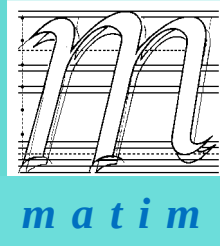


MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

UTIS 2024

International Congress on Machining

ÖZEL SAYI 2025



ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar
Eğitim ve Araştırma Vakfı - ANKARA

Yayın Kurulu

Editör: Erhan İlhan Konukseven
Yardımcı Editör: İbrahim Etem Saklakoğlu
Yardımcı Editör: Ulvi Şeker
Yardımcı Editör: Hakan Kalkan

ODTÜ
Ege Üniversitesi
Gazi Üniversitesi
Atılım Üniversitesi

Kurul Üyeleri

Mustafa Bakkal
Erhan Budak
Volkan Esat
Mehmet Fırat
Hüseyin Filiz
Necdet Geren
Yiğit Karpat
İsmail Lazoğlu
İzzet Özdemir
Ferruh Öztürk
Halim Meço
Yusuf Kaynak
Ali Oral
Haydar Livatyalı

İTÜ
Sabancı Üniversitesi
ODTÜ Kuzey Kıbrıs
Sakarya Üniversitesi
Gaziantep Üniversitesi
Çukurova Üniversitesi
Bilkent Üniversitesi
Koç Üniversitesi
İYTE
Uludağ Üniversitesi
FNSS
Marmara Üniversitesi
Balıkesir Üniversitesi
YTÜ

Danışma Kurulu

Bilgin KAFTANOĞLU
Tuna BALKAN
Melik DÖLEN
Yiğit YAZICIOĞLU
Orhan YILDIRIM

Atılım Üniversitesi
ODTÜ
ODTÜ
ODTÜ
ODTÜ

Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar
Eğitim ve Araştırma Vakfı

Hacettepe Üniversitesi Beytepe Kampüsü 1661.Sk. No:12 Beytepe/Ankara

Tel : +90 312 227 02 73 , Faks : +90 312 227 02 75

Web : <https://parlar.org.tr/matim>

e-mail : matim@parlar.org.tr

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

UTİS 2024
Özel Sayı 2025

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

ISSN 2667-4297

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfına aittir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

DİZGİ

Hülya SEVER

BASKI

DERGİPARK-Elektronik Yayın

Yılada 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

AISI 4140 Çelik Alaşımın Sert Tornalanmasındaki Karbon Emisyon Miktarının Sonlu Elemanlar ve Regresyon Yöntemleri ile Analizi 1
Kutay Aydın
Ulvi Şeker

Lazer Kesme Hızının Tungsten Karbür Malzemede Kesme Derinliği Üzerine Olan Etkisi 13
Buse Ortaç Baştekeli
Hacı Abdullah Taşdemir
Emin Orhun Baştekeli
Batu Yüzbaşıgil
Seyfullah Hatipoğlu

Lazer Tornalama Operasyonunda Kesme Hızının Talaş Derinliğine Olan Etkisi 20
Emin Orhun Baştekeli
Hacı Abdullah Taşdemir
Buse Ortaç Baştekeli

Eksenel Kullanım Yoğunluğunun Frezeleme İşlemlerinde Titreşim ve Kesme Performansına Etkisi 25
Mehmet Kubilay Askerden
Fatih Karpat
Mustafa Cemal Çakır

Testere ile Kesilmiş AA7075 Yüzeylerin Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Karakterizasyonu 30
Şükran Katmer
Yafes Çavuş
Yunus Emre Kınacı
Ulvi Şeker

Impax ve Nımax Takım Çeliklerinin Parmak Freze İle İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Karşılaştırılması 40
Buse Güney
Ege Güvenir
Hüseyin Emre Çakırca
Yaşar Emre Ünal
Ahmet Şimşek
Yusuf Furkan Yapan
Orhan Çakır

17-4 Ph Malzemeden Pervane Kanatlı Turbo Disklerin Kaba İşlemleri İçin Kesme Parametrelerinin Deneysel Optimizasyonu 52
Cenk Mirza
Şükran Katmer
Çağla Gökbulut Avdan
Çağlar Yavaş
Ulvi Şeker

Kesici Takım Geometrisinin Cw511I Kurşunsuz Pirinç Malzemenin İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi 59
Emre Taşcioğlu
Yusuf Kaynak
Özhan Kıtay

Eym ile Üretilen Pla Parçaların Talaşlı İmalatla Delinmesinde Katman Kalınlığının ve Delme Parametrelerinin Delik Kalitesine Etkisi 66
Kemal Ayan
Nail Aslan
Fırat Mavi
Sırrı Can Polat
Cansu Apaydın
Nurşen Saklakoğlu

Robotik Yüzey Zımparalamada Proses Koşullarının Bant Zımpara Ömrü ve İş Parçası Yüzeyine Etkileri 77
A. Emre Çetin
Bilal Yılmaz
Bayram Uysal
Emir Kavas
Suden Battal

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimiz, 2017 yılından beri TÜBİTAK DERGİPARK ortamında yayınlanmaktadır. (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim>) 2019 yılından beri elektronik yayına dönmemiz nedeni ile dergi ISSN-No 2667-4297 olmuştur. Dergimizin eski sayılarına da (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim/archive>) adresinden ulaşılmaktadır.

Ayrıca yeni web sayfamızda (<https://parlar.org.tr/matim>) Dergimiz ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Dergimiz 2021 yılından beri tekrar TR Dizin tarafından da önceki yıllarda olduğu gibi taranmaya devam edilmiştir.

(<https://app.trdizin.gov.tr/dergi/TWpreE1RPT0/makina-tasarim-ve-imalat-dergisi>)

Dergimiz, 1986-2022 yılları arasında Makine Tasarım ve İmalat Derneği bünyesinde yayınlanmıştır. Ancak, Derneğin 2022 yılı sonu itibarı ile faaliyetlerini sonlandırması üzerine, dergimiz 2023 yılından itibaren Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı bünyesinde yayına devam etmektedir.

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

Kutay Aydın*^{ID}Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya/TürkiyeUlvi Şeker^{ID}Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat
Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye

AISI 4140 Çelik Alaşımın Sert Tornalanmasındaki Karbon Emisyon Miktarının Sonlu Elemanlar ve Regresyon Yöntemleri ile Analizi

Bu çalışmada, yüksek mekanik özellikleri sebebiyle endüstride yaygın tercih edilen AISI 4140 çelik alaşımın sert tornalama sürecinde karbon emisyon miktarları araştırılmıştır. Bu kapsamda, ilk olarak farklı kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametreleri ile tornalama sonlu elemanlar metodu (SEM) ile analizleri yapılmıştır. SEM analizleri sonucunda elde edilen kesme güçleri ve diğer karbon emisyon faktörleri kullanılarak toplam karbon emisyon değerleri hesaplanmıştır. Sonrasında, Varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizleri ile karbon emisyon modeli kurulmuştur. Sonuç olarak, en düşük karbon emisyon miktarı 100 m/dk kesme hızı, 0.3 mm/dev ilerleme ve 1.5 mm kesme derinliği parametrelerinde elde edilmiştir. Karbon emisyon üzerindeki en etkili kesme parametresi, %37,58 oranla kesme hızı olduğu anlaşılmıştır. Ek olarak, toplam karbon emisyon miktarının yaklaşık %51'inin atık talaş ve yaklaşık %41'inin iş malzemesi kaynaklı karbon emisyon bileşenlerinin oluşturduğu görülmüştür.

Bu çalışma, 1-3 Kasım 2024 tarihleri arasında gerçekleşen 12. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu'nda (UTIS 2024) tam metin tebliğ olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı imalat, Sert tornalama, AISI 4140, SEM. ANOVA. Karbon emisyonu

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 12 Şubat 2025

Kabul: 8 Nisan 2025

*Sorumlu Yazar: Kutay Aydın

Email: kutay.aydin@amasya.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1638750>

1. Giriş

AISI 4140 (42CrMo4) çelik alaşımı, krom (Cr), mangan (Mn) ve molibden (Mo) alaşım elementleri içeren, yüksek dövülebilme kabiliyeti, korozyon direnci, süneklik, mukavemet ve tokluk vb. mekanik özellikleri sebebiyle dikkat çeken bir çelik alaşımdır. Bu özellikleri nedeniyle otomotiv, imalat, inşaat, havacılık vb. sektörlerde yaygın olarak tercih edilir. Makine parçaları, krank milleri, dişliler, akslar, soğuk çekme miller, yaylar, fren halka ve kolları, türbin motor parçaları, gemi zincirleri vb. sayısız kullanım örneği bulunmaktadır [1-3]. Günümüzde

yaşanılan iklim değişimi, sera gazı salınımı ve çevre kirliliği sorunları, öncelikli ilgilenilmesi gereken büyük küresel problemler arasında yer almaktadır. Bu nedenlerle bilimsel açıdan, ulaşım, taşımacılık, imalat, inşaat, altyapı, tarım, petrol vb. birçok endüstride karbon emisyonları, sürdürülebilirlik, verimlilik, yenilenebilir enerji kaynakları, güvenilirlik, geri dönüşüm vb. kavramların önemi artmaktadır [4-7].

Literatürde, AISI 4140 çelik alaşımın işlenmesi üzerine deneysel, sayısal, makine öğrenmesi ve istatistiksel tabanlı çalışmalar bulunmaktadır. Akbar vd., AISI 4140 çeliğin kaplamasız ve TiN kaplı kesici takımlarla yüksek hızda tormalanması sırasında kesici takımlar üzerindeki ısı dağılımını deneysel ve SEM analizi ile değerlendirmişlerdir [8]. Tzotzis vd., seramik kesici takım ile AISI-4140 çeliğin sert tormalanmasında farklı kesme parametrelerinin sürtünme kuvvetleri, ısı transferi ve takım-talaş temas alanı gerilmeleri üzerindeki etkilerini SEM analizi ile araştırmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır [9]. Rafighi, AISI 4140 çeliğin sert tormalanmasında kuru kesme koşulları altında kaplamalı karbür kesici takımlar kullanarak kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin titreşim, motor akımı, işleme gürültüsü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Ayrıca elde edilen veriler ile yüzey pürüzlülüğü tahmini yapılmıştır [10]. Gürbüz ve Gönülaçar, farklı kesme parametrelerinin ve kuru, ıslak ve minimum miktar yağlama işleme koşullarının AISI 4140 çeliğin sürdürülebilirliği ve işlenebilirliği üzerindeki etkisini deneysel ve istatistiksel olarak araştırmışlardır [11]. Makhesana vd., talaşlı imalatla sürdürülebilirliği ve enerji tasarrufunu artırmak için AISI 4140 çeliğin kuru, bitkisel yağ bazlı minimum miktar yağlama ve minimum miktar katı yağlayıcı koşullarında işleme performansını, işleme verimliliği, toplam enerji tüketimi, karbon emisyonu, yüzey pürüzlülüğü, talaş-takım arayüz sıcaklığı ve takım ömrü açısından değerlendirmişlerdir [12]. Asiltürk vd., AISI 4140 çeliğin kuru tormalanmasında farklı kesme parametrelerinin titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve akustik emisyonlar üzerindeki etkilerini deneysel ve bulanık mantık makine öğrenme algoritması ile araştırmışlardır [13]. Bagga ve diğerleri, AISI 4140 çeliğin kuru tormalanmasında karbür kesici takımlar kullanarak farklı kesme koşullarının kesici takım ömrü üzerindeki etkisini deneysel ve YSA yöntemi ile araştırmışlardır [14]. Chavoshi ve Tajdari, CBN kesici takım kullanarak AISI 4140 çeliğin sert tormalanmasında yüzey pürüzlülük değerlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile regresyon ve YSA yöntemini kullanarak yüzey pürüzlülüğü modellemesi oluşturmuşlardır [15]. Rafighi vd., kriyojenik işlemle sertliği artırılmış AISI 4140 çeliğinin sert tormalama işleminde CBN kesici takım kullanarak farklı kesme parametreleri ile ekonomik ve sürdürülebilir işleme açısından işleme performansını araştırmışlardır [16]. Literatürde talaşlı imalat sürecinde karbon emisyonlarının dikkate alındığı birçok çalışma mevcuttur. Zhou vd., yaptıkları çalışmada talaşlı imalat sürecinde işleme süresi ve işleme maliyeti faktörlerini dengelemek amacıyla karbon emisyon miktarlarını da dikkate alarak kesme parametreleri için bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir [17]. Cao vd., imalat sektöründe düşük karbonlu üretimin sağlanabilmesi

için takım tezgahlarının karbon emisyonlarının azaltılması gerektiğine odaklanmışlardır. Bunun için takım tezgahlarının yaşam döngüsünü, karbon emisyonları açısından anlamak ve nicel olarak tanımlamak gerekmektedir. Tezgah verimi, işleme süresi ve malzeme kaldırma hacmi, ekipmanlar gibi faktörleri dikkate alarak yaptıkları vaka çalışmasında enerji verimliliğinin artırılabilirdiği ve karbon emisyonlarının azaltılabildiği sonucuna ulaşmışlardır [18]. Pawanr vd., artan çevresel sorunlar sebebiyle imalat sektöründe düşük karbon emisyonlu işleminin gerekliliğine vurgu yapmaktadırlar. Çalışmalarında silindirik iş parçalarının işlenmesindeki karbon emisyonları ölçmek için ampirik bir model geliştirmişlerdir. Modelde, takım tezgahının tüm bileşenlerinin tükettiği enerji, iş parçası tüketimi, kesme sıvısı tüketimi, takım aşınması, atık talaşın geri dönüşümü gibi faktörleri dikkate almışlardır. Ayrıca yaptıkları vaka çalışmalarıyla geliştirdikleri modelin, talaşlı üretim endüstrisinde uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalardan anlaşıldığı üzere giderek ciddileşen iklim değişimi ve çevre kirliliği sebebiyle, bilimsel çalışmalarda karbon emisyonu, sürdürülebilirlik ve güvenilirlik gibi konularının önemi giderek artmaktadır [19-21].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde AISI 4140 çelik alaşımın talaşlı işlenmesinde karbon emisyon miktarı, sürdürülebilir ve çevreye duyarlı işleme konularındaki çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada, birçok endüstride yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çelik alaşımın talaşlı imalat sürecinde atmosfere salınan karbon emisyon miktarlarına odaklanılmıştır. Bu kapsamda, farklı kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametreleri kullanılarak tam faktöriyel tasarımda sert tormalama SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizlerinden elde edilen kesme gücü sonuçları ve diğer karbon emisyon faktörleri kullanılarak toplam karbon emisyon miktarları hesaplanmıştır. Sonrasında, ANOVA ve regresyon analizleri ile karbon emisyon modellemesi kurularak optimum kesme şartları belirlenmiştir.

2. SONLU ELEMANLAR METODU (SEM)

SEM analizleri AdvantEdge® yazılımı ile sürdürülmüştür. AdvantEdge® yazılımı, talaşlı imalat operasyonları için geliştirilmiş bir SEM yazılımıdır. Çözüm sırasında updated-Lagrangian yaklaşımı ve otomatik yeniden ağ oluşturma tekniğini kullanmaktadır. Çalışmada 3 boyutlu tormalama SEM analizleri sürdürülmüştür. Kesici takım gövdesi için tungsten karbür malzeme ve 2,5 µm kalınlığında TiN kaplama uygulanmıştır. Tormalama için, kesici takım gövdesi rijit yapıda ve ISO standardına uygun CCGW-120408 olarak tanımlanmıştır. Kesici takımın geometrik parametreleri, 80° köşe açılı baklava dilimi (C) profil, boşluk açısı 7°, burun yarıçapı ve kesici

kenar yuvarlama yarıçapı 0,04 mm olarak belirlenmiştir. İş parçası olarak AISI 4140 malzeme seçilmiş, kesme parametreleri olarak, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği kullanılmıştır. Her kesme parametresi için üçer seviye belirlenmiştir (Tablo 1). Talaş kaldırma işlemleri kuru işleme şartlarında sürdürülmüştür. SEM analizleri çıktısı olarak kesme güçleri elde edilmiş ve elde edilen kesme gücü verileri, karbon emisyon değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. İş parçası için; talaşlı işleme SEM analizlerinde yüksek oranda gerçekleşen gerilim, şekil değişimi, ısı üretimi vb. dinamik faktörlerin doğru anlaşılması ve çözüm doğruluğunun artırılması açısından uygun malzeme modeli olan “Johnson-Cook malzeme modeli” tanımlanmıştır. Johnson-Cook malzeme modelinin genel denklemi Eşitlik 1’de, AISI 4140 çelik için Johnson-Cook model parametreleri Tablo 2’de, mekanik özellikleri ise Tablo 3’te verilmiştir. SEM analizlerinin çözüm doğruluğu açısından iş parçasının malzeme modeli kadar ağ yapısı da son derece önemlidir. Bu nedenle, iş parçası ve kesici takım gövdelerinin ağ yapısında 4 nokta ve 12 serbestlik derecesine (dof) sahip dört yüzlü (tetrahedral) sonlu elemanlar kullanılmıştır. Maksimum düğüm sayısı 24000 olarak tanımlanmıştır. Üç boyutlu SEM modeli, ağ yapısı ve sınır şartları Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. SEM analizlerinde kullanılan kesme parametreleri

Seviye	Faktör		
	Kesme hızı, v (m/dk)	İlerleme, f (mm/dev)	Kesme derinliği, ap (mm)
1	100	0,1	0,5
2	200	0,2	1
3	300	0,3	1,5
Cevap	Karbon emisyon, CE (kgCO ₂)		

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_{\text{Elasto-Plastik}} \underbrace{\left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{Viskozite}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{ortam}}{T_{erime} - T_{ortam}}\right)^m\right]}_{\text{Termal Yumuşama}} \quad (1)$$

Burada σ , ε , $\dot{\varepsilon}$ ve $\dot{\varepsilon}_0$ sembolleri sırasıyla akış gerilimini, gerinim, gerinim oranı ve referans gerinim oranını ifade etmektedir. T kesme sıcaklığı, T_{erime} iş parçası erime sıcaklığı ve T_{ortam} ise ortam veya başlangıç sıcaklığını göstermektedir. A , B , n , C ve m sembolleri sırasıyla akma dayanımı, pekleşme modülü, pekleşme katsayısı, gerinim oranı bağımlılık katsayısı ve termal yumuşama katsayısı olarak ifade edilmektedir. SEM analizlerinde, Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır (Eşitlik 2).

$$F_f = \mu F_n \quad (2)$$

Burada F_f , μ ve F_n sembolleri sırasıyla sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve normal kuvvet olarak ifade edilmektedir. Tungsten karbür ile AISI 4140 çelik alaşım arasındaki sürtünme katsayısı önceki çalışmalar referans alınarak 0,5 olarak tanımlanmıştır [22,23].

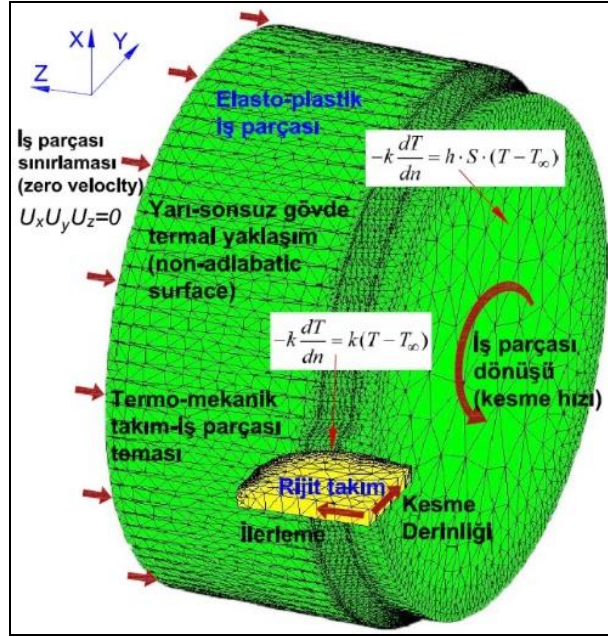
Literatürdeki deneysel ve SEM analizi çalışmalarında AISI 4140 çeliğin Johnson-Cook malzeme model parametrelerinin doğruluğu gösterilmiştir [24,26]. Yine de literatürdeki deneysel bir çalışmadan elde edilen kesme kuvveti bulguları ile SEM analizleri doğrulanmıştır [27]. Literatürdeki çalışmalarda, bu çalışma ile karşılaştırılabilecek kesme gücü verileri yer almadığı için SEM analizleri, kesme kuvveti verileri ile doğrulanmıştır. Doğrulama analizleri Tablo 4’te gösterilmiştir. Tabloda deneysel ve SEM analizi çalışmalarından elde edilen bileşke kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Hata oranları %7’nin altında elde edilmiştir. Böylece, AISI 4140 çelik için tanımlanan Johnson-Cook malzeme modelinin bu çalışma için uyumlu ve kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 2. AISI 4140 çelik alaşım için Johnson Cook malzeme model parametreleri [24,23]

A (MPa)	B (MPa)	n	T _{erime} (°C)	T _{ortam} (°C)	m	C	α (1/s)
598	768	0,2092	1416	20	0,807	0,0137	1

Tablo 3. AISI 4140 çelik alaşımın mekanik ve fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Termal iletkenlik (W/mK)	41,7
Özgül ısı (J/kgK)	361
Yoğunluk (kg/m ³)	7850
Termal genleşme katsayısı (1/°C)	1,19E-5
Young modülü (GPa)	200
Poisson oranı	0,3



Şekil 1. Tornalama işlemi için SEM modelinin sınır şartları ve ağ yapısı [25]

Tablo 4. SEM analizlerinin doğrulanması

Literatür	Kesme hızı, v (m/dk)	İlerleme, f (mm/dev)	Kesme derinliği, ap (mm)	Bileşke Kesme kuvveti, Deneysel (N)	Bileşke Kesme kuvveti, SEM (N)	Hata (%)
[27]	180	0,2	0,5	342,526	356,979	4,22
	215	0,15	0,5	266,176	284,008	6,70
	250	0,1	0,5	205,925	219,175	6,43
[22]	150	0,11	0,3	267,669	259,801	2,94
	150	0,14	0,3	316,885	303,108	4,35
	115	0,14	0,3	300,924	293,652	2,42
[28]	550	0,2	0,75	1292,720	1168,900	9,58
	700	0,3	0,75	918,218	857,886	6,57
	850	0,3	0,375	225,610	216,747	3,93

3. AISI 4140 ÇELİK ALAŞIMIN SERT TORNALANMASI İÇİN KARBON EMİSYON MODELİ

Tornalama süresindeki karbon emisyon miktarını tespit etmek için kullanılan elektrik enerjisi, iş parçası ve kesici takımın üretimi ve talaşın geri dönüşümü faktörlerinin her birinden açığa çıkan karbon emisyonlarının hesaplanması gerekmektedir. Kuru tornalama için karbon emisyonunun hesaplanması için genel denklem Eşitlik 3'te verilmiştir [29].

$$CE_{torna} = CE_{elek} + CE_{işp} + CE_{takım} + CE_{talaş} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (3)$$

Burada, CE_{torna} , CE_{elek} , $CE_{işp}$, $CE_{takım}$, ve $CE_{talaş}$ sembolleri sırasıyla kuru tornalama için toplam karbon emisyonu, kesme enerjisinden kaynaklanan karbon emisyonu, iş parçasının

üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu, kesici takımın üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ve atık talaşlardan kaynaklanan karbon emisyonu olarak ifade edilmektedir.

Kesme enerjisinden kaynaklanan karbon emisyonu Eşitlik 4'te gösterilmiştir [29]. Tornalama işleminde, işleme tezgahındaki eksen hareketleri, boşa bekleme vb. dolaylı olarak kesme enerjisini etkileyen elektrik enerji tüketimi mevcuttur. Bu çalışma SEM tabanlı yapıldığı için tezgahın elektrik tüketimi ihmal edilmiştir. Hesaplamalara SEM analizlerinden elde edilen kesme gücü dahil edilmiştir. Kesme enerjisi ve kesme süresi, sırasıyla Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da gösterilmiştir [29]. Tornalama işleminde kesme parametrelerine ek olarak kesme süresini etkileyen faktörler mevcuttur. Bu faktörler, işlenen malzeme kütlesi sabit 1 kg

olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece, iş parçası çapı $D=40\text{mm}$, işlenen iş parçasının uzunluğu $L=507\text{mm}$, toplam işleme derinliği $\Delta=2\text{mm}$ olarak tanımlanmıştır. Elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü olarak (CEF_{elek}), dünyanın farklı coğrafik bölgeleri için elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörlerinin ortalaması kullanılmıştır (Tablo 5).

$$CE_{elek} = CEF_{elek} \times E_{kesme} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (4)$$

$$E_{kesme} = P_{kesme} \times t_{kesme} \text{ (kWsa)} \quad (5)$$

$$t_{kesme} = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \Delta}{60 \cdot 1000 \cdot v \cdot f \cdot ap} \text{ (saat)} \quad (6)$$

Burada, CEF_{elek} , E_{kesme} , P_{kesme} , ve t_{kesme} sembolleri sırasıyla elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü, kesme enerjisi, kesme gücü ve kesme süresi olarak gösterilmektedir. D , L , ve Δ sembolleri ise iş parçası çapı, işleme uzunluğu (paso) ve toplam işleme derinliğin ifade etmektedir.

Tablo 5. Dünyadaki farklı coğrafik bölgeler için elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörleri

Coğrafik bölge	CEF_{elek} (kgCO ₂ /kWsa) [30,31]
Afrika	0,8665
Asya	0,5102
Avrupa	0,3619
Orta doğu	0,4804
Kuzey Amerika	0,2613
Güney Amerika	0,2088
Dünya ortalaması	0,4482

İş parçasının üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu, kesici takımın üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ve atık talaşlardan kaynaklanan karbon emisyonu sırasıyla Eşitlik 7, Eşitlik 8 ve Eşitlik 9'da gösterilmiştir [29]. Bu karbon emisyon bileşenlerinin hesaplanabilmesi için karbon emisyon faktörlerinin bilinmesi gerekir. Çelik iş parçası üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü (CEF_{isp}), karbür kesici takımların üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü ($CEF_{takım}$), atık çelik malzemenin geri dönüşümünden kaynaklanan karbon emisyon faktörü ($CEF_{talaş}$) Tablo 6'da verilmiştir. İş parçası için mühendislik çeliği üretimi ve atık talaş için mühendislik çeliği atığına en verimli geri dönüşüm yöntemi uygulandığında elde edilen karbon emisyon değerleri kabul edilmiştir. Kesici takım için hem karbür malzemesi hem de tornalama insertinin üretiminden kaynaklanan karbon emisyonları kabul edilmiştir. Karbür tornalama kesici uç kütlesi 0,015 kg olarak tanımlanmıştır [29].

İşlenen malzeme kütlesi Eşitlik 10'da verilmiştir [29].

$$CE_{isp} = CEF_{isp} \times M_{talaş} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (7)$$

$$CE_{takım} = CEF_{takım} \times M_{takım} \times \frac{t_{kesme} \cdot 60}{T} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (8)$$

$$CE_{talaş} = CEF_{talaş} \times M_{talaş} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (9)$$

$$M_{talaş} = \frac{v \cdot f \cdot ap \cdot t_{kesme} \cdot \rho \cdot 60}{10^6} \text{ (kg)} \quad (10)$$

Burada $M_{takım}$, $M_{talaş}$ ve T sembolleri sırasıyla kesici takım kütlesi, işlenmiş iş parçası kütlesi (talaş kütlesi) ve kesici takım ömrü olarak gösterilmiştir.

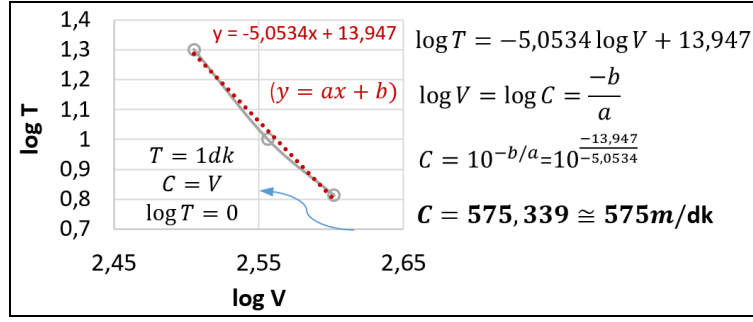
Tablo 6. İşleme malzemeleri için karbon emisyon faktörleri

Malzeme	CEF (kgCO ₂ /kg)
Mühendislik çeliği üretimi (CEF_{isp})	1,27 [32]
Karbür kesici takım üretimi ($CEF_{takım}$)	104,6 [29]
Atık mühendislik çeliği geri dönüşüm süreci ($CEF_{talaş}$)	1,58 [32]

Takım ömrü hesaplaması için genişletilmiş Taylor eşitliği kullanılmıştır (Eş. 11). AISI 4140 çelik kullanılarak yapılmış literatürdeki deneysel takım ömrü çalışmalarından elde edilen deneysel veriler üzerinde non-lineer regresyon uygulanarak genişletilmiş Taylor eşitliği elde edilmiştir (Eş. 12). Literatürde yer alan AISI 4140 çelik ile yapılmış takım ömrü çalışmalarında, farklı işleme parametreleri, farklı takım geometrileri ve takım kaplamaları bulunmaktadır (Tablo 7). Ayrıca literatürde birçok takım aşınması çalışması bulunmasına rağmen takım ömrü verileri bulunan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu sebeple bu çalışmada Taylor eşitliği (Eş. 12) oluşturulurken, AISI 4140 çelik için genel ve ortalama bir takım ömrü modeli kurulmuştur. Literatürden elde edilen takım ömrü verileri (Tablo 7) kullanılarak kurulan Non-lineer regresyon modeli sonucunda Eş. 11'deki n , m , l ve k katsayıları elde edilmiştir. Deneysel ve non-lineer regresyon modeli ile tahmin edilen takım ömrü karşılaştırmaları Şekil 3'te gösterilmiştir.

$$C = T \cdot v^n \cdot f^m \cdot ap^l \cdot k \quad (11)$$

Burada C bir dakikalık kesici takım ömrü için kesme hızıdır. C değerleri, Tablo 7'de belirtilen literatürdeki takım ömrü çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak Şekil 2'deki örnekte gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Takım ömrü modelinde (Eş. 12), Tablo 7'deki tüm C değerlerinin ortalaması olan 576 m/dk değeri kullanılmıştır.



Şekil 2. Literatürdeki takım ömrü verilerinden C değerinin hesaplanmasına bir örnek [33]

$$T = \frac{576}{(v^{3,04385} \cdot f^{-0,307951} \cdot ap^{0,149435} \cdot 6,77E-7)} \text{ (dk)} \quad (12)$$

Tablo 7. Deneysel ve non-linear regresyon yönteminden elde edilen takım ömrü karşılaştırmaları

Referans	Üretici	Tornalama ucu ISO kodu	Kaplama malzemesi	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	C hız değeri (m/dk)	Takım ömrü (dk) Deneysel	Takım ömrü (dk) Non-linear regresyon tahmini
[33]	Seco	TNMG 160408	TiN +Al2O3 +TiCN	320	0,25	1	575	20	13,15
				360	0,25	1	575	10	9,19
				400	0,25	1	575	6,5	6,67
[34]	Korloy	TNMG 220408	TiN +Al2O3 +TiCN	150	0,25	2	337	73,7	119,02
				200	0,25	2	337	15,5	49,58
				250	0,25	2	337	5,5	25,14
				300	0,25	2	337	1,72	14,43
				350	0,25	2	337	0,84	9,03
[35]	Tungaloy	SNGA 120408	Al2O3 +TiC	200	0,06	0,1	765	61	49,99
				220	0,04	0,1	765	58	33,01
				220	0,06	0,1	765	45	37,40
				220	0,08	0,1	765	34	40,87
				240	0,06	0,1	765	35	28,70
[36]	Kennametal	VBMT 160408	TiAlN	210	0,14	1	630	48,5	39,65
				260	0,14	1	630	19,5	20,70
				310	0,14	1	630	8,5	12,12
				360	0,14	1	630	7	7,69
				410	0,14	1	630	5	5,17

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

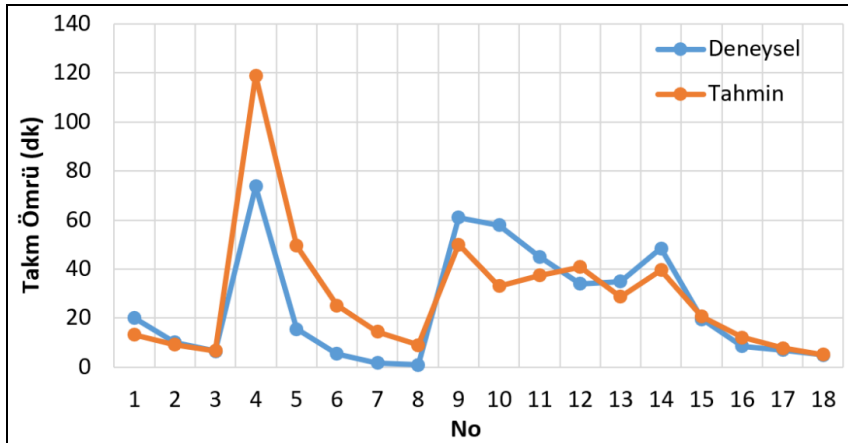
AISI 4140 çelik malzemesinin farklı kesme parametreleri kullanılarak yapılan tornalama SEM analizleri sonucunda kesme güçleri elde edilmiştir. Kesme gücü ile hesaplanan kesme enerjisi ve diğer karbon emisyon bileşenleri ile tornalama sürecindeki toplam karbon emisyonu hesaplanmıştır. Karbon emisyon değerleri, 1 kg AISI 4140 çelik malzemesinin işlenmesi sonucu elde edilen karbon emisyonudur. Tam faktöriyel düzendeki kesme

parametreleri ve tüm karbon emisyon bileşenleri açısından sonuçlar Tablo 8’de gösterilmiştir. Toplam karbon emisyonunun kesme parametrelerine göre değişimini göstermek için etki grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4). Etki grafiği incelendiğinde kesme hızı artışı ile karbon emisyonunun arttığı görülmektedir. İlerleme ve kesme derinliği artışı ile karbon emisyonları düşmüştür. Karbon emisyonunun kesme parametrelerine göre değişiminin daha net görülebilmesi için karbon emisyon bileşenlerinin değişimleri Şekil 5’te verilmiştir. İşlenen malzeme

kütlesi sabit 1 kg olduğu için iş malzemesi (CE_{isp}) ve atık talaş ($CE_{talaş}$) kaynaklı karbon emisyon değerleri sabit görülmektedir. Jiang et al. [37], Li et al. [29] ve Jiang et al. [38] yaptıkları çalışmalarda, karbon emisyon değerlerinin kesme hızı ile doğrudan ve dolaylı ilişkilerinin olduğunu raporlamışlardır. Aslında kesme hızı değişimi karbon emisyonlarının yanında bir çok faktörü etkiler. Kesme hızı artışıyla, birim zamanda kaldırılan talaş miktarı diğer bir deyişle talaş kaldırma oranı artar. Kesme hızı artışı ile iş milinin harcadığı enerji miktarı da artar. Bu durumlar karbon emisyonlarının artmasını destekler. Diğer yandan artan kesme hızıyla kesme süresi kısılacağından iş milinin enerji tüketimi de azalır. Bu ise karbon emisyonlarını önemli seviyede azaltıcı etkiye sebep olur. Bu durumların aksine kesme hızı artışı ile takım ömrünün azaldığı bilinen bir olgudur. Takım ömrünün azalması ile kesici takım üretiminden kaynaklanan karbon emisyon bileşeni ($CE_{takım}$) belirgin şekilde artar. Takım ömrü, karbon emisyon değerleri üzerinde baskın rol oynamaktadır [37,38,29]. Kesme hızı ve karbon emisyonu ilişkisini özetlemek gerekirse tormalama sürecinde tüketilen elektrik enerjisi ile kesme süresi ters orantılı olduğu için kesme enerjisinden kaynaklanan karbon emisyon bileşeninin (CE_{elek}) toplam karbon emisyonu üzerindeki etkisi belirgin değildir. Diğer yandan kesme hızı artışı ile takım ömrü azaldığı için kesici takım üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ($CE_{takım}$) değerleri artmıştır (Şekil 5). Bu sebeple kesme hızı artışı ile toplam karbon emisyonu da artmıştır (Şekil 4). İlerleme ve kesme derinliği artışı ile karbon emisyon değerlerinde belirgin azalma gözlenmiştir (Şekil 4). İlerleme ve kesme derinliği arttırıldığında kesme süresi azalır. Kesme süresi azalınca kesici takım daha az aşınacağı için takım ömrü artar. Böylece kesici takım üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ($CE_{takım}$) azalır (Şekil

5). Sonuçta ilerleme ve kesme derinliği artışı ile toplam karbon emisyonunu azaltır (Şekil 4).

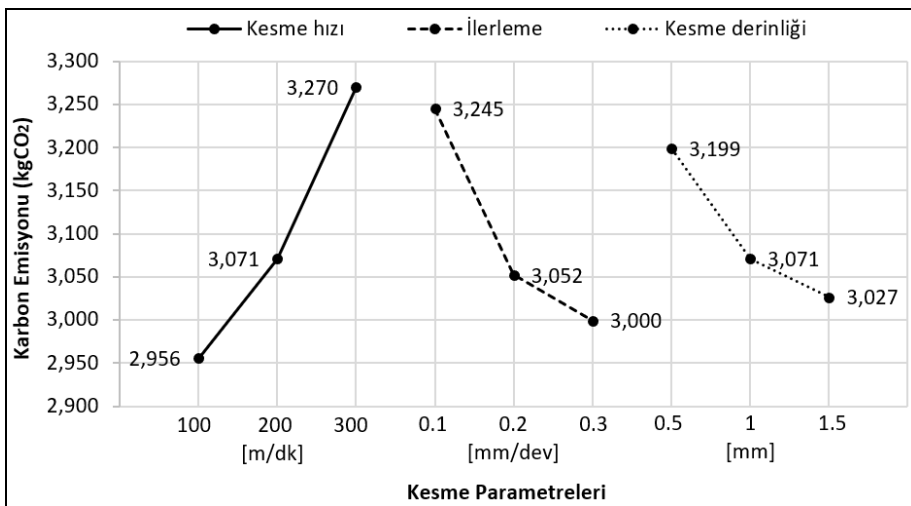
Karbon emisyonu açısından kesme parametrelerinin etki seviyelerinin anlaşılabilmesi için ANOVA analizi ve AISI 4140 çeliğin sert tormalanmasındaki karbon emisyon modellemesi için regresyon analizi yapılmıştır. Analizler %95 güven seviyesi ile yapılmıştır. ANOVA analiz sonuçları, Tablo 9'da gösterilmiştir. Tüm P değerlerinin %5 ($P<0,05$) oranından küçük çıktığı görülmektedir. Buna ek olarak faktörlerin F değerleri ile 0,05'e eşit anlamlılık veya %95 güven seviyesindeki kritik F değerleri de karşılaştırılmıştır. Tüm F değerleri, kritik F değerinden ($F_{0,5,2,26}=3,369$, $F_{0,5,4,26}=2,743$, $F_{0,5,6,26}=2,474$, $F_{0,5,12,26}=2,220$) büyük çıkmıştır. Tüm P ve F değerinin incelemesi sonucunda bağımsız faktörlerin ve seviyelerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu anlaşılmıştır. Karbon emisyonu açısından en etkili kesme parametresinin %37,58 oranla kesme hızı olduğu görülmektedir. Regresyon analizi sonucu elde edilen model özeti incelendiğinde R^2 , $R^2(\text{adj})$ ve $R^2(\text{pred})$ değerleri sırasıyla %97,88, %93,11 ve %75,84 olarak elde edilmiştir. Buradan, kurulan modelin SEM sonuçları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Regresyon analizi sonucu oluşturulan matematiksel model Eşitlik 13'te verilmiştir. Regresyon eşitliği, AISI 4140 çelik alaşımın sert tormalanma işleminde birim kütle iş parçası başına açığa çıkan karbon emisyon miktarını göstermektedir. Ancak karbon emisyon hesaplamasında kuru tormalama işlemi yapılmış olup, takım tezgah bileşenlerinin elektrik tüketim miktarları hesaplamaya dahil edilmemiştir. Eşitlik 13, AISI 4140 çelik alaşımın sert tormalanması işlemi için gelecek çalışmalarda kullanılabilir ancak ihmal edilen faktörler göz ardı edilmemelidir.



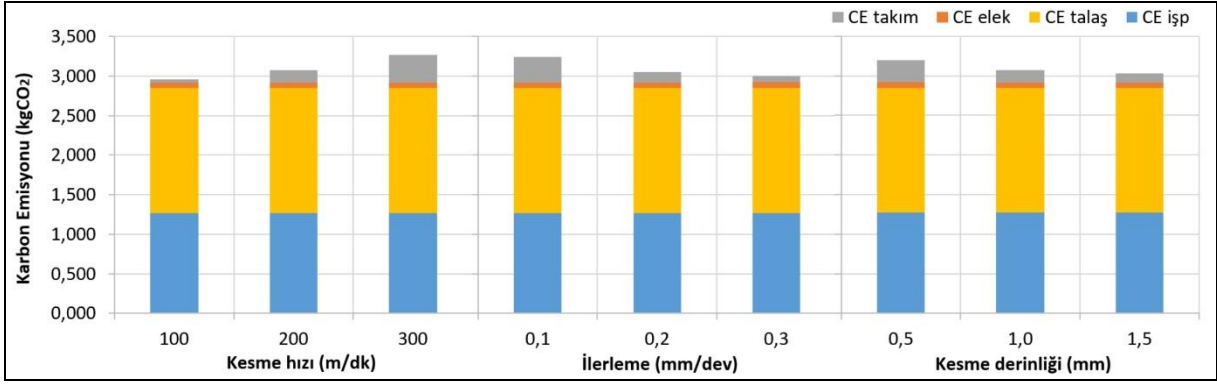
Şekil 3. DeneySEL ve non-lineer regresyon sonuçları açısından takım ömrü karşılaştırma grafiği

Tablo 8. Tam faktöriyel SEM analizleri ve hesaplanan karbon emisyon miktarları

No	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	Kesme gücü (kW)	Kesme süresi (saat)	Takım ömrü (dk)	Kesme enerjisi (kWsa)	CE _{elek} (kgCO ₂)	CE _{işp} (kgCO ₂)	CE _{takım} (kgCO ₂)	CE _{ortal} (kgCO ₂)	CE _{ortal} (kgCO ₂)
1	100	0,1	0,5	0,335	0,425	379,3	0,142	0,064	1,270	0,105	1,580	3,019
2	100	0,1	1	0,661	0,212	342,0	0,140	0,063	1,270	0,058	1,580	2,971
3	100	0,1	1,5	0,995	0,142	321,9	0,141	0,063	1,270	0,041	1,580	2,954
4	100	0,2	0,5	0,756	0,212	469,6	0,161	0,072	1,270	0,043	1,580	2,965
5	100	0,2	1	1,434	0,106	423,4	0,152	0,068	1,270	0,024	1,580	2,942
6	100	0,2	1,5	2,106	0,071	398,5	0,149	0,067	1,270	0,017	1,580	2,934
7	100	0,3	0,5	1,162	0,142	532,1	0,164	0,074	1,270	0,025	1,580	2,949
8	100	0,3	1	2,221	0,071	479,7	0,157	0,070	1,270	0,014	1,580	2,934
9	100	0,3	1,5	3,420	0,047	451,5	0,161	0,072	1,270	0,010	1,580	2,932
10	200	0,1	0,5	0,668	0,212	46,0	0,142	0,064	1,270	0,435	1,580	3,348
11	200	0,1	1	1,304	0,106	41,5	0,138	0,062	1,270	0,241	1,580	3,153
12	200	0,1	1,5	1,963	0,071	39,0	0,139	0,062	1,270	0,171	1,580	3,083
13	200	0,2	0,5	1,462	0,106	56,9	0,155	0,070	1,270	0,175	1,580	3,095
14	200	0,2	1	2,768	0,053	51,3	0,147	0,066	1,270	0,097	1,580	3,013
15	200	0,2	1,5	4,203	0,035	48,3	0,149	0,067	1,270	0,069	1,580	2,986
16	200	0,3	0,5	2,206	0,071	64,5	0,156	0,070	1,270	0,103	1,580	3,023
17	200	0,3	1	4,387	0,035	58,2	0,155	0,070	1,270	0,057	1,580	2,977
18	200	0,3	1,5	6,560	0,024	54,7	0,155	0,069	1,270	0,041	1,580	2,960
19	300	0,1	0,5	1,013	0,142	13,4	0,143	0,064	1,270	0,995	1,580	3,909
20	300	0,1	1	1,904	0,071	12,1	0,135	0,060	1,270	0,552	1,580	3,462
21	300	0,1	1,5	2,975	0,047	11,4	0,140	0,063	1,270	0,391	1,580	3,304
22	300	0,2	0,5	2,262	0,071	16,6	0,160	0,072	1,270	0,402	1,580	3,324
23	300	0,2	1	4,082	0,035	14,9	0,144	0,065	1,270	0,223	1,580	3,138
24	300	0,2	1,5	6,297	0,024	14,1	0,149	0,067	1,270	0,158	1,580	3,074
25	300	0,3	0,5	3,407	0,047	18,8	0,161	0,072	1,270	0,237	1,580	3,159
26	300	0,3	1	6,426	0,024	16,9	0,152	0,068	1,270	0,131	1,580	3,049
27	300	0,3	1,5	9,917	0,016	15,9	0,156	0,070	1,270	0,093	1,580	3,013



Şekil 4. Kesme parametrelerinin karbon emisyonu üzerindeki etki grafiği



Şekil 5. Kesme parametrelerine bağlı olarak karbon emisyonu bileşenlerindeki değişimler

Tablo 9. Kesme parametrelerinin karbon emisyonu üzerindeki etkisi için ANOVA sonuçları

Kaynak	DF	SS	MS	F Değeri	P Değeri	Katkı %	Yorum
Model	18	1,18776	0,065987	20,51	0,000	97,88	
Lineer	6	0,90065	0,150108	46,65	0,000	74,22	Anlamlı
v	2	0,45607	0,228033	70,87	0,000	37,58	Anlamlı
f	2	0,30053	0,150266	46,7	0,000	24,77	Anlamlı
ap	2	0,14405	0,072024	22,38	0,001	11,87	Anlamlı
2 Yönlü							
Etkileşimler	12	0,28712	0,023927	7,44	0,004	23,66	Anlamlı
v×f	4	0,16524	0,04131	12,84	0,001	13,62	Anlamlı
v×ap	4	0,07253	0,018132	5,64	0,019	5,98	Anlamlı
f×ap	4	0,04935	0,012338	3,83	0,050	4,07	Anlamsız
Hata	8	0,02574	0,003218				
Toplam	26	1,21351					
Model Özeti				R ² (adjusted)= %93,11			
S= 0,056725				R ² (predicted)= %75,84			
R ² = %97,88							

$$CE_{torna} = 2,701 + (0,005263 \times v) - (0,201 \times f) - (0,113 \times ap) - (0,01104 \times v \times f) - (0,001480 \times v \times ap) + (1,183 \times f \times ap) \quad (13)$$

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AISI 4140 çelik alaşımın sert tormalanmasında sürdürülebilirliği artırmak açısından karbon emisyon miktarı araştırılmıştır. Farklı kesme parametreleri kullanılarak yapılan üç boyutlu SEM analizleriyle kesme güçleri elde edilmiştir. Kesme güçleri ve diğer faktörler ile toplam karbon emisyon miktarları hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1 kg kütleli AISI 4140 çelik alaşımın sert tormalanma süreci için en düşük karbon emisyonu, 2,932 kgCO₂ olarak 100 m/dk kesme hızı, 0,3 mm/dev ilerleme ve 1,5 mm talaş derinliği parametrelerinde elde edilmiştir.

- En yüksek karbon emisyonu, 3,909 kgCO₂ olarak 300 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme ve 0,5 mm talaş derinliği parametrelerinde elde edilmiştir.
- Kesme parametreleri değişiminin karbon emisyonu üzerindeki etkileri sırasıyla %37,58 oranla kesme hızı, %24,77 oranla ilerleme ve %11,87 oranla talaş derinliği olduğu anlaşılmıştır.
- Kurulan regresyon modelinin karbon emisyonu sonuçlarına ile %97,88 uyumlu olduğu görülmüştür.
- Karbon emisyon bileşenleri açısından; toplam karbon emisyon miktarı ortalamasının yaklaşık %51'ini atık talaş ($CE_{talaş}$) kaynaklı karbon emisyon bileşeni ve yaklaşık %41'ini iş malzemesi ($CE_{iş}$) kaynaklı karbon emisyon bileşeninin oluşturduğu anlaşılmıştır.

- Küresel iklim değişimi ve talaşlı imalatla sürdürülebilirlik açısından mühendislik malzemelerinin üretimi ve geri dönüşümü süreçlerindeki atmosfere salınan karbon miktarlarının azaltılması için endüstrilerin bu konu üzerindeki dikkati artırması gerekmektedir.

Kongre Bilgisi: Bu çalışma, 1-3 Kasım 2024 tarihleri arasında gerçekleşen 12. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu'nda (UTIS 2024) tam metin tebliğ olarak sunulmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Fonlama Bilgileri: Bu çalışma herhangi bir fon tarafından desteklenmemiştir.

Yazar katkısı: Yazarlar, çalışmanın tasarlanması, verilerin toplanması, sonuçların analizi ve yorumlanması ve makalenin hazırlanması ile ilgili sorumluluklarını onaylamaktadır.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Bu çalışma sırasında üretilen ve/veya analiz edilen veriler kamuya açık değildir, ancak veriler makul bir talep üzerine ilgili yazar tarafından sağlanabilir.

INVESTIGATION OF CARBON EMISSION DURING HARD TURNING OF AISI 4140 STEEL WITH FEM AND REGRESSION METHODS

In this study, carbon emission rates during hard turning of AISI 4140 steel alloy, which is widely preferred in the industry due to its high mechanical properties, were investigated. In this context, firstly, Finite Element Method (FEM) simulations were performed with different cutting speed, feed and cutting depth parameters for turning operations. The total carbon emission values were calculated by using the cutting forces and other carbon emission components obtained from the FEM simulations. Then, the carbon emission model was established by Analysis of Variance (ANOVA) and regression analysis. As a result, the lowest carbon emission amount was obtained at 100 m/min cutting speed, 0.3 mm/rev feed rate and 1.5 mm cutting depth. The most effective cutting parameter on carbon emission was found to be cutting speed with a rate of 37.58%. In addition, about 51% of the total carbon emission amount was found to be waste chips and about 41% was found to be carbon emission components from the workpiece.

This study was presented as a full text paper at the 12th International Congress on Machining (UTIS 2024) held between 1-3 November 2024.

Keywords: Machining, Hard turning, AISI 4140, FEM, ANOVA, Carbon emission

KAYNAKLAR

1. Khan, W.A., Hayat, Q., Ahmed, F., Ali, M., Zain-ul-Abdein, M. 2023. "Comparative Assessment of Mechanical Properties and Fatigue Life of Conventional and Multistep Rolled Forged Connecting Rods of High Strength AISI/SAE 4140 Steel", Metals, Volume 13, Issue 6, Pages 1035.
2. Sun, X., Liu, G., Liang, X., Tong, S. 2023. "Superior Comprehensive Mechanical Properties of a Low-Carbon Medium Manganese Steel for Replacing AISI 4330 Steel in the Oil and Gas Industry", Materials, Volume 16, Issue 2, Pages 490.
3. Mahmood, N., Hussein, A., Hasan, A.S., Ali, O. Effect of AISI 4140 carbon steel heat treatments on specified mechanical properties. In: AIP Conference Proceedings, 2022. vol 1. AIP Publishing,
4. Yadav, P., Singh, J., Srivastava, D.K., Mishra, V. (2021) Environmental pollution and sustainability. In: Environmental sustainability and economy. Elsevier, pp 111-120
5. de la Hoz, J., Martín, H., Guerrero, J.M. 2023. "Technologies and policies for decarbonisation of the industrial and transport sectors", Frontiers in Energy Research, Volume 11, Issue, Pages 1200837.
6. Akšamović, A., Odžak, S. 2023. "Tehnološki napredak i klimatske promjene–tema u obrazovanju inženjera/technological progress and climate change–topic in engineering education", Pregled: časopis za društvena pitanja/Periodical for social issues, Volume, Issue 1, Pages 91-111.
7. Kaygusuz, K. 2021. "Energy efficiency and renewable energy sources for industrial sector", Energy Services Fundamentals and Financing, Volume, Issue, Pages 213-238.
8. Akbar, F., Mativenga, P., Sheikh, M. 2008. "An evaluation of heat partition in the high-speed turning of AISI/SAE 4140 steel with uncoated and TiN-coated tools", Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 222, Issue 7, Pages 759-771.
9. Tzotzis, A., Efklidis, N., Tzetzis, D., Kyratsis, P. FEM-based investigation on machining forces and temperatures induced during AISI-4140 hard turning. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022. vol 1. IOP Publishing, p 012043

10. Rafighi, M. 2022. "Effects of shallow cryogenic treatment on surface characteristics and machinability factors in hard turning of AISI 4140 steel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Volume 236, Issue 5, Pages 2118-2130.
11. Gürbüz, H., Gönülaçar, Y.E. 2022. "Experimental and statistical investigation of the effects of MQL, dry and wet machining on machinability and sustainability in turning of AISI 4140 steel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Volume 236, Issue 5, Pages 1808-1823.
12. Makhesana, M., Baravaliya, J., Parmar, R., Mawandiya, B., Patel, K. 2021. "Machinability improvement and sustainability assessment during machining of AISI 4140 using vegetable oil-based MQL", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Volume 43, Issue, Pages 1-14.
13. Asiltürk, İ., Kuntoğlu, M., Binali, R., Akkuş, H., Salur, E. 2023. "A Comprehensive Analysis of Surface Roughness, Vibration, and Acoustic Emissions Based on Machine Learning during Hard Turning of AISI 4140 Steel", *Metals*, Volume 13, Issue 2, Pages 437.
14. Bagga, P.J., Makhesana, M.A., Darji, P.P., Patel, K.M., Pimenov, D.Y., Giasin, K., Khanna, N. 2022. "Tool life prognostics in CNC turning of AISI 4140 steel using neural network based on computer vision", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 123, Issue 9-10, Pages 3553-3570.
15. Zare Chavoshi, S., Tajdari, M. 2010. "Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool", *International journal of material forming*, Volume 3, Issue, Pages 233-239.
16. Rafighi, M., Özdemir, M., Das, A., Das, S.R. 2022. "Machinability investigation of cryogenically treated hardened AISI 4140 alloy steel using CBN insert under sustainable finish dry hard turning", *Surface Review and Letters*, Volume 29, Issue 04, Pages 2250047.
17. Zhou, G., Lu, Q., Xiao, Z., Zhou, C., Tian, C. 2019. "Cutting parameter optimization for machining operations considering carbon emissions", *Journal of Cleaner Production*, Volume 208, Issue, Pages 937-950.
18. Cao, H., Li, H., Cheng, H., Luo, Y., Yin, R., Chen, Y. 2012. "A carbon efficiency approach for life-cycle carbon emission characteristics of machine tools", *Journal of Cleaner Production*, Volume 37, Issue, Pages 19-28.
19. Pimenov, D.Y., Mia, M., Gupta, M.K., Machado, Á.R., Pintaude, G., Unune, D.R., Khanna, N., Khan, A.M., Tomaz, Í., Wojciechowski, S. 2022. "Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 166, Issue, Pages 112660.
20. Khanna, N., Agrawal, C., Dogra, M., Pruncu, C.I. 2020. "Evaluation of tool wear, energy consumption, and surface roughness during turning of inconel 718 using sustainable machining technique", *Journal of materials research and technology*, Volume 9, Issue 3, Pages 5794-5804.
21. Ghosh, S., Rao, P. 2019. "Comparison between sustainable cryogenic techniques and nano-MQL cooling mode in turning of nickel-based alloy", *Journal of cleaner production*, Volume 231, Issue, Pages 1036-1049.
22. Öztürk, E. 2022. "FEM and statistical-based assessment of AISI-4140 dry hard turning using micro-textured insert", *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 81, Issue, Pages 290-300.
23. Ma, J., Yong, Y., Lei, S. 3D FEM investigation of the effects of nose radius and edge radius on turning of AISI 4140. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2012. American Society of Mechanical Engineers, pp 1085-1089
24. Lotfi, M., Amini, S., Aghaei, M. 2018. "Tool wear modeling in rotary turning modified by ultrasonic vibration", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 87, Issue, Pages 226-238.
25. Aydin, K. 2023. "Investigating cutting force and cutting power when turning AA6082-T4 alloy at cutting depths smaller than tool nose radius", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Volume 26, Issue 4, Pages 972-982.
26. Arrazola, P., Ugarte, D., Dominguez, X. 2008. "A new approach for the friction identification during machining through the use of finite element modeling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Issue 2, Pages 173-183.
27. Özdemir, M., Şahinoğlu, A., Rafighi, M., Yilmaz, V. 2022. "Analysis and optimisation of the cutting parameters based on machinability factors in turning AISI 4140 steel", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Volume 61, Issue 4, Pages 407-417.
28. Sivaramakrishnaiah, M., Kumar, P.N., Janardhana, G.R. 2015. "Prediction of cutting forces in turning of AISI-4140 steel using

- FEA and experimental validation", i-Manager's Journal on Mechanical Engineering, Volume 6, Issue 1, Pages 24-33.
29. Li, C., Tang, Y., Cui, L., Li, P. 2015. "A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems", Journal of Intelligent Manufacturing, Volume 26, Issue, Pages 911-922.
30. Carbon_Footprint (2022) 2022 Grid Electricity Emissions Factors v0.1 – February 2023. Carbon Footprint. https://www.carbonfootprint.com/docs/2023_02_emissions_factors_sources_for_2022_electricity_v10.pdf. Accessed 20.09.2023
31. Climate_Transparency (2022) Climate Transparency 2022 Report. Climate Transparency. <https://www.climate-transparency.org/>. Accessed 20.09.2023
32. Circular_Ecology (2019) The Inventory of Carbon and Energy (ICE) database v3.0 - November 2019. Circular Ecology. <http://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. Accessed 19.09.2023
33. Motorcu, A., Şahin, Y. 2004. "AISI 4140 Çeliğinin Farklı Kaplamalı Karbür Ve Sermet Kesici Takımlarla İşlenebilirliği", On Birinci Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Antalya, Türkiye, Volume, Issue, Pages 13-15.
34. Karayel, B., Nalbant, M. 2014. "Ç4140 Malzemesinin Tornalamasında İlerleme, Kesme Hizi Ve Kesici Takimin Yüzey Pürüzlülüğü, Takim Ömrü Ve Aşınmaya Etkileri", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Volume 11, Issue 3, Pages 11-26.
35. Paengchit, P., Saikaew, C. 2023. "Simulation of the influence of cutting speed and feed rate on tool life in hard turning of AISI 4140 steel", Materials Science-Poland, Volume 41, Issue 2, Pages 311-324.
36. Khrais, S.K., Lin, Y. 2007. "Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel", Wear, Volume 262, Issue 1-2, Pages 64-69.
37. Jiang, Z., Gao, D., Lu, Y., Kong, L., Shang, Z. 2021. "Quantitative analysis of carbon emissions in precision turning processes and industrial case study", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Volume 8, Issue, Pages 205-216.
38. Jiang, Z., Gao, D., Lu, Y., Liu, X. 2019. "Optimization of cutting parameters for trade-off among carbon emissions, surface roughness, and processing time", Chinese journal of mechanical engineering, Volume 32, Issue, Pages 1-18.

Buse Ortaç Baştekli^{ID}

Hacı Abdullah Taşdemir^{ID}

Emin Orhun Baştekli*^{ID}

Batu Yüzbaşigil^{ID}

Seyfullah Hatipoğlu^{ID}

İstanbul Teknik Üniversitesi,
Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği,
İstanbul/Türkiye

Lazer Kesme Hızının Tungsten Karbür Malzemede Kesme Derinliği Üzerine Olan Etkisi

Talaşlı imalat malzemelere uygulanan en yaygın imalat yöntemlerinden biridir. Talaşlı imalatla talaş kaldırma işlemi genellikle bir kesici uç vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kesici uçlar, işlenen malzemeden kayma deformasyonu ile malzeme kaldırarak yeni bir yüzey oluştururlar. Bu işlem neticesinde kesici uç zamanla aşınır ve kullanılamaz hale gelir. Kesici uç performansının iyileştirilmesi ve kesici takım ömrünün artırılması ile ilgili çalışmalar son yıllarda lazer ışınları ile tekstür oluşturma üzerine yoğunlaştırılmıştır. Yüzeylere lazer ışınları ile tekstür açma işlemlerinde malzemeye çeşitli gravürler açılarak bu gravürlerin bir desen oluşturması ve malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirmesi beklenmektedir. Yüzeylerde lazer ışınları ile tekstür oluşturma işlemlerinin mekanizmasının anlaşılabilmesi için lazer işleme parametrelerinin malzeme üzerinde bıraktığı etkilerin irdelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da, en çok kullanılan kesici uç malzemelerinden biri olan tungsten karbür malzemenin üzerine farklı lazer kesme hızları ile gravürler açılmış ve lazer kesme hızı ile kesme derinliği arasındaki ilişki gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer ışınları ile tekstür oluşturma, lazer kesme hızı, tungsten karbür.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 25 Şubat 2025

Kabul: 16 Ağustos 2025

*Sorumlu yazar: Emin Orhun Baştekli

E-mail: orhun-bastekli@yandex.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1646833>

1. GİRİŞ

Son yıllarda yüzey tekstürü oluşturma çalışmaları oldukça hız kazanmıştır [1]. Yüzeylerde tekstür oluşturma işlemlerinin amacı adhezyonu ve sürtünen yüzeylerin temas alanını azaltmak, sürtünme katsayısını azaltmak ve aşınma sonucu olan partikülleri toplamaktır [2]. Tribolojik özellikleri iyileştirmesi sebebi ile birbiri ile temas halinde çalışan sistemlerde kullanım yeri bulmuştur. Kullanım alanlarına örnek olarak; piston-silindir sistemleri, kesici takımlar, yataklar, hidrolik motorlar, protezler ve diş implantları verilebilir. Yüzey tekstürü oluşturma tekniklerinin arasında lazer ışınlarından yararlanma, elektroerozyon ile işleme, kimyasal dağlama, kumlama, mikro taşlama ve mikro döküm gibi yöntemler yer almaktadır [3]. Bu yöntemler arasında lazer ışınları ile tekstür oluşturma işlemi, sahip olduğu yüksek doğruluk, hızlı işlem kabiliyeti ve karmaşık yüzeylerin oluşturulabilmesine imkan verme özellikleri sebebi ile tercih sebebi olmaktadır [4]. Lazer ışınları yardımıyla yüzey tekstürü oluşturma işlemi çeşitli kesici uçlara uygulanabilmektedir. Literatürde matkap uçlarına [5, 6], torna plakalarına [7] ve frezeleme takımlarına [8] uygulanmış çalışmalar mevcuttur.

Malzeme yüzeyine açılan tekstürler farklı şekil ve geometride olabilmektedir. Tekstürler; noktalar şeklinde [9, 10], paralel ya da dik çizgiler şeklinde [11, 12], çeşitli geometrik şekillerin ya da harflerin oluşturduğu gravürler şeklinde [13, 14] olabileceği gibi biyomimetik şekillerde [15, 16] oluşturulabilir.

Lazer makineleri ile yapılan malzeme yüzeyinden talaş kaldırma işlemlerinde, çok kısa sürelerde çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığından malzeme özelinde lazer işleme parametrelerinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Lazer gücü, lazer kesme hızı, frekans ve spot çapı gibi lazer parametrelerinin seçilmesi gereken optimum değerleri malzemeden malzemeye değişiklik gösterebilmektedir. Uygun lazer parametrelerinin tam olarak malzeme üzerinde etkisinin bilinmemesi halinde, lazer ile işleme sonrası elde edilen yüzey pürüzlülüğü, metalürjik yapı ve mekanik özelliklerinin istenmeyen değer aralıklarında olması kaçınılmazdır. Lazer ışınları ile malzemenin üzerinde açılan gravürler bir araya gelerek yüzey tekstürünü oluştururlar. Her oluşturulan tekstür kendi içinde bulunduğu ortam ve

çalışma koşullarına göre performans göstermektedir. Yüzey tekstürlerinin istenilen boyutlarda ve boyut hassasiyetlerinde, malzemenin kimyasal özelliklerini değiştirmeden açılabilmesi için öncelikli olarak lazer parametrelerinin malzemeye olan etkilerinin belirlenmesi gerekir. Bu çalışmanın amacı da tungsten karbür malzeme üzerinde lazer ışınlarının etkisini farklı kesme hızları ile belirlemektir. Çalışma kapsamında malzemeye farklı lazer kesme hızlarında açılan gravürlerin derinlikleri ölçülmüştür. Yapılan çalışmanın, ileride gerçekleştirilmesi planlanan kesici takım üzerine lazer ışınları ile tekstür oluşturma çalışmalarına girdi oluşturması hedeflenmiştir.

Bertolete ve ark. [17] gerçekleştirdikleri çalışmada, tungsten karbür kesici takımların üzerine mikro kanallar şeklinde gravürler açarak yüzeyinde tekstür oluşturulmuş bu kesici takımların martenzitik paslanmaz çelik işleme performansına olan etkisini incelemişlerdir. İşlem sırasında 785 nm dalga boyuna sahip lazer makinesinde 15 μ J enerji ve 4 kHz frekans değerinde çalışmışlardır. Gravürlerin açılmasında 3 mm/s lazer kesme hızı tercih etmişler ve sonuç olarak ortalama 32 mikron derinliğe sahip gravürler elde etmişlerdir. Sonuç olarak işleme veriminin arttığı ve tribolojik özelliklerin iyileştiği gözlemlenmiştir. Schwanekamp ve ark. [18] gerçekleştirdikleri çalışmada, güç yoğunluk dağılımı Gauss eğrisine uyan, odak çapı 70 μ m olan Nd-YAG lazer makinesi kullanmışlardır. Deneylerde lazer gücü 50 W ile 200 W arasında, lazer kesme hızı ise 25 mm/s ile 200 mm/s arasında seçilmiştir. Bunun sonucunda, tungsten karbür malzemede gravür açmak için gerekli olan kritik P/Vs (Lazer gücü/Lazer kesme hızı) değerinin 0,25-8 J/mm aralığında olması gerektiği sonucuna varmışlardır. P/Vs oranının bu değer aralığında olmadığı lazer işleme operasyonlarının malzeme üzerinde herhangi bir etki oluşturmadığı görülmüştür.

Marimuthu ve ark. [19] yaptıkları çalışmada, pikosaniye lazeri ve tungsten karbür blokları üzerinde çalışmışlardır. Lazer parametresi olarak, lazer gücü maksimum 300 W ve frekans 0,6-40 MHz değerlerini tercih etmişlerdir. Çalışmanın sonunda, kesme derinliği ile kesme hızları arasındaki ilişki hakkında yorum yapmışlardır. 2,30-9,6 mm/s aralığında seçilen lazer kesme hızlarının, kesme derinliği üzerinde düşük bir etkisinin olduğu ancak malzemeden talaş kaldırma konusunda etkili hız aralığı olduğu tespit edilmiştir. Teicher ve ark. [20] yaptıkları çalışmada, yüzeylere direkt lazer ışını interferansı ile tekstür açma yöntemini kullanmışlardır. Tungsten karbür ile yapılan çalışmalarda frekans değeri 20 kHz seçilmiş olup gravürler 2,46 J/cm² enerji yoğunluğu ile açılmıştır. 2,2 mikron derinliğe ve 5 mikron aralığa sahip gravürler malzemenin tekstür yapısını oluşturmuştur. Bu araştırmada, tekstürleme için gerekli kesme hızı değeri paylaşılmamış olsa da sabit

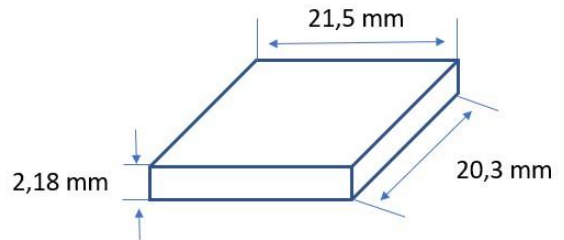
bir enerji yoğunluğu değeri ile işlemin stabil olarak gerçekleştirilmiş olması, sabit güce sahip lazer makinasının sabit bir kesme hız değerinde çalıştırıldığını göstermektedir.

Shin ve ark. [21] gerçekleştirdikleri çalışmada, femtosaniye lazeri ile %10 Co içeren tungsten karbür malzemede delik açabilmek için gerekli olan eşik enerji yoğunluk değerini araştırmışlardır. 1026 nm dalga boyunda ve 100 kHz frekans değerinde gerçekleştirdikleri deneylerde karbür plakalarda delik delme/talaşlı işleme yapabilmek için gerekli eşik enerji yoğunluğu değerini 0,33 J/cm² olarak tespit etmişlerdir. Ding ve ark. [22] yaptıkları araştırmada, femtosaniye lazeri vasıtasıyla 50-200 mm/s kesme hızı aralığında, 1,92-11,20 W ortalama lazer güç çıkışı değerlerinde, WC-Co malzemeye çeşitli boyutlarda gravürler açmışlar ve yüzeyin kesme derinlikleri ile pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak lazer tarama hızları ile kaldırılan talaş miktarı arasındaki ilişkiyi grafiğe çevirerek gelecek çalışmalar için anlamlı hale getirmişlerdir.

Çalışmanın amacı, 50W ortalama çıkış gücü, 50 mikron sabit spot çapı, 50 kHz sabit frekans ve lazer kesme hızı 1-128 mm/s aralığı parametreleri ile, 1064 nm dalgaboylu, Q-switch, nanosaniye atımlı lazer makinesinde, tungsten karbür malzeme üzerinde açılan gravürlerin kesme derinliklerinin araştırılmasıdır. Ayrıca, çalışmanın tungsten karbür esaslı kesici uçların yüzeylerinin lazer ile tekstürlenerek kesme performanslarının iyileştirilmesi konusundaki gelecek çalışmalara temel oluşturması hedeflenmiştir. Çalışmanın özgünlüğü, kullanılan lazer makinasının teknik özelliklerinin ve seçilen lazer parametrelerinin mevcut çalışmalardan farklı olmasıdır.

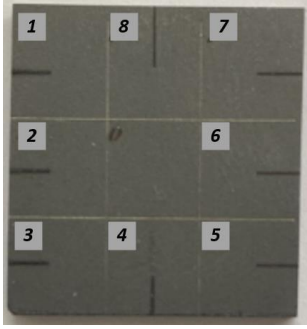
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Deneylerde 2,18 mm kalınlığa, 20,3 mm ve 21,5 mm kenar uzunluklarına sahip, %8,82 kobalt içeren, çizimi Şekil 1'de görülen tungsten karbür plaka kullanılmıştır. Plaka, standart üretim prosedürlerine göre, 5 eksen taşlama operasyonundan sonra kesici uç (insert) olarak piyasaya sunulması planlanan yarı mamül malzemedir.



Şekil 1: Tungsten karbür plakaya ait geometrik çizim.

Plakanın üzerine Şekil 2’de görüldüğü gibi numaralandırma yapılmıştır. Her numara alanına farklı lazer kesme hızı ile gravür açma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2: Numaralandırılmış ve farklı lazer ilerleme hızlarında işlenmiş tungsten karbür plaka.

Lazer ile yüzey gravürü oluşturma işlemlerinde 1064 nm dalga boyuna sahip darbe modlu-QB anahtarlamalı 50 W Nd:YAG lazer kaynağı (Wuhan Raycus Fiber Laser Technologies Co., Ltd.) kullanılmıştır. Lazer makinesinin güç yoğunluk dağılımı Gauss eğrisine (TEM 00) uymaktadır. Lazer ile işleme esnasında herhangi bir soğutma işlemi uygulanmamış işlemler atmosferik koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan Nd:YAG fiber lazer makinesinin teknik özellikleri Tablo 1’de, makineye ait alt bileşenlerin gösterildiği şematik çizim ise Şekil 3’te görülmektedir.

Tablo 1: Fiber lazer makinesinin özellikleri.

Nd:YAG Fiber Lazer Makinesi Teknik Özellikleri	
Lazer Tipi	Nanosaniye Lazeri
Ortalama Çıkış Gücü (W)	50
Dalga boyu (nm)	1060~1085
Darbe süresi (ns)	120~150@50 kHz

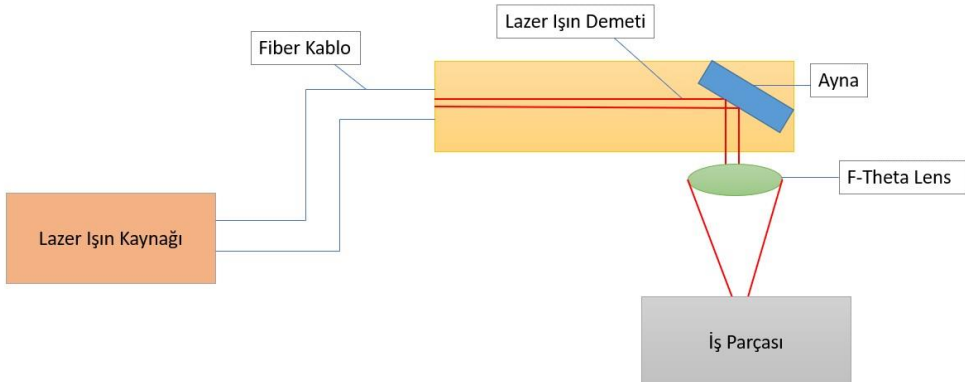
Tungsten karbür plakanın numaralandırılmış bölümlerine etki ettirilen lazer parametreleri Tablo 2’de görüldüğü gibidir. Kesme derinliği üzerinde lazer kesme hızının etkisini görebilmek için lazer gücü, frekans ve spot çapı değerleri sabit tutulmuş sadece lazer kesim hızı değerleri değiştirilmiştir. Yapılan deneylerde lazer gücü 50 W, frekans 50 kHz ve spot çapı 0,05 mm olarak seçilmiştir.

Tablo 2: Deneylerde seçilen lazer parametre değerleri.

Gravür Numarası	Hız (mm/s)
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32
7	64
8	128

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tungsten karbür plaka üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda, açılan 8 adet gravüre ait lazer kesme hızına bağlı olarak değişen kesme derinlikleri Tablo 3’te belirtildiği gibi ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin grafiğe yansımış hali Şekil 3’te görülmektedir. Lazer kesme hızı ve kesme derinliği değerlerine göre çizdirilen grafikte 3 ana bölgenin oluşumundan bahsedilebilir. 7 ve 8 numaralı gravür değerlerini kapsayan 1. bölgede kesme derinliklerinin 50 mikron ve altında olduğu, 5 ve 6 numaralı gravür değerlerini kapsayan 2. bölgede kesme derinliklerinin 50 ve 100 mikron arasında seyrettiği, 1, 2, 3 ve 4 numaralı gravür değerlerini kapsayan bölgede ise kesme derinliklerinin 100 mikron ve üzeri olduğu yorumu yapılabilir.



Şekil 3: Fiber lazer makinesinin alt bileşenlerinin şematik gösterimi.

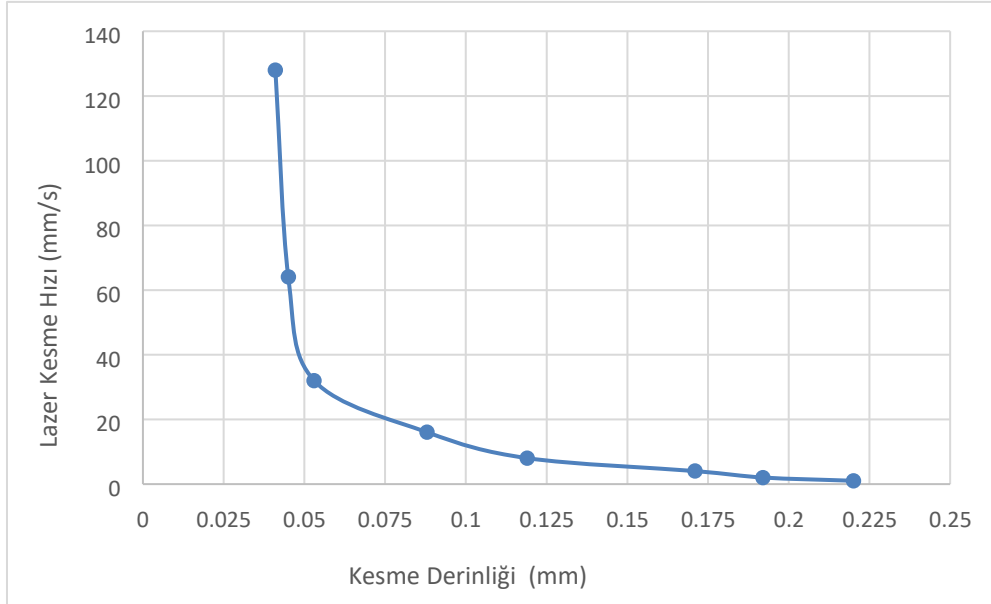
1000x dijital mikroskop ile büyütülerek incelenen gravür bölgelerine ait fotoğraf Şekil 5'te görüldüğü gibidir. Fotoğraftan da görüleceği gibi 2 mm/s lazer kesme hızı ile açılan gravüre ait bu görüntüde gravür bölgesinin kaynak dikişi bölgesine benzeyen bir görüntüde olduğu gözlemlenmiştir. V şekline benzeyen bu görüntü lazer makinesinin gönderdiği ışınların gauss eğrisi ile uyumlu olmasının bir sonucudur. Isıdan etkilenen bölge V şeklini çevreleyen bölge boyunca belirginleşmiş durumdadır. 2 mm/s, 32 mm/s ve 128 mm/s lazer kesme hızları ile açılmış kesme derinlikleri ise sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için Şekil 6'da yanyana verilmiştir. Lazer kesme hızının artması ile derinliğin azaldığı ve gravür bölgesinin 'V' şeklinden 'U' şekline doğru bir görünüm oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında incelenen çizgisel gravür geometrilerinin, literatürde lazer yüzey

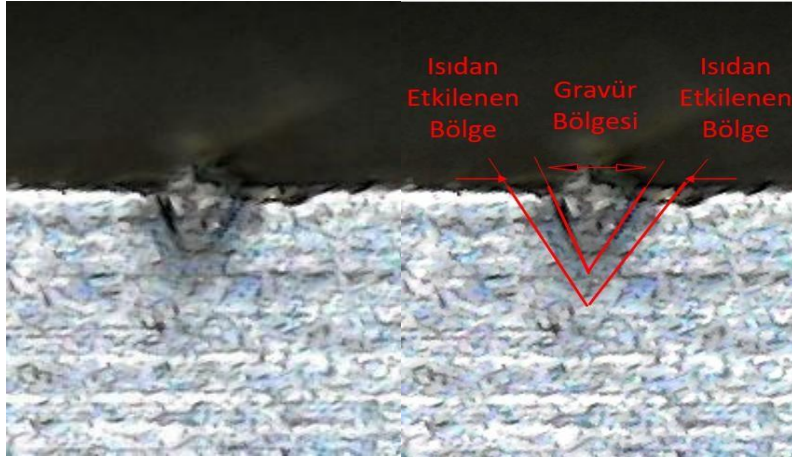
tekstürleme çalışmalarında da tercih edildiği görülmektedir [11, 12]. Ölçümlenen kesme derinlik değerlerinin literatür ile karşılaştırıldığında kullanılan farklı lazer makinası teknik özelliklerine ve seçilen lazer parametrelerine göre farklılık gösterdiği dikkat çekmektedir. Kullanılan lazer makinesinin lazer kaynağının [17], modülasyon tipinin [18], lazer atım tipinin [19], lazer işleme tekniğinin [20], lazer atım sürelerinin [21] farklı olması açılan gravür boyutlarının (derinlik ve genişlik) farklı olmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum işlenebilirliğin, belirtilen özelliklerin fonksiyonu olmasından kaynaklanmaktadır. Bahsi geçen özellikler her ne kadar yapılan çalışmalarda farklılıklar gösterse de lazer kesme hızı-kesme derinliği trendi geçmiş çalışmalar ile paraleldir [17-22]. Bu bağlamda, lazer kesme hızı azaldıkça açılan gravür derinliği artmaktadır.

Tablo 3: Lazer kesme hızına bağlı olarak kesme derinliği ölçümleri.

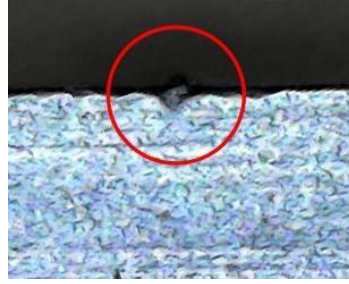
Gravür Numarası	1	2	3	4	5	6	7	8
Kesme Hızı (mm/s)	1	2	4	8	16	32	64	128
Kesme Derinliği (mm)	0,220	0,192	0,171	0,119	0,088	0,053	0,045	0,041



Şekil 4: Farklı lazer kesme hızları ile açılmış gravür derinlikleri.



Şekil 5: Gravür bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge.



Şekil 6: 2 mm/s, 32 mm/s ve 128 mm/s lazer kesme hızları ile açılmış kesme derinlikleri.

4. SONUÇ

Yapılan çalışmada, 1064 nm dalgaboyunda, nanosaniye atımlı 50W Nd:YAG lazeri ile 50 kHz sabit frekansta, 1-128 mm/s lazer kesme hızı aralığındaki çeşitli hızlarda, tungsten karbür malzeme işlenmiş ve çeşitli kesme derinliklerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. 50W maksimum güç seviyesinde ve 1 mm/s minimum lazer kesme hızı değerinde ulaşılabilen maksimum kesme derinliği 220 mikron olarak ölçümlenmiştir. Maksimum lazer kesme hızı 128 mm/s olarak seçilen lazer kesme hızı için ise ulaşılabilen kesme derinliği 41 mikrondur. Elde edilen kesme derinliklerine göre çizdirilen lazer kesme hızı-kesme derinliği grafiğinde şekilsel olarak 3 bölgenin olduğu gözlemlenmektedir. Bunlar 0-50 mikron, 50-120 mikron ve 120-220 mikron aralığındaki kesme derinlik bölgeleri olmaktadır. Belirli lazer kesme aralıklarında kesme derinliği değerlerinin belirli bir karakteristiğe göre değiştiği belirlenmiştir. İncelenen mikroskop görüntülerinde de, farklı lazer kesme hızlarında gravürlerin nispeten farklı geometrik özellik ('V' ve 'U' formasyonu) gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, lazer kesme hızı azaldıkça ısıdan etkilenen bölgenin varlığı dikkat çekmektedir.

EFFECT OF LASER CUTTING SPEED ON CUTTING DEPTH IN TUNGSTEN CARBIDE MATERIAL

Machining is one of the most commonly applied manufacturing methods for materials. In machining, the material removal process is typically performed using a cutting tool. Cutting tools generate a new surface by removing material from the workpiece through shear deformation. As a result of this process, the cutting tool gradually wears out and becomes unusable. In recent years, research has increasingly focused on enhancing cutting tool performance and extending tool life through the use of laser beam texturing techniques. Laser surface texturing involves engraving patterns onto the material using laser beams, with the aim of forming specific textures that improve the tribological properties of the material. In order to understand the mechanism of laser surface texturing, it is essential to investigate the effects of laser processing parameters on the material. In this study, one of the most commonly used cutting tool materials, tungsten carbide, was textured using various laser cutting speeds. The relationship between laser cutting speed and cutting depth was observed and analyzed.

Keywords: Laser surface texturing, laser cutting speed, tungsten carbide.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Birimi tarafından MGA-2023-45222 numaralı genel araştırma projesi ile desteklenmektedir. Yazarlar, deneylerin yapılmasında malzeme ve cihaz tedarikini sağlayan Buse

Dental San. ve Tic. Ltd. Şti. ve Moncarb Kesici Takımlar San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarına, ayrıca projenin fonlanmasını sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi BAP Birimi'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

1. Nagpal, J., Rana, R., Lal, R., Singari, R. M., & Kumar, H. 2022. "A brief review on various effects of surface texturing using lasers on the tool inserts", *Materials Today: Proceedings*, 56, 3803-3812.
2. Roushan, A. 2023. "Influence of laser parameters on the machining performance of textured cutting tools". *Optics & Laser Technology*, 165, 109569.
3. Arslan, A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Varman, M., Mufti, R. A., Mosarof, M. H., Khuong, L.S., & Quazi, M. M. 2016. "Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: a review". *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41(6), 447-481.
4. Mao, B., Siddaiah, A., Liao, Y., & Menezes, P. L. 2020. "Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review", *Journal of Manufacturing Processes*, 53, 153-173.
5. Öztürk, E., & Kaya, K. 2024. "Drilling performance of micro-textured twist drill bit for Ti-6Al-4V alloy: Validated FEM and statistical approaches". *Journal of Manufacturing Processes*, 115, 342-351.
6. Niketh, S., & Samuel, G. L. 2017. "Surface texturing for tribology enhancement and its application on drill tool for the sustainable machining of titanium alloy". *Journal of cleaner production*, 167, 253-270.
7. Kawasegi, N., Sugimori, H., Morimoto, H., Morita, N., & Hori, I. 2009. "Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior". *Precision Engineering*, 33(3), 248-254.
8. Sugihara, T., & Enomoto, T. 2012. "Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture". *Precision Engineering*, 36(2), 229-237.
9. Vignesh, G., Barik, D., Ragupathi, P., & Aravind, S. 2020. "Experimental analysis on turning of AISI 4340 steel using non-textured,

dimple textured and MoS₂ coated dimple textured carbide cutting inserts at the rack surface". *Materials Today: Proceedings*, 33, 2616-2620.

10. Etsion, I. 2004. "Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing". *Tribology letters*, 17, 733-737.
11. Baumann, R., Bouraoui, Y., Teicher, U., Selbmann, E., Ihlenfeldt, S., & Lasagni, A. F. 2023. "Tailored laser structuring of tungsten carbide cutting tools for improving their tribological performance in turning aluminum alloy Al6061 T6". *Materials*, 16(3), 1205.
12. Bhaduri, D., Dimov, S., & Soo, S. L. 2016. "Laser texturing of tungsten carbide tools: the effects on tribological performance when machining Ti-6Al-4V alloy". In *euspen's 16th International Conference & Exhibition*, UK.
13. Maldonado-Cortés, D., Peña-Parás, L., Martínez, N. R., Leal, M. P., & Correa, D. I. Q. 2021. "Tribological characterization of different geometries generated with laser surface texturing for tooling applications". *Wear*, 477, 203856.
14. Sreedath, P., Bhat, S., & Arunachalam, N. 2019. "Evaluation and characterization of deterministic laser textured surfaces using machine vision". *Measurement*, 135, 537-546.
15. Fatima, A., & Mativenga, P. T. 2017. "On the comparative cutting performance of nature-inspired structured cutting tool in dry cutting of AISI/SAE 4140". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(11), 1941-1948.
16. Ranjan, P., & Hiremath, S. S. 2022. "Influence of texture parameters of the bio-inspired crescent textured tool on machining performance of martensitic stainless steel". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 39, 70-90.
17. Bertolete, Marcelo & Barbosa, Patrícia & Machado, Alisson & Samad, Ricardo & Vieira, Nilson & Vilar, R. & de Rossi, Wagner. 2018. "Effects of texturing the rake surfaces of cemented tungsten carbide tools by ultrashort laser pulses in machining of martensitic stainless steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 98. 1-12. 10.1007/s00170-018-2407-x.
18. Schwanekamp, Tobias & Gussone, Joachim & Reuber, Martin. 2020. "Impact of laser irradiation on microstructure and phase development of tungsten carbide - cobalt". *Procedia CIRP*. 94. 239-242.
19. 10.1016/j.procir.2020.09.045.

20. Marimuthu, Sundar & Dunleavy, Justin & Smith, Bethan. 2020. "High-power ultrashort pulse laser machining of tungsten carbide". *Procedia CIRP*. 94. 829-833. 10.1016/j.procir.2020.09.115.
21. Teicher, Uwe & Baumann, Robert & Bouraoui, Yasmine & Ben Achour, Anas & Lasagni, Andrés & Ihlenfeldt, Steffen. 2022. "Laser structuring with DLIP technology of tungsten carbide with different binder content". *Procedia CIRP*. 111. 601-604. 10.1016/j.procir.2022.08.159.
22. Shin, Young-Gwan & Ji, Seok-Young & Choi, Junha & Cho, Sung-Hak. 2022. "Morphologies of cemented tungsten carbide ablated by pulsed femtosecond laser to manufacture next-generation blades of a cutting tool". *Applied Physics A*. 128. 10.1007/s00339-022-05945-8.
23. Li, Guangxian & Li, Xuanang & He, Guichao & Fan, Ruiguang & Li, Feiyuan & Ding, Songlin. 2023. "Surface Quality and Material Removal Rate in Fabricating Microtexture on Tungsten Carbide via Femtosecond Laser". *Micromachines*. 14. 1143. 10.3390/mi14061143.

Lazer Tornalama Operasyonunda Kesme Hızının Talaş Derinliğine Olan Etkisi

Emin Orhun Baştekeli* 

Hacı Abdullah Taşdemir 

Buse Ortaç Baştekeli 

İstanbul Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi Makine Mühendisliği
İstanbul/Türkiye

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 25 Şubat 2025

Kabul: 20 Mayıs 2025

*Sorumlu Yazar: Emin Orhun Baştekeli

Email: orhun-bastekeli@yandex.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1646833>

Günümüzde İleri imalat teknikleri içerisinde lazer teknolojileri giderek artan bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, 2 mm altında çapa sahip çubuk formundaki malzemelerin çap küçültme işlemlerinde 6 eksen taşlama robotu ve kayar otomat tezgahına alternatif olabilecek, son yıllarda popülerliği artan doğrudan lazer ışını ile tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, AISI 308L östenitik paslanmaz çeliğin direkt lazer ışınları ile tornalanması operasyonunda kontrollü talaş kaldırma sürecinin ve mikroşafıların bu yöntemle üretilirliğinin araştırılmasıdır. Deneylerde numuneler, 50 W gücünde, 1064 nm dalga boyuna sahip Nd:YAG fiber lazer ile 800 ila 12800 mm/s arasında değişen beş farklı kesme hızında tornalanmış ve numunelerin çaplarının düşümlerine dair ölçümler gerçekleştirilmiştir. İşlem sonrasında numunelerin yüzey morfolojisi dijital mikroskop ile incelenmiş, çap küçültme oranları mikrometre ile ölçülmüştür. Bulgular, kesme hızı arttıkça talaş derinliğinin azaldığını ve yüzey kalitesinin iyileştiğini ortaya koymuştur. Deneysel veriler doğrultusunda, talaş derinliği ile lazer kesme hızı arasındaki ilişki güçlü bir negatif korelasyon göstermiş ($R^2=0.9954$) ve bu sayede literatürde ilk defa, AISI 308L östenitik paslanmaz çelik malzemesine ait lazer parametrelerine bağlı kontrollü talaş kaldırma süreci modellenilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer tornalama, kesme hızı, talaş derinliği.

1. GİRİŞ

Günümüzde 2 mm altında çapa sahip çubuk formundaki malzemelerin hassas olarak işlenmesi, 6 eksen taşlama robotu ya da kayar otomat tezgahı ile yapılmaktadır. Bu makinelerin büyük, çok enerji tüketen ve hassasiyeti düşük yapıları, bilim insanlarını daha kompakt, tasarruflu ve hassas teknolojiler geliştirmeye yönlendirmektedir. Gelişen lazer teknolojileri, özellikle lazer atım sürelerinin giderek küçülmesine ve 1 mikron altı geometrik hassasiyetin başarı ile uygulanabilmesine olanak sağlamıştır. Lazer teknolojileri, üretim ve boyutsal hassasiyet avantajıyla biyomalzemeler ve mikro sensörlerde; işleme stabilitesiyle ise zor işlenen malzemelerde kullanılmaktadır [1-8].

Bu çalışmada yapılan işlem, lazer ışınlarının doğrudan parça üzerine yansıtılarak iş parçasından malzeme kaldırılması üzerinedir. ‘Lazer Tornalama’ olarak anılabileceği gibi ‘Doğrudan Lazer Işınları İle Tornalama’ ya da ‘Direkt Lazer Işınları İle Tornalama’ şeklinde de karşımıza çıkabilir.

Literatürde daha sık karşımıza çıkan Lazer Destekli Tornalama (Laser Assisted Turning) ile Lazer Tornalama (Laser Turning) birbirinden farklı uygulamalardır. Lazer destekli tornalamada, iş parçasından kesici uç vasıtasıyla talaş kaldırılmadan önce, iş parçası bir lazer kaynağı vasıtasıyla ısıtılmaktadır. Bu ön ısıtma işlemi sayesinde iş parçasının sertliği, pekleşme eğilimi ve akma dayanımı düşeceğinden işlenmesi zor malzemelerden daha düşük kesme kuvvetlerinde talaş kaldırılabilmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar, lazer destekli tornalama işleminin yüzey kalitesini iyileştirdiğini ve soğutma sıvısı kullanımını azalttığını göstermektedir [9]. Lazer tornalama işleminde ise, kesici takım vasıtasıyla talaş kaldırma operasyonu bulunmamaktadır, iş parçası üzerinden malzeme doğrudan lazer ışınlarının parçaya gönderilmesi ile kaldırılmaktadır. Literatürde lazer destekli tornalama operasyonu ile ilgili bir çok kaynak olmasına rağmen, lazer tornalama ile ilgili az sayıda çalışma mevcuttur [10-16].

Bu çalışmada, yeni bir araştırma alanı olan doğrudan lazer ışınları ile tornalama operasyonunda, kesme hızının talaş derinliğine olan etkisi üzerine çalışılmıştır. Literatürde ilk defa AISI 308L östenitik paslanmaz çeliğinin direkt lazer ışınları ile tornalanması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca talaş kaldırma süreci ile lazer parametreleri arasında kuvvetli bir korelasyon ($R^2 = 0.9954$) kurularak gelecek çalışmalar için bir veritabanı oluşturulmuştur. Bu çalışma ile özellikle hassas tolerans değerlerinde mikroşaft üretmek isteyen çalışmacılar için yöntemin potansiyeli ve parametreleri ortaya çıkartılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Fiber lazer makinesinde tornalama operasyonuna tabi tutulacak malzeme AISI 308L östenitik paslanmaz çelik malzemedir. Boy kesilmiş çubuk malzeme boyutları $\varnothing 1.6 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ olup düz silindirik bir yapıya sahiptir. İşlem görececek numuneye ait görsel Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1: Lazer tornalama operasyonu öncesi AISI 308L östenitik paslanmaz çelik çubuk.

AISI 308L östenitik paslanmaz çelik malzemeye ait kimyasal kompozisyon Tablo 1’de, malzemenin fiziksel özellikleri ise Tablo 2’de verildiği gibidir.

Tablo 1: AISI 308L malzeme kimyasal bileşenleri [17].

Elementler	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	P	S
Min. (%)	63,8	19,5	9	1	0,25	-	-	-
Max. (%)	70,5	22	11	2,5	0,6	0,080	0,030	0,030

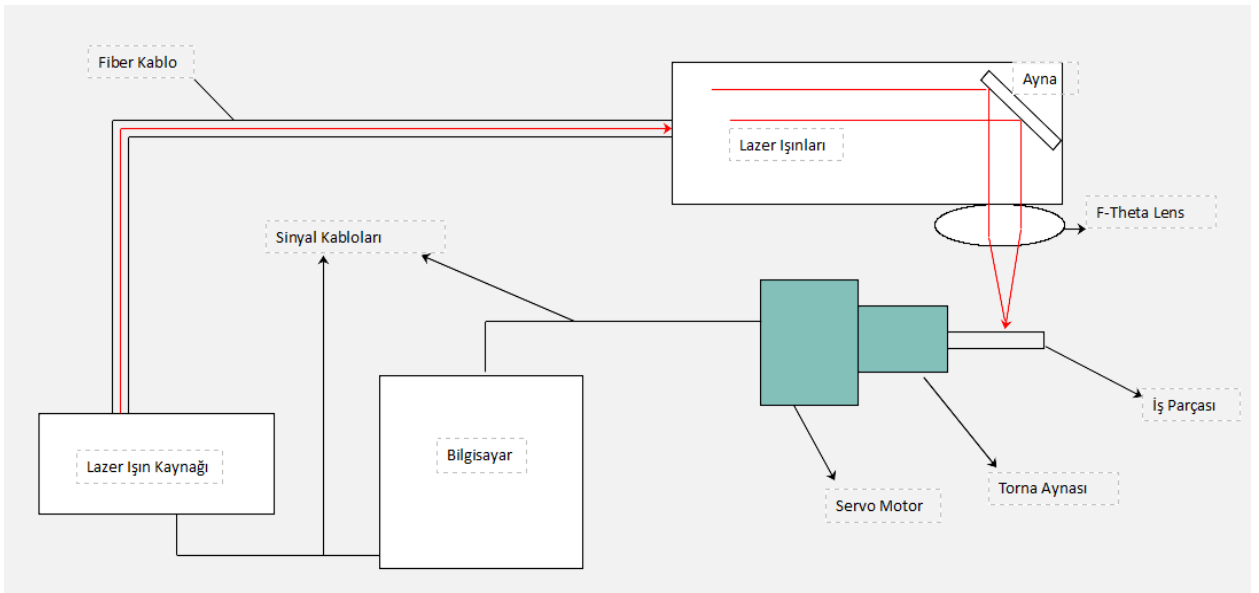
Tablo 2: AISI 308L malzeme fiziksel özellikleri [18].

Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Uzama (%)
593	207	190-210	0,27-0,30	48

Tornalama işlemini gerçekleştirecek fiber lazer makinesi Raycus QB50 tip atımlı Nd:YAG lazer olup makineye ait devre şeması Şekil 2’de gösterildiği gibidir. Lazer dalga boyu 1064 nm, atım süresi nanosaniye mertebesinde. Lazer kaynağına ait özellikler Tablo 3’te verilmiştir. Ayrıca deney sırasında kullanılan servo motor 2 d/dk sabit hız ile dönmektedir. Lazerin ortalama çıkış gücü 50 W’tır. Deneyler esnasında, güç değeri %100 olarak ayarlanmıştır. Frekans değeri 20 kHz olarak seçilmiştir.

Tablo 3: Fiber lazer makinesinin teknik özellikleri.

Nd:YAG Fiber Lazer Makinesi Teknik Özellikleri	
Lazer tipi	Nanosaniye Lazeri
Ortalama çıkış gücü (W)	50
Dalga boyu (nm)	1060~1085
Darbe süresi (ns)	120~150@50 kHz



Şekil 2: Fiber lazer makinesinin şematik devresi.

Silindirik formdaki malzemelerin lazer ile tornalanması esnasında seçilen kesme hızlarına ait bilgiler Tablo 4'te yer almaktadır. bu düzen ile işlenmiş numuneler ise Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Tornalama sonrası numuneler.

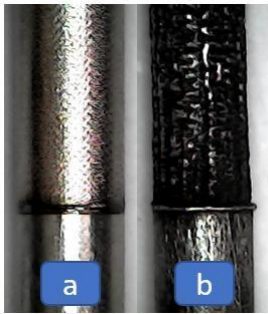
Tablo 4: Numune numarası & kesme hızı (mm/s).

Numune Numarası	1	2	3	4	5
Kesme Hızı (mm/s)	800	1600	3200	6400	12800

3. BULGULAR

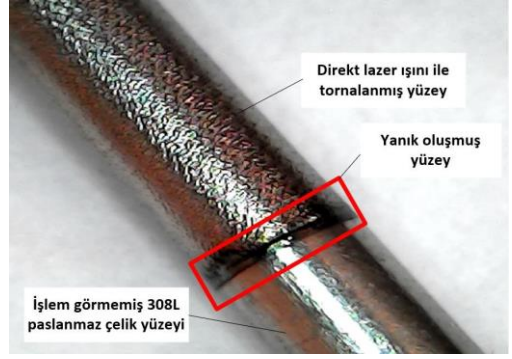
İşlem sonrasında çubuk numunelerin çaplarının küçülme oranının belirlenmesi için mikrometre ile ölçümler yapılmış, dijital mikroskopta görüntüler alınmıştır.

Şekil 4'te 12800 mm/s kesme hızı ile lazer tornalanmış numune 5 ile 800 mm/s kesme hızı ile lazer tornalanmış numune 1'e ait dijital mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi 12800 mm/s ile işlenen parça parlak bir yüzey oluşturmuş ancak 800 mm/s ile işlenmiş parçada yanık yüzeyler meydana gelmiştir.



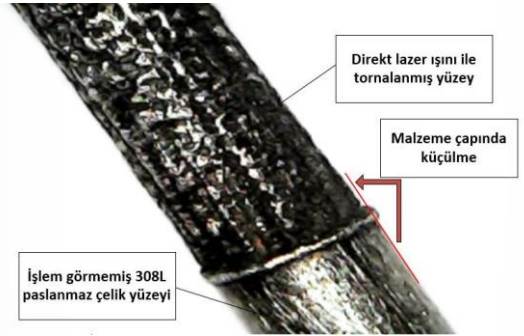
Şekil 4: Lazer tornalama işlemi sonrası numune görüntüleri: (a) numune 5 ve (b) numune 1

Şekil 5'te numune 5'in detaylı görüntüsü verilmiştir. Burada da, parça işlendikten sonra ortaya çıkan yüzeyin parlak bir yüzey olduğu net olarak görülebilir. İşlenmiş yüzey ile işlenmemiş yüzeyi birbirinden ayıran çizgide bazı yanık oluşumları gözlemlenmiştir.



Şekil 5: Numune 5'in dijital mikroskop görüntüsü.

Şekil 6'da ise numune 1'in detaylı görüntüsüne yer verilmiştir. Paylaşılan bu görüntüde de, lazer kesme hızının azalması ile yanık yüzeylerin oluşumunun artması durumu net olarak görülmektedir. Ayrıca görselde, malzemede oluşan çap küçülmesi de gözlemlenmektedir.

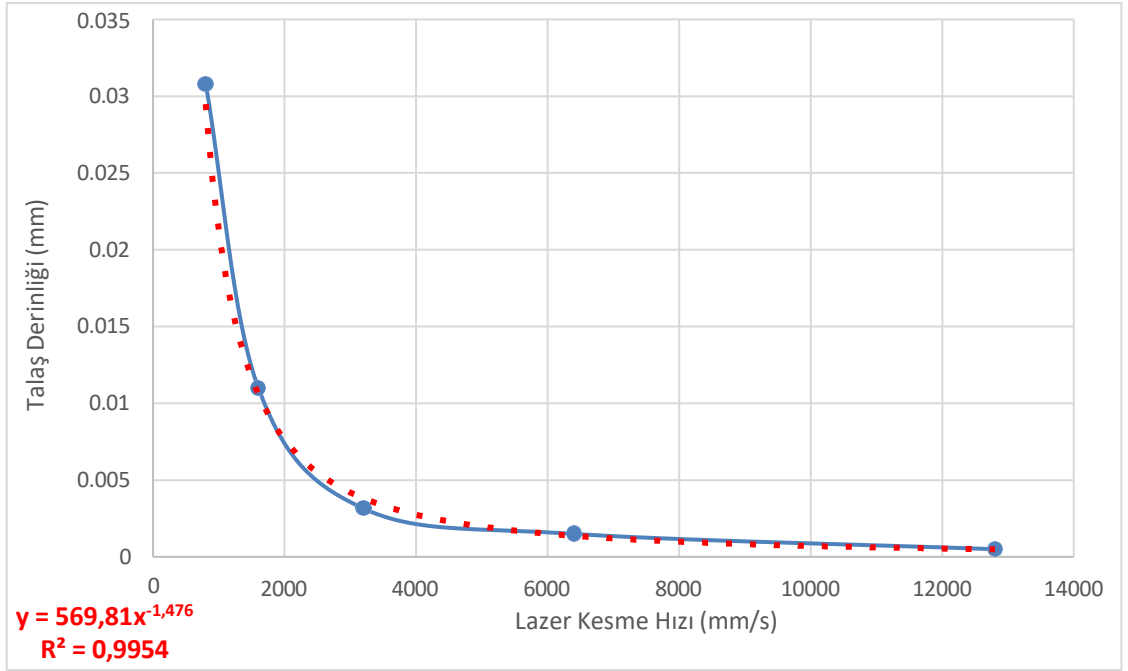


Şekil 6: Numune 1'in dijital mikroskop görüntüsü.

Mikrometre ölçümlerinde elde edilen sonuçlar, lazer kesme hızı (mm/s) ve talaş derinliği (mm) olarak Şekil 7'de grafiğe yansıtılmıştır. Lazer kesme hızı ile talaş derinliği arasındaki ilişkiyi gösteren eğrinin;
 $y=569,81x^{-1,476}$ denklemine $R^2=0,9954$ ile uyduğu görülmektedir.

4. SONUÇ

LİTERATÜRDE henüz yeni bir çalışma alanı olan lazer tornalama operasyonu ile ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, 2 mm çapın altındaki silindirik formdaki malzemeye lazer ile kontrollü talaş kaldırma/malzeme kaldırma işlemi uygulanabilir ve başarılı sonuçların elde edilebilir olduğu görülmüştür. Lazer kesme hızları ile talaş derinliği arasında ters orantı bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 12800 mm/s lazer kesme hızında gerçekleştirilen operasyon sonrasında ortaya çıkan yüzeyin parlak bir yüzey olduğu, 800 mm/s hız ile gerçekleştirilen operasyon sonrasında ortaya çıkan yüzeyde yanıkların oluştuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7: Lazer kesme hızı - talaş derinliği diyagramı.

Elde edilen lazer kesme hızı-talaş derinliği grafiği ve türetilen formül ile 308L paslanmaz çelik silindirik malzeme için talaş kaldırma operasyonu kontrol edilebilir hale gelmiştir. Malzemelerin makro geometrisini şekillendirmek için 800 mm/s ve altındaki kesme hızları ile talaş kaldırma operasyonu gerçekleştirmek gerekirken, malzeme üzerine performans artırıcı tekstür benzeri mikro yapıların açılması için 800-1600 mm/s hızların kullanılabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, paslanmaz çelik üzerinde talaş alma operasyonundan ziyade farklı renk dokularının oluşturabilmesi 6400 mm/s lazer kesme hızı civarında mümkün olmaktadır.

Sonraki çalışmalarda, lazer tornalama operasyonunun farklı lazer parametrelerinden nasıl etkilendiği, tornalama sonucu oluşan yüzeylerin topoğrafyasının ve yüzey sertliğinin farklı lazer parametreleri ile nasıl değiştiği, farklı lazer parametrelerinde malzemenin mikroskobik boyutta geçirdiği dönüşümler incelenecektir.

EFFECT OF CUTTING SPEED ON CHIP DEPTH IN LASER TURNING OPERATION

In recent years, laser technologies have gained increasing importance among advanced manufacturing techniques. In this study, direct laser turning experiments were conducted as a potential alternative to six-axis grinding robots and Swiss-type

automatic lathes for diameter reduction of rod-shaped materials with diameters below 2 mm. The aim of the study is to investigate the feasibility of producing micro-shafts and the process of controlled material removal in direct laser turning of AISI 308L austenitic stainless steel. During the experiments, the samples were machined using a 50 W Nd:YAG fiber laser with a wavelength of 1064 nm, at five different cutting speeds ranging from 800 to 12800 mm/s. After the process, diameter reductions were measured using a micrometer, and surface morphology was analyzed via digital microscopy. The results showed that as the cutting speed increased, the depth of cut decreased and surface quality improved. A strong negative correlation ($R^2 = 0.9954$) was found between cutting speed and depth of cut. For the first time in the literature, a controlled material removal model was developed based on laser parameters for AISI 308L austenitic stainless steel using this method.

Keywords: Laser turning, cutting speed, depth of cut.

Teşekkür

Yazarlar, deneylerin yapılmasında malzeme ve cihaz tedarikini sağlayan Buse Dental San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

1. Razeghi, M., Slivken, S., Tahraoui, A., Matlis, A., & Park, Y. S. 2001. "High power 3–12µm infra-red lasers: recent improvements and future trends". *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 11(2-3), 233-239.
2. Pitts, W. K., & Martin, M. D. 2001. "Experience with laser microfabricated detectors at the University of Louisville". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 471(1-2), 268-271.
3. Lu, L., Zhao, Y., Lin, N., & Xie, Y. 2024. "Skin-inspired flexible pressure sensor with hierarchical interlocked spinosum microstructure by laser direct writing for high sensitivity and large linearity". *Sensors and Actuators A: Physical*, 366, 114988.
4. Zhao, F., Bernstein, W. Z., Naik, G., & Cheng, G. J. 2010. "Environmental assessment of laser assisted manufacturing: case studies on laser shock peening and laser assisted turning". *Journal of Cleaner Production*, 18(13), 1311-1319.
5. Przystacki, D. 2014. "Conventional and laser assisted machining of composite A359/20SiCp". *Procedia Cirp*, 14, 229-233.
6. Khatir, F. A., Sadeghi, M. H., & Akar, S. 2021. "Investigation of surface roughness in laser-assisted hard turning of AISI 4340". *Materials Today: Proceedings*, 38, 3085-3090.
7. You, K., Liu, G., Wang, W., & Fang, F. 2023. "Laser assisted diamond turning of silicon freeform surface". *Journal of Materials Processing Technology*, 322, 118172.
8. Naresh, C., Bose, P. S. C., Rao, C. S., & Selvaraj, N. 2021. "Prediction of cutting force of AISI 304 stainless steel during laser-assisted turning process using ANFIS". *Materials Today: Proceedings*, 38, 2366-2371.
9. Uğraş, A., & Kafkas, F. 2020. Sertleştirilmiş AISI 4340 "Çeliğin Isı-Destekli İşlenmesinde TIG Tekniğinin Uygulanabilirliği". *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(2), 40-48.
10. Deswal, N., & Kant, R. 2023. "Machinability and surface integrity analysis of magnesium AZ31B alloy during laser assisted turning". *Journal of Manufacturing Processes*, 101, 527-545.
11. Wei, C., Guo, W., Gao, B., Wang, Y., Sun, Z., & Li, L. 2021. "Understanding the behaviour of workpieces' bulk temperature during laser-assisted turning of Ti6Al4V alloy and heating of Al-SiC metal-matrix composite rods". *Optics & Laser Technology*, 139, 106951.
12. Abedinzadeh, R., Norouzi, E., & Toghraie, D. 2022. "Study on machining characteristics of SiC–Al₂O₃ reinforced aluminum hybrid nanocomposite in conventional and laser-assisted turning". *Ceramics International*, 48(19), 29205-29216.
13. Wei, Y., Park, C., & Park, S. S. 2017. "Experimental evaluation of direct laser assisted turning through a sapphire tool". *Procedia Manufacturing*, 10, 546-556.
14. Zettl, J., Klar, M., Rung, S., Esen, C., & Hellmann, R. 2021. "Laser turning with ultrashort laser pulses". *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1562-1568.
15. Sriram, D., Jayaprakash, G., Arulkrubakaran, D., Prabu, M., & Ajithkumar, A. 2021. "Laser turning of alumina (Al₂O₃) ceramic by Nd: YAG laser technique". *Materials Today: Proceedings*, 39, 731-735.
16. Dhupal, D., Doloi, B., & Bhattacharyya, B. 2008. "Pulsed Nd: YAG laser turning of micro-groove on aluminum oxide ceramic (Al₂O₃)". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(2), 236-248.
17. <https://m4metals.com/stainless-steel/austenitic/aisi-308l-chemical-composition.php>, Erişim tarihi:02.05.2024
18. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8205>, Erişim tarihi:02.05.2024

Mehmet Kubilay Askerden*^{ID}

Fatih Karpaz^{ID}

Mustafa Cemal Çakır^{ID}

Bursa Uludağ Üniversitesi
Makine Mühendisliği
Bursa/Türkiye

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 26 Şubat 2025

Kabul: 6 Mayıs 2025

*Sorumlu Yazar: Mehmet Kubilay Askerden

Email: mkaskerden@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1647309>

Eksenel Kullanım Yoğunluğunun Frezeleme İşlemlerinde Titreşim ve Kesme Performansına Etkisi

Bu çalışma, frezeleme işlemlerinde eksenel kullanım yoğunluğunun titreşim ve kesme performansına etkisini incelemektedir. Belirli eksen ve devir aralıklarında yoğun kullanılan CNC tezgâhlarında iş mili (spindle) ve rulman sağlığının olumsuz etkilendiği ve bunun titreşim seviyelerini artırarak kesme kalitesini düşürdüğü tespit edilmiştir. Çalışmada, homojen takım yolları oluşturma, periyodik bakım stratejileri geliştirme ve dijital ikiz destekli izleme sistemleriyle üretim verimliliğini artırmaya yönelik çözümler önerilmektedir. Sonuçlar, daha uzun takım ömrü, gelişmiş yüzey kalitesi ve optimize edilmiş işleme parametreleriyle üretim süreçlerinin iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı İmalat, Titreşim, İş Mili, Bakım, Frezeleme

GİRİŞ

Talaşlı imalat operasyonlarının geneli işleme stratejilerine bağlı olarak nihai ürünün performansını önemli ölçüde etkileyebilen operasyonlardan oluşmaktadır. Talaşlı imalat malzemelerin işlenebilirliği kesme parametrelerine, tezgâh sağlığına, kesici takımlara, soğutma sıvısına, takım yolu vb. gibi birçok etmene bağlı olarak bu etmenlerin ortaklaşa çalıştığı oldukça karmaşık bir süreçtir. Bunların hepsinin ortak noktadaki en önemli amacı ise istenilen kalitedeki yüzey bütünlüğünü minimum maliyetle ve en hızlı şekilde imal edebilmektir [1]. Talaşlı imalat operasyonları içerisinde frezeleme operasyonu en çok kullanılan talaşlı imalat operasyonları arasında yer almaktadır. Özellikle otomobil, havacılık ve uzay endüstrileri gibi sektörlerde ince duvar frezeleme gibi oldukça dikkat isteyen frezeleme yöntemleri önemli bir yere sahiptir ve bu alanda çalışmalar günümüzde son hızıyla devam etmektedir [2, 3].

Talaşlı imalat esnasında frezeleme operasyonlarında oluşabilecek istenmeyen titreşimler istenilen kesme parametrelerini etkileyerek kesme operasyonu sonrasında istenilen nihai ürünün kalitesini büyük ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Aynı zamanda ise bu konu oldukça popülerliğini koruyarak üzerinde çok fazla modelleme ve deneysel çalışmaların olduğu ve bu çalışmalarla daha iyi yüzey

kalitesi, daha yüksek üretkenlik ve daha uzun takım ömrü ile işlenebilirliğinde arttığı gözlemlenmiştir. [4, 5]. Modellemelerin yanı sıra Raju ve ark. günümüzde oldukça popüler olan makine öğrenmesini kullanarak titreşimlere bağlı yüzey pürüzlülüğünü inceleyerek titreşimleri anlama ve azaltmak için anlık modelleme ile üretim verimliliğini arttıran çalışmaları ile çeşitli sektörlerde istenilen kalitedeki işleme sonuçlarına giden yolu açtı [6]. Geçmişteki çalışmalar incelendiğinde titreşim mekanizmaları hakkında ilk çalışmalar işleme titreşimlerini kendiliğinden oluşan ve/veya zorlanmış titreşimler olarak Arnold [7] tarafından incelenmiştir. Bununla alakalı ilk bilimsel yasaların ise hemen hemen aynı zamanlarda Tobias ve ark. ve Tlustý ve arkadaşları tarafından bağımsız olarak sunulmuştur [8, 9].

Titreşimlerin oluşması ve buna bağlı salgılar, takım tutucunun tezgâha bağlandığı spindle koniği, spindle çanak yayları, spindle rulmanları, spindle balansına sağlığının bozulmasına bağlı olarak artmaktadır. Bu noktada yapılacak periyodik bakım ve kontroller üretim verimliliğinin kontrolü ve iyileştirilmesi noktasında kritik öneme sahiptir [10]. Tlustý ve Tobias oluşabilecek titreşimleri tahmin eden ve ona göre kritik kesme derinliğini ön gören çalışmalar yapmıştır. Altıntaş ve arkadaşları tarafından da bu kesme dinamikleri ve titreşim kararlılığı modelleri incelenmiş ve geliştirilmiştir [11, 12]. Bunun yanı sıra titreşim değerleri istenilenin

dışında olan ve bu titreşimi oluşturabilecek tezgâh sağlığının bozuk olmasıyla birlikte oluşan salgılar, kesici takımın bir diş öncekine kıyasla kesici yarıçapında değişikliğe neden olduğu, değişken talaş kaldırma yüklerine maruz kaldığı ve kesici takımda değişken aşınmalara sebep olduğu gözlemlenmiştir [13]. Bu tip istenmeyen ve verimliliği düşüren olguların azaltılması için sıkı toleranslar ve yüksek yüzey kalitesi istenen birçok sektörde akıllı süreç izleme talebi oldukça ilgi görmektedir. İşlem esnasında gerçek zamanlı veriler ile takip edebilme, işleme doğruluğu, süreç güvenilirliği, üretim sürelerini ve maliyetlerini azaltma ve üretim süreçlerinin otomasyonunu oluşturmak istenmeyen titreşimleri anlamakta oldukça kritiktir. Bahsedilen süreç izleme yöntemi üzerine Bai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada titreşim sinyallerine dayanan güvenilir ve sağlam durum izleme yöntemi sunmaktadırlar [14]. Parsa ve arkadaşlarının geliştirdiği dijital ikiz destekli çevrim içi izleme ve kontrol sistemi ile birlikte spindle titreşim verileri, takım aşınma ilerlemesi ve takım kırılma algılaması için geliştirdikleri model üretim tahmini için kullanılır. Bu şekilde işleme esnasında istenmeyen titreşim yani tırlamalardan kaçınmak için dijital ikiz ve entegre çalışan modelin kullanımı işleme sürecinin izlenmesi ve istenilen şekilde ilerlemesi için kullanılır [15]. Askerden ve arkadaşları yaptıkları iki farklı çalışmada bu titreşim ve tezgâh sağlığının istenilen değerlerde olmaması halinde delik delme, yüzey pürüzlülüğü, kesici takım ömrü, istenilen nihai ölçü doğrultusunda sağlıklı olmayan titreşimin etkilerini incelemiş ve bakım yapıp sağlıklı hale gelen titreşimle değerlerini incelemişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda sağlıklı haldeki tezgâhla yapılan frezeleme ve delik delme işleminde kesici takım ömründe, yüzey pürüzlülüğünde, istenilen nihai ölçüme tek seferde ulaşmada, tezgâhta operasyon esnasındaki dinamik yüklenmelerde iyileşmeler görülmüştür [16, 17].

Bu çalışmanın amacı ise yapılan birçok spindle sağlık ölçümü esnasında üretilen parçaların geometrisine göre frezeleme esnasında tezgâhın yoğunlukla bir eksen ve belirli devir aralığında çalıştırılması sonucunda tezgâhın o eksen ve devir aralıklarında titreşim değerlerinin sağlıklı olmadığı fark edilmiştir. Ancak diğer eksen ve devir aralıklarında ise titreşim ve diğer sağlık değerleri normal aralıklardadır. Bu da frezeleme esnasında eksenel kullanım yoğunluğuna bağlı tezgâhın o eksenindeki rulman ve diğer bileşenlerinin zamanla ömrünü tamamlayıp sağlığının bozulmasına ve titreşim değerlerinin normalden farklı seyretmesine sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda bu ve benzer tip operasyonda neler yapılabileceği ve dikkat edilmez ve göz ardı edilirse doğurabileceği sonuçlar değerlendirilip tartışılacaktır. Bunun yanında alınabilecek önlemler ve geliştirilebilecek yöntemler üzerinde durulacaktır.

MATERYAL VE METOT

Talaşlı imalat esnasında istenilen nihai ürünü yüksek verimlilikte elde edebilmek adına yapılan CNC spindle sağlık kontrolü statik ve dinamik kontroller olmak üzere iki başlık altında incelenmiştir. Bu incelemelerden çıkan sonuçlar neticesinde elde edilen bilgiler oluşan titreşim kaynaklarının ve bu istenmeyen titreşimlerinin oluşturduğu etkilerin kök nedenini bizlere sunmaktadır. Yapılan sağlık ölçümünde spindle konik içi salgı değeri, spindle 300 mm test bar salgı değeri, spindle çanak yaylarının kontrol edildiği takım çekme kuvveti ölçümünden oluşmaktadır. Dinamik ölçümler ise rulmanların en yakın olduğu bölgeden alınan titreşim ölçer cihazı ile spindle balansı hız (mm/s) cinsinden, spindle rulman sağlığı ivme (G) cinsinden her 1000 devirde spindle maksimum devrine kadar ölçülerek analiz edilmektedir. Spindle titreşimlerini ölçmek için Gtech marka VPod-tek prob titreşim ölçme cihazı kullanılmıştır. Şekil 1’de statik ve dinamik ölçümler esnasında alınan görseller görülmektedir.

Statik Ölçümler



Dinamik Ölçümler



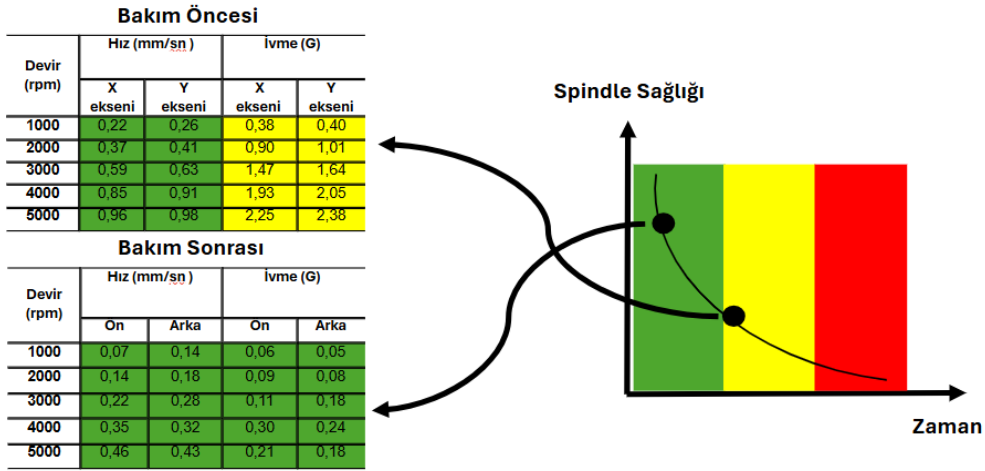
Şekil 1. Statik Ölçümler: A- Konik içi salgı ölçümü B- 300 mm test bar salgı ölçümü C- Takım çekme kuvveti ölçümü, Dinamik Ölçümler: D- Spindle eksenleri balans ve rulman sağlığı ölçümü

Ölçümler değerlendirilirken ise Normal, Kritik, Tehlikeli olarak sınıflandırılacak şekilde tabloda sunulmaktadır. Normal değerler yeşil renkte, kritik değerler sarı renkte, tehlikeli değerler ise kırmızı renkte boyanarak tablo oluşturulmaktadır. Örnek bir titreşim değeri ölçün ait bakım öncesi ve bakım sonrası değerleri ve sınıflandırılma şekli Şekil 2’de gösterilmektedir. Titreşim değerlerinin istenilen düzeye geldikten sonra kritik seviyeden normal seviyeye geçerek spindle ömrünün ve buna bağlı üretim verimliliğinin artması beklenmektedir. Bakım öncesi ölçüme göre yapılacak bakım ve hasar gören mekanizmaların tahmini yapılarak izlenecek yol belirlenmektedir.

Titreşimlerin yanı sıra spindle diğer bileşenleri de ihtiyaç doğrultusunda bakım yapılması gerekmektedir. Çünkü tüm bileşenler bir zincir gibi

birbirini etkilemekte ve talaşlı imalat esnasında oluşabilecek istenmeyen titreşimleri tetiklemektedirler.

Burada uygulanması beklenen ve istenen metot Şekil 3’te gösterilen grafikteki gibi sürekli bir döndü içerisinde anlık olarak takip edilen ve takibe istinaden revize edilmesi gerektiği durumda revize edilebilen bir sistem kurulmasıdır. Takip edilen ve kurulan sistemde alınan verilerin analizi ile birlikte operasyon için gerekli olan modellerin oluşturulması bu modellerle birlikte revize edilen veriler dijital ikiz yardımıyla sisteme entegre edilmesi ve bu döngünün oluşabilecek zorlu ve istenmeyen koşullarda sistemin en verimli şekilde çalışmasını sağlamasıdır. Bu geliştirilmesi beklenen sistem bizlere en verimli koşullarda çalışmayı ve kaliteyi en üst noktaya taşımayı amaçlamaktadır.



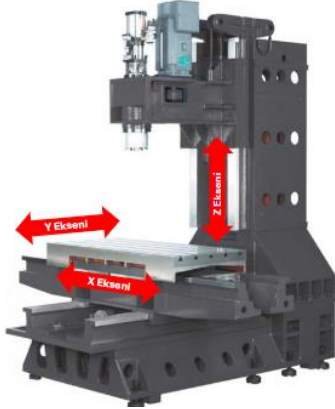
Şekil 2. Bakım öncesi ve bakım sonrası titreşim değerlerinin spindle sağlığı ve zaman çizelgesi üzerindeki etkisi



Şekil 3. Anlık veri toplaması ve dijital ikiz ile sürekli kontrol edilene ve izlenen sistem döngüsü

BULGULAR VE TARTIŞMA

Talaşlı imalatta frezeleme başta olmak üzere birçok operasyonda yoğun olarak kullanılan 3 eksen CNC tezgahlarda tabla eksenlerinin kullanımı imal edilecek parçanın geometrisine göre değişiklikleri göstermektedir. Şekil 4'te dik işlem merkezi tezgâha ait eksenler görülmektedir. Burada talaşlı imalar esnasında 3 eksenle işlenecek parçanın geometrik şekline göre konum almaktadır. Talaş kaldırma esnasında ise eksenlere farklı dinamik yükler yüklenmekte ve bu yüklenmelerde spindle sağlığını bozmaktadır.



Şekil 4. 3 eksen dik işlem merkezi takım tezgâhı ve eksenleri

Periyodik kontroller sırasında veya anormal devam eden nihai ürün verimliliğine bağlı gerçekleştirilen sağlık kontrollerinde hasar tespiti yapılabileceğinden bahsedilmiştir. Ölçümler esnasında seri imalat yapan bir tezgâhta periyodik kontroller sırasında belirli devir aralıklarında ve bir eksenle bir yoğunluk tespit edilmiştir. Bu tezgâha ait X ve Y ekseninden alınan titreşim ölçüm değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Burada tezgâhta kullanılan en sık devirler, talaşlı imalatı gerçekleştirilen parça, takım yolu ve talaşlı imalat operasyonu incelendiğinde istenmeyen ve sağlıklı olmayan titreşim değerlerinin gerçekleştirilen tek eksen yoğunluklu yapılan frezeleme operasyonu neticesinde olduğu ortaya tespit edilmiştir. Bu ölçümlere binaen istenen nihai ürün verimliliğinin ise istenilen noktada olmadığı operatör tarafından onaylanmıştır.

Tablo verilerinde de görüldüğü üzere sarı ile işaretlenen noktaların eksenleri aynıdır. Çalıştığı devirlerde titreşim seviyesinin yüksekliğine bağlı olarak spindle balansının da yine X ekseninde bozulduğu Hız (mm/s) verileri ile de tespit edilmiştir. Burada elde edilen bulgular neticesinde talaşlı imalat frezeleme esnasında tek eksen yoğunluğunda ve belirli devirler ile çalışan tezgâhta o eksenle spindle rulman sağlığı ve balansının olumsuz etkilenerek olması gerekenden daha hızlı bozulduğu ve istenmeyen titreşim seviyelerine geldiği gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Spindle titreşim ölçüm verileri

Devir (rpm)	Hız (mm/sn) (rms)		İvme (G) (rms)	
	X eksen	Y eksen	X eksen	Y eksen
1000	0,07	0,09	0,10	0,11
2000	0,17	0,05	1,22	0,21
3000	0,18	0,07	2,40	0,83
4000	0,24	0,12	2,10	0,60
5000	0,24	0,10	1,45	0,57
6000	0,57	0,15	0,88	0,47
7000	0,63	0,17	0,70	0,64
8000	1,10	0,67	0,70	0,74
9000	1,40	0,70	0,74	0,80
10000	1,50	0,65	0,86	0,82

Askerden ve ark. daha önceki yaptıkları çalışmalarda spindle sağlığına bağlı olarak değişen ve istenmeyen titreşimlerin takım tezgâhı spindle bakımı yapıldıktan sonra iyileşme göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen verilere göre kesici takım ömrü yaklaşık olarak %40 oranında iyileşmiş, yüzey pürüzlülüğü yaklaşık olarak %35 oranında iyileşmiş, tezgâh dinamik yüklenmeleri ortalama %15 oranında azalmış ve istenilen nihai ölçüde bakım öncesinde sapma ortalama 0,25 iken bakım sonrasında 0,05 olarak iyileşmiştir. Bu noktada üretim verimliliği ciddi bir şekilde gelişmiştir [16,17].

SONUÇLAR

Talaşlı imalatın birçok etmene bağlı olarak oldukça kapsamlı incelenmesi gerektiği ve her bir etmenin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği yapılan çalışma neticesinde de ortaya konulmuştur. Talaşlı imalat frezeleme operasyonunda seri imalat esnasında yoğun olarak kullanılan eksen ve devirlerde spindle bileşenleri ve özellikle rulman sağlığı olumsuz etkilenmektedir. Bu etkilerle birlikte oluşan istenmeyen titreşimler istenilen kalitedeki nihai ürünün oluşmasını olumsuz etkilemektedir. Bu etkiler kesici takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, işleme süresi, tezgâh sağlığı, tezgâh dinamik yüklenmesi, ölçüsel doğruluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışma neticesinde talaşlı imalat ile üretilen parçanın:

- 1- Takım yolunun olabildiğinde homojen seçilmesi
- 2- Kullanılan devir ve eksenlerin mümkün olduğunda parça geometrisine göre tek düze kullanılmaması
- 3- Tezgâh tablasına bağlanan parçaların bağlama yöntemlerinin imalatın el verdiği sürece tezgâhı homojen ve verimli kullanacak şekilde tasarlanması
- 4- Belirli periyotlarla spindle sağlık ölçümü yapılarak tezgâhta istenmeyen titreşimlerin önüne geçilmesi
- 5- Dijital ikiz yöntemi ve modeller geliştirilerek anlık ve sürekli takip sisteminin oluşturulması

gibi çalışmalarla daha verimi yüksek üretim yapılabilir.

Gelecekteki çalışmalarda CAM programlarında parçaya, tezgâh bilgilerine göre parçaya standart takım yolları haricinde, özel homojen takım yolu oluşturabilecek arayüzler geliştirilerek ve dijital ikiz ile de işleme öncesinde kontrolü sağlanarak daha verimli bir imalat yapılabilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede istenen kalite, hız ve güven ile üretim gerçekleştirerek üretim verimliliği üst seviyelere çıkarılabilir.

THE EFFECT OF AXIAL ENGAGEMENT INTENSITY ON VIBRATION AND CUTTING PERFORMANCE IN MILLING OPERATIONS

This study investigates the effect of axial utilization intensity on vibration and cutting performance in milling operations. It was observed that intensive use of specific axes and speed ranges in CNC machines negatively impacts spindle and bearing health, leading to increased vibration levels and reduced cutting quality. The study proposes solutions to enhance manufacturing efficiency through homogeneous tool path generation, periodic maintenance strategies, and digital twin-assisted monitoring systems. The results indicate that longer tool life, improved surface quality, and optimized machining parameters can be achieved, contributing to more efficient and reliable manufacturing processes.

Keywords: Machining, Vibration, CNC Spindle, Maintenance, Milling

KAYNAKLAR

1. Liao, Z., Schoop, J. M., Saelzer, J., Bergmann, B., Priarone, P. C., Splettstößer, A., ... & Kaynak, Y. (2024). Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 50, 151-184.
2. Aydın, M. (2022). Parmak frezeleme sırasında takım salgısının etkisi dahil edilerek kesme kuvvetlerinin tahmini ve analizi. *Politeknik Dergisi*, 25(1), 157-167.
3. Wan, M., Budak, E., & Zhang, W. H. (2024). Mechanics and dynamics of thin-wall milling process.
4. Altintas, Y., Stepan, G., Budak, E., Schmitz, T., & Kilic, Z. M. (2020). Chatter stability of machining operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110801.
5. Caixu, Y. U. E., Haining, G. A. O., Xianli, L. I. U., Liang, S. Y., & Lihui, W. A. N. G. (2019). A review of chatter vibration research in

milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(2), 215-242.

6. Umamaheswara Raju, R. S., Ravi Kumar, K., Vargish, K., & Bharath Kumar, M. (2025). Machine learning based surface roughness assessment via CNC spindle bearing vibration. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19(1), 477-494.
7. Arnold, R. (1946). Cutting tools research: report of subcommittee on carbide tools: the mechanism of tool vibration in the cutting of steel. *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, 154(1), 261-284.
8. Tobias, S. A., & Fishwick, W. (1958). Theory of regenerative machine tool chatter. *The engineer*, 205(7), 199-203.
9. Tlustý, J. (1963). Stability of machine tool against self-excited vibration in machining. In *Int Prod Eng Res Conf-Proc 1963* (pp. 465-474).
10. Morales Méndez, J. D., & Rodriguez, R. S. (2017). Total productive maintenance (TPM) as a tool for improving productivity: a case study of application in the bottleneck of an auto-parts machining line. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92, 1013-1026.
11. Tlustý, J. (1986). Dynamics of high-speed milling.
12. Altintas, Y., & Weck, M. (2004). Chatter stability of metal cutting and grinding. *CIRP annals*, 53(2), 619-642.
13. Li, H. Z., & Li, X. P. (2005). A numerical study of the effects of cutter runout on milling process geometry based on true tooth trajectory. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 435-443.
14. Bai, L., Zhang, J., Budak, E., Tang, Y., & Zhao, W. (2024). Vibration energy-based indicators for multi-target condition monitoring in milling operations. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 284-300.
15. Bakhshandeh, P., Mohammadi, Y., Altintas, Y., & Bleicher, F. (2024). Digital twin assisted intelligent machining process monitoring and control. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 49, 180-190.
16. Askerden, M. K., Yazar, M., & Talaş, Ş. (2024). Investigation of the Effects of CNC Tool Runout on Machining of 1.2379 Steel and Tool Life. *Engineering Perspective*, 141.
17. Askerden, M. K., Yazar, M., & Talaş, Ş. (2024). Effects Of Cnc Tool Runouts On Drilling Process. *Engineering Perspective*, 119.

Şükran Katmer* 

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat
Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye

Yafes Çavuş 

Hacettepe Üniversitesi, Başkent OSB Teknik Bilimler
MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü,
Ankara/ Türkiye

Yunus Emre Kınacı 

Beka-Mak Makine San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezi,
Bursa/ Türkiye

Ulvi Şeker 

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat
Mühendisliği Bölümü, Ankara/ Türkiye

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 14 Mart 2025

Kabul: 16 Mayıs 2025

*Sorumlu Yazar: Şükran Katmer

Email: sukatmer@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1657753>

Testere ile Kesilmiş AA7075 Yüzeylerin Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Karakterizasyonu

Testere ile kesme işlemi imalat sürecinin ilk aşaması olup, endüstride çoğu kez, kesilen parça doğrudan bir sonraki aşamaya geçecek geometrik toleransları (diklik, paralellik, yalpa vb.) ve yüzey kalitesini taşımaz ve ikincil işlemlere ihtiyaç duyulur. Ancak kesilen malzemenin boyut tamlığı, geometrik toleransları ve yüzey durumunun istenen tolerans aralığında olması sağlanabilirse, malzeme ek işlemlere ihtiyaç duyulmadan bir sonraki aşamaya alınabilir.

Bu çalışmada, yüksek mekanik özellikleri sayesinde savunma ve havacılık sektöründe yaygın kullanılan AA7075'in şerit testere ile kesilmesinde yüzey kalitesi, yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz, Rq) esas alınarak karakterize edilmiştir. Bunun yanı sıra, testere tezgâhlarında yeni bir uygulama olan gagalama fonksiyonu ile kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey kalitesine etkileri araştırılmıştır. Her bir parametrenin üçer seviyesi üzerinden tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmış ve veriler tek yönlü ve çok yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, testerenin hem düşey yönde hem de soldan sağa hareketine bağlı olarak, tek yüzey üzerinde farklı bölgelerde istatistiki olarak anlamlı düzeyde farklı yüzey kaliteleri oluştuğunu göstermiştir. Gagalama fonksiyonu uygulanması, kesme hızının yüksek, ilerleme miktarının düşük/orta seviyelerinin kullanımı ile daha yüksek yüzey kalitesi elde etmek mümkün görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Şerit testere, AA7075, gagalama, yüzey kalitesi

1. GİRİŞ

Testere ile kesme imalat sürecindeki ilk aşamadır. Bu aşamanın çıktısı olan kesilen malzemenin boyut tamlığı, geometrik toleransları ve yüzey durumu sonraki aşamaların sürdürülmesi açısından önemlidir. Geometrik özellikleri ve yüzey durumu istenen tolerans aralığında olan malzeme ek işlemlere ihtiyaç duyulmadan bir sonraki aşamaya alınabilir. Bu sayede, kesici takım, atık malzeme ve işleme zamanından tasarruf sağlanmış olur. Bunlara bağlı olarak, sonraki aşamalarda tezgâh işgal süresi, enerji sarfıyatı ve işçilik giderleri azaltılmış olur. Ancak, endüstride çoğu kez, kesilen parça doğrudan bir sonraki aşamaya geçecek geometrik toleransları (diklik, paralellik, yalpa vb.) ve yüzey kalitesini taşımaz ve ikincil işlemlere ihtiyaç duyulur. Son yıllarda, testere tezgâhlarında, özellikle kontrol sistemlerindeki gelişmelerle birlikte, testere ile kesme aşamasından beklentiler artmış ve bu alanda hem

endüstriyel uygulamalar hem de bilimsel çalışmalar artmaya başlamıştır.

Testere ile kesme konusu kesici tipine göre, daire testere, lama testere ve şerit testere ile kesme olarak üç ana gruba ayrılabilir. Testere ile kesme de titreşim, kesme kuvvetleri, kesilen parça geometrik toleransları, yüzey durumlarına ve malzeme cinsine göre kesme şartlarının (kesme hızı ve ilerleme miktarı) belirlenmesi konuları ağırlıklı olarak çalışılmaktadır. Bunun yanı sıra testere diş tipi, diş adımı, diş seti tipi, malzemesi ve kaplamasının da kesme süreci üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Metal dışı malzemelerde, mineral taşların kesilmesinde gürültü ve buna bağlı insan sağlığı faktörü öne çıkmaktadır [1]. Ağaç/odun malzemelerin kesilmesinde beklenen çıktılar yüksek boyutsal kararlılık ve verimlilik [2]. Plastik ve plastik matrisli kompozit malzemelerin kesilmesinde testere ile kesme işleminin parçaların mekanik özelliklerine

etkileri, özellikle kesilen parçaların darbe dayanımına etkileri önem arz etmektedir [3]. Metal malzemelerin kesilmesinde, literatürde, ağırlıklı olarak düşük ve orta karbonlu alaşımsız çelik malzemenin kesilmesi sürecini irdeleyen çalışmalar göze çarpmaktadır [4-10]. Alüminyumun testere ile kesilmesinde ağırlıklı olarak titreşim ve titreşimin yüzey kalitesi ile testere yorulmasına etkileri irdelenmiştir [11]. Alüminyum alaşımları; düşük kuvvetlerle kesilebilmesine rağmen yüksek sünekliği ve yüksek BUE (Built Up Edge) oluşturma eğilimi [12, 13] nedeniyle “işlenmesi zor malzemeler” sınıfındadırlar. Metal malzemelerin kesilmesiyle ilgili çalışmalar göz önüne alındığında testere ile kesme konusunda hala bilinmeyen noktalar ve belirsizlikler vardır. Bunun yanı sıra bu malzemelerden parça imalatında, malzeme maliyeti hesaba katılınca, testere ile kesme aşamasında, atık ve hurda miktarının düşürülmesi, ikincil işlemlerin azaltılması veya kaldırılması üretimde verimliliği artırıcı rol oynayacaktır.

Kesilmeleri esnasında, talaşın doğal oluşum sürecinde kırılmaması durumunda, kesme işleminin kesintiye uğratılarak talaşın kırıldığı yönteme gagalama işlemi denmektedir. Gagalama işlemi, delik delme işleminde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Delme işleminde gagalama yönteminin amacı, sürekli talaşın kesintiye uğratılarak kırılmasını sağlamak ve delme sürecinde matkabın geri çekilerek talaş tahliyesini kolaylaştırmaktır. Gagalama yönteminin, işlenmesi zor malzemelerin delinmesinde olumlu etkileri olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur [14, 15]. Bu fonksiyonun testere ile kesmede de benzer şekilde etkili olması öngörülmektedir. Ancak gagalama yöntemi ile kesme işleminin testere ile kesme işleminde uygulandığını gösteren her hangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, havacılık ve savunma sanayinde sıklıkla kullanılan bir alüminyum alaşımının şerit testere ile kesilmesinde yüzey kalitesi, yüzey pürüzlülüğü üzerinden incelenmiş ve gagalama fonksiyonunun, kesme hızı ve ilerleme miktarı parametrelerinin parça yüzey kalitesi üzerinde etkileri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Bu deneysel çalışmada, AA7075 malzemenin şerit testere ile kesilmesi sürecinde yüzey kalitesi araştırılmıştır. 140 mm çapında, AA7075 malzeme sertifikalı temin edilmiş olup ayrıca spektral analiz de yaptırılmıştır. Numunelerin kesilmesinde servo kontrollü testere tezgâhı ((BMSO 335XS) Bekamak, Bursa) ve kaplamasız bimetal şerit testere ((Marathone® M42) Wikus, Almanya) kullanılmıştır. Şerit testere ölçüleri 34x1,1 mm ve 2-3 diştir.

Gagalama fonksiyonu, testere tezgâhlarında paket bir fonksiyon olmayıp, testere tezgâhının yazılım kodu değiştirilerek tanımlanmıştır. Gagalama işlemi için üç farklı gagalama işlemi uygulanmıştır. Şerit testerenin bağlı olduğu kesme kafasının iş parçası içinde her 5 mm ilerlemesi (inişi) sonrası 0 ms, 250 ms ve 500 ms ilerlemenin beklemeye alınması ve bu esnada boşta kesme hareketi uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre, gagalama süresi parametresinin düşük seviyesi (-) “gagalama olmadan” iken orta (0) ve yüksek (+) seviyelerde farklı sürelerde gagalama uygulanmıştır.

Diğer kesme parametreleri, kesme hızı ve ilerleme miktarı olup tüm parametrelerin üçer seviyesinin etkileri incelenmiştir. Testere ile kesme sürecinde, kesme hızı şeridin soldan sağa akış hızını ifade ederken, ilerleme miktarı şeridin düşey yönde hızını ifade etmektedir. Çizelge 1’de sunulan deney planında, parametrelerin seviyeleri belirlenirken, testere üretici firmanın önerdiği kesme hızı ve ilerleme miktarı değerleri referans alınmıştır. Gagalama fonksiyonunda gagalama süresinin kesme süresi üzerindeki etkisi dikkate alınarak seçim yapılmıştır.

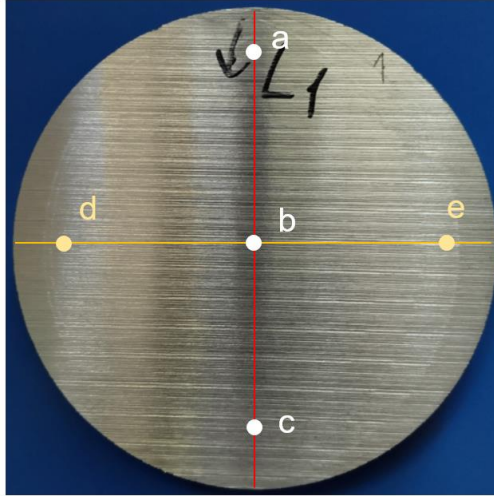
Çizelge 2’deki tam faktöriyel deney tasarım tablosunun her bir satırı için 10 mm kalınlığında bir numune kesilmiştir. Kesme işlemi sonrasında oluşan her iki yüzey, “testere ön yüzünün oluşturduğu yüzey” ve “testere arka yüzünün oluşturduğu yüzey” olarak nitelendirilerek, deney tasarım tablosuna göre numaralandırılmıştır.

Çizelge 1. Deney Planı

Faktörler	Seviyeler		
	-	0	+
(A) Gagalama Süresi (ms)	0	250	500
(B) Kesme Hızı (m/dk)	100	125	150
(C) İlerleme Miktarı (mm/dk)	85	110	130

Şerit testere ile kesilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri profilometre (Mitutoyo, Japonya) ile Şekil 1’de gösterilen 5 ayrı bölgeden (a, b, c, d, e) testere diş izlerine dik yönde yapılmıştır. Tüm ölçüm sonuçları, ön yüzey ve arka yüzey olarak iki ana grupta incelenmiş ve ana gruplar da 5 bölge

üzerinden analiz edilmiştir. Yüzey kalitesi ölçümlerinde, aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), maksimum yüzey pürüzlülüğü (Rz) ve kuadratik ortalama yüzey pürüzlülüğü (Rq) dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Ölçüm bölgeleri

Çizelge 2. Tam faktöriyel deney tasarımı

No	(A) Gagalama	(B) Kesme Hızı	(C) İlerleme Miktarı
L1	0	100	85
L2	0	100	110
L3	0	100	130
L4	0	125	85
L5	0	125	110
L6	0	125	130
L7	0	150	85
L8	0	150	110
L9	0	150	130
L10	250	100	85
L11	250	100	110
L12	250	100	130
L13	250	125	85
L14	250	125	110
L15	250	125	130
L16	250	150	85
L17	250	150	110
L18	250	150	130
L19	500	100	85
L20	500	100	110
L21	500	100	130
L22	500	125	85
L23	500	125	110
L24	500	125	130
L25	500	150	85
L26	500	150	110
L27	500	150	130

3. DENEY BULGULARI

3.1. Numune Ön ve Arka Yüzeylerinde Yüzey Kalitesi

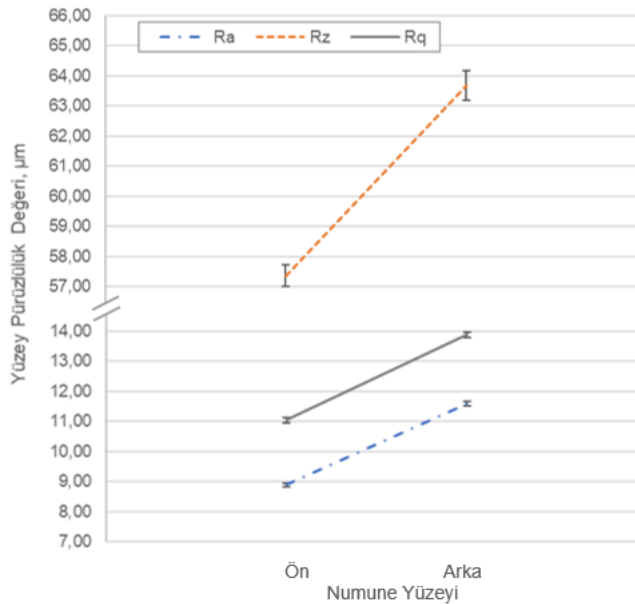
Bir numunenin kesilmesi ile aynı parametrelerle kesilmiş iki yüzey ortaya çıkmaktadır. Bu yüzeyler testerenin kesme pozisyonuna göre kopan numune tarafı, ön yüzey, kütük tarafında kalan yüzey ise arka yüzey olarak adlandırılmıştır. Elde edilen Ra, Rz ve Rq verileri, Minitab® paket programında, ayrı ayrı numune ön ve arka yüzeyi ile tek yönlü varyans analizine (tek yönlü ANOVA) tabi tutulmuştur. Tek yönlü ANOVA sonuçları, Çizelge 3’de birleştirilerek, ana etki grafikleri ise Şekil 2’de sunulmuştur. Tek yönlü varyans analizi sonuçları, her iki yüzeyin ortalama Ra, Rz ve Rq değerlerinin birbirinden

istatistiki olarak anlamlı düzeyde ($p < 0,05$) farklı olduğunu göstermiştir. Kurulan tek yönlü modeller, kesilen yüzeyin testereye göre konumunun (ön veya arka yüzey) yüzey kalitesini, Ra için %79,29; Rz için %32,8 ve Rq için %73,96 etkilediği ortaya koymuştur.

Şekil 2 incelendiğinde, testere ön yüzeyine temas eden numune yüzeyinde ortalama Ra değerinin 8,89 μm olduğunu ve arka yüzeye temas eden numune yüzeyinde ortalama Ra değerinin 11,59 μm olduğu ve iki yüzey arasındaki Ra değişiminin anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. Benzer durum Rz (sırası ile 57,36 μm ve 63,67 μm) ve Rq’da (11,05 μm ve 13,88 μm) da göze çarpmaktadır. Ra, Rz ve Rq’daki artış miktarları yüzdelik olarak sırasıyla %30,3; %11 ve %25,6’dır ve en yüksek artış Ra’da gerçekleşmiştir.

Çizelge 3. Numune ön ve arka yüzeyi ile Ra, Rz ve Rq tek yönlü ANOVA sonuçları

	Faktör	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	R ²
Ra	Numune Yüzeyi	1	98,18	98,1849	199,17	0	79,29
	Hata	52	25,63	0,493			
	Toplam	53	123,82				
Rz	Numune Yüzeyi	1	538	537,96	25,38	0	32,80
	Hata	52	1102,1	21,2			
	Toplam	53	1640,1				
Rq	Numune Yüzeyi	1	108,22	108,221	147,73	0	73,96
	Hata	52	38,09	0,733			
	Toplam	53	146,32				



Şekil 2. Numune ön ve arka yüzeylerinde yüzey pürüzlülüğü değişimi

3.2. Bölgelere Göre Yüzey Kalitesi

Bu başlıkta numunelerin ön ve arka yüzeyleri iki ayrı grup olarak ele alınmış ve bu yüzeylerde tanımlı ölçüm bölgelerinden (a, b, c, d, e) elde edilen yüzey kalitesi verileri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Her bölgeden üçer ölçüm alınmış ve analizler 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, bölgelerin yüzey kaliteleri arasında istatistiki olarak anlamlı bir fark olup olmadığı tek yönlü ANOVA ile irdelenmiştir. ANOVA sonuçları Çizelge 4 ve Çizelge 5’de Ra, Rz ve Rq için bütünleşik olarak ve etki grafikleri de Şekil 3’de birlikte verilmiştir.

Numunelerin ön ve arka yüzeylerinden elde edilen veriler, bölgeler arasındaki yüzey kalitesinin arka yüzey Rz değeri hariç $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Ön yüzeyler için, bölgelere göre Ra değişimi %18,35; Rz değişimi %10,19 ve Rq değişimi %19,56 olurken, arka yüzeyler için bu oranlar Ra %21,85; Rz %6,65 ve Rq %21,76 olmuştur (Çizelge 4 ve Çizelge 5). Bu sonuçlar, bir numunenin tüm yüzeyinin aynı kalitede olmadığını ve yüzey kalitesinin testere hareketine göre anlamlı düzeyde değiştiğini kanıtlamaktadır.

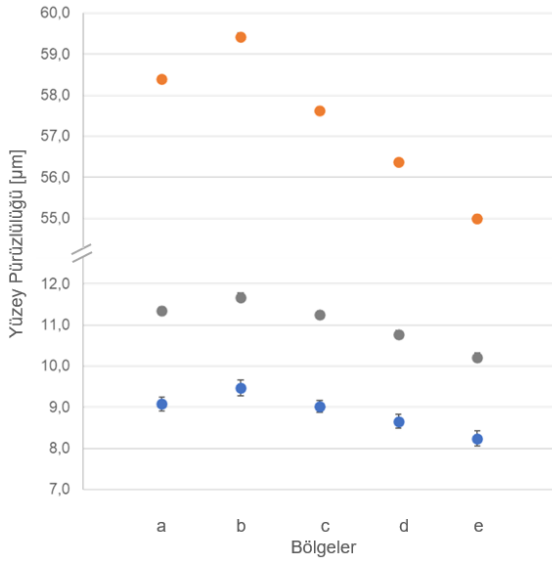
Şekil 3’deki etki grafikleri incelendiğinde, hem ön hem arka yüzeyler için yüzey kalitesinin bölgelere göre değişiminin benzer olduğu ancak değerlerin farklı olduğu göze çarpmaktadır. Hem ön hem de arka yüzeylerde en düşük yüzey kalitesi b bölgesinde (numune orta bölgesi) elde edilmektedir. Bunun muhtemel sebebi; bu bölgede talaş yükünün yüksek olması ve buna bağlı talaş sıkışması gerçekleşmesidir. A ve c bölgeleri (düşey yönde testere giriş ve çıkış bölgeleri) yüzey kalitesi olarak birbirine yakın bulunmuştur. D ve e bölgeleri testerenin soldan sağa hareketinde giriş ve çıkış bölgelerini temsil etmektedir. Numune arka yüzeyinde d ve e bölgeleri neredeyse aynı yüzey kalitesi sergilerken, numune ön yüzeyinde e bölgesi anlamlı düzeyde daha iyi yüzey kalitesine sahip çıkmıştır. Bu durum, numune ön yüzeyinin kesilen ve her adımda daha fazla serbest hale gelen parçada yer alması ve sıkışan talaşın tamamen sabit tutulan arka yüzey üzerinden akarken yüzeyi çizmesi ile açıklanabilir. Genel olarak tamamen sabit olan yüzeyin yüzey kalitesi, testere ve talaşın akışından olumsuz etkilenirken, kesme süresince esneme ihtimali olan yüzey daha iyi yüzey kalitesine sahip olmuştur.

Çizelge 4. Numune ön yüzeyi için bölgelerin tek yönlü ANOVA sonuçları

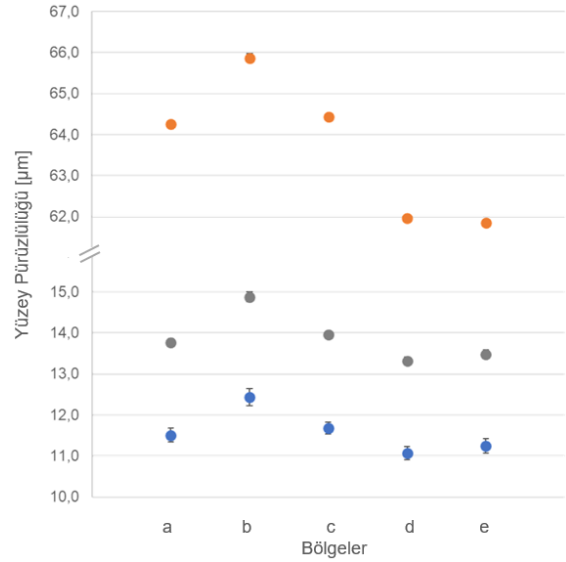
	Faktör	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	R ²
Ra	Bölgeler	4	23,2	5,7988	7,3	0	18,35
	Hata	130	103,22	0,794			
	Toplam	134	126,41				
Rz	Bölgeler	4	322,3	80,58	3,69	0,007	10,19
	Hata	130	2839,7	21,84			
	Toplam	134	3162				
Rq	Bölgeler	4	35,2	8,8	7,9	0	19,56
	Hata	130	144,8	1,114			
	Toplam	134	180				

Çizelge 5. Numune arka yüzeyi bölgelerin tek yönlü ANOVA sonuçları

	Faktör	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	R ²
Ra	Bölgeler	4	29,92	7,4805	9,09	0	21,85
	Hata	130	107	0,8231			
	Toplam	134	136,92				
Rz	Bölgeler	4	323,1	80,78	2,32	0,061	6,65
	Hata	130	4535,7	34,89			
	Toplam	134	4858,9				
Rq	Bölgeler	4	40,06	10,015	9,04	0	21,76
	Hata	130	144,01	1,108			
	Toplam	134	184,08				



(a)



(b)

Şekil 3. Bölgelerde Ra, Rz ve Rq değişimi, (a) numune ön yüzeyi, (b) numune arka yüzeyi

3.3. Parametrelerin Yüzey Kalitesine Etkileri

Şerit testere ile kesme işleminde, numune ön ve arka yüzeylerinin farklı yüzey kalitesine sahip olduğu ve bir yüzeyin yüzey kalitesinin testerenin hareketine bağlı olarak anlamlı olarak değiştiği önceki iki başlıkta ortaya konmuştur. Sonuçlar, en yüksek yüzey pürüzlülüğü ve buna bağlı en düşük yüzey kalitesinin numune arka yüzeyinde ve b bölgesinde oluştuğunu göstermiştir. Bu başlıkta, kesme parametrelerinin yüzey kalitesine etkileri irdelenirken en düşük yüzey kalitesinin elde edildiği arka yüzey b bölgesi verileri dikkate alınmıştır. Bu bölgenin, Ra, Rz ve Rq değerlerine üç ayrı gagaalama, kesme hızı ve ilerleme miktarı değerlerinin tekil, çift yönlü ve üçlü etkileşimleri çoklu ANOVA ile analiz edilmiştir. Ra, Rz ve Rq değerleri için ANOVA sonuçları Çizelge 6'da, parametrelerin tekil ana etki grafikleri ise Şekil 4'te bütünlük olarak verilmiştir.

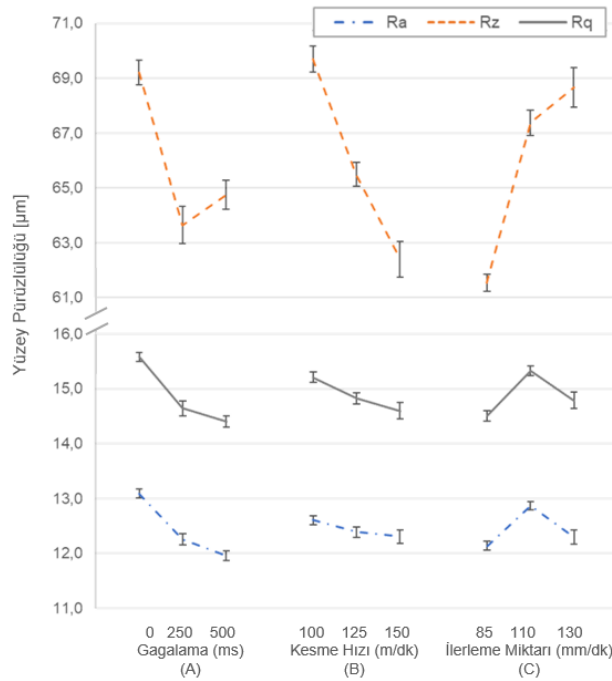
Arka yüzey b bölgesinin Ra değeri üzerinde en etkili parametre gagaalama ve kesme hızının ikili etkileşimi olurken, onu sırasıyla gagaalama*kesme hızı*ilerleme miktarı üçlü etkileşimi, gagaalama ve ilerleme miktarı tekil parametreleri takip etmiştir (Çizelge 6). Gagaalama*ilerleme miktarı ikili etkileşimi ve kesme hızının da Ra üzerindeki etkisi istatistiki olarak anlamlı olsa da diğer parametreler yanında yüzdelik değerleri düşük bulunmuştur. Rz'nin ANOVA sonuçları incelendiğinde en etkili parametre ilerleme miktarı olurken, ikinci etkili parametre kesme hızı olmuştur. Bunları sırasıyla, gagaalama*kesme hızı ikili etkileşimi, gagaalamanın tekil etkisi ve

gagaalama*ilerleme miktarı ikili etkileşimi takip etmiştir. Rq ANOVA sonuçları, Ra sonuçları ile aynı sıralamaya sahip bulunmuştur. Kurulan üç modelin R2 değerleri Ra: %99,32; Rz: %98,2 ve Rq: %99,45 olmuştur. Sonuçlar gagaalama fonksiyonunun yüzey kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Şekil 4'te sunulan Ra ana etki grafiği incelendiğinde, gagaalama fonksiyonunun devreye girmesi (250 ms) ve daha uzun gagaalama süresinde (500 ms) Ra değerinin sürekli bir azalma gösterdiği, ilerleme miktarının artışı ile Ra'nın önce arttığı sonra azaldığı, kesme hızının artışı ile Ra'nın düşüş eğilimi sergilediği ancak 125 m/dk ve 150 m/dk kesme hızları arasında anlamlı fark olmadığı görülmektedir. Rz ana etki grafiğinde ise, ilerleme miktarının artışı ile Rz'nin arttığı, yüksek ilerleme miktarı (130 mm/dk) ile orta ilerleme miktarı (110 mm/dk) arasındaki artışın anlamlı olmadığı anlaşılmaktadır. Kesme hızının artışı ile Rz düzenli olarak düştüğü ve üç seviye arasındaki farkların anlamlı olduğu dikkate değerdir. Gagaalama fonksiyonunun varlığı Rz değerini 69,2 µm'den 63,6 µm'ye düşürdüğü ancak kısa gagaalama süresi (250 ms) ile uzun gagaalama süresi (500 ms) arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Rq ana etki grafikleri genel olarak Ra ile paralel seyir izlemektedir. Ana etki grafiklerine göre daha iyi yüzey kalitesi için ideal seviyeler; gagaalama fonksiyonunun uygulanması hatta daha uzun gagaalama süresi kullanımı, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme miktarı seçimi öne çıkmaktadır.

Çizelge 6. Numune arka yüzeyi b bölgesi yüzey kalitesi ANOVA sonuçları

Faktör	SD	Ra			Rz			Rq		
		F-Değeri	P-Değeri	%Etki	F-Değeri	P-Değeri	%Etki	F-Değeri	P-Değeri	%Etki
Model	28	272,41	0	99,32	101,34	0	98,20	336,87	0	99,45
Tekrar	2	0,71	0,497	0,02	0,45	0,642	0,03	1,26	0,292	0,03
Lineer	6	388,02	0	30,32	295,54	0	61,37	443,8	0	28,08
A	2	781,71	0	20,36	210,56	0	14,57	780,17	0	16,45
B	2	52,78	0	1,37	326,2	0	22,58	193,6	0	4,08
C	2	329,58	0	8,58	349,87	0	24,22	357,63	0	7,54
2-Yönlü Etkileşim	12	291,31	0	45,52	59,16	0	24,57	383,59	0	48,53
A*B	4	754,93	0	39,32	105,68	0	14,63	959,24	0	40,46
A*C	4	107,47	0	5,60	51,21	0	7,09	180,6	0	7,62
B*C	4	11,55	0	0,60	20,59	0	2,85	10,93	0	0,46
3-Yönlü Etkileşim	8	225,28	0	23,47	44,18	0	12,23	270,48	0	22,82
A*B*C	8	225,28	0	23,47	44,18	0	12,23	270,48	0	22,82
Hata	52			0,68			1,8			0,55
Toplam	80			100			100			100



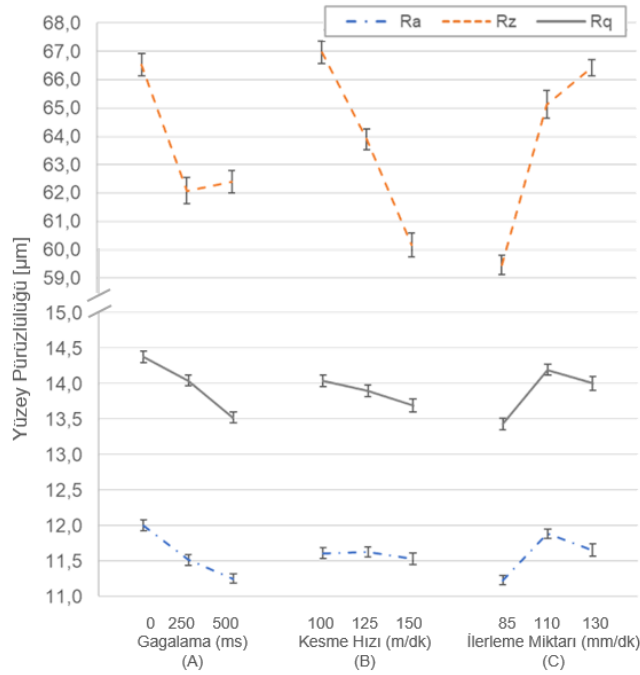
Şekil 4: Arka yüzey b bölgesinin Ra, Rz ve Rq ana etki grafikleri

Numune arka yüzeyi için tüm bölgelerin yüzey pürüzlülük sonuçları üzerinden çoklu ANOVA analizi yapılmış ve sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Tüm bölgelerin dikkate alınması ile kurulan modellerin R2değerleri Ra, Rz ve Rq için sırasıyla, %68,52; %78,89 ve %70,9 olmuştur. Parametrelerin etki sıralaması b bölgesi sonuçları ile benzer olup, etki oranları daha düşük çıkmıştır. Bu da bazı bölgelerdeki sonuçların b bölgesi ile tamamen örtüşmediğini ancak parametrelerin tüm yüzeyin ortalama yüzey kalitesi

üzerindeki etkilerini kabul edilebilir güvenilirlik seviyesinde kullanılabilir bilgiye dönüştürülebildiğini göstermektedir. Benzer etkiyi Şekil 5'de sunulan, arka tüm yüzeyin ana etki grafiklerinde de görmek mümkündür. Özetle, kesme esnasında gagalama fonksiyonu kullanılması, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme miktarı değerleri ile AA7075'in testere ile kesilmesinde daha yüksek yüzey kalitesi elde edilebileceği öngörülmektedir.

Çizelge 7: Numune tüm arka yüzeyi yüzey kalitesi ANOVA sonuç tablosu

Faktör	SD	Ra			Rz			Rq		
		F-Değeri	P-Değeri	%Etki	F-Değeri	P-Değeri	%Etki	F-Değeri	P-Değeri	%Etki
Model	28	7,55	0	68,52	12,96	0	78,89	8,45	0	70,90
Tekrar	2	18,05	0	21,85	8,19	0	6,65	19,44	0	21,76
Lineer	6	9,31	0	16,91	47,83	0	58,24	11,21	0	18,82
A	2	15,74	0	9,53	28,11	0	11,41	17,12	0	9,58
B	2	0,27	0,767	0,16	52,84	0	21,45	2,62	0,077	1,47
C	2	11,93	0	7,22	62,53	0	25,38	13,89	0	7,77
2-Yönlü Etkileşim	12	6,63	0	24,09	4,63	0	11,27	7,35	0	24,68
A*B	4	16,07	0	19,46	8,06	0	6,54	17,22	0	19,27
A*C	4	3,47	0,011	4,20	4,83	0,001	3,92	4,42	0,002	4,94
B*C	4	0,35	0,842	0,43	0,99	0,416	0,80	0,41	0,799	0,46
3-Yönlü Etkileşim	8	2,34	0,024	5,67	1,68	0,111	2,73	2,52	0,015	5,64
A*B*C	8	2,34	0,024	5,67	1,68	0,111	2,73	2,52	0,015	5,64
Hata	52			31,48			21,11			29,10
Toplam	80			100			100			100



Şekil 5: Numune arka tüm yüzeyi yüzey kalitesi ana etki grafikleri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AA7075'in şerit testere ile kesilmesinde yüzey kalitesi yüzey pürüzlülüğü esas alınarak karakterize edilmiştir. Bunun yanı sıra, gagalama fonksiyonu, kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey kalitesine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, bir kesme işlemi sonunda aynı parametrelerle elde edilen ve testerenin temas yüzeylerine göre numunenin ön ve arka yüzeyi olarak tanımlanan yüzeylerin yüzey kaliteleri arasında

istatistiki olarak anlamlı fark bulunduğu ve arka yüzeyin yüzey kalitesinin, ön yüzeye göre daha düşük olduğu görülmüştür. Testerenin hem düşey hem de soldan sağa hareketine bağlı olarak, tek yüzey üzerinde farklı bölgelerde istatistiki olarak anlamlı düzeyde farklı yüzey kaliteleri elde edilmektedir. Bu bölgeler içerisinde en düşük yüzey kalitesi, silindirik parçanın orta bölgesinde gerçekleşmekte olup, bu bölgenin talaş yükü ve talaş sıkışmasından olumsuz etkilendiği sonucuna varılmıştır. Gagalama fonksiyonu uygulanması, kesme hızının yüksek,

ilerleme miktarının düşük/orta seviyelerinin kullanımı ile daha yüksek yüzey kalitesi elde etmek mümkün görülmektedir. Gagalama fonksiyonundan kaynaklı kesme süresinin uzaması, daha yüksek kesme hızı ile telafi edilebilirken, orta veya düşük ilerleme miktarı seviyeleri ile kesme süresi ve yüzey kalitesi arasında verimli bir denge kurulabileceği sonucuna varılmıştır.

CHARACTERISATION OF SAW-CUT AA7075 SURFACES IN TERMS OF SURFACE ROUGHNESS

Sawing is the first stage of the manufacturing process, and most of the time in the industry, the cut piece does not meet the geometric tolerances (perpendicularity, parallelism, wobble, etc.) and surface quality that will pass directly to the next stage, and secondary processes are needed. However, if the dimensional accuracy, geometric tolerances and surface condition of the cut material can be ensured to be within the desired tolerance range, the material can be taken to the next stage without the need for additional processes.

In this study, the surface quality of AA7075, which is widely used in the defense and aerospace industry thanks to its high mechanical properties, was characterized based on the surface roughness (Ra, Rz, Rq) in band saw cutting. In addition, the effects of the pecking function, which is a new application in sawing machines, cutting speed and feed rate on the surface quality were investigated. A full factorial experimental design was applied over three levels of each parameter and the data were evaluated with one-way and multi-way analysis of variance (ANOVA). The results showed that statistically significantly different surface qualities occurred in different regions on a single surface, depending on the movement of the saw both in the vertical direction and from left to right. It seems possible to obtain higher surface quality by applying the pecking function, using high cutting speed and low/medium feed rate.

Keywords: Cutting with band-saw, AA7075, pecking, surface quality

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2218 programı kapsamında 123C103 kodlu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar destek için TÜBİTAK BİDEB'e teşekkür eder.

KAYNAKLAR

1. Şengün, N., Altındağ, R., Demirdağ, S. 2013. Dairesel Testerele Kesme İşleminde Testere Devir Sayısının Ve Gürültü Seviyesi

- Değişimlerinin İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 19, Sayı 3, 2013, Sayfalar 121-126.
2. Chai, H., So, C., Yuan, P.F. 2021. Manufacturing double-curved glulam with robotic band saw cutting technique. Automation in Construction 124 (2021) 103571.
3. Bates, P.J., Wang, C.Y. The Effect of Sample Preparation on the Mechanical Properties of Nylon 66. Polymer Engineering And Science, April 2003, Vol. 43, No. 4.
4. Mulaitat, A. 2022. Şerit Testere İle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
5. Civelek, H.A. Gökmen, O., Çavdar, K. 2022. Şerit Testere Makinelerinde Kesme Sürecinin Deneysel İncelenmesi. 1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences
6. Yıldız, S., Özsoy, M., Özsoy, N., Doğan, S. 2021. AISI 1040 Malzemesinin Şerit Testere İle Kesiminde İşlem Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Taguchi Metoduyla İncelenmesi. Aegean Summit 2nd International Applied Sciences Congress. Sayfa 65-75.
7. Yıldız, S. 2022. AISI 1040 Malzemesinin Yüksek Performanslı Otonom Daire Testere Makinesi ile Kesiminde Kesme Parametrelerinin Talaş Sıcaklığına Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. 22 (2022) 055903 (1225-1237).
8. Ulaş, H.B., Mihmat, F., Demir, H. 2010. DIN 1.2344 Sıcak İş Takım Çeliğinin Testere Freze Çakılarıyla İşlenebilirliğinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 26(2): 170-178.
9. Yılmaz, T., Uzun, İ., Uzun, İ. 2014. Lama Testere ile AISI 1020 Malzemesinin Kesilmesi İşleminde Takım Performansının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi. XX (2014) xxxxxx (xx s).
10. Ko, T.J., Kim, H.S. 1999. Mechanistic cutting force model in band sawing. International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 1185–1197.
11. Gendraud, P., Roux, J.-C., Bergheau, J.-M. 2003. Vibrations and stresses in band saws: A review of literature for application to the case of aluminium-cutting high-speed band saws. Journal of Material Processing and Technology 135 (2003) 109-116.
12. Cakir, A., Yağmur, S., Kavak, N., Küçüktürk, G., Seker U. 2016. The effect of minimum quantity lubrication under different parameters

- in the turning of AA7075 and AA2024 aluminium alloys. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, cilt.84, ss.2515-2521.
13. Yağmur, S., Kaya, M.K., Şeker, U. 2021. AA-6082 T4 Alaşımının Tornalamasında Çok Kristalli Elmas (ÇKE) Takımlara Uygulanan Talaş Kırıcı Formlarının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt.7, sa.1, ss.51-57.
14. Kivak, T., Habali, K., Şeker, U. 2012. The effect of cutting paramaters on the hole quality and tool wear during the drilling of Inconel 718. Gazi University Journal of Science.
15. Yıldız, Y., Korkut, I., Şeker, U. 2006. Development of a feature based CAM system for rotational parts. Gazi University Journal of Science.

Buse Güney*^{ID}

Ege Güvenir^{ID}

Hüseyin Emre Çakırca^{ID}

Yaşar Emre Ünal^{ID}

Ahmet Şimşek^{ID}

Yusuf Furkan Yapan^{ID}

Orhan Çakır^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Makine Müh. Bölümü
İstanbul/Türkiye.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 14 Mart 2025

Kabul: 2 Haziran 2025

*Sorumlu Yazar: Buse Güney

Email: buseguney193@gmail.com,

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1657815>

IMPAX ve NIMAX Takım Çeliklerinin Parmak Freze ile İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Karşılaştırılması

Bu çalışmada talaşlı imalatla kullanılan işleme parametrelerinin NIMAX ve IMPAX (DIN 1.2738) takım çeliklerinin talaşlı işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla belirlenen talaşlı işleme parametreleri olarak; kesme hızı (75, 100 ve 125 m/dak), ilerleme hızı (0,05, 0,10 ve 0,15 mm/dev) ve kesme koşuldur (Kuru ve Hibrit Nano Minimum Miktar Yağlama- HNMMY). Taguchi'nin L18 ($2^1 \times 3^2$) ortogonal dizisi ve Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak seçilen talaşlı işleme parametreleri, sistematik olarak incelenmiş ve optimize edilmiştir. Deneyisel sonuçlar, HNMMY koşulları altında yüzey pürüzlülüğünde önemli iyileşmeler olduğunu ortaya koymuştur. NIMAX çeliği için HNMMY koşulları yüzey pürüzlülüğünde %51,35'e varan bir iyileşme sağlarken kesme koşulu %81,6'lık bir oranla en etkili parametre olmuştur. Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, IMPAX çeliği için HNMMY koşulları, yüzey pürüzlülüğünde %40,2'ye varan bir iyileşme sağlamış; bu iyileşmede kesme koşulu %72 oranında belirleyici bir etken olmuştur. IMPAX çeliği için HNMMY koşulu, yüzey pürüzlülüğünde %40,2'ye varan bir iyileşme sağlamıştır. Ayrıca kesme koşulu, %72 oranında katkı sağlayarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olmuştur. Bu durum, NIMAX takım çeliği için elde edilen sonuçlarla da paralellik göstermektedir. Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde, NIMAX malzemesinin aynı kesme parametreleri altında IMPAX malzemesine kıyasla %43,68'e kadar daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri verdiği ortaya çıkmıştır. Yapılan deneyisel çalışma sonucunda; IMPAX ve NIMAX takım çeliği malzemeleri için optimum talaşlı işleme parametreleri, her iki malzeme için HNMMY kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı imalat, Takım çelikleri (IMPAX, NIMAX), Yüzey Pürüzlülüğü, Optimizasyon

1. GİRİŞ

Günümüzde plastik endüstrisi sürekli bir büyüme içindedir ve özellikle plastik enjeksiyon işlemleri için kullanılan plastik kalıpların imalatı için imalatı önemli bir yer almaktadır. Plastik kalıpların tüm gereksinimleri göz önünde bulundurulduğunda, enjekte edilen plastik malzemesi, ortaya çıkacak plastik parçanın işlenen kalıp yüzeyindeki hatalar da dahil olmak üzere, tüm detayları eksiksiz yansıttığından, plastik kalıpların imalatında kalıp yüzey bitirme işlemi ayrı bir önem oluşturur. Plastik enjeksiyon kalıplama, plastik parçaları üretmek için kullanılan işlemlerden sadece bir tanesidir [1-3].

Bununla birlikte, ekstrüzyon [4,5], termoform [6,7], şişirme [8,9] ve talaşlı işleme [10,11] gibi üretim yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında plastik enjeksiyon kalıplama, hassas toleranslara ve yüksek kaliteli yüzey kalıplamalarına sahip kalıplar gerektiren plastik bileşenlerin üretilmesi için oldukça popüler bir yöntemdir.

Plastik kalıpların imalatında yaygın olarak kullanılan malzemeler DIN 1.2738 kodlu olarak bilinirler. Bu malzeme grubu içinde, malzeme üreticilerinin kendi deneyimlerine bağlı olarak

kimyasal içerikleri değişik ama aynı grup içinde yer alan takım çeliklerinin endüstriyel kullanıma sunulduğu bilinmektedir [1,2]. NIMAX ve IMPAX malzemeler de takım çeliği grubunda, DIN 1.2738 yer almakta, fakat kimyasal içerikleri farklılık göstermektedir. Bu malzemelerin talaşlı işlenebilirlik konusunda NIMAX ve IMPAX kodlu takım çeliklerinin iyi olduğu üretici firma tarafından belirtilmiştir. Plastik kalıpların imalatında yaygın olarak kullanılan bu iki takım çeliğinin farklı özelliği, sertlik değerlerindeki farklılıklardır; IMPAX takım çeliğinin sertlik değeri 290-340 HB iken, NIMAX takım çeliğinin sertlik 360-400 HB değerindedir [12, 13].

Plastik enjeksiyon kalıplarında, kalıbın yüzey kalitesi, plastik ürünün görünümü üzerindeki doğrudan etkileri nedeniyle önemli bir gerekliliktir ve bu nedenle kalıp üretiminde iyi yüzey kalitesi elde etmek için optimum işleme parametrelerinin seçilmesi oldukça önemlidir. Bu parametrelere genellikle operatör deneyimi veya pratik bilgilere dayalı olarak karar verilir [11,14]. Bu çalışmada, farklı koşullar altında pratik sonuçlar ortaya konmaya çalışılmıştır. Kalıp imalatında takım çeliklerinin işlenmesinde yaygın olarak tercih edilen frezeleme yönteminin uygulanması ile ortaya çıkan sonuçlar detaylı şekilde analiz edilmiş ve optimizasyon işlemi yapılmıştır.

Yüzey kalitesi konusunun ortaya konmasında, dört talaşlı işleme parametresinin (kesme hızı, ilerleme, radyal derinlik ve eksenel kesme derinliği) yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha büyük etkisi vardır [14]. Abou-El-Hossein ve arkadaşları, parmak frezelemede kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetlerini tahmin etmek için bir yanıt yüzey modeli kullanmışlardır [14]. Kara ve Öztürk, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını analiz etmiş ve kesme hızının sert tornalama koşullarında her ikisini de önemli ölçüde etkilediğini bulmuştur [15]. Literatürde, NIMAX ve IMPAX takım çeliklerinin talaşlı işlenebilirliğinde kesme hızı [16-19], ilerleme hızı [16-19], kesme derinliği [16-19], uç yarıçapı [16,17,19], kesme ortamı [16], radyal kesme derinliği ve ısıtma işlemi (soğuk ortamda bekletme) [18-19], seçilen kesici takımın özellikleri (kesici kaplaması, geometrisi ve kesme yolu) [17] gibi işlem parametreleri olduğu belirlenmiştir. Bu işleme parametreleri ile birlikte yüzey pürüzlülüğü [18-19], kesme kuvveti [16], malzeme kaldırma oranı [18], takım aşınması [18], takım ömrü [16, 19], güç tüketimi [16], talaşlı işleme süresi ve talaş özellikleri gibi işlenebilirlik kriterleri karakterize edilmiştir.

Kesme sıvılarının kullanımı talaşlı işleme süreçlerinde oldukça önemli bir rol oynar. İstenen yüzey kalitesini ve boyutsal işleme hassasiyetini

elde etmek için kullanılması konusunda olumlu sonuçlar ortaya konmuştur [20-22]. Günümüzde, talaşlı işleme operasyonları sırasında iş parçasını ve kesici takımını yağlamak/soğutmak ve nihai ürünün kalitesini artırmak için çeşitli kesme sıvıları kullanılmaktadır. Belirli işleme koşullarına göre uyarlanmış uygun bir yağlayıcı ve yöntem seçmek, takım aşınmasını azaltmak, yüzey kalitesini artırmak ve genel işleme süreci performansını sürdürmek için büyük önem teşkil etmektedir [20]. Minimum miktarda yağlama (MMY) teknolojisi, talaşlı imalatla artan verimlilikleri ve çevre dostu özellikleri nedeniyle giderek daha fazla tercih edilen bitkisel yağ bazlı yağlayıcıları kullanarak özellikle ilgili olduğunu kanıtlamaktadır [21]. Son yıllarda çok sayıda çalışmada farklı malzemelerin işlenebilirliğini artırmak için çeşitli soğutma teknikleri kullanılmıştır. Detaylı literatür taraması sonucunda NIMAX ve IMPAX takım çeliklerinin işlenmesinde kuru, HNMMY ve MMY gibi soğutma koşullarının araştırıldığı analiz edilmiştir [22].

Bu çalışmanın amacı, IMPAX ve NIMAX takım çeliği malzemelerin parmak freze ile işlenmesinde, üç farklı kesme hızı ve ilerleme hızı kullanılırken kesme koşullarının (kuru işleme ve HNMMY kullanılarak yapılan işleme) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu faktörleri sistematik olarak karşılaştırmak için Taguchi'nin $L_{18}(2^1 \times 3^2)$ ortogonal dizisi kullanılmıştır. Sonuçları analiz etmek için hem Taguchi yöntemi hem de Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Bu deneysel tasarım, her bir parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini ve işleme süreçlerinin optimize edilebilmesi için değerli bilgiler sağlamıştır.

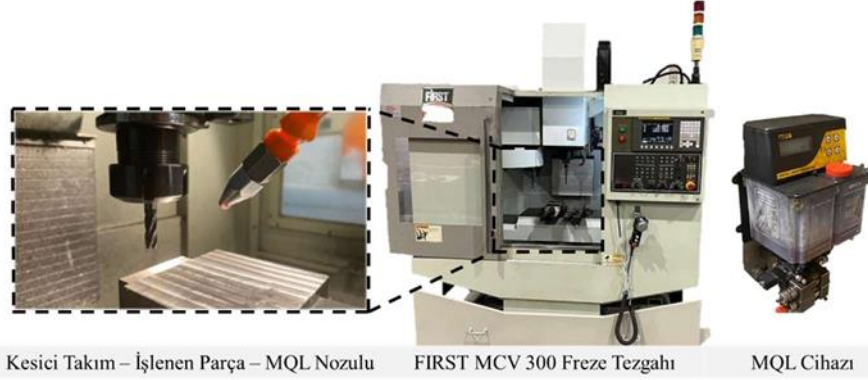
2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, belirlenen iki takım çeliği malzemesinin kodu aynıdır ve DIN 1.2738 olarak standartlaştırılmıştır. Plastik enjeksiyon takım çeliğinin modifiye edilmiş türleri IMPAX ve NIMAX işleme operasyonlarını gerçekleştirmek için kullanılmıştır.

Belirlenen iki takım çeliği malzemesinin kimyasal içeriği Tablo 1'de verilmiştir. NIMAX iyi işlenebilirliğe ve çok iyi kaynak özelliklerine sahiptir ve IMPAX yüksek saflığa ve iyi homojenliğe sahiptir [12,13]. İş parçası malzemelerinin boyutları sırasıyla kalınlık, uzunluk ve genişlik olarak 30x100x100 mm'dir. Frezeleme işlemi sırasında işleme uzunluğu ve kesme derinliği 100 mm ve 1 mm'de sabit tutulmuştur.

Tablo 1. IMPAX ve NIMAX malzemelerin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri.

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Akma Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Sertlik (HB)
IMPAX	0,37	0,3	1,4	2,0	1,0	0,2	900	1020	330
NIMAX	0,1	0,3	2,5	3,0	0,3	0,3	785	1265	400



Şekil 1. Deneysel kurulum.

Deneysel çalışma parmak freze ile yapılmış ve deneylerde kullanılan First MCV-300 CNC freze tezgahı Şekil 1’de verilmiştir. NIMAX ve IMPAX malzemeleri için MMY soğutma sisteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm deneyler için karbür parmak freze (K40) kaplamasız kesici takım kullanılmıştır [22]. Kesici takım seçimi, ülkemizde yaygın kullanımı nedeniyle yapılmıştır. Kesici takımın çapı 8 mm ve diş sayısı 4’tür. Her deney için yeni bir kesici takım kullanılarak, kuru işleme ve HNMMY ile frezeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Frezeleme işlemlerinde kullanılan HNMMY, ticari bir bitkisel bazlı kesme sıvısı olan Werte KT2000’e iki farklı mono-nanofluid eklenerek hazırlanmıştır. NanoGraphene Platelets (nGP) ve nano molibden disülfürün ($nMoS_2$) ağırlık yüzdesi oranı literatüre göre seçilmiştir [23,24]. Nanopartiküllerin oranı ağırlıkça %0,2 MoS_2 ve %0,8 nGP’dir. Bu nanopartiküllerin seçimi ilgili özelliklerine dayanmaktadır: $nMoS_2$, nGP’ye kıyasla daha üstün yağlama sağlarken, nGP, $nMoS_2$ ’den daha yüksek bir termal iletkenlik katsayısına sahiptir [25]. Hazırlanan kesme sıvısı, deneylerden önce Wise-Tis HG-15D model homojenizatörde 5000 rpm’de 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma sonrasında önemli bir sıcaklık artışı gözlemlenmemiş ve kesme sıvısı MMY cihazına aktarılmıştır. HNMMY uygulamak

için Werte STN 15 model MMY cihazı kullanılmıştır. Seçilen talaşlı işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemek için Mitutoyo Surftest SJ210 model yüzey pürüzlülüğü test cihazı kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçülmüştür. Toplam 15 adet yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülmüş ve ölçme işlemleri 5 adet başlangıç, 5 adet orta ve son talaşlı işlenmiş yüzeylerden alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ISO 4287:1997 standardına göre yapılmıştır. Ölçümlerde 0.5 mm/s, ve ölçme uzunluğu (λ_c) 0.8 mm olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, IMPAX ve NIMAX kalıp çelikleri için, iki seviyeli (2^1) kesme koşulu ve üç seviyeli (3^2) kesme hızı ve ilerleme hızı olmak üzere üç girdi parametresi için deney tasarımı Taguchi mix L18 ($2^1 \times 3^2$) dizisine göre yapılandırılmıştır. Deney yapılandırmasına ait girdi parametreleri ve parametrelerin seviyeleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneylerde kesme derinliği (1 mm), nozul açısı (30°), nozul mesafesi (30 mm) ve HNMMY akış hızı (60 ml/sa) sabit tutulmuştur. Her iki malzeme için 18 deney gerçekleştirilmiş ve malzemelerin sertlik değerlerinin aynı girdi parametreleri altında yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemek için yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür.

Tablo 2. Talaşlı işlemede girdi parametreleri ve seviyeleri

Seviye Parametre	1	2	3	Birim
Kesme Koşulu	Kuru	HNMMY	-	-
Kesme Hızı	75	100	125	m/dak
İlerleme Hızı	0,05	0,10	0,15	mm/dev

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel Sonuçlar

Talaşlı imalatla yüzey pürüzlülüğü kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, takım geometrisi ve kullanılan soğutma veya yağlama sisteminin türü gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu faktörler, kesici takım ile iş parçası arasındaki etkileşimi değiştirerek yüzey dokusunda değişikliklere yol açabilir [26,27]. Bu çalışmada, farklı işleme koşullarının yüzey kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, ortalama yüzey pürüzlülüğü birincil çıktı parametresi olarak seçilmiş ve kesme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen veriler üzerinde gerçekleştirilen ANOVA analizi ile her bir işleme parametresinin istatistiksel anlamlılığı ve katkı oranları belirlenmiştir. Sonuçlar, farklı malzemelerin ve kesme koşullarının performansını karşılaştırmaya odaklanarak en iyi yüzey kalitesinin elde edilebileceği koşulları belirlemek için analiz edilmiştir.

Deneysel çalışma ile NIMAX ve IMPAX takım çeliklerinin parmak freze ile işlenmesi üç farklı talaşlı işleme parametresi esas alınarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, Şekil 2’de grafiksel olarak sunulmuştur. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlara dayanarak, yüzey pürüzlülüğü için en uygun talaşlı işleme parametrelerini belirlemek üzere çeşitli optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Şekil 2, IMPAX ve NIMAX malzemeleri için seçilen işleme parametrelerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğünü göstermektedir. Her iki malzeme için de HNMMY koşullarının, literatürde belirtildiği üzere, daha düşük sıcaklık ve sürtünme nedeniyle kuru koşullardan daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağladığı görülmektedir [28-30]. Ayrıca, kesme hızının artırılması ve ilerleme hızının azaltılmasının yüzey kalitesini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Kesme hızının artırılması, takım ile iş parçası arasındaki temas süresini azaltarak daha düzgün talaş oluşmasını sağlamış ve bu sayede yüzeyde oluşan plastik deformasyon miktarını azaltarak daha düşük yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlandırmıştır. Benzer şekilde, ilerleme hızının azaltılması, takımın iş parçası üzerinde bıraktığı izlerin daha sık ve daha az belirgin olmasını sağlamış, bu da yüzey dalgalanmalarının azalmasına ve dolayısıyla yüzey kalitesinin iyileşmesine katkı sağlamıştır [31,32]. Bu sonuçlar, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki

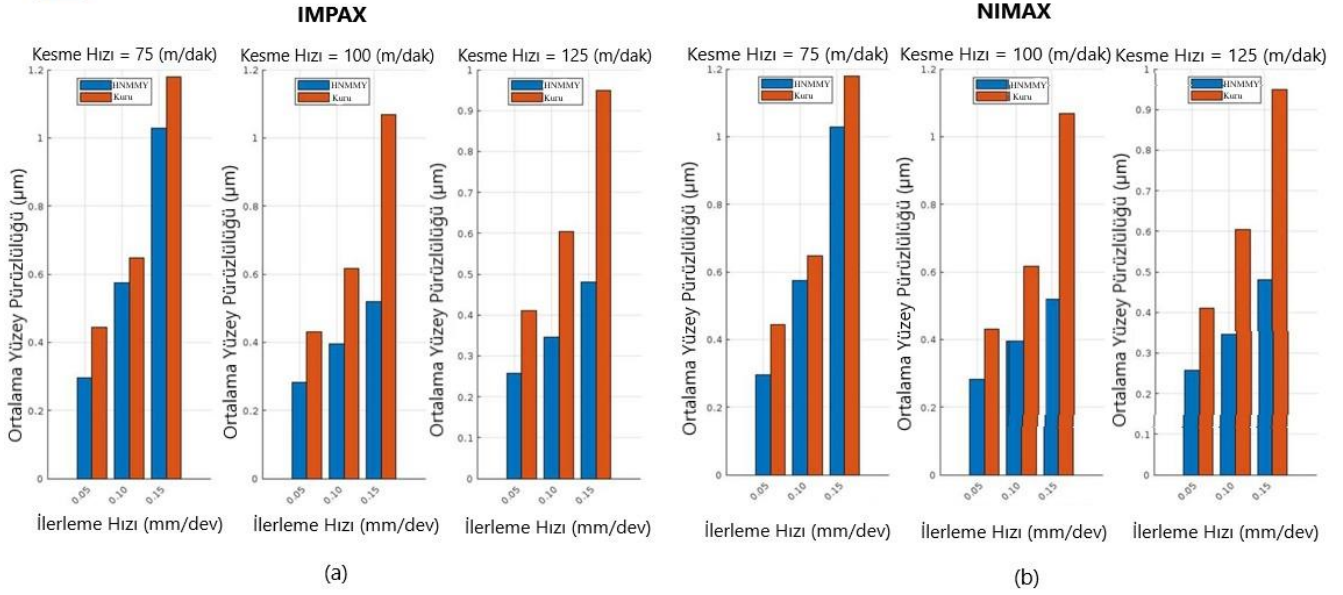
etkilerini araştıran literatürdeki çalışmalarla tutarlıdır. HNMMY yönteminin kullanılmasının diğer tüm parametreler sabit tutulduğunda yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri $R_a = 0,258 \mu\text{m}$ olarak 16 numaralı deneyde 125 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/dev ilerleme hızı ve HNMMY sisteminin uygulandığı durumda gözlemlenmiştir. Talaşlı işleme koşulu kuru olduğunda elde edilen en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri $R_a = 0,410 \mu\text{m}$ olup 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı altında 7 numaralı deneyde kaydedilmiştir. Tablo 3’te gösterildiği gibi diğer parametreler sabit tutulurken HNMMY kullanımı, yüzey pürüzlülüğünde minimum %11,48 ile maksimum %51,35 arasında değişen bir iyileşme ile sonuçlanmıştır. HNMMY kullanımından bağımsız olarak ilerleme hızı parametresinin artırılmasının yüzey pürüzlülüğünün üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğu da Tablo 3 ve Tablo 4’teki değerlerde görülmektedir. İki kalıp çeliği malzemesi karşılaştırıldığında aynı parametreler altında NIMAX malzemesinin %43,68’e kadar daha iyi yüzey pürüzlülüğü sergilediği bulunmuştur.

3.2. Taguchi Tasarımı ve Sinyal-Gürültü (Signal-to-Noise, S/N) Oranları

Taguchi yönteminde “sinyal-gürültü oranı” (Signal-to-Noise, S/N) kalite özelliklerinin varyasyonunu azaltmak ve istenen hedefe ulaşmak için kullanılan önemli bir metriktir. S/N oranları, kontrol faktörlerinin performans üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılır ve genellikle üç farklı kategoriye ayrılır: daha büyük daha iyidir (Larger is Better), nominal daha iyidir (Nominal is Better) ve daha küçük daha iyidir (Smaller is Better) [33,34]. Bu çalışmada performans kriteri olarak minimize edilmek istenen yüzey pürüzlülüğü ölçüldüğünden, her iki deney malzemesi için sinyal-gürültü oranı “daha küçük daha iyidir” (Smaller is Better) kategorisine göre değerlendirilmiş ve sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Sinyal-gürültü oranı (S/N) değerleri özellikle Taguchi yönteminde yaygın olarak kullanılan bir performans ölçütüdür. Bu S/N değerleri sistemin istenen değişken olan sinyalden ve istenmeyen değişken olan gürültüden ne kadar etkilendiğini gösterse de S/N değerleri yüksek olduğunda sistem tepkisinin gürültüden daha az olduğunu gösterdiğinden daha iyi olarak kabul edilir.

HNMMY: Hibrit Nano Minimum Miktar Yağlama
Kuru



Şekil 2. (a) IMPAX malzemesinin parmak freze ile Kuru ve HNMMY koşullarında işlenmesi sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (b) NIMAX malzemesinin parmak freze ile Kuru ve HNMMY koşullarında işlenmesi sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Tablo 3. IMPAX malzeme için deney sonuçları.

Deney No	Gerçek Değerler						S/N oranları	
	Kesme Koşulu	Kesme (m/dak)	Hızı	İlerleme (mm/dev)	Hızı	Yüzey (µm)	Pürüzlülüğü	SNRA1
1	Kuru	75		0,05		0,680		3,3498
2	Kuru	75		0,1		0,719		2,8634
3	Kuru	75		0,15		1,232		-1,8146
4	Kuru	100		0,05		0,600		4,4370
5	Kuru	100		0,1		0,665		3,5479
6	Kuru	100		0,15		1,193		-1,5328
7	Kuru	125		0,05		0,548		5,2301
8	Kuru	125		0,1		0,634		3,9628
9	IMPAX Kuru	125		0,15		0,989		0,0936
10	HNMMY	75		0,05		0,525		5,5956
11	HNMMY	75		0,1		0,600		4,4370
12	HNMMY	75		0,15		1,078		-0,6546
13	HNMMY	100		0,05		0,502		5,9946
14	HNMMY	100		0,1		0,580		4,7314
15	HNMMY	100		0,15		0,907		0,8459
16	HNMMY	125		0,05		0,349		9,1358
17	HNMMY	125		0,1		0,541		5,3441
18	HNMMY	125		0,15		0,805		1,8868

Tablo 4. NIMAX malzeme için deney sonuçları.

Deney No	Gerçek Değerler							S/N oranları
	Kesme Koşulu	Kesme Hızı (m/dak)	Hızı	İlerleme (mm/dev)	Hızı	Yüzey (µm)	Pürüzlülüğü	SNRA1
1	Kuru	75		0,05		0,444		7,0499
2	Kuru	75		0,1		0,648		3,7628
3	Kuru	75		0,15		1,178		-1,4229
4	Kuru	100		0,05		0,430		7,3407
5	Kuru	100		0,1		0,617		4,1943
6	Kuru	100		0,15		1,068		-0,5714
7	Kuru	125		0,05		0,410		7,7390
8	Kuru	125		0,1		0,605		4,3649
9	NIMAX Kuru	125		0,15		0,950		0,4455
10	HNMMY	75		0,05		0,296		10,5709
11	HNMMY	75		0,1		0,574		4,8218
12	HNMMY	75		0,15		1,029		-0,2483
13	HNMMY	100		0,05		0,282		10,9813
14	HNMMY	100		0,1		0,396		8,0388
15	HNMMY	100		0,15		0,520		5,6866
16	HNMMY	125		0,05		0,258		11,7676
17	HNMMY	125		0,1		0,346		9,2157
18	HNMMY	125		0,15		0,480		6,3691

Tablo 5. IMPAX malzemenin Sinyal-gürültü oranı için yanıt tablosu.

Seviye	Kesme Koşulu	Kesme Hızı	İlerleme Hızı
1	4,1463	2,2961	5,6238
2	2,2375	3,0040	4,1478
3		4,2755	-0,1959
Delta	1,9088	1,9794	5,8198
Sıralama	3	2	1

Tablo 6. NIMAX malzemenin Sinyal-gürültü oranı için yanıt tablosu

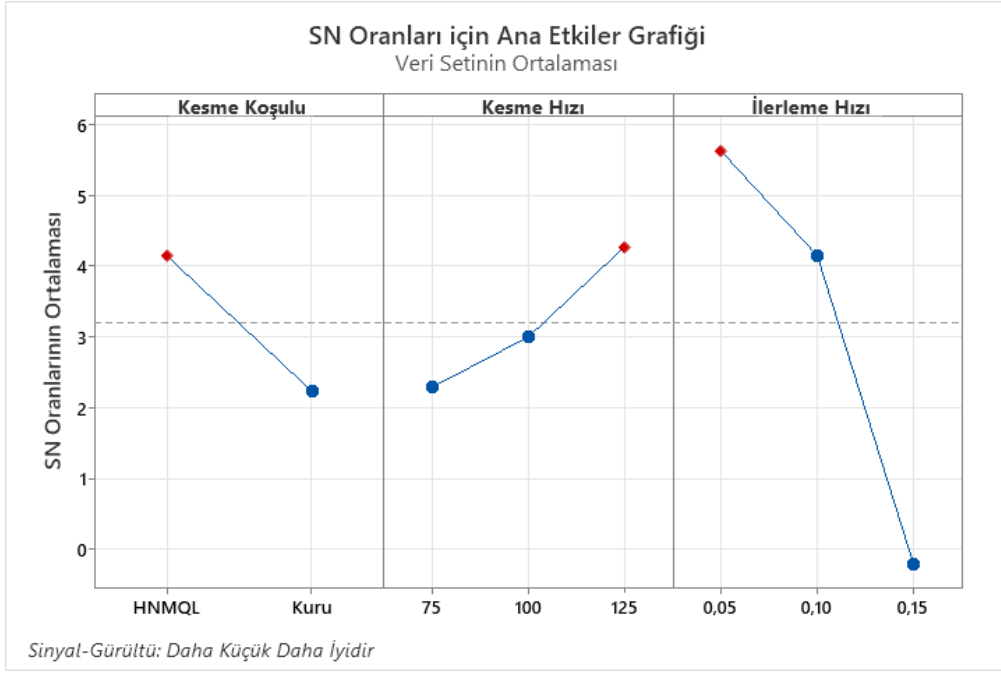
Seviye	Kesme Koşulu	Kesme Hızı	İlerleme Hızı
1	7,467	4,089	9,242
2	3,656	5,945	5,733
3		6,650	1,710
Delta	3,811	2,561	7,532
Sıralama	2	3	1

IMPAX ve NIMAX takım çelikleri için hesaplanan Sinyal-gürültü (S/N) oranları için yanıt tablosu Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Tablolarda verilen her bir seviye, ilgili girdi parametresinin deney tasarımındaki farklı ayarlarını temsil etmektedir. Belirtilen seviyeler, kesme ve ilerleme hızı parametreleri için düşük, orta ve yüksek düzeyleri; kesme koşulu parametresi için ise

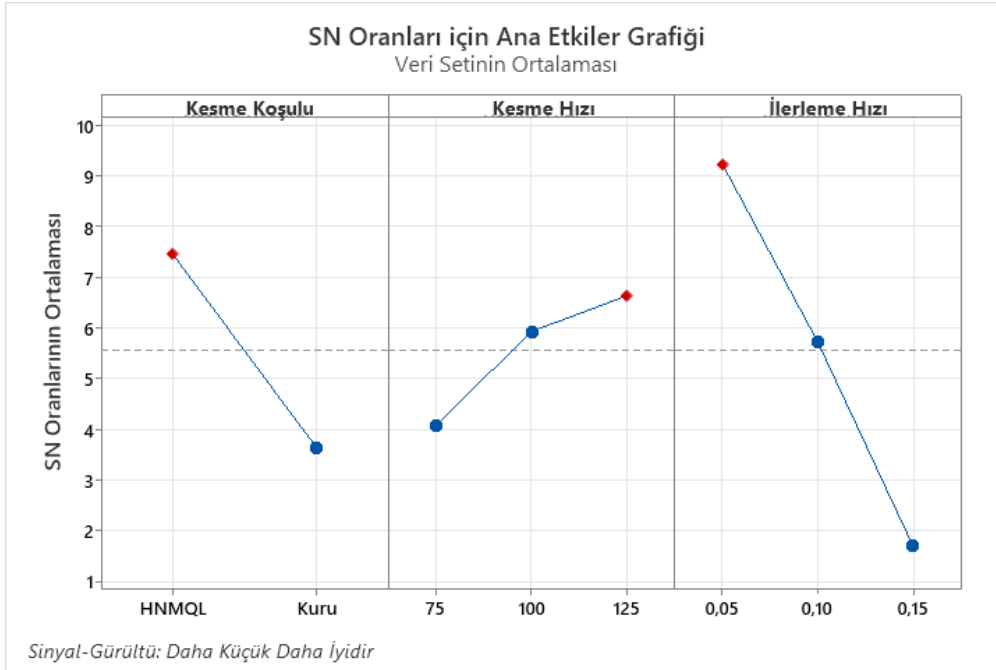
kuru ve HNMMY koşullarını temsil etmektedir. Delta, her bir faktör için en yüksek ve en düşük Sinyal-gürültü (S/N) oranları arasındaki farkı ve her bir faktörün yanıt değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Son olarak, sıralama her bir faktörün göreceli önemini belirler; yanıt değişkeni üzerinde en büyük etkiye sahip faktör 1 ve en az etkiye sahip faktör 3 olarak sıralanır [35], [36].

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

S/N oranları, yüzey pürüzlülüğü azaldıkça oranların arttığı ve yüzey pürüzlülüğü arttıkça oranların azaldığı “küçük olan daha iyidir” kriterine göre Roy tarafından belirtilen Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır [34]. Tablo 3'teki yüksek S/N oranları sistem performansının daha istikrarlı olduğunu ve gürültüden daha az etkilendiğini göstermektedir. Örneğin, Tablo 3'te gösterildiği gibi IMPAX malzeme için 75 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızıyla HNMMY koşulları altında 5,59563'lük bir S/N oranı mükemmel olarak kabul edilir. Düşük S/N oranları, yüzey pürüzlülüğünün istenenden daha yüksek olduğunu ve sistem performansının daha değişken olduğunu gösterir. Örneğin, kuru işlemede 75 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme hızı için değer -1,81456'dır, bu oldukça düşüktür ve kötü performansa işaret eder.



Şekil 3. IMPAX malzemesinin S/N oranları için Ana Etkiler Grafiği (Main Effects Plot).



Şekil 4. NIMAX malzemesinin S/N oranları için Ana Etkiler Grafiği (Main Effects Plot).

Her bir talaşlı işleme girdi parametresinin kalite karakteristiği üzerindeki etkileri S/N oranları kullanılarak analiz edilmiş ve her bir deney için hesaplanan S/N oranları Tablo 3'te verilmiştir. Her iki malzeme için S/N oranlarına ilişkin ana etki grafikleri Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur ve bu grafikler optimum kesme parametrelerini analiz

etmek için kullanılmıştır. IMPAX malzemesi için bu optimum giriş parametreleri HNMQ kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı olarak belirlenirken, NIMAX malzemesi için benzer optimum giriş parametreleri HNMQ kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı 0,05 mm/dev ilerleme hızı olarak belirlenmiştir.

3.3. ANOVA ve Faktörlerin Etkisi

Bu deneysel çalışmada, her bir önemli talashlı işleme parametresinin belirlenmesi ve bu parametrelerin deney sonunda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerini etkileme oranlarının tespit edilmesi için %95 güven düzeyinde ANOVA istatistiksel yöntemi kullanılmıştır [37]. ANOVA sonuç tablosundaki katkı oranı her bir parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin oranıdır, bu durumda yüksek katkı oranı güçlü bir etkiyi, tersi durumda ise düşük katkı oranı zayıf bir etkiyi gösterir. Sıralı Kareler Toplamı (Sequence Sum of Squares, “Seq SS”), bir faktörün modele eklendiği anda açıkladığı özgün varyans miktarını gösteren ve faktörlerin modele giriş sırasına bağlı olarak değişen bir ANOVA ölçütüdür [38-40]. Serbestlik derecesi (Degrees of Freedom, “DF”), modeldeki bağımsız bilgi miktarını sayısal olarak ifade eden ve ANOVA’da varyansın kaynaklara bölünmesinde temel rol oynayan bir ölçüttür [40,41]. “F-değeri”, grup ortalamaları arasındaki farklılıkları ölçen Gruplar Arası Ortalama Karenin, her bir grup içindeki değişkenliği ölçen Gruplar İçi Ortalama Kareye, yani gruplar arası varyansa oranı olarak hesaplanır. Tanım gereği, yüksek bir F-değeri, grup ortalamaları arasındaki varyansın grup içi varyanstan daha önemli olduğunu gösterir; bu da en az bir grup ortalamasının diğerlerinden farklı olduğu anlamına gelir [34,42,43]. “p-değeri”, grup ortalamaları arasında gözlenen farklılıkların rastgele varyasyondan kaynaklanma olasılığını gösterir ve 0,05’ten küçük bir p-değeri önemli farklılıklar olduğunu gösterirken, bu değerden büyük bir p-değeri önemli bir farklılık olmadığını gösterir [44].

Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuç tablosu, Tablo 7 incelendiğinde kesme hızı 3 seviyeli olduğundan Serbestlik Derecesi (DF) 2, Sıralı Kareler Toplamı (Seq SS) değeri 0,07939, F değeri 13,83, p-değeri 0,0007 ve son olarak katkı oranının 7 olduğu görülmektedir. Bu değerler

incelendiğinde kesme hızının IMPAX malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve p-değeri 0,05’ten küçük olduğu için kesme hızları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde, kesme koşulları için ANOVA tablosu incelendiğinde bu girdi parametresinin 2 seviyesine sahip olması nedeniyle serbestlik derecesi değerinin 1 olduğu yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu ve p-değeri 0,05’ten küçük olduğu için kuru ve HNMMY koşulları altında istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Son olarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde %79,63 ile en büyük katkıya sahip olan ilerleme hızının p-değeri 0,05’ten çok daha küçüktür ve bu nedenle ilerleme hızı değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak oldukça anlamlıdır. Hata teriminin toplam varyansın %3,21’i gibi nispeten düşük bir oranda olması modelin iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen verilere dayanarak, IMPAX malzeme için yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek amacıyla girdi parametreleri optimize edilebilir. İlerleme hızı, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinde en yüksek katkı oranına sahip olduğu için optimize edilmesi gereken en kritik girdi parametresidir.

NIMAX takım çeliği malzemesi için ANOVA sonuçları olan Tablo 7 incelendiğinde, tüm parametreler için hesaplanan p- değerinin 0,05’ten küçük olduğu ve dolayısıyla kesme koşulları, kesme hızları ve ilerleme hızları arasındaki farklılıkların yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri olduğu görülmektedir. NIMAX malzemesi için hata terimi yüksek ancak makul bir değerle toplam varyansın %13,02’sini oluşturmaktadır. Yine de en yüksek katkı IMPAX malzemesinde olduğu gibi %59,87’lik bir değerle ilerleme hızında görülmektedir. NIMAX malzemesi için kesme koşulu girdi parametresi %18,86’lık bir katkı ile en etkili ikinci parametredir. Buna karşılık kesme hızı %8,25’lik bir oranla en düşük katkıya sahiptir.

Tablo 7. IMPAX ve NIMAX malzemelerin yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.

Malzeme	Kaynak	Seq SS	DF	F-Değeri	p-Değeri	% Dağılım
IMPAX	Kesme Koşulu	0,10475	1	36,49	0,00005	%9,76
	Kesme Hızı	0,07939	2	13,83	0,0007	%7,40
	İlerleme Hızı	0,85438	2	148,79	0,000000003	%79,63
	Hata	0,03445	12			%3,21
	Toplam	1,07298	17			%100,00
NIMAX	Kesme Koşulu	0,2612	1	17,38	0,001	%18,86
	Kesme Hızı	0,1143	2	3,8	0,05	8,25%
	İlerleme Hızı	0,8294	2	27,59	0,00003	59,87%
	Hata	0,1803	12			13,02%
	Toplam	1,3853	17			100,00%

3.4. Regresyon Analizi

Bu deneysel çalışmada, regresyon analizi için Minitab Statistical Software 22 programı kullanılmış ve regresyon denklemleri Denklem 2 ve Denklem 3'te gösterilmiştir. Küçük olan daha iyidir kriterine göre, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için en düşük

katsayıya sahip parametre koşulları seçilmelidir. Verilen regresyon denklemlerine ait R^2 yani determinasyon katsayısı değerleri IMPAX ve NIMAX malzeme için sırasıyla %96,79 ve %86,98'dir. R^2 değeri modelin, toplam varyansın yüzde kaçını açıkladığını göstermektedir.

$$\text{IMPAX Yüzey Pürüzlülüğü } (\mu\text{m}) = 0.7304 + 0.0763 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{Kuru}} - 0.0763 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{HNMMY}} + 0.0755 * \text{Kesme Hızı}_{75} + 0.0107 * \text{Kesme Hızı}_{100} - 0.0862 * \text{Kesme Hızı}_{125} - 0.1964 * \text{İlerleme Hızı}_{0.05} - 0.1074 * \text{İlerleme Hızı}_{0.10} + 0.3038 * \text{İlerleme Hızı}_{0.15} \quad (2)$$

$$\text{NIMAX Yüzey Pürüzlülüğü } (\mu\text{m}) = 0.5851 + 0.1205 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{Kuru}} - 0.1205 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{HNMMY}} + 0.1098 * \text{Kesme Hızı}_{75} - 0.0330 * \text{Kesme Hızı}_{100} - 0.0768 * \text{Kesme Hızı}_{125} - 0.2317 * \text{İlerleme Hızı}_{0.05} - 0.0540 * \text{İlerleme Hızı}_{0.10} + 0.2857 * \text{İlerleme Hızı}_{0.15} \quad (3)$$

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kuru ve HNMMY koşulları altında parmak freze ile talaşlı işlenmesi sırasında NIAMX takım çeliğinin yüzey pürüzlülüğündeki değişimleri göstermiştir. Ayrıca sonuçlar aynı parametreler altında IMPAX takım çeliğinin yüzey pürüzlülüğü yanıtları ile karşılaştırılmıştır. Bulgular aşağıdaki gibidir:

1. Kuru kesme koşuluyla karşılaştırıldığında, HNMMY kesme koşulunun kullanılması sonucunda yüzey pürüzlülüğünü ortalama %36,22 oranında azaltmıştır.
2. IMPAX takım çeliği malzemesi için ANOVA sonuçlarında yüzey pürüzlülüğü üzerinde %79,63 ile en yüksek katkı oranına sahip girdi parametresinin ilerleme hızı olduğu ve benzer şekilde NIMAX takım çeliği için de ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için en yüksek katkı oranının %59,87 değeri ile ilerleme hızı parametresinde olduğu görülmüştür.
3. Geliştirilen matematiksel model, deneylerde kullanılmayan kesme parametreleri seviyeleri için yüzey pürüzlülüğü değerlerini tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır. Tahmin edilen bu sonuçlara göre, HNMMY kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı kombinasyonunun en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini verdiği görülmüştür. Benzer şekilde, NIMAX malzemesi için de aynı parametre kombinasyonu en uygun yüzey kalitesi sonuçlarını vermiştir. Bu bağlamda, her iki malzeme açısından optimum performans sağlayan kesme parametrelerinin örtüştüğü söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya sağladığı destek ve kesici takımların temini için Fatih Çakıroğlu'na (CKR Kesici Takımlar Sanayi ve Dış Ticaret Ltd. Şirketi – İstanbul/Türkiye) teşekkür ederler.

COMPARISON OF SURFACE ROUGHNESS IN END MILLING OF IMPAX AND NIMAX TOOL STEELS

In this study, the effects of cutting parameters used in machining on the surface roughness of NIMAX and IMPAX (DIN 1.2738) tool steels were investigated. The cutting parameters evaluated were cutting speed (75, 100 and 125 m/min), feed rate (0.05, 0.10 and 0.15 mm/rev) and cutting condition (Dry and Hybrid Nano Minimum Quantity Lubrication – HNMQL). These parameters were systematically investigated and optimized using Taguchi's L18 ($2^1 \times 3^2$) orthogonal array and Analysis of Variance (ANOVA). The experimental results revealed significant improvements and improvements in surface roughness under HNMQL conditions. For NIMAX steel, HNMQL conditions provided an improvement of up to 51.35% in surface roughness, while the cutting condition was the most effective parameter with a rate of 81.6%. When evaluated comparatively, HNMQL conditions for IMPAX steel provided an improvement of up to 40.2% in surface roughness; cutting condition was the determining factor in this improvement by 72%. For IMPAX steel, the HNMMY condition provided an improvement of up to 40.2% in surface roughness. In addition, the cutting condition was the most effective parameter on surface roughness with a contribution of 72%. This is in parallel with the results obtained for NIMAX steel. When the experimental results are analyzed in general, it is seen that NIMAX material gives up to 43.68% lower surface roughness values compared to

IMPAX material under the same cutting parameters. As a result of the study, the optimum input parameters for IMPAX and NIMAX materials were determined as HNMQL cutting condition, 125 m/min cutting speed and 0.05 mm/rev feed rate for both materials.

Keywords: Machining, Tool steels (IMPAX, NIMAX), Surface Roughness, Optimization

KAYNAKLAR

1. Mesquita, R.A. ve Schneider, R.S.E., *Tool Steel Quality and Surface Finishing of Plastic Molds*, Exacta, 8 (2011) 3, 307-318.
2. Dang, X.-P., *General Frameworks for Optimization of Plastic Injection Molding Process Parameters, Simulation Modelling Practice and Theory*, 41 (2014) 15-27.
3. Chen, W.C., Nguyen, M.H., Chiu, W.H., et al., *Optimization of the Plastic Injection Molding Process Using the Taguchi Method, RSM, and Hybrid GA-PSO*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83 (2016) 1873-1886.
4. Sofuoğlu, H. ve Gedikli, H., *Physical and Numerical Analysis of Three Dimensional Extrusion Process*, Computational Materials Science, 31 (2004) 1-2, 113-124
5. Mu, Y., Zhao, G., Chen, A., Wu, X., *Modeling and Simulation of Polymer Melts Flow in the Extrusion Process of Plastic Profile with Metal Insert*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67 (2013) 629-646.
6. O'Connor, C.P.J., Martin, P.J., Menary, G., *Viscoelastic Material Models of Polypropylene for Thermoforming Applications*, International Journal of Material Forming, 3 (2010) 599-602.
7. Gaspar-Cunha, A., Costa, P., Galuppo, W.D.C., Duarte, F., Costa, L., *Multi-Objective Optimization of Plastics Thermoforming*, Mathematics, 9 (2021) 1760-1780.
8. Schmidt, F., Agassant, J.-F., Bellet, M., *Experimental Study and Numerical Simulation of the Injection Stretch/Blow Molding Process*, Polymer Engineering and Science, 38 (1998) 9, 1399-1412.
9. Laroche, D., Kabanemi, K.K., Pecora, L., Diraddo, R.W., *Integrated Numerical Modeling of the Blow Molding Process*, Polymer Engineering and Science, 39 (1999) 1223-1233.
10. Hamdi, A., Furkan, Y., Alper, U., Hammoudi, U., *Multi-Objective Analysis and Optimization of Energy Aspects During Dry and MQL Turning of Unreinforced Polypropylene (PP): An Approach Based on ANOVA, ANN, MOWCA, and MOALO*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 128 (2023) 4933-4950.
11. Hamdi, A., Furkan, Y., Alper, Y., Sidi, U., Merghache, M., *Investigation of MQL and CNC Turning Parameters on the Machinability of Unreinforced Polypropylene: Study of Surface Roughness, Temperature, and Specific Cutting Energy*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2024) 717-730.
12. Internet: Uddeholm. Impax Supreme. Retrieved from <https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/41/2017/10/Impax-Supreme-eng.pdf>, Erişim Tarihi: Temmuz 10, 2024.
13. Internet: Uddeholm Nimax Technical Data Sheet. Retrieved from https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2017/11/Uddeholm_nimax-eng_p_12_1612_e7.pdf, Erişim Tarihi: Temmuz 10, 2024.
14. Abou-El-Hossein, K.A., Kadirgama, K., Hamdi, M., Benyounis, K.Y., *Prediction of Cutting Force in End-Milling Operation of Modified AISI P20 Tool Steel*, Journal of Materials Processing Technology, 182 (2007) 1-3, 241-247.
15. Fuat, K., Öztürk, B., *Comparison and Optimization of PVD and CVD Method on Surface Roughness and Flank Wear in Hard Machining of DIN 1.2738 Mold Steel*, Sensor Review, 1 (2018) 24-33.
16. Gupta, A., Singh, H., Aggarwal, A., *Taguchi-Fuzzy Multi Output Optimization (MOO) in High-Speed CNC Turning of AISI P-20 Tool Steel*, Expert Systems with Applications, 38 (2011) 6822-6828.
17. Reddy, B.S., Kumar, J.S., Reddy, K.V.K., *Optimization of Surface Roughness in CNC End Milling Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm*, International Journal of Engineering, Science and Technology, 3 (2011) 102-109.
18. Mukkoti, V.V., Mohanty, C.P., Gandla, S., Sarkar, P., P, S.R., Dhanraj, B., *Optimization of Process Parameters in CNC Milling of P20 Steel by Cryo-Treated Tungsten Carbide Tools Using NSGA-II*, Production & Manufacturing Research, 8 (2020) 291-312.
19. Vardhan, M.V., Mohanty, C.P., Dhanraj, B., *Experimental Study on Parameters of P-20 Steel in CNC Milling Machine*, Journal of

- Physics: Conference Series, 1495 (2019) 1-9.
20. Hamdi, A., Yapan, Y.F., Uysal, A., Merghache, S.M., *The Effects of Minimum Quantity Lubrication Parameters on the Lubrication Efficiency in the Turning of Plastic Mold Steel*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 132 (2024) 5803-5821.
 21. Zhang, X., Li, C., Zhou, Z., Liu, B., Zhang, Y., Yang, M., Gao, T., Liu, M., Zhang, N., Said, Z., Sharma, S., Ali, H.M., *Vegetable Oil-Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application*, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36 (2023) 1-39
 22. Iqbal, A., Dar, N.U., He, N., Khan, I., Li, L., *Optimizing Cutting Parameters in Minimum Quantity of Lubrication Milling of Hardened Cold Work Tool Steel*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 223 (2008) 43-54.
 23. Tougui, Y., Uysal, A., Emiroglu, U., et al., *Evaluation of MQL Performances Using Various Nanofluids in Turning of AISI 304 Stainless Steel*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115 (2021) 3983-3997.
 24. Saatçi, E., Yapan, Y.F., Uslu Uysal, M., & Uysal, A., *Orthogonal Turning of AISI 310S Austenitic Stainless Steel Under Hybrid Nanofluid-Assisted MQL and a Sustainability Optimization Using NSGA-II and TOPSIS*, Sustainable Materials and Technologies, 36 (2023) e00628.
 25. Zeng, X., Peng, Y., Lang, H., et al., *Probing the Difference in Friction Performance Between Graphene and MoS2 by Manipulating the Silver Nanowires*, Journal of Materials Science, 54 (2019) 540–551.
 26. Lou, M.S., Chen, J.F., Li, C.M., Liu, J.C.H., *Surface Roughness Prediction Technique for CNC End-Milling*, Journal of Industrial Technology, 15 (1999) 1-6.
 27. Kalpakjian, S., Schmid, S.R., Sekar, V., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition, Pearson Publications, Singapore, 2013.
 28. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Dixit, A.R., *Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review*, J. of Cleaner Production, 127 (2016) 1–18.
 29. Sarıkaya, R., Güllü, H., *Taguchi Design and Response Surface Methodology Based Analysis of Machining Parameters in CNC Turning Under MQL*, J. of Cleaner Production, 65 (2014) 604–616.
 30. Dhar, N., Islam, S., Kamruzzaman, M., *Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel*, Gazi University Journal of Science, 20 (2010) 2, 23–32.
 31. Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A.G., Herrmann, C., *Metalworking fluids—Mechanisms and performance*, CIRP Annals, 57 (2015) 2, 605–628.
 32. Nalbant, M., Gökkaya, H., Sur, G., *Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning*, Materials & Design, 28 (2007) 4, 1379–1385.
 33. Risbood, K.A., Dixit, U.S., Sahasrabudhe, A.D., *Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process*, Journal of Materials Processing Technology, 132 (2003) 1–3, 203–214.
 34. Roy, R.K., *A Primer on the Taguchi Method*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 2010.
 35. Kurt, M., Hortomacioğlu, S., Mutlu, B., Köklü, U., *Minimization of the surface roughness and form error on the milling of free-form surfaces using a grey relational analysis*, Materiali in Tehnologije / Materials and Technology, 46 (3) (2012) 205–213.
 36. Krishankant, J.T., Bector, M., Kumar, R., *Application of Taguchi method for optimizing turning process by the effects of machining parameters*, Int. J. Eng. Adv. Technol., 2 (1) (2012) 263–274.
 37. Yan, J., Li, L., *Multi-objective optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality*, J. Clean. Prod., 52 (2013) 462–471.
 38. Penn State University. (n.d.). Sequential (or Extra) Sums of Squares | STAT 501. Available at <https://online.stat.psu.edu/stat501/lesson/6/6.3>
 39. Minitab. (n.d.). Analysis of variance table for Fit Regression Model and Linear Regression. Available at <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regressionmodel/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/>
 40. Minitab. (n.d.). Analysis of Variance table for One-Way ANOVA. Available at <https://support.minitab.com/en->

us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/#:~:text=Sequential%20sums%20of%20squares%20are,the%20adjusted%20sums%20of%20squares

41. Penn State University. (n.d.). 13.2 - The ANOVA Table. Available at <https://online.stat.psu.edu/stat415/book/export/html/822>
42. Abdullah, T., Rao, P.S., Rao, P.S., Maqsood, Z., *Optimization of Cutting Parameters in CNC Turning by using Taguchi Method: A Review*, International Journal of Technical

Innovation in Modern Engineering & Science, 5 (2019) 5, 1068-1072.

43. Samtaş, G., *Optimisation of cutting parameters during the face milling of AA5083-H111 with coated and uncoated inserts using Taguchi method*, Int. J. Machining Machinability Mater., 17 (2015) 3, 211-232.
44. Saini, S., Ahuja, I.S. & Sharma, V.S., *Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in hard turning of AISI H11 tool steel using ceramic tools*, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 13 (2012), 1295–1302.

Cenk Mirza* 

Karcan Kesici Takım San. ve Tic. A.Ş.,
Eskişehir/ Türkiye

Şükran Katmer 

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara/ Türkiye

Çağla Gökbulut Avdan 

Karcan Kesici Takım San. ve Tic. A.Ş.,
Eskişehir/ Türkiye

Çağlar Yavaş 

Karcan Kesici Takım San. ve Tic. A.Ş.,
Eskişehir/ Türkiye

Ulvi Şeker 

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara/ Türkiye

17-4 PH Malzemedan Pervane Kanatlı Turbo Disklerin Kaba İşlemleri için Kesme Parametrelerinin Deneysel Optimizasyonu

Uçak motorlarının kritik parçalarından biri olan pervane kanatlı turbo diskler (blisk), karmaşık geometrik yapıları ve yüksek sıcaklık, basınç ve devir hızlarında çalışmaları nedeniyle zorlu üretim süreçlerine sahiptir. Çalışmada, 17-4 PH paslanmaz çelikten üretilen blisklerin simültane beş eksen parmak freze ile kaba kanal boşaltma işlemi için kesme parametrelerinin optimizasyonu deneysel olarak incelenmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımı ile üç farklı kesme hızı ve ilerleme miktarı kullanılarak dokuz deney gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvveti, eğilme ve burulma momentleri analiz edilerek ANOVA yöntemiyle en uygun parametreler belirlenmiştir. Sonuçlar, kısa işleme süresi hedefiyle yüksek kesme hızı + orta veya yüksek ilerleme miktarının en uygun kombinasyon olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Pervane kanatlı turbo disk, blisk, 17-4 PH, Simültane 5 eksen işleme, Kesme parametreleri

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 14 Mart 2025

Kabul: 16 Mayıs 2025

*Sorumlu Yazar: Cenk Mirza

Email: c.mirza@karcan.com

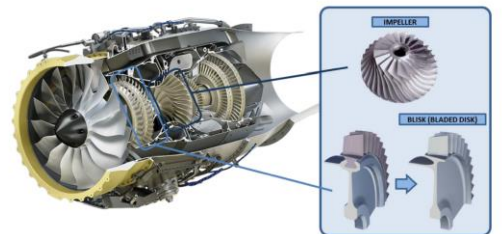
DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1658069>

1. GİRİŞ

Uçak motorlarındaki, özellikle kompresör ve türbin aşamalarındaki turbo makine döner bileşenleri, aynı rotor boyunca dağıtılmış bir dizi kanatlı diskten oluşan karmaşık bir geometriye sahiptir. Son yıllarda, bıçakları ve rotoru monolitik bir bileşen halinde entegre etme ve 5 eksenli frezeleme işlemiyle üretilmesi konusunda çalışılmaktadır. Bu tür bileşenlerin ortak tanımı, entegre kanatlı rotor IBR (Entegre Kanatlı Rotorlar) veya blisk'tir [1, 2].

Uçak motorlarının en önemli parçalarından biri olan pervane kanatlı turbo disklerin (blisk), derin ve dar kanal, küçük ve değişken eğrilik, farklı kalınlıkta ön ve arka kenar özelliklerine sahip bir parça olması nedeniyle, üretimi zordur [3]. Aynı zamanda yüksek

sıcaklık, yüksek basınç ve yüksek devir hızı altında çalışmaları nedeniyle imalatında paslanmaz çelik, titanyum alaşımları ve nikel bazlı süper alaşımlar (Inconel) gibi yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler kullanılmaktadır [1].



Şekil 1. Blisk ve pervane örnekleri [3]

Bu malzemeler arasında yer alan çökeltmeyle sertleştirilen (PH) paslanmaz çelikler, martensitik paslanmaz çeliğin yüksek mukavemeti ile östenitik paslanmaz çeliğin mükemmel korozyon direncini bir araya getiren bir martensitik PH tipidir. Uçak motoru parçaları, dişliler, kimyasal cihazlar, nükleer reaktör ve gemi bileşenleri gibi birçok önemli endüstriyel uygulama aparatı bu malzemenin şekillendirilmesi ile üretilmektedir [4, 5]. Pekleşme, yığıntı talaş oluşumu (BUE), uzun ve yapışık talaş vermesi sebebiyle PH paslanmaz çelikleri işlenmesi zor malzemeler grubunda olup işlenebilirliği sertlik seviyelerine ve alaşımın içeriğine bağlı olarak da değişmektedir [6]. İşlenmesi zor olan PH (çökeltme sertleşmeli) paslanmaz çeliklerin işlenebilirlik süreçlerinin doğru analizi, işlenebilirlik maliyetlerinin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır [7]. Yaşar vd. (2019) yaptıkları çalışmada 17-4 PH paslanmaz çeliğin farklı kaplama türlerine sahip kesici takımlar ile farklı kesme ve ilerleme kuvvetleri denemeleri ile işlenebilirliğini incelenmiştir. Çalışma sonucunda PVD kaplamalı takımlarda artan kesme hızı ile ilerleme kuvveti değerinin %0,97 ile %3,18 arasında azaldığı, CVD kaplamalı takımlarda ise %2,78 ile %7,11 arasında arttığı tespit edilmiştir [8]. Yine Yaşar vd. (2020), yaptıkları çalışmada bu sefer 17-4 PH ve 15-5 PH paslanmaz çeliklerin tornalanmasında CVD ve PVD kaplama türleri ve farklı kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde 17-4 PH ve 15-5 PH için kesme kuvveti açısından optimum kesme parametreleri 210 m/dk ve 168 m/dk kesme hızları, 0.15 mm/dev ilerleme oranı, 1.5 mm kesme derinliği ve PVD kaplama olarak belirlenmiştir [9]. Mohanty vd. (2016), kuru işleme şartlarında 17-4 PH çeliğinin tornalanması esnasındaki işleme karakteristiklerini incelemişlerdir. Bu kapsamda talaş morfolojisi, takım

aşınması, kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü incelemiş, kaplamasız takımlar için yüksek kesme hızlarının takım aşınmasına sebep olduğunu, tüm kesme hızlarında her iki kesici takımda da artan işleme mesafesiyle takım aşınmasının arttığını, kesme hızındaki artışın sıcaklığı artırdığını, CVD kaplamalı takımın kaplamasız takıma göre daha fazla ısı ürettiğini belirlemişlerdir [10].

Turbo disklerin dolu malzemeden şekillendirilmesi sırasında kanat arası boşlukların kaba frezeleme işlemleriyle boşaltılması gerekmekte olup, literatürde de işaret edildiği gibi optimum şartlarda işlenmemesi halinde düşük takım ömrü, yüksek işleme zamanı ve maliyeti gibi olumsuzlukları beraberinde getirmektedir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında, 17-4 PH paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş kanatlı turbo disklerin kaba işlenmesinde farklı kesme parametrelerinin etkilerinin araştırılması ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

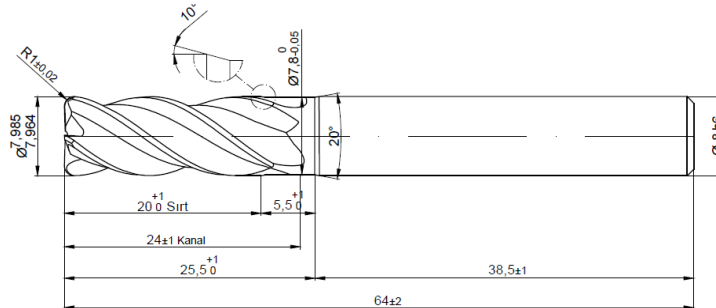
2. MATERTAL VE METOD

Çalışma kapsamında üretilecek pervane kanatlı turbo disk (blisk) malzemesi olarak kullanılan 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

Kaba boşaltma işleminde, 4 ağızlı, paslanmaz çelik malzemeye özgü kalitede, sementit karbür parmak freze (Karcan, Eskişehir) kullanılmıştır. Takımın makro geometrisi Şekil 2.’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kesme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Her bir parametre grubu için deneyler 2 kez (2 kanal boşaltma) tekrarlanmıştır. Toplam 20mm derinliğe sahip kanallar a_p : 4mm olacak şekilde 5 pasada alınması planlanmıştır.

Tablo 1. 17-4 PH paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu (%ağırlık)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb+Ta	Nb	Ta
Min						3	15		3	0,15	0,15	
Maks	0,07	1	1	0,04	0,03	5	17,5	0,35	5	0,45	0,45	0,05
Ölçü	0,02	0,44	0,62	0,02	<0,001	4,22	15,2	0,14	3,35	0,22	0,21	<0,01

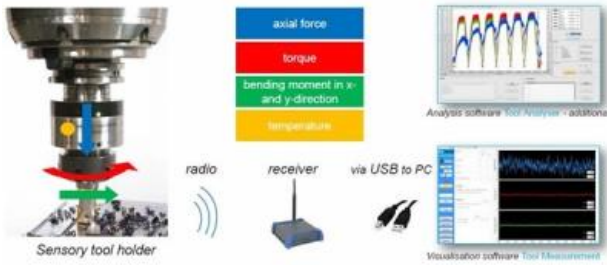


Şekil 2. Parmak freze geometrisi

Tablo 2. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri

Faktörler	Seviyeler		
	1	2	3
Kesme Hızı (m/dk)	60	70	80
İlerleme Miktarı (mm/diş)	0,021	0,025	0,03

Kuvvet ve moment ölçümleri sensörlü tutucu (Spike, Almanya) (Şekil 3) ile gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvveti, eğilme ve burulma momentleri her bir kanalda her bir paso için ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda üretilen pervane diske ait görsel Şekil 4.'te verilmiştir.



Şekil 3. Sensörlü tutucu



Şekil 4. Çalışmada üretilen pervane diskinin görseli

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

İki parametre ve üçer seviye için hazırlanmış tam faktöriyel deney tasarımına tablosuna göre kaba işlemler gerçekleştirilmiş ve her takımla iki pervane kanalı işlenmiştir. İşleme esnasında kaydedilen, kesme kuvveti, eğilme ve burulma momentleri verileri çok yönlü varyans analizi (ANOVA) ile analiz edilmiş ve parametrelerin sonuçlar üzerinde etkili olup olmadığı ve etki yüzdeleri belirlenmiştir. Ayrıca her iki pervane kanalı işlenirken, takıma gelen yükler açısından boşluklar arasında istatistiki olarak anlamlı bir değişim olup olmadığını kontrol için ANOVA'ya kanal sırası da tekrarın etkisi olarak eklenmiştir. Sonuçlar, kesme kuvveti, eğilme momenti ve burulma momenti sırası ile sunulmuştur.

Tablo 3'de verilen ANOVA sonuç tablosunda parametrelerin sonuçlarının birbirinden farklı ve $\alpha=0,05$ düzeyinde anlamlı olduğunu göstermektedir. Eşzamanlı beş eksenli işleme esnasında kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı ($p<0,05$) olduğu ve bunu sırası ile kanal sırası ($p<0,05$) ve kesme hızı*ilerleme miktarı ikili etkileşiminin ($p=0,05$) takip ettiği bulunmuştur. İlerleme miktarının artmasıyla kesme kuvvetinin arttığı literatürde yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [9, 11]. Kareler toplamı üzerinde hesaplanan yüzdelik etki oranına göre sıralama ise ilerleme miktarı, kesme hızı*ilerleme miktarı ikili etkileşimi ve kanal sırası şeklindedir. Kurulan modelin deneysel sonuçları temsil oranı %87,47 olmuştur.

Tablo 3. Kesme kuvvetleri ANOVA sonuç tablosu

Faktör	SD*	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	%Etki
Model	9	75570	8397	6,21	0,009	87,47
Kanal Sırası (Tekrar)	1	17450	17450	12,9	0,007	20,20
Lineer	4	37531	9383	6,94	0,01	43,44
Kesme Hızı	2	8023	4011	2,97	0,109	9,29
İlerleme Miktarı	2	29509	14754	10,91	0,005	34,16
2-Yönlü Etkileşim	4	20589	5147	3,8	0,051	23,83
Kesme Hızı*İlerleme Miktarı	4	20589	5147	3,8	0,051	23,83
Hata	8	10822	1353			12,53
Toplam	17	86392				100

*SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması

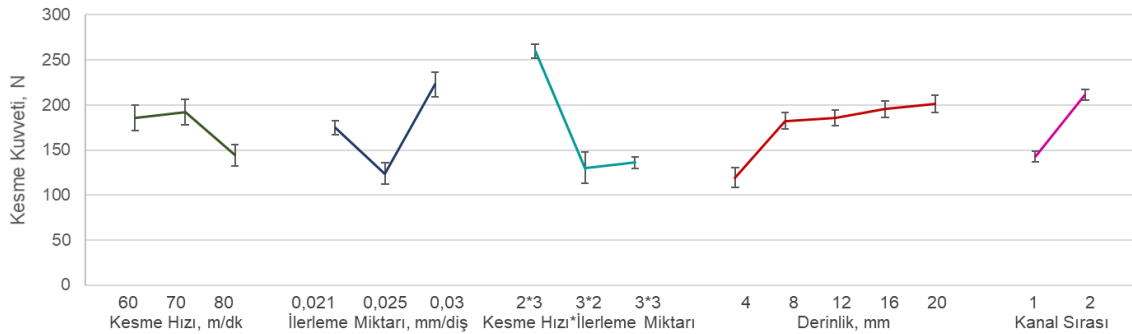
Parametrelerin kesme kuvveti üzerindeki etki yönlerini gösteren ana etki grafiği Şekil 5'te sunulmuştur. Ana etki grafiğinde soldan sağa, kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme hızı*ilerleme miktarı ikili etkileşimi, kesme derinliği ve kanal sırasına göre kesme kuvvetlerindeki değişimi göstermektedir. ANOVA sonucunda en etkili bulunan ilerleme miktarının artışı ile kesme kuvvetleri önce azalmış sonra artmıştır. Kesme hızı*ilerleme miktarı ikili etkileşiminde; yüksek kesme hızı-yüksek ilerleme miktarı hem kesme kuvveti hem sağlayabileceği hızlı işleme avantajı ile ne çıkmaktadır. Kesme hızının etkisi ANOVA sonucunda anlamlı bulunmasa da yüksek seviye kesme hızının etkisi düşük ve orta seviye kesme hızına göre anlamlı bir farka sahiptir. Kesme derinliği arttıkça kesme kuvvetlerinin önce artış sergilediği ancak sonrasında durağan bir seyir izlediği görülmektedir. Birinci ve ikinci kanal arasında kuvvetlerin arttığı ve bu artışın anlamlı olduğu görülmektedir. Bunun muhtemel sebebinin takım aşınması mekanizmalarının etkisi olduğu söylenebilir.

Tablo 4'te görülen bileşke eğilme momenti ANOVA sonuç tablosuna göre, parametrelerin tekil etkileri ve kanal sırası $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyine göre anlamlı bulunmuştur. p-değerine göre bileşke eğilme momenti üzerinde en etkili parametre ilerleme miktarı olurken, ikinci kanal sırası ve üçüncü kesme hızı olmuştur. Kesme hızı*ilerleme miktarı ikili etkileşimi bileşke eğilme momenti üzerinde anlamlı bir etkiye sahip çıkmamıştır. Yüzdelik etki oranlarına göre ise ilerleme miktarı %72,13 oranı ile model (%92,31) içerisinde oldukça yüksek orana sahiptir. Yüzdelik ağırlıkça ikinci etkin parametre ise kesme hızı (%10,19) bulunmuştur.

Bileşke eğilme momentinin ana etki grafiği (Şekil 6), ilerleme miktarının artışı ile eğilme momentinin arttığını ortaya koymaktadır. Kesme

hızının düşük ve orta seviyeleri arasında sonuç üzerinde anlamlı bir fark bulunmazken, yüksek kesme hızında eğilme momentinde artış oluşmaktadır. Ancak oluşan artış, yüksek kesme hızının sağlayacağı saha şartlarında kısa işleme süresi avantajı yanında kabul edilebilir bir artış olarak değerlendirilebilir. Derinlik arttıkça, takımın maruz kaldığı bileşke eğilme momenti de düzenli olarak artış göstermektedir. Kesme kuvveti sonuçlarına benzer olarak, işlenen kanal sayısı arttıkça bileşke eğilme momenti de artış eğilimi sergilemektedir.

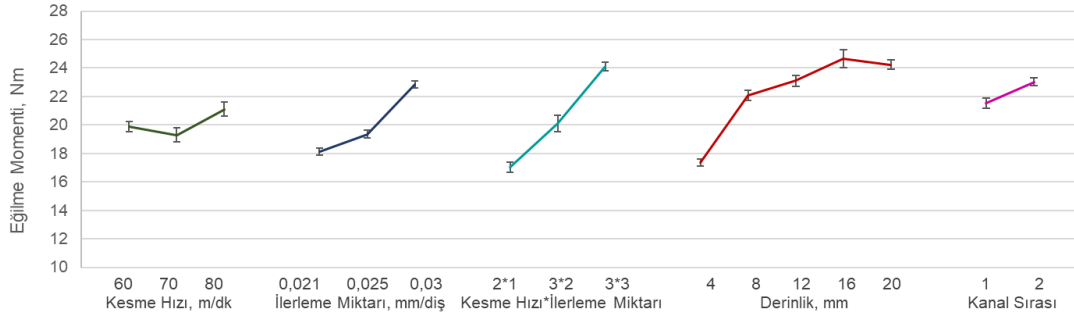
Burulma momenti ANOVA sonuç tablosuna göre, burulma momenti üzerinde en etkili parametre kesme hızı*ilerleme miktarı ikili etkileşimidir ($p=0,000$) ve onu kesme hızı ($p=0,001$) takip etmektedir. İlerleme miktarı ve kanal sırasının burulma momenti üzerindeki etkileri istatistiki olarak anlamlı bulunmamıştır. Burulma momenti üzerinde en etkili parametre kesme hızı*ilerleme miktarı olduğu literatürde yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [12]. Şekil 7'de verilen burulma momenti ana etki grafiğinde özellikle, yüksek kesme hızı-düşük ilerleme miktarı etkileşiminde ($3*1$) burulma momenti, 3 ayrı kesme hızının düşük seviye ilerleme miktarı ile etkileşim sonuçları içerisinde, en düşük değerini almıştır. Ancak yüksek kesme hızı*orta ilerleme hızı ($3*2$) veya yüksek kesme hızı*yüksek ilerleme miktarı ($3*3$) sonuç değerlerinin de burulma momenti açısından yüksek değerler olmaması işleme zamanı açısından avantajlı olan bu parametre çiftlerinin kullanılabilirliğini göstermektedir. Kesme hızı tekil etki grafiğinde de bu sonuca paralel olarak kesme hızı arttıkça burulma momenti düzenli bir azalma göstermiştir. İlk iki pasoda derinlik artışı ile burulma momenti artarken sonraki derinliklerde durağan bir seyir izlemektedir.



Şekil 5. Deney değişkenlerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi

Tablo 4. Bileşke eğilme momenti ANOVA sonuç tablosu

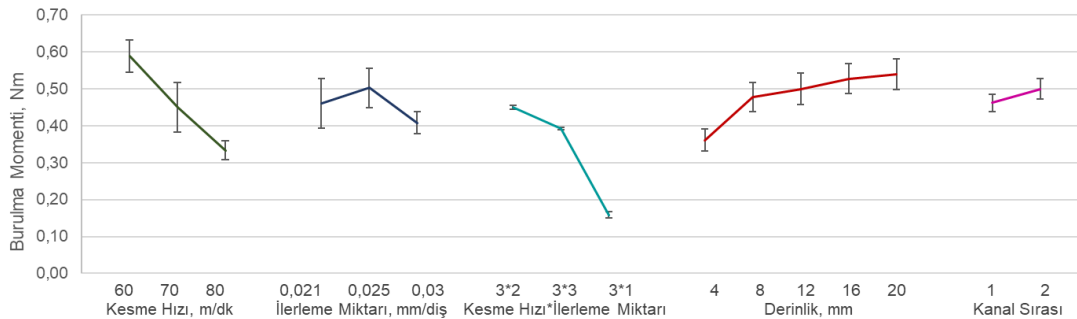
Faktör	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	%Etki
Model	9	92,881	10,3201	10,67	0,001	92,31
Kanal Sırası (Tekrar)	1	8,134	8,1339	8,41	0,02	8,08
Lineer	4	82,826	20,7066	21,41	0	82,32
Kesme Hızı	2	10,251	5,1255	5,3	0,034	10,19
İlerleme Miktarı	2	72,575	36,2877	37,52	0	72,13
2-Yönlü Etkileşim	4	1,921	0,4803	0,5	0,74	1,91
Kesme Hızı*İlerleme Miktarı	4	1,921	0,4803	0,5	0,74	1,91
Hata	8	7,737	0,9671			7,69
Toplam	17	100,618				100



Şekil 6. Deney değişkenlerinin bileşke eğilme momentleri üzerindeki etkisi

Tablo 5. Burulma momentleri ANOVA sonuç tablosu

Faktör	SD	KT	KO	F-Değeri	P-Değeri	%Etki
Model	9	1,17179	0,130199	26,41	0	96,74
Kanal Sırası (Tekrar)	1	0,005	0,005	1,01	0,343	0,41
Lineer	4	0,2233	0,055826	11,32	0,002	18,44
Kesme Hızı	2	0,19642	0,09821	19,92	0,001	16,22
İlerleme Miktarı	2	0,02688	0,013441	2,73	0,125	2,22
2-Yönlü Etkileşim	4	0,94349	0,235872	47,84	0	77,90
Kesme Hızı*İlerleme Miktarı	4	0,94349	0,235872	47,84	0	77,90
Hata	8	0,03944	0,004931			3,26
Toplam	17	1,21123				100



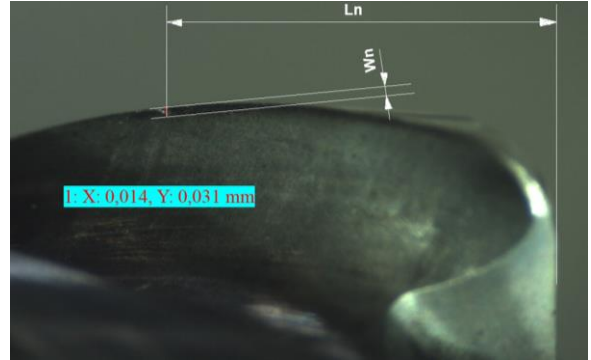
Şekil 7. Deney değişkenlerinin burulma momentleri üzerindeki etkisi

Tek deney satırında kullanılan takım, iki kanal boşaltma işleminden sonra incelenmiştir. Şekil 8’de şematize edildiği üzere, tüm takımların kesici kenarları üzerinde farklı büyüklüklerde çentik aşınması gözlenmiş olup, çentik derinliği ve kesici takım ucuna olan mesafesi deney sayısına göre değişmektedir. W_n ; çentik derinliğini, L_n ; çentiğin takımın uç kısmına olan mesafesini göstermektedir. Her bir deneyden elde edilen takım aşınması değerleri Tablo 6.’da verilmiştir.

Takım aşınması verileri ANOVA ile değerlendirildiğinde kesme parametrelerinin çentik derinliği ve çentik mesafesi üzerinde istatistiki olarak anlamlı bir etkisi bulunmamıştır. Ancak Şekil 9’da sunulan ana etki grafiği çentik derinliği ve çentik mesafesi ile kesme parametreleri arasında ilişki kurulabileceğine işaret etmektedir.

Çentik derinliği (W_n) grafiğinde, kesme hızının düşük seviyesi ile orta/yüksek seviyesi arasındaki fark anlamlı olup, kesme hızının artışı ile çentik derinliği, dolayısıyla takım aşınması azalmaktadır. İlerleme miktarının artışı ile takım aşınması anlamlı düzeyde artmaktadır. Çentik mesafesi, takım aşınmasının takım üzerindeki konumunu göstermekte olup hem kesme hızı hem ilerleme miktarı değişiminden etkilenmektedir. Kesme hızının düşük ve üst seviyesi arasındaki fark anlamlı

olup, kesme hızı artışı ile aşınma yeri takım ucundan uzaklaşmaktadır. İlerleme miktarının düşük ve orta seviyesi arasındaki fark anlamlı olmayıp, ilerlemenin artışı ile aşınma bölgesi takımın uç kısmına yaklaşmaktadır.

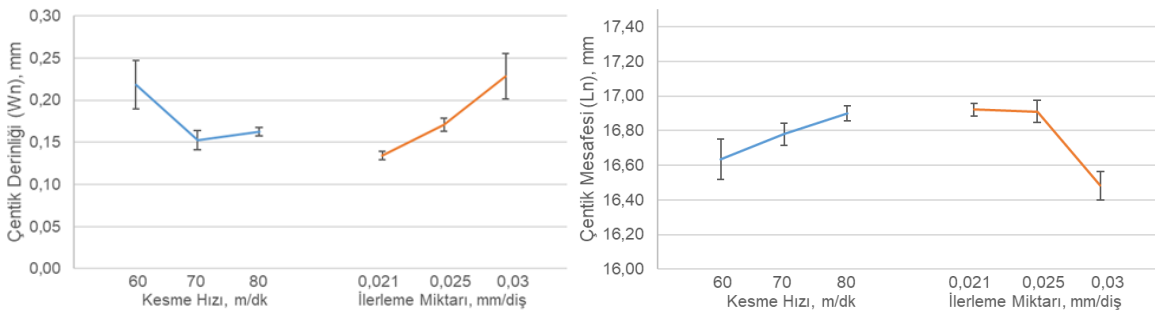


Şekil 8. Takım aşınması ölçümü

Kesme parametreleri esas alınarak kesme kuvvetleri ve takım aşınması arasındaki ilişki irdelendiğinde; yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme miktarında, daha düşük kesme kuvveti ve daha az takım aşınması olduğu anlaşılmaktadır. Buradan, kesme kuvveti ve takım aşınması mekanizmalarının birbirini doğru orantılı olarak etkilediği sonucuna varılmıştır.

Tablo 6. Takım aşınması

	Kesme (m/dk)	Hızı	İlerleme Miktarı (mm/diş)	Çentik Derinliği W_n (mm)	Çentik Mesafesi L_n (mm)
L1	60		0,021	0,15	16,78
L2	60		0,025	0,14	17,05
L3	60		0,03	0,36	16,08
L4	70		0,021	0,11	17,09
L5	70		0,025	0,21	16,60
L6	70		0,03	0,14	16,65
L7	80		0,021	0,14	16,90
L8	80		0,025	0,16	17,08
L9	80		0,03	0,18	16,71



Şekil 9. Kesme hızı ve ilerleme miktarı ile takım aşınması ilişkisi

4. SONUÇLAR

17-4 PH paslanmaz çelik malzemeden kanatlı turbo disk üretimi sürecinde, kaba işleme şartlarının kesme kuvveti, bileşke eğilme momenti ve burulma momenti üzerindeki etkileri araştırılmış ve yüksek hızda işleme için optimum kesme parametreleri belirlenmiştir. İlerleme miktarı, kesme kuvveti ve bileşke eğilme momenti üzerinde en yüksek etkiye sahipken burulma momenti en fazla kesme hızı*ilerleme miktarı ikili etkileşiminden etkilenmiştir. İlerleme miktarının tekil etkisi özellikle ilerleme miktarındaki artış ile kesme kuvveti ve bileşke eğilme momentinde artışa neden olduğunu gösterirken, kesme hızı*ilerleme miktarı etkileşiminde yüksek kesme hızı ile orta veya yüksek seviye ilerleme miktarı seçiminin kuvvet ve momentlerde kabul edilebilir artışlara neden olduğunu ortaya koymaktadır. Kaba işlemede, yüzey kalitesi beklentisi olmadan, kısa işleme süresi hedefiyle, sonuçlar irdelendiğinde, yüksek kesme hızı*orta ilerleme miktarı ve/veya yüksek kesme hızı*yüksek ilerleme miktarının değerlendirilen şartlarda en uygun kuvvet, momentler ve süre hedeflerini karşılayacak parametre çifti olduğu sonucuna varılmıştır. Bir sonraki çalışmada, önerilen en uygun parametrelerin takım ömrü sonuçları açısından değerlendirilmesi ve takım ömrü-işleme süresi dolayısıyla işleme maliyeti dengesinin araştırılması planlanmaktadır.

EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS FOR ROUGH MACHINING OF 17-4 PH MATERIAL FAN BLADE TURBO DISKS

Fan blade turbo disks (blisks), which are critical components of aircraft engines, have complex geometric structures and operate under high temperatures, pressures, and rotational speeds, making their manufacturing process challenging. In this study, the optimization of cutting parameters for rough channel milling of blisks made from 17-4 PH stainless steel using simultaneous five-axis end milling was experimentally investigated. A full factorial experimental design was applied with three different cutting speeds and feed rates, resulting in nine experiments. Cutting forces, bending, and torsional moments were analyzed, and the optimal parameters were determined using ANOVA. The results indicate that for shorter machining times, the best combination is high cutting speed with medium or high feed rate.

Keywords: Fan blade turbo disk, blisk, 17-4 PH, Simultaneous 5-axis machining, Cutting parameters

KAYNAKLAR

1. Lee, J., Yeh, H., Chen, T. (2022) Improvement in the Efficiency of the Five-axis Machining of Aerospace Blisks. *Science Progress*. 105(4).

2. González-Barrio, H., Calleja-Ochoa, A., Lamikiz, A., López de Lacalle, L. N. (2020) Manufacturing Processes of Integral Blade Rotors for Turbomachinery, Processes and New Approaches. *Applied Sciences*. 10(9) : 1-21.
3. Xin, H., Shi, Y., Zhao, T. (2018) Compound Efficient and Powerful Milling Machine Tool of Blisk”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 98 : 1745-1753.
4. Karthik, D., Kalainathan, S., Swaroop, S. (2015) Surface Modification of 17-4 PH Stainless Steel by Laser Peening Without Protective Coating Process. *Surface and Coatings Technology*. 278: 138–45.
5. Çiftçi, İ., Kasap, M. Şeker, U. (1999) Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirlik Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Yapılmış Deneysel Çalışmalar. *Z.K.Ü. Karabük Tek Eğitim Fakültesi Teknol Derg*. 3(4): 130-141.
6. Mohanty, A. (2014) Influence of CVD Multilayer Coating on Machinability Characteristics of Aerospace Grade Stainless Steel. *Yüksek Lisans Tezi*. National Institute of Technology.
7. Yurtkuran, H., Günay, M. (2022) Analyzing the Effects of Cutting Parameters on Machinability Criteria in Milling of 17-4PH Stainless Steel under Dry Environment. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*. 3(3): 8-19.
8. Yaşar, S., A., Uzun, G., Korkut, İ. (2019) 17-4 PH Paslanmaz Çeliklerin Tornalamasında Farklı Kaplama Tiplerinin Kesme Kuvvetlerine Etkilerinin İncelenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8: 1-11.
9. Yaşar, S., A., Uzun, G., Korkut, İ. (2020) 17-4 PH ve 15-5 PH Paslanmaz Çeliklerinin Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*. 10(1): 71-81.
10. Mohanty, A., Gangopadhyay, S., Thakur, A. (2016) On Applicability of Multilayer Coated Tool in Dry Machining of Aerospace Grade Stainless Steel. *Mater Manuf Process*. 31(7): 869–879.
11. Ay, M., Kalyon, A. (2011) CNC Torna Tezgahında 17-4 PH Paslanmaz Çeliğin İşleme Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi. 6 th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11).
12. Yavuz, M., Gökçe, H., Yavaş, Ç., Korkut, İ., Şeker, U. (2017) Matkap geometrisinin delik kalitesi ve kesme performansına etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(5): 1051-1066.

Emre Taşcıoğlu* 

Marmara Üniversitesi
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
İstanbul/Türkiye

Yusuf Kaynak 

Marmara Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul/Türkiye

Özhan Kıtay 

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü
Bilecik/Türkiye

Kesici Takım Geometrisinin CW511L Kurşunsuz Pirinç Malzemenin İşlenebilirliğine Etkisinin İncelenmesi

Kurşunsuz pirinç malzemeler çok geniş bir uygulama alanına sahip olmasına rağmen talaşlı işlenebilirliğinde halen problemlerle karşılaşılabilinmektedir. Bu çalışmada kurşunsuz pirinç olan CW511L malzemenin talaşlı işlenebilirliği farklı kesme hızları, takım talaş açısı ve ilerleme değeri bakımından incelenmiştir. Elde edilen bulgular düşük kesme hızında ve ilerleme değerinde kesme kuvvetinin ve kesme sıcaklığının azaldığını göstermektedir. Ayrıca takım geometrisi işlenebilirliği doğrudan etkilemiştir. En yüksek mikrosertlik değeri negatif talaş açısıyla yapılan deneylerde elde edilmiştir. Ayrıca malzemenin deformasyon hızının 105 s-1 olduğu hesaplanmıştır. Deformasyon hızına takım geometrisinin etkisi sınırlı olurken kesme hızının etkisi belirgin farklılıklar sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: CW511L, kurşunsuz pirinç, talaşlı işlenebilirlik

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 16 Mart 2025

Kabul: 26 Haziran 2025

*Sorumlu Yazar: Emre Taşcıoğlu

Email: emre_tascioglu@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1658896>

GİRİŞ

Boru, profil, vana, pompa, su saatleri, kol saatindeki çok küçük parçalar gibi birçok nesne pirinç alaşımlarından üretilmektedir. Pirincin mukavemeti, sızdırmazlığı ve işlenebilirliği çok iyi olup fiyatı da gayet uygun sınırlar içindedir. Ana metal olarak bakır ve çinkodan meydana gelen pirinç alaşımlarının büyük bir çoğunluğu kurşunludur. Kurşunun doğada çok olması, düşük sıcaklıkta ergimesi ve kolay şekillendirilebilmesi gibi birçok nedenler kullanılmasını cazip kılmaktadır [1-3]. Pirinç imal edilirken işlenebilirliği artırıcı farklı alaşım elementleri ilave edilir. Bu elementlerden bazıları silikon [4], selenyum [2], bizmut [5], grafit [6] ve özellikle kurşundur [7]. Bu bağlamda en önemli unsur, mükemmel talaş kırılması, düşük takım aşınması ve yüksek kesme parametreleri ile ilgili olan kurşundur. Çünkü kurşunun pirincin içinde çözünmesi çok düşüktür, kurşun tüm mikro yapıyı özellikle tane sınırlarını ayırır. Bu nedenle kayma mukavemeti önemli ölçüde azalır ve mükemmel talaş kırılması ile sonuçlanır.

Bununla birlikte kurşunlu pirinç insan sağlığı ve doğa için önemli bir tehlike oluşturmaktadır. [8-10]. Bu nedenle pirinç alaşımlarında kullanılan kurşun miktarı Avrupa, ABD, Çin ve Japonya'da önemli ölçüde sınırlıdır. [11]. Bu kısıtlamalar kurşunsuz pirinç kullanımını artırmış ve bu nedenle çalışmalar kurşunsuz pirinç üzerine yoğunlaşmıştır. Kurşun tehlikeli ağır metal olduğu için son yıllarda bakır alaşımlarında kurşun kullanımı belirli uygulamalar için sınırlandırılmıştır. Pirinç malzemelerdeki kurşun oranının azaltılması talaşlı imalat performansına talaş kırılabilirliği açısından olumsuz etkileri vardır. Kurşun içermeyen pirinçler çoğu işleme sırasında sürekli talaş üretme eğilimindedir [12].

Literatürdeki birçok çalışma kurşunlu malzemelere odaklanmış olup, sınırlı sayıda çalışma kurşunsuz malzemeleri analiz etmiştir [12-14]. Nobel ve ark. [3], CuZn42 (CW510L) ve CuZn38As (CW511L) gibi kurşunsuz pirinç alaşımlarının işlenebilirliğini araştırmıştır. Bu alaşımlar için ana problemlerin uzun talaş oluşumu ve takıma gelen yüksek termal ve mekanik yüklerin olduğunu tespit

etmişlerdir. Nobel ve ark. [8] ayrıca ortogonal kesme yöntemiyle talaş oluşumu ve kırılabilirliğini incelemiştir. Kato ve ark. [15] CuZn21Si3P malzemenin mikro delinmesinde farklı takımlar kullanılarak talaş oluşumunu incelemiştir. Nobel ve ark. [16] takım kaplamasının ve malzemenin düşük kurşunlu pirinç alaşımlarının işlenebilirliği üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Kurşunlu ve düşük kurşunlu pirinç alaşımlarının işleme davranışlarını karşılaştırmışlar ve çok farklı işlenebilirlik sonuçları elde etmişlerdir. Pantazopoulos ve ark. [17] kurşunsuz pirinçlerin mekanik özellikleri ve mikro yapısı arasındaki ilişkiyi araştırmışlar ve en uygun kurşunsuz pirinç alaşımını belirlemeye çalışmışlardır. CW510L kurşunsuz pirincin kurşunlu pirincin yerini alabilecek potansiyel bir aday olduğunu göstermişlerdir. Bu hususta CW511L kurşunsuz pirincin işlenebilirliğinin geniş bir parametre aralığında incelenmesi literatürde sınırlı sayıda çalışmaya ek olarak önemli bir boşluğu dolduracaktır.

Bu çalışmada CW511L kurşunsuz pirinç malzemenin dik tornalanması deneylerinde farklı kesme hızları ve talaş açılarının etkisinin işlenebilirlik kabiliyetine etkisi kesme kuvveti ve kesme sıcaklığı bakımından incelenmiştir. Ayrıca kesme parametrelerinin malzemenin deformasyon hızına etkisi hesaplanmış olup işlenmiş yüzeydeki mikrosertlik değişimleri incelenmiştir.

DENEYSEL TASARIM

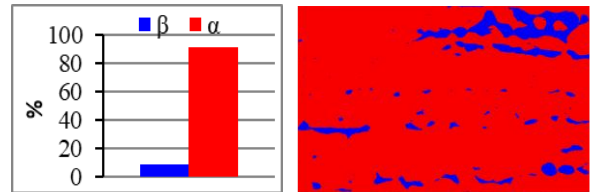
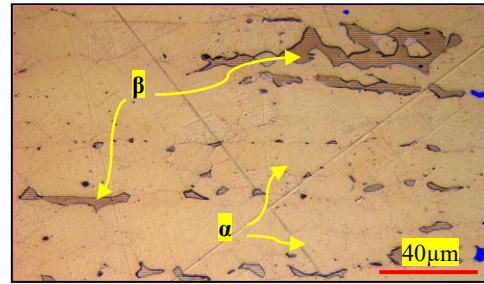
Çalışmalarda iş parçası olarak 80 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda çubuk CW511L kurşunsuz pirinç malzemesi kullanılmıştır. Malzemelerin kimyasal bileşimi Tablo 1' de sunulmuştur. Pirinçler alfa (α) ve beta (β) fazından oluşmakta olup, malzemelerin mikro yapı görüntüleri Şekil 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. CW511L pirinç malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

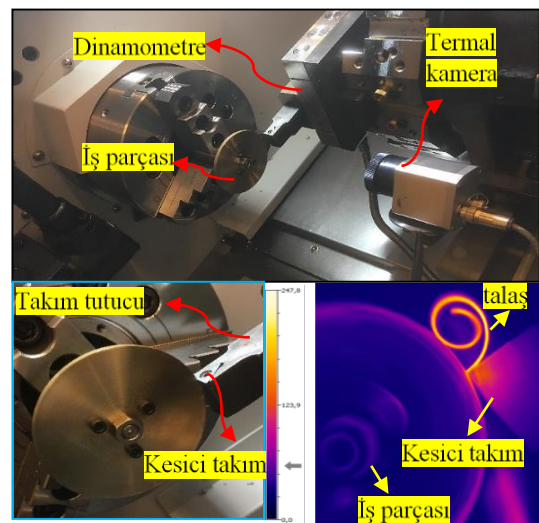
Cu	Zn	Pb	As
%61.16	%38.39	%0.15	%0.07
Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
392	250	22	90 $\pm$ 5 HV

Deneylerde kullanılmak üzere CW511L malzemeden 4 mm çapında diskler tel erozyonla kesilmiştir. Deneysel düzenek Şekil 2' de gösterilmiştir. Deneyler 4500 dev/dak kapasiteli Doosan Puma CNC torna tezgâhında yapılmıştır. Kesme hızları 50, 150 ve 350 m/dak olarak seçilmiştir. 0.05 ve 0.15 mm/dev olmak üzere iki

farklı ilerleme değeri kullanılmıştır. Kesici uç olarak TCMW16T308 H13A kodlu kaplamasız ve 0° boşluk açısına sahip takım tercih edilmiştir. Her bir deneyde tekrarlanabilirlik açısından yeni kesici takım kullanılmıştır ve her deney iki kez tekrar edilmiştir. Özel olarak imal edilmiş takım tutucular kullanılarak deneyler -6, -3, 0, 3 ve 6° olmak üzere beş farklı talaş açısında gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri KISTLER 2129AA dinamometreye ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde Optris PI400 termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera örnek görüntüsü Şekil 2' de gösterilmiştir. Vickers(HV) sertlik ölçmede FutureTech FM310e model cihaz kullanılarak yapılan 10 adet ölçümün ortalaması alınmıştır.



Şekil 1. CW511L pirinç malzemenin optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görüntüsü



Şekil 2. Deneyel düzenek gösterimi

Tablo 2. Dik kesme parametreleri

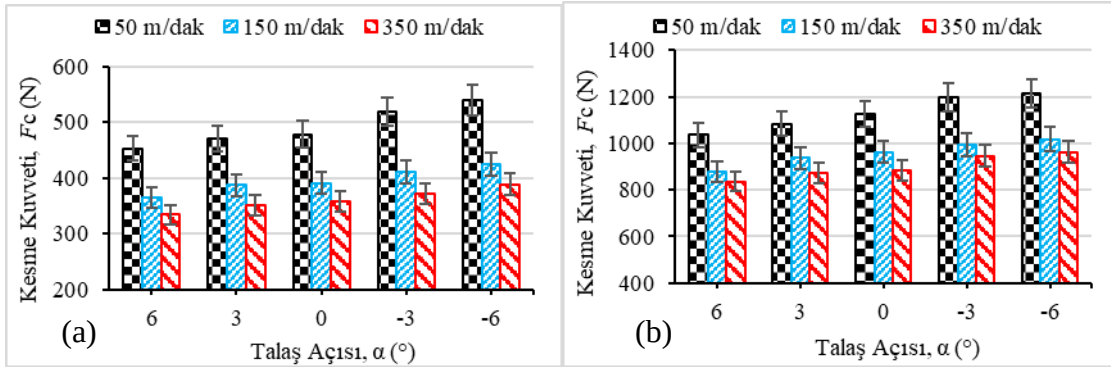
Kesme hızı, V_c (m/dak)	50, 150, 350
İlerleme, f (mm/dev)	0.05, 0.15
Talaş açısı, γ (°)	+6, +3, 0, -3, -6

KESME KUVVETİ

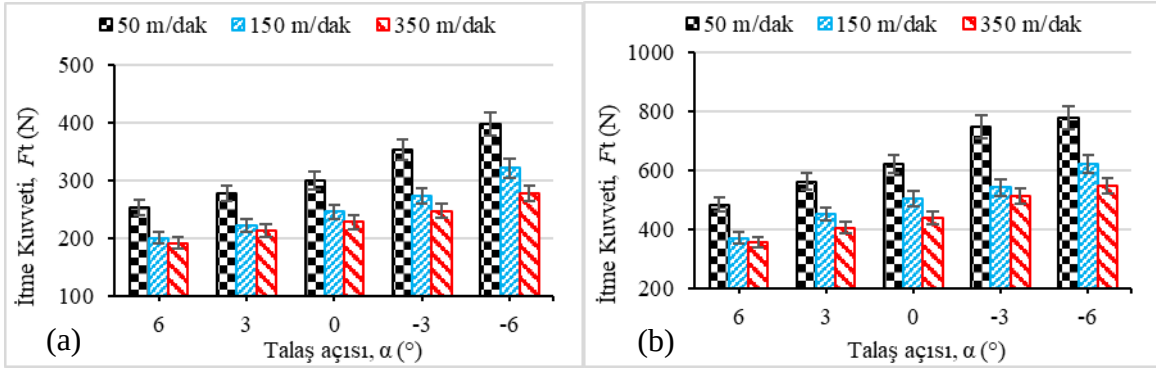
Değişken talaş açısı değerlerinde ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma deneylerinde ölçülen esas kesme kuvvetleri Şekil 3' te gösterilmiştir. 0.05 mm/dev ve 0.15 mm/dev olmak üzere her iki ilerleme değerinde de kesme hızları ve talaş açıları bakımından ölçülen esas kesme kuvvetlerindeki değişim eğilimleri aynıdır. Şekil 3a 0.05 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen esas kesme kuvvetlerini göstermektedir. Tüm talaş açısı değerlerinde kesme hızındaki artış esas kesme kuvvetlerinde azalmaya sebep olmuştur. Kesme hızının artması takım-talaş sürtünmesinin artması ve dolayısıyla kesme sıcaklığının artmasına yol açmıştır. Kesme bölgesinde artan sıcaklık iş parçasında termal yumuşama etkisi yaratarak daha kolay talaş kaldırılmasına yardım etmiştir. Bunun sebebi talaş kaldırma esnasında artan ısı nedeniyle malzemenin kristal yapısındaki atomların kinetik enerjilerinin artmasıdır. Bir diğer eğilim ise talaş açısı değerlerinin pozitiften negatife doğru değiştikçe ölçülen kesme kuvvetlerinde meydana gelen düzenli artıştır. En düşük esas kesme kuvvetleri 6° pozitif talaş açısı değerinde ölçülmüştür. En yüksek esas kesme kuvvetleri ise -6° negatif talaş açısı değerinde ölçülmüştür. Bunun sebebi talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan kayma düzlem açısı ve dolayısıyla alanının oluşumunda talaş açısı değerinin doğrudan ilgili olmasındandır. Çünkü büyük talaş açısı büyük kayma açısı oluşturur. Kayma açısının büyük olması kesme birinci deformasyon bölgesinde kayma düzlem alanının küçük olmasına yol açar. Sonuçta kayma düzlem alanının küçük olması talaş kaldırmak için

daha az kuvvet harcanmasına yol açar. Görüleceği üzere pozitif talaş açısı değerlerinde ölçülen kuvvetlerin negatif talaş açısı değerlerindeki kuvvetlerden az olması bu durumu desteklemektedir. En yüksek esas kesme kuvveti 50 m/dak kesme hızında ve -6° talaş açısı değerinde 540N olarak ölçülmüştür. En düşük esas kesme kuvveti ise 334N olarak 350 m/dak kesme hızında ve 6° talaş açısı değerinde ölçülmüş olup aradaki fark %62 kadardır. Şekil 3b' de gösterilen 0.15 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen kuvvetler ise 0.05 mm/dev ilerleme değerindeki kuvvetlerin iki katı civarında seyretmiştir. Talaş açısı ve kesme hızı bakımından benzer eğilimlerin geçerliği olduğu görülmektedir. En yüksek esas kesme kuvveti olan 1212N ile en düşük esas kesme kuvveti olan 835N arasındaki fark %45 kadardır. İlerleme değerinin büyümesi talaş kesit alanının artmasına neden olmaktadır. Bu durumda birim zamanda kaldırılan talaş miktarının artmasıyla daha fazla esas kesme kuvvetinin harcanmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla 0.15 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen kuvvetler daha fazladır.

Değişken kesme hızları ve talaş açıları yapılan dik kesme deneylerinde ölçülen itme kuvvetleri 0.05 mm/dev ilerleme değeri için Şekil 4a' da ve 0.15 mm/dev ilerleme değeri için Şekil 4b' de gösterilmiştir. Kesme kuvvetlerindeki eğilimler itme kuvvetlerinde de aynen geçerlidir. En yüksek itme kuvveti 0.05 mm/dev ve 0.15 mm/dev ilerleme değerlerinde sırasıyla 50 m/dak kesme hızı ve -6° talaş açısında 397N ve 781N olarak ölçülmüştür. En düşük itme kuvvetleri ise 350 m/dak kesme hızı ve 6° talaş açısı değerinde 0.05 mm/dev ve 0.15 mm/dev ilerleme değerlerinde sırasıyla 192N ve 356N olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Dik kesme deneylerinde ölçülen esas kesme kuvvetleri a)f=0.05 mm/dev, b)f=0.15 mm/dev

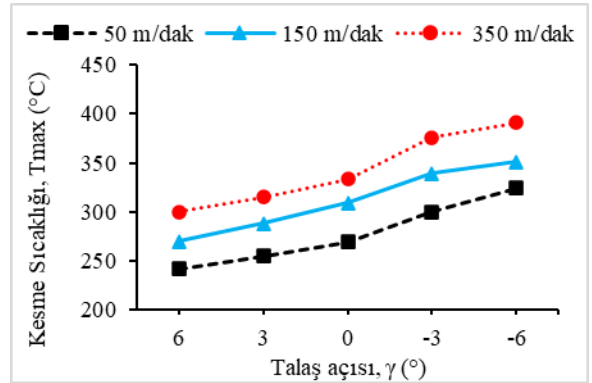


Şekil 4. Dik kesme deneylerinde ölçülen itme kuvvetleri a)f=0.05 mm/dev, b)f=0.15 mm/dev

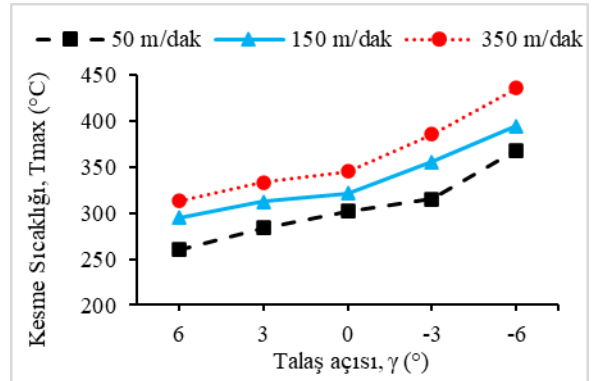
KESME SICAKLIĞI

Şekil 5' te 0.05 mm/dev ilerleme değerinde değişken kesme hızı ve talaş açısı değerlerinde yapılan dik kesme deneylerinde ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları gösterilmiştir. Tüm talaş açısı değerlerinde en düşük sıcaklıklar 50 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Kesme hızının artmasıyla sıcaklık değerlerinde de artış söz konusudur. Ayrıca tüm kesme hızı değerlerinde de en düşük sıcaklıklar 6° pozitif talaş açısında elde edilmiştir. Talaş açısı pozitiften negatife doğru değiştikçe sıcaklıktaki artış eğilimi açıktır. Talaş kaldırma esnasında en çok ısı birinci deformasyon bölgesinde oluşur. Bu bölge de kayma düzlemine denk gelmektedir ve asıl elasto-plastik deformasyon burada gerçekleşmektedir. Dolayısıyla negatif talaş açısında daha büyük kayma düzlemi oluştuğundan burada ki deformasyonun pozitif talaş açısına göre daha büyük olması ve dolayısıyla takım-talaş arasına tekabül eden ikincil deformasyon bölgesinde ki sürtünmenin daha fazla olması beklenir. Nitekim termal kamera ile ölçülen sıcaklık değerlerinin negatif talaş açısında en yüksek değerler olduğu görülmektedir. 50 m/dak kesme hızında 6° ve -6° talaş açılarında ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları sırasıyla 242°C ve 324°C olup arada %34 fark vardır. Ayrıca 350 m/dak kesme hızında ise en düşük ve en yüksek sıcaklıklar ise sırasıyla 300°C ve 391°C olup arada ki %30 dur. Buradan anlaşılabileceği üzere kesme hızı değişse bile talaş açısı değerlerine bağlı olarak yaşanan sıcaklık değişim oranı benzerdir.

İlerleme değeri 0.15 mm/dev olduğu durumda değişken kesme hızı ve talaş açısına bağlı olarak ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları Şekil 6' te gösterilmiştir. İlerleme değerinin artması sonucu ölçülen sıcaklık değerlerinde artışlar belirgindir. Ayrıca kesme hızına ve talaş açısına bağlı eğilimlerin değişmediği görülmektedir. 50 m/dak kesme hızında ölçülen en düşük ve en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 260°C ve 368°C dir. 350 m/dak kesme hızında ise en düşük ve en yüksek sıcaklıklar ise sırasıyla 313°C ve 435°C dir.



Şekil 5. Dik kesme deneylerinde ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları (f=0.05 mm/dev)

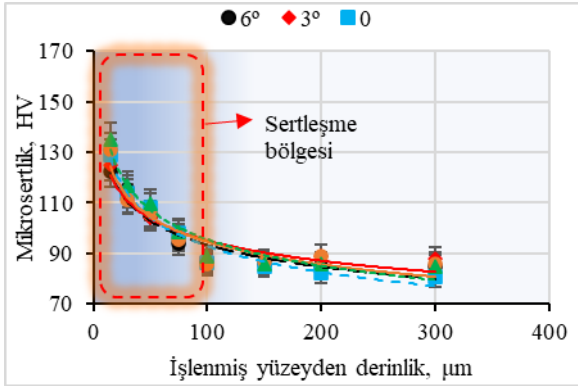


Şekil 6. Dik kesme deneylerinde ölçülen maksimum kesme sıcaklıkları (f=0.15 mm/dev)

MİKROSERTLİK

Talaş kaldırma operasyonlarında takım-iş parçası arasında meydana gelen mekanik, termal ve hatta kimyasal reaksiyonlar sonucu iş parçasının işlenmiş yüzeyinde plastik deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Bu durum işlenmiş yüzeyin ve yüzeyaltının sertlik özelliklerini değiştirmekte ve ortaya çıkan ürünün başta yorulma olmak üzere

kullanım performansını doğrudan etkilemektedir. Bu hususta işlenen malzemelerin mikrosertlik değerleri incelenmiştir. Şekil 7’ te değişken talaş açısı değerlerinde 0.05 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen sertlik değerleri gösterilmiştir. İşlenmiş yüzeyden 15 µm derinlikte ölçülen sertlik değerleri arasında en yüksek sertlik 135 HV ile -6° talaş açısında ölçülmüştür. İşlem görmemiş malzeme sertliğine kıyasla %50 artış söz konusudur. En düşük sertlik artışı ise 122 HV ile 6° talaş açısında ölçülmüştür. Bu durum açıkçası kesme kuvvetleri sonuçlarıyla örtüşmektedir. Çünkü negatif talaş açısı değerindeki kuvvetler daha yüksek olduğundan meydana gelen plastik deformasyon oranının da yüksek olması malzemenin sertliğini etkilemiştir. Tüm talaş açısı değerlerinde sertlik değerleri işlenmiş yüzeyden 100 µm derinliğe ulaşıldığında işlem görmemiş malzeme sertliğine düştüğü görülmektedir.

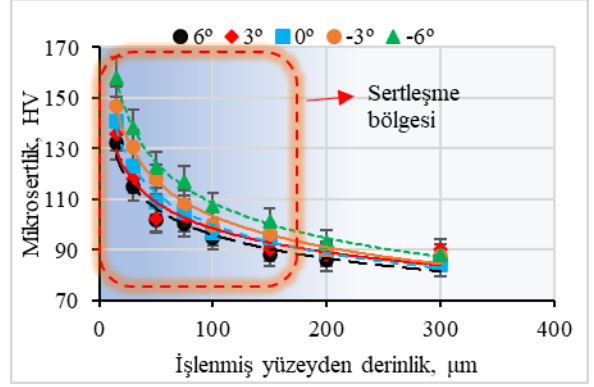


Şekil 7. Değişken talaş açısı değerlerinde işlenen malzeme sertliği (Vc=350 m/dak, f=0.05 mm/dev)

Şekil 8’ te ise değişken talaş açısı değerlerinde ve 0.15 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen mikrosertlik değerleri gösterilmiştir. En yüksek sertlik değeri işlenmiş yüzeyden 15 µm derinlikte -6° talaş açısında 158 HV olarak ölçülmüş olup bu değer işlenmemiş malzeme sertliğinden %75 daha fazladır. Aynı noktada en az sertlik artışı ise 6° talaş açısında 132 HV olarak ölçülmüş olup benzer eğilim ilerleme değeri artsa bile devam etmiştir. İşlenmemiş malzeme sertliğine ise 150 µm derinlikte ulaşılmıştır.

ANALİTİK ANALİZ

Talaş açısı ve kesme hızı parametrelerinin malzemenin işlenebilmesine etkisinin daha iyi anlaşılması için analitik hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Merchant teorisine göre Denklem 1-4 kullanılarak malzemenin farklı kesme parametrelerindeki deformasyon hızı davranışı incelenmiştir.



Şekil 8. Değişken talaş açısı değerlerinde işlenen malzeme sertliği (Vc=350 m/dak, f=0.15 mm/dev)

$$\mu = \frac{F_c \tan \gamma + F_t}{F_c - F_t \tan \gamma} \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \mu \quad (2)$$

$$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

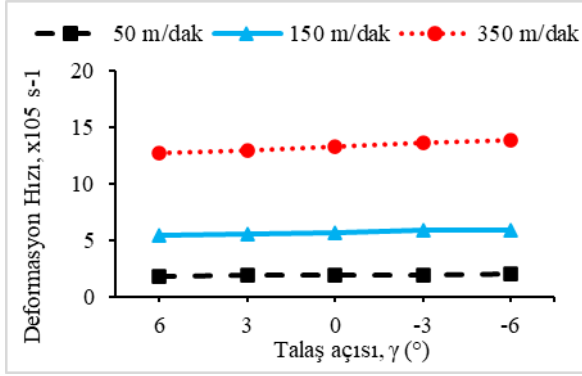
$$\dot{\epsilon} = \frac{10 v_c \cos \gamma}{t_n \cos(\phi - \gamma)} \quad (4)$$

Burada μ sürtünme katsayısı, γ talaş açısı, β sürtünme açısı, t_0 ilerleme değeri, ϕ ise kayma açısıdır. Şekil 9’te 0.05 mm/dev ilerleme değerinde ve Şekil 10’ te 0.15 mm/dev ilerleme değerinde hesaplanan deformasyon hızları paylaşılmıştır. Her iki ilerleme değerinde de deformasyon hızı 105 s-1 olarak gerçekleşmiştir. İlerlemenin 0.05 mm/dev değerinde deformasyon hızının 0.15 mm/dev değerine kıyasla tüm kesme parametrelerinde daha yüksektir. En yüksek deformasyon hızı 350 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. Ayrıca negatif talaş açısı değerlerinde deformasyon hızı daha fazladır.

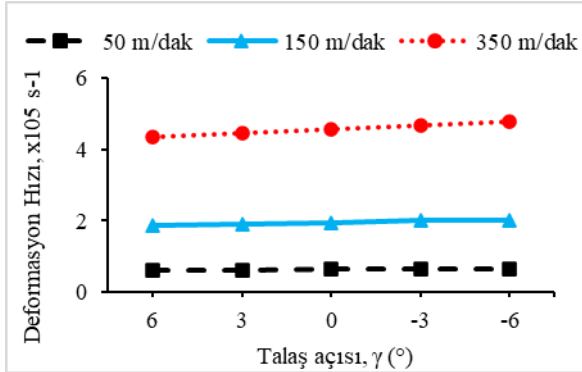
Deformasyon hızı genelde kesme hızı ve malzeme özelliklerinden etkilenmektedir. Kesme hızının artması deformasyon hızının artması için Zemin oluşturmaktadır.

Aslında, 103 s-1’den büyük deformasyon hızları, deformasyon oranının yüksek bölgede olduğunu gösterir ve bu aynı zamanda deformasyon hızının gerilim-gerinim üzerindeki etkisinin de büyük olduğunu gösterir. Aslında, sıcaklık ve deformasyon hızı birbirini tetikleyen iki faktördür. Yüksek deformasyon hızı önemli ısı üretimine neden olur. Bu nedenle, ortaya çıkan yüksek sıcaklık, adiabatik kayma bantlarının oluşumunun önünü açar ve talaş oluşumu gerçekleşir [34]. Yüksek deformasyon

hızlarında oluşan deformasyon mekanizmasının, düşük deformasyon hızlarına göre daha karmaşık olması da bir diğer konudur. Düşük deformasyon hızlarındaki deformasyon mekanizması kayma ve eğilmeden oluşurken, yüksek deformasyon hızlarında mikroyapı, kusurlar ve mekanik özellikler gibi malzeme özellikleri etkilidir. Hesaplanan deformasyon hızlarının yüksek sınıfta olduğu düşünüldüğünde, yüksek kesme hızında düşük kesme kuvveti ve yüksek sıcaklık ölçülmesi bu durumu desteklemektedir.



Şekil 9. Farklı kesme parametrelerinin deformasyon hızına etkisi (f=0.05 mm/dev)



Şekil 10. Farklı kesme parametrelerinin deformasyon hızına etkisi (f=0.15 mm/dev)

SONUÇ

Bu çalışmada CW551L kurşunsuz pirinç malzemenin farklı kesme parametrelerinde dik tornalama deneyleri yapılmıştır. Özellikle farklı talaş açılarının malzemenin işlenebilirliği ve deformasyon hızına etkisi ortaya konmuştur. Bazı dikkat çekici bulgular şu şekildedir;

- Malzeme -6° talaş açısı değerinde işlendiğinde tüm kesme hızları ve ilerleme değerlerinde en yüksek kesme kuvveti ve kesme sıcaklıkları elde edilmiştir.

- Pozitif talaş açısına sahip kesici takımlar işlenebilirlik performansı açısından daha verimlidir.
- CW551L malzemenin işlenmesi 105 S-1 deformasyon hızında gerçekleşmiştir.
- Deformasyon hızına etki bakımından talaş açısı nispeten etkili bir parametreyken kesme hızının etkisi daha barizdir. En yüksek deformasyon hızı maksimum kesme hızı ve -6° talaş açısı değerinde elde edilmiştir.

Bu çalışma kurşunsuz pirinç malzemelerin işlenebilirliğinin kesme parametreleri ile kontrol edilebileceğini ve talaş kaldırma operasyonlarında karşılaşılan problemlerin çözülebileceğini göstermektedir.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING TOOL GEOMETRY ON THE MACHINABILITY OF CW551L LEAD-FREE BRASS MATERIAL

Although lead-free brass materials have a very wide application area, problems can still be encountered in machinability. In this study, the machinability of lead-free brass CW551L material was investigated in terms of different cutting speeds, tool rake angle and feed rate. The findings obtained show that cutting force and cutting temperature decrease at low cutting speed and feed rate. In addition, tool geometry directly affected machinability. The highest microhardness value was obtained in experiments conducted with negative rake angle. In addition, the strain rate of the material was calculated as 105 s⁻¹. While the effect of tool geometry on strain rate was limited, the effect of cutting speed provided significant differences.

Keywords: CW551L, Lead-free brass, Machining

KAYNAKLAR

1. Nobel, C., et al., Experimental investigation of chip formation, flow, and breakage in free orthogonal cutting of copper-zinc alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 84: p. 1127-1140.
2. Vilarinho, C., et al., Influence of the chemical composition on the machinability of brasses. Journal of materials processing Technology, 2005. 170(1-2): p. 441-447.
3. Nobel, C., et al., Machinability enhancement of lead-free brass alloys. Procedia Cirp, 2014. 14: p. 95-100.
4. Hofmann, U., et al., Messing und Stahl auf dem Prüfstand: Ein Vergleich der Zerspanbarkeit. Werkstatt und Betrieb, 2005. 7: p. 93-97.

5. IMAI, H., et al., Mechanical properties and machinability of extruded Cu-40% Zn brass alloys with bismuth via powder metallurgy process. Transactions of JWRI, 2009. 38(1): p. 25-30.
6. Saigal, A. and P. Rohatgi, Machinability of cast lead-free yellow brass containing graphite particles. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1996. 104: p. 225-228.
7. Gane, N., The effect of lead on the friction and machining of brass. Philosophical Magazine A, 1981. 43(3): p. 545-566.
8. Nobel, C., et al., Experimental investigation of chip formation, flow, and breakage in free orthogonal cutting of copper-zinc alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 84(5-8): p. 1127-1140.
9. Chen, X., et al., Study on the properties of Sn-9Zn-xCr lead-free solder. Journal of alloys and Compounds, 2008. 460(1-2): p. 478-484.
10. Atsumi, H., et al., High-strength, lead-free machinable α - β duplex phase brass Cu-40Zn-Cr-Fe-Sn-Bi alloys. Materials Science and Engineering: A, 2011. 529: p. 275-281.
11. Directive, E., Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011, on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast). Official Journal of the European Communities, 2011.
12. Hofmann, U. and E. El-Magd, Behaviour of Cu-Zn alloys in high speed shear tests and in chip formation processes. Materials Science and Engineering: A, 2005. 395(1-2): p. 129-140.
13. Klocke, F., D. Lung, and C. Nobel, Ansätze zur Hochleistungserschpannung bleifreier Kupferwerkstoffe. Metall-Clausthal, 2012. 66(11): p. 496.
14. Taha, M.A., et al., Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties. Ain Shams Engineering Journal, 2012. 3(4): p. 383-392.
15. Kato, H., S. Nakata, and N. Ikenaga, Improvement of chip evacuation in drilling of lead-free brass using micro drill. International journal of automation technology, 2014. 8(6): p. 874-879.
16. Klocke, F., C. Nobel, and D. Veselovac, Influence of tool coating, tool material, and cutting speed on the machinability of low-leaded brass alloys in turning. Materials and Manufacturing Processes, 2016. 31(14): p. 1895-1903.
17. Toulfatzis, A.I., G.A. Pantazopoulos, and A.S. Paipetis, Fracture behavior and characterization of lead-free brass alloys for machining applications. Journal of materials engineering and performance, 2014. 23(9): p. 3193-3206.

Kemal Ayan* 

Nail Aslan 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü,
Manisa/Türkiye

Fırat Mavi 

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine
Mühendisliği Bölümü,
İzmir/Türkiye

Sırrı Can Polat 

Cansu Apaydın 

Nurşen Saklakoğlu 

Manisa Celal Bayar Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine
Mühendisliği Bölümü,
Manisa/Türkiye

EYM ile Üretilen PLA Parçaların Talaşlı İmalatla Delinmesinde Katman Kalınlığının ve Delme Parametrelerinin Delik Kalitesine Etkisi

Biyobozunur ve işlenebilir yapısı nedeniyle PLA, EYM (Eriyik Yiğma Modelleme) yönteminde sıkça tercih edilir. Ancak elde edilen parçaların yüzey kalitesi ve geometrik doğruluğu, çoğunlukla son işlem adımlarını zorunlu kılar. Bu çalışmada, katman kalınlığı ile kesme ve ilerleme hızlarının, delik çapı, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, kesme hızının delik doğruluğu, ilerleme hızının silindiriklik ve her iki parametrenin delaminasyon üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Yüzey kalitesi ile boyutsal tutarlılığın dengelenmesi adına düşük katman kalınlığı, yüksek kesme ve orta düzeyde ilerleme hızı önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Eriyik Yiğma Modelleme, Polilaktik asit (PLA), Delme, Proses Optimizasyonu.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 1 Mayıs 2025

Kabul: 16 Mayıs 2025

*Sorumlu Yazar: Kemal Ayan

Email: kemal.ayan@cbu.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1688383>

1. GİRİŞ

Polilaktik Asit (PLA), mısır nişastası, buğday ve pirinç gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, biyobozunur özellikte bir termoplastiktir. PLA üretimi, tarımsal ürünlerin fermantasyonu sonucu oluşan laktik asidin, doğrudan yoğunlaştırılması veya laktid halkalarının polimerizasyonu ile gerçekleştirilir [1,2]. Mekanik özellikleri açısından polietilen tereftalat (PET), işlenebilirlik açısından ise polistirene (PS) benzer özellikler gösterir. Buna karşın, PLA'nın düşük darbe direnci ve sınırlı termal stabilite gibi dezavantajları bulunmaktadır [3]. Tüm bu sınırlamalara rağmen PLA, katmanlı üretim teknikleri ile karmaşık geometrileri yüksek hassasiyetle üretebilme olanağı ve ekonomik avantajları nedeniyle eklemeli üretim yöntemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Literatürde, PLA'nın biyobozunur yapısını iyileştirmek ve mekanik

özelliklerini geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen farklı katkı çalışmaları da bulunmaktadır [4-6]. Ancak, bu süreçlerin ardından boyutların iyileştirilmesi ve yüzey kalitesinin artırılması için kesme ve delme gibi son işleme işlemleri gereklidir. Bu bağlamda, eklemeli imalatla üretilen PLA parçaların delme özelliklerini anlamak, işleme süreçlerini optimize etmek ve nihai bileşenlerde boyutsal doğruluğu sağlamak açısından oldukça önemlidir. Uygun kesme takımları ve delme parametrelerinin seçimi, yüksek yüzey kalitesi ve hassas boyutsal toleransların elde edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, eklemeli imalat ile üretilen PLA'nın katman temelli yapısı, işleme süreçlerinde ek zorluklar yaratmakta ve işlem parametrelerinin deneysel olarak doğrulanmasını zorunlu kılmaktadır.

PLA ile ilgili literatür, özellikle talaşlı delme işlemi konusunda sınırlı bilgi sunmaktadır. Baraheni ve arkadaşları [7], eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş PLA parçaların delme performansını değerlendirmek amacıyla konvansiyonel delme (CD) ve ultrasonik destekli delme (UD) tekniklerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, CD işleminde matkabin ilerlemesiyle itme kuvvetleri artarken, UD tekniğinde ultrasonik titreşimler sayesinde kuvvetler daha stabil hâle gelmektedir. Ayrıca, kesme hızının artmasıyla itme kuvvetlerinin azaldığı, ilerleme hızının artmasıyla ise arttığı görülmüştür. Aynı çalışma, düşük ilerleme hızı ve yüksek kesme hızı kombinasyonunun delaminasyonu azalttığını; UD tekniğinin ise CD yöntemine kıyasla delaminasyonu yaklaşık %18 oranında daha da düşürdüğünü göstermiştir. Bu iyileşme, ultrasonik delmenin sağladığı kuvvet stabilitesi ve daha düzenli talaş oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar genellikle PLA kompozitlerinin delme tekniklerine odaklanmakta, ancak delme sırasında oluşan hasar mekanizmalarına sınırlı şekilde değinmektedir. Delme işleminde meydana gelen başlıca hasar türleri matris çatlakları, elyaf kırılması (kompozit yapılarında), termal bozulmalar ve delaminasyondur. Bunlar arasında özellikle delaminasyon, bileşenlerin yorulma direncini ve yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde etkileyen önemli bir kusurdur [8,9]. Havacılık endüstrisinde delaminasyona bağlı kusurlar nedeniyle parça reddedilme oranları %60'a kadar ulaşabilmektedir. Bu olumsuz etkileri azaltmak için araştırmacılar, takım geometrisi, kesici takım malzemesi, kesme parametreleri ve titreşim destekli işleme teknikleri gibi faktörlerin delaminasyon, kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini detaylı biçimde incelemiştir [10-13].

PLA'nın talaşlı işleme performansını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunların başında PLA'nın termal stabilitesi, mekanik özellikleri ve eklemeli imalat sırasındaki yazdırma parametreleri gelir. PLA'nın nispeten düşük erime noktası (yaklaşık 153-168°C), işleme sırasında termal bozulma riskini artırarak kötü delik kalitesine, hızlı takım aşınmasına ve nihai parçalarda boyutsal hatalara neden olabilir [14,15]. Ayrıca, PLA'nın kırılkan yapısı ve düşük darbe direnci nedeniyle işleme sırasında çatlak oluşumu ve yüzey kusurlarına yatkınlığı da yüksektir. Bu nedenle, yüksek boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesi elde edebilmek için talaşlı işleme parametrelerinin dikkatli biçimde seçilmesi gerekmektedir [10, 16].

Ayrıca, Eriyik Yığılma Modellemesi (EYM) yöntemiyle üretilmiş PLA parçaların yazdırma parametreleri de talaşlı işleme performansını

etkileyen önemli değişkenlerdir. Katman yüksekliği, baskı hızı ve dolgu yoğunluğu gibi üretim parametreleri, katmanlar arası yapışma mukavemetini ve parçanın genel mekanik dayanımını şekillendirerek işleme performansını doğrudan etkilemektedir[17]. EYM yöntemiyle üretilmiş PLA'nın anizotropik doğası, katmanlar arası bağlanma farklılıkları sebebiyle deliklerin geometrik doğruluğunu ve yapısal stabiliteyi azaltmakta; iç boşluklar ve katman hizasızlıkları da talaşlı işlemeyi daha zor hale getirmektedir. Bu nedenle, üretimde yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirliği sağlamak için talaşlı işleme parametrelerinin doğru şekilde modellenmesi ve malzemenin çeşitli gerilim koşulları altındaki davranışının iyi anlaşılması büyük önem taşımaktadır.

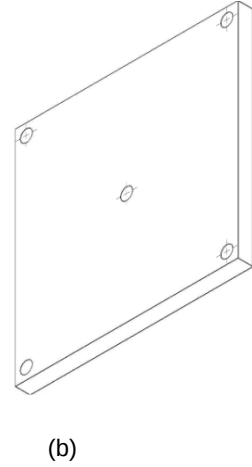
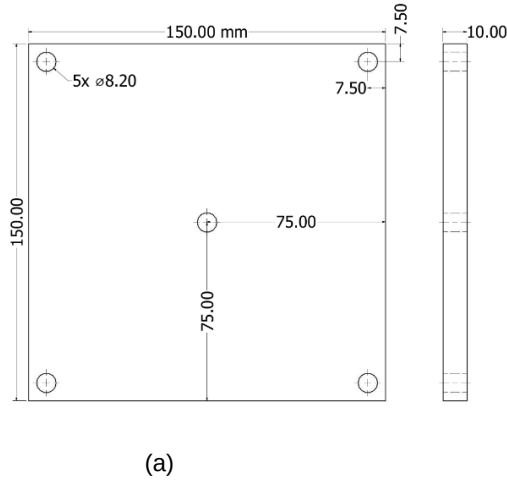
Bu çalışmanın temel amacı, EYM yöntemiyle üretilen PLA parçaların talaşlı delinmesinde optimal kesme parametrelerini deneysel olarak belirlemektir. Katman yüksekliği ile talaşlı imalat parametrelerinin PLA'nın delik kalitesi üzerindeki etkileri, kontrollü deneyler ile incelenmiştir. Yapılan deneyler, delik boyutlarını hassas bir şekilde kontrol etmek amacıyla parametrelerin optimizasyonunu hedeflemekte ve katman kalınlığı değişiminin süreç üzerindeki etkisini değerlendirmektedir. Bu çalışma ayrıca, deneysel bulgulara dayanarak delme parametrelerinin sistematik analizini sağlayarak, EYM ile üretilmiş PLA parçalarının delik kalitesi ve güvenilirliğini iyileştirmek için önemli bilgiler sunmakta ve eklemeli imalat sonrası son-işlem süreçlerine yönelik literatüre katkı sağlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Eriyik Yığılma Modelleme Yöntemiyle Üretim

Çalışmada kullanılan numuneler, Ultimaker S5 marka üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş olup, her biri 150 × 150 × 10 mm boyutlarında ve %100 dolgu yoğunluğuna sahiptir. Deneylerde kullanılan bu PLA plakaların detaylı teknik çizimi Şekil 1'de sunulmaktadır.

Çalışmada kullanılan PLA plakalar, CNC dikey işleme merkezine rijit bir şekilde sabitlenebilmeleri amacıyla beş adet sabitleme deliği içerecek şekilde tasarlanmıştır. Üretimde kullanılan hammadde, önceki çalışmalarda performansı optimize edilmiş olan NatureWorks 4043D PLA granüllerinden elde edilen, 2.85 mm çapında renksiz filamentlerdir. Filamentlerin üretim öncesinde nem kaynaklı hataların önüne geçmek amacıyla 45°C sıcaklıkta, 12 saat boyunca fırında kurutulması sağlanmıştır. Tasarım dosyaları, Ultimaker Cura v5.3.1 dilimleme yazılımı kullanılarak G-kod formatına dönüştürülmüş ve üretim işlemleri Tablo 1'de verilen parametreler ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Delik delme çalışmasında kullanılan plakanın teknik çizimleri. a) Ön ve sol yan görünüşler, b) İzometrik görünüş.

Tablo 1. Üretim Parametreleri

Nozül Çapı	0,4 mm
Nozül Sıcaklığı	210°C
Tabla Sıcaklığı	60°C
Dolgu Tarama Açısı	+45°/-45°
Baskı Hızı	60 mm/sn
Katman Genişliği	0,38 mm
Dolgu/Katman Hattı Çakışma Oranı	%10

Tüm bu üretim parametreleri, ilgili literatürde yer alan önceki çalışmaların bulgularına dayalı olarak seçilmiştir [18, 19]. Bu çalışmada katman kalınlığının delik kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, 0.1 mm, 0.2 mm ve 0.3 mm olmak üzere üç farklı katman kalınlığına sahip PLA plakalar üretilmiştir.

2.2. Talaşlı İmalat ile Delik Delme

Delme işlemleri, 6.7 mm çapında yüksek hızlı çelik (HSS) matkap ucu kullanılarak, ETASIS ETAMILL VL1000 model CNC dikey işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı kesme hızı ve ilerleme hızı kombinasyonları uygulanarak bu parametrelerin delik kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Her bir parametre kombinasyonu için dört tekrar yapılmış; böylece hem sonuçların tekrarlanabilirliği hem de istatistiksel geçerliliği sağlanmıştır.

Delme işlemleri tek geçişli olarak uygulanmış ve takımın giriş ve çıkış hızları sabit tutulmuştur. Her delme işleminden sonra takım yüzeyleri talaş kalıntılarından arındırılmış, su ile soğutma uygulanarak takımın bir sonraki işlem öncesinde oda sıcaklığına dönmesi sağlanmıştır. Deneylerde 27 farklı kombinasyonda kullanılan katman kalınlığı,

ilerleme hızı ve kesme hızı değerlerine ait detaylı bilgiler Tablo 2’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Deneyin bağımsız değişkenleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişkenler	Değerler		
l : Katman kalınlığı [mm]	0.1	0.2	0.3
f : İlerleme hızı [mm/min]	50	100	150
V_c : Kesme hızı [m/min]	12.629	18.944	25.258

2.3. Çap, Silindiriklik ve Delaminasyon Ölçümü

Çap ve silindiriklik ölçümleri, Hexagon marka Glory model Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çap sapması, ölçülen delik çapından kullanılan takım çapının çıkarılmasıyla hesaplanmıştır.

Delaminasyon, özellikle kompozit ve katmanlı yapıdaki malzemelerde yaygın olarak karşılaşılan bir sorundur ve malzeme katmanlarının birbirinden ayrılması veya soyulması şeklinde tanımlanır. Bu olgu, katmanlar arası yapışmayı zayıflatarak yapısal bütünlüğü ve mekanik performansı olumsuz yönde etkileyebilir. Delaminasyon; mekanik gerilmeler, çevresel etkiler veya üretim sürecinde oluşabilecek yerleşik kusurlar sonucu ortaya çıkabilir ve

malzemenin uzun vadeli dayanımını önemli ölçüde düşürebilir.

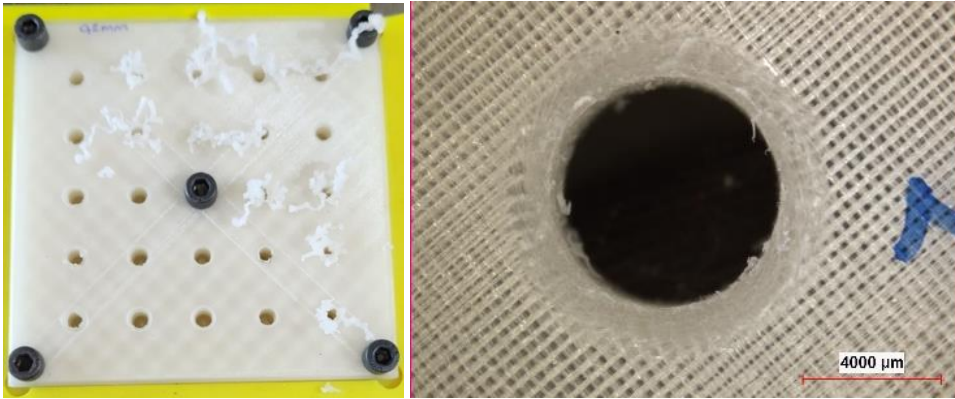
Bu çalışmada, delme işlemi sırasında oluşan delaminasyonun boyutunu nicel olarak değerlendirmek amacıyla görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Görüntü işleme yöntemi, delik ile çevresindeki malzeme arasındaki kontrastı kullanarak delik sınırlarının belirlenmesi adımıyla başlamaktadır. Belirlenen sınırlar doğrultusunda delik merkezi ve çapı hesaplanmakta, bu değer delaminasyonun iç sınır çapını temsil etmektedir.

Bu fonksiyon, Şekil 3(a)'da gösterilen dairenin hesaplanan merkezini referans alarak, belirlenen katsayı yardımıyla dış sınır çapının belirlenmesini sağlamıştır. Bu çap değeri kullanılarak dış sınır Şekil 3(b)'de mavi renkli daire olarak gösterilmiştir.

Delaminasyon miktarı, stereo mikroskop ile elde edilen görüntüler üzerinde uygulanan analizler aracılığıyla, etkilenen alanın belirlenmesi yoluyla tespit edilmiştir. Doğru ve tekrarlanabilir ölçümler sağlamak amacıyla analiz öncesinde delik çevresindeki talaşlar dikkatlice temizlenmiş, böylece görüntü işlemeye bağlı hatalar minimize edilmiştir. Delaminasyonun dış sınırının belirlenmesi sürecinde, hasarsız bölge ile hasarlı bölge arasındaki kontrast farkının yetersiz olması nedeniyle bazı sınırlamalarla

karşılaşılmıştır. Delik sınırlarının belirlenmesinde kullanılan kontrast tabanlı görüntü işleme yöntemi, dış sınırın tespitinde yeterli doğruluğu sağlayamadığından, bu sorunu aşmak amacıyla ayarlanabilir katsayılı bir daire çizim fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 2, deliklerin delme sonrası orijinal hâlini ve talaş temizliği yapılmış yüzey durumlarını göstermektedir. Görüntülerin işlenmesinde Python v3.13 programlama dili kullanılmış ve böylece ölçümlerin doğruluğu ile tekrarlanabilirliği güvence altına alınmıştır [20,21].

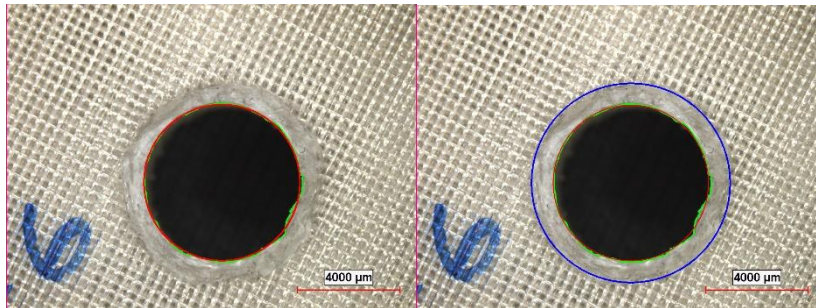
Bu yöntemle, Şekil 3'te gösterilen merkez nokta referans alınarak 10×3 büyütme oranında iç çap hesaplanmış; böylece delaminasyon bölgesine karşılık gelen dış sınır sistematik biçimde tanımlanmıştır. Daha sonra, iç ve dış sınır dairelerine ait çap ve alan değerleri hesaplanarak delaminasyonun boyutu nicel olarak belirlenmiştir. Alan hesaplamalarında standart daire alanı hesaplama formülü kullanılmıştır. Hesaplamaların son aşamasında, delaminasyon alanı, dış sınırı temsil eden mavi daire alanından, iç sınırı temsil eden kırmızı daire alanının çıkarılmasıyla elde edilmiş; böylece etkilenen bölge izole edilerek güvenilir bir şekilde analiz edilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 2. a) 0.2 mm katman kalınlığıyla üretilmiş plakanın delme işlemi sonrasındaki görüntüsü b) 50 mm/dak ilerleme hızı ve 18.944 m/dak kesme hızıyla delinen bir deliğin görüntüsü



Şekil 3. Delaminasyon iç sınırı (kırmızı) (a); dış sınırı (mavi) gösterimi (b)

2.4. Deliklerin Yanal Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

Deliklerin yanal yüzeylerinin pürüzlülükleri Mitutoyo SurfTest SJ-301 stylus uçlu profilometre ile ölçülmüştür. Ölçümlerde R profili esas alınmış, Gaussian filtre uygulanmış, cut-off değeri 0.8 mm ve örneklem adedi 5 olarak uygulanmıştır. Elde edilen yüzey profili üzerinden Ra ve Rz değerleri hesaplanmıştır.

2.5. İstatistiksel Analiz

Delik kalitesi üzerinde farklı talaşlı imalat parametrelerinin etkisini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek amacıyla, çok yönlü varyans analizi (n-way ANOVA) uygulanmıştır. Bu güçlü istatistiksel yöntem, bağımsız değişkenler olan katman kalınlığı, ilerleme hızı ve kesme hızı ile bağımlı değişkenler olan delik çapı sapmaları, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkileri sistematik olarak incelemek için kullanılmıştır. Her bir parametre, önceden belirlenen aralıklarda dikkatlice değiştirilmiş; böylece hem bireysel faktörlerin ana etkileri hem de bu faktörler arasındaki anlamlı etkileşimler analiz kapsamına alınmıştır.

3. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Çap sapmasına ilişkin elde edilen ANOVA sonuçları, kesme hızı ve ilerleme hızı değişkenlerinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğunu, buna karşın katman kalınlığının delik çapı üzerinde belirgin bir etkisinin bulunmadığını ortaya koymuştur. Bu bulgular doğrultusunda, ileri analizlerde endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen 0.2 mm katman kalınlığı ile üretilmiş numuneler esas alınmıştır. Dolayısıyla, diğer katman kalınlıklarında üretilen delik örnekleri kapsam dışı bırakılmıştır.

Yalnızca kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin bağımsız değişken olarak kabul edildiği bu revize edilmiş modelin ANOVA sonuçları Tablo 3'te özetlenmiştir. Elde edilen verilere göre, kesme hızının delik çapı sapması üzerinde, ilerleme hızına kıyasla çok daha belirgin bir etki yarattığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu iki parametre arasındaki etkileşim de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş; bu durum, parametrelerin delik çapını birlikte ve karşılıklı olarak güçlü bir biçimde etkilediğini göstermiştir.

Şekil 4a, delme parametreleri ile delik çapı sapması arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kesme hızı 12.63 m/dak olarak uygulandığında, elde edilen delik çaplarının, nominal takım çapından daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun, delme sırasında iş parçasında oluşan elastik gerilmelerin takımın çıkışıyla birlikte serbest kalması ve ardından gerçekleşen elastik geri toparlanma (spring-back) ile açıklanabileceği düşünülmektedir.[10,22,23] Bu mekanizma sonucunda, delik çapında daralma meydana gelmiştir.

Buna karşılık, kesme hızı 25.3 m/dak seviyesine çıkarıldığında, delik çaplarının çoğunlukla nominal takım çapının üzerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, kesici takım ile malzeme arasında artan sürtünme kuvveti nedeniyle oluşan ısının, PLA'nın lokal olarak termal yumuşamasına neden olmasıyla açıklanabileceği düşünülmektedir. Artan sıcaklık, malzemenin viskozitesini azaltarak deformasyona karşı daha duyarlı hale gelmesine yol açmakta ve bu da delik çapında kalıcı bir genişleme eğilimine neden olmaktadır.

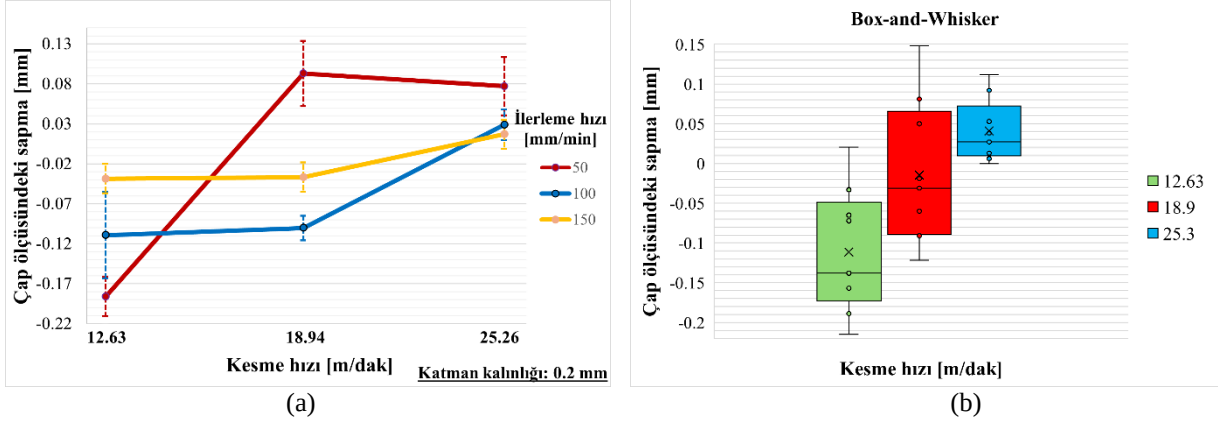
Talaşlı imalat çalışmalarında, box-and-whisker (kutu grafikleri), kesme ve ilerleme hızları gibi bağımsız değişkenlerin; çap sapması, silindiriklik ve delaminasyon gibi işlem çıktıları üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Bu bağlamda, Şekil 4b, delme parametreleri ile çap sapmaları arasındaki ilişkiyi görsel olarak sunmakta ve optimal işlem koşullarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır.

Elde edilen veriler doğrultusunda, en düşük çap sapması, 18.94 m/dak kesme hızı ve 150 mm/dak ilerleme hızı kombinasyonunda gözlemlenmiştir. Öte yandan, en yüksek çap sapması ise 12.63 m/dak kesme hızı ve 50 mm/dak ilerleme hızı kombinasyonunda meydana gelmiştir. Ayrıca, 25.26 m/dak kesme hızıyla gerçekleştirilen delme işlemlerinde, diğer kombinasyonlara kıyasla daha yüksek tekrarlanabilirlik (daha dar yayılım aralığı) elde edildiği görülmüştür. Bu durum, yüksek kesme hızının işleme sürecindeki kararlılığı artırdığını göstermektedir.

Silindiriklik için elde edilen ANOVA sonuçları Tablo 4'te sunulmaktadır. İlerleme hızı, kesme hızına kıyasla daha yüksek bir etkiye sahiptir. Parametreler temelde silindirikliği birbirlerinden bağımsız bir şekilde etkilemektedir.

Tablo 3. Çap ölçüsündeki sapma değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Çap sapması	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	0.2046	0.0256	17.55	< 0.0001
İlerleme hızı (B)	0.0161	0.0080	5.52	0.0142
Kesme hızı (C)	0.1075	0.0537	36.88	< 0.0001
B&C	0.0845	0.0211	14.5	< 0.0001



Şekil 4. Çaptaki sapma değerinin kesme hızına bağlı değişimi. a) çizgi grafiği, b) box-and-whisker grafiği.

Tablo 4. Silindiriklik değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Silindiriklik	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	0.0619	0.0155	10.26	<0.0001
İlerleme hızı (B)	0.0494	0.0247	16.36	<0.0001
Kesme hızı (C)	0.0126	0.0063	4.16	0.0294

Silindiriklik ölçümünde, milimetre cinsinden elde edilen değerlerin artması, delik geometrisinin ideal silindirik formdan sapma miktarını göstermekte olup, silindirikliğin bozulduğunu ifade eder. Başka bir deyişle, ölçülen değer ne kadar büyükse, delik o kadar az silindirik yapıdadır.

Uygulanan parametre aralıkları kapsamında, en iyi (optimum) silindiriklik, 50 mm/dak ilerleme hızı ve 18.94 m/dak kesme hızı kombinasyonunda elde edilmiştir. Buna karşılık, en kötü silindiriklik değeri, 100 mm/dak ilerleme hızı ile 25.3 m/dak kesme hızı kombinasyonunda gözlemlenmiştir (Şekil 5). Bu bulgu, özellikle yüksek kesme hızının ilerleme hızıyla birlikte arttığında, takım sapması ve talaş birikimi gibi faktörlerin silindirikliği olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir.

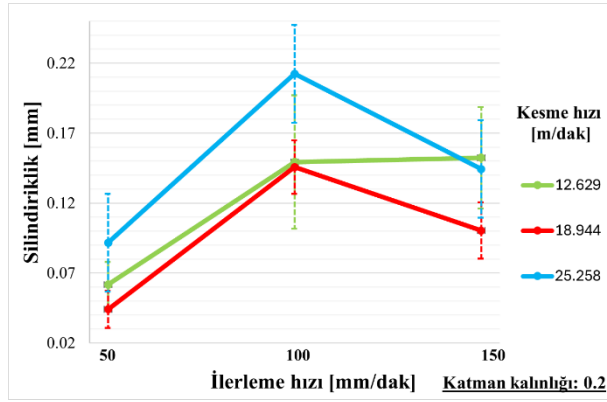
Delaminasyon için elde edilen ANOVA sonuçları Tablo 5'te sunulmaktadır. Her iki parametre de istatistiksel olarak anlamlı ve birbirlerine yakın seviyelerde etkiye sahiptir. Ayrıca parametreler delaminasyonu birbirlerine bağımlı bir şekilde de etkilemektedir.

İlerleme hızı arttıkça, delaminasyon değerlerinde azalma, kesme hızı arttıkça ise artma eğilimi gözlemlenmiştir. Delaminasyonun düşük olduğu parametre kombinasyonlarında, ölçülen standart sapma değerlerinin de oldukça düşük olduğu

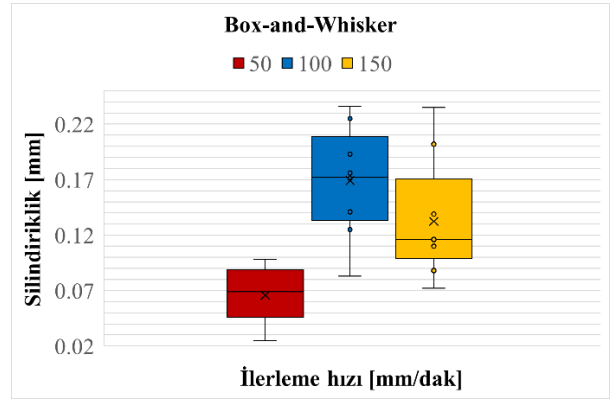
dikkat çekmektedir; bu durum, hem daha kararlı bir işleme sürecine hem de daha homojen bir delaminasyon davranışına işaret etmektedir.

Düşük kesme hızı koşullarında, talaş kaldırma sırasında itme kuvvetlerinin arttığı ve EYM yöntemiyle üretilmiş parçaların katmanlı yapısı nedeniyle, bu kuvvetlerin delik çevresinde katmanlar arası soyulma (delaminasyon) mekanizmasını tetiklediği düşünülmektedir. Buna karşın, kesme hızının artırılmasıyla talaş kaldırma sürecinde oluşan ısının yükseldiği, bunun da PLA'nın lokal olarak yumuşamasına neden olarak, malzemenin kesici takım etkisine karşı daha az direnç göstermesine ve dolayısıyla delaminasyonun azalmasına yol açtığı değerlendirilmiştir.

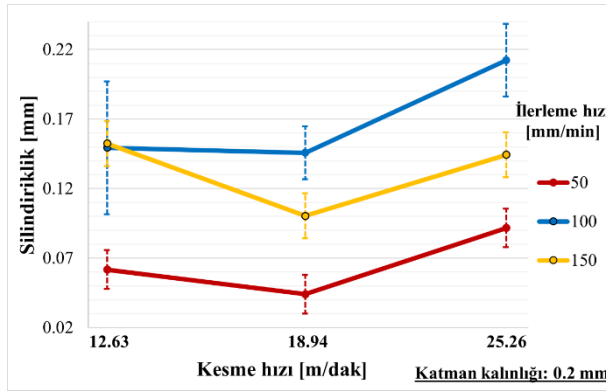
Öte yandan, yüksek ilerleme hızı, talaş kaldırma süresini kısaltmasına rağmen, takımın iş parçasına uyguladığı talaş yükünü ve itme kuvvetlerini artırmakta; bu da delaminasyon oluşumunu tekrar artırmaktadır. Bu bağlamda, yüksek kesme hızı ile sağlanan termal yumuşama ve düşük ilerleme hızı ile minimize edilen mekanik yük birleştiğinde, en düşük delaminasyon seviyesinin bu parametre kombinasyonlarında sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu bulgu, optimal delik kalitesi için ısı ve mekanik etkilerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.



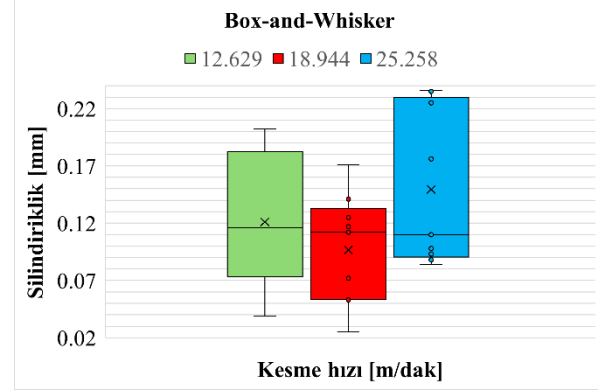
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5. Silindiriklik değerinin delme parametrelerine bağlı değişimi. a) ilerleme hızına bağlı çizgi grafiği, b) ilerleme hızına bağlı box-and-whisker grafiği, c) kesme hızına bağlı çizgi grafiği, d) kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği.

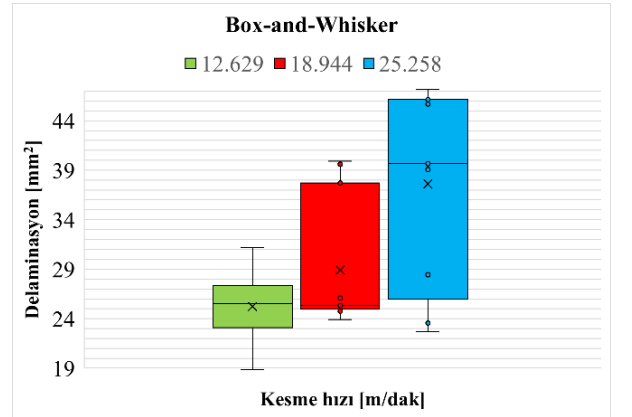
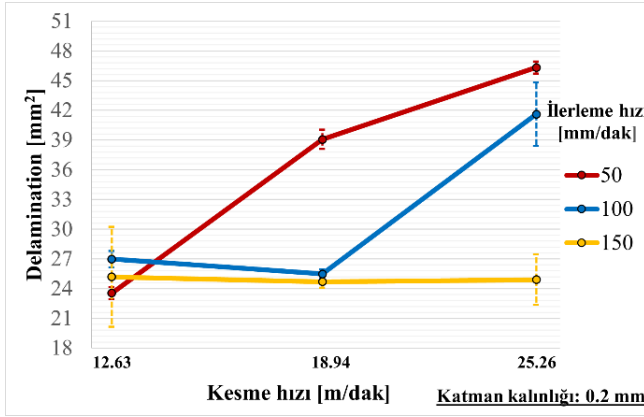
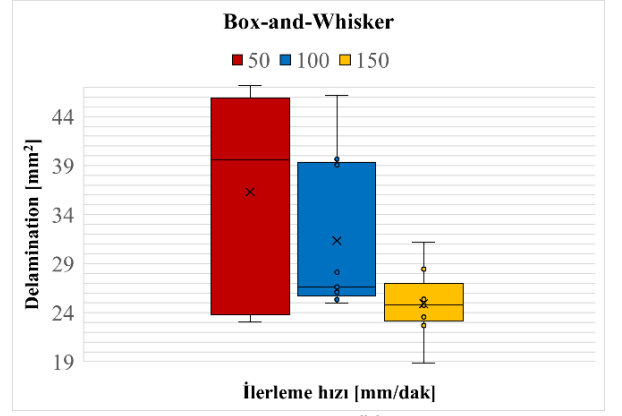
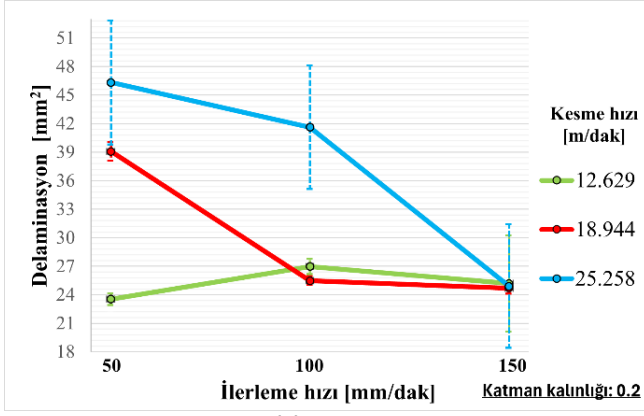
Tablo 5. Delaminasyon değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Delaminasyon	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	1876.38	234.55	31.29	< 0.0001
İlerleme hızı (B)	586.6	293.3	39.13	< 0.0001
Kesme hızı (C)	705.84	352.92	47.08	< 0.0001
B&C	583.94	145.99	19.48	< 0.0001

Deneyde kullanılan bağımsız değişkenlerin tamamının, yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, parametrelerin ikili kombinasyonlar halinde (örneğin A×C ve B×C) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin de istatistiksel olarak anlamlı bulunması, bu değişkenlerin birbirleriyle bağımlı bir şekilde etki gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Analiz sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en yüksek etkiye sahip değişkenin katman kalınlığı olduğu görülmüştür. Bu bulgu, EYM yöntemiyle üretilen parçalarda katman kalınlığına

bağlı olarak yüzeyde oluşan basamak (stair-stepping) dokularının pürüzlülük üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle A×C (katman kalınlığı × kesme hızı) ve B×C (ilerleme hızı × kesme hızı) etkileşimlerinin anlamlılığı dikkate alındığında, yüzey pürüzlülüğünün yalnızca tek bir parametreye değil, katman kalınlığı ile talaşlı işleme parametrelerinin birlikte optimize edilmesine duyarlı olduğu söylenebilir (Tablo 6). Bu durum, yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için çok değişkenli optimizasyon yaklaşımlarının gerekliliğine işaret etmektedir.



Şekil 6. Delaminasyon değerinin delme parametrelerine bağlı değişimi. a) ilerleme hızına bağlı çizgi grafiği, b) ilerleme hızına bağlı box-and-whisker grafiği, c) kesme hızına bağlı çizgi grafiği, d) kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği.

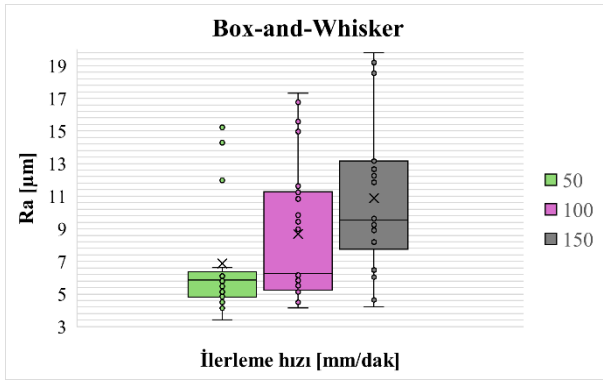
Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü değeri için uygulanan çok yönlü ANOVA sonuçları.

Ra	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	1183.83	65.77	10.90	< 0.0001
Katman kalınlığı (A)	154.77	77.39	12.83	< 0.0001
İlerleme hızı (B)	107.60	53.80	8.92	0.0005
Kesme hızı (C)	94.71	47.36	7.85	0.0011
A&B	158.25	39.56	6.56	0.0002
A&C	285.06	71.27	11.82	< 0.0001
B&C	265.89	66.47	11.02	< 0.0001

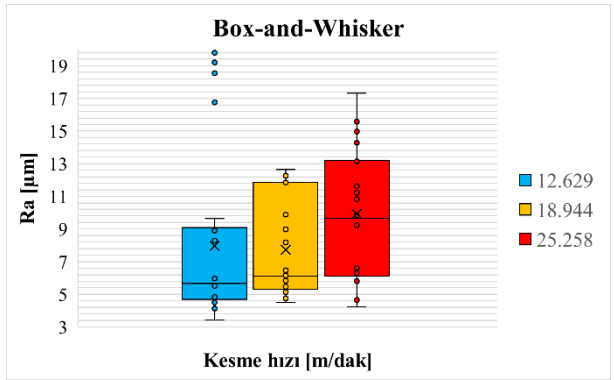
Rz	Karelerin toplamı	Ortalamaların karekökü	F değeri	p değeri
Model	23512.10	1306.23	6.85	< 0.0001
Katman kalınlığı (A)	3141.74	1570.87	8.24	0.0008
İlerleme hızı (B)	1340.12	670.06	3.51	0.0372
Kesme hızı (C)	3032.95	1516.47	7.95	0.0010
A&B	3276.99	819.25	4.30	0.0045
A&C	5348.87	1337.22	7.01	0.0001
B&C	4828.01	1207.00	6.33	0.0003

İlgili veriler incelendiğinde hem kesme hızı hem de ilerleme hızının artışıyla deliklerin yanal yüzeylerinin pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Fakat standart sapmanın yüksek olması sebebiyle

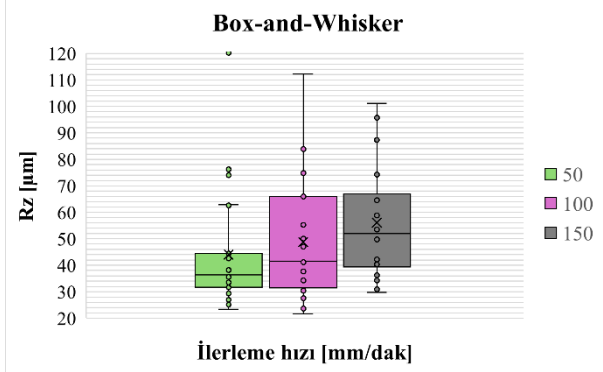
düşük kesme hızı ve düşük ilerleme hızı değerlerinin istikrarlı bir ideal parametre kombinasyonu sağladığı söylenememektedir (Şekil 7).



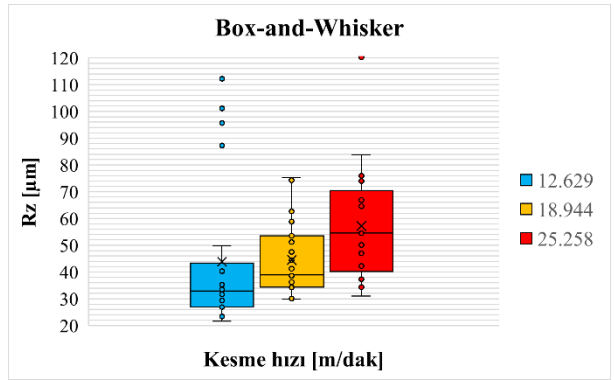
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7. Yüzey pürüzlülük değerlerinin delme parametrelerine bağlı box-and-whisker grafikleri. a) Ra değerinin ilerleme hızına bağlı grafiği, b) Ra değerinin kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği, c) Rz değerinin ilerleme hızına bağlı grafiği, d) Rz değerinin kesme hızına bağlı box-and-whisker grafiği,

4. SONUÇ

Bu çalışma, EYM yöntemi kullanılarak üretilen PLA plakalarda, baskı katman kalınlığı ve delme parametrelerinin delik çapı sapması, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü oluşumu üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar Çok Yönlü Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak analiz edilmiş ve parametrelerin etkileri istatistiksel olarak tartışılmıştır. Sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Katman kalınlığı parametresinin çap sapmasına etkisi istatistiksel olarak etkisizdir. Çap sapması üzerinde büyük oranda kesme hızı parametresi etkindir.
- Silindiriklik değeri üzerinde en etkili parametre açıkça ilerleme hızıdır.
- Delaminasyon seviyeleri incelendiğinde hem kesme hem de ilerleme hızı parametrelili birbirlerine bağımlı olarak ikili etkiye sahiptir. Parametrelerin etki dereceleri birbirlerine benzerdir.

- Katman kalınlığı-işleme parametresi etkileşiminin (A&C, A&B) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki payı oldukça yüksektir. Bu sebeple yüzey pürüzlülüğü bir kalite etkeni olarak esas alınığında katman kalınlığı ile delme parametreleri birlikte birbirine bağımlı bağımsız değişkenler olarak değerlendirilmelidir.
- Çalışmada uygulanan seviyeler nezdinde, yüksek kesme hızının EYM ile üretilmiş polimer parçaların delinmesinde hem boyutsal doğruluğu hem de pürüzlülüğü iyileştirmektedir.
- Boyutsal doğruluk, silindiriklik, delaminasyon ve yüzey pürüzlülüğü etkenleri birlikte ele alındığında düşük katman kalınlığı (0.1 mm), yüksek kesme hızı (18 veya 25 m/dak) ve düşük ilerleme hızı değerleri (50 veya 100 mm/dak) kombinasyonu önerilebilmektedir.
- EYM ile üretilen parçaların delinmesinde önerilen “ince katman + hızlı kesme + orta ilerleme hızı” stratejisiyle delik kalitesi iyileştirilebilir ve ardıl işlem ihtiyacı azaltılabilir.

Ayrıca çalışma nihayetinde EYM ile üretilen parçaların delinmesine yönelik takım yükleri gibi mekanik, polimerin yumuşamasını sebebiyet verdiği düşünüldüğün için ısı ve uygulanan katman

kalınlığının merdiven etkisi sebebiyle yüzey pürüzlülüğünü etkilediği düşünüldüğü için geometrik bileşenleri bir bütün olarak değerlendiren kapsamlı bir model üzerinde çalışılabileceği önerilmektedir.

INFLUENCE OF LAYER THICKNESS AND CUTTING-PARAMETER SETTINGS ON HOLE QUALITY WHEN DRILLING FDM-PRINTED PLA PARTS

Due to its biodegradable nature and ease of processing, PLA is widely used Material Extrusion Based Additive Manufacturing (MEX). However, final parts often require post-processing, particularly drilling, to improve surface finish and dimensional accuracy. This study investigates the influence of layer thickness, cutting speed, and feed rate on hole diameter deviation, cylindricity, delamination, and surface roughness in drilled PLA plates. Results show that cutting speed primarily affects hole accuracy, while feed rate has a significant impact on cylindricity. Delamination is strongly influenced by both parameters. Optimal performance is achieved using a low layer thickness, high cutting speed, and moderate feed rate combination.

Keywords: Additive Manufacturing, Fused Deposition Modelling, Polylactic acid (PLA), Drilling, Process Optimisation.

KAYNAKLAR

1. Shogren, R. L., Doane, W. M., Garlotta, D., Lawton, J. W., & Willett, J. L. (2003). "Biodegradation of starch/polylactic acid/poly(hydroxyester-ether) composite bars in soil." *Polymer Degradation and Stability*, 79(3), 405-411
2. Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. (2012). "Tribological behavior of natural fiber reinforced PLA composites." *Wear*, 296(1-2), 395-398
3. Garlotta, D. (2001). "A Literature Review of Poly(Lactic Acid)." *Journal of Polymers and the Environment*, 9(2), 63-84. DOI: 10.1023/A:1020200822435.
4. A. Doğru, A. Sözen, M. Ö. Seydibeyoğlu, and G. Neşer, "Hemp Reinforced Polylactic Acid (PLA) Composite Produced By Fused Filament Fabrication (FFF)", *HJBC*, vol. 50, no. 3, pp. 239–246, 2022, doi: 10.15671/hjbc.1032298.
5. A. Sözen, A. Doğru, M. Demir, H. N. Özdemir, and Y. Seki, "PRODUCTION OF WASTE JUTE DOPED PLA (POLYLACTIC ACID) FILAMENT FOR FFF: EFFECT OF PULVERIZATION", *IJ3DPTDI*, vol. 7, no. 1, pp. 124–128, 2023, doi: 10.46519/ij3dptdi.1213659.

6. A. Doğru, S. Yılancıoğlu, G. Ülkü, B. Şentürk Turan, and M. Ö. Seydibeyoğlu, "Comparison of wood fiber reinforced PLA matrix bio-composites produced by Injection Molding and Fused Filament Fabrication (FFF) methods", *HJBC*, vol. 50, no. 3, pp. 215–226, 2022, doi: 10.15671/hjbc.1053764.
7. Mohammad Baraheni, Mohammad Reza Shabgard, Saeid Amini, Evaluating the hole quality produced by vibratory drilling: additive manufactured PLA+, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2021) 117:785–794
8. N.S. Mohan et al. Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials, *Journal of Materials Processing Technology* 186 (2007) 265–271
9. Hossein Heidarya, Navid Zarif Karimib , Giangiacomo Minak, Investigation on delamination and flexural properties in drilling of carbon nanotube/polymer composites, *Composite Structures* 201 (2018) 112–120
10. Madhan Kumar and K. Jayakumar, Mechanical and drilling characterization of biodegradable PLA particulate green composites, *JOURNAL OF THE CHINESE INSTITUTE OF ENGINEERS*, 2022, VOL. 45, NO. 5, 437–452, <https://doi.org/10.1080/02533839.2022.2061602>
11. Antonio Dı'az-A ´lvarez, A ´ngel Rubio-Lo´pez, Carlos Santiuste and Mari´a Henar Migue´lez, Experimental analysis of drilling induced damage in biocomposites, *TextileResearchJournal*88(22)
12. Leonardo Riva, Roberto Pagani, Antonio Fiorentino, Alberto Borboni, Additive manufacturing of PLA to mimic the thrust force of mandibular bone during drilling, *Procedia CIRP* 110 (2022) 198–201
13. Masannan, V.; Anbalagan, C.; Lakshmaiya, N.; Kumar, P. Experimental Investigation on the Drilling Characteristics of Kenaf/PLA-Based Laminates. *Eng. Proc.* 2024, 61, 9. <https://doi.org/10.3390/engproc2024061009>
14. F. Carrasco, P. Pagès, J. Gámez-Pérez, O.O. Santana, M.L. Maspoch, Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability* 95 (2010) 116e125.
15. Racha Al-Itry, Khalid Lamnawar, Abderrahim Maazouz, Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. *Polymer*

Degradation and Stability Volume 97, Issue 10, October 2012, Pages 1898-1914

16. Bajpai, P. K., Singh, I., & Madaan, J. "Tribological behavior of natural fiber reinforced PLA composites." *Wear* Volume 297, Issues 1–2, 15 January 2013, Pages 829-840]
17. El Mehtedi, M., Cristofolini, L., La Vecchia, G. M., & Minetola, P. (2024). Evaluation of surface quality and burr formation in hybrid manufacturing of polymeric components. *Journal of Composites Science*, 8(4), 131. <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/4/131>
18. Hsueh, M.-H.; Lai, C.-J.; Chung, C.-F.; Wang, S.-H.; Huang, W.-C.; Pan, C.-Y.; Zeng, Y.-S.; Hsieh, C.-H. Effect of Printing Parameters on the Tensile Properties of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Based on Fused Deposition Modeling. *Polymers* 2021, 13, 2387. <https://doi.org/10.3390/polym13142387>].
19. Muammel M. Hanon, László Zsidai, Quanjin Ma, Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors, *Materials Today: Proceedings*, Volume 42, Part 5, 2021, Pages 3089-3096
20. Krishnamoorthy A, Boopathy S, Rajendra, Palanikumar K (2009) Delamination analysis in drilling of CFRP composites using response surface methodology. *J Compos Mater* 43(24):2885–2902
21. Davim PJ, Rubio CJ, Abrao AM (2007) A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *Compos Sci Technol* 67(9):1939–1945
22. Shokrieh M, Kamali M (2005) Theoretical and experimental studies on residual stresses in laminated polymer composites. *J Compos Mater* 39(24):2213–2225
23. Shtuchnyi BP (1974) *Plastics machining. Reference manual*. Mashynostroyeniye, Moscow, p 144

A. Emre Çetin 

Olgun Otomasyon Lideri, Olgun Çelik,
Manisa, Türkiye

Bilal Yılmaz 

Devreye Alma ve Elektrik Proje Lideri,
Olgun Çelik, Manisa, Türkiye

Bayram Uysal 

Otomasyon Teknikeri, Olgun Çelik,
Manisa, Türkiye

Emir Kavas 

Celal Bayar Üniversitesi,
Mekatronik Mühendisliği, Manisa, Türkiye

Suden Battal* 

Endüstriyel Yazılım Mühendisi, Olgun Çelik,
Manisa, Türkiye

Robotik Yüzey Zımparalamada Proses Koşullarının Bant Zımpara Ömrü ve İş Parçası Yüzeyine Etkileri

Robotik metal yüzey temizleme için geliştirilen sistemde, zımpara kağıdı içeren bant mekanizması robot ile taşınırken, parça sabit ve gerektiğinde döner bir sistemle konumlandırılmıştır. İşlem kalitesini etkileyen baskı kuvveti, bant hızı ve robot ilerleme hızı gibi parametreler optimize edilmiştir. Yapılan testlerle bant zımpara ömrü belirlenmiş, kuvvet/tork sensörü verileri analiz edilmiştir. Ayrıca, makine öğrenmesi kullanılarak sensör verileri ile bant ömrü arasındaki bağıntılar incelenmiş ve sürecin daha verimli hale getirilmesi sağlanmıştır. Tork sensörü, baskı kuvvetinin hassas şekilde kontrol edilmesini sağlamış, böylece yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik elde edilmiştir. Geliştirilen yöntem, farklı geometri ve malzemelere uygulanabilir.

Anahtar kelimeler: Robotik metal yüzey temizleme, Zımpara kağıdı, Makine öğrenmesi.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 5 Mart 2025

Kabul: 4 Eylül 2025

*Sorumlu Yazar: Suden Battal

Email: suden.battal@olguncelik.com.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1650105>

1. GİRİŞ

Bant zımpara ile yüzey temizleme işlemi, malzemenin yüzey kalitesi ve sertliğini iyileştirmek, aşınma direncini artırmak, çatlak oluşturabilecek derinlikleri azaltmak ve kaplama, boyama veya yapıştırma gibi sonraki işlemlerde daha iyi performans elde edilmesini sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir. Kullanılan zımpara kağıtları, iş parçası yüzeyindeki talaşı kaldırdığı gibi, çapak, pas, boya ve diğer istenmeyen maddeleri de etkin bir şekilde uzaklaştırarak temiz ve düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlar. Bu sayede estetik görünüm de iyileştirilir.

Kullanılan zımpara kağıdı, birim alandaki tanecik miktarına göre sınıflandırılır. Birim alandaki tanecik miktarı arttıkça, zımpara daha ince, yani kum değeri yüksek olurken, miktar azaldıkça tanecikler

büyür ve zımpara kalın, yani kum değeri düşük olur. Büyük tanecikli zımparalar, yüksek aşındırma gerektiren işlemlerde kullanılır. Baş ve diğerleri [1], EN 90MnCrV8 (1.2842) çeliğinin farklı yüzey işleme yöntemlerine göre değişen yorulma ömrünü incelemiştir. Talaşlı imalat, EDM, kimyasal aşındırma ve kumlama yöntemleri arasında karşılaştırmalar yapılarak, EDM ve kimyasal işlemin yorulma ömrünü azalttığı, kumlamanın ise ömrü uzattığı belirlenmiştir. Bu bulgular, yüzey işlemlerinin malzeme performansındaki kritik rolünü vurgulamakta ve mevcut literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Sarılıgil [2] tarafından yapılan çalışmalar, zımparalama işlemlerinde kum büyüklüğü ve süre seçiminin zımparalama miktarını üç kat artırabileceğini göstermektedir, bu da yüzey temizleme işleminin etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Çırak [3], dönel parçaların yüzey işleme üzerine yaptığı çalışmada, özel bir aparat kullanarak talaşlı imalat gerçekleştirmiş ve işlenen yüzeylerin sertlik değerlerini Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak analiz etmiştir. Deneysel sonuçlar, bu yöntemlerin malzeme yüzeyindeki çatlak oluşum riskini azalttığını ve genel malzeme performansını artırdığını göstermektedir. Bu çalışma, talaşlı imalat ve YSA'nın kombinasyonu ile yüzey işlemleri üzerine literatürde yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Ermergen ve Taylan [4] tarafından eklemeli imalat yöntemleri ile yüzey kalitesinin artırılmasına yönelik yapılan çalışmalar, bu sistemde kullanılan yüzey temizleme metodlarının önemini ve avantajlarını ortaya koymaktadır.

Torres ve diğerleri [5] tarafından havacılık ve uzay endüstrisinde yapılan çalışmalarda, robotik bant taşlama işleminin malzeme kaldırma sürecini otomatize eden bir modelleme yaklaşımı sunulmuş, bu da robotik yüzey temizleme sistemlerinin etkinliğini artırmada önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, geliştirilen robotik bant zımpara ile yüzey temizleme sistemi tanıtılmaktadır (Bölüm 2). Endüstrideki genel çalışmaların aksine, geliştirilen sistemde parça yerine bant zımpara mekanizması robot ile taşınmakta, parça ise robot önünde sabit olarak konumlandırılmaktadır.

Sistemde Fanuc R2000iC-270F robotu kullanılmış ve robotik yüzey işleme prosesi kuvvet kontrolü ile yapılmıştır. Sistemde Fanuc FS250-iA tork/kuvvet (T/K) sensörü kullanılarak, robotun 6. eksen flanşı ile sensör arasında kuvvet ölçümü sağlanmış, bu sayede yörünge boyunca malzemeye uygulanan kuvvetin hassas bir şekilde kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Li ve diğerleri [6] tarafından geliştirilen ve robotik taşlama sürecinde malzeme çıkarma oranını tahmin eden model, zımpara kağıdının etkin kullanımını artırmak amacıyla temas kuvveti ve iş parçası eğriliği gibi faktörleri dikkate alarak önemli bir yaklaşım sunmaktadır. Lu ve diğerleri [7] tarafından geliştirilen çevrimiçi izleme yöntemleri, robotik taşlama işlemlerinin kalitesinin etkin bir şekilde izlenmesini sağlayan yöntemler sunmaktadır. Ayrıca, Chen ve diğerleri [8] tarafından yapılan çalışmalar, uçak motoru kanatlarının taşlanmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve malzeme kaldırma derinliği üzerindeki etkilerin incelendiği, robotik aşındırıcı bant kullanılarak taşlama kalitesinin artırılabilirliğini göstermektedir.

Geliştirilen sistemde ilk olarak ideal çalışma parametreleri belirlenmiştir (Bölüm 3.1). Yüzey temizleme işleminin kalitesini etkileyen en önemli

parametreler, baskı ve kesme kuvveti, bant zımparanın aşındırma yüzeyindeki doğrusal hızı, robotun ilerleme hızı ve zımpara kağıdının özellikleridir. Bu değerleri belirlemek üzere planlanan testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar nitel ve nicel olarak incelenerek en ideal parametreler saptanmıştır. Ardından, bu parametreler kullanılarak proses isterlerinde belirtilen minimum talaş kaldırma miktarı elde edilemeyene kadar yüzey işleme tekrarlanarak kuvvet sensörü verileri toplanmış ve her test öncesi ve sonrası talaş kaldırma miktarı mikrometre ile ölçülmüştür. Bu sayede bant zımparanın ömrü tespit edilmiştir (Bölüm 3.2). Toplanan veriler incelenerek bant zımpara ömrü ile azalan talaş kaldırma miktarının toplanan veriler arasındaki korelasyonu nasıl etkilediği analiz edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, bant zımparanın ömrünü makine öğrenmesi algoritması ile tespit etmek üzere kullanılacaktır.

2. ROBOTİK YÜZEY ZIMPARALAMA

Robotik yüzey temizleme sistemi için Fanuc R2000iC-270F robotu ve FS250-iA Fanuc T/K sensörü kullanılmıştır (Şekil 1). Fanuc R2000iC-270F 6 eksenli 270kg taşıma kapasiteli ve 2655 mm erişime sahip endüstriyel bir robottur.

Fanuc FS-250iA, endüstriyel robot sistemlerinde kullanılan 6 eksenli bir tork/kuvvet sensördür. Robotun uç efektörüne monte edilerek uygulanan kuvvet ve momentleri gerçek zamanlı olarak ölçer. Nominal ölçüm kapasitesi 2500 N, çözünürlüğü 4.9 N'dir ve hassasiyeti nominal yükün %2'si (50 N) seviyesindedir. Çalışma prensibi temel olarak piezoelektrik veya strain gauge (gerinim ölçer) teknolojisine dayanır. Sensör, uygulanan mekanik yüklemeleri elektriksel sinyallere dönüştürür. Bu sinyaller, robot kontrol ünitesi tarafından yorumlanarak robot hareketleri dinamik olarak ayarlanır. Böylece montaj, taşlama, parlatma gibi hassas temas gerektiren işlemlerde yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sağlanır. Ayrıca, çevreyle temas durumları algılanarak çarpışma önleme ve adaptif kontrol gibi gelişmiş işlevler de mümkün hale gelir. Bu sayede FS-250iA, robotların insan benzeri hassasiyetle çalışmasını mümkün kılan temel bileşenlerden biri olarak öne çıkar.

Kullanılan bant zımpara 100 mm genişliğinde, 4285 mm uzunluğunda ve çift yönlü çalışabilir özelliklidir. Destek malzemesi polyester pamuk ve aşındırıcı malzemesi hassas şekilli seramik (ince kum 60+) şerit şeklindedir.

Kullanılan bant zımparada polyester pamuk mesnet üzerinde hassas şekillendirilmiş mineral yer alır. Hassas şekillendirilmiş mineral geleneksel aşındırıcıların aksine metali oymak veya sürmek

yerine metali keserek geçen üçgen nokta şeklini alır. Bu noktalar kırıldıkça kendini sürekli olarak keskinleştirir. Son derece hızlı bir kesimle daha az ısı birikimi sunar. Bu sayede ısıya bağlı stres çatlakları ile renkte bozulmayı azaltır. Aşındırıcı, ömrü boyunca homojen bir yüzey oluşturur ve zımparalama uygulamalarında yanmayı ortadan kaldırmaya yardımcı olur.

Seçilen iş parçası uzunluğu 1650mm, genişliği ise 70mm'dir. İş parçası, 950 °C'de 55 dakika boyunca, 63 °C yağda 20 dakika boyunca ani soğutulmuş ve aynı zamanda 460 °C'de 128 dakika boyunca menevişleme yapılarak ısıl işlem görmüştür. Robot eli ve serbest cisim diagramı Şekil 1'de görülmektedir. Kuvvet sensörünün daha düzgün ve gürültüsüz sinyal ölçebilmesi için robot eline ayarlanabilir karşı ağırlık ile düşey baskı yönünde serbestlik eklenmiştir. Bu mekanizma, T/K sensörünün çok daha etkin ve düşük titreşimli kuvvetlere maruz kalmasını sağlamıştır. Robotun elinde tamburu 4500 dev/dk'ya kadar döndürebilecek servo motor mevcuttur. Bu sayede bant zımparanın malzeme yüzeyindeki doğrusal hızı ayarlanabilmektedir. Diagramda görüldüğü gibi, kesme yönü F_x , baskı kuvveti yönü F_y ve yanal kuvvet yönü F_z koordinatı ile temsil edilmektedir. Robot konfigürasyonunda doğru bir kuvvet kontrolü için T/K sensör ve takım koordinatlarını aynı yönde olması gerekmektedir. İş parçasından yüzey kaldıracak olan zımpara bandının dönüş yönünün ilerleme yönüne ters olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Çünkü iş parçasından çıkacak olan çapaklar robot yörüngesi üzerinde kalırsa zımpara ömrüne negatif etkisinin yanında iş parçasının yüzeyinin düzgün temizlenmemesine neden olacaktır. Robot T/K sensörü ile birlikte yapılandırıldığında kontrol modlarından biri de kuvvet kontrolüdür. Kuvvet kontrol modu ile hassas montaj, vidalama, yüzey temizleme, vb. prosesler gerçekleştirilebilir. Bu mod ile robot istenen kuvvet değerlerini yörünge boyunca yörüngeye dik belirlenebilen bir yönde hassas bir şekilde sabit tutarak çalışabilir. Sensörün örneklemme süresi minimum 4 ms (250 Hz) desteklenmektedir. Ayrıca, kapalı çevrim kuvvet kontrol kazanç değeri de titreşime sebep olmayacak

şekilde dikkatlice ayarlanması gereken parametrelerden biridir.

Şekil 1'de görüldüğü üzere iş parçasını robot önünde konumlamak için yere paralel eksenle dönebilen bir mekanizma tasarlanarak üretilmiştir. Bu sayede ürünün her iki tarafının da temizlenmesi mümkün olmuştur.

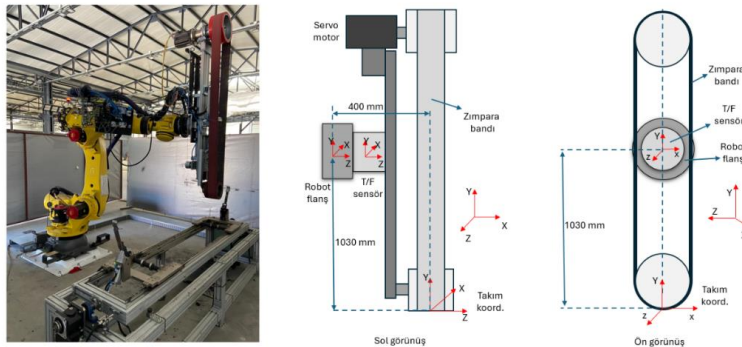
Robot, parça yörüngesini hazırlanan programlar ve T/K sensörü yardımı ile otomatik bir şekilde öğrenir. Öğrenilen yörünge, kaydedilen programları T/K sensörü yardımı ile kullanarak yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilir. Bu teknolojik entegrasyon, endüstriyel yüzey işleme süreçlerinde verimliliği ve kaliteyi artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Uygulanan kuvvet, T/K sensörü aracılığıyla sürekli olarak izlenmiş ve gerektiğinde robot hızı, zımpara kağıdının dönme hızı veya T/K sensörü ayarlamaları daha önceden oluşturulan reçete değerleri ile yapılmıştır. Her bir yüzey temizleme işlemi, belirli bir süre boyunca sabit hızda uygulanmıştır.

Şekil 2'de örnek bir yörünge gösterilmektedir. Sistemin tasarlanma aşamasında Roboguide simülasyon programında gereksinimler belirlenmiş, erişim kontrolleri ve kapasite analizleri yapılmıştır. Ayrıca, bu simülasyonlar yardımı ile parça tutucunun nihai konumu belirlenmiştir.

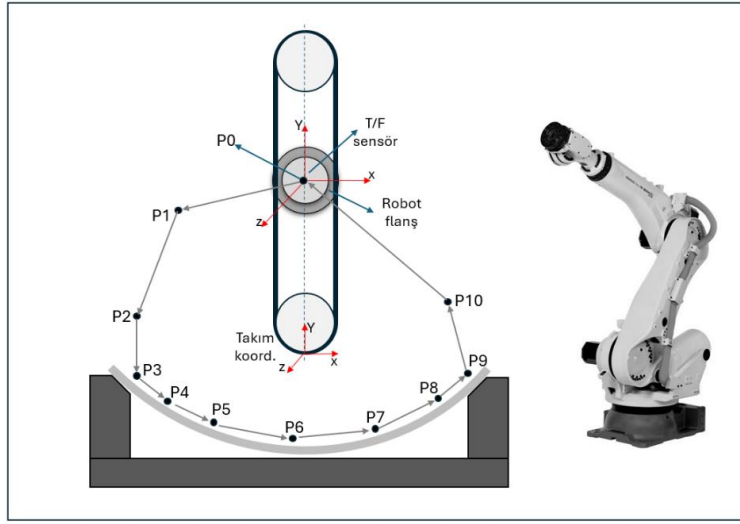
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. İdeal proses parametrelerini tespiti

Proses parametrelerini en doğru şekilde tespit edebilmek üzere, birçok test yapılmış, ve bunların bazıları Tablo 1'de listelenmiştir. Bu testlerle, kuvvet, robot hızı ve bant zımpara doğrusal hızı için en uygun değerler analiz edilmiştir. T/K sensöründen en hassas sonuçları alabilmek için gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır. Her bir yüzey temizleme işlemi sırasında ve sonrasında, yüzey kalitesi görsel olarak incelenmiş, T/K sensöründen alınan tüm veriler, zımpara kağıdı doğrusal kesme hızı, robot konumu ve robot doğrusal hızı kaydedilmiştir.



Şekil 1: Robotik Yüzey Zımparalama Sistemi ve Robot Eli Serbest Cisim Diagramı



Şekil 2: Örnek robot yörüngesi

Tablo 1: Proses parametreleri

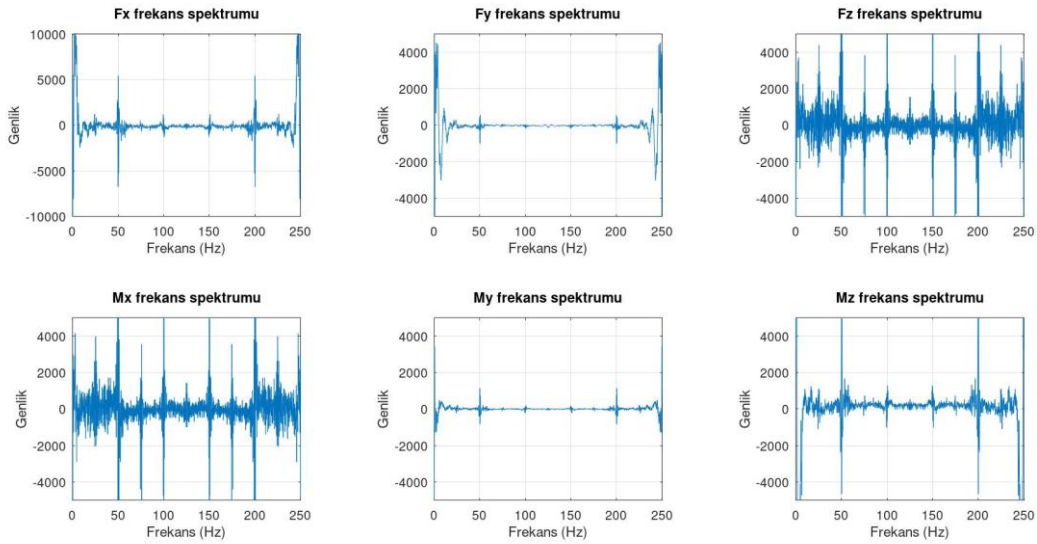
Test	Tahrik Motor devri (dev/dk)	Bant zımpara doğrusal hızı (m/s)	Robot ilerleme hızı (mm/s)	Baskı kuvveti (N)
1	500	7.85	125	150
2	500	7.85	250	150
3	500	7.85	125	100
4	500	7.85	250	100
5	500	7.85	125	50
6	500	7.85	250	50
7	1000	15.7	125	150
8	1000	15.7	250	150
9	1000	15.7	125	100
10	1000	15.7	250	100
11	1000	15.7	125	50
12	1000	15.7	250	50
13	1500	23.55	250	150
14	1500	23.55	300	150
15	1500	23.55	250	100
16	1500	23.55	300	100
17	1500	23.55	250	50
18	1500	23.55	300	50
19	2000	31.4	250	150
20	2000	31.4	300	150
21	2000	31.4	250	100
22	2000	31.4	300	100
23	2000	31.4	250	50
24	2000	31.4	300	50
25	3000	47.1	250	150
26	3000	47.1	300	150
27	3000	47.1	250	100
28	3000	47.1	300	100
29	3000	47.1	250	50
*30	3000	47.1	300	50

Deneme yanılma yöntemi ile yapılan bu çalışmada tahrik motor devri 500 dev/dk'dan başlayarak aşamalı bir şekilde artırılarak bant zımpara hızı, yüzeye uygulanan baskı kuvveti ve robot hızı, elde edilen veriler doğrultusunda optimize edilerek en uygun parametreler Tablo 1 Satır 30 daki gibi tespit edilmiştir.

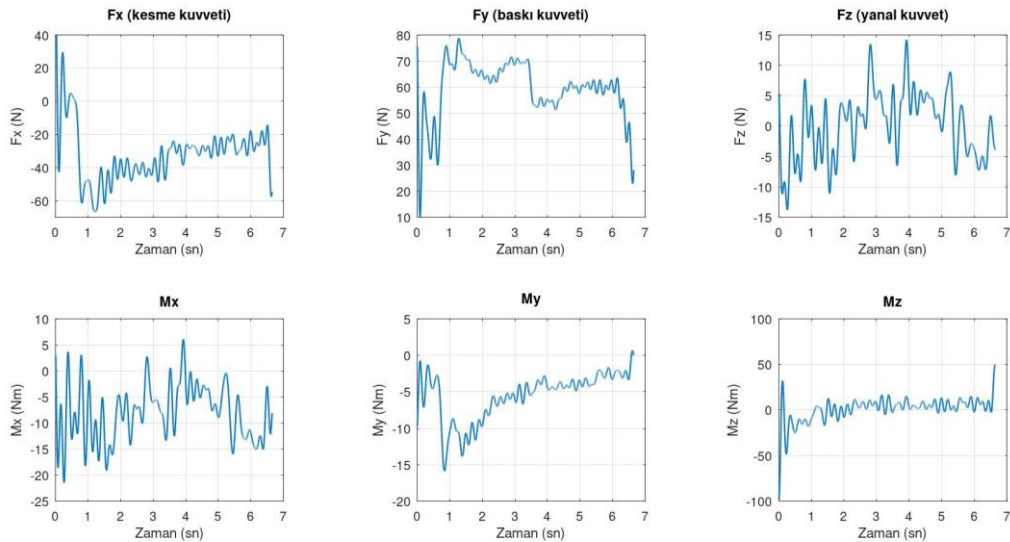
T/K sensörü ile 4 ms (250 Hz) örnekleme ile alınan kuvvet ve moment değerlerinin Fourier dönüşümü ile genlik spektrumları Şekil 3'te görülmektedir. İdeal bant zımpara doğrusal hızını elde etmek için gerekli servo motor hızı 3000 dev/dk, tambur çapı ise 300 mm'dir. Bu devirde, tamburun dönme eksenindeki kütsel dengesizliğinin oluşturduğu periyodik kuvvetin frekansı 50 Hz'dir.

Bu sebeple, 50 Hz frekansta kütsel dengesizlikten kaynaklı gürültü beklenen bir sonuçtur.

Bu nedenle, ölçülen değerler 40 Hz alçak geçiren filtre ile filtrelenerek gösterilmiştir (Şekil 4). Yüzey işleme prosesi başlangıcında sensör aktif edilmekte ve robot, baskı yönünde T/K sensörü ile iş parçasını arayarak bulmaktadır (Şekil 2 P3 noktası). Ardından yüzey işleme prosesi başlamaktadır. Robot proses sonunda yüzeyden ayrılırken (Şekil 2 P9) kuvvet kontrolü sonlandırıldığı için ölçülen kuvvet/tork değerlerinde salınımlar gözlemlenmektedir. Bu durum, grafiklerin okunmasını zorlaştırdığı için son 250 ms'lik kısım dikkate alınmamıştır. Şekil 4'te yüzey temizleme işlemi esnasında ölçülen ve eksenlerinde oluşan kuvvet ve momentler görülmektedir.



Şekil 3: Kuvvet ve momentlerin FFT genlik spektrumları



Şekil 4: Kuvvet ve moment grafikleri

Ölçülen değerlerin korelasyon matrisi Tablo 2'de verilmiştir. F_z ile M_x 'in korelasyon değeri 0.993 olduğu için birbirlerine çok bağımlı sinyallerdir. Baskı kuvveti kontrol edilen değişkendir; bu yüzden diğer sinyallerle korelasyonuna bakmak anlamlı değildir. Son olarak, kesme kuvveti ile ters yönde -0.866 değeri ile koreledir.

Arka arkaya yapılan 2 testte kesme F_x ve F_y kuvvetleri Şekil 5' te gösterilmiştir. F_x - Zaman grafiğinde üst üste baskı kuvveti, F_y - Zaman grafiğinde de üst üste çizdirilerek sistemin tekrar edilebilir olduğu gözlemlenmiştir. Burada oluşan F_x kesme kuvveti parça geometrisine bağlı olarak negatif veya pozitif olabilir.

3.2. Bant zımpara ömrünün tespiti

Bant zımpara ömrünü ve kalitesini tespit etmek üzere bir tip malzeme seçilmiştir. Seçilen malzeme sertliği 467 HB ile 520 HB arasında değişmektedir.

Yüzey zımparalama işlemlerinde yüzeyden kaldırılan maksimum talaş miktarı proses ve elde edilen yüzey kalitesi için çok önemlidir. T/K sensörü ile baskı kuvveti kontrol altına alınarak aynı zamanda yüzeyden kaldırılan talaş miktarı da kontrol altına alınmış olmaktadır. Yüzeyden kaldırılacak talaş miktarı proses isteri gereği, maksimum 250 μm olarak belirlenmiştir. Yapılan her yüzey temizleme işleminden sonra iş parçasının kalınlığındaki değişim parça uzunluğu boyunca 15 noktadan mikrometre ile ölçülerek zımpara ömrü gözlemlenmiştir. El ile yapılan ölçümler değişkenlik gösterebileceği için her noktadan 5 kere ölçüm alınarak ortalaması kaydedilmiştir. Şekil 6'da mavi renkli veri el ile yapılan ölçümleri göstermektedir. Görüldüğü üzere sonuçlar çok hassas değildir ve değişkenlik göstermektedir. Ancak ömrün azaldığını net bir şekilde tanımlamaktadır. Ayrıca grafikte kırmızı renk ile ölçüm sonuçlarının filtrelemiş hali gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, parça kalınlığındaki azalma sıfır zımpara bandı kullanılarak ilk testlerde 60 μm değerlerinde iken, zımpara kağıdı kullanıldıkça bu değer son testlerde 20 μm 'lere kadar düşmüştür. 530 test sonucunda zımpara kağıdının kaldırdığı yüzey miktarı proses isterleri olan 20

μm 'nin altında kaldığı için zımpara kağıdının ömrünü tamamladığı kabul edilmiştir.

Deneyler sırasında toplanan veriler, yüzey temizleme işleminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir. Temizlenen yüzeylerin pürüzlülük ölçümleri, kaldırılan yüzey miktarı, görsel incelemeler ve T/K sensörü verileri incelenmiştir. Bant zımpara ömrü ile azalan talaş kaldırma miktarının kuvvet ve moment değerlerine etkisi analiz edilmiştir. Yapılan 530 test içinden, 1., 265. ve 530. testlerin kesme kuvveti (F_x) ve baskı kuvveti (F_y) sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir. Bant ömrü azaldıkça kuvvetlerdeki değişim net bir şekilde görülmektedir. Bu sonuçlar bant zımpara ömrünün makine öğrenmesi algoritması ile tespit edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, robot ve T/K sensörünün yüzey temizleme işlemlerinde yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağladığı görülmüştür. Elde edilen bulgular, yüzey temizleme işlemlerinin optimizasyonu için değerli bilgiler sunarken, zımpara bantlarının ömürlerinin anlaşılmasında faydalı olmuştur.

Yüzey işleme sonrası oluşan ürünlerin görsel görüntüleri Şekilde görüldüğü gibidir. Robot, temizlenecek ürünün uç kısımlarını robot elindeki tambur çapından dolayı temizleyememiştir.

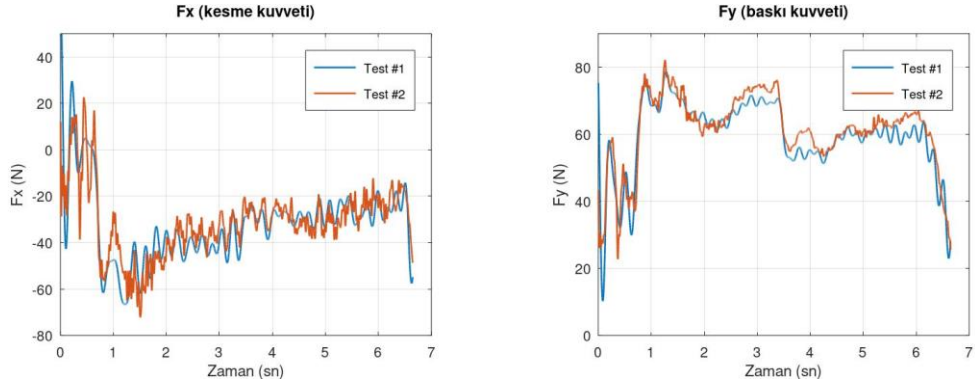
Tüm ürünlerde merkez bölgesi tüm ürünlerde temizlenmiştir. Enine yüzey pürüzlülüğü genel olarak $R_z(\text{max}) < 20\mu\text{m}$, değerinin iyi seviyede olduğu görülmüştür.

Yüzey işleme sonrası örnek olarak seçilen bazı parçaların kalite raporları Tablo 3'te verilmiştir. Bu değerler yüzeyde işleme sonuçlarının başarılı olduğunu göstermektedir.

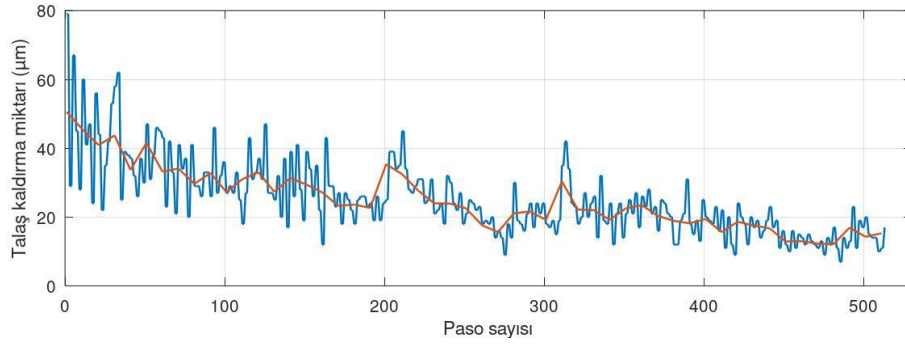
Yapılan incelemelerde temizleme sonrası yüzeylerde çapak kalıntısı görülmediği Şekil 9'da gösterilmiştir. Parça iç yüzey ve dış yüzeyinde herhangi bir sertlik kaybı (dekarbonizasyon) görülmemiştir. Dolayısıyla karbon kaybı sebepli yüzeyde sertlik kaybı meydana gelmediği gözlemlenmiştir.

Tablo 2: Korelasyon matrisi

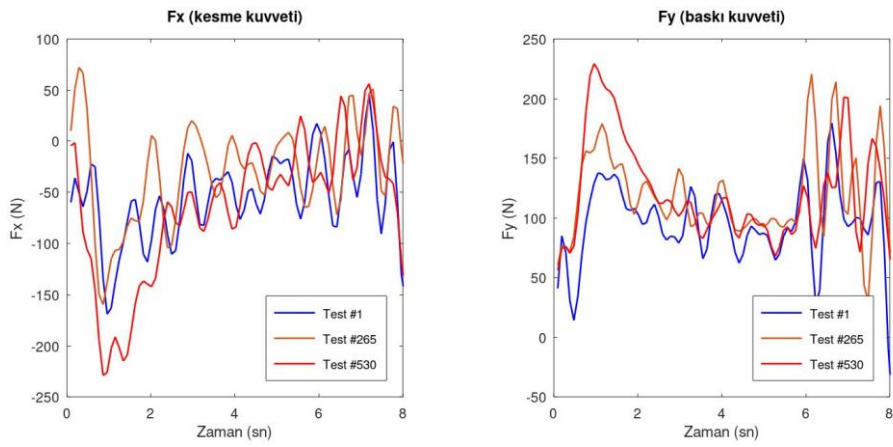
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	1	0.283	-0.084	-0.068	-0.285	-0.866
F_y	0.283	1	0.073	0.067	-0.68	-0.504
F_z	-0.084	0.073	1	0.993	0.105	0.046
M_x	-0.068	0.067	0.993	1	0.108	0.063
M_y	-0.285	-0.68	0.105	0.108	1	0.584
M_z	-0.866	-0.504	0.046	0.063	0.584	1



Şekil 5: Tekrar edilebilirlik



Şekil 6: Zımpara ömrü



Şekil 7: Bant ömrünün kesme ve baskı kuvvetine etkisi

Tablo 3: İşlem Gören Numune Örnekleri

Numune #			Rz Değeri (µm)		Birleşik ferrite Durumu		Çapak Durumu		Hadde yönü iz ve çukurcuk durumu (H) (µm)	Ön ve arka gözler etrafında iç yüzeyde işlem görmeyen yüzeyler (mm)		Göbek düzlüğü etrafında işlem görmeyen yüzeyler	Sertlikler (Hv)				Merkez Kalınlık (mm) 25 +/- 0,35
			Boyuna	Enine	İç Yüzey	Dış Yüzey	İç Yüzey	Dış Yüzey		FR	RR		İç Yüzey @50µm	İç Yüzey @100µm	Dış Yüzey @50µm	Dış Yüzey @100µm	
#240501	RR	STD	3,0µm	6,6µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	140	80	YOK	454	481	449	478	24,7
	FR	200	1,8µm	8,8µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	443	481	464	478	
#240502	RR	STD	13,2µm	18,4µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	210	50	YOK	435	475	427	476	24,7
	FR	200	6,0µm	17,3µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	456	465	443	478	
#240503	RR	STD	2,2µm	10,3µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	150	70	YOK	451	456	433	484	25,0
	FR	200	1,8µm	10,2µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	471	467	448	491	
#240504	RR	STD	4,6µm	11,4µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	130	70	YOK	441	476	477	446	24,5
	FR	200	3,7µm	11,7µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	430	473	488	456	
#240508	RR	STD	6,2µm	13,5µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	230	230	YOK	454	470	445	466	25,0
	FR	200	3,9µm	10,6µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	469	493	452	463	
#240509	RR	STD	6,1µm	24,9µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	150	115	YOK	479	517	467	489	24,7
	FR	200	4,2µm	18,4µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	473	494	495	508	
#240510	RR	STD	2,6µm	15,7µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	130	110	YOK	428	442	442	491	24,9
	FR	200	4,2µm	13,7µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	458	490	478	408	
#240511	RR	STD	2,6µm	18,7µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	200	120	YOK	448	462	464	405	25,0
	FR	200	2,2µm	13,0µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	442	481	435	450	
#240512	RR	STD	3,9µm	11,7µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	150	110	YOK	411	470	478	483	24,8
	FR	200	2,8µm	11,3µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	486	463	471	493	
#240513	RR	STD	2,7µm	12,3µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK	140	120	YOK	456	497	454	486	24,9
	FR	200	2,5µm	11,9µm	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK			YOK	411	470	478	483	



Şekil 9: İşlem Gören Parçanın İç ve Dış Yüzeyi

4. SONUÇLAR

Çalışmada T/K sensörü kullanılarak endüstriyel bir robotik yüzey temizleme sistemi geliştirilmiştir. Endüstrideki çalışmalarda robot parçayı taşıırken, bant zımpara mekanizması robot önünde sabit durmaktadır. Bu çalışmada ise bunun aksine, bant zımpara mekanizması robot ile taşınmakta, parça ise robot önünde sabit, gerektiğinde parçanın arka tarafını da zımparalamak için döner bir sistem ile konumlandırılmıştır. Bu sayede farklı tipte

ve geometrideki ürün yüzeylerinin temizlenebildiği esnek bir çözüm geliştirilmiştir.

T/K sensörü, yüzey temizleme işlemi esnasında parçaya uygulanan baskı kuvvetinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlamıştır. Baskı kuvveti, proses başarısı için en önemli parametrelerdendir. Bu sayede proste yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik elde edilmiştir. Ayrıca yüzey zımparalama işlemlerinde yüzeyden kaldırılan maksimum talaş miktarı proses ve elde edilen yüzey

kalitesi için çok önemlidir. T/K sensörü ile baskı kuvveti kontrol altına alınarak aynı zamanda yüzeyden kaldırılan talaş miktarı da kontrol altına alınmıştır.

Kullanılan zımpara bandı ömrünü tamamlayarak istenen miktarda yüzey kaldırmayana kadar testler tekrar edilmiş ve bu esnada, baskı kuvvetine ek, kesme kuvveti, yanal kuvvet ve bütün momentler kayıt altına alınmıştır. Bant ömrü ile oluşan kesme, baskı, yanal kuvvetler ve momentler arasındaki korelasyon tam anlamıyla analiz edilmemiş olsa da ilk izlenimler bant ömrünün azalması ile bu değerlerde değişimin olduğu yönündedir. Bu durum elde edilen verinin zımpara bandının ömrünü makine öğrenmesi algoritması ile tespit etmek üzere kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılan ön çalışmalarda bir makine öğrenme algoritması geliştirilmiş ve başarılı sonuçlar gözlemlenmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşaması bu konuda olacaktır.

TEŞEKKÜR

Robotik Yüzey Zımparalamada Proses Koşullarının Bant Zımpara Ömrü ve İş Parçası Yüzeyine Etkileri isimli çalışmada, kalite raporları konusundaki değerli katkıları ve titiz analizleri için Eren Nas'a içtenlikle teşekkür ederiz. Destekleri, çalışmamızın kalitesini artırmada kritik rol oynamıştır.

INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON ABRASIVE BELT LIFE AND SURFACE INTEGRITY IN ROBOTIC GRINDING APPLICATIONS

In the developed system for robotic metal surface cleaning, the grinding paper contained in the belt mechanism is carried by the robot while the workpiece is fixed and positioned with a rotating system when needed. Key parameters affecting process quality, such as applied pressure, belt speed, and robot feed rate, have been optimized. Tests were conducted to determine the lifespan of the abrasive belt, and force/torque sensor data were analyzed. Additionally, machine learning was applied to explore the correlation between sensor data and belt lifespan, improving process efficiency. The force/torque sensor ensured precise control of the

applied pressure, achieving high accuracy and repeatability. The developed method is applicable to various geometries and materials.

Keywords: Robotic metal surface cleaning, Grinding paper, Machine learning.

KAYNAKLAR

1. Baş, M., Ertan, R., Yavuz, N., Yüzey işleme yöntemlerinin soğuk iş takım çeliğinin yorulma davranışına etkisinin incelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 16 (2011) 1.
2. Sarılıgil, M., Makine öğrenmesi ile kısıtlara dayalı zımpara seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2023.
3. Çırak, B., Yüzey İşleme Sürecinde Yüzey Sertliğinin İncelenmesi ve Yapay Sinir Ağları ile Yorumlanması, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 1 (2017) 2, 34-49.
4. Ermergen, T., Taylan, F., Eklemeli İmalat ile İmal Edilmiş Metal Parçaların Yüzey Bitirme İşlemleri, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12 (2020) 1, 45-55.
5. Torres, R., Mata, S., Iriarte, X., Barrenetxea, D., Robotic Belt Finishing with Process Control for Accurate Surfaces, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7 (2023) 4, 124.
6. Li, D., Yang, J., Zhao, H., Ding, H., Contact force plan and control of robotic grinding towards ensuring contour accuracy of curved surfaces, International Journal of Mechanical Sciences, 227 (2022), 107449.
7. Lu, H., Zhao, X., Tao, B., Yin, Z., Online process monitoring based on vibration-surface quality map for robotic grinding, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 25 (2020), 2882-2892.
8. Chen, G., Yang, J., Yao, K., Xiang, H., Liu, H., Robotic abrasive belt grinding with consistent quality under normal force variations, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 125 (2023) 7, 3539-3549.

YAYIN İLKELERİ

Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;

Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.

- (b) Dergide yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıtıldığı yazılar yayımlanabilir

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

Makalelerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergi'ye gelen her makale kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında makale yazarlarına bilgi verilecektir.

YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı'na aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfıdır. "Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır. Dergi Yayın Kurulları ODTÜ Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı tarafından seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda Orta Doğu Teknik Üniversitesi Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Eğitim ve Araştırma Vakfı Yönetim Kuruluna bilgi verir ve onayını alır.

Journal of
MECHANICAL
DESIGN
AND
PRODUCTION

Journal of Mechanical Design and Production is a periodical, published by the METU Prof.Dr. Mustafa N. Parlar Education and Research Foundation, Ankara, Turkey.

MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazarına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
- Uygulama Makaleleri.
- Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
- Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
- Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
- Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların sunulduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerinin tanıtıldığı yazılardır.

Örnek makale <https://parlar.org.tr/matim> sitesinde verilmiştir. Yazarlar, makalelerini TÜBİTAK ULAKBİM tarafından yürütülen <http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim> sitesine yüklemelidirler. Bir sorun ile karşılaşırsanız İlhan Konukseven (konuk@metu.edu.tr) veya Hakan Kalkan (hakan.kalkan@atilim.edu.tr) ile iletişim kurabilirsiniz. Yazarlar, yayınlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik olarak aynı şekilde yüklemelilerdir. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır.

MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
- Yazar(lar) ad(lar)ı, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
- Özet ve anahtar kelimeler
- Makalenin ana kısmı
- Teşekkür (gerekli ise)
- İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
- Kaynakça
- Ek(ler) varsa

Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir.

Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir.

Özette sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanıtılmalı, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmesine özen gösterilmelidir.

Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,

- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırdan devam edilmelidir.

Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, bilgisayar ile anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazı ile belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle bilgisayar kullanımında "l" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşitliğin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "()" içinde verilmelidir.

Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için bilgisayar ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında çizilmelidir. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şeklin altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler yeterli çözünürlükte sağlanmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Derginin elektronik ortamda renkli olarak yayınlanacağı dikkate alınmalıdır.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

- Dergi Makalesi
1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376. Kitap
 2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983. Rapor
 3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980. Kongre Makalesi
 4. Adalı, E. ve Tunali, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler bilgisayar ile A4 formatında, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemeden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çeviriden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.