub>, T<sub>off1</sub> olarak, R<sub>q</sub> için; T<sub>on1</sub>, T<sub>s1</sub>, T<sub>off3</sub> olarak ve R<sub>z</sub> için T<sub>on1</sub>, T<sub>s1</sub>, T<sub>off2</sub> olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, ana kesimde olduğu gibi R<sub>a</sub>, R<sub>q</sub> ve R<sub>z</sub> için optimum seviyeler; düşük vurum süresi (12 µs), düşük tabla ilerleme (0,5 mm/dk) ve orta vurum bekleme süresi (208 µs) olarak bulunmuştur [23, 24].

Bu çalışmada, ana kesim ve son kesim işlemlerinde ölçülen  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  için optimum faktör seviyeleri en düşük vurum süresi ve tabla ilerlemesi ile orta vurum bekleme süresi olarak bulunmuştur (Tablo 2 ve 5). Bu parametreler için ana kesim ve son kesim işlemlerinde en küçük  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değerleri 1. deneyde, en yüksek değerler ise 9. deneyde bulunmuştur. Ana ve son kesim işlemleri sonucunda oluşan yüksek yüzey pürüzlülük değerleri iki sebebe atfedilmektedir. Birincisi, deşarj sırasında oluşan kıvılcımın işlenen malzemeyi eritmesi ve/veya buharlaştırması sırasında ortaya çıkan döküntülerin bir kısmının tekrar katı bir tabaka oluşturduğu ve bu yüzden yüzey pürüzlülüğünün artmasıdır [24]. İkincisi, iş parçanın işlenmesi sırasında kıvılcımlar sayesinde oluşan erimiş parçaların dielektrik sıvı tarafından tam olarak uzaklaştırılmamasıdır.

### 3.2. Varyans Analizi (Variance analysis)

Tel erozyon tezgâhında SAE 1080 çeliğinin kesilmesi işlemi için seçilen kesme parametrelerinin  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  pürüzlülük kriterlerine etkilerini tespit edebilmek için ANOVA kullanılmıştır. ANOVA, %95 güvenirlilik seviyesi ( $P < 0.05$ ) uygulanarak yapılmış olup, seçilen faktörlerin pürüzlülük kriterleri üzerindeki etki yüzdeleri tespit edilmiştir. Bu analizler Minitab 19 yazılımında gerçekleştirilmiştir. ANOVA tablosunda, serbestlik derecesi (DoF), kareler toplamı (SS), kareler ortalaması (MS), anlamlılık düzeyi (P) ve katkı oranı (%) gösterilmiştir. Ana kesim ve son kesim için pürüzlülük kriterlerine ait ANOVA sonuçları Tablo 8 ve 9’da verilmiştir.

Tablo 8. Ana kesim için ANOVA sonuçları (ANOVA results for main cut)

Faktör	DoF	SS	MS	F	P	(%)	
$R_a(\mu\text{m})$	$T_{on}$	2	4.38722	2.19361	153.41	0.006*	87.09*
	$t_s$	2	0.56635	0.28318	19.8	0.048*	11.24*
	$T_{off}$	2	0.05566	0.02783	1.95	0.339	1.10
	Artık hata	2	0.0286	0.0143			0.57
	Toplam	8	5.03783				100.00
S= 0.119 $R^2 = \% 99.43$ $R^2(\text{adj}) = \% 97.73$							
$R_q(\mu\text{m})$	$T_{on}$	2	6.7564	3.3782	143.93	0.007*	85.42*
	$t_s$	2	1.00165	0.50082	21.34	0.045*	12.66*
	$T_{off}$	2	0.10488	0.05244	2.23	0.309	1.33
	Artık hata	2	0.04694	0.02347			0.59
	Toplam	8	7.90987				100.00
S= 0.153 $R^2 = \% 99.41$ $R^2(\text{adj}) = \% 97.63$							
$R_z(\mu\text{m})$	$T_{on}$	2	100.56	50.28	59.13	0.017*	79.37*
	$t_s$	2	23.416	11.7079	13.77	0.068	18.48
	$T_{off}$	2	1.24	0.512	0.6	0.624	0.81
	Artık hata	2	1.701	0.8504			1.34
	Toplam	8	126.701				100.00
S= 0.922 $R^2 = \% 98.66$ $R^2(\text{adj}) = \% 94.63$							

Tablo 9. Son kesim için ANOVA sonuçları (ANOVA results for trim cut)

Faktör	DoF	SS	MS	F	P	(%)
$T_{on}$	2	3.40388	1.70194	50.02	0.02*	84.12*
$T_S$	2	0.55972	0.27986	8.23	0.108	1.83
$R_a(\mu m)$ $T_{off}$	2	0.01472	0.00736	0.22	0.822	0.36
Artık hata	2	0.06805	0.03402			1.68
Toplam	8	4.04637				100.00
S= 0.184 $R^2 = \% 98.32$ $R^2 (adj) = \% 93.27$						
$T_{on}$	2	4.43623	2.21811	13.66	0.068	75.88
$T_S$	2	1.00351	0.50175	3.09	0.244	17.17
$R_q(\mu m)$ $T_{off}$	2	0.08167	0.04083	0.25	0.799	1.40
Artık hata	2	0.32475	0.16237			5.55
Toplam	8	5.84614				100.00
S= 0.402 $R^2 = \% 94.45$ $R^2 (adj) = \% 77.78$						
$T_{on}$	2	81.832	4.0916	3.56	0.219	65.13
$T_S$	2	17.61	8.805	0.77	0.566	14.02
$R_z(\mu m)$ $T_{off}$	2	3.226	1.613	0.14	0.877	2.57
Artık hata	2	22.982	11.491			18.29
Toplam	8	125.65				100.00
S= 3.388 $R^2 = \% 81.71$ $R^2 (adj) = \% 26.84$						

Tablo 8’de verildiği gibi, ana kesimde  $T_{on}$ ,  $T_S$  ve  $T_{off}$  faktörlerinin  $R_a$  değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %87.09, %11.24 ve %1.10;  $R_q$  değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %85.42, %12.66 ve %0.59 ve  $R_z$  değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %79.37, %18.48 ve %01.34 olarak bulunmuştur. Son kesim için  $T_{on}$ ,  $T_S$  ve  $T_{off}$  faktörlerinin  $R_a$  değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %84.12, %13.83 ve %1.68;  $R_q$  değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %75.88, %17.17 ve %1.40 ve  $R_z$  değerine olan katkı yüzdeleri sırasıyla %65.13, %14.02 ve %2.57 olarak bulunmuştur (Tablo 9). Analiz sonuçları,  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  değişiminde önemli faktörlerin vuru süresi ve tabla ilerleme hızı olduğunu göstermektedir. Vurum bekleme süresinin pürüzlülük kriterleri için istatistiksel olarak mühim olmadığı belirlenmiştir ( $P>0.05$ ).

Yüzey pürüzlülüğü değişimleri incelendiğinde vurum süresi ve tabla ilerleme değerleri arttıkça yüzey pürüzlülüğünde kötüleşme olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün vurum süresinin tepe akımı ve tabla ilerleme hızından büyük oranda etkilendiği ve aynı zamanda vurum süresinin yüzey kalitesini etkileyen en önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalar da bunu doğrulamaktadır [14-20]. En iyi yüzey pürüzlülüğü 12  $\mu s$  vurum süresi, 0.5 mm/dk ilerleme hızı ve 115  $\mu s$  vurum bekleme süresi kullanılarak yapılan deneyde elde edilmiştir.

SAE 1080 çeliğinin çoklu kesim tekniği uygulanarak tel erozyonla kesilmesinde son kesim sonucunda yüzey pürüzlülük kriterleri ( $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$ ) değişimleri değerlendirilmiştir. Ana kesim ve son kesim için yüzey pürüzlülüğü açısından optimum kesme parametreleri aynı seviyelerde bulunmuştur. Sonuç olarak, ana kesime göre  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  için sırasıyla ortalama % 21.5, %10.5 ve %12.5’lik bir iyileşme elde edilmiştir. Bu sonuç, çoklu kesimin yüzey kalitesi açısından tel erozyonla işlemede endüstriyel olarak kullanılması gerektiğini göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, SAE 1080 çeliğinin tel erozyon ile işlenmesinde, vurum süresi, tabla ilerleme hızı ve vurum bekleme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri çoklu kesim tekniği uygulanarak



araştırılmıştır. Taguchi deney tasarımı ve optimizasyon yöntemi ile yapılan araştırmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yüzey pürüzlülük kriterleri ( $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$ ) açısından vurum süresi ve ilerleme hızı arttıkça pürüzlülük değerlerinde artış gözlenirken, vurum bekleme süresi değişiminde anlamlı bir etki görülmemiştir.
- En düşük yüzey pürüzlülüğü, 12  $\mu$ s vurum süresi, 0.5 mm/dk ilerleme hızı ve 115  $\mu$ s bekleme süresi parametrelerinde elde edilmiştir.
- Varyans analizlerine göre, ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) üzerinde en etkin kesme parametresi ana kesim ve son kesimde sırasıyla %87.09 ve %84.12 oranla vurum süresi olduğu anlaşılmıştır.
- Son kesim sonucunda,  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$  için sırasıyla % 21.5, %10.5 ve %12.5'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bu bağlamda, tel erozyonla kesmede daha iyi bir yüzey kalitesine ulaşılabilmesi için çoklu kesimin uygulanması gerektiği anlaşılmıştır.
- Tel erozyonla işlemede çoklu kesim uygulamasında, dielektrik sıvı basıncı ve son kesim derinliği değiştirilerek yüzey kalitesi değişimleri araştırılabilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A.S.S. Balan, A. Giridharan, A progress review in wire electrical discharge machining process, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 14(2): 4097-4124, 2017.
2. K.T. Chiang, F.P. Chang, Optimization of the WEDM process of particle-reinforced material with multiple performance characteristics using grey relational analysis, Journal of Materials Processing Technology, 180: 96–101, 2006.
3. K. Ukey, A.R. Sahu, S.S. Gajghate, A.K. Behera, C. Limbadri, H. Majumder, Wire electrical discharge machining (WEDM) review on current optimization research trends, Materials Today: Proceedings, 2023
4. R. Vijayakumar, N. Srirangarajulu, M. Santhanakumar, R. Adalarasan, Investigation in  $\mu$ -WEDM of Inconel 625 superalloy using RSM-CCD technique, Materials and Manufacturing Processes, 38(4): 449–460, 2023.
5. A. Johny, C. Thiagarajan, Investigation of surface integrity and it's optimization on pure titanium using molybdenum wire by reciprocated travelling WEDM A review, Materials Today: Proceedings 33: 2581–2584, 2020.
6. T. Jadam, S. Datta, M. Masanta, Study of surface integrity and machining performance during main/rough cut and trim/finish cut mode of WEDM on Ti–6Al–4V: effects of wire material, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41: 151, 2019.
7. M. Rehan, S.A. Khan, R. Naveed, M. Usman, S. Anwar, A.Y. AlFaify, C.I. Pruncu, L. Lamberti, Experimental investigation of the influence of wire offset and composition on complex profile WEDM of Ti6Al4V using trim-pass strategy, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 127: 1209–1224, 2023.
8. M. Usman, K. Ishfaq, M. Rehan, A. Raza, J. Mumtaz, An in-depth evaluation of surface characteristics and key machining responses in WEDM of aerospace alloy under varying electric discharge environments, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 124: 2437–2449, 2023.
9. A. Goswami, J. Kumar, Trim cut machining and surface integrity analysis of Nimonic 80A alloy using wire cut EDM, Engineering Science and Technology, an International Journal, 20: 175–186, 2017.
10. K.K. Jangra, V. Kumar, V. Kumar, An experimental and comparative study on rough and trim cutting operation in WEDM of hard to machine materials, Procedia Materials Science, 5: 1603 –1612, 2014.
11. P. Sharma, D. Chakradhar, S. Narendranath, Precision manufacturing of turbine wheel slots by trim-offset approach of WEDM, Precision Engineering, 71: 293–303, 2021.
12. V.K. Rohilla, R. Goyal, A. Kumar, Y.K. Singla, N. Sharma, Surface integrity analysis of surfaces of nickel-based alloys machined with distilled water and aluminium powder-mixed dielectric fluid after WEDM, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116: 2467–2472, 2021.
13. T. Bergsa, M. Olivier, A. Gommeringer, F. Kern, A. Klink, Surface integrity analysis of ceramics machined by wire EDM using different trim cut technologies, Procedia CIRP, 87: 251–256, 2020.

14. V. Singh, K. Kumar, P. Katyal, Experimental investigation on surface integrity and wear behavior of Ti-6Al-7Nb alloy under rough and trim cut modes of wire electrical discharge machining, *JMEPEG*, 30: 66–76, 2021.
15. L. Li, Y.B. Guo, X.T. Wei, W. Li, Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy, *Procedia CIRP*, 6: 220-225, 2013.
16. S. P. Arikatla, K. T. Mannan, A. Krishnaiah, Surface integrity characteristics in wire electrical discharge machining of titanium alloy during main cut and trim cuts, *Materials Today: Proceedings*, 4: 1500–1509, 2017.
17. J.F. Liu, L. Li, Y.B. Guo, Surface integrity evolution from main cut mode to finish trim cutmode in W-EDM of shape memory alloy, *Applied Surface Science*, 308: 253–260, 2014.
18. L. Li, X.T. Wei, Z.Y. Li, Surface integrity evolution and machining efficiency analysis of W-EDM of nickel-based alloy, *Applied Surface Science*, 313: 138–143, 2014.
19. C. Cao, X. Zhang, X. Zha, C. Dong, Surface integrity of tool steels multi-cut by wire electrical discharge machining, *Procedia Engineering*, 81: 1945–1951, 2014.
20. G. Selvakumar, K. Bravilin Jiju, S. Sarkar, S. Mitra, *Int J Adv Manuf Technol*, 83: 791–803, 2016.
21. V. Kumar, V. Kumar, K.K. Jangra, An experimental investigation and statistical modelling for trim cutting operation in WEDM of Nimonic-90, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6: 351–364, 2015.
22. V. Kumara, K.K. Jangra, V. Kumar, An experimental study on trim cutting operation using metal powder mixed dielectric in WEDM of Nimonic-90, *International Journal of Industrial Engineering Computations* 7: 135–146, 2016.
23. İ. Demir, T. Kıvak, Ş. Şirin, AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezelenmesinde farklı surfaktan katkılı CuO nanoakışkanların performans değerlendirmesi, *Manufacturing Technologies and Applications*, 3(2): 9-21, 2022.
24. M. Altın Karataş, Inconel 718'in tel erozyon ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çok kriterli optimizasyonu, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(4): 516-532, 2022.

## Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 Alüminyum Alaşımlı Sacların Mekanik Özellikler Yönünden İncelenmesi

Çetin Batuk<sup>1,\*</sup> , Hüseyin Demirtaş<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

*Alınma:* 21.11.2023

*Kabul:* 19.12.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Sürtünme Karıştırma

Kaynak

SKK

AA6061-T6

### ÖZET

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), farklı formlarda tasarlanmış uç ve omuza sahip olan takımın alın, bindirme veya farklı pozisyonlarda yerleştirilen parçaların boyunca dönerek ilerlediği bir kaynak yöntemidir. Aynı zamanda kaynak bölgesinde iyi mekanik özellikler sunan katı hal birleştirme tekniğidir. Önemli avantajlarından dolayı SKK birleştirme yöntemi son yıllarda gelişmekte olup geliştirme, araştırma ve kullanılması sürekli artış göstermektedir. Diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde sıcak çatlama, porozite ve çarpılma gibi problemler yaşanan çeşitli alüminyum alaşım malzemelerde bu birleştirme yönteminin artarak kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada savunma ve havacılık sanayinde sıklıkla kullanılan AA6061-T6 sacların (0.5mm-6mm) SKK ile alın birleştirmeleri çekme dayanımı yönünden incelenmiştir. Bu amaçla 17 farklı çalışma verisi çekme mukavemetleri yönünden incelenmiş ve istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmalar neticesinde birleştirme mukavemetlerinin kullanılan sac mukavemetlerine oranla %30-90 aralığında dağılmakla birlikte medyan değerlerinin %60-70 aralığında toplandığı tespit edilmiştir. Çalışmalarda en sık kullanılan 6 mm saclarda ise ortalama mukavemetlerin %75 civarında olduğu belirlenmiştir. Birleştirmelerde tasarımın ve takım geometrisinin en önemli parametreler olarak öne çıktığı görülmüştür.

## Investigation of Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy Sheets Welded by Friction Stir Welding

### ARTICLE INFO

*Received:* 21.11.2023

*Accepted:* 19.12.2023

#### Keywords:

Friction Stir

Welding

FSW

AA6061-T6

### ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is a welding method in which a tool with a tip and shoulder designed in different forms rotates along the parts placed butt, lap or in different positions. It is also a solid-state joining technique that offers good mechanical properties in the weld area. Due to its significant advantages, the FSW combining method has been developing in recent years, and its development, research and use are constantly increasing. It has been observed that this joining method is increasingly used in various aluminium alloy materials that have problems such as hot cracking, porosity and distortion when joining with other welding methods. In this study, butt joints of AA6061-T6 sheets (0.5mm-6mm), which are frequently used in the defence and aerospace industry, were examined in terms of tensile strength. For this purpose, 17 different data sources were examined in terms of tensile strength and evaluated statistically. As a result of the studies, it was determined that the joint strengths were distributed in the range of 30-90% compared to the sheet strengths used, but the median values were collected in the range of 60-70%. It was determined that the average strength of 6 mm sheets, which were most frequently used in the studies, was around 75%. It has been observed that design and tool geometry are the most important parameters in joints.

\*Sorumlu yazar, e-posta: cetin.batuk@tubitak.gov.tr

To cite this article: Ç. Batuk, H. Demirtaş, Mekanik Özellikler Yönünden Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 Alüminyum Alaşım Sacların İncelenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3), 167-178, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1393930>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İmalat teknolojisinde iki veya daha fazla parçanın birleştirilmesi için en yaygın kullanılan yöntem kaynaklı birleştirmelerdir. Bu kaynak yöntemlerinden biri de sürtünme karıştırma kaynağı (SKK)'dır. SKK, 1991 yılında Birleşik Krallık Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) katı hal birleştirme tekniği olarak geliştirilmiştir. Başlangıçta özellikle sıcak çatlama, porozite ve çarpılma olmaksızın, ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor olan alüminyum alaşımları için geliştirilmiştir [1]. Günümüzde, birçok araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılan ve pek çok sektörde kullanım alanına sahip olan bir kaynak yöntemi haline gelmiştir. Ayrıca yirmi yıllık gelişim ile alüminyum alaşımlarını içeren savunma ve havacılık uygulamalarında uygulanabilir ve önemli bir üretim yöntemi haline gelmiştir [2–6]. SKK'nın temel yapısı oldukça basittir. Farklı formlarda tasarlanmış uç ve omuzla sahip olan takımın alın, bindirme veya farklı tiplerde yerleştirilen parçaların boyunca dönerek ilerlediği bir kaynak yöntemidir. Birleştirilecek parçalar kaynak yapılacak tezgâhta uygun bir fikstür ile sıkıca sabitlenir. Omuz ve pimden oluşan takım kendi eksenine etrafında döner ve tanımlanmış bir kuvvetle iki iş parçası arasındaki bağlantı noktasına götürülür. Pim ve omuzun formu ve dönme hareketi sayesinde sürtünmeden kaynaklı ısı oluşur. Dönen takım kaynak boyunca belirli bir ilerleme kuvveti ile ilerletilir. Plastik deformasyona uğrayan malzemelerin karıştırılması ile sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleşir. Kaynak işlemi sırasında malzeme yüksek sıcaklıkta yoğun plastik deformasyona uğrar ve bunun sonucunda ince yapıyı yeniden kristalize taneler oluşur [7–10]. Bu ince mikro yapı sayesinde kaynak bölgesinde iyi mekanik özellikler elde edilir.

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak işlemi malzemelerin ergime sıcaklığının altında yapıldığından distorsiyon düşük ve mekanik özellikler yüksek olmaktadır [11–14]. Diğer kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında çok daha az enerji tüketilir. Düşük enerji tüketimi, koruyucu gaz ve ilave tel kullanılmaması hem çevre dostluğu hem de ekonomiklik açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Kaynaklanacak parçaların sıkı sabitlenme gerekliliği, kaynak deliğinin kalması, kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgâhlara ihtiyaç duyulması, her malzemenin kaynağının mümkün olmaması, kaynak hızının bazı ergitme kaynaklarından düşük olması, kalın parçaların ters çevrilip arka tarafından da kaynak edilmesine ihtiyaç duyulması ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajlarının da olduğu görülmektedir [15–26]. Alın birleştirme, kenar birleştirme, T alın birleştirme, bindirme birleştirme, çoklu üst üste koyarak birleştirme, T üste koyarak birleştirme, dolgu birleştirme ve boru birleştirme olmak üzere birçok birleştirme tiplerinin uygulanabilmesi de yöntemin avantajlı yanı olarak karşımıza çıkmaktadır [15, 27, 28]. Yukarıda bahsedilen avantajlara bakıldığında SKK' daki gelişim ve yaygın kullanım gelecek yıllar için artarak devam edeceği rahatlıkla söylenebilir.

AA6XXX ve AA7XXX serisi alaşımlar otomotiv, havacılık ve uzay sanayiinde sıklıkla tercih edilen düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli malzemelerdir. Yaygın kullanılan AA 6061-T6 malzeme, çökeltmeyle sertleştirilmiş Al-Mg-Si içeren alüminyum alaşımıdır ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranının ve iyi korozyon direncinin gerekli olduğu yapıların imalatında yaygın olarak kullanılır [29]. Fakat korozyon direnci, yoğunluk ve dayanım oranı açısından yüksek kabiliyete sahip olmasına rağmen kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür. Geleneksel yöntemlerle kaynaklı birleştirmelerinin kolay yapılamamasından veya yapılsa bile büyük termal gerilmeler oluşmasından dolayı bu alaşımların kullanımında zorluklar yaşanmaktadır. Uygulamalara bakıldığında ve literatür incelendiğinde AA6061-T6 malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile iyi birleştirmeler elde edilebildiği ve birçok sanayi uygulamasında kullanılmaya başlandığı görülmektedir. AA6061-T6 alaşımlarının kaynağında geleneksel ergitme kaynak teknolojisi kullanıldığında, aşırı ısı girdisi nedeniyle çökeltelerin yeterince çözünmesine ve tanelerin kabalaşmasına neden olmakta, bu da bağlantı mukavemetinde önemli bir kayıpla sonuçlanmaktadır [30]. Bu nedenle AA6061-T6 alaşımlarının birleştirilmesine uygun bir kaynak teknolojisine ve iyi belirlenmiş işlem parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. SKK ile başarılı birleştirmeler yapılan bu levhalarda çeşitli parametrelerin kullanıldığı görülmektedir (Tablo 1). Bu çalışmada birleştirilen levhalar alüminyum AA6061-T6 olarak sabit tutulmuş ve SKK ile

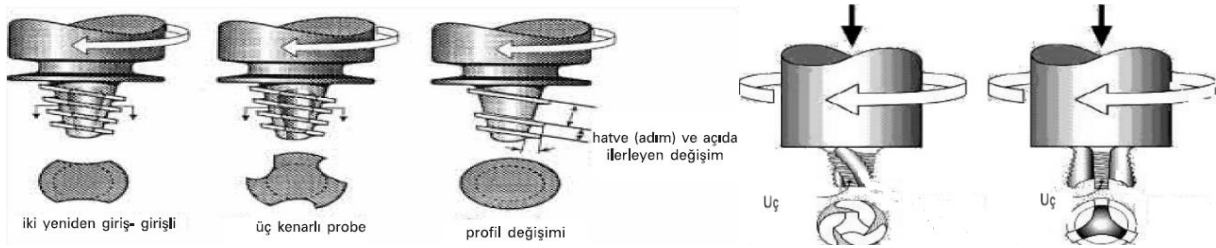
birleştirmeleri üzerine yapılan araştırmalar incelenerek kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkileri değerlendirilmiştir.

## 2. İŞLEM PARAMETRELERİ (PROCESS PARAMETERS)

Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi, termo-mekanik bir süreçtir ve bu sebeple geleneksel kaynak metodlarından farklı parametrelere bağlıdır [31–33]. Kaynak hızı, takım devri, omuz çapı ve takım yolu profili gibi işlem faktörlerinin değiştirilmesi yoluyla birçok çalışma kaynak kalitesini artırmaya yönelik yenilikçi yaklaşımı değerlendirmiştir [34]. İyi kaynak elde etmek için takım profili, dönme hızı ve takım hareketi gibi parametrelerinin optimizasyonu etkilidir [35]. Uygun olmayan parametreler ve kaynak prosesi nedeniyle katılma sırasında birçok kusur oluşabilmektedir [36–38]. SKK sürecinde etkili olan bu parametreler genel olarak takım geometrisi, kaynak parametreleri ve diğer parametreler olmak üzere üç grup altında toplanmaktadır.

### Takım geometrisi

Takımın pim ve omuz boyutları ile takımın eğim açısı takım geometrisinin ana değişkenleridir. Takım geometrisi süreç geliştirmenin en etkili yönüdür. Takım geometrisi malzeme akışında kritik bir rol oynar ve SKK'nın gerçekleştirilebileceği ilerleme hızını yönetir. Takımın lokal ısıtma ve malzeme karıştırma olmak üzere iki temel işlevi vardır. Takım, şematik olarak bir omuz ve bir pimden oluşur. Pim ve omuz ile iş parçası arasındaki sürtünme, ısınmanın ve SKK kaynak oluşumunun en büyük bileşenine neden olur. Isıtma ve karıştırma açısından pim ve omuzun boyutu ve formu önemlidir. Omuz aynı zamanda ısıtılan malzeme hacminin hapsedilmesini de sağlar. Takımın ikinci işlevi malzemeyi karıştırmak ve hareket ettirmektir. Mikro yapı ve özelliklerin tekdüzeliği ile proses yükleri takım tasarımı tarafından yönetilir. Genellikle içbükey bir omuz ve dişli silindirik pimler kullanılır. Takım geometrisinin metal akışı üzerindeki önemli etkisi göz önüne alındığında, malzeme akışı ile kaynak mikro yapısı arasındaki temel korelasyon, her takıma göre değişir. Takım tasarımı için sistematik bir çerçeve geliştirmek kritik bir ihtiyaçtır. Artan deneyim ve malzeme akışının anlaşılmasındaki bazı gelişmelerle birlikte takım geometrisi önemli ölçüde gelişmiştir. Takım üreticisi bazı firmalarda tasarladıkları özel SKK takımlarını ürün gamına eklemiştir. Şekil 1'de örnek bazı takım geometrileri görülmektedir.



Şekil 1. Çeşitli WhorlTM ve Triflute tasarımları (Various WhorlTM and Triflute designs) [39]

Malzeme akışını değiştirmek, karıştırmak ve proses yüklerini azaltmak için takımlara karmaşık özellikler eklenmiştir. Takım geometrisinin etkileri üzerine yapılan bir çalışmada, takım dönme hızı ve takım omuz çapının, mekanik özelliklerin yanı sıra korozyon direncini kontrol etmede en etkili parametreler olduğu bildirilmiştir [40].

### Kaynak parametreleri

SKK için saat yönünde veya saat yönünün tersine takım dönüş hızı ( $\omega$ , rpm) ve bağlantı hattı boyunca takım ilerleme hızı ( $v$ , mm/dak) olmak üzere iki kaynak parametresi oldukça önemlidir. Takımın dönmesi ve ilerlemesi, malzemenin dönen pim etrafında karıştırılmasına ve karıştırılan malzemeyi pimin önünden arkasına doğru hareket ettirerek kaynak işleminin oluşmasına neden olmaktadır. Daha yüksek takım dönüş hızı ve ilerleme uyumu ile artan sürtünmeli ısınma sayesinde

daha yüksek sıcaklık ve malzemenin daha yoğun karıştırılması sağlanır. Takım dönme ve ilerleme hareketlerine daha fazla odaklanması, mekanik alaşımlamada ve kaynağın diğer özelliklerinde önemli bir iyileşme sağlayabilir [41].

Takım dönüş hızı ve ilerleme hızına ek olarak bir diğer önemli proses parametresi iş parçası yüzeyine göre iş milinin veya takımın eğim açısıdır. Milin arka yöne doğru uygun bir eğimi, takım omuzunun karıştırılan malzemeyi pimin önünden arkasına verimli bir şekilde hareket ettirmesini sağlar. Ancak fazla verilecek açı, yeterli ısınma ve karıştırma olmadan malzemeyi arka tarafa hareket ettireceğinden iyi bir kaynak birleşimi olmamasına sebep olacaktır. Bu yüzden takıma verilecek açı uygun seçilmelidir.

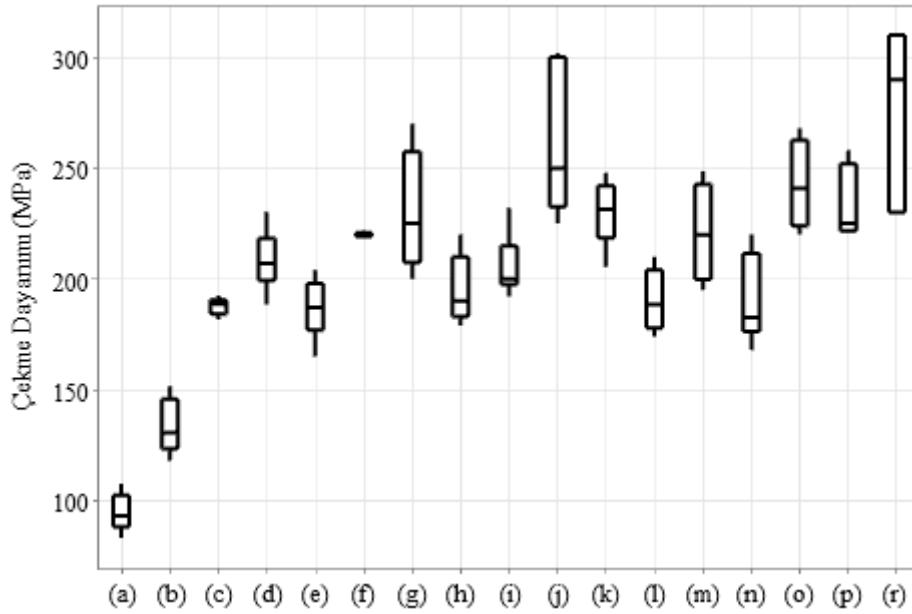
### **Diğer parametreler**

İş parçasının özellikleri, takım boyutu, iş parçası boyutu, takım malzemesi gibi parametreler SKK süreci için önem arz eden diğer parametreleri oluşturmaktadır [42]. Literatürde yukarıda belirtilen çoğu parametrenin belirlenmesi için çalışmalar bulunmaktadır [43-57]. Ancak bu çalışmada SKK için önemli olan bazı parametrelerin etkileri ele alınmıştır. Çalışma kapsamında farklı kalınlıklardaki AA6061-T6 sacların farklı parametreler kullanılarak SKK ile birleştirilmesi ile ilgili incelenen makalelerin kodları ve bazı temel parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. İncelenen çalışmalar ve bazı temel SKK parametreleri (Reviewed studies and some basic FSW parameters)

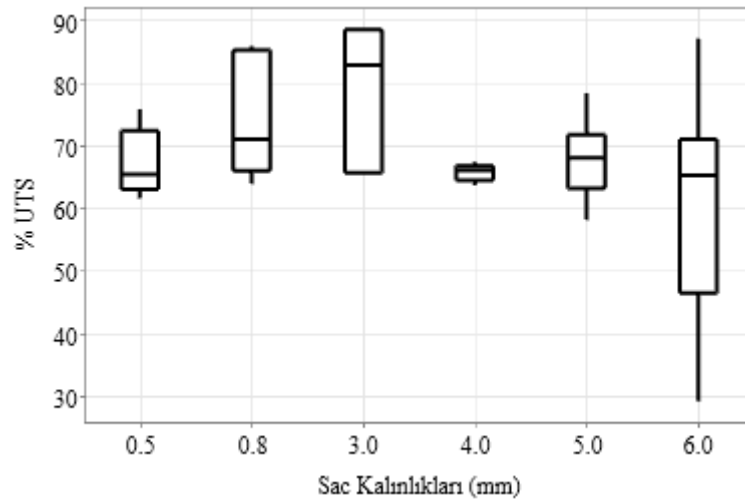
Makale kodu	Devir aralığı (rpm)	Kaynak hız aralığı (mm/dak)	Sac kalınlığı (mm)	Uç tipi
(a) [43]	800-1000	15-35	6	Silindirik
(b) [43]	800-1000	15-35	6	Kare
(c) [44]	450-710	20-63	6	Silindirik
(d) [45]	600-700	30-40	5	Yivli-Konik
(e) [46]	1200-1600	40-80	5	Silindirik
(f) [46]	1400	60	5	Silindirik
(g) [47]	1100	120	6	Yivli
(h) [48]	600-1400	300	0.5	Konik
(i) [49]	1000-1200	100-150	6	Silindirik
(j) [50]	2000-8000	300-1500	0.8	Yivli-Konik
(k) [51]	560-1800	50-650	9	Yivli
(l) [52]	900	78	2	Yivli
(m) [53]	900-1500	45-135	6	Kare
(n) [54]	1100	45-135	6	Yivli-Konik
(o) [55]	500-1400	120	6	
(p) [56]	750-1500	100-300	5	Yivli-Konik
(r) [57]	1100	125-760	3	Silindirik

Tablo 1’deki parametreler ile yapılan çalışmalarda kaynak kalitesi genel olarak çekme testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Nihayetinde oluşabilecek kaynak kusurları veya seçilen kötü kaynak parametreleri mekanik özellikleri olumsuz etkileyecektir. Fakat bu çalışmaların genelinden çekme mukavemetinin düşüş nedenini anlamak mümkün değildir. Bu nedenle bu konuya değinilmemiştir. Çalışmalarda belirlenen çekme dayanımları (UTS) her bir çalışmanın genelini ifade edecek şekilde box-plot grafiği olarak Şekil 2’de verilmiştir. Grafikte verilen kutucukların ortasından geçen medyan çizgilerinin konumlarına baktığımızda her bir çalışmada normal dağılım oluşmadığı görülmektedir. Bilindiği gibi parametrik testler normal dağılım varsayımını gerektiren testlerdir. Diğer yandan her bir çalışmada aynı malzeme kullanılmakla birlikte üretim parametreleri değişmektedir. Bu nedenle bu çalışmalar arasında ANOVA gibi analizler uygulanmamıştır.



Şekil 2. SKK kaynaklı sacların her bir çalışmada ölçülen çekme dayanımlarının dağılımı (Distribution of tensile strengths of FSW welded sheets measured in each study)

Şekil 2’deki dağılımlar incelendiğinde dayanımların büyük çoğunluğu 170-250MPa aralığında dağılmaktadır. Verilere ayrıca Grubbs testi uygulanarak aykırı değer (outlier) incelemesi yapılmış ve %5 seviyesinde aykırı değer olmadığı belirlenmiştir. Bu deneylerde aynı malzeme olmakla birlikte farklı kalınlıklardaki saclar da kullanılmıştır. Bu sacların kalınlığına bağlı olarak mukavemetlerinin de değiştiği a ve e ile j ve r çalışmalarında kullanılan sacların orijinal mukavemetlerinde görülmektedir [43, 50, 52, 57]. Bu çalışmalarda j ve r gibi ince saclar da daha yüksek çekme dayanımı ölçüldüğü görülmektedir. Bu nedenle kaynak sonrası sonuçları kıyaslamak için tüm numunelerin çekme dayanımları makalelerde kullanılan sacların işlemsiz çekme mukavemeti ile kıyaslanarak %UTS değerleri hesaplanıp Şekil 3’teki grafiklerde kullanılmıştır. İncelenen çalışmaların sac kalınlığına göre gruplandırılıp %UTS değeri değişimlerini gösteren box-plot grafiği Şekil 3’te verilmiştir.

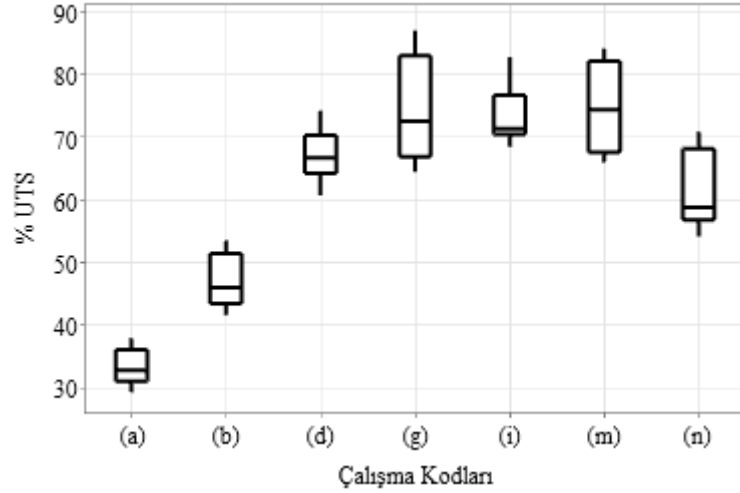


Şekil 3. SKK kaynaklı levhaların sac kalınlıklarına bağlı % UTS değerlerinin dağılımı (Distribution of UTS % values depending on sheet thickness of FSW welded plates)

Şekil 3’te verilen farklı sac kalınlıklarına göre yapılan birleştirme mukavemetleri incelendiğinde belirgin bir ayrışma görülmemekle birlikte deneylerde kullanılan sac kalınlığı 0.5 mm’den 3mm’ye doğru artarken arttığı, sonrasında ise artan sac kalınlığı ile azaldığı görülmektedir. Grafiklerde en

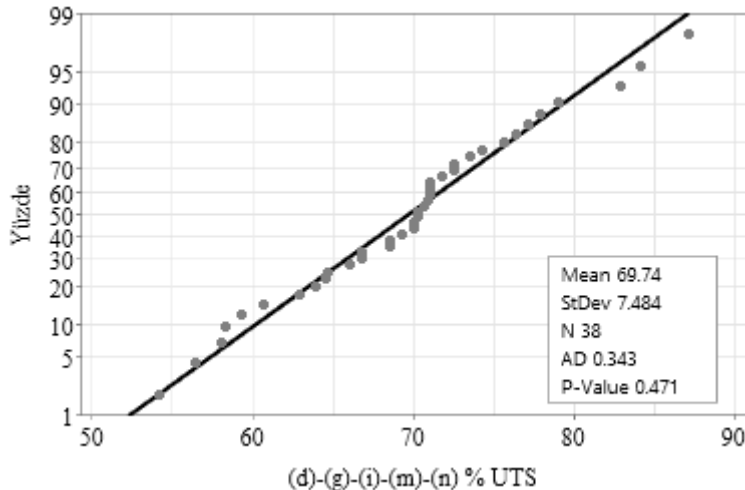


yüksek üçüncü çeyrek ve medyan değeri 3mm saclar ile yapılan çalışmalarda ölçülmüştür. Bununla birlikte 6 mm sac ile yapılan deneylerde ise en yüksek değer çizgisi 3 mm ile elde edilen değerlere oldukça yakındır. Fakat diğer yandan en düşük değer ve en düşük birinci çeyrek de belirgin şekilde 6mm sac kullanılan deneylerde belirlenmiştir. SKK çalışmalarında bu saclar arasında en yaygın sac kalınlığı olarak 6mm kullanılmaktadır. Hali ile bu incelemede de en fazla veri bu sac kalınlığından elde edilmiştir. Bu çalışmalarda kullanılan parametre farklılıkları ve veri çeşitliliğine bağlı olarak geniş bir dağılım oluşmuştur. 6mm sac kullanılarak yapılan çalışmaların ayrı olarak değerlendirilmesi için her bir çalışma ayrılarak Şekil 4'teki grafikte verilmiştir.



Şekil 4. SKK kaynaklı 6 mm sac levhaların her bir çalışmadaki % UTS dağılımları (UTS % distributions of FSW welded 6 mm sheet metals in each study)

Şekil 4'te verilen grafik incelendiğinde birleştirmelerin çekme mukavemetleri (a) çalışmasının birinci çeyreğinden (88 MPa) (g) çalışmasının üçüncü çeyreğine kadar (257 MPa) geniş bir aralıkta dağılmaktadır. Bu değerler çalışmalarda kullanılan sacların çekme mukavemetinin %30'undan %85'ine kadar olan aralığa denk gelmektedir. Diğer yandan (a) ve (b) çalışmasında belirlenen çekme dayanımları diğer çalışmalardan belirgin şekilde ayrılmaktadır. Şekil 3'teki 6mm saclarda görülen büyük ayrışmanın da sebebi bu iki çalışmadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi 6mm sac mukavemetlerinde medyan değeri oldukça yukarılardadır. Bu iki çalışmanın verisi aynı makalede farklı parametreler ile yapılan üretimlerden elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra (a) ve (b) çalışmaları hariç tutularak diğer çalışmaların % UTS değerleri arasında önce Anderson-Darling (AD) normallik testi uygulanmıştır. Bu test normallikten sapmaları tespit etmek için tasarlanmış Minitab'daki üç genel normallik testinden biridir.



Şekil 5. (d)-(g)-(i)-(m)-(n) çalışmalarındaki % UTS değerlerinin normallik testi (Normality test of UTS % values in studies (d)-(g)-(i)-(m)-(n))

AD testi aslında bir hipotez testidir. Sıfır hipotezi (H0), verilerin normal dağıldığını, alternatif hipotez (H1) ise, verilerin normalden farklı olduğunu gösterir. Sıfır değerini reddedip reddetmeme konusundaki karar P değerine göre verilir. Anlam seviyesi ( $\alpha$ ) 0.05 olarak seçilirse, P değeri 0.05'ten küçükse H0 hipotezi reddedilir, 0.05'in üzerindeyse verilerin istatistiksel olarak normal dağılımdan farklı olmadığını belirtilebilir. Şekil 5'teki grafiğe ve P değerine baktığımızda verilerin normal dağıldığı anlaşılmaktadır.

Bu verilere tek yönlü (one-way) ANOVA (analysis of variance) analizi yapılmış ve sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Tek yönlü varyans analizi (ANOVA), üç veya daha fazla bağımsız (ilişkisiz) grubun ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Üç veya daha fazla popülasyon ortalamasının eşit olduğunu belirten sıfır hipotezi (H0) ve en az bir ortalamanın farklı olduğunu öne süren alternatif hipotezi (H1) test edilir.

Tablo 2. (d)-(g)-(i)-(m)-(n) çalışmalarındaki %UTS değerlerinin ANOVA analizi (ANOVA analysis of %UTS values in studies (d)-(g)-(i)-(m)-(n))

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-değeri	P-değeri
Faktör	4	1002	250.46	7.72	0.002
Hata	33	1070	32.43		
Toplam	37	2072			

Tabloda DF (degree of freedom) serbestlik derecesi, SS (sum of squares) kareler toplamı ve MS (Mean Square) ortalama kareyi ifade etmektedir. F değeri, faktörün ortalama karesinin (MS) hatanın ortalama karesine bölümüdür. P değeri, tüm ortalamaların benzer olduğuna ilişkin sıfır hipotezinin geçerliliğini değerlendirmek için kullanılır. Bu çalışmada P değeri 0.002'dir. Bu küçük p değeri ( $\alpha = 0.05$ ), ortalamaların hepsinin aynı olmadığını ve ortalamaların birbirinden önemli düzeyde ( $P < 0.0001$ ) farklı olduğu kanıtlamaktadır.

Ortalamaların farklı olduğunu belirledikten sonra gruplar arasındaki ortalama farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını hızlı bir şekilde belirlemek için gruplandırma bilgi tablosu kullanılır bu tabloda aynı harfi kullanmayan gruplar önemli ölçüde farklıdır. Tablo, seçtiğiniz karşılaştırma yöntemine bağlı olarak farklı grup çiftleri karşılaştırılır. Bu çalışmada farklılıkların hangi varyans gruplarından kaynaklandığını görmek için %95 güven aralığı ile Fisher LSD (least significant difference) çoklu karşılaştırma testi (post-hoc tests) uygulanmış ve elde edilen sonuç Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Fisher LSD metoduna göre gruplama bilgisi (Grouping information according to Fisher LSD method)

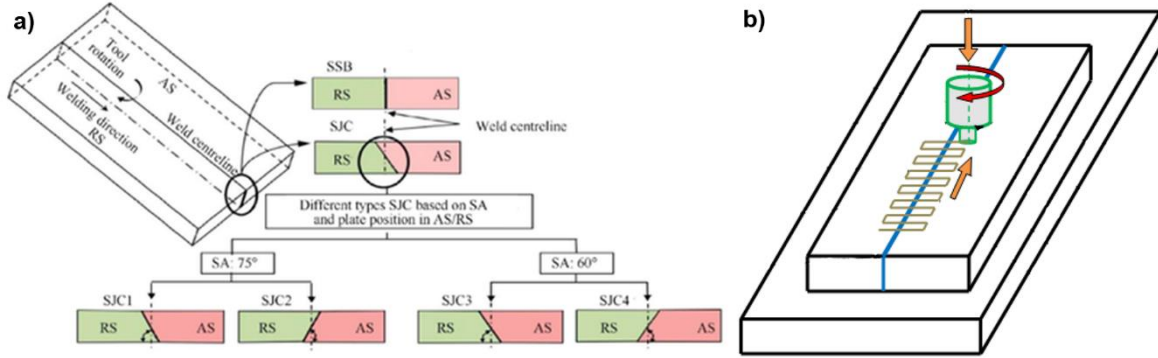
Faktör	N	Ortalama	Gruplama
(m)	4	74.79	A
(g)	5	74.52	A
(i)	12	73.45	A
(d)	9	67.40	B
(n)	8	61.29	C

Tablo 3, aynı harfte gruplanan faktörlerin ortalamaları arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Buna göre (m), (g) ve (i) çalışmalarında bulunan ortalamaların benzerlik göstererek diğerlerinden ayrıldığı görülmektedir. Bu üç çalışma aynı zamanda uygulanan metod ve kontrol edilen parametreler yönünden de farklılık göstermektedir. SKK ile ilgili yapılan çalışmalarda genel olarak uç tipi, devir ve ilerleme hızı analiz edilmektedir. Fakat bunların dışında uç boyutu, malzemesi, mekanik özellikleri gibi uca bağlı ve birleştirme pozisyonu, uç hareketleri, açıları, ısıtma ve soğutma ortamları gibi birçok parametre de etkili olmaktadır.

Yüksek çekme mukavemeti gösteren (g) çalışmasında uç devri 1100rpm olarak sabit tutulmuş ve Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi açılı bağlantılar yapılarak birleştirme denenmiştir. Bu sayede UTS değeri birleştirme uygulanmış orijinal malzemenin %87'sine (270 MPa) kadar çıkmıştır. Aynı parametrelerle klasik alın birleştirilmesinde ise UTS değeri sacın %72.5'si kadar olmuştur ve bu değer (g) çalışmasında elde edilen değerlerin ortalamasına (%74.5) yakındır. Sonuç olarak (g)

çalışması alın SKK birleştirmelerde Şekil 6(a)'daki gibi açılı ( $60^\circ$ - $75^\circ$ ) bir birleştirmenin daha iyi çekme mukavemeti sağladığını oraya koymuştur.

Tablo 3'te verilen A grubundaki (i) çalışmasında da SKK alın birleştirmesinde farklı bir yöntem kullanılmıştır. Bu çalışmada kaynak ucu Şekil 6(b)'de görüldüğü gibi sadece birleştirme eksenine paralel değil ona dik yönde de tekrarlı hareketler yaparak birleştirme işlemi yapılmıştır. Çalışmada, 1200 rpm devir ve 150 mm/dak ilerleme parametreleriyle Şekil 6(b)'deki modeli kullanarak 232MPa'lık çekme mukavemetine ulaşılmıştır. Bu değer deneyde kullanılan sac mukavemetinin %82.8'ine denk gelmektedir. Çalışmada bu tasarımın çekme mukavemetinde %10'luk bir artış sağladığı belirtilmiştir [49].



Şekil 6. a) Farklı açılarda eğik bağlantı tasarımı (Oblique connection design at different angles) [47], b) X-Y ekseninde hareketle birleştirme işlemi (Joining process with movement in the X-Y axis) [49]

A grubunda yer alan (m) çalışmasında ise diğer çalışmalardan farklı bir proses uygulanmış, birim devirde ilerleme miktarı (mm/rev) gibi farklı bir parametre kontrol edilerek en yüksek çekme mukavemetleri elde etmek için çalışmalar yürütülmüştür. Bu parametre, biriminden de anlaşılacağı üzere ucun devir ve ilerleme hızına bağlı olarak belirlenmektedir. Çalışmada 900-1500 rpm devir aralığında ve 0.75-2.25 mm/dak ilerleme hızı aralığında dört farklı daneme yapılmıştır. Çalışmada birim devirde ilerlemeye odaklanıldığı için tam faktöriyel bir deneme yapılmamıştır. Ayrıca aynı parametrelerin farklı devir/ilerleme kombinasyonları ile de elde edilebileceği gerçeği üzerinde durulmamıştır. Neticede birleştirilmiş sacda 248.5MPa gibi kullanılan sacın %84.1'ine denk gelen çekme mukavemeti elde edilmiştir [53]. Fakat parametrelerin belirsizliği ve diğer faktörlerin hesaba katılmaması neticesinde tekrarlanabilirliği zayıf görülmektedir.

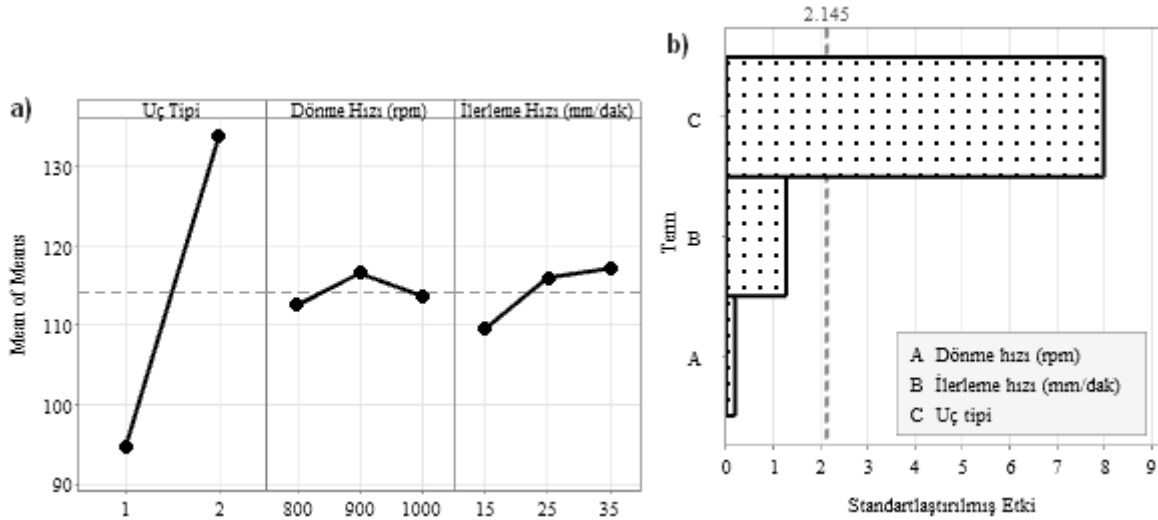
Yukarıda belirtildiği gibi Tablo 3'teki A grup çalışmalarında birbiri ile kıyaslanamayacak özgül parametreler kullanılmıştır. Bunların dışında Şekil 4'te verilen (a), (b) ve (d) çalışmalarında kıyaslanabilir benzer değerler kullanılmış; dönme hızı ve kaynak hızı değişken parametre olarak uygulanmıştır. Aynı şekildeki diğer çalışmada (n) ise kaynak hızı ve uç şekli parametre olarak seçilmiş ve farklı olarak uçta eğim açısı (tilt angle) kullanılmıştır. Sonraki kısımda bu çalışmalar ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizlerde çalışmalar kendi içinde değerlendirildiği için çekme mukavemeti (UTS) değerleri kullanılmıştır.

Analizde kullanılan (a) ve (b) verileri aynı üretim parametrelerinde farklı uç tipi kullanılarak elde edilmiş çekme mukavemetleridir. Bu nedenle iki veri seti birlikte değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde kare profilli takımın daha iyi sonuç verdiği 900 rpm dönme ve 25 mm/dak ilerleme hızında en iyi sonuç verdiği ve 151.6MPa çekme dayanımı ile deneyde kullanılan sacın %53.6 mukavemetine ulaşıldığı belirtilmiştir [43]. Çalışmada belirtilen sonuçlardan faydalanılarak en etkili parametrelerin tespiti için analiz edilmiştir. Bu çalışma için tam faktöriyel L18 ( $2^1, 3^2$ ) olarak tasarlanmış bir Taguchi analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda parametrelerin etkisi Tablo 4'te ve Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 4. Ortalamalara göre parametrelerin etkisi (Effect of parameters according to averages)

Level	Uç Tipi	Dönme Hızı (rpm)	İlerleme Hızı (mm/dak)
1	94.67	112.39	109.45
2	133.58	116.42	115.89
3		113.56	117.04
Delta	38.92	4.03	7.58
Rank	1	3	2

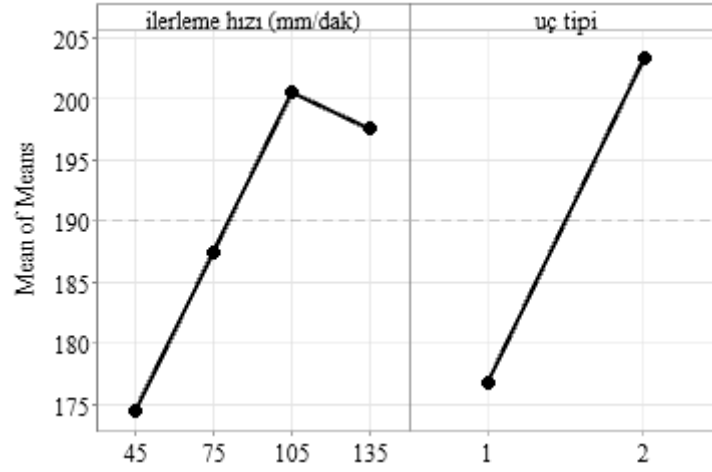
Taguchi analizinde çekme mukavemetine göre en yüksek daha iyi (larger is better) olarak belirlenmiştir. Buna göre yapılan sıralamaya göre Tablo 4'te görüldüğü gibi en yüksek etki (rank) uç tipinde ve en düşük etki de dönme hızında görülmüştür. Bu etki Şekil 7'de verilen grafiklerde de görülmektedir. Analizde kullanılan çalışmanın verilerine göre R kare (R-Sq) değeri %83.5 olarak belirlenmiştir. Bu durumda sonuçlar arasındaki ilişki çok güçlü olmamakla birlikte (%85 üstü genelde uygun) fikir vericidir. Yine Taguchi analizinde uygulanan ANOVA'ya göre uç tipi yüksek bir anlamlılık değerine ( $P < 0,0005$ ) sahiptir. Diğer iki parametrenin p değeri ise %5'in oldukça üzerindedir ve anlamlı bir fark oluşturmamışlardır. Diğer yandan değişkenlerin katkı oranlarına bakıldığında belirgin bir şekilde (%80.3) uç tipi olurken diğerlerinin katkısı düşüktür.



Şekil 7. a) Üretim parametrelerinin ortalamalar üzerine etkisi ve b) standartlaştırılmış etkinin preto grafiği (a) Effect of production parameters on averages and b) preto plot of standardized effect)

Analizde büyük daha iyidir (larger is better) seçildiğinde Şekil 7a'da görüldüğü gibi uç tipinde 2. seçenek, yani kare uç, belirgin bir şekilde çekme mukavemetini olumlu etkilemiştir. Bu durum, bu çalışmanın (a) ve (b) şeklinde gösterildiği Şekil 3'teki grafikte de görülmektedir ve (b) çekme mukavemeti verilerine ait box-plot belirgin şekilde (a) dan ayrılmıştır. Dönme hızında 900 rpm ve ilerleme hızında 35 mm/dak en iyi parametreler olarak görülmektedir.

Bu çalışmalarda görüldüğü gibi uç tipi en etkili parametre olurken, dönme hızı en etkisiz parametre olmuştur. Aynı kalınlık ve türdeki sacın kullanıldığı (n) çalışmasında ise devir 1000 rpm de sabit tutulmuş uç tipi ve ilerleme hızı değişken olarak kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde şu sonuçlar çıkmıştır. Analizde kullanılan çalışmanın verilerine göre R kare (R-Sq) değeri %86.5 olarak belirlenmiştir. ANOVA'ya göre uç tipi anlamlı bir değere ( $P=0,04$ ) sahipken ilerleme hızının P değeri 0.25 ile anlamlılık değerinin üzerinde çıkmıştır. Bu çalışma L8 kolonunda Taguchi metoduyla analiz edilmiş ve üretim parametrelerinin ortalamalar üzerine etkisi Şekil 8'de verildiği gibi bulunmuştur.



Şekil 8. Üretim parametrelerinin ortalamalar üzerine etkisi (Effect of production parameters on averages)

Çalışma analizinde yüksek olan iyidir olarak değerlendirildiğinden ilerleme hızı en iyi 105 mm/dak, karıştırıcı uç ise yivli konik (taper thread) olanda görülmektedir (Şekil 8). Ayrıca ilerleme hızının ortalamalara etkisi incelendiğinde 135 mm/dak hızda lineerliğin bozulduğu görülmektedir. Bu veri dışında ilerleme hızı da ortalamalar ile anlamlı bir ilişki çıkması muhtemeldir. Fakat sonuç olarak (a), (b) ve (n) çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde en etkili parametrenin uç tasarımı olduğu açıktır. İlerleme hızının bazı uç tipi ve dönme hızlarına bağlı olarak etkisi değişmektedir.

### 3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AA6061-T6 saclara uygulanan sürtünme karıştırma kaynağı sonrası birleştirilen parçaların çekme mukavemetleri yönünden inceleme yapılmıştır. Aynı türde sacın kullanıldığı 17 farklı çalışma incelenmiş (Şekil 2) ve şu sonuçlar çıkarılmıştır. Kaynaklanmamış ince sacın genel olarak çekme mukavemeti kalın saca (6mm) göre daha yüksektir ve kaynaklanma sonrası da mukavemeti daha yüksek çıkmaktadır. Fakat çekme mukavemetleri orijinal sacın mukavemeti ile kıyaslandığında sac kalınlığı belirgin bir faktör olmaktan çıkmıştır (Şekil 3). Çalışmalarda en yaygın kullanılan 6mm kalınlığındaki saclar ayrı olarak incelendiğinde UTS değerleri benzer olan üç farklı çalışmada yüksek mekanik özellikler belirlenmiştir (Tablo 2). Fakat bu üç çalışmada da farklı kaynak teknikleri kullanılarak yüksek değerler elde edildiği belirlenmiştir. Diğer çalışmalar ayrı olarak incelendiğinde uç tipinin en etkili olduğu bununla birlikte uç dönme hızının en az etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Uç ilerleme hızı ise diğer parametrelere bağlı olarak önem kazandığı görülmüştür.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, Friction welding, US Patent 228, 1995.
2. I. Stol, Selecting manufacturing processes for automotive aluminum space frames, *Weld J.*, 73: 57–65, 1994.
3. R. Irving, Interest in welded aluminum automobiles Gathers Momentum worldwide, *Weld J.*, 77: 31–35, 1998.
4. M.R. Johnsen, Friction stir welding takes off at Boeing, *Weld J.*, 78: 35–39, 1999.
5. P.F. Mendez, T.W. Eager, Welding processes for aeronautics, *Adv Mater Process*, 159: 34-43, 2001.
6. D. Burford, C. Widener, B. Tweedy, Advances in friction stir welding for aerospace applications, *Airframer*, 14: 3–7, 2007.
7. S. Benavides, Y. Li, L.E. Murr, D. Brown, J.C. McClure, Low temperature friction stir welding of 2024 aluminum, *Scr Mater*, 41: 809–815, 1999.
8. K.V. Jata, S.L. Semiatin, Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scr Mater*, 43: 743–749, 2000.
9. G. Liu, L.E. Murr, C.S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega, Microstructural aspects of the friction stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scr Mater*, 37: 355–361, 1997.

10. C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scr Mater*, 36: 67–75, 1997.
11. M. ÖZDEMİR, Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum malzemelerin kaynaklanabilirliği, Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi, 2003.
12. G. Staniek, W. Hillger, C.D. Donne, Ultrasonic testing on friction stir welded aluminium alloys, *Welding and Cutting*, 313–318, 2002.
13. P. Threadgill, Friction stir welds in aluminium alloys- preliminary microstructural assessment, *TWI*, 2: 513, 1997.
14. C.G. Rhodes, M.W. Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling, C.C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium, *Scr Mater*, 36: 690–751, 1997.
15. R.S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R. Reports*, 50: 1–78, 2005.
16. E. Taban, E. Kaluç, Sürtünen eleman ile kaynak (FSW) yöntemi, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 2007.
17. B. Christner, J. McCoury, S.C. Higgins, Development and testing of friction stir welding (FSW) as a joining method for primary aircraft structure, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 14–16, 2003.
18. B. Christner, M. Hansen, M. Skinner, G.V. Sylva, Friction stir welding system development for hinge aerospace structures, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 2003.
19. G.E. Shepherd, The evaluation of friction stir welded joints on Airbus aircraft wing structure, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 2003.
20. D. Lohwasser, Friction stir welding of aerospace alloys, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, 2003.
21. H.J. Liu, H. Fujii, M. Maeda, K. Nogi, Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, *J. Mater Process Technol*, 142: 692–696, 2003.
22. W.M. Thomas, K.I. Johnson, C.S. Wiesner, Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies, *Adv Eng Mater*, 5: 485–490, 2003.
23. H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3, *Acta Mater*, 54: 1199–1209, 2006.
24. J.A. Schneider, A.C. Nunes, Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35: 777–783, 2004.
25. P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, A thermomechanical analysis of the friction stir welding process, *Materials Science Forum*, 396: 1537–1542, 2002.
26. P. Heurtier, M.J. Jones, C. Desrayaud, J.H. Driver, F. Montheillet, D. Allehauxet, Mechanical and thermal modelling of friction stir welding, *J. Mater Process Technol*, 171: 348–357, 2006.
27. A. Sık, M.K. Külekçi, Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum almasını levhalarının birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri, *Kaynak Teknolojisi IV Ulusal Kongresi*, 77–87, 2003.
28. G. Çam, Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler, *Kaynak Teknolojisi IV Ulusal Kongresi*, 47–64, 2003.
29. H.J. Liu, J.C. Hou, H. Guo, Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of self-reacting friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Mater Des*, 50: 872–878, 2013.
30. D. Peng, J. Shen, Q. Tang, C. Wu, Y. Zhou, Effects of aging treatment and heat input on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded 6061-T6 alloy joints, *Int J Miner Metall Mater*, 20: 259–265, 2013.
31. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Smith, C.J. Dawes, Improvements relating to friction stir welding, 1992.
32. W.M. Thomas, I.M. Norris, I.J. Smith, D.G. Staines, Reversal stir welding-feasibility study, 4th International Symposium on Friction Stir Welding, 2003.
33. R.A. Prado, L.E. Murr, D.J. Shindo, K.F. Soto, Tool wear in the friction-stir welding of aluminium alloy 6016+20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: a preliminary study, *Scr Mater*, 45: 78–80, 2001.
34. S. Vijayan, R. Raju, S.R.K. Rao, Multi objective optimization of friction stir welding process parameters on aluminum alloy AA 5083 using Taguchi-based grey relation analysis, *Mater Manuf Process*, 25: 1206–1212, 2010.
35. N.Z. Khan, Z.A. Khan, A.N. Siddiquee, Effect of shoulder diameter to pin diameter (D/d) ratio on tensile strength of friction stir welded 6063 aluminium alloy, *Mater Today*, 2: 1450–1457, 2015.

36. S. Babu, K. Elangovan, V. Balasubramanian, M. Balasubramanian, Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA2219 aluminum alloy joints, *Metals Mater Int*, 15: 321–330, 2009.
37. J. Mohammadi, Y. Behnamian, A. Mostafaei, H. Izadi, T. Saeid, A.H. Gerlich, Materials characterization friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: microstructure studies and mechanical characterizations, *Mater Charact*, 101: 189–207, 2015.
38. R.P. Mahto, R. Bhoje, S.K. Pal, H.S. Joshi, S. Das, A study on mechanical properties in friction stir lap welding of AA 6061–T6 and AISI 304, *Mater Sci Eng*, 652: 136–144, 2016.
39. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, S.D. Smith, Friction stir welding- tool developments, TMS Annual Meeting and Exhibition, Aluminium Joining – Emphasizing Laser and Friction stir welding, New Orleans, 2001.
40. S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded {AA}6061-T6 aluminium alloy joints, *Mater Des*, 32: 2878–2890, 2011.
41. K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Mater Sci Eng A*, 459: 7–18, 2007.
42. S. Verma, M. Gupta, J.P. Misra, Friction stir welding of aerospace materials, a State of Art Review, 135–150, 2016.
43. M. Vangalapati, K. Balaji, A. Gopichand, ANN modeling and analysis of friction welded AA6061 aluminum alloy, *Mater Today Proc*, 18: 3357–3364, 2019.
44. L.N. Semakane, E. Ekınlabı, F. Nemavhola, Material characterization and optimisation of friction stir welds of 6061-T6 aluminium alloy, Masters, University of Johannesburg, 2018.
45. M. Gomathisankar, M. Gangatharan, P. Pitchipoo, A novel optimization of friction stir welding process parameters on aluminum alloy 6061-T6, *Mater Today Proc*, 5: 14397–14404, 2018.
46. S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Establishing empirical relationships to predict grain size and tensile strength of friction stir welded AA 6061-T6 aluminium alloy joints, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 1863–1872, 2010.
47. D. Sethi, U. Acharya, S. Shekhar, B. S. Roy, Applicability of unique scarf joint configuration in friction stir welding of AA6061-T6: Analysis of torque, force, microstructure and mechanical properties, *Defence Technology*, 18: 567–582, 2022.
48. H. Zhang, S. Chen, Y. Zhang, X. Chen, Effect of high rotational-speed friction-stir welding on microstructure and properties of welded joints of 6061-T6 Al Alloy ultrathin plate, *Materials*, 14: 6012, 2021.
49. L. Prabhu, S.S. Kumar, S. Krishnamoorthi, A. Anderson, Effect of novel tool path pattern on mechanical properties of friction stir welded AA6061 alloy, *Appl Nanosci*, 13: 2129–2138, 2023.
50. F.J. Liu, Z.Y. Sun, Y.F. Tuo, Y. Ji, Effect of shoulder geometry and clamping on microstructure evolution and mechanical properties of ultra-thin friction stir-welded Al6061-T6 plates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106: 1465–1476, 2020.
51. H. Hsieh, J.L. Chen, Influence of welding parameters on mechanical properties of friction stir welded 6061-T6 launch box, *Mater Trans*, 49: 2179–2184, 2008.
52. A. Astarita, A. Squillace, L. Nele, Mechanical characteristics of welded joints of aluminum alloy 6061 T6 formed by arc and friction stir welding, *Metal Science and Heat Treatment*, 57: 564–569, 2016.
53. A. Banik, T. Debnath, J.D. Barma, S.C. Saha, Effect of square pin tool on friction stir welded AA 6061-T6 from the perspective of revolution pitch, *Soldagem & Inspeção*, 27: 2706, 2022.
54. A. Banik, J. Deb Barma, S.C. Saha, Effect of threaded pin tool for friction stir welding of AA6061-T6 at varying traverse speeds: Torque and force analysis, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 44: 749–764, 2020.
55. D. Sethi, U. Acharya, S. Kumar, S. Shekhar, Effect of tool rotational speed on friction stir welded AA6061-T6 scarf joint configuration, *Adv Compos Hybrid Mater*, 5: 2353–2368, 2022.
56. D. Li, X. Yang, L. Cui, F. He, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of AA6061-T6 butt welded joints by stationary shoulder friction stir welding, *Materials and Design*, 64: 251–260, 2014.
57. S. Malopheyev, I. Vysotskiy, V. Kulitskiy, S. Mironov, Optimization of processing-microstructure-properties relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering A*, 662: 136–143, 2016.

# AISI 52100 Rulman Çeliğinin Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Sıcaklığı ve Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Havva Demirpolat<sup>1</sup> , Kübra Kaya<sup>1</sup> , Rüstem Binalı<sup>1,\*</sup> , Mustafa Kuntoğlu<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Konya, Türkiye

## MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 20.11.2023  
**Kabul:** 25.12.2023

**Anahtar Kelimeler:**  
AISI 52100  
İşlenebilirlik  
Takım ucu sıcaklığı  
Yüzey pürüzlülüğü  
Kesme kuvveti

## ÖZET

AISI 52100 malzemesi esas olarak rulman endüstrisinde kullanılmaktadır. Bu çelikler yüksek sertlik, mükemmel aşınma direnci ve boyutsal stabilite sunar. Daha yüksek mukavemet olması, özellikle otomotiv endüstrisinde rulman uygulamaları için uygun hale getirmektedir. Bu çalışmada AISI 52100 çeliğinin işlenebilirlik özellikleri iki farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğine göre kuru kesme koşullarında tornalama işlemine göre değerlendirilmiştir. İşlenebilirlik çıktı parametreleri ise kesme kuvveti, takım ucu sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğünü içermektedir. İşlenebilirlik deneyleri tam faktöriyel deneysel tasarım olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada TiC kaplı kesici takım kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, yüksek kesme hızlarında rulman çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük ilerleme oranında işleme koşullarında kesme kuvveti değeri azalmıştır. Bu da daha düşük güç tüketimi ile işleme verimliliğini artırmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörün ilerleme miktarı olduğu, ardından talaş derinliğinin olduğu görülmüştür. Sıcaklık değerinin artmasında ise en etkili parametrenin talaş derinliği olduğu sonucuna varılmıştır.

## Investigation of the Effects of Machining Parameters on Surface Roughness, Cutting Temperature and Cutting Force in Turning AISI 52100 Bearing Steel

### ARTICLE INFO

**Received:** 20.11.2023  
**Accepted:** 25.12.2023

**Keywords:**  
AISI 52100  
Machinability  
Tool tip temperature  
Surface roughness  
Cutting force

### ABSTRACT

AISI 52100 material is mainly used in the bearing industry. These steels offer high hardness, excellent wear resistance and dimensional stability. The higher strength makes it suitable for bearing applications, particularly in the automotive industry. In this study, the machinability properties of AISI 52100 steel were evaluated according to the turning process under dry cutting conditions at two different cutting speeds, feed rates and depths of cut. Machinability output parameters include cutting force, tool tip temperature and surface roughness. The machinability experiments were carried out using a full factorial design. A TiC coated cutting tool was used in the study. As a result of the study, high cutting speed generally caused less surface roughness than lower cutting speed parameters under the same environmental cutting conditions. It was also found that cutting force was better achieved under low feed machining conditions. It was observed that the most effective factor on surface roughness was feed rate, followed by depth of cut. It was concluded that the most effective parameter for increasing the temperature value is the depth of cut.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda yüksek karbonlu krom alaşımlı çelikler üstün özelliklerinden dolayı imalatta yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin artan kullanımı, yeni işleme zorluklarını ortaya çıkaran yüksek performanslı işleme gerektirir. Kesme koşullarının rulman çeliklerinin yüzey bütünlüğü,

\*Sorumlu yazar, e-posta: rstmbinali@gmail.com

To cite this article: H. Demirpolat, K. Kaya, R. Binalı, M. Kuntoğlu, AISI 52100 Rulman Çeliğinin Tornalanmasında İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü, Kesme Sıcaklığı ve Kesme Kuvveti Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(3), 179-189, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1393430>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0



pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkisini araştırmak için birçok araştırma yapılmıştır [1, 2]. AISI 52100 çeliğinin işlenmesi, sertliği, yüksek aşınma direnci ve zayıf yüzey kalitesi nedeniyle zorlu bir iştir. Ayrıca takım/iş arayüzünde oluşan yüksek sıcaklıklar, işlenen ürünün yüzey bütünlüğüne ve takım ömrüne zarar verebilir [3]. İşleme prosesi parametrelerinin işlenebilirlik performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. İki veya daha fazla kayıtlı yanıt için ideal deneme konfigürasyonunu elde etmek amacıyla çok amaçlı optimizasyon gerçekleştirilebilir. Bu çok kriterli karar modeli, süreç parametrelerini optimize etmek amacıyla birden fazla yanıtı birleştirilmiş bir yanıt halinde birleştirmek için kullanılabilir [4]. Spesifik yanıtlar için araştırmacılar en uygun kesme parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır [5, 6]. Sonuç olarak, süreç modelleme ve girdi parametreleri ile süreç çıktısı arasında optimum ilişkilerin sağlanması, bitmiş ürünün kalitesinin değerlendirilmesi, üretkenliğin ve genel süreç verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir [7]. Bouacha vd. [8] AISI 52100 çeliğinin işlenmesi sırasında hem takım kuvvetlerini hem de yüzey bütünlüğünü tahmin etmek için bir model oluşturmak amacıyla tepki yüzey metodolojisini kullanmışlardır. Kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş azalması, AISI 52100 işleme prosesi sırasında çok amaçlı Taguchi ve gri ilişki analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Sankar and Umamaheswararao [9], Taguchi yöntemini kullanarak tornalama işleminin rulman çeliği üzerindeki etkisini araştırdı. Kesme derinliği ve ardından kesme hızı ve ilerleme hızı ana işleme parametresi olarak tanımlanmıştır. Ramakrishnan vd. [10], çeşitli çalışma koşulları altında rulman çeliğinin CNC tornalama işleminden kaynaklanan yüzey pürüzlülüğünü optimize etmek için Taguchi parametre tasarımının kullanımını araştırmışlardır. AISI 52100 alaşımlı çelik malzemenin (55 HRC) sert tornalama işleminde azaltılmış yüzey pürüzlülük değerleri elde etmek için ideal kesme koşulları, CBN kesici uç takımı kullanılarak Taguchi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Mane ve Kumar [11], AISI 52100 sertleştirilmiş alaşımının işlenmesinde model oluşturmak için istatistiksel deneysel tasarım tekniğini ve en küçük kareler uydurma yöntemini kullanmışlardır. Deneysel tasarım için merkezi kompozit tasarım yöntemi kullanılmış ve 'Design Expert' yazılımında tam faktöriyel tasarım kullanılarak yapılandırılmıştır. Çalışmada, kesme parametrelerinin ve bunların yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkileşimlerinin karşılaştırmalı önemini belirlemek için varyans analizini (ANOVA) kullanıldı. Sonuçlar, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu ve ardından kesme hızının geldiğini, kesme derinliğinin ise önemli bir etkisinin olmadığını gösterdi. Vijaykumar vd. [12] kesme sıvısı olmadan sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğinin tornalanması için optimum işlem parametrelerini belirlemek amacıyla Taguchi tekniğini kullanmışlardır. Kesme hızı, ilerleme ve derinlik gibi işleme parametrelerinin performansını araştırmak için Minitab v.16.2.0 yazılımı kullanılarak L9 ortogonal dizi, sinyal-gürültü (S/N) ve varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Çalışmada malzeme kaldırma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğü dikkate alınmıştır. Gerekli yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için optimum parametreler, 450 dev/dak kesme hızı, 0.05 mm/dev ilerleme hızı ve 0.4 mm kesme derinliğiydi. Alok ve Das [13], istatistiksel deney tasarımına dayalı olarak sertliği 55 HRC olan AISI 52100 çeliği üzerinde bir tornalama deneyi gerçekleştirmişlerdir. İşlenebilirlik özelliklerini etkileyen kesme hızı (Vc), ilerleme hızı (f) ve kesme derinliği (ap) gibi farklı kesme parametrelerinin etkisini, ana kesme kuvveti (Fc), radyal kuvvet (Fp), ilerleme kuvveti (Ff), maksimum yan yüzey aşınması (VBmax) ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne (Ra) göre analiz etmişlerdir. Yıldız ve ark.[14] AISI 52100 rulman çeliğinin tornalanmasında minimum sıcaklık ve güç tüketimine etki eden kesme parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Bunun için yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan deneysel sistemlerde en düşük deney sayısı için kullanılan Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Sıcaklık ve güç tüketimi değişkenleri, kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızı olmak üzere her üç parametreden de etkilendiği belirtilmiştir. Minimum sıcaklık ve güç tüketimi için kesme koşulları; 162.427 m/dak kesme hızı, 1.395 mm kesme derinliği ve 0.247 mm/dev ilerleme oranı olarak belirtmişlerdir. Ayrıca, ilerleme oranının hem sıcaklığı hem de güç tüketimini en çok etkileyen parametre olduğu tespit edilmiştir. Şahinoğlu ve ark.[15] iki farklı sertlik değerine sahip AISI52100 çeliği değişen kesme parametreleri ile üç farklı soğutma koşulu (kuru, soğutma sıvısı ve MQL) altında tornalanmasının yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi ve titreşime etkisini incelemişlerdir.

Kesme hızındaki artışa bağlı olarak güç tüketimi ve yüzey pürüzlülüğünde azalma tespit edilirken aklık güç tüketimi ve titreşim artmıştır. En iyi kesme performansı yüksek sertlikteki iş parçasının MQL ortamında yüksek hızlarda tormalanmasında tespit etmişlerdir. Rafighi ve ark.[16] kuru işleme ortamında AISI 52100 çeliğin tormalanmasında sertlik ve kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini 2 ve 3 seviyeli karma bir Taguchi metoduyla dizayn ettikleri tormalama deneyleri ile araştırmışlardır. Sonuçlar, ilerlemenin %96.3'lük bir katkı ile yüzey pürüzlülüğü üzerinde baskın bir sonuca sahip olduğunu ve aynı zamanda %13.8'lik bir katkı ile kesme kuvvetini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Literatür araştırmasından kuru işlemenin birçok çelik bileşen türü için uygun maliyetli bir işleme prosesi olduğu sonucunun çıkarılması mümkündür. Ayrıca, kuru işlemeyle ilgili literatür taraması, istatistiksel yaklaşımın, farklı girdi koşullarında işleme süreçlerinin çoklu yanıtlarını yüksek doğrulukla tahmin ederek modelleme teorisini geliştirdiğini göstermektedir.

Bu çalışmada işleme operasyonunu tanımlayan üç temel parametrenin etkilerini araştırmak için deneyler yapılmıştır. AISI 52100 rulman çeliğinin sürdürülebilir işleme hedefleri bağlamında kuru kesme ortamında net ve objektif bir değerlendirmesini sağlamak için kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme hızının sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetine etkileri incelenmiştir. Deneyler tam faktöriyel tasarım metodu ile üç faktörün iki seviyede olası kombinasyonları ile dizayn edilmiştir. Kesme sıvısı gerektirmeyen en temiz üretim tekniği olarak kabul edilen kuru işleme ortamında AISI 52100 rulman çeliğinin tormalanmasında yüzey pürüzlülüğünü, kesme kuvvetini ve takım ucu sıcaklığını etkileyen kesme parametrelerinin etkileri profesyonellere ve literatüre sunulmaktadır.

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

### 2.1. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

AISI 52100 kalite yüksek karbonlu krom alaşımlı çelik iş parçasının kimyasal bileşimi, bu deneysel çalışmanın odak noktası olarak Tablo 1'de sunulmaktadır. Çapı 30 mm ve uzunluğu 100 mm deney numunesinin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de sunulmaktadır. Kesme derinliği, kesme hızları ve ilerleme oranları, işleme deneyleri için tam faktöriyel yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi ve yorumlanması için kullanılan tam faktöriyel deneysel tasarım yaklaşımı optimum bir yaklaşım olarak kabul edilir, çünkü faktörlerin farklı seviyelerinin olası tüm kombinasyonları değerlendirilir[17]. Bu tür tasarımlarda, her faktörün her seviyesinden eşit sayıda sonuç alınır ve birbirleriyle karşılaştırılır. Bu yöntem yalnızca çok az sayıda faktör söz konusu olduğunda kullanılabilir. Gerekli deney sayısı, faktör sayısı ve etkileri ile birlikte hızla artar. Bu sebeple, ana etkilerin ve etkileşimlerin tahmin edilmesine olanak tanıyan basit bir sistematik tasarım kullanılarak iş parçası üzerinde toplam 8 deney gerçekleştirilmiştir. Tepkiyi etkileyebilecek kesme faktörlerinin belirlenmesi deneyin tasarlanmasındaki ilk adım olarak uygulanmıştır. Her faktörün en az iki düzeyi vardır ve düzeyler, bu çalışmanın özellikleriyle ilgili ve makul olana göre seçilmiştir. Faktörler ve seviyeler belirlendikten sonra, her faktör için olası tüm seviye kombinasyonlarını içeren bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Bir sonraki adım, her faktör seviyesi kombinasyonuna test noktaları atamak olmuştur. Bu sayede birden fazla faktör aynı anda test edilerek deneyin sonuçları değerlendirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada tam faktöriyel tasarım yöntemi kullanılarak ana etkiler ve etkileşimler belirlenmiştir.

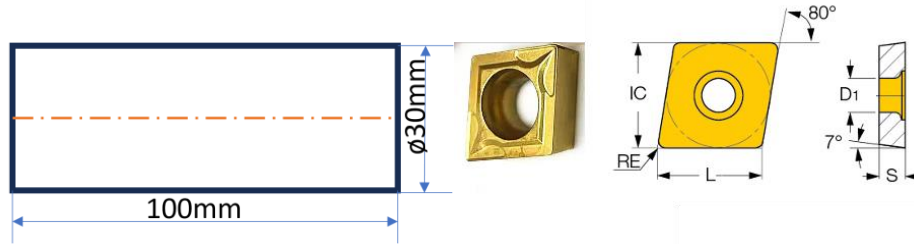
Tablo 1. AISI 52100 çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical compounds of the AISI 52100 steel)

Element (% ağırlık)	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
AISI 52100	0.98-1.10	0.15-0.30	0.25-0.45	1.35-1.60	0.10	0.25	0.30	Kalan

Tablo 2. AISI 52100 çeliğinin mekanik ve fiziksel özellikleri (Mechanical and physical properties of AISI 52100 steel)

Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	7.80
Sertlik (HRC)	60-66
Çekme dayanımı (MPa)	520
Akma dayanımı (MPa)	415
Kopma uzaması (%)	2.7
Elastisitemodülü (GPa)	80
Isıl iletkenlik (W/m.°K)	42.4

Kesici takım ve takım tutucu, pratik uygulamalara ve imalatçıların tavsiyelerine göre seçilmiştir. TiC kaplı CCMT 09T308-304 serisi kesici takım, ISO 3685'e uygun olarak kullanılmıştır[18]. Kesici takımlara ilişkin fiziksel detaylar Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca iş parçası ve kesici takım geometrileri Şekil 1'de verilmiştir. Kesici takımlar her test periyodundan sonra değiştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler ve seviyeleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 1. İş parçası ve kesici takım geometrileri (Workpiece and cutting tool geometries)

Tablo 3. Kesici takım özellikleri (Cutting tool properties)

Kesici takım	Boşluk açısı	Kesme kenarı uzunluğu	Kesici uç kalınlığı	Köşe radyüsü
CCMT-09T308-304	7°	9mm	3.97mm	0.8mm

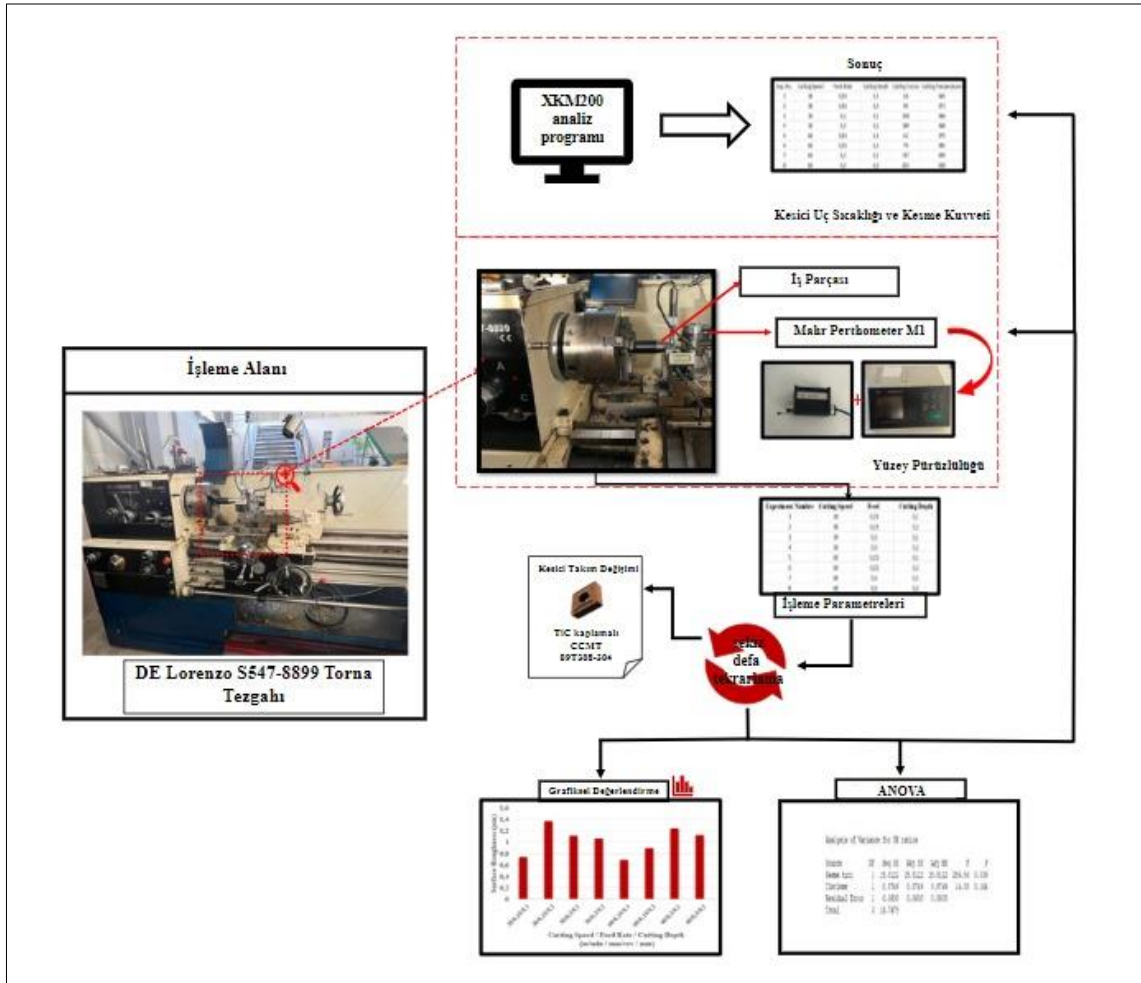
Tablo 4. Deney parametreleri (Experiment parameters)

Deney No	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)
1	30	0.15	0.1
2	30	0.15	0.2
3	30	0.3	0.1
4	30	0.3	0.2
5	60	0.15	0.1
6	60	0.15	0.2
7	60	0.3	0.1
8	60	0.3	0.2

## 2.2. İşleme deneyleri (Machining Experiments)

İşleme denemeleri kuru kesme ortamı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma bazında üç farklı parametre iki farklı seviyede, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvvetine etkisi tornalama imalat yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri Tablo 4'te verilmektedir. Kesme kuvvetleri Kistler 9275 dinamometre ile ölçülmüş ve sinyaller bilgisayara kaydedilmiştir. Her deneyin sonucunda işlenen yüzeyin farklı noktalarından yüzey pürüzlülüğü değerleri Mahr Perthometer M1 cihazı kullanılarak ölçülerek ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Pürüzlülük değeri, ölçümlerden en yüksek ve en düşük değerlerin çıkarılması ve üç değerın ortalamasının alınmasıyla belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, kesme sıcaklığı bir InGaAs radyasyon sensörü (Telc, Almanya) ile ölçülmüş ve sensörden elde edilen termometre sinyalleri bilgisayara aktararak değerlendirilmiştir. Kesme işlemi sırasında anlık

olarak akım ve gerilim hesaplanarak %0.1 doğrulukla yüksek hassasiyetli ölçümler elde etmek mümkün olmaktadır. Bununla beraber deneylerin hepsinin bitiminde kullanılan kesici takım yenisiyle değiştirilerek kesici takımdan kaynaklanabilen ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyebilecek değişiklikler minimuma indirilmiştir. Şekil 2’de çalışma kapsamında ele alınan işleme süreci verilmektedir.



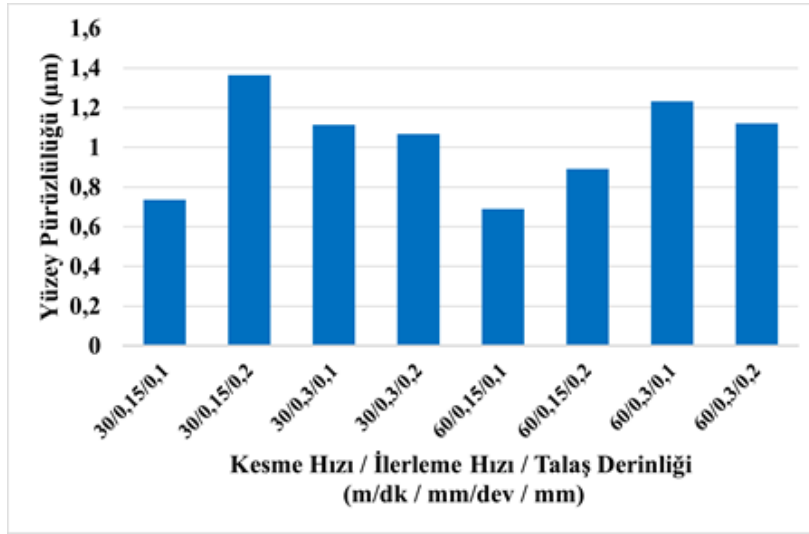
Şekil 2. Deneysel düzenek (Experimental setup)

### 3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENT RESULTS)

#### 3.1. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Şekil 3’de kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliğine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği verilmektedir. Grafik incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü kesme hızının, ilerlemenin ve kesme derinliğinin sırasıyla 60 m/dak, 0.15 mm/dev, 0.1 mm değerleri seçilen deneyde elde edilmiştir. İlerleme oranının 0.15 mm/dev’ den 0.3 mm/dev’ e çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerleri artış göstermektedir. İlerlemenin artması ilerleme kuvvetine ve yüzeyden kaldırılan talaş hacminin artış göstermesine neden olmaktadır [19]. Bahsedilen durumlar yüzey kalitesini negatif etkilediğinden dolayı yüzey pürüzlülüğünde artış gerçekleşmesi beklenen bir durumdur. Kesme hızının nispeten düşük olduğu işleme durumunda ilerleme oranının atışı ve kesme derinliğinin azalması ile yüzey pürüzlülük değerinde %15 bir azalma ölçülmüştür. Ancak bu etki daha yüksek kesme hızı değerinde gözlenmemiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki azalma eğiliminin kesme hızının artması ile azaldığı ancak ilerlemenin artmasıyla pürüzlülük değerinin düşük kesme hızlarında azaldığı yine açıkça görülmektedir. Sebebi malzemenin düşük ilerlemede sürülmesi olabilir[20]. Düşük kesme hızı değerinde 0.1mm kesme derinliği kesme koşulunda, ilerlemenin artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerinde yaklaşık %33 oranında bir artış tespit edilmiştir.

Kesme hızının 30 m/dak seçildiği deneylerde ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri, (1.07  $\mu\text{m}$ ) elde edilmiştir. 60 m/dak kesme hızında bu değer (0.983  $\mu\text{m}$ ) olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi bir sonuç elde edilmesi için kesme hızının artırılması geçmiş çalışmalarda en çok başvurulan yöntemlerdendir [21, 22]. Kesme hızının artışı, takımın parçaya olan temasının azalması ve yüksek sıcaklıklarda oluşan akma bölgesinden dolayı yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuç elde edilmesini sağlamaktadır [23]. Deneylerin sonunda literatürdeki çalışmaların doğrulandığı görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde ilerleme oranının 0.15 mm/dev olduğu deneylerde kesme derinliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artarken, ilerleme oranının 0.3 mm/dev olduğu deneyler için tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Bu bağlamda kesme derinliği ve ilerleme hızının yüzey kalitesi açısından önemli rol oynadığı düşüncesi yanlış değildir. Belirtilen bu rolün önemi, kesme bölgesinin derinliğinin fazla olmasıyla beraber deney süresi uzadığında yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması sonucuna bağlanabilir.

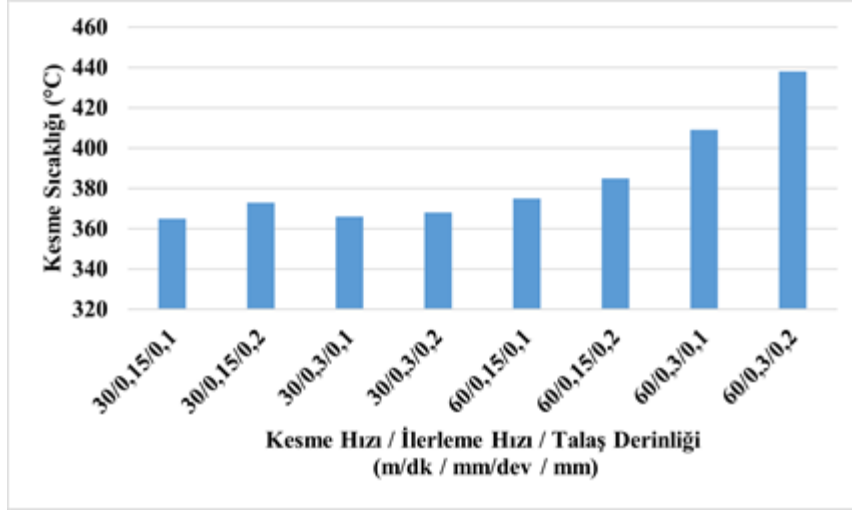


Şekil 3. Yüzey pürüzlülüğünün kesme hızına, ilerleme değerlerine ve kesme derinliğine göre değişimi (Surface roughness change according to cutting speed, feed levels and cutting depth)

### 3.2. Kesme Sıcaklığı (Cutting Temperature)

Kullanılan işleme yöntemi olan tornalama, talaşlı imalat yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır. Talaşlı imalatta kesme bölgesinde ortaya çıkan sıcaklığın minimuma indirilmesi geçmişten günümüze halen en büyük istem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple deneylerde takım ve yüzey arasında meydana gelen sıcaklık yorumlamaları ve gözlemleri önem arz etmektedir. Takım ucunda meydana gelen sıcaklık takım ömrü ve takım aşınmasını etkileyen en önemli özelliklerdendir ve işlem esnasında takım yönüne doğru gerçekleşen ısı akışından kaynaklanmaktadır [24]. Takım aşınmasının yüzey işlemede meydana getirdiği negatif sonuçlar göz önüne alınırsa kesme sıcaklığı değerlendirmesi göz ardı edilemeyecek kadar önem arz eden konulardandır. Aşırı aşınma işlenen yüzey ve takım arasında yüzey temasını arttırdığı için takım ucu sıcaklığında da yükselmeye sebep olur. Ayrıca kesme hızı artışıyla ısının kesme bölgesinde dağıtım süresini azalması da takım ucu sıcaklığının artmasına neden olan bir diğer faktördür [25]. Şekil 4'te çalışma bazında gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen takım ucu sıcaklık değişim grafiği verilmektedir. Optimum kesme sıcaklığı için ele alınan üç parametrenin de düşük seviyelerde olması gerekmektedir. Bu çalışma içinde optimum kesme sıcaklığı 30 m/dak, 0.15 mm/dev, 0.1 mm parametre değerlerinin seçildiği deneyde görülmektedir. Parametrelerin yüksek değerlerde kullanılmasıyla maksimum takım ucu kesme sıcaklıkları elde edilmiştir. Literatürde kesme hızının artmasıyla takım ucu sıcaklığının artış gösterdiği sonucu verilmektedir [26, 27]. Kesme sıcaklığı değişim periyodu tüm parametrelerin artması ile artan bir eğilim göstermektedir.

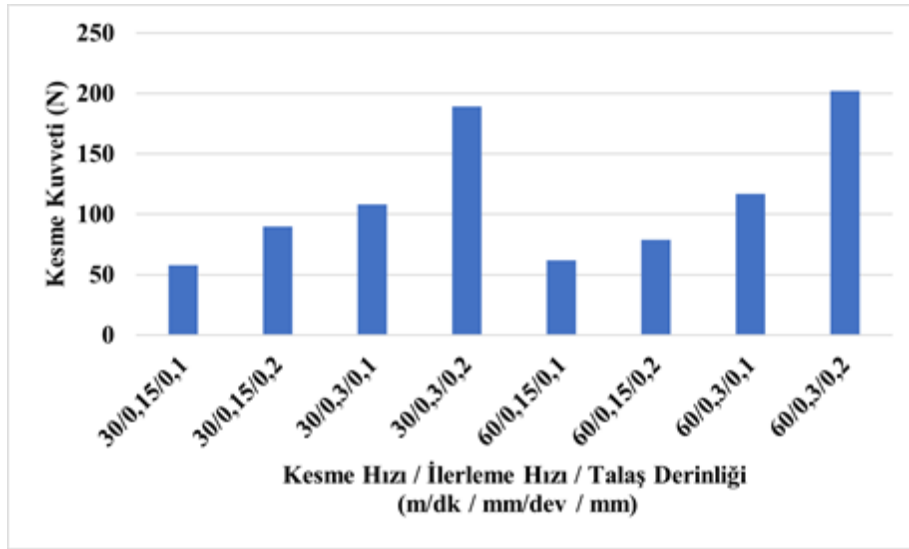
Kesme hızının ve kesme derinliğinin kademeli olarak artması, AISI 52100 malzemenin işlenmesinde sıcaklığı artırmaktadır. Ancak sıcaklık değerindeki en belirgin artış her üç kesme parametresinin de yüksek olduğu durumda elde edilmiştir.



Şekil 4. Takım ucu sıcaklığının kesme hızına, ilerleme değerlerine ve kesme derinliğine göre değişimi (Tool-tip temperature variations according to cutting speed, feed levels and cutting depth)

### 3.3. Kesme Kuvveti (Cutting Force)

AISI 52100 yüksek mukavemet özelliklerine sahip rulman çeliği olarak bilinmektedir. Bu özelliği sahip olması malzemenin işleme esnasında daha yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyacı olduğu gerçeğini yanında getirmektedir. Bu amaçla çalışmaya kesme kuvveti analizi de eklenmiştir. Şekil 5'te ele alınan işleme parametrelerine göre kesme kuvveti değişim grafiği verilmektedir. Maksimum kesme kuvveti yüksek kesme hızı, yüksek ilerleme oranı ve düşük kesme derinliğinde elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde kesme derinliğinin değişimiyle kesme kuvvetinin büyük ölçüde etkilendiği görülmektedir. Yüksek kesme derinlikleri ve ilerleme oranı kesmeye karşı daha yüksek direnç göstermesinden kaynaklı olarak kesme için daha fazla kuvvet gereksinimi ortaya çıkarmaktadır [2]. Kesme hızının artış göstermesi kesme kuvvetinde çok fazla değişime sebep olmamıştır. Her iki kesme hızı değerinde de artan ilerleme ve kesme derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetindeki artış eğilimi benzerlik göstermektedir. Kesme hızında artışa bağlı olarak aynı parametre değerlerinde kesme kuvvetinde bir azalma gözlenmektedir. Bu eğilim etkisini yüksek kesme derinliği ve ilerleme değerinde kaybetmektedir [28]. Bu durum kesme kuvvetinin optimizasyonu için öncelikli olarak kesme hızı parametresinin göz önüne alınamayabileceği sonucunu doğrulamaktadır. İlerleme miktarı yukarıda da bahsedildiği üzere kesmeye karşı gösterilen dirençle ilişkili olduğundan düşük ilerleme değerleri kesme kuvvetinde pozitif sonuçlar doğurduğu görülmektedir. Optimum kesme kuvveti 30 m/dak, 0.15 mm/dev, 0.1 mm parametre seçiminin gerçekleştiği deneyde elde edilmiştir. Düşük kesme hızı değerinde kesme derinliğinde artışa bağlı olarak kesme kuvveti %35.55 oranında artmaktadır. İlerleme oranındaki artışa bağlı olarak kesme kuvvetindeki artış %46.29 oranında olmaktadır.



Şekil 5. Kesme kuvvetinin kesme hızına, ilerleme değerlerine ve kesme derinliğine göre değişimi (Cutting force variations according to cutting speed, feed levels and cutting depth)

### 3.3. Kesme Kuvveti İçin İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis for Cutting Force)

AISI 52100 malzemesinin yüksek mukavemet özelliklerine sahip olduğu ve işlenmesi sırasında yüksek kesme kuvvetlerine ihtiyaç duyduğu yukarıda belirtilmiştir. Bununla beraber kesme kuvveti yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ucu sıcaklığında önemli ölçüde rol oynadığı için çalışma kapsamında sadece kesme kuvvetine ANOVA analizi yapılarak en önemli parametre belirlenmiştir. Tablo 5’de istatistiksel analiz sonuçları verilmektedir. ANOVA analizi bağımsız değişkenin bağımlı değişkenler üzerinde anlamlı etkisinin olup olmadığı durumunu belirlemek için kullanılan bir yöntemdir [29]. F değerlerinden en yükseği ele alınan değişkeni en fazla etkileyen parametre olarak yorumlanmaktadır. Tablo 5 incelendiğinde kesme kuvveti için en önemli parametre %63.5’lik yüzdesel oranla ilerleme oranı olarak görülmektedir. Önem sırasında ilerleme oranını kesme derinliği ve kesme hızı takip etmektedir. Aynı zamanda analiz sonucunda  $R^2$  değeri %91.09 olarak elde edilmiştir. Buradan deney sonuçlarının yüksek bir doğruluk payına sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Kesme kuvveti için ANOVA (ANOVA results for cutting force)

Parametre	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Kesme hızı	1	28.1	28.1	0.06	0.819	0.133
İlerleme oranı	1	13366.1	13366.1	28.49	0.006	63.5
Kesme derinliği	1	5778.1	5778.1	12.32	0.025	27.451
Hata	4	1876.5	469.1	-	-	8.915
Toplam	7	21048.9	-	-	-	100

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Bu çalışma kapsamında AISI 52100 rulman çeliğinin kuru kesme ortamında tornalanması yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti değerlendirilmiştir. Deneylerin sonucunda elde edilen veriler grafikselleştirilerek görselleştirilmiş ve en son olarak da kesme kuvveti için ANOVA analizi yapılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuç ve gözlemler çıkarılabilir.



- İlerleme 0.15 mm/dev'e ve kesme derinliği 0.1 mm'ye sabitlendiğinde ve kesme hızı 30 m/dak' dan 60 m/dak'ya çıkarıldığında yüzey pürüzlülüğündeki azalış miktarı %6.25 şeklinde elde edilmektedir. Kesme hızının 30 m/dak ve kesme derinliğinin 0,1 mm olarak ele alındığı ve ilerleme oranının 0.15 mm/dev'den 0.3 mm/dev'e çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğünde %33.87'lik bir artış meydana gelmiştir. İlerleme 0,15 mm/dev ve kesme hızı 30 m/dak'ta gerçekleştirilen deneylerde kesme derinliğinin 0.1 mm'den 0.2 mm'e çıkarılmasıyla da yüzey pürüzlülüğünde %46'lık bir artış gözlemlenmiştir. Kesme hızının artış göstermesi yüzey pürüzlülüğünü azaltırken ilerleme ve kesme derinliğinde artış olması yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır.
- Kesme hızının 30 m/dak ve ilerlemenin 0.15 mm/dev olarak seçildiği deneylerde 0,1 mm kesme derinliğinden 0.2 mm kesme derinliğine artış meydana geldiğinde kesme kuvvetinde %35.55'lik bir yükselme, ilerlemenin 0.15 ve kesme derinliğinin 0.1 mm değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde kesme hızının 30 m/dak'tan 60 m/dak'a çıkarılmasıyla %6.45'lik kesme kuvvetinde artış ve kesme hızının 30 m/dak ve kesme derinliğinin 0.1 değerlerinde sabitlendiği ve ilerlemenin 0.15 mm/dev' den 0.3mm/dev' e çıkarılmasıyla kesme kuvvetinde %46.29'luk artış meydana gelmiştir. Buradan her üç parametrenin yükselmesinin kesme kuvvetini arttıracak fakat en az kesme hızı parametresinin etkileyeceği sonucu görülmektedir.
- Takım ucu sıcaklık analizi için kesme hızının 30 m/dak ve kesme derinliğinin 0.1 mm olduğu deneylerde ilerlemenin arttırılmasıyla %0.27 kadar çok az yüzdesel artış gerçekleşmiştir. İlerlemenin 0.15 mm/dev ve kesme derinliğinin 0.1 mm olarak kabul edildiği deneylerde kesme hızının iki katına çıkarılmasıyla takım ucu sıcaklığında %2.66'lık bir artış meydana gelmiştir. Kesme hızı 30 m/dak ve ilerleme 0.15 mm/dev ile gerçekleştirilen deneylerde kesme derinliğinin 0.1 mm'den 0.2 mm'ye çıkarılmasıyla takım ucu sıcaklığında %2.14'lük bir artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlardan takım ucu sıcaklığının en fazla ilerleme oranından etkilendiği ve üç parametrenin arttırılmasıyla takım ucu sıcaklığının yükseldiği sonucuna varılmaktadır.
- Yüzey pürüzlülüğü için optimum koşullar kesme hızının 60 m/dak, ilerlemenin 0.15 mm/dev ve kesme derinliğinin 0.1 mm olarak seçildiği deneylerde elde edilmiştir. Kesme kuvveti ve kesme sıcaklığı için optimum koşullar ise kesme hızı 30 m/dak, ilerleme 0.15 mm/dev ve kesme derinliği 0.1 mm olarak gerçekleştirilen deneylerde elde edilmiştir.
- Kesme kuvvetine yapılan ANOVA analizi sonucunda parametrelerin etki sıralaması ilerleme oranı, kesme derinliği ve kesme hızı olarak bulunmuştur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A. Panda, A.K. Sahoo, R. Kumar, R.K. Das, A review on machinability aspects for AISI 52100 bearing steel, *Materials Today: Proceedings*, 23:617-621, 2020.
2. H. Demirpolat, R. Binali, A. D. Patange, S. S. Pardeshi, S. Gnanasekaran, Comparison of tool wear, surface roughness, cutting forces, tool tip temperature, and chip shape during sustainable turning of bearing steel, *Materials*, 16 (12): 4408, 2023.
3. U.M.R. Paturi, A. Yash, S.T. Palakurthy, N. Reddy, Modeling and optimization of machining parameters for minimizing surface roughness and tool wear during AISI 52100 steel dry turning, *Materials Today: Proceedings*, 50:1164-1172, 2022.
4. A. Kentli, A. Kar, A satisfaction function and distance measure based multi-criteria robot selection procedure, *International Journal of Production Research*, 49(19):5821-5832, 2011.
5. P. Sivaiah, U. Bodicherla, Effect of surface texture tools and minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in CNC turning of AISI 52100 steel, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 101:85-95, 2020.
6. M. Jamil, N. He, W. Zhao, A.M. Khan, H. Xiang, M.K. Gupta, A. Iqbal, A novel low-pressure hybrid dry ice blasting system for improving the tribological and machining characteristics of AISI-52100 tool steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 80:152-160, 2022.



7. O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in Manufacturing*, 3:42-53, 2015.
8. K. Bouacha, M.A. Yallese, T. Mabrouki, J.-F. Rigal, Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(3): 349-361, 2010.
9. B.R. Sankar, P. Umamaheswar rao, Analysis of forces during hard turning of AISI 52100 steel using Taguchi method, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2):2114-2118, 2017.
10. T. Ramakrishnan, K. Sathish, P. Sampath, S. Anandkumar, Experimental investigation and optimization of surface roughness of AISI 52100 alloy steel material by using Taguchi method, *Advances in Natural and Applied Sciences*, 10(6):130-138, 2016.
11. S. Mane, S. Kumar, Analysis of surface roughness during turning of AISI 52100 hardened alloy steel using minimal cutting fluid application, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(1):138-149, 2022.
12. H. Vijaykumar, A. Siddiq, M. Sinan, Optimization of turning parameters using Taguchi technique for MRR and surface roughness of hardened AISI 52100 steel, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4 (5):39-44, 2014.
13. A. Alok, M. Das, Multi-objective optimization of cutting parameters during sustainable dry hard turning of AISI 52100 steel with newly develop HSN2-coated carbide insert, *Measurement*, 133:288-302, 2019.
14. A. Yıldız, L. Uğur, İ.E. Parlak, Optimization of the cutting parameters affecting the turning of AISI 52100 bearing steel using the Box-Behnken experimental design method, *Applied Sciences*, 13(1): 3, 2022.
15. A. Şahinoğlu, Investigation of the effects of MQL and material hardness on energy consumption, vibration, and surface roughness in hard turning of AISI 52100 steel for a sustainable manufacturing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, p. 09544089231173257, 2023.
16. M. Rafighi, M. Özdemir, A. Şahinoğlu, R. Kumar, S.R. Das, Experimental assessment and topsis optimization of cutting force, surface roughness, and sound intensity in hard turning of AISI 52100 Steel, *Surface Review and Letters*, 29(11): 2250150, 2022.
17. J. D. Kechagias, K.-E. Aslani, N. A. Fountas, N. M. Vaxevanidis, D. E. Manolakos, A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy, *Measurement*, 151: 107213, 2020.
18. ISO 3685: tool-life testing with single-point turning tools, International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1993.
19. Ş. Karabulut, A. Güllü, Farklı yavaşlama açıları ile vermiküler grafitli dökme demirin frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin araştırılması ve analitik modellenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28, 1, 2013.
20. G. Bartarya, S. Choudhury, Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness during finish hard turning AISI52100 grade steel, *Procedia CIRP*, 1: 651-656, 2012.
21. M.C. Shaw, J. Cookson, *Metal cutting principles*, Oxford university press, New York, 2005.
22. G. Boothroyd, *Fundamentals of metal machining and machine tools*, CRC Press, 1988.
23. H. Başak, Ş. Baday, Küreselleştirilmiş orta karbonlu bir çeliğin işlenmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin regresyon analizi ile modellenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4):253-258, 2016.
24. F. Jiang, Z. Liu, Y. Wan, Z. Shi, Analytical modeling and experimental investigation of tool and workpiece temperatures for interrupted cutting 1045 steel by inverse heat conduction method, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(6): 887-894, 2013.
25. G.C. Behera, J. Thrinadh, S. Datta, Influence of cutting insert (uncoated and coated carbide) on cutting force, tool-tip temperature, and chip morphology during dry machining of Inconel 825, *Materials Today: Proceedings*, 38:2664-2670, 2021.
26. H. Sağlam, S. Yaldiz, F. Unsacar, The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature, *Materials & Design*, 28(1): 101-111, 2007.
27. M. Pal, S. Dasmahapatra, Estimation of cutting forces and tool tip temperature in turning operation with help of artificial neural network, *Materials Today: Proceedings*, 66:1623-1632, 2022.

28. S. Rajarajan, C. Ramesh Kannan, M.S. Dennison, A comparative study on the machining characteristics on turning AISI 52100 alloy steel in dry and microlubrication condition, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 20(2): 360-371, 2022.
29. J. Nevalainen, H. Oja, SAS/IML macros for a multivariate analysis of variance based on spatial signs, *Journal of Statistical Software*, 16:1-17, 2006.