

# Sertleştirilmiş DIN 1.2550 Çeliğinin Frezeleme Performansının Araştırılması

## *Investigation of the Milling Performance of Hardened DIN 1.2550 Steel*

**Alaattin Kaçal\***

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Simav Kütahya

Geliş / Received: 22.04.2022

Kabul / Accepted: 11.05.2022

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author) Alaattin Kaçal, [alaattin.kacal@dpu.edu.tr](mailto:alaattin.kacal@dpu.edu.tr)

**ÖZ:** Bu çalışmada, 58 HRC sertliğinde DIN 1.2550 malzemenin karbür kesici uçlarla frezelenme performansı araştırılmıştır. Deneylemlerden elde edilecek sonuçlar kullanılarak, bu gibi zor kesme şartları için uygun olabilecek frezeleme parametrelerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Frezeleme işlemleri kuru şartlarda 0.25 mm sabit kesme derinliğinde, 4 farklı kesme hızı (50, 75, 100 ve 125 m/dak) ve 3 farklı ilerleme (0.1, 0.15 ve 0.2 mm/diş) değerinde yapılmıştır. Uygun olan parametre seviyelerinin belirlenmesi için yüzey pürüzlülüğü (Ra), kesici takım aşınması ve oluşan talaşlar değerlendirilmiştir. Ra sonuçlarının istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi için varyans analizi yapılmıştır. İlerlemenin artması yüzey pürüzlülüğünü artırmış ve yüksek kesme hızında kesici takım aşınması artmıştır. Daha az yüzey pürüzlülüğü için düşük kesme hızı ve ilerleme parametrelerinin uygun olacağı belirlenmiştir. En düşük 100 m/dak kesme hızı değerinde 0,1 mm/diş ilerlemede 0,19 µm olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** DIN 1.2550 çeliği, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, sert parça frezeleme

**ABSTRACT:** In this study, the milling performance of DIN 1.2550 material with a hardness of 58 HRC with carbide inserts was investigated. By using the results obtained from the experiments, it is aimed to determine the milling parameters that may be suitable for such difficult cutting conditions. Milling operations were carried out in dry conditions at a constant cutting depth of 0.25 mm, 4 different cutting speeds (50, 75, 100 and 125 m/min) and 3 different feeds (0.1, 0.15 and 0.2 mm/tooth). Surface roughness (Ra), cutting tool wear and chips were evaluated to determine the appropriate parameter levels. Analysis of variance was performed in order to evaluate the Ra results statistically. The increase in feed increased the surface roughness and the wear of the cutting tool increased at high cutting speed. It was determined that low cutting speed and feed parameters would be appropriate for less surface roughness. It was measured as 0.19 µm at 0.1 mm/tooth feed at the lowest cutting speed of 100 m/min.

**Keywords:** DIN 1.2550 steel, surface roughness, tool wear, hard milling

## 1. GİRİŞ

Talaşlı imalat endüstrisinde geniş ölçekli rekabet gücünü koruyabilmek adına sürekli olarak maliyetleri düşürmek hedeflenir. En yüksek kaliteye ve düşük maliyete ulaşmak için çaba sarf edilir. Makine imalat sektöründe çeliklerin sertleştirildikten sonra işlenmesi maliyet ve yüzey özellikleri gibi beklentilerden dolayı ilgi görmektedir. Aks, mil ve kalıp elemanlarının işlenmesinde sertleştirme ısı işleminden sonra işleme uygulanmaktadır [1]. Bu alanlarda sertleştirilmiş çeliklerin frezelenmesi

yaygınlaşmaktadır [2]. Çeliklerin sertleştirildikten sonra işlenmesiyle elde edilen yüzey özellikleri taşlama operasyonlarına göre daha uygun olabilmektedir. Şekil ve istenen yüzey kalitesinin bir işlemede elde edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Soğutma sıvısı kullanmadan seramik, CBN, PCD ve kaplamalı karbür kesici takımlar ile işleme yapılabilmesi bir avantajdır [1]. Sertleştirilmiş çeliklerin frezelenmesi, geleneksel işlemeye kıyasla daha düşük üretim maliyeti ve süresi sebebiyle önemli faydalar sağlar. Frezelemedeki sıcaklık değişimi, kesici takımların aşınmasını etkileyen önemli bir faktördür. Hatalı

frezeleme parametreleri seçimi, aşırı takım aşınmasına ve artan yüzey pürüzlülüğüne neden olabilir. Bu nedenle, sertleştirilmiş çeliklerin frezelenmesi sırasında işlenebilirliğin incelenmesine ihtiyaç vardır.

Sert takım çeliklerinin frezelenmesinde çentik, yapışma ve ufalanma aşınması mekanizmaları belirgin mekanizmalar olarak öne çıkmaktadır [3]. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş Bohler K390 çeliğinin kaplamalı karbür uçlarla frezelenmesinde düşük pürüzlülük ve aşınma yüksek sıcaklıkta temperlenmiş numunede elde edilmiştir. İşlenmiş yüzeylerde taşlama kalitesi elde edilmiştir [4]. 58 HRC AISI D6 çeliğinin karbür kesiciler ile frezelenmesinde, artan ilerleme yüzey pürüzlülüğünün arttırmıştır. İstenen düşük yüzey pürüzlülüğünü elde etmede kesme hızı ve ilerlemenin daha az olduğu koşullar uygundur [5]. Scandiffio vd., kesme hızı ile takım-yüzey temasının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırmıştır. Takım merkezi ile iş parçası arasındaki temasın, sertleştirilmiş çeliklerde serbest biçimli yüzeyleri frezeleme sırasında takım ömrünü artırabileceğini ve pürüzlülüğü azaltabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, takım ömrü için en etkili faktörün takım titreşimi olduğunu göstermektedir. Titreşim ne kadar yüksekse, takım ömrü o kadar kısa olur [6, 7]. Benzer bir çalışmada, sertliği 62 HRC olan AISI D6 çeliğinin kavisli, dışbükey yüzeyinin küresel uçlu parmak freze ile frezelemesinde takım ömrü, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü araştırılmıştır. Yapışma ve kesme kenarının ufalanması belirgin aşınma mekanizmasıdır [8]. Castanhera ve Diniz, ilerleme yönü (yukarı ve aşağı doğru daire) ve eğim açısı (takım eğimi) değişkenleriyle dairesel bir dışbükey sertleştirilmiş çelik iş parçasında birkaç frezeleme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Yukarı doğru takım yolunun çoğunlukla yüksek pürüzlülük değerleri sunduğunu ve bunun da takım eğiminden etkilendiğini göstermektedir. Aşağı doğru takım yolu, daha az pürüzlülük değeri sunmuştur [9]. Gaitonde, AISI D2 çeliğin frezeleme sırasında kesme hızı, ilerleme hızı ve radyal kesme derinliğinin frezeleme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti üzerindeki etkisi, yanıt yüzey metodolojisi (RSM) tabanlı modeller kullanılarak

araştırmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ile doğrusal olmayan bir şekilde arttığı ortaya çıkmıştır [10]. Seramik kesici takımlar, işlenmesi zor malzemelerin kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak seramik frezeleme kesicilerinin uygulamaları, tasarımları ve üretim kısıtlamaları nedeniyle sınırlıdır. Sertleştirilmiş AISI H13 çeliğin (HRC 60-62) işlenmesinde Si3N4, Ti (C, N), SG4 ve LT55 dahil olmak üzere dört seramik parmak freze takımının kesme performanslarını incelenmiş. Seramik parmak frezeleme takımlarının kesme kuvvetlerinin, belirtilen sinterlenmiş karbür takımlardan daha az olduğu ve Si3N4, Ti (C, N) ve LT55 gibi bu tür seramik takımların daha iyi yüzey kaliteleri ürettiği, daha uzun takım ömürlerine sahip olduğu belirtilmiştir [11]. AISI H13 sertleştirilmiş çeliğin yüzey frezelemesinde karbür kesici takım kullanıldığında nispeten uzun bir takım ömrü ve düşük enerji tüketimi elde etmek için simetrik frezelemede 0.2 mm / diş civarında bir değere sahip diş başına ilerleme ve 150 ila 250 m / dak arasında değişen kesme hızı kullanılmalıdır. Aşağı frezelemede diş başına ilerleme 0,15 ila 0,2 mm / diş aralığında ve kesme hızı 100 ila 200 m / dak arasında olmalıdır. Yukarı frezelemede 0,2 mm / dişe yakın diş başına ilerleme ve 200 ile 300 m / dak arasında kesme hızı benimsenmelidir [12]. Machado ve Diniz çalışmalarında, sürekli ve darbeli kesme sırasında birkaç sertleştirilmiş çeliğin işlenmesinde ortaya çıkan takım aşınma mekanizmalarını analiz etmektedir. Tornalama ve frezeleme işlemlerinde uygulanan kübik bor nitrid, seramik ve PVD kaplı karbür uçlar gibi farklı takım malzemesi türlerinin aşınma mekanizmaları analiz edilmiştir [13]. Hassanpour vd., çalışmalarında minimum miktarda yağlayıcı kullanılarak 4340 alaşımli çeliğin sert frezelemesinde kesme parametreleri ile işlenmiş yüzey bütünlüğü arasındaki ilişki araştırmıştır [14]. AISI S1 soğuk iş takım çeliğinin seramik ve CBN kesici takımlarla yüksek hızda sert tornalaması üzerine yapılan çalışmada, seramik ve CBN takımlarının performansı, işleme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına göre değerlendirilmiştir. CBN kesici, seramik kesiciye göre daha iyi bir performans sergilemiştir. Sertleştirilmiş iş parçasının tornalanmasından sonra taşlama

kalitesinde yüzeyler elde edilmiştir [15]. Günay, aşınmış bir makine parçasının sert frezelenmesinde sürdürülebilirlik için işleme koşullarının kapsamlı analizini yapmıştır. İlk olarak X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinden yapılan kesme bıçağının aşınmış bölgesi elektrik ark kaynağı ile dolduruldu. Ardından, sert dolgu kaynaklı parçanın işlenmesinde farklı kaplamalı karbür uçların performansını analiz etmek için sert frezeleme deneyleri yapılmıştır. Optimum sonuçlar PVD-AlTiCrN kaplı takım ile elde edilmiştir [16].

Sertleştirilmiş çeliğin yüksek hızlı yüzey frezelemesine ilişkin daha fazla araştırma yapılmalıdır. Aralıklı sert kesmede daha yüksek kesme hızında ortaya çıkan özelliklere odaklanmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Sert frezelemede geçici kesme sıcaklıklarının doğru analizinin yapılabilmesi için, frezelemede ısı kaynağı yoğunluğunun ve alanının gelişimine dikkat edilmelidir. Hasar mekaniği, aralıklı sert kesmede takım malzemesinin mikroskobik hasar analizi ile makroskopik kırılması arasında bir köprü olarak düşünülebilir [17]. Kesici kenardaki olası aşınma mekanizmalarını doğru bir şekilde incelemek ve analiz etmek çok önemlidir. Genellikle 35 HRC'nin üzerinde olan yüksek sertliğe sahip malzemeleri işlerken, yüksek kesme kuvvetleri ve oluşan ısı nedeniyle hızlı takım aşınmasına ve kısa takım ömrü oluşur. Sertlik 45 HRC'yi aştığında, durum daha da kötüleşir çünkü talaşlar, bölgesel kesme, artan kuvvetler ve sıcaklıklar ile oluşan sürekli tırtıklı tiplere değişir. Bu tip işleme koşulları için seramik ve CBN kesici malzemeleri kullanılır. Darbeli kesimde sinterlenmiş karbürler sıklıkla kullanılır. Sert işlemede aşınma mekanizması analizi bu nedenle özel bir önem taşır.

Kesici takım üretiminde ortaya çıkan gelişmeler başta sertleştirilmiş çelikler olmak üzere işlenmesi zor olan pek çok malzemenin işlenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca endüstriyel alanda pek çok üretici parçaların sertleştirildikten sonra işlenmesine olan ilgilerini arttırmaktadır. Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, çeliklerin sertleştirildikten sonra frezelenmesine yönelik çok sayıda çalışma vardır. Ancak, geliştirilen çelik türleri ve kesici uçlar bu alandaki çalışmaların devam etmesini sağlamaktadır. Hazırlanan

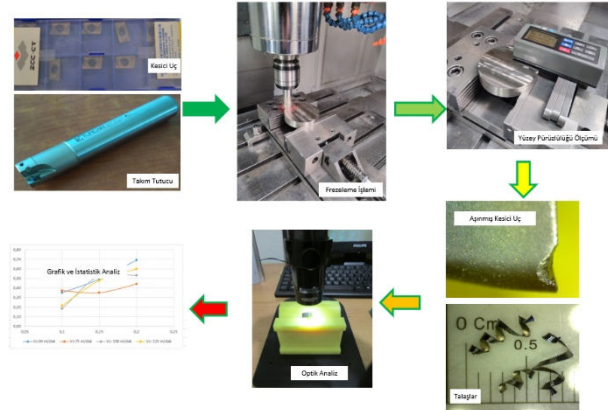
çalışmada, ağırlıklı olarak kalıp ve kesici yapımında kullanılan sertleştirilmiş (58 HRC) AISI S1 soğuk iş takım çeliğinin karbür kesiciler ile frezelenme performansı araştırılmıştır. Performans değerlendirmesinde yüzey pürüzlülüğü, kesici takım aşınması ve talaş oluşumu dikkate alınmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOD

Deneylerde 58 HRC sertliğinde DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliği numune kullanılmıştır. DIN 1.2550 soğuk iş takım çelikleri, aşınmaya ve darbelere dirençli bir çeliktir. Kesme zımbaları, kırıcılar, desen kalıpları, ahşap işleme takımları ve metal para basma takımları için kullanılır. DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 1 'de verilmiştir.

**Tablo 1:** Frezeleme numunesi DIN 1.2550 çeliğinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	W
0.6	0.74	0.33	0.012	0.007	1.01	0.16	1.88



**Şekil 1:** Deneysel prosedür

Frezeleme deneyleri max 8000 d/dak devir sayısı ve 7.5 kW motor gücündeki AWEA BM-850 CNC tezgahında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde APKT 11T308-PM PVD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı P10-P30 kalite karbür kesici uçlar (Şekil 1) kullanılmıştır. Bu uçlar Ø 25 mm silindirik takım tutucu ve bilyalı pens ile fener miline bağlanmıştır. Yüzey pürüzlülükleri TIME TR200 izleyici uç tip pürüzlülük ölçüm cihazı ile üç değişik bölgeden ölçülmüştür. Ölçümler sırasında örnekleme uzunluğu 0.8 mm alınmıştır. INSIZE elektronik mikroskop ile deneylerden sonra kesici uçların görüntüleri aşınma davranışlarının belirlenmesi için alınmıştır. Literatürden ve kesici takım üreticilerinin tavsiyelerine göre deneylerde

kullanılacak kesme parametreleri belirlenmiştir. Parametre seviyelerinin belirlenmesinde öncelikle deneme deneyi yapılmış ve buna göre parametreler yenilenmiştir. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2:** Kesme parametreleri

Parametreler	Seviyeler			
	1	2	3	4
Kesme Hızı (Vc), m/dak	50	75	100	125
İlerleme (f), mm/diş	0.1	0.15	0.2	--
Kesme Derinliği (ap), mm	0.25			

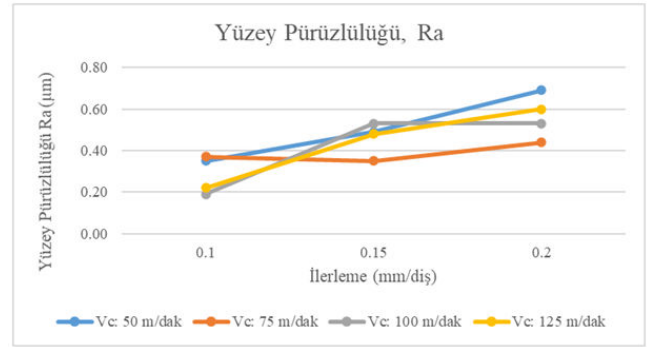
Frezeleme operasyonları için aynı yönlü frezeleme yöntemi kullanılmıştır. Ölçülen pürüzlülük değerinin ortalaması alındıktan sonra ilişki grafikleri hazırlanmıştır. Kesici takım aşınmaları ve talaş incelemeleri için elektronik mikroskop kullanılmıştır.

### 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deney parametrelerine göre gerçekleştirilen frezeleme deneylerinden sonra ölçülen yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri, kesici uç aşınma ve talaş görüntüleri değerlendirilmiştir. Ra ile frezeleme parametreleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 2’de verilmiştir. Grafikte, tüm kesme hızı değerleri için ilerlemenin artışıyla Ra değeri artmıştır. Artan ilerlemeye bağlı olarak frezelenen yüzeyde kesici izleri arasındaki mesafenin artması pürüzlülük değerini arttıracaktır. Teoride yüzey pürüzlülüğü önce ilerleme ve kesici uç yarıçapının bir fonksiyonudur. İlerlemenin artması Ra’yı arttırırken, uç yarıçapının artması azaltmaktadır. Ra’nın artma eğilimi 75 m/dak kesme hızında ilerleme artışına göre fazla değildir. İlerlemenin 0,1 minimumdan 0,2 mm/diş çıkmasıyla Ra artışı 2.78 kat olarak 125 m/dak kesme hızında ölçülmüştür.

Deney malzemesinin 58 HRC sertlikte olmasına bağlı olarak kesme hızının artmasıyla artan takım aşınması ve kesme geometrisinin hasar görmesi de bu drumun sebebi olabilir. 100 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/diş ilerlemede en düşük Ra değeri 0,19  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. Belli bir aşamaya kadar, artan kesme hızının kesme bölgesinde kesme işlemini kolaylaştırması nedeniyle Ra değerinin azalması beklenirken bu deneylerde düzenli bir değişim görülmemiştir. Bu durum sertleştirilmiş çeliğin frezelenmesinde ortaya çıkan şartlara karbür kesicinin tepkisi ile ilişkilendirilebilir.

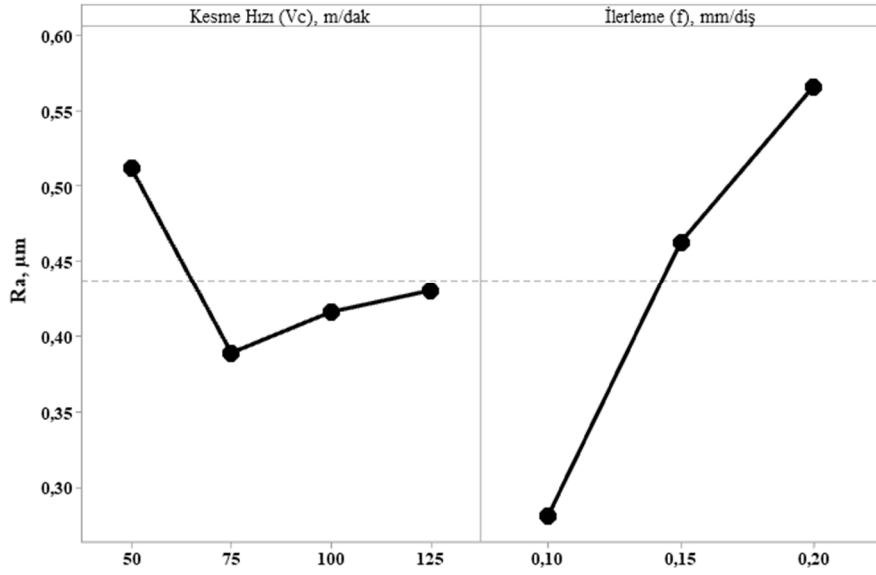
Frezeleme parametreleri ile Ra arasındaki ilişkinin analiz edilmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Tablo 3’te ANOVA sonuçları verilmiştir. Burada bir parametrenin P değeri 0,05 den küçükse % 95 güven düzeyinde parametredeki değişimlerin sonuç üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır. İlerleme için  $P=0,014<0,05$  olduğundan anlamlıdır. Fakat kesme hızı  $P=0,475>0,05$  olduğundan kesme hızı seviyelerindeki değişimin Ra sonuçlarını anlamlı düzeyde etkilemediği söylenebilir.



**Şekil 2:** Farklı kesme hızlarında Ra değerinin ilerlemeye göre değişimi

**Tablo 3:** Ra değerlerinin ANOVA sonuçları

Faktör	Ser. Der.	Kareler toplamı	Varyans	F-değeri	P-değeri	% Katkı
Kesme Hızı, Vc	3	0.02513	0.008376	0.95	0.475	8.35
İlerleme, f	2	0.16626	0.083132	9.41	0.014	82.85
Hata	6	0.05303	0.008838			8.80
Toplam	11	0.24442				

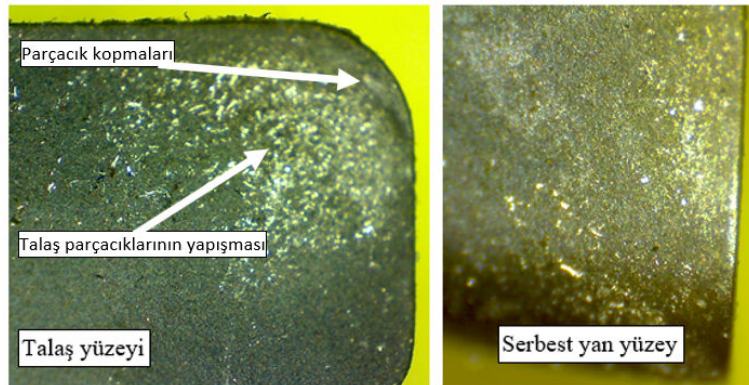


Şekil 3: Ra değerleri için ana etki grafiği

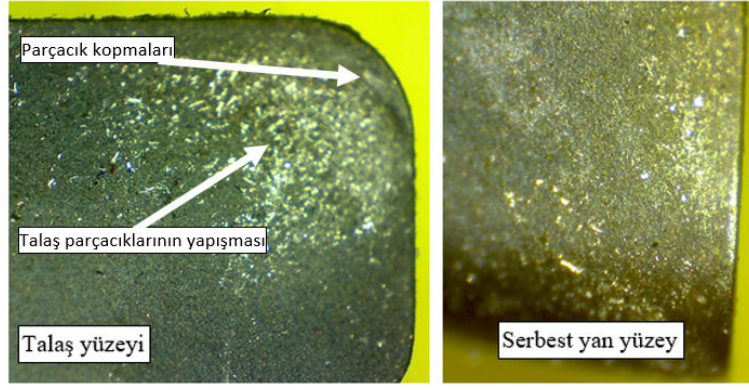
Şekil 3'teki ana etki grafiğine bakıldığında, yatay ortalama çizgisine göre daha dik açı yapan ilerleme eğrisinin Ra üzerindeki etkinliğinin fazla olduğu söylenebilir. Ana etki grafiği de ilerleme artışının Ra'yı arttırdığını teyit etmektedir. Kesme hızı ise değişken bir tavır sergilemiştir.

58 HRC sertlikteki DIN 1.2550 soğuk iş takım çeliğinin kuru şartlarda frezelenmesinde kesici uçta aşınma olması mümkündür. Yapılan her frezeleme deneyinden sonra kesici kenar elektronik mikroskop ile incelenmiştir. Şekil 4'te  $V_c=50$  m/dak ve  $f=0.15$  mm/diş parametresinde kullanılan kesicinin aşınma görüntüsü verilmiştir. Talaş yüzeyini gösteren şekle bakıldığında, yer yer küçük

kopmaların olduğu ve krater aşınması başlangıcı görülmektedir. Bu aşınmalar abrasiv aşınma mekanizması ve sert parça frezeleme sırasında oluşan yüksek kuvvetlerin sonucunda oluşmaktadır. Serbest yan yüzeye bakıldığında ise belirgin bir aşınma görülmemiştir. Şekil 5'te  $V_c=125$  m/dak ve  $f=0.15$  mm/diş parametresinde kullanılan kesicinin aşınma görüntüsü verilmiştir. Talaş yüzeyine bakıldığında pul pul dökülme ve artan parçacık kopması, serbest yan yüzeyde ise abrasiv aşınmanın yüksek kesme hızında hızla ilerlediği ve kesici uç kenar kırılmasıyla sonuçlandığı tespit edilmiştir.

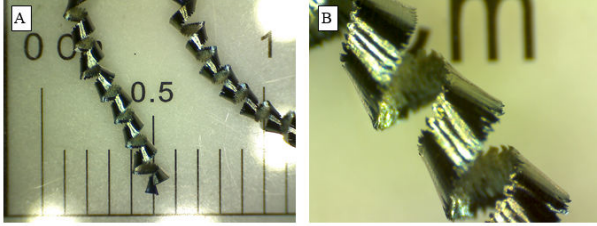


Şekil 4:  $V_c=50$  m/dak ve  $f=0.15$  mm/diş parametrelerinde kesici kenarda aşınma

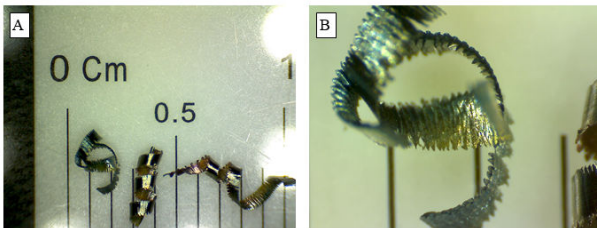


**Şekil 5:**  $V_c = 125$  m/dak ve  $f = 0.15$  mm/diş parametrelerinde kesici kenarda aşınma

Talaş kaldırma işleminin değerlendirilmesinde talaş formu da ele alınmaktadır. Frezeleme deneyleri sırasında toplanan talaşlar elektronik mikroskopta incelenmiştir. Şekil 6’da  $V_c = 50$  m/dak ve  $f = 0.15$  mm/diş parametresinde, Şekil 7’de ise  $V_c = 125$  m/dak ve  $f = 0.15$  mm/diş parametresinde toplanan talaşların görselleri verilmiştir. A harfli resimler genel talaş, B harfli resimler genel talaş görüntüsünün yakından görüntüsüdür.



**Şekil 6:**  $V_c = 50$  m/dak ve  $f = 0.15$  mm/diş parametrelerindeki talaşlar



**Şekil 7:**  $V_c = 125$  m/dak ve  $f = 0.15$  mm/diş parametrelerindeki talaşlar

Resimler incelendiğinde, 125 m/dak kesme hızında (Şekil 7) talaşın eğrilik yarıçapının 50 m/dak kesme hızına göre göre (Şekil 6) fazla olduğu görülmektedir. Talaşın oluşumu sırasında eğrilik yarıçapı kesme hızının artmasıyla artar. Artan kesme hızı kesme kuvvetini arttırarak talaş

üzerindeki bükme momentini artırır [18]. Ayrıca talaşların plastik deformasyonunu artar ve talaşların tırtıklı kenarları oluşmasına yol açar.

#### 4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada 58 HRC sertlikteki DIN 1.2550 çeliğinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü, kesici takım aşınması ve talaş formu incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yüzey pürüzlülüğü ilerlemenin artmasıyla önemli ölçüde arttırmıştır.
- ANOVA sonuçları ve ana etki grafiği ilerleme parametresinin en etkin parametre olduğunu ve kesme hızının etkisini olmadığını göstermiştir.
- 100 m/dak kesme hızı ve 0,1 mm/diş ilerlemede 0,19  $\mu\text{m}$  değerinde en düşük  $R_a$  ölçülmüştür.
- Kesici takım aşınmaları açısından, abrasiv aşınma, pul pul dökülme, yan yüzey aşınması ve kırılma görülmüştür. Düşük kesme hızındaki aşınma kabul edilebilir düzeydedir.
- Artan kesme hızına bağlı olarak talaşlardaki deformasyon artmıştır.

#### 5. KAYNAKLAR

- [1] T. Özel, Y. Karpat, L. Figueira, and J. P. Davim, "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, no. 1–3, pp. 192–198, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.01.021.
- [2] H. Chandrasekaran and R. M'Saoubi, "Improved machinability in hard milling and strategies for steel development," *CIRP Ann.* -

- Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 93–96, 2006, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60374-6.
- [3] A. Iqbal, H. Ning, I. Khan, L. Liang, and N. U. Dar, “Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 199, no. 1, pp. 379–390, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.029.
- [4] S. Cetinkaya and A. Kacal, “Investigation of the heat treatment effect in milling of K390 powder metallurgical steel,” *Kovove Materialy-Metallic Materials*. vol. 52, pp. 209–218, 2014, doi: 10.4149/km.
- [5] A. Kaçal, “Sertleştirilmiş EN X210CrW12 Soğuk İş Takım Çeliğinin Karbür Kesici İle Frezeleme Performansının Araştırılması,” IMOFE VIII, Antalya, Türkiye, 2019.
- [6] I. Scandiffio, A. E. Diniz, and A. F. de Souza, “The influence of tool-surface contact on tool life and surface roughness when milling free-form geometries in hardened steel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 1–4, pp. 615–626, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0093-8.
- [7] I. Scandiffio, A. E. Diniz, and A. F. de Souza, “Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 82, no. 9–12, pp. 2075–2086, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7525-0.
- [8] H. Kull Neto, A. E. Diniz, and R. Pederiva, “Tool life and surface roughness in the milling of curved hardened-steel surfaces,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 9–12, pp. 2983–2995, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8640-2.
- [9] I. da C. Castanhera and A. E. Diniz, “High Speed Milling of Hardened Steel Convex Surface,” *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 220–231, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.020.
- [10] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, C. H. A. Maciel, J. C. Rubio and A. M. Abroa, “Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel” *Materials Research*, vol. 19, no. 2, pp. 360–369, 2016, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0263
- [11] B. Wang and Z. Liu, “Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 55, pp. 24–32, 2016, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2015.11.004.
- [12] X. Cui, X. Zheng, and J. Guo, “Optimization of cutting conditions in hard milling with the performance of cemented carbide tool material considered,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 96, no. 5–8, pp. 2161–2173, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1782-7.
- [13] Á. R. Machado and A. E. Diniz, “Tool wear analysis in the machining of hardened steels,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 9–12, pp. 4095–4109, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0455-2.
- [14] H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, and S. Shajari, “Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication,” *J. Clean. Prod.*, vol. 120, pp. 124–134, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.091.
- [15] A. Kaçal and F. Yildirim, “High speed hard turning of AISI S1 (60WCrV8) cold work tool steel,” *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 10, no. 8, 2013.
- [16] M. Günay, “Modeling and multiple optimization in face milling of hardfacing welding applied steel: Force, roughness, power” *Proc Ins ec Eng, Part C: J Mech Eng Sci*, 2022, doi:10.1177/09544062211065998
- [17] X. Cui, F. Jiao, B. Zhao, and J. Guo, “A review of high-speed intermittent cutting of hardened steel,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 9–12, pp. 3837–3846, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0815-y.
- [18] S. Debnath, M. M. Reddy, and Q. S. Yi, “Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 78, pp. 111–119, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2015.09.011.