TALAŞLI İMALATTA GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE UYGULAMALAR

Editör:
Doç. Dr. Ali Uysal



BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Talaşlı İmalatta Güncel Yaklaşımlar ve Uygulamalar

Editör: Doç. Dr. Ali Uysal

ISBN: 978-625-5057-54-9

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-11-02
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İÇİNDEKİLER

Aısı 1045 Çeliğinin Hss (%5 Co) Matkapla Delinmesinde İşlem Parametrelerinin Titreşim Üzerindeki Etkilerinin Belirlenmesi ... 1
AHMET MURAT PİNAR

Cep Frezeleme İşleminde Takım Tutucu Türlerinin Aa7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi 14
FİKRET SÖNMEZ

Aa7075 Alüminyum Alaşımının Farklı Takım Tutucular ile Cep Frezelenmesinde Takım Aşınması Davranışının Takımcı Mikroskobu ve Sem-edx Analizleri İle İncelenmesi 29
FİKRET SÖNMEZ

BÖLÜM 1

AISI 1045 ÇELİĞİNİN HSS (%5 CO) MATKAPLA DELİNMESİNDE İŞLEM PARAMETRELERİNİN TİTREŞİM ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

AHMET MURAT PİNAR[1]

Giriş

Delme, iş parçasında dairesel delik açmak için "matkap" adı verilen döner bir kesici ile gerçekleştirilen talaşlı imalat işlemlerinden biri olup, talaşlı imalat operasyonlarının yaklaşık %30'luk bir kısmını oluşturmaktadır (Aamir vd., 2023; Kumar vd., 2020). Özellikle otomotiv, havacılık ve kalıpçılık endüstrilerinde, parçaların montajında gerekli olan hassas deliklerin açılması, ürünün fonksiyonelliği ve dayanımı açısından kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla deliğin kalitesi büyük önem arz etmekte ve bu da talaşlı imalat alanında çalışan araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmesine sebep olmaktadır. Delme operasyonlarında delik kalitesi olarak deliğe ait dairesellik, silindiriklik, çap değeri sapması, yüzey pürüzlülüğü, delaminasyon ve çapak oluşumu parametrelerinin incelendiği gözlemlenmektedir. Delme operasyonlarında deliğin

[1] Prof. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Orcid: 0000-0002-0721-6723

kalitesini dolaylı olarak etkileyen diğer kalite karakteristikleri de takım aşınması, titreşim, kuvvet ve tork ölçümleri olmaktadır.

Özellikle dar toleranslı büyük hacimli ve maliyetli havacılık ve otomotiv parçalarının delinmesinde, delik kalitesi daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle, delme operasyonları ile ilgili olarak en iyi kesme parametrelerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Aşağıda delme operasyonlarında gerçekleştirilen titreşim çalışmaları değerlendirilmiştir:

Abu-Mahfouz (2003) çok katmanlı ileri beslemeli yapay sinir ağları ve geri yayılım algoritmaları kullanılarak delme işlemi sırasında yalnızca titreşim sinyallerinin analizine dayanan bir takım durum izleme sistemi önermiştir. Deneylerde kesici takım olarak HSS helisel matkap kullanılmış olup bağımsız değişken olarak kesme hızı ve ilerleme değerleri kullanılmıştır. Zaman ve frekans alanlarında çıkarılan titreşim özellikleri yapay sinir ağına girdiler olarak sunulmuş ve beş farklı matkap aşınma durumu yapay olarak tanıtılarak sınıflandırma performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, özellikle frekans alanına ait ortalama harmonik dalgacık katsayıları ve maksimum entropi spektrumu tepe değerlerinin, zaman domeyni istatistiksel momentlerine kıyasla sinir ağının eğitimi ve doğruluğu açısından daha etkili olduğunu göstermiştir. Tang ve Ji (2005) 0,29 mm çapındaki HSS matkaplarla AISI 1045 çeliğin delinmesinde matkap aşınması ve delik kalitesinin titreşimle olan ilişkisini araştırmışlardır. Mikro delme deneylerinden toplanan titreşim sinyallerini zaman ve frekans teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Deneyler 2 farklı devir sayısında (10000 ve 15000 dev/dk) iki farklı ilerleme oranı (1 ve 5µm/devir) ve iki farklı delik derinliğinde (0,5 ve 1,5 mm) deneyler gerçekleştirilmiştir. Titreşim karakteristik parametreleri; zaman bölgesindeki istatistiksel ölçütler ve frekans bölgesindeki belirli bantlarda ortalama spektral genlikler, matkap aşınmasına ve kırılmasına karşı titreşimin yüksek bir korelasyonda olduğunu belirlemişlerdir. Kaplan vd. (2015) AISI D2

ve D3 soğuk iş takım çeliklerinin HSS helisel matkapla delinmesinde çoklu işlem parametrelerinin titreşim üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. İş parçası sertliği, matkap uzunluğu/bağlama mesafesi, kesme hızı, ilerleme hızı ve delik sayısı parametrelerinin seviyelerinin tüm kombinasyonlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları regresyon analizi ile değerlendirilmiş ve ivme genliğinin tahmini için ikinci dereceden bir denklem geliştirilmiştir. Tahmin denkleminin %95 güven düzeyindeki korelasyon katsayısı R^2= 0.703 olarak hesaplanmıştır. Sridhar vd. (2021) IS3048 çeliğinin kuru kesme şartlarında monoblok karbür matkaplarla delinmesinde, farklı takım geometrilerinin ve işleme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği) titreşim genliği ile takım aşınması/hasarı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyler, Taguchi L9 dik dizilimi temel alınarak Ø7 mm ve Ø3 mm çaplarındaki matkaplarla dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada frekans ve zaman alanlarındaki titreşim sinyalleri analiz edilerek takım kırılması ve serbest yüzey aşınmasının anlık tespiti için dinamik öznitelikler geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kesme takımı titreşim genliği ile takım aşınması arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ve titreşim genliğinin 0.30 mm serbest yüzey aşınması (VB) değerine kadar belirgin bir artış göstermediğini, ancak bu eşikten sonra önemli ölçüde yükseldiğini ortaya koymuştur. Ayrıca daha büyük çaplı takımda (Ø7 mm) daha yüksek titreşim genlikleri ve aşınma oranları gözlemlenirken, minimal titreşim seviyelerine en düşük devir ve ilerleme parametrelerinde ulaşılmıştır. Savilov vd. (2019) Çelik 35 (170 HB) malzemesinin 9 mm çapındaki karbür matkapla delinmesi işleminde rezonans ve rejeneratif oto-titreşimleri bastırmak amacıyla modal analiz (kararlı kesme diyagramları) ve kesme hızı modülasyonu yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Oto-titreşimlerin başlangıcına karşılık gelen 3816 dev/dk olumsuz mil devrinde yapılan delme deneylerinde %4 modülasyon derinliği uygulanmış ve yüzey

pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, kesme hızı modülasyonu uygulandığında yüzey pürüzlülüğünün modülasyonsuz duruma göre yarı yarıya iyileşerek R_a = 1.9 µm değerinden R_a= 0,95 µm değerine düştüğünü göstermiştir. Araştırmacılar, modal analizin tüm devir aralıklarında uygulanabilir genel bir yöntem sunduğunu, kesme hızı modülasyonunun ise yüksek mil devirlerinde tezgin ataleti nedeniyle sınırlandığını belirterek her iki yöntemin birlikte kullanılmasının delik kalitesini artırmada en efektif yaklaşım olacağını vurgulamışlardır.

Önerilen çalışmada, literatürden farklı olarak AISI 1045 çeliğinin TiN kaplı %5 Co alaşımlı HSS matkaplarla delinmesinde, takım tutucu tipi, kesme hızı ve ilerleme oranının titreşim performansı üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Deneysel Çalışmalar

Deney numunelerimiz Ø20x30 mm ölçülerindeki soğuk haddelenmiş AISI 1045 çeliğinden oluşmakta olup, bunlara ait kimyasal analiz Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Numunelere ait kimyasal analiz sonuçları

Alaşım elementi % ağırlık													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	B	Cr+Mo+Ni	N	Fe
0,44	0,18	0,75	0,016	0,025	0,16	0,09	0,23	0,017	0,006	0,0003	0,27	0,0106	Kalan

Delme testlerinde takım malzemesi olarak DIN 338 standardında, %5 kobalt alaşımlı yüksek hız çeliğinden (HSS-E) imal edilmiş; 35° helis açısına, 135° uç açısına ve titanyum nitrür (TiN) kaplamaya sahip silindirik saplı matkap uçları (Makina Takım A.Ş., Türkiye) kullanılmıştır. Matkapların tezgâha bağlantısı ER tipi pens tutucu (ERC), bilyalı pens tutucu (PMC) ve weldon tipi tutucu (WH) olmak üzere 3 farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Delme testlerimiz Mitsubishi M80 kontrol ünitesine sahip 7,5 kW gücünde ve 12.000 dev/dk'lık fener mili hızına sahip GMT MCV 740 CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir.

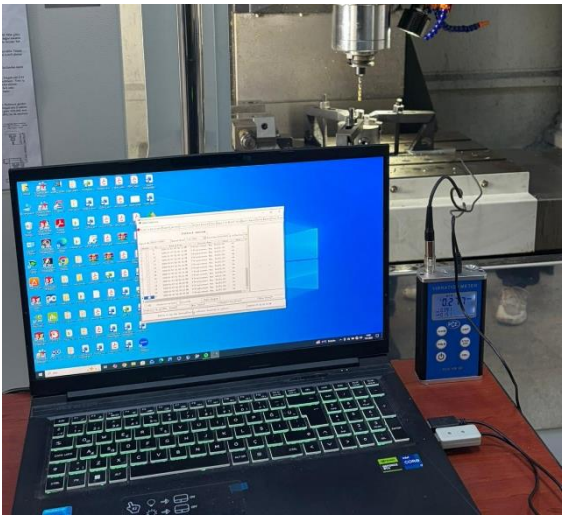
Titreşim ölçümlerimiz PCE firmasına ait piezoelektrik ivme transdüseri ile ölçüm yapan PCE-Vm3D cihazla gerçekleştirilmiştir Cihaza ait teknik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Titreşim ölçüm cihazı özellikleri

Özellik	Değer / Açıklama
Cihaz modeli	PCE-VM 3D
Sensör tipi	3 Eksenli Piezoelektrik İvmeölçer
Görüntüleme	4 haneli, arka aydınlatmalı LCD ekran
Ölçüm eksenleri	X, Y, Z (tekil veya üç eksen birlikte)
Doğruluk	Okumanın %5'i ± 2 basamak
Ölçüm aralıkları	Yer değiştirme**:** 0.001–4.000 mm (tepe-tepe eşdeğeri), Hız: 0.01–400.0 mm/s (RMS) İvme: 0.1–400.0 m/s² (tepe)
Frekans aralığı	10 Hz – 10 kHz (tüm ölçüm modları için)
Analog çıkış	0–2.0 V (tepe), yük direnci >10 kΩ
Birim dönüştürme	Metrik / Inch
Veri aktarımı	Analog çıkış üzerinden veri toplama sistemine

Öncelikle, numunelerin bağlantısını gerçekleştirdiğimiz 4 inch'lik torna aynasının arkasına transdüserin mıknatısıyla aynanın bağlantısını sağlayacak bir flanş imal edilip, 3 adet imbus cıvata ile montajı sağlanmıştır. Sonraki adımda ivme transdüserinin aynaya güçlü neodyum mıknatısla bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Resim 1'de iş parçası titreşimi ölçüm sistemi görülmektedir. Mıknatıslı ivme transdüserine bağlı cihazın bilgisayara bağlantısı RS-232C özel kabloyla gerçekleştirilmiştir.

Resim 1. İş parçası titreşimi ölçüm sistemi



Bu çalışmada titreşim verisi olarak, delme işlemi süresince iş parçası üzerinde eş zamanlı olarak ölçülen X, Y ve Z eksen bileşenlerine ait anlık yer değiştirme kayıtları kullanılmıştır. Söz konusu kayıtlar, ilgili Excel dosyasından elde edilmiş olup, her eksene karşılık gelen etkin değer (RMS) ayrı ayrı belirlenmiştir. X eksenine ait RMS hesaplama yöntemi aşağıda sunulmaktadır (Pinar & İlhan, 2026).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2} \tag{1}$$

Bu ifadede x_i, deney süresince X ekseninde kaydedilen *i.* yer değiştirme büyüklüğünü; N ise toplam ölçüm sayısını temsil etmektedir. Aynı hesaplama prosedürü Y ve Z eksenlerine de uygulandıktan sonra, üç eksenin birleşik etkisini yansıtan bileşke RMS değeri aşağıda verilen bağıntı aracılığıyla elde edilmektedir (Pinar & İlhan, 2026).

$$B_{RMS} = \sqrt{{X_{RMS}}^2 + {Y_{RMS}}^2 + {Z_{RMS}}^2} \quad (2)$$

Deney Tasarımı ve İstatistiksel Analiz

Deney tasarımı olarak Taguchi'nin L9 ortogonal dizisi seçilmiştir. Buna göre Tablo 3'te verilen işlem parametrelerinin farklı seviyelerinde 9 adet test gerçekleştirilmiştir. Tablo 4'te Deney planı esas alınarak gerçekleştirilen iş parçası titreşim sonuçları (V_w) ve bunlara karşılık gelen *S/N* oranları verilmiştir.

Tablo 3 İşlem parametreleri ve bunlara ait seviyeler

İşlem Parametreleri	Birimler	Seviyeler		
		1	2	3
Takım tutucu tipi (*A*)	-	ERC	PMC	WH
Kesme hızı (*B*)	m/dk.	20	25	30
İlerleme oranı (*C*)	mm/dev	0,06	0,09	0,12

Tablo 4. İş parçası titreşim sonuçları ve bunlara karşılık gelen S/N oranları

Test no	Takım tutucu tipi (*A*)	Kesme hızı (*B*)	İlerleme oranı (*C*)	V_w	*S/N*
1	ERC	20	0.06	0,167	15,5457
2	ERC	25	0.09	0,707	3,0116
3	ERC	30	0.12	0,595	4,5097
4	PMC	20	0.09	0,300	10,4576
5	PMC	25	0.12	0,751	2,4872
6	PMC	30	0.06	0,927	0,6584
7	WH	20	0.12	0,101	19,9136
8	WH	25	0.06	0,214	13,3917
9	WH	30	0.09	0,502	5,9859

Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi

Taguchi metodu, ölçülen deney verilerinin değerlendirilmesinde istatistiksel bir araç olarak, elektrik kontrol teorisinden esinlenilmiş S/N oranını kullanmaktadır (Pinar & İlhan, 2026; Pinar vd., 2016). Bu yöntemde "sinyal", ortalama ile ifade

edilen istenen yanıt değerini temsil ederken, "gürültü" standart sapma ile ifade edilen istenmeyen değişimi ifade etmektedir. *S/N* oranının seçimi, amaç fonksiyonunun türüne bağlı olup "Nominal En İyidir (NB)", "Küçük En İyidir (SB)" veya "Büyük En İyidir (LB)" olarak sınıflandırılabilir. Bu çalışmanın amacı mümkün olan en küçük titreşimi elde etmek olduğundan, "Küçük En İyidir" kriteri seçilmiş ve ilgili *S/N* oranı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Pinar & İlhan, 2026; Pinar vd., 2016)

$$\frac{S}{N} = -10.log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (3)$$

Burada n ölçüm sayısı ve y_i de ölçülen karakteristik değerdir. *S/N* oranının birimi desibeldir (dB). Tüm testler için hesaplanan *S/N* oranları Tablo 4'ün son sütununda verilmiştir."

Varyans analizi (ANOVA)

Tablo 5'te İş parçası titreşim sonuçlarına ait S/N oranı ANOVA sonuçları verilmiştir. Buna göre, Kesme hızı ve takım tutucu tipinin titreşim üzerinde anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Kesme hızının %58,87'lik yüzdelik dağılımla en anlamlı parametre olduğu, bunu %28,24'lük oranla takım tutucu tipinin izlediği elde edilmiştir.

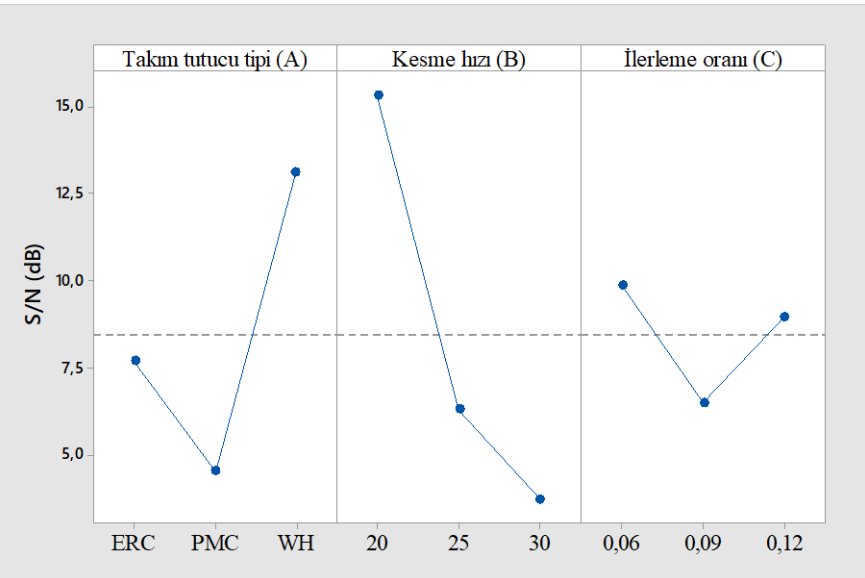
Tablo 5. S/N oranı için ANOVA sonuçları

Faktörler	*DF*	*SS*	*V*	*F*	*SS'*	*P*
Takım tutucu tipi (A)	2	112,518	56,259	9,762	100,992	28,24
Kesme hızı (B)	2	222,081	111,040	19,268	210,555	58,87
İlerleme oranı (C)	(2)	(18,403)	-	Pooled	Pooled	-
Hata	4	23,051	5,763	-	46,103	12,89
Toplam	8	357,650	-	-	357,650	100
DF: Serbestlik derecesi, **SS:** Kareler toplamı, **V:** Varyans, **SS':** Saf kareler toplamı, **P:** Yüzdelik dağılım, $F_{0.05,2,4} = 6,94$						

Optimum iş parçası titreşiminin belirlenmesi

Optimum iş parçası titreşimi *S/N*'ye ait ANOVA (Tablo 5) ve ana etkiler grafiği (Grafik 2) dikkate alınarak belirlenmiştir. Ana etkiler grafiğine göre, minimum iş parçası titreşiminin bilyalı pens tutucu kullanılarak, 20m/dk'lık kesme hızında ve 0,09mm/devir'lik ilerleme oranında elde edildiği gözlemlenmektedir. Taguchi optimum titreşimin hesaplanmasında anlamlı işlem parametrelerini dikkate almaktadır. Eşitlik 4'te, Taguchi'nin optimum titreşim tahmini verilmiştir.

Grafik 2. S/N oranı ana etkiler grafiği



$$P_v = VA_3 + VB_1 - V_\mu \quad (4)$$

Burada V_{A3} takım tutucu tipinin 3. Seviyesinde gerçekleştirilen testlere ait ortalamayı (Bkz. Tablo 6, 13,097 dB), V_{B1} kesme hızının birinci seviyesinde gerçekleştirilen testlere ait ortalamayı (Bkz. Tablo 6, 15,306 dB) V_μ tüm testlere ait ortalamayı ifade etmektedir. Buna göre minimum titreşim 19,96285 dB olarak

elde edilmiştir. Buna karşılık gelen minimum yer değiştirme değeri 0,100 mm'dir.

Tablo 6. Faktör seviyelerine ait S/N oranları

Seviye	Takım tutucu tipi (A)	Kesme hızı (B)	İlerleme oranı (C)
1	7,689	15,306	9,865
2	4,534	6,297	6,485
3	13,097	3,718	8,970
Fark	8,563	11,588	3,380
Derece	2	1	3
V_μ= 8,44015			

Optimizasyonun son aşaması olan tolerans tasarımında optimum titreşimin elde edildiği faktör seviyelerinde doğrulama testleri gerçekleştirilip, bunların hesaplanan güven aralığında olup olmadığı kontrol edilmektedir. Aşağıda güven aralığının hesaplandığı eşitlik verilmiştir.

$$CI = \left(F_{0.05}(1,df_e).V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right] \right)^{1/2} \quad (5)$$

Eşitlikteki $F_{0.05(1,df_e)}$, 0,05 anlamlılık seviyesinde 1'e ve hatanın serbestlik derecesine (4) göre çizelgelerden elde edilmekte olup, 7,71'dir. V_e hataya ait varyans değeridir ve 5,763 olarak hesaplanmıştır. R optimum seviyede gerçekleştirilen 3 adet doğrulama deney sayısını ifade etmektedir. Son olarak n_{eff}, etkin tekrar sayısı olup Eşitlik 6 kullanılarak elde edilmektedir.

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (6)$$

Burada N (9) toplam deney sayısını Vt (4) de optimum yüzey pürüzlülüğünün tahmininde kullanılan işlem parametrelerinin toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir. Buna göre n_{eff}, 1,8 olarak hesaplanmıştır. Bunu takiben Eşitlik 5 ve 6 kullanılarak, CI=±6,284 dB olarak elde edilmiştir. Belirlenen optimum faktör seviyelerinde (A_3=Weldon, B_1=20 m/dk, C_1=0,06mm/dev) üç adet

doğrulama deneyi gerçekleştirilmiş ve ortalama 0,098 mm yer değiştirme gözlemlenmiş olup, buna tekabül eden *S/N* oranı 20,176 dB olarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerin, belirlenen güven aralığında yer aldığı, böylece metodun sistemin optimizasyonunu %95 güven seviyesinde yeterli doğrulukta gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.

Sonuçlar

Sunulan çalışmada, AISI 1045 çeliğinin TiN kaplı %5 Co alaşımlı HSS matkaplarla delinmesinde, titreşim performansı istatistiksel olarak araştırılmıştır. Buna göre, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. ANOVA sonuçlarına göre, takım tutucu tipi ve kesme hızı işleme parametrelerinin anlamlı olduğu gözlemlenmiştir. Kesme hızının %58,87'lik yüzdelik dağılımla en anlamlı parametre olurken bunu %28,24 ile takım tutucu tipi izlemektedir.
2. Ana etkiler grafiğine göre, iş parçası titreşiminin kesme hızı ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Weldon tutucu, ER tipi pens tutucuya ve bilyalı pens tutucuya göre göre titreşimi sırasıyla **%44,39** ve %58,70 oranında azaltmıştır..
3. Metot optimum titreşimi Weldon takım tutucuda, 20mm/dk'lık kesme hızında ve 0,06mm/devir ilerleme oranında 0,1 mm olarak tahmin etmiştir. Aynı şartlarda gerçekleştirilen 3 adet doğrulama deneyinde ortalama 0,098 mm mm'lik titreşim değeri tespit edilmiş olup, ilgili değerin belirlenen güven aralığında yer aldığı, böylece metodun sistemin optimizasyonunu %95 güven seviyesinde yeterli doğrulukta gerçekleştirdiği elde edilmiştir.

4. Ayrıca 16 adet deneye ait sonuçlar incelendiğinde, 7 no'lu testte 0,101mm'lik en düşük titreşim elde edilmiş olup, önerilen metotla %2'lik iyileştirme sağlandığı tespit edilmiştir.

Kaynakça

Aamir, M., Sharif, A., Zahir, M. Z., Giasin, K., & Tolouei-Rad, M. (2023). Experimental assessment of hole quality and tool condition in the machining of an aerospace alloy. Machines, 11(7), 726.

Kumar, B. S., Baskar, N., & Rajaguru, K. (2020). Drilling operation: A review. Materials Today: Proceedings, 21, 926-933.

Abu-Mahfouz, I. (2003). Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(7), 707–720. https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00004-4

Tang, Y., & Ji, Y. (2005, January). Study on tool wear and vibration characteristics in micro drilling operation. In Proceedings of the ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 47381, pp. 735–740). ASME. https://doi.org/10.1115/DETC2005-84915

Kaplan, Y., Motorcu, A. R., Nalbant, M., & Okay, Ş. (2015). The effects of process parameters on acceleration amplitude in the drilling of cold work tool steels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(5–8), 1387–1401. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7039-9

Sridhar, A. V., Prasad, B. S., & Chandra Mouli, K. V. V. N. R. (2021). Evaluation of tool performance and wear through vibration

signature analysis in drilling of IS3048 steel. Journal of Engineering and Applied Science, 68(1), Article 27. https://doi.org/10.1186/s44147-021-00036-6[cite: 1]

Savilov, A. V., Pyatykh, A. S., & Timofeev, S. A. (2019). Vibration suppression methods at high performance drilling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 632(1), Article 012108. https://doi.org/10.1088/1757-899X/632/1/012108

Pinar, A. M., & İlhan, Ö. (2026). AA6082-T6 alüminyum alaşımının frezelemesinde çoklu işlem parametrelerinin titreşim üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak değerlendirilmesi. In Mühendislikte akademik çalışmalar ve yeni vizyonlar (ss. 63–77). Duvar Yayınları.

Pinar, A.M., Filiz, S. & Ünlü, B.S. A comparison of cooling methods in the pocket milling of AA5083-H36 alloy via Taguchi method. Int J Adv Manuf Technol 83, 1431–1440 (2016). https://doi.org/10.1007/s00170-015-7666-1

BÖLÜM 2

CEP FREZELEME İŞLEMİNDE TAKIM TUTUCU TÜRLERİNİN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

FİKRET SÖNMEZ[1]

Giriş

Talaşlı imalat; karmaşık geometrilerin yüksek hassasiyetle işlenebilmesi ve düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edilebilmesi nedeniyle modern üretimde önemli bir yere sahiptir (Groover, 2010).

Yüzey pürüzlülüğü, talaşlı imalatla üretilen parçaların yüzey kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılan temel göstergelerden biridir. Parçanın kullanım amacına bağlı olarak temas, sürtünme ve aşınma davranışları açısından önem taşımaktadır. İş parçası malzemesi, kesici takım geometrisi ve kesme parametrelerinin yanı sıra tezgâh rijitliği, iş parçasının bağlanması ve takım tutucu özellikleri de işlenen yüzeyin oluşumunu etkileyebilmektedir. İşleme sırasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve titreşimler, yüzey kalitesini ve boyutsal doğruluğu olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Çakır, 2006). Bu nedenle yüzey

[1] Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-1718-892X

pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde kesme parametreleriyle birlikte takımın bağlanma koşullarının da dikkate alınması gerekmektedir (Davim, 2008; Ortner et al., 2014).

Alüminyum alaşımları (ISO 513 N sınıfı), düşük yoğunlukları ve yüksek özgül dayanımları nedeniyle özellikle havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Callister & Rethwisch, 2020; Gialanella & Malandruccolo, 2020). Bununla birlikte alüminyum alaşımlarının işlenmesi sırasında görülen sıvanma eğilimi ve yığma kenar oluşumu, yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Cep frezeleme, kalıpçılık ve havacılık uygulamalarında en sık kullanılan frezeleme operasyonlarından biridir. Bu operasyonda elde edilen yüzey kalitesi; kesme hızı, ilerleme, dalma stratejisi ve takım tutucu gibi birçok etkene bağlı olarak değişmektedir (Hbaieb et al., 2011; Jacso & Szalay, 2018; Pateloup et al., 2010; Pinar, 2013).

Takım tutucuların karşılaştırılmasında salgı, rijitlik ve titreşim sönümleme özelliklerinin birbirinden ayrılması önemlidir. Salgı, kesici takımın dönme eksenine göre geometrik sapmasını; rijitlik, kesme yükleri altında yer değiştirmeye karşı gösterilen direnci; sönümleme ise titreşim enerjisinin azalmasıyla ilişkili davranışı ifade etmektedir. Bu özelliklerin işleme performansına katkısı, kullanılan malzemeye ve kesme koşullarına göre değişmektedir (Rosenthal et al., 2020; Simsek et al., 2012).

Literatürde farklı takım tutucuların işleme performansını karşılaştıran çalışmalar bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmalarda kullanılan iş parçası malzemeleri, kesici takımlar ve kesme koşulları farklılık göstermektedir. Bu nedenle tutucu performansının AA7075-T6 alaşımının kuru cep frezelenmesine özgü koşullarda değerlendirilmesi önem taşımaktadır. Pensli, Weldon, hidrolik ve rulmanlı tutucuların aynı kesme parametreleri ve takım yolu altında karşılaştırılması, bu uygulamaya özgü yüzey

pürüzlülüğü davranışının değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmanın amacı, AA7075-T6 alüminyum alaşımının kuru cep frezelenmesinde dört farklı takım tutucuyla elde edilen Ra ve Rz değerlerini karşılaştırmak ve yüzey pürüzlülüğünün ardışık cep işlemleri boyunca değişimini incelemektir.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak AA7075-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. 6,15 mm kalınlığındaki plaka malzeme kesilerek 118 × 26 × 6,15 mm boyutlarına getirilmiştir. AA7075 malzemeye ait kimyasal kompozisyon Tablo 1'de, T6 temper durumuna ait mekanik özellikler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1 AA7075 malzemeye ait kimyasal kompozisyon (%)

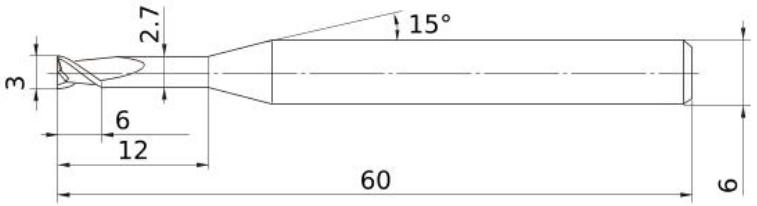
Element	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si
Ağırlıkça %	87,1-91,4	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	En fazla 0,5	En fazla 0,4

Tablo 2 AA7075-T6 malzemeye ait mekanik özellikler

Mekanik özellik	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Vickers)
Değer	503	570	11	175

Deneylerde Mitsubishi (AM2SCD0300A060) kodlu, alüminyum işleme için özel olarak tasarlanmış Ø3 mm çaplı ve iki ağızlı parmak freze kullanılmıştır (Şekil 1). Her takım tutucu için kullanılmamış ayrı bir kesici takım tahsis edilmiş ve aynı kesici takım, ilgili takım tutucu ile yapılan 10 cep frezeleme işleminin tamamında değiştirilmeden kullanılmıştır.

Şekil 1 Deneylerde kullanılan kesici takım



Kesici takımların tezgâha bağlanmasında dört farklı takım tutucu kullanılmıştır. Şekil 2'de sırasıyla hidrolik, Weldon, rulmanlı ve pensli (ER32) takım tutucular görülmektedir.

Şekil 2 Deneylerde kullanılan takım tutucular



Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneyler öncesi AA7075 malzemeler CNC dik işleme merkezinde (GMT MCV740) yüzey temizliği ve boyutsal düzeltme işlemlerine tabi tutulmuş, ardından uygun kesme şartlarının belirlenmesi amacıyla ön deneyler gerçekleştirilmiştir. İş mili devri (N, dev/dk), kesme hızı (V, m/dk) ve takım çapına (d, mm) bağlı olarak $N = 1000 \cdot V/(\pi \cdot d)$ eşitliğiyle hesaplanmıştır.

Kesme hızı, takım aşınmasını belirleyen başlıca etkenlerden biridir; düşük kesme hızlarında takım aşınması daha yavaş ilerler. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının özellikle düşük kesme hızlarında işlenmesinde yığma kenar (BUE) oluşumu görülebilmektedir. Deneylerde kullanılan AA7075-T6 alüminyum

alaşımının işlenmesinde BUE oluşumunu engellemek için genellikle yüksek kesme hızları tercih edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, mevcut CNC tezgâhının iş mili kapasitesi sınırları dikkate alınarak tezgâh kapasitesini aşmayacak şekilde mümkün olan en yüksek kesme hızının kullanılmasına karar verilmiştir.

Kesme parametreleri, tezgâhın iş mili devir sınırı ve ön deneylerde gözlenen işleme davranışı dikkate alınarak belirlenmiştir. Ø3 mm çaplı kesici takım için 75 m/dk kesme hızı seçilmiş ve buna karşılık gelen iş mili devri yaklaşık 7958 dev/dk olarak hesaplanmıştır. Bu değer, kesici takım üreticisinin önerdiği 20000 dev/dk değerinin altında kalmaktadır. Ön deneylerde 1000, 1250 ve 1500 mm/dk ilerleme hızları denenmiş, ancak takım kırılması gözlenmiştir. İlerleme hızının iş mili devrine göre yüksek kalması, diş başına ilerlemeyi artırarak bu hasara katkıda bulunmuş olabilir. Örneğin 7958 dev/dk iş mili devrinde, iki ağızlı takım için 1500 mm/dk ilerleme hızı yaklaşık 0,094 mm/diş değerine karşılık gelmektedir. İlerleme hızının 600 mm/dk olarak seçilmesiyle diş başına ilerleme yaklaşık 0,0377 mm/diş değerine düşürülmüş ve cep frezeleme işlemleri tamamlanabilmiştir.

Ön deneylerde, Siemens NX yazılımında oluşturulan helisel dalma stratejisi kullanılmıştır. Helisel dalma için takım yarıçapının %80'i ve 3° dalma açısı esas alınmıştır. Bu koşullarda kesici kenarlarda kırılma ve yerel hasar gözlenmesi üzerine, takımın iş parçasına yandan giriş yaptığı trokoidal takım yolu stratejisine geçilmiştir. Ön deneylerde bu stratejiyle cep frezeleme işlemleri tamamlanabildiğinden, karşılaştırma deneylerinin tamamında aynı takım yolu kullanılmıştır. Kullanılan takım yolu parametreleri Tablo 3'te sunulmuştur.

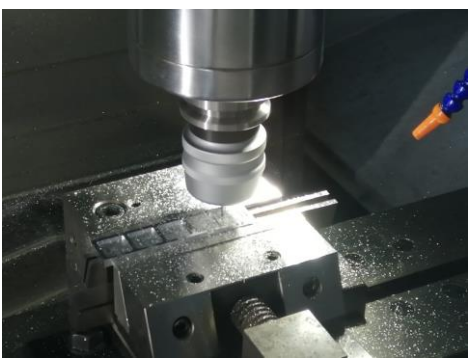
Tablo 3 Deneylerde kullanılan kesme parametreleri

Kesme Parametresi	Kullanılan değer
Kesme hızı	75 m/dk
Kesme hızına karşılık gelen devir sayısı	7958 dev/dk
İlerleme	600 mm/dk
Diş başına ilerleme	0,0377 mm/diş
Yana kayma (Stepover)	Takım çapının %10'u
Her pasoda kesme derinliği (Depth per cut)	0,6 mm
Trokoidal genişlik (Trochoidal width)	Takım çapının %60'ı
Minimum trokoidal genişlik	Takım çapının %5'i
Yana kayma limiti (Stepover limit)	Takım çapının %100'ü
Trokoidal yana kayma (Trochoidal step ahead)	Takım çapının %10'u

Deneylerin ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümlerinin Gerçekleştirilmesi

Ön deneylerden elde edilen tecrübeye dayanarak asıl deneyler Tablo 3'te verilen koşullarda gerçekleştirilmiştir. Her bir takım tutucu kullanılarak AA7075 iş parçası üzerinde, önce iş parçasının bir yüzeyine beş cep açılacak, ardından iş parçası ters çevrilerek diğer yüzeyine beş cep açılacak şekilde toplam 10 adet cep frezeleme işlemi 75 m/dk kesme hızı ve 600 mm/dk ilerleme ile kuru işleme şartlarında tamamlanmıştır (Şekil 3).

Şekil 3 Cep frezeleme işlemi



Her bir cep frezeleme işleminden sonra kesici takım, takım tutucudan sökülmeden takımcı mikroskobu ile incelenmiş; beşinci

cep frezeleme işleminin ardından iş parçasının diğer yüzeyine geçilirken kesici takım takım tutucudan çıkarılarak daha detaylı olarak incelenmiştir. İş parçasının arka yüzeyinin işlenmesi amacıyla iş parçası ters çevrilerek hassas şekilde bağlanmış, yüzeyi temizlenmiş ve kesici takım takım tutucuya bağlandıktan sonra komparatör (Z saati) ile hassas boy ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Trokoidal takım yolunda kesici takımın hareket yönü ve yüzey üzerinde bıraktığı izler konuma göre değişebilmektedir. Cebin tabanındaki konumsal pürüzlülük farklılıklarını örneklemek amacıyla, her cepte beş farklı konumdan ölçüm alınmıştır. Ölçüm ucunun cep tabanına erişebilmesi için iş parçasının erişimi engelleyen bazı kısımları talaş kaldırılarak uzaklaştırılmıştır. Ölçümler, Mahr MarSurf RD18 sürücü ünitesi ve Mahr M300 terminali kullanılarak ISO 4288 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4). Her cep için elde edilen beş Ra ve beş Rz değerinin aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

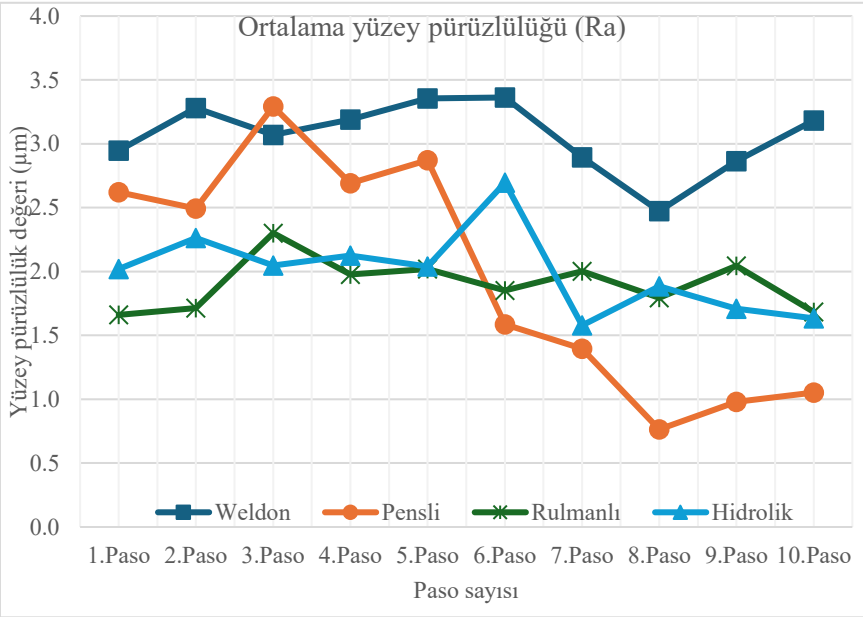
Şekil 4 Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin yapılması



Bulgular

Yapılan deneyler ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri, her bir takım tutucu için Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmuştur. Grafiklerde her cep frezeleme işlemi için beş ölçümün aritmetik ortalaması sunulmuştur.

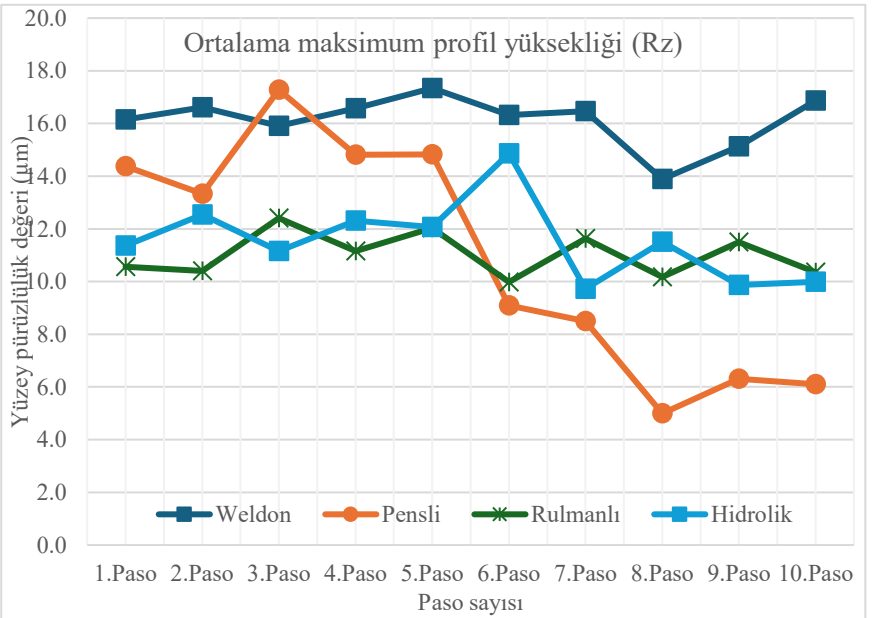
Şekil 5 Tüm takım tutucular için ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri



Şekil 5'teki ortalama Ra değerleri incelendiğinde, Weldon tutucunun üçüncü cep dışındaki tüm ceplerde en yüksek değerleri verdiği görülmektedir. Hidrolik ve rulmanlı tutucuların sonuçları birbirine yakın olmakla birlikte, aralarındaki sıralama cep numarasına göre değişmektedir. Pensli tutucu, ilk beş cepte hidrolik ve rulmanlı tutuculardan daha yüksek Ra değerleri üretmiş; üçüncü cepte Weldon tutucunun değerini de aşmıştır. Altıncı cepten itibaren ise en düşük Ra değerleri pensli tutucuyla elde edilmiştir. Bu

değişim, deney prosedüründeki yeniden bağlama aşamasıyla birlikte Tartışma bölümünde değerlendirilmiştir.

Şekil 6 Takım tutuculara göre her cepte ölçülen Rz değerlerinin ortalamaları



Şekil 6'da sunulan Rz değerleri, tutucular arasındaki genel karşılaştırma açısından Ra sonuçlarına benzer bir eğilim göstermektedir. Weldon tutucu üçüncü cep dışında en yüksek Rz değerlerini üretirken, pensli tutucu altıncı cepten itibaren en düşük değerleri vermiştir. Hidrolik ve rulmanlı tutucular arasındaki sıralama ise cep numarasına bağlı olarak değişmiştir. Ra ve Rz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, pensli tutucunun işleme serisinin ikinci yarısında gösterdiği iyileşmenin her iki pürüzlülük parametresine de yansıdığı görülmektedir.

Deneyler sırasında yapılan takımcı mikroskobu incelemelerinde, kesici takımlardaki aşınmanın düşük seviyede kaldığı gözlenmiştir. Bu bölümde yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına

odaklanılmış, takım aşınmasının ayrıntılı değerlendirilmesi ayrı bir çalışmaya bırakılmıştır.

Tartışma

Rosenthal et al. (2020), yaptıkları çalışmada aynı kesme şartlarında meydana gelen titreşimlerin takım tutucu türü ile doğrudan alakalı olduğunu ve talaşlı imalat işlemlerinin takım tutucu türünden etkileneceğini ortaya koymuştur. Yapılan bu çalışmada da elde edilen Ra ve Rz değerlerinin takım tutucu türüne bağlı olarak farklılaştığı gözlenmiştir.

Tutucular arasında gözlenen pürüzlülük farklılıkları; salgı, bağlama rijitliği, sıkma biçimi ve titreşim davranışındaki farklılıklarla ilişkili olabilir. Weldon tutucunun kesici takımı yandan sıkması, diğer tutucuların kavrama mekanizmalarından farklı bir bağlama koşulu oluşturmaktadır. Zagórski et al. (2021), farklı tutucularla gerçekleştirilen frezeleme deneylerinde tutucu türünün titreşim davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Korpysa et al. (2024) de trokoidal frezelemede tutucu türü ve kesme koşullarının süreç kararlılığıyla ilişkisini değerlendirmiştir. Bu çalışmalar, tutucu özelliklerinin işleme davranışındaki önemini desteklemektedir.

Simsek et al. (2012), kuru frezeleme koşullarında karşılaştırdıkları tutucular arasında shrink-fit tutucunun daha iyi performans gösterdiğini bildirmiştir. Mevcut çalışmada ise shrink-fit tutucu kullanılmamış; pensli, Weldon, hidrolik ve rulmanlı tutucular karşılaştırılmıştır. İlk beş cepte hidrolik ve rulmanlı tutucular daha düşük pürüzlülük değerleri verirken, sonraki beş cepte pensli tutucu öne çıkmıştır. Çalışmalar arasındaki performans farklılıkları, kullanılan tutucu grupları ve deney koşullarıyla birlikte değerlendirilebilir.

Kesici takımlar genel olarak aşındıkça kesme özellikleri kötüleşmekte ve daha kötü yüzey kalitelerine neden olmaktadır; bu durum Demir ve Adiyaman (2019) tarafından da vurgulanmıştır.

Bununla birlikte ilginç bir şekilde pensli takım tutucu ile gerçekleştirilen deneylerde son pasolarda yüzey kalitesinin önceki pasolara kıyasla iyileştiği görülmektedir. Bazı literatür kaynakları da benzer durumları rapor etmektedir. Örneğin Derani et al. (2021) ile Akhavan Niaki ve Mears (2017) takım ömrünün son kısımlarında işlenen parçanın yüzey kalitesinin iyileştiğini ortaya koymuşlardır. Bununla birlikte pensli tutucuda altıncı cepten itibaren gözlenen pürüzlülük azalması, deney prosedüründeki yeniden bağlama aşamasıyla aynı zamana denk gelmektedir. Beşinci cep sonrasında kesici takım inceleme amacıyla tutucudan çıkarılmış, yeniden bağlanmış ve iş parçasının diğer yüzeyinin işlenmesine geçilmiştir. Bu nedenle işleme serisinin ilk ve ikinci yarısı arasındaki değişim değerlendirilirken, takımın kullanımına bağlı kesici kenar değişimleriyle birlikte yeniden bağlamanın ve iş parçası bağlama koşullarının olası etkileri de dikkate alınmalıdır.

Tablo 4 İlk ve son beş cep arasında ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimi

Tutucu	Ra, cep 1–5 (µm)	Ra, cep 6–10 (µm)	Ra azalması (%)	Rz azalması (%)
Weldon	3,169	2,955	6,7	4,7
Hidrolik	2,099	1,900	9,5	5,9
Rulmanlı	1,934	1,875	3,1	5,2
Pensli	2,794	1,155	58,6	53,1

İlk beş ve son beş cebin ortalamaları karşılaştırıldığında (Tablo 4), Ra değerindeki azalma pensli tutucuda %58,6; Weldon, hidrolik ve rulmanlı tutuculara ise sırasıyla %6,7, %9,5 ve %3,1 olarak hesaplanmıştır. Pensli tutucuda Rz değerinin de %53,1 azalması, iyileşmenin her iki pürüzlülük parametresine yansıdığını göstermektedir. Yeniden bağlama bütün tutuculara uygulanmış olmakla birlikte, değişimin pensli tutucuda daha büyük olması dikkat çekicidir. Bu farklılık, yeniden bağlama sonrasında pensin oturması, takımın konumu ve salgıdaki değişimlerle ilişkili olabilir.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada dört farklı takım tutucu (pensli, Weldon, hidrolik ve rulmanlı takım tutucular) kullanılarak AA7075 alüminyum malzeme üzerinde cep frezeleme işlemi gerçekleştirilmiş ve yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Elde edilen bulgular şu şekildedir:

İncelenen deney koşullarında, dört takım tutucuyla elde edilen Ra ve Rz değerleri farklılık göstermiştir. Weldon tutucu, üçüncü cep dışında en yüksek pürüzlülük değerlerini üretmiştir. İlk beş cepte hidrolik ve rulmanlı tutucular, pensli ve Weldon tutuculara göre daha düşük değerler vermiştir. Altıncı cepten itibaren ise her iki pürüzlülük parametresi için en düşük değerler pensli tutucuyla elde edilmiştir. Pensli tutucudaki bu değişim, yeniden bağlama ve iş parçasının diğer yüzeyine geçiş aşamasından sonra gözlenmiştir.

Sonuçlar, incelenen deney serisinde tutucuların yüzey pürüzlülüğü bakımından sıralamasının işleme aşamasına göre değiştiğini göstermektedir. Bu bulgu, tutucu performansının ardışık işleme sonuçları ve yeniden bağlama koşullarıyla birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Çalışma, tek kesme hızı ve ilerleme değerinde, her tutucu için bir kesici takımla yürütülen ardışık cep frezeleme serilerini kapsamaktadır. Her cepteki beş ölçüm, bağımsız deney tekrarları yerine yüzey üzerindeki konumsal değişkenliği temsil etmektedir. Salgı ve titreşim ölçümleri yapılmamıştır. Gelecek çalışmalarda bağımsız deney serilerinin tekrarlanması, yeniden bağlama öncesi ve sonrasında salgı ve titreşimin ölçülmesi ve farklı kesme koşullarının incelenmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2023-056.

Kaynakça

Akhavan Niaki, F., & Mears, L. (2017). A comprehensive study on the effects of tool wear on surface roughness, dimensional integrity and residual stress in turning IN718 hard-to-machine alloy. Journal of Manufacturing Processes, 30, 268–280. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.09.016

Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2020). Callister's materials science and engineering. John Wiley & Sons.

Çakır, M. C. (2006). Modern talaşlı imalatın esasları (2. baskı). Nobel Yayın Dağıtım.

Davim, J. P. (Ed.). (2008). Machining: Fundamentals and recent advances. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5

Demir, Z., & Adiyaman, O. (2019). Investigation of influence of approach angle and chip slenderness ratio on vibration, chip formation and surface quality in turning of AISI 1050 steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41(10), Article 467. https://doi.org/10.1007/s40430-019-1977-3

Derani, M. N., Ratnam, M. M., & Nasir, R. M. (2021). Improved measure of workpiece surface deterioration during turning using non-contact vision method. Precision Engineering, 68, 273–284. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.12.016

Gialanella, S., & Malandruccolo, A. (2020). Aerospace alloys. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24440-8

Groover, M. P. (2010). Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems (4th ed.). John Wiley & Sons.

Hbaieb, M., Othmani, R., & Bouzid, W. (2011). Time modeling in high-speed machining of mold pocket. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53(1–4), 113–120. https://doi.org/10.1007/s00170-010-2844-7

Jacso, A., & Szalay, T. (2018). Analysing and optimizing 2.5D circular pocket machining strategies. In A. Hamrol, O. Ciszak, S. Legutko, & M. Jurczyk (Eds.), Advances in manufacturing (pp. 355–364). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_34

Korpysa, J., Zagórski, I., Weremczuk, A., & Habrat, W. (2024). Process stability analysis during trochoidal milling of AZ91D magnesium alloy using different toolholder types. Applied Sciences, 14(9), Article 3616. https://doi.org/10.3390/app14093616

Ortner, H. M., Ettmayer, P., & Kolaska, H. (2014). The history of the technological progress of hardmetals. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 44, 148–159. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.07.014

Pateloup, V., Duc, E., & Ray, P. (2010). Bspline approximation of circle arc and straight line for pocket machining. Computer-Aided Design, 42(9), 817–827. https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.05.003

Pinar, A. M. (2013). Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of

AA5083 aluminum alloy via Taguchi method. Arabian Journal for Science and Engineering, 38(3), 705–714. https://doi.org/10.1007/s13369-012-0372-5

Rosenthal, O., Hintze, W., & Möller, C. (2020). Assessment of tool holder performance in roughing with end mills: Process dynamics and surface formation. Production Engineering, 14, 253–263. https://doi.org/10.1007/s11740-019-00944-w

Simsek, B. T., Kuram, E., & Ozcelik, B. (2012). The performance of different tool holders in dry milling. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 11(3), 308–326. https://doi.org/10.1504/IJMMM.2012.046890

Zagórski, I., Korpysa, J., & Weremczuk, A. (2021). Influence of tool holder types on vibration in rough milling of AZ91D magnesium alloy. Materials, 14(10), Article 2517. https://doi.org/10.3390/ma14102517

BÖLÜM 3

AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ FARKLI TAKIM TUTUCULAR İLE CEP FREZELENMESİNDE TAKIM AŞINMASI DAVRANIŞININ TAKIMCI MİKROSKOBU VE SEM-EDX ANALİZLERİ İLE İNCELENMESİ

FİKRET SÖNMEZ[1]

Giriş

Günümüzde yüksek hassasiyet gerektiren makine parçalarının üretiminde talaşlı imalat temel üretim yöntemlerinden biri olarak kullanılmaktadır (Groover, 2010). Talaşlı imalatta üretim maliyetini ve işleme performansını belirleyen en önemli unsurlardan biri kesici takım ömrüdür. Kesici takımın aşınması yalnızca takım maliyetini artırmakla kalmamakta; yüzey kalitesinin bozulmasına, boyutsal hatalara ve üretim sürelerinin uzamasına da neden olmaktadır (Çakır, 2006). Bu nedenle takım aşınmasının kontrol altına alınması ve aşınma mekanizmalarının doğru şekilde açıklanması talaşlı imalat araştırmalarının temel konuları arasında yer almaktadır.

[1] Doç. Dr., Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-1718-892X

Son yıllarda kesici takım geometrileri ve kaplama teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde daha yüksek kesme hızlarında daha uzun takım ömürleri elde edilebilmektedir (Çakır, 2006; Davim, 2008; Ortner et al., 2014). Bununla birlikte takım aşınması; kesme hızı, ilerleme, takım malzemesi, iş parçası malzemesi, soğutma koşulları ve takım bağlama sistemi gibi çok sayıda parametreden etkilenmektedir.

Alüminyum alaşımları (ISO 513 N sınıfı), düşük yoğunlukları ve yüksek özgül dayanımları nedeniyle özellikle havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Callister & Rethwisch, 2020; Gialanella & Malandruccolo, 2020). Buna karşın işleme sırasında görülen sıvanma ve yığma kenar (built-up edge, BUE) oluşumu, takım aşınması davranışını önemli ölçüde etkileyebilmektedir.

Cep frezeleme işlemi, kalıp ve havacılık parçalarının işlenmesinde yaygın olarak tercih edilen frezeleme operasyonlarından biridir. İşleme sırasında meydana gelen takım aşınması; kesme parametreleri, takım yolu stratejisi ve takım tutucu özelliklerinden etkilenmektedir (Hbaieb et al., 2011; Jacso & Szalay, 2018; Pateloup et al., 2010; Pinar, 2013).

Takım tutucular; kesici takımın salgı miktarını, rijitliğini ve titreşim davranışını etkileyerek takım aşınması davranışını doğrudan etkileyebilmektedir (Rosenthal et al., 2020; Simsek et al., 2012). Simsek et al. (2012), farklı takım tutucuların takım ömrü üzerinde önemli farklılıklara neden olduğunu; shrink fit takım tutucuların daha iyi, hidrolik takım tutucuların ise daha düşük performans sergilediğini bildirmiştir. Bu durum, takım tutucu seçiminin yalnızca yüzey kalitesini değil, takım aşınmasının ilerleyişini de etkileyebileceğini göstermektedir.

Takım tutucuların takım ömrüne etkisini inceleyen çalışmalar bulunmakla birlikte, pensli ve Weldon takım tutucuların AA7075

alaşımının cep frezelenmesindeki takım aşınması davranışını takımcı mikroskobu ile birlikte SEM ve SEM-EDX analizleri kullanarak değerlendiren çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada AA7075 alüminyum alaşımı üzerinde dört farklı takım tutucu (pensli, Weldon, hidrolik ve rulmanlı) kullanılarak gerçekleştirilen cep frezeleme deneylerinde takım aşınması davranışı takımcı mikroskobu, SEM ve SEM-EDX analizleri birlikte kullanılarak ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Materyal ve Yöntem

Materyal

Bu çalışmada, 6,15 mm kalınlıkta AA7075-T6 malzeme kullanılmıştır. AA7075 malzemeye ait kimyasal kompozisyon Tablo 1'de, T6 temper durumuna ait mekanik özellikler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1 AA7075 malzemeye ait kimyasal kompozisyon (%)

Element	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si
Ağırlıkça %	87,1-91,4	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	En fazla 0,5	En fazla 0,4

Tablo 2 AA7075-T6 malzemeye ait mekanik özellikler

Mekanik özellik	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Vickers)
Değer	503	570	11	175

Cep frezeleme deneyleri Ø3 mm parmak freze (AM2SCD0300A060, Mitsubishi) takımları ile gerçekleştirilmiştir. Bu kesici takımlar hidrolik, Weldon, rulmanlı ve pensli takım tutucular kullanılarak tezgâha bağlanmıştır.

Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneyler öncesi AA7075 malzemelerin deneylere hazır duruma getirilmesi amacıyla CNC dik işleme merkezinde yüzey temizliği ve boyutsal düzeltme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Ardından Tablo 3'te verilen kesme parametreleri kullanılarak her bir takım tutucu tipi için 10 adet cep frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3 Deneylerde kullanılan kesme parametreleri

Kesme Parametresi	Kullanılan değer
Kesme hızı	75 m/dk
Kesme hızına karşılık gelen devir sayısı	7958 dev/dk
İlerleme	600 mm/dk
Diş başına ilerleme	0,0377 mm/diş
Yana kayma (Stepover)	Takım çapının %10'u
Her pasoda kesme derinliği (Depth per cut)	0,6 mm
Trokoidal genişlik (Trochoidal width)	Takım çapının %60'ı
Minimum trokoidal genişlik	Takım çapının %5'i
Yana kayma limiti (Stepover limit)	Takım çapının %100'ü
Trokoidal yana kayma (Trochoidal step ahead)	Takım çapının %10'u

Takım Aşınması Kriterleri

Takım aşınması incelemelerine ait uluslararası standartlar işlem türlerine göre ayrılmaktadır. Torna tezgâhında yapılan ve tek noktalı kesici takımlar için kullanılan ISO 3685 (Tool-life testing with single-point turning tools) standardının yanında, freze tezgâhında kullanılan takımlara yönelik standartlar da bulunmaktadır. Düzlem yüzey frezeleme işlemleri için ISO 8688-1 (Tool life testing in milling – Part 1: Face milling), parmak frezeler için ise ISO 8688-2 (Tool life testing in milling – Part 2: End milling) standardı kullanılmaktadır. Mevcut çalışmada ISO 8688-2 standardındaki aşınma tanımları ve takım ömrü kriterleri değerlendirmeye referans olarak alınmıştır (Şekil 1).

ISO 8688-2 standardına göre takım ömrü kontrolünde kullanılan kriterlerin başında yan yüzey aşınması (serbest yüzey aşınması/flank wear) gelmektedir. Yan yüzey aşınması kesici takımın kesme yapan dişleri üzerinde meydana gelir ve aşınma miktarı işleme şartlarına bağlı olarak farklılaşabilir. Aşınma tüm

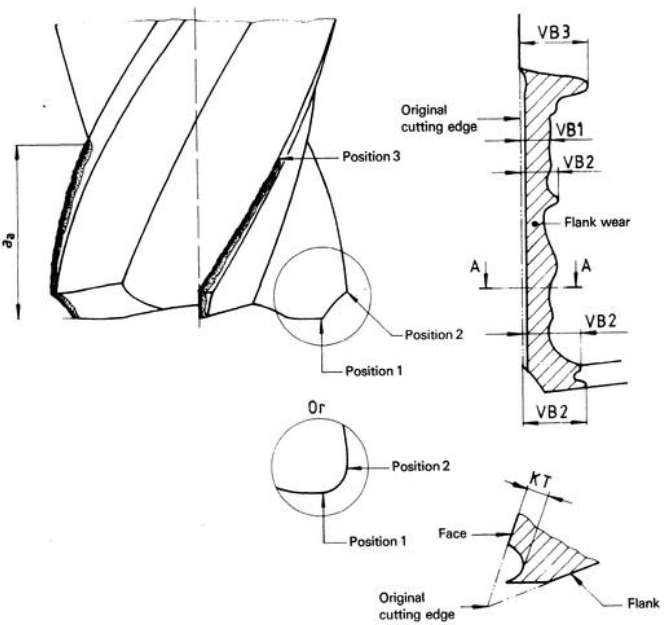
kesici kenar boyunca nispeten düzenli ise VB olarak tanımlanmaktadır. İlgili standartlarda tanımlanan başlıca takım ömrü kriterleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4 ISO 8688-2 ve ISO 3685 standartlarında tanımlanan başlıca takım ömrü kriterleri

Standart	İşlem türü	Aşınma kriteri	Takım ömrü sınırı
ISO 8688-2	Parmak frezeleme	Düzenli yan yüzey aşınması (VB)	300 µm (0,3 mm)
ISO 8688-2	Parmak frezeleme	Lokal aşınma (localized wear)	500 µm (0,5 mm)
ISO 3685	Tornalama	Maksimum yan yüzey aşınması (VBmax)	600 µm (0,6 mm)

Tablo 4'ten görüldüğü üzere, tornalama ve frezeleme işlemlerinde kullanılan takım ömrü kriterlerinin maksimum aşınma değerleri birbirinden farklılık göstermektedir.

Şekil 1 ISO 8688-2'ye göre takım aşınması

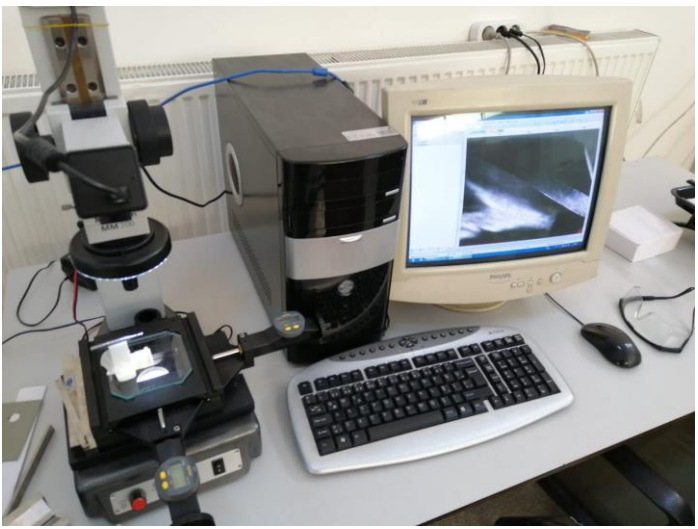


Deneylerin ve Aşınma İncelemelerinin Gerçekleştirilmesi

Her bir cep frezeleme işleminden sonra kesici takım, takım tutucudan sökülmeden takımcı mikroskobu ile incelenmiş; iş parçalarının değiştirildiği her 5 cep frezeleme işlemi sonrasında ise kesici takım takım tutucudan çıkarılarak daha detaylı olarak incelenmiştir. İş parçasının arka yüzeyinin işlenmesi amacıyla iş parçası ters çevrilerek hassas şekilde bağlanmıştır.

Takım aşınmasının incelenmesi için Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Mahr MM200 takımcı mikroskobu kullanılmıştır. Bu mikroskop 5 MP OEM bir kamera ile entegre edilerek ölçüm fotoğraflarının dijital ortama nakledilmesi sağlanmıştır (Şekil 2).

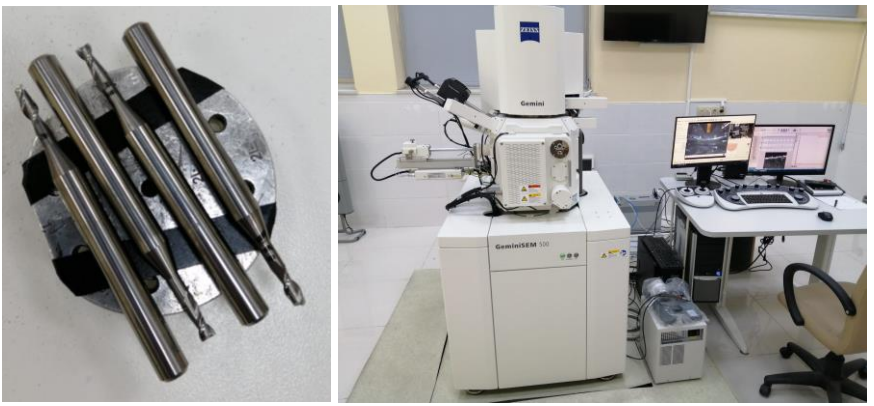
Şekil 2 Takım aşınması ölçümünün gerçekleştirilmesi



Talaşlı imalat işlemleri sonrası takım yüzeylerinin incelenmesi amacıyla takımlar, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) analizlerine tabi tutulmuştur. SEM ve SEM-EDX analizleri ZEISS GeminiSEM 500 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri, deneylerin

tamamlanmasının ardından her takım tutucuda kullanılan kesici takım (her tutucu için bir adet takım) üzerinde, takımların üst yüzeylerinden gerçekleştirilmiştir. Düşük büyütmeli (makro) çekimler genel aşınma morfolojisinin, yüksek büyütmeli (mikro) çekimler ise olası yığma kenar oluşumunun incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Kesici takım yüzeyinde talaş birikintileri beklendiğinden, yüzeyin seçilen belirli bölge ve noktalarında element tespiti için SEM-EDX analizi yapılmış; EDX ölçümleri pensli ve Weldon takım tutuculardaki kullanılan kesici takımlar üzerinden alınmıştır (Şekil 3).

Şekil 3 SEM ve SEM-EDX ölçümleri için yerleştirme ve ölçümlerin yapıldığı cihaz

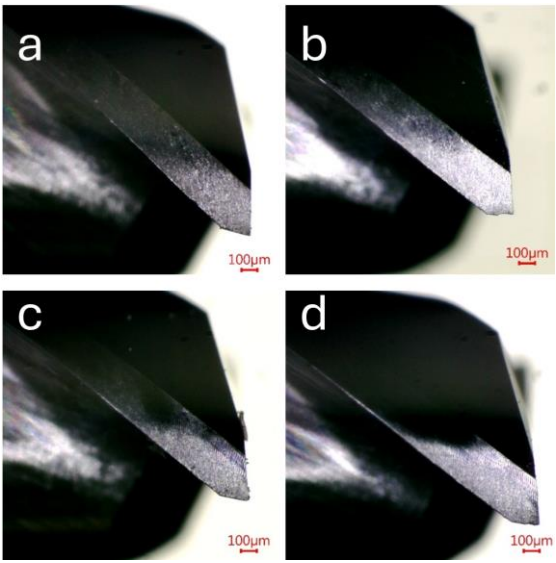


Bulgular

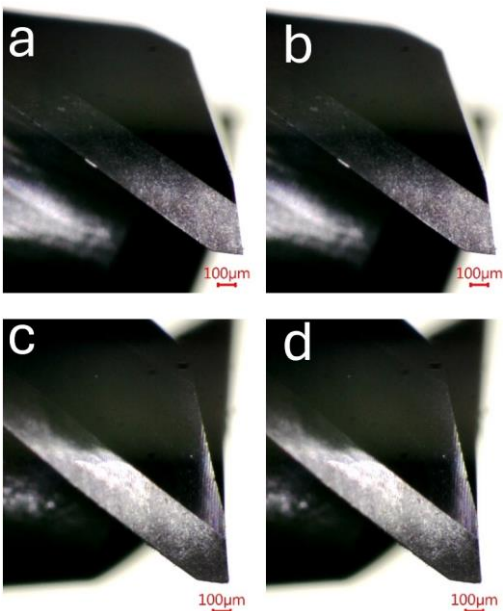
Takımcı Mikroskobu ile Takım Aşınması İncelemeleri

Deneylerin tamamlanmasının ardından takımcı mikroskobu ile elde edilen görüntüler Şekil 4 ile Şekil 6 arasında sunulmuştur.

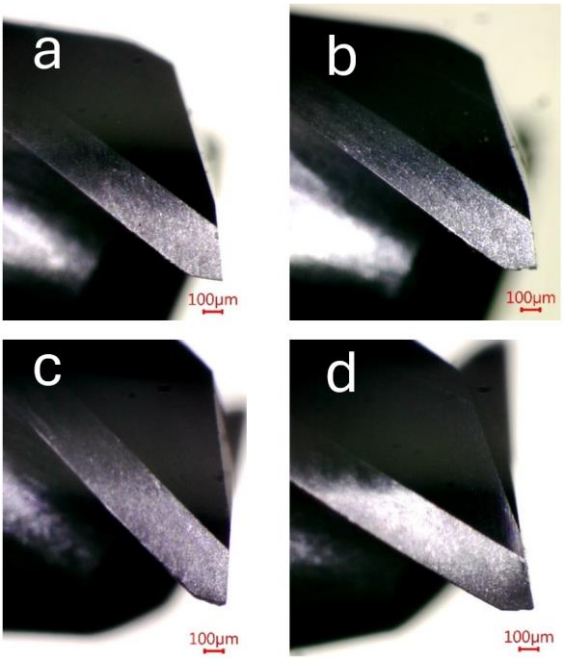
Şekil 4 Birinci cep sonunda takım aşınması a) Pensli b) Weldon c) Rulmanlı d) Hidrolik



Şekil 5 Beşinci cep sonunda takım aşınması a) Pensli b) Weldon c) Rulmanlı d) Hidrolik

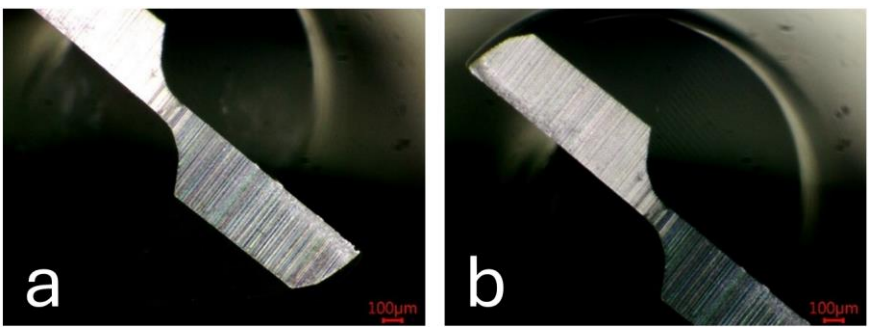


Şekil 6 Onuncu cep sonunda takım aşınması a) Pensli b) Weldon c) Rulmanlı d) Hidrolik



Şekil 4–6'da sunulan görüntülerde aşınmanın genel olarak düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Aşınmanın düşük seviyede kalmasında kullanılan düşük kesme hızının etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca takımların kesici kenarlarının üstten çekilen fotoğrafları ile de takım aşınması araştırılmıştır (Şekil 7).

Şekil 7 Takım aşınmasının açılı incelemesi

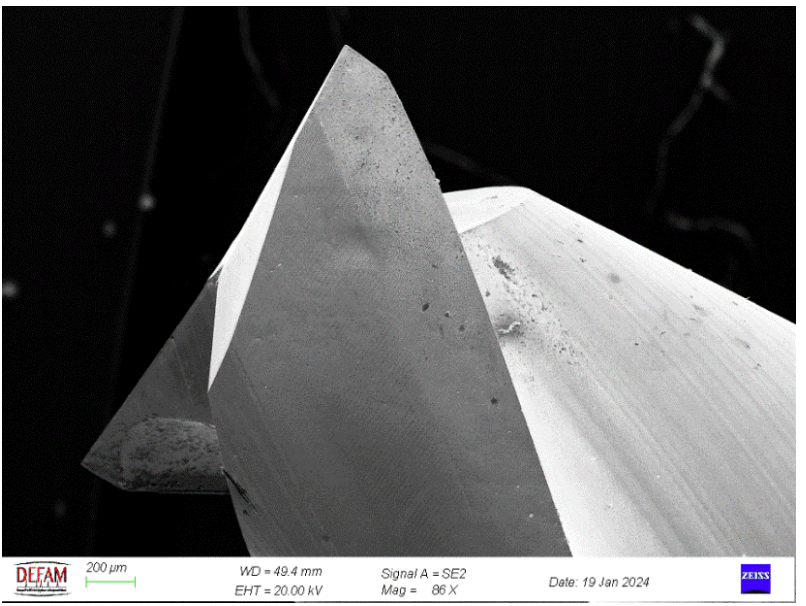


Mikroskobik görüntüler üzerinden yapılan nitel değerlendirme, aşınmanın genel olarak düşük seviyede kaldığını göstermiştir.

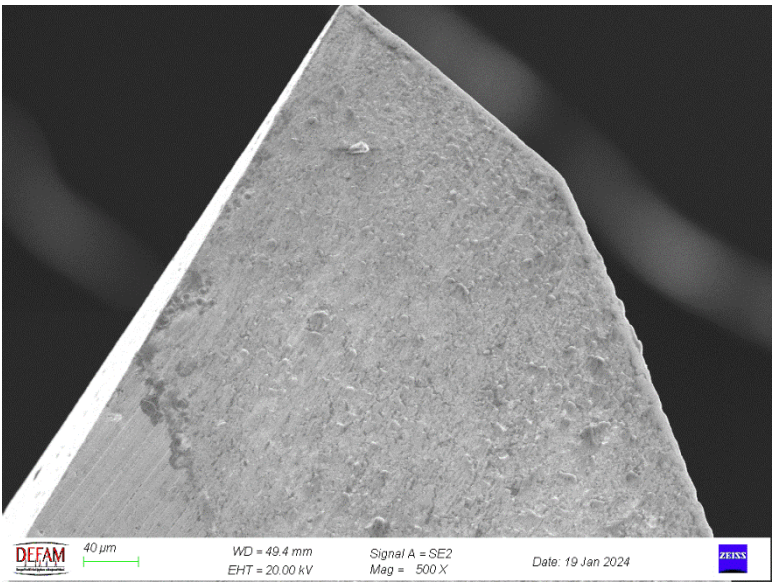
SEM ve SEM-EDX Analiz Sonuçları

SEM fotoğrafları yaklaşık 86X ile 1000X büyütme koşulları altında ve 20,00 kV hızlandırma gerilimi kullanılarak alınmıştır. Elde edilen SEM görüntüleri Şekil 8 ile Şekil 13 arasında verilmiştir.

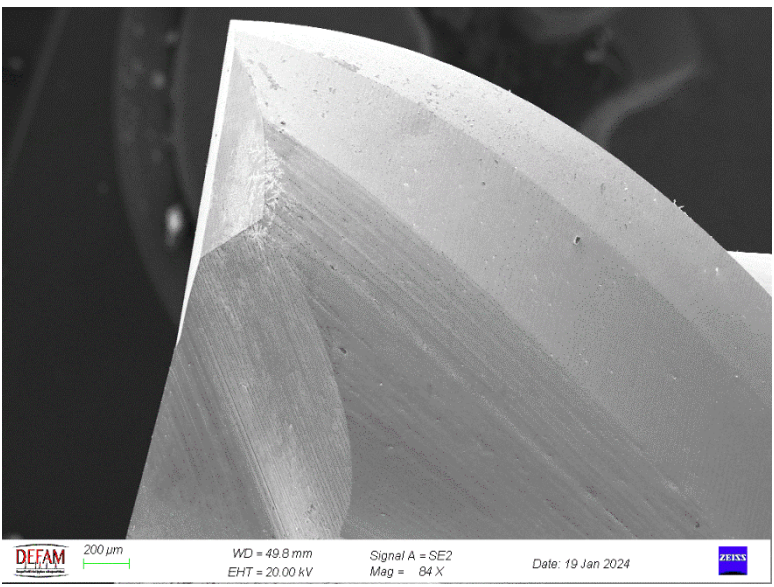
Şekil 8 Pensli takım tutucuda kullanılan kesici takıma ait makro SEM çekimi



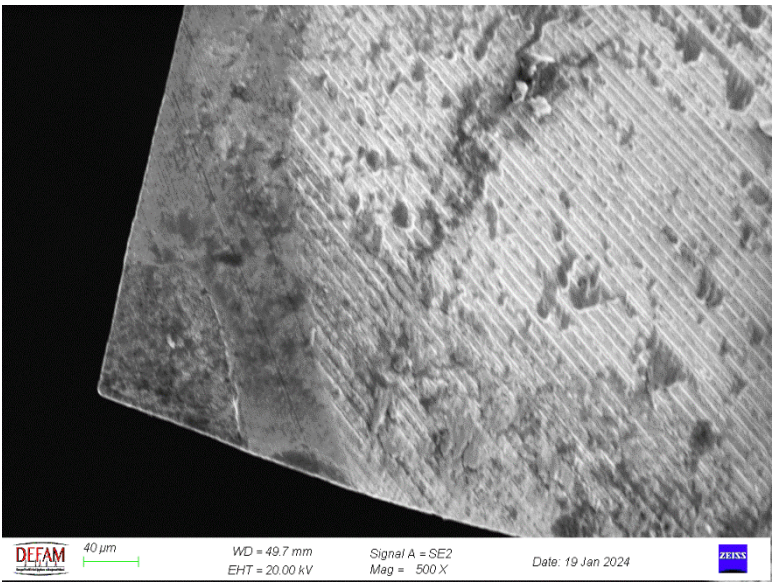
Şekil 9 Pensli takım tutucuda kullanılan kesici takıma ait mikro SEM çekimi



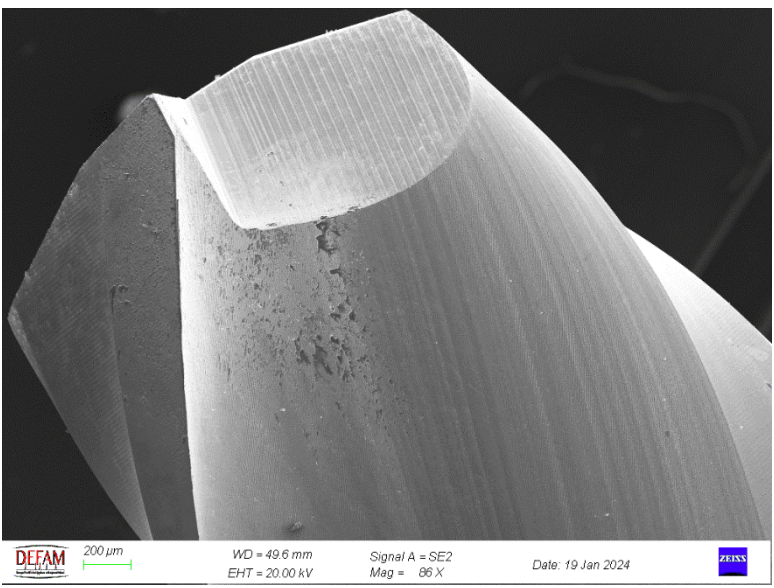
Şekil 10 Weldon takım tutucuda kullanılan kesici takıma ait makro SEM çekimi



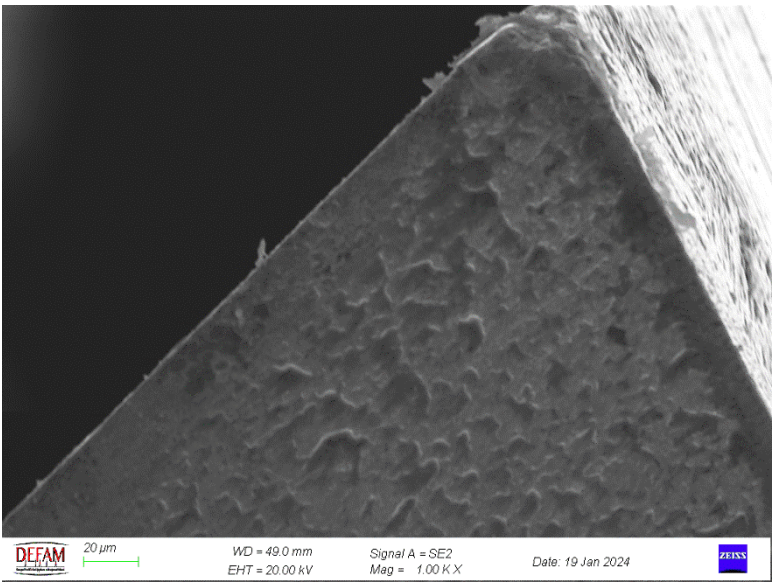
Şekil 11 Weldon takım tutucuda kullanılan kesici takıma ait mikro SEM çekimi



Şekil 12 Rulmanlı takım tutucuda kullanılan kesici takıma ait makro SEM çekimi



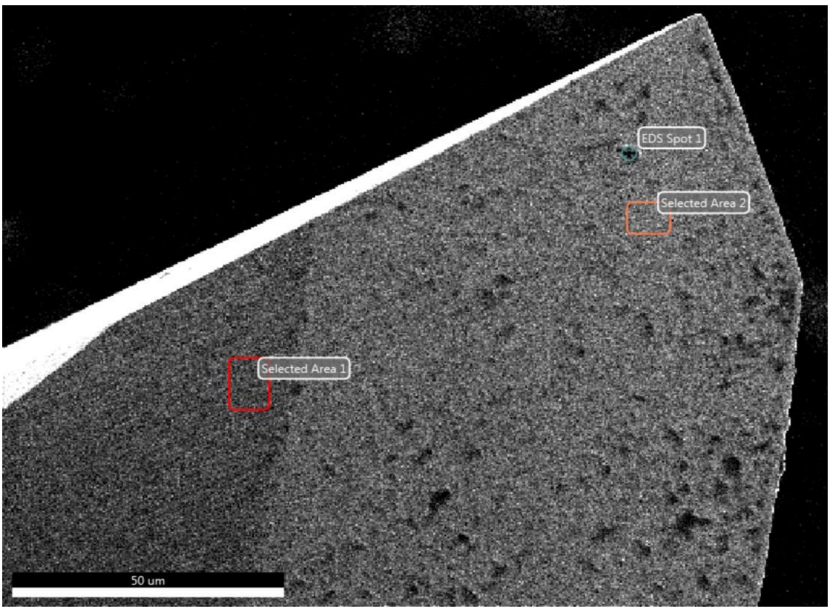
Şekil 13 Rulmanlı takım tutucuda kullanılan kesici takıma ait mikro SEM çekimi



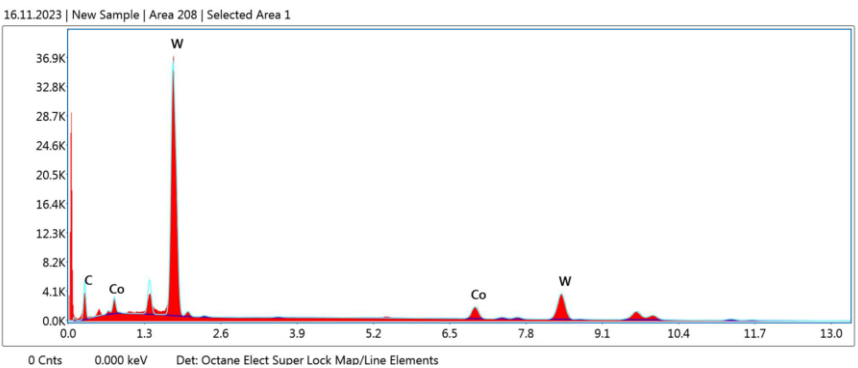
SEM görüntüleri, takımcı mikroskobu incelemelerinde gözlenen düşük seviyeli aşınma bulgularıyla genel olarak uyumludur. İncelenen bölgelerde belirgin krater aşınması veya pullanma gözlenmemiştir. Yüzeydeki birikintilerin iş parçasından malzeme transferi ve olası yığma kenar (BUE) oluşumuyla ilişkisini değerlendirmek amacıyla, pensli ve Weldon tutucularda kullanılan takımların seçilen bölgelerinde EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.

Pensli takım tutucu ile yapılan deneyler sonucunda kesici takımın yan yüzeyinden biri noktasal ikisi alansal olmak üzere üç adet EDX ölçümü alınmıştır. Ölçüm alınan bölgeler Şekil 14'te görülmektedir. 1 numaralı alan (Area 1) için yapılan EDX analizleri Şekil 15 ve Tablo 5'te sunulmuştur.

Şekil 14 Pensli takım tutucu ile kullanılan kesici takım için EDX analizi alınan bölgeler



Şekil 15 Pensli takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı alan EDX analizi

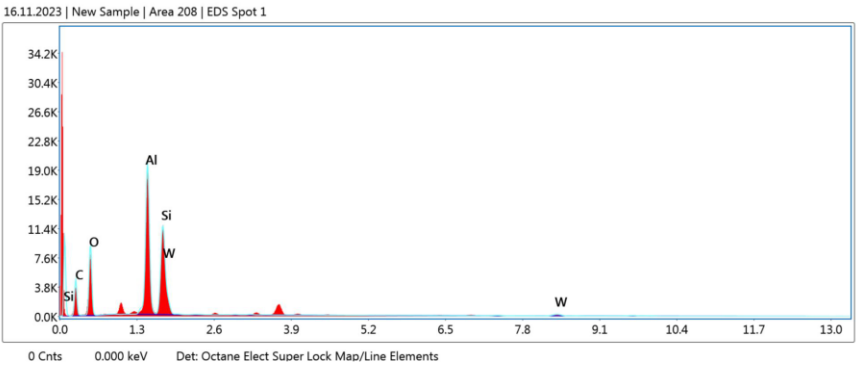


Tablo 5 Pensli takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı alan SEM-EDX analiz tablosu

Element	Ağırlıkça %	Atomca %	Net Int.	Hata %	Kratio	Z	A	F
C K	20,92	77,37	1254,22	9,42	0,0709	1,4495	0,2337	1
CoK	6,87	5,18	1241,95	4,84	0,0903	1,0969	0,9514	1,2593
W L	72,21	17,45	3010,5	3,22	0,6009	0,8218	1,0135	0,999

Yapılan incelemelerde (Şekil 15 ve Tablo 5) Tungsten (W), Kobalt (Co) ve Karbon (C) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Yekpare karbür kesici takımların malzemeleri hemen hemen her durumda tungsten karbür (WC) toz malzemelerden oluşmakta ve yapı içerisinde tozların birleştirilmesi amacıyla bağlayıcı olarak kobalt kullanılmaktadır. Bu sonuçlar, 1 numaralı alanda tespit edilen elementlerin WC-Co esaslı takım malzemesiyle uyumlu olduğunu göstermektedir; bu analizde alüminyum tespit edilmemiştir. Analizlerde görülen karbon büyük ölçüde takımı oluşturan tungsten karbür (WC) yapısından kaynaklanmakla birlikte, EDX yönteminde hafif elementlerin nicel tayinindeki belirsizlikler ve olası yüzey kontaminasyonu karbon değerlerini yükseltebilmektedir; bu nedenle karbon oranları çalışma kapsamında nitel olarak değerlendirilmiştir. 1 numaralı nokta için EDX analizleri Şekil 16 ve Tablo 6'da sunulmuştur.

Şekil 16 Pensli takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı nokta EDX analizi



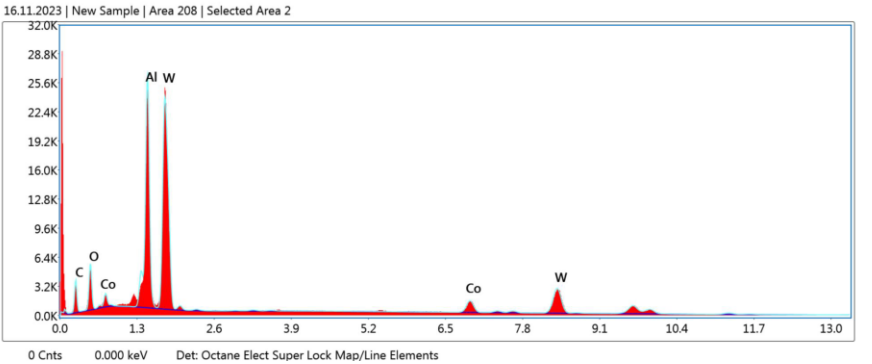
Tablo 6 Pensli takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı nokta SEM-EDX analiz tablosu

Element	Ağırlıkça %	Atomca %	Net Int.	Hata %	Kratio	Z	A	F
C K	33,59	48,53	1113,11	9,97	0,0676	1,0843	0,1856	1
O K	28,56	30,98	2517,25	9,31	0,0648	1,0389	0,2182	1
AlK	19,62	12,62	7515,99	3,4	0,1434	0,9259	0,7879	1,0019
SiK	11,75	7,26	3991,31	4,55	0,0776	0,9465	0,6968	1,0015
W L	6,48	0,61	181,05	13,68	0,0388	0,5662	1,0503	1,008

Şekil 16 ve Tablo 6 kullanılarak yapılan incelemelerde Tungsten (W), Oksijen (O), Alüminyum (Al), Silisyum (Si) ve Karbon (C) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Alüminyumun tespit edilmesi, incelenen bölgede iş parçasından malzeme transferi bulunduğunu desteklemektedir. Yerel EDX analizinde belirlenen silisyum oranı, Tablo 1'deki alaşım bileşiminden belirgin biçimde yüksektir. Si Kα ve W Mα çizgilerinin yakın enerjilerde bulunması nedeniyle pik çakışması, bu değerin yorumlanmasında dikkate alınmalıdır. Alüminyum içeren yüzey birikintileri ve SEM

görüntüleri, yerel BUE oluşumuyla uyumludur. 2 numaralı alan için EDX analizleri Şekil 17 ve Tablo 7'de sunulmuştur.

Şekil 17 Pensli takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 2 numaralı alan EDX analizi



Tablo 7 Pensli takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 2 numaralı alan SEM-EDX analiz tablosu

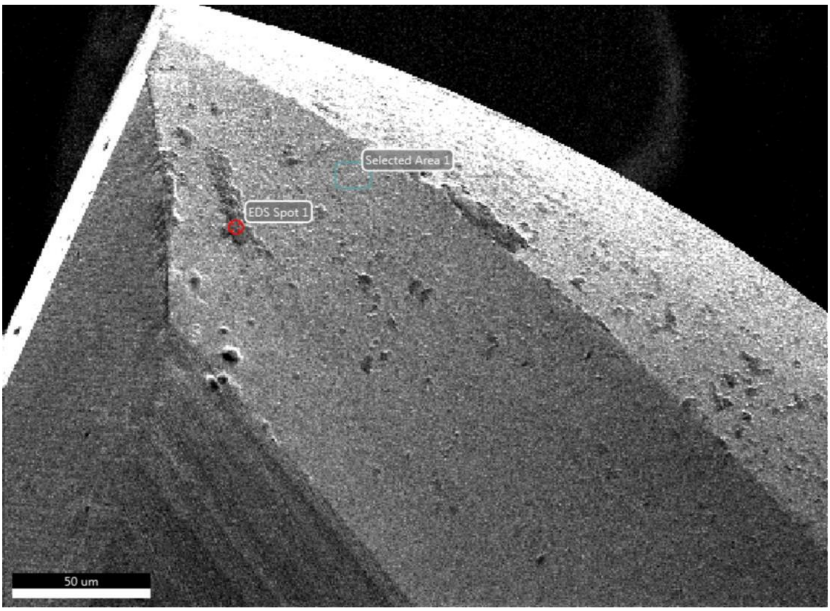
Element	Ağırlıkça %	Atomca %	Net Int.	Hata %	Kratio	Z	A	F
C K	15,85	44,22	845,45	10,09	0,0398	1,3239	0,1898	1
O K	9,79	20,51	1388,4	9,58	0,0277	1,2743	0,222	1
AlK	18,72	23,25	9824,62	4,47	0,1454	1,1469	0,6766	1,0011
CoK	4,84	2,75	955,68	4,92	0,0579	0,9925	0,9682	1,2466
W L	50,8	9,26	2295,44	3,9	0,382	0,7338	1,0255	0,9994

Şekil 17 ve Tablo 7'de, takım malzemesiyle uyumlu W, Co ve C elementlerine ek olarak O ve Al tespit edilmiştir. Alan 1'den farklı olarak bu bölgede alüminyum bulunması, yerel iş parçası yapışmasını desteklemektedir.

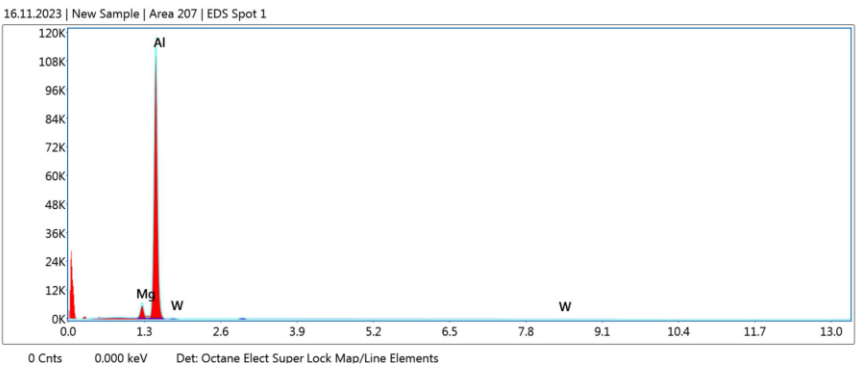
Weldon takım tutucu ile yapılan deneyler sonucunda kesici takımın yan yüzeyinden biri noktasal biri alansal olmak üzere iki adet EDX ölçümü alınmıştır. Ölçüm alınan bölgeler Şekil 18'de

görülmektedir. 1 numaralı nokta (Spot 1) için yapılan EDX analizleri Şekil 19 ve Tablo 8'de sunulmuştur.

Şekil 18 Weldon takım tutucu ile kullanılan kesici takım için EDX analizi alınan bölgeler



Şekil 19 Weldon takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı nokta EDX analizi

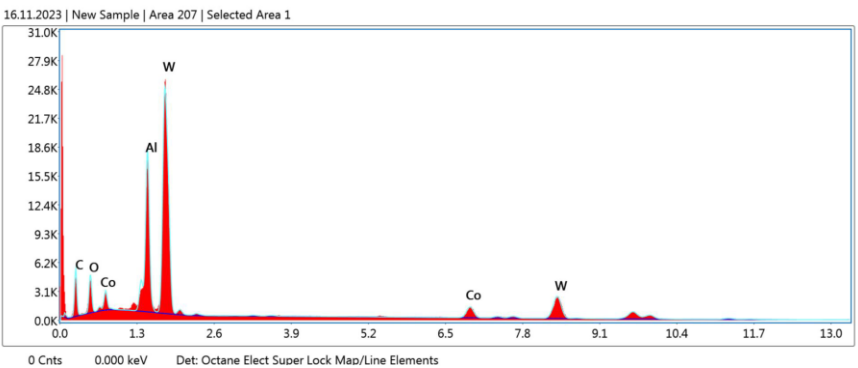


Tablo 8 Weldon takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı nokta SEM-EDX analiz tablosu

Element	Ağırlıkça %	Atomca %	Net Int.	Hata %	Kratio	Z	A	F
MgK	4,62	5,18	2304,82	2,29	0,0447	1,0426	0,9227	1,0074
AlK	93,49	94,54	44431,16	1,91	0,8606	1,0044	0,9163	1,0001
W L	1,89	0,28	55,98	30,49	0,0122	0,6148	1,0447	1,0069

Yapılan incelemelerde (Şekil 19 ve Tablo 8) Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al) ve Tungsten (W) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Alüminyum işlenen AA7075 alaşımının ana elementi, magnezyum ise alaşımın temel alaşım elementlerinden biridir. Ölçüm yapılan bölgede hesaplanan çok yüksek Al oranı, bu bölgede iş parçası malzemesine ait belirgin bir yapışmanın bulunduğunu göstermekte olup yığma kenar (BUE) oluşumu ile uyumludur. 1 numaralı alan için EDX analizleri Şekil 20 ve Tablo 9'da sunulmuştur.

Şekil 20 Weldon takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı alan EDX analizi



Tablo 9 Weldon takım tutucu ile kullanılan kesici takım için 1 numaralı alan SEM-EDX analiz tablosu

Element	Ağırlıkça %	Atomca %	Net Int.	Hata %	Kratio	Z	A	F
C K	22,22	56,06	1207,77	9,68	0,0617	1,3009	0,2133	1
O K	9,19	17,41	1121,18	9,78	0,0244	1,2523	0,2119	1
AlK	14,1	15,83	6668,52	4,49	0,1083	1,1271	0,6808	1,0011
CoK	4,91	2,53	870,57	4,86	0,0581	0,9746	0,9713	1,2484
W L	49,57	8,17	1999,2	3,93	0,3659	0,7196	1,0264	0,9994

Şekil 20 ve Tablo 9 kullanılarak yapılan incelemelerde Karbon (C), Oksijen (O), Alüminyum (Al), Kobalt (Co) ve Tungsten (W) elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. İncelenen bu alanda hem kesici takımı oluşturan elementlerin hem de işlenen malzeme olan AA7075'e ait elementlerin varlığı görülmektedir. Bu durum kısmi bir yığma kenar oluşumu ile uyumludur.

Yapılan tüm EDX ölçümlerinin özeti, karşılaştırma kolaylığı açısından Tablo 10'da sunulmuştur. Olası mekanizmalar ise Tablo 11'de sunulmuştur.

Tablo 10 EDX ölçümlerinin karşılaştırmalı özeti (ağırlıkça %)

Ölçüm	**C**	**O**	**Al**	**Si**	**Mg**	**Co**	**W**
Pensli - Alan 1	20,92	-	-	-	-	6,87	72,21
Pensli - Nokta 1	33,59	28,56	19,62	11,75	-	-	6,48
Pensli - Alan 2	15,85	9,79	18,72	-	-	4,84	50,80
Weldon - Nokta 1	-	-	93,49	-	4,62	-	1,89
Weldon - Alan 1	22,22	9,19	14,10	-	-	4,91	49,57

Tablo 11 EDX ölçümlerinin değerlendirilmesi

Ölçüm	**Değerlendirme**
Pensli - Alan 1	Takım malzemesi (WC-Co)
Pensli - Nokta 1	İş parçası yapışması (BUE ile uyumlu)
Pensli - Alan 2	Kısmi yapışma
Weldon - Nokta 1	Belirgin yapışma (BUE ile uyumlu)
Weldon - Alan 1	Kısmi yapışma

Tartışma

Kesici takım aşınması; kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve soğutma koşulları gibi birçok etkene bağlıdır. Literatürde kesme hızının takım aşınması ve takım ömrü üzerindeki etkisi farklı işleme koşullarında incelenmiştir (Ding & He, 2011; Diniz et al., 2016; Letot et al., 2016; Santhanakumar et al., 2017; Wang et al., 2021). Mevcut çalışmada aşınmanın düşük seviyede kalması, kullanılan düşük kesme hızıyla ilişkili olabilir.

Rosenthal et al. (2020), aynı kesme şartlarında meydana gelen titreşimlerin takım tutucu türü ile doğrudan alakalı olduğunu ve talaşlı imalat işlemlerinin takım tutucu türünden etkileneceğini ortaya koymuştur. Simsek et al. (2012) yaptıkları çalışmada ise kullanılan üç farklı kesme hızı için rulmanlı tutucuların nispeten kötü sonuçlar verdiğini, hidrolik tutucuların ise en kötü takım ömrüne sahip olduğunu belirlemiştir. Mevcut çalışmada tutucuların değerlendirilmesi, 10 cep frezeleme işlemi boyunca gözlenen aşınma davranışıyla sınırlıdır; takım ömrü sonu belirlenmemiştir. Benzer şekilde Korpysa et al. (2024), bu çalışmada da kullanılan trokoidal frezeleme stratejisinde takım tutucu türünün süreç kararlılığı ve titreşim davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Literatürde sıklıkla görülen krater aşınması bu çalışmada belirgin olarak gözlenmemiştir. Pekşen ve Kalyon (2021), yan yüzey aşınmasının yanında belirgin krater aşınması tespit etmiş; benzer şekilde Wu et al. (2021) da belirgin krater aşınması ile karşılaşmıştır.

Mevcut deneylerde belirgin krater aşınması gözlenmemesi, kullanılan kesme koşulları ve toplam işleme süresiyle ilişkili olabilir.

Kesici takım yüzeylerinde yapılan EDX analizlerinde alüminyum, Weldon tutucuda kullanılan takımın incelenen noktasında ise ayrıca magnezyum tespit edilmiştir. Bu bulgular iş parçasından malzeme transferini desteklemekte ve SEM görüntüleriyle birlikte yerel BUE oluşumuyla uyum göstermektedir. Demir ve Adiyaman (2019), yaptıkları çalışmada diğer aşınma türlerinin yanında belirgin yığma kenar oluşumu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada da benzer şekilde yığma kenar oluşumu gözlenmiş olsa da anılan çalışmadaki kadar belirgin bir oluşum gözlenmemiştir. Medina et al. (2025) da AA7075-T6 alaşımının işlenmesinde SEM-EDX analizleri ile kesici takım ucunda alüminyum ve magnezyum ağırlıklı yapışmalar tespit etmiş ve yığma kenarın özellikle düşük kesme hızlarında takım-iş parçası etkileşiminde öne çıkan mekanizma olduğunu raporlamıştır. Mevcut çalışmada gözlenen kısmi BUE oluşumu bu bulgularla uyumludur.

Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada dört farklı takım tutucu (pensli, Weldon, hidrolik ve rulmanlı takım tutucular) kullanılarak AA7075 alüminyum malzeme üzerinde cep frezeleme işlemi gerçekleştirilmiş ve takım aşınması davranışı incelenmiştir. Elde edilen bulgular şu şekildedir:

Takım aşınması kesme hızı ile doğrudan ilişkilidir ve kesme hızının olması gerekenden düşük seçilmesi takım aşınmasının tespit edilmesini ve raporlanmasını güçleştirmektedir. Bu çalışmada tezgâh kapasitesi nedeniyle kullanılan düşük kesme hızı, takım ömrü açısından takım tutucular arasında belirgin fark oluşmamasına neden olmuştur.

İncelenen bölgelerde belirgin krater aşınması gözlenmemiştir. Pensli ve Weldon tutuculardaki kullanılan takımların

seçilen bölgelerindeki SEM-EDX analizleri, iş parçasından malzeme transferini destekleyen yüzey yapışmaları ortaya koymuştur. Bu bulgular, SEM görüntüleriyle birlikte yerel BUE oluşumuyla uyumludur.

Sonraki çalışmalarda kesici takım üreticisinin önerdiği değerlere daha yakın veya çok daha yüksek kesme hızları kullanılarak deneyler tekrarlanabilir. Ayrıca artan takım aşınmasına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin ölçülmesi veya sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi de yapılabilecek çalışmalar arasındadır.

Teşekkür

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: 2023-056.

Kaynakça

Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2020). *Callister's materials science and engineering*. John Wiley & Sons.

Çakır, M. C. (2006). *Modern talaşlı imalatın esasları* (2. baskı). Nobel Yayın Dağıtım.

Davim, J. P. (Ed.). (2008). *Machining: Fundamentals and recent advances*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-213-5

Demir, Z., & Adiyaman, O. (2019). Investigation of influence of approach angle and chip slenderness ratio on vibration, chip formation and surface quality in turning of AISI 1050 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41*(10), Article 467. https://doi.org/10.1007/s40430-019-1977-3

Ding, F., & He, Z. (2011). Cutting tool wear monitoring for reliability analysis using proportional hazards model. *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 57(5–8), 565–574. https://doi.org/10.1007/s00170-011-3316-4

Diniz, A. E., Machado, Á. R., & Corrêa, J. G. (2016). Tool wear mechanisms in the machining of steels and stainless steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87*(9–12), 3157–3168. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8704-3

Gialanella, S., & Malandruccolo, A. (2020). *Aerospace alloys*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24440-8

Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Hbaieb, M., Othmani, R., & Bouzid, W. (2011). Time modeling in high-speed machining of mold pocket. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 53*(1–4), 113–120. https://doi.org/10.1007/s00170-010-2844-7

Jacso, A., & Szalay, T. (2018). Analysing and optimizing 2.5D circular pocket machining strategies. In A. Hamrol, O. Ciszak, S. Legutko, & M. Jurczyk (Eds.), *Advances in manufacturing* (pp. 355–364). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_34

Korpysa, J., Zagórski, I., Weremczuk, A., & Habrat, W. (2024). Process stability analysis during trochoidal milling of AZ91D magnesium alloy using different toolholder types. *Applied Sciences, 14*(9), Article 3616. https://doi.org/10.3390/app14093616

Letot, C., Serra, R., Dossevi, M., & Dehombreux, P. (2016). Cutting tools reliability and residual life prediction from degradation indicators in turning process: A case study involving four

approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86*(1–4), 495–506. https://doi.org/10.1007/s00170-015-8158-z

Medina, S., Acuña-Rivera, M., Castellanos, S., & Castro, K. (2025). Evaluation of machining parameters in turning Al7075-T6 aluminum alloy using dry, flooded, and cryogenic cutting fluid conditions. *Journal of Manufacturing and Materials Processing, 9*(10), Article 328. https://doi.org/10.3390/jmmp9100328

Ortner, H. M., Ettmayer, P., & Kolaska, H. (2014). The history of the technological progress of hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 44*, 148–159. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.07.014

Pateloup, V., Duc, E., & Ray, P. (2010). Bspline approximation of circle arc and straight line for pocket machining. *Computer-Aided Design, 42*(9), 817–827. https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.05.003

Pekşen, H., & Kalyon, A. (2021). Optimization and measurement of flank wear and surface roughness via Taguchi based grey relational analysis. *Materials and Manufacturing Processes, 36*(16), 1865–1874. https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1926497

Pinar, A. M. (2013). Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 aluminum alloy via Taguchi method. *Arabian Journal for Science and Engineering, 38*(3), 705–714. https://doi.org/10.1007/s13369-012-0372-5

Rosenthal, O., Hintze, W., & Möller, C. (2020). Assessment of tool holder performance in roughing with end mills: Process dynamics and surface formation. *Production Engineering,*

14(2), 253–263. https://doi.org/10.1007/s11740-019-00944-w

Santhanakumar, M., Adalarasan, R., Siddharth, S., & Velayudham, A. (2017). An investigation on surface finish and flank wear in hard machining of solution treated and aged 18% Ni maraging steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39*(6), 2071–2084. https://doi.org/10.1007/s40430-016-0572-0

Simsek, B. T., Kuram, E., & Ozcelik, B. (2012). The performance of different tool holders in dry milling. *International Journal of Machining and Machinability of Materials, 11*(3), 308–326. https://doi.org/10.1504/IJMMM.2012.046890

Wang, Q., Jin, Z., Zhao, Y., Niu, L., & Guo, J. (2021). A comparative study on tool life and wear of uncoated and coated cutting tools in turning of tungsten heavy alloys. *Wear, 482–483*, Article 203929. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203929

Wu, J., He, L., Wu, Y., Zhou, C., Zou, Z., Zhan, G., Zhou, T., Du, F., Tian, P., Zou, Z., & Zhang, X. (2021). Enhancing wear resistance and cutting performance of a long-life micro-groove tool in turning AISI 201. *Coatings, 11*(12), Article 1515. https://doi.org/10.3390/coatings11121515


BİDGE