

Atf İçin: Akgün M, 2022. AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliğinin İşlenmesinde Kesme Kuvvetinin Deneysel, Nümerik ve İstatistiksel Olarak İncelenmesi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(3): 1758 - 1769.

To Cite: Akgün M, 2022. Experimental Numerical and Statistical Investigation of Cutting Force in the Machining of AISI H13 Hot Work Tool Steel . Journal of the Institute of Science and Technology, 12(3): 1758 - 1769.

AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliğinin İşlenmesinde Kesme Kuvvetinin Deneysel, Nümerik ve İstatistiksel Olarak İncelenmesi

Mahir AKGÜN^{1*}

ÖZET: Bu çalışmada, seramik kesici takımlar ile AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tornalama deneyleri, üç farklı kesme hızında (120, 180 ve 240 m dak⁻¹), üç farklı ilerleme miktarında (0.12, 0.15 ve 0.18 mm dev⁻¹) ve üç farklı talaş derinliğinde (0.6, 1 ve 1.4 mm) kuru kesme şartlarında CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, tornalama simülasyonları da sonlu elemanlar analizine (FEA) dayalı olarak Third Wave AdvantEdge yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve nümerik analizler ile elde edilen kesme kuvveti verileri, Taguchi methodu, Anova ve regresyon analizleri kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları her iki yöntem ile elde edilen esas kesme kuvveti (Fc) değerleri üzerinde sırasıyla %80.97 ve %80.32 katkı oranları ile en etkin parametrenin talaş derinliği olduğunu göstermektedir. Dahası, tornalama simülasyonlarında ve deneysel olarak elde edilen esas kesme kuvveti (Fc) değerleri arasında ortalama %9'lik bir fark elde edilmiştir ve her iki yöntem ile elde edilen Fc değerleri için optimum parametre grubu A3B1C1 (kesme hızı = 240 m dak⁻¹, ilerleme miktarı = 0.12 mm dev⁻¹ ve talaş derinliği = 0.6 mm)'dir.

Anahtar Kelimeler: AISI H13, tornalama, kesme kuvveti, optimizasyon, sonlu elemanlar analizi

Experimental, Numerical and Statistical Investigation of Cutting Force in the Machining of AISI H13 Hot Work Tool Steel

ABSTRACT: In this study, the effects of cutting parameters on cutting force are investigated in turning of AISI H13 hot work tool steel with ceramic cutting tools. Turning experiments have been performed at three different cutting speeds (180 and 240 m min⁻¹), three different feed rates (0.12, 0.15 and 0.18 mm rev⁻¹) and three different depths of cut (0.6, 1 and 1, 4 mm) on a CNC lathe under dry cutting conditions. At the same time, turning simulations have been made with Third Wave AdvantEdge software based on finite element analysis (FEA). The cutting force data obtained by experimental and numerical analyzes have been also statistically analyzed using the Taguchi method, Anova, and regression analysis. The analysis results revealed that the most effective parameter on the main cutting force (Fc) values obtained by both methods was the depth of cut with the contribution rates of 80.97% and 80.32%, respectively. Moreover, an average of 9% difference was obtained between the main cutting force values (Fc) obtained in the turning simulations and experimentally and the optimum parameter group for the Fc values obtained by both methods were A₃B₁C₁ (cutting speed = 240 m min⁻¹, feed rate = 0.12 mm rev⁻¹, and depth of cut = 0.6 mm).

Keywords: AISI H13, turning, cutting force, optimization, finite element analysis

¹Mahir AKGÜN ([Orcid ID: 0000-0002-4522-066X](https://orcid.org/0000-0002-4522-066X)), Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Aksaray, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mahir AKGÜN, e-mail: mahirakgun@aksaray.edu.tr

GİRİŞ

Sıcak iş takım çelikleri, demir esaslı ve demir dışı metallerin yüksek sıcaklıklarda dövme, ekstrüzyon ve basınçlı döküm gibi plastik şekillendirme işlemleri ile şekillendirilmesinde kalıp elemanlarının yapımında oldukça yaygın kullanılmaktadırlar (Fallböhmer ve ark., 2000; Persson ve ark., 2004). Bu çeliklerin en önemli özellikleri, sertlik, mukavemet, termal şok direnci ve yüksek sıcaklıklarda aşınmaya karşı dayanıma sahip olmalarıdır (Davis, 1995; Demir ve ark., 2018). Bu özellikler uygun bileşim ve ısıl işlem prosesinin uygulanması ile elde edilmektedir (Bala ve ark., 2007). Bu yüzden, sıcak iş takım çelikleri, Cr, Mo ve V gibi karbür oluşturu elementler içermektedirler. Bu alaşım elementlerine ve uygun ısıl işlem prosesine bağlı olarak karbürlerin çökmesi ile süper mekanik özellikler elde edilmektedir (Taştumur ve Gündüz, 2021). Ancak, bu güçlü karbür oluşturu elementlerden dolayı işlenebilirlikleri genellikle zordur (Medvedeva ve ark., 2009). Örneğin, sert aşındırıcı intermetalik bileşiklerin ve karbürlerin varlığı, kesici takım ucunda ağır aşınmaya neden olmaktadır (Demir ve ark., 2018).

Son yıllarda sonlu elemanlar analizi (SEA); haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi plastik şekillendirme uygulamalarının yanı sıra talaşlı imalat işlemlerinin simülasyonunda da güçlü bir araç haline gelmiştir. Deneysel olarak tanımlanması oldukça zor ve maliyetli olan kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, gerinim, gerinim hızı, gerilim ve takım aşınması gibi talaş oluşum mekaniğinde etkili olan çeşitli faktörler işleme sürecinin simülasyonu ile tahmin edilebilmektedir (Korkmaz ve Günay, 2018). Önemli kesme prosesi faktörlerinin tahmin edilmesi, takım geometrilerinin tasarımında ve kesme koşullarının iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle, literatürde kesilmesi zor malzemelerin işleme prosesinin sayısal modellenmesi ve kesme parametrelerinin karakterize edilmesinde sonlu elemanlar analizinin kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Örneğin, Cui ve diğerleri, sertleştirilmiş çeliklerin seramik kesici takımlarla SEA yardımıyla sürekli ve aralıklı tormalanması sırasında kesme hızının ve talaş açısının etkisini incelemiştir (Cui ve ark., 2016). Parida ve Maity, Nikel esaslı alaşımların ısı destekli işlenmesinde talaş oluşumunu nümerik olarak analiz etmişlerdir (Parida ve Maity, 2018). Farklı bir çalışmada ise Inconel 625 süper alaşımının ısı destekli işlenmesinde kesme kuvvetlerini ve talaş formunu deneysel ve nümerik olarak incelemiştir (Parida ve Maity, 2019). Aydın ve Köklü, 20NiCrMo5 çeliğinin işlenmesinde küresel uçlu parmak frezeleme kuvvetlerini belirlemek için ABAQUS yazılımında dik talaş kaldırma işleminin modelini oluşturmuşlardır (Aydın ve Köklü, 2019). Yaşar ve diğerleri, sertleştirilmiş X40CrMoV5-1 çeliğinin tormalanmasında oluşan kesme kuvvetini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir (Yaşar ve ark., 2018). Yan ve diğerleri, AISI H13 çeliğinin sert tormalanması için termo-mekanik bir model geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, kesme hızı arttıkça kesme ve ilerleme kuvvetlerinin azaldığını ve ilerleme ve takım kenar yarıçapındaki artışla ilerleme yönündeki kesme kuvvetlerinin arttığını bildirmişlerdir (Yan ve ark., 2005). Zhang ve arkadaşları, AISI H13 çeliğinin sert frezelenmesinde meydana gelen kesme kuvvetlerini ve kesme sıcaklığını deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir. Sonuç olarak, Fx, Fy ve Fz için maksimum bağıl hatanın sırasıyla %11.73, %14.16 ve %3.76 olduğunu ve sunulan modelin kesme kuvvetlerini tahmin etmek için oldukça başarılı olduğunu vurgulamışlardır (Zhang ve ark., 2017). Reimer ve Luo, AISI H13 çeliğinin hassas frezelenmesinde kalıntı gerilimin tahmini üzerine deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonlu elemanlar analizi için Abaqus yazılımı kullanılırken, artık gerilimin tahmini için yapay sinir ağları (ortalama kare hatası (MSE) ve regrasyon doğruluğu dikkate alınarak) kullanmışlardır. Sonuçlar olarak, düzlem artık gerilim durumu üzerinde en etkin faktörün ilerleme miktarı olduğunu ve düzlem artık gerilim için XRD ölçümleri ve SEA simülasyon sonuçları arasında yaklaşık olarak %3.39 sapma olduğunu bildirmişlerdir (Reimer ve Luo, 2018). Özel, honlanmış ve pahlı CBN kesici takımlar ile AISI H13 çeliğinin sert işlenmesinde işleme karakteristiğini hem

deneysel hem de nümerik analizler ile araştırmıştır. Sonuç olarak, honlanmış CBN takımlar ile yapılan deneylerde daha düşük kesme kuvvetlerinin oluştuğunu, ancak talaş yüzeyinde ise daha yüksek sıcaklıkların meydana geldiğini bildirmiştir (Özel, 2003).

Literatür taramasından talaşlı imalat işlemlerinde kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, güç tüketimi, gerinim ve takım aşınması gibi çıktı parametrelerinin tahmin edilmesinde sonlu elemanlar analizinin etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Dahası, sıcak iş takım çeliklerinde Johnson-Cook (JC) yapısal denklem modeli sabitleri bilinen AISI H13 çeliği üzerine yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Ancak, AISI H13 çeliğinin tornalanmasında kesme kuvveti üzerinde kesme parametrelerinin etkisinin deneysel ve sayısal olarak kapsamlı bir şekilde araştırılmadığı ve ayrıca, kesme parametreleri ve çıktı parametresi arasındaki ilişkinin matematiksel olarak modellenmesi üzerine çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu yüzden, bu çalışmada, farklı kesme parametrelerinde AISI H13 çeliğinin işlenmesinde oluşan kesme kuvvetinin hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizi ile kıyaslanması ve matematiksel olarak modellenmesi amaçlanmıştır.

MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak bir sıcak iş takım çeliği olan AISI H13 çeliği kullanılmıştır. Deney numuneleri 30 mm çapında ve 200 mm boyunda hazırlanmıştır. Çizelge 1'de deney malzemesinin kimyasal bileşimi yer almaktadır. Tornalama deneyleri ALEX TECH ANL-75T, C eksenli CNC torna tezgahında kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneylerinde, Kennametal firması tarafından KY4400 kalitesinde ve CNGA1204T01020 formunda üretilen kesici takımlar kullanılmıştır. Talaş kırıcı geometrisine sahip olmayan bu kesici takımlar, PCLNR 2525M-12 formundan takım tutucuya rijit bir şekilde bağlanmıştır.

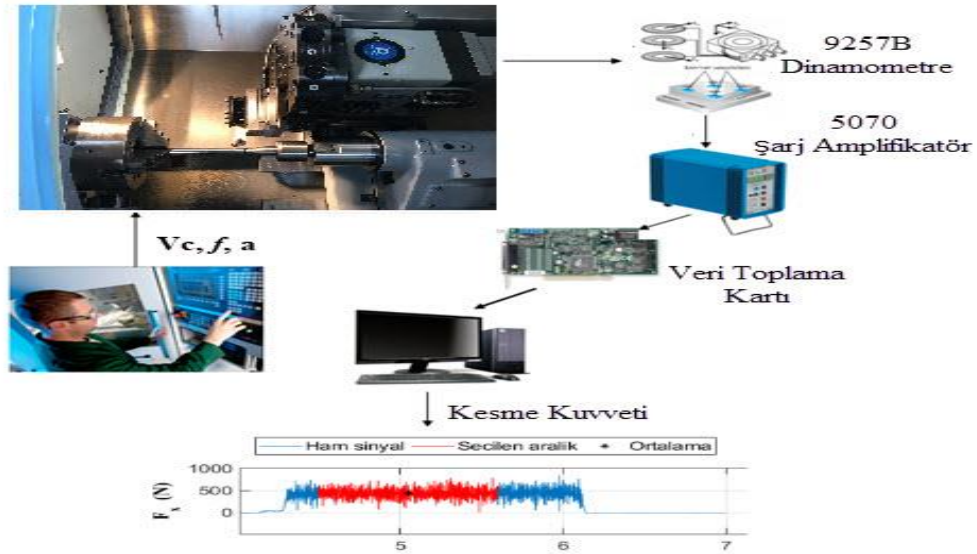
Çizelge 1. AISI H13 çeliğinin % kimyasal bileşimi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0.36	1.05	0.33	0.002	<0.001	5.39	1.35	0.9

Çizelge 2'de tornalama deneylerinde ve sayısal analizlerde kullanılan kesme parametrelerinin seviyeleri görülmektedir. KISTLER 9257B tipi dinamometre ile her bir kesme şartında meydana gelen kesme kuvvetlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Dinamometre ile birlikte Kistler 5070 yükseltici, veri toplama kartı ve kesme kuvveti sinyallerinin toplanması için CUTPRO® yazılımı da kullanılmıştır. Şekil 1'de kesme kuvveti ölçüm sistemi görülmektedir.

Çizelge 2. İşleme parametreleri

Sembol	Kesme Parametreleri	I	II	III
Vc	Kesme hızı (m dak ⁻¹)	120	180	240
f	İlerleme miktarı (mm dev ⁻¹)	0.12	0.15	0.18
a	Talaş derinliği (mm)	0.6	1.0	1.4



Şekil 1. Kesme kuvveti ölçüm sistemi

Nümerik analiz

AISI H13 çeliğinin tornalanmasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesinde, tornalama simülasyonları sonlu elemanlar analizine (FEA) dayalı olarak Third Wave AdvantEdge yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tornalama simülasyonları, Çizelge 2’de yer alan kesme parametreleri ve seviyelerinde yapılmıştır. Tornalama simülasyonuna ilk olarak iş parçası boyutları ve malzeme yapısal parametrelerinin tanımlanması ile başlanmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçası ölçüleri oldukça fazla olduğu için simülasyon süresini uzatmaktadır. Bu yüzden hem deneylerde hem de simülasyonlarda aynı kesme şartlarında talaş oluşumu benzer olacağı için iş parçası ebatları daha küçük tanımlanmıştır (Korkmaz ve Günay, 2018). Böylelikle, simülasyon işleminde zamandan kazanç sağlanmıştır. Diğer taraftan, iş parçası malzemesinin tanımlanmasında yüksek gerinim hızı deformasyonlarının simülasyonlarında yaygın olarak kullanılan Johnson-Cook (JC) yapısal denklem modeli sabitleri kullanılmıştır. Bu sabit değerleri Çizelge 3’te ve iş parçası ve takım malzemesinin ait mekanik ve fiziksel özellikler de Çizelge 4’te yer almaktadır (Umbrello et al., 2008; Stenberg ve Proudian, 2013; Işık, 2014).

$$\sigma^0 = (A + B(\epsilon^p)^n) \left(1 + C \log\left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right) \quad (1)$$

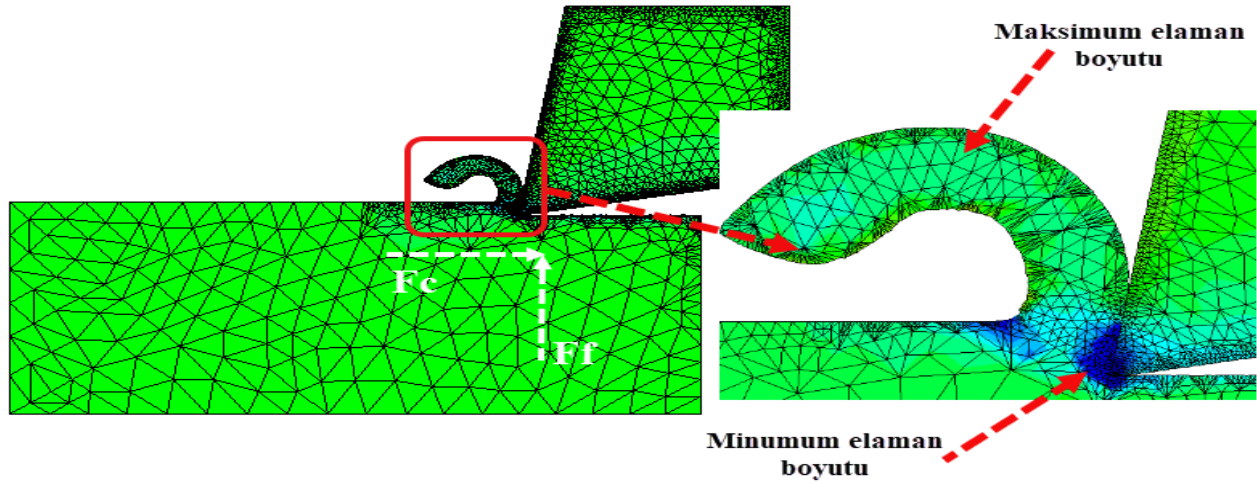
Çizelge 3. İş parçası malzemesi için Johnson-Cook parametreleri

Materials	A	B	n	C	m	T _m	E
AISI H13	908.53	321.39	0.278	0.03	1.18	1427	0.028

Tornalama simülasyonunun ikinci aşamasında kesici takım geometri ve takım malzemesi bilgileri tanımlanmıştır. Tornalama simülasyonunda remeshing (tekrar genel örgü oluşturma) tekniği kullanılarak, her bir çözüm aralığı için yeniden ağ oluşturulmuştur. Ağ elemanı boyutları kesici takım uç bölgesinde yoğun diğer bölgelerde daha seyrek olacak şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca, takım-talaş ara yüzeyi, 0.6 olarak kabul edilen standart bir Coulomb sürtünme katsayısı ile modellenmiştir. Son aşamada, kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kesme uzunluğu gibi gerekli kesme simülasyon parametreleri yazılıma girilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir ve her bir çözüm aralığında oluşan kesme kuvvetleri çıktı parametresi olarak kaydedilmiştir. Şekil 2’de kesici takım ve iş parçası ağ yapısı görülmektedir.

Çizelge 4. İş parçası ve takım malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri

Özellikler	İş parçası (AISI H13)	Kesici takım (Seramik)
Yoğunluk (kg m ⁻³)	7800	4260
Elastikiyet modülü (GPa)	211	400
Poisson oranı	0.28	0.23
Özgül ısı (J/Kg/°K)	560	903
Isıl genleşme (10 ⁻⁶)	10.4e-06	8.6
Isıl iletkenlik (W m ⁻¹ K)	37	24



Şekil 2. Tornalama simülasyonu

Deney tasarımı

Deneyel çalışmalarda tercih edilen istatistiksel bir yöntem olan Taguchi yöntemi, üretim maliyetlerini en aza indirmek ve verimliliği artırmak için birçok endüstriyel alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Kıvak, 2014; Özlü ve ark., 2019; Akgün ve Demir, 2021). Özellikle, bu yöntemin ortogonal diziler kullanarak test sayısını önemli ölçüde azaltması ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini en aza indirmesi onu önemli kılmaktadır (Cebeci ve ark., 2021). Bu çalışmada, Taguchi yönteminin L₉ standart ortogonal dizisi kullanılarak tornalama deneyleri tasarlanmıştır (Yaka, 2021). Optimizasyon işleminde, kesme hızı (Vc), ilerleme miktarı (f) ve talaş derinliği (a) girdi faktörleri olarak seçilirken esas kesme kuvveti (Fc) de çıkış parametresi olarak seçilmiştir. Test verilerinin analizinde, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak ve modellemek için sinyal-gürültü oranı (S/N oranı) analizi, varyans (ANOVA) analizi ve regresyon analizleri kullanılmıştır. En düşük çıkış parametresi değerini elde etmek için S/N sinyal-gürültü oranlarının hesaplanmasında, Eşitlik 2'de yer alan "en küçük en iyi" yaklaşımı uygulanmıştır.

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

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu

Deney sonuçları ve çıktı parametresi (Fc) için kesme parametrelerinin S/N yanıtı sırasıyla Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir. Bu tabloda, optimum kesme parametresinin belirlenmesinde en yüksek S/N değerine sahip seviye dikkate alınır ve tabloda koyu olarak gösterilen veriler kesme parametrelerinin en etkili seviyelerini göstermektedir. Sonuç olarak hem deneysel olarak elde edilen hem de tornalama simülasyonları ile elde edilen esas kesme kuvvetlerinin en düşük seviyesi için 240 m dak⁻¹ (Vc), 0.12 mm dev⁻¹ (f) ve 0.6 mm (a) optimum kesme parametreleridir.

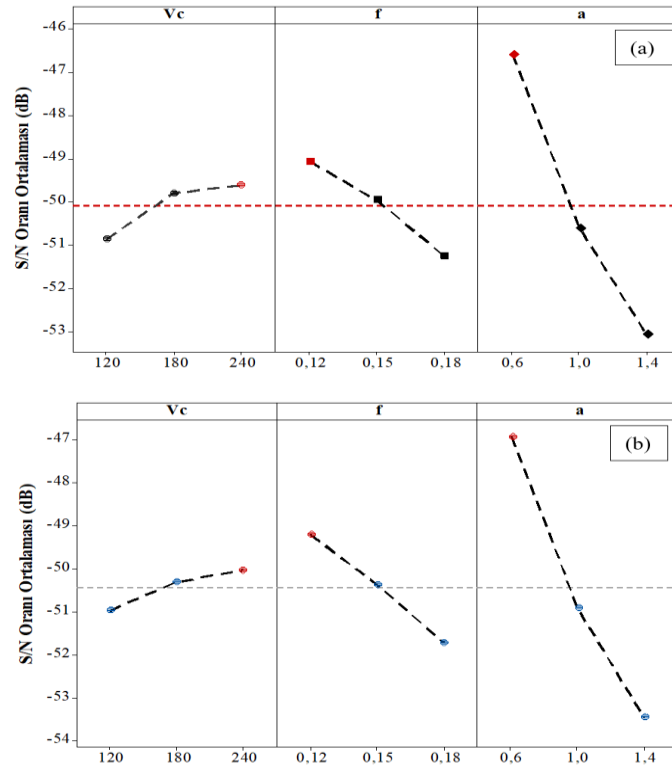
Çizelge 5. Deney sonuçları ve S/N değerleri

Test Id	Parameters			Fc (N)	Fc-S/N (dB)	Fc(FEA) (N)	Fc(FEA)-S/N (dB)
	A (Vc)	B (f)	C (a)				
1	120	0.12	0.6	208.5	-46.3613	200.9	-46.0206
2	120	0.15	1	372.3	-51.4109	380.4	-51.5957
3	120	0.18	1.4	550.5	-54.8073	580.5	-55.2686
4	180	0.12	1	285.4	-49.0969	300	-49.5424
5	180	0.15	1.4	430.7	-52.6694	450.5	-53.0643
6	180	0.18	0.6	240	-47.6042	260.4	-48.2995
7	240	0.12	1.4	385.5	-51.7092	400.7	-52.0412
8	240	0.15	0.6	195.7	-45.8007	210.3	-46.4444
9	240	0.18	1	368.2	-51.3170	380	-51.5957

Çizelge 6. Çıktı parametreleri için S/N yanıt tablosu

	Kesme Faktörleri			A (Vc)	B (f)	C (a)
	A (Vc)	B (f)	C (a)			
Fc				Fc(FEA)		
1	-50.86	-49.06	-46.59	-50.96	-49.20	-46.92
2	-49.79	-49.96	-50.61	-50.30	-50.37	-50.91
3	-49.61	-51.24	-53.06	-50.03	-51.72	-53.46
Delta	1.25	2.19	6.47	0.93	2.52	6.54

Şekil 3'te deneysel olarak elde edilen esas kesme kuvveti (Fc) değerlerinin ve tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti (Fc) değerlerine ait S/N değer grafiği görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde, her iki yöntem ile elde edilen kuvvet değerlerinin ilerleme miktarı ve talaş derinliğinin artması ile arttığı ve kesme hızındaki artışla azaldığı görülmektedir.



Şekil 3. (a) Fc ve (b) Fc (nümerik) için S/N oranlarının ortalama dağılımı

Varyans analizi (ANOVA)

Kesme parametrelerinin Fc üzerindeki etki düzeylerini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Çıktı parametresi (Fc) için varyans analizi sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir. Çizelgede (P) anlamlılık düzeyini gösterirken (F) değerleri etki düzeyini göstermektedir. F değeri en yüksek olan

faktör sonuç üzerinde en büyük etkiye sahip olan faktör olarak kabul edilmektedir (Nas ve Özbek, 2019; Özbek ve ark., 2021). Varyans analizi sonuçlarına göre deneysel olarak elde edilen esas kesme kuvveti üzerinde talaş derinliği, ilerleme miktarı ve kesme hızı sırasıyla, %80.97, %12.25 ve %6.6 etki oranına sahiptir. Analizde hata %0.18 oranında meydana gelmiştir. Benzer şekilde tornalama simülasyonları ile elde edilen esas kesme kuvveti üzerinde talaş derinliği, ilerleme miktarı ve kesme hızı sırasıyla, %80.32, %14.31 ve %4.8 etki oranına sahiptir. Analizde hata %0.57 oranında meydana gelmiştir. Sonuç olarak hem deneysel olarak elde edilen hem de tornalama simülasyonları ile elde edilen esas kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametre talaş derinliğidir.

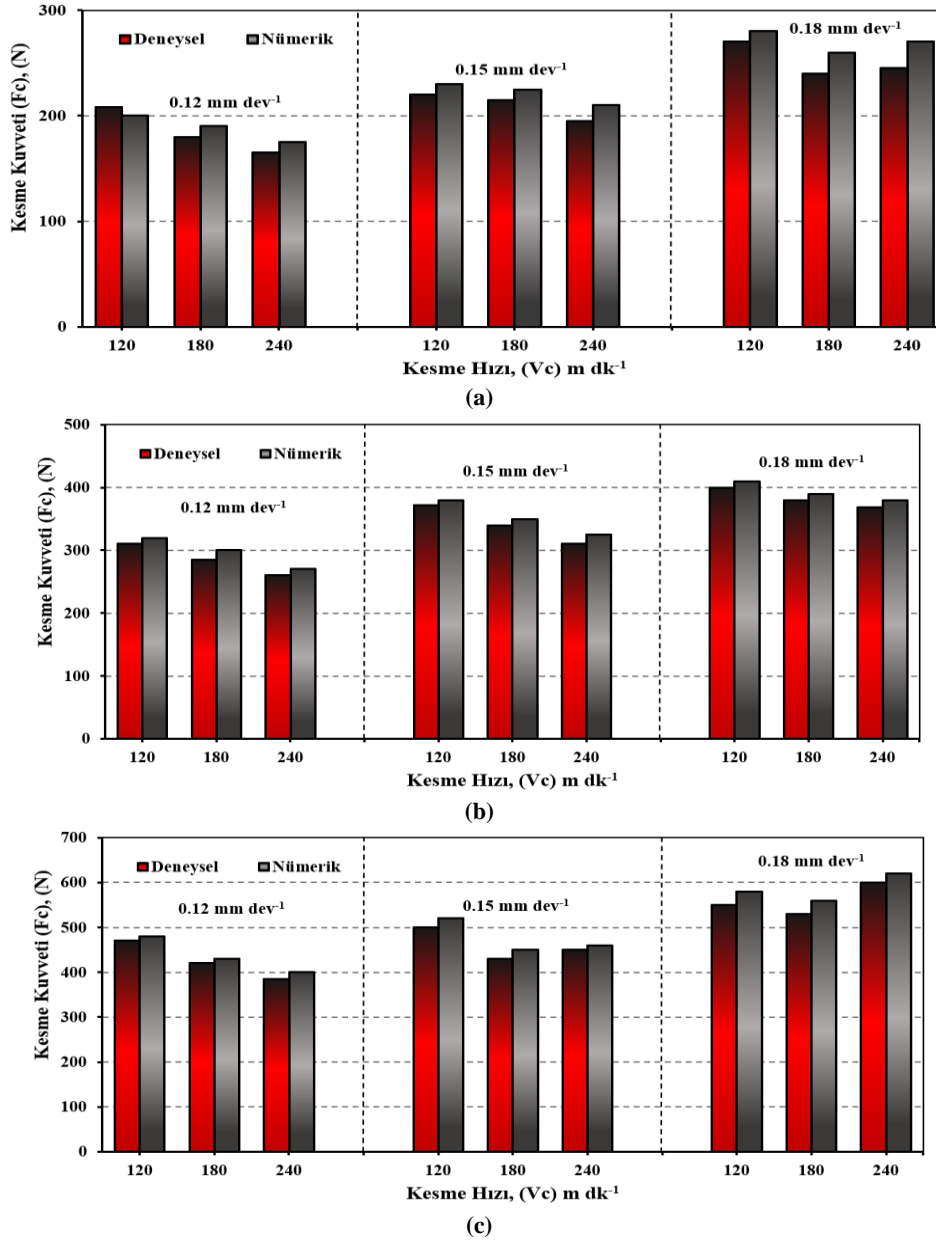
Çizelge 7. Varyans analiz sonucu

Faktörler	SD	Seq SS	Adj MS	F değeri	P değeri	Etki oranı (%)
<i>Fc Deneysel</i>						
Vc	2	7089	3544.3	36.54	0.027	6.60
f	2	13165	6582.3	67.86	0.015	12.25
a	2	86978	43489.3	448.34	0.002	80.97
Hata	2	194	97			0.18
Toplam	8	107426				100
<i>Fc Nümerik</i>						
Vc	2	5756	2877.8	8.35	0.107	4.80
f	2	17156	8577.8	24.90	0.039	14.31
a	2	96289	48144.4	139.77	0.007	80.32
Hata	2	689	344.4			0.57
Toplam	8	119889				100

Deneysel sonuçlarının değerlendirilmesi

AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin tornalanmasında ölçülen esas kesme kuvveti (Fc) değerlerinin ve tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti (Fc) değerlerinin kesme parametrelerine göre değişimi Şekil 4'te görülmektedir. Hem deneysel hem de tornalama simülasyonlarında elde edilen kesme kuvveti değerleri 158 N ile 500 N arasında değişmektedir. Şekil 4 incelendiğinde, Fc değerlerinin ilerleme miktarı ve talaş derinliğinin artması ile arttığı ancak kesme hızınının 180 m dak⁻¹ arttırılması ile azaldığı, ardından Fc değerlerinin yükselme eğiliminde olduğu görülmektedir. Kesme hızının artması ile kesme kuvveti değerlerinin genellikle azalma eğilimi sergilediği ancak ilerleme ve talaş derinliğinin yüksek seviyelerinde artış eğilimine girdiği gözlenmiştir. İlerleme miktarı (0.12 mm dev⁻¹) ve talaş derinliği (0.6 mm) için optimum seviyeler dikkate alındığında, kesme hızınının 120 m dk⁻¹'den 180 m dk⁻¹'ya çıkarılması ile Fc değerlerinin ortalama %13 azaldığı, kesme hızınının 240 m dk⁻¹'ya çıkarılmasıyla ise Fc değerlerinin ortalama %20 azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum kesme hızındaki artışa bağlı olarak sıcaklığın artması ile takım talaş temas alanının azalması ve malzemenin kesme mukavemetinin düşmesi ile ilişkilendirilmiştir. (Çiçek ve ark., 2013; Demir ve ark., 2018). Ancak, yüksek ilerleme ve talaş derinliklerinde artan kesme hızı ile kesme bölgesinde oluşan yüksek ısıdan kesici takım olumsuz etkilenmektedir. Şekil 5 de yer alan SEM resimlerine göre, kesici takım üzerinde meydana gelen burun aşınması, yanak aşınması ve küçük kırılmaların (chipping) kesici takımlarda etkili aşınma tipleri olduğu görülmektedir. Kesme parametrelerindeki artış ile yanak ve talaş yüzeyindeki aşınma oluklarının derinleştiği ve bunun sonucu olarak kesme kuvvetinin arttığı düşünülmektedir. Deneysel çalışmalar ile elde edilen esas kesme kuvveti değerleri göz önüne alındığında, Fc değerinin ilerleme miktarının 0.12 mm dev⁻¹'den 0.15 mm dev⁻¹'e artırılması ile yaklaşık %35 arttığı diğer taraftan ilerleme miktarının 0.15 mm dev⁻¹'den 0.18 mm dev⁻¹'e artırılması ile ise Fc değerinin yaklaşık %47 arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti değerleri değerlendirildiğinde, aynı şartlarda Fc değerinin sırasıyla yaklaşık %35 ve %46 arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, literatürde genellikle ilerleme hızınının artması ile talaş kesit alanının artması nedeniyle talaş kaldırma işleminde

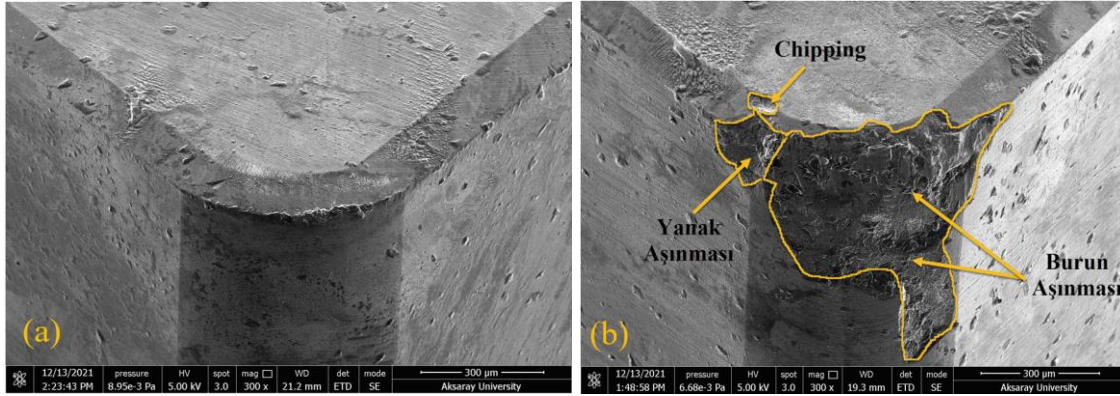
daha fazla güce ihtiyaç duyulması ve bunun sonucu olarak kesici takım üzerinde daha fazla gerilme oluşumu ile ilişkilendirilmiştir. Literatürde yer alan bir çalışmada da ilerleme hızının artması ile hem deneysel olarak hem de nümerik olarak elde edilen F_c değerlerinin arttığına yer verilmiştir (Yaşar ve ark., 2018). Benzer şekilde Tekaut ve arkadaşları da AISI H13 çeliğinin delinmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında aynı sonucu elde etmişlerdir (Tekaut ve ark., 2018).



Şekil 4. İşleme parametrelerinin F_c üzerindeki etkisi (a) 0.6 mm (b) 1 mm ve (c) 1.4 mm talaş derinliği

Deneysel olarak ölçülen esas kesme kuvveti (F_c) değerlerinin ve tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti (F_c) değerleri karşılaştırıldığında, her iki yöntem ile elde edilen kuvvet değerlerinin benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti (F_c) değerlerine göre deney olarak elde edilen kesme kuvveti değerlerinin yaklaşık %9 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yaşar ve arkadaşları, benzer bir çalışmalarında bu sapmayı iş parçası malzemesinin metalürjik yapısının, mekanik ve fiziksel özelliklerinin modellemeye literatürdeki verilere göre kullanılan iş parçası bilgilerinden farklı olması ile ilişkilendirmişlerdir (Yaşar ve ark., 2016). Her iki yöntemde en düşük kesme kuvveti değeri 240 m dk⁻¹ kesme hızı, 0.12 mm dev⁻¹ ilerleme miktarı ve 0.6 mm talaş derinliğinde deneysel olarak 158 N ve tornalama

simülasyonunda 170 N olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. Kesici takımların SEM görüntüleri (a) 240 m dak⁻¹, 0.12 mm dev⁻¹ ve 0.6 mm talaş derinliği (b) 240 m dak⁻¹, 0.18 mm dev⁻¹ ve 1.4 mm talaş derinliği.

Regresyon analizi

Girdi ve çıktı parametresi arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade edebilmek için regresyon analizi kullanılmıştır. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'te deneysel olarak elde edilen esas kesme kuvveti için sırasıyla geliştirilen doğrusal ve kuadratik denklemleri verilirken Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da ise tornalama simülasyonları ile elde edilen esas kesme kuvveti için sırasıyla geliştirilen doğrusal ve kuadratik denklemleri verilmiştir;

$$F_c = -106.2 - 0.506V_c + 1556f + 300.8a \quad (3)$$

$$F_c = 386.9 - 3.097V_c - 3094f + 455.8a + 0.007778V_c^2 + 13889f^2 - 34.37a^2 + 1.667V_c * f - 0.4583V_c * a \quad (4)$$

$$F_{c_{FEA}} = -147.2 - 0.472V_c + 1778f + 316.7a \quad (5)$$

$$F_{c_{FEA}} = 241.3 - 1.667V_c - 3167f + 500a + 0.006019V_c^2 + 16667f^2 - 31.25a^2 - 1.852V_c * f - 0.6944V_c * a \quad (6)$$

Regresyon analizinde, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin tahmin performansının bir ölçüsü olan belirleme katsayısı (R^2) dikkate alınmıştır. R^2 değeri her zaman 0 ile %100 arasındadır ve ayrıca R^2 değeri %100'e yaklaştıkça ilişkinin uyum durumunun çok güçlü olduğu söylenebilir (Sun ve ark., 2021). Deneysel olarak elde edilen esas kesme kuvvetinin tahmini için geliştirilen doğrusal ve kuadratik denklemlerin R^2 değerleri sırasıyla %98.18 ve %99.9 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde, tornalama simülasyonları ile elde edilen esas kesme kuvvetinin tahmini için geliştirilen doğrusal ve kuadratik denklemlerin R^2 değerleri sırasıyla %98.55 ve %99.8 olarak bulunmuştur. R^2 değerleri değerlendirildiğinde gerçek değerlere en yakın tahmin değerlerinin kuadratik denklemler ile elde edildiği görülmüştür.

Doğrulama testleri

Optimizasyon sürecinin son aşaması, optimizasyonun doğruluğunu kontrol etmek için optimal ve rastgele seviyelerde doğrulama deneyleri yapmaktır. Optimizasyonun başarısını görmek için, Eşitlik 7 ve 8 kullanılarak çıktı parametresi (F_c) için güven aralığı (CI) hesaplanmıştır.

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (7)$$

$$CI_{RaFcP} = \sqrt{F_{a,1,fe} V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (8)$$

Eşitlik 7'de yer alan N toplam deney sayısını, Tdof toplam serbestlik derecesini temsil etmektedir. Eşitlik 8'de yer alan $F_{a,1, fe}$; %95 güven seviyesini, α anlamlılık düzeyini, fe hata serbestlik derecesini, V_e hata varyansını, n_{eff} etkili yineleme sayısını ve R doğrulama deneyleri için tekrar sayısını göstermektedir. Güven aralığı hesaplamaları için kullanılan bu parametrelerin değerleri Çizelge 8'de yer almaktadır. Sonuç olarak, deneysel olarak elde edilen esas kesme kuvveti için $CI_{FC} = 55.62$ olarak hesaplanırken tornalama simülasyonları ile elde edilen esas kesme kuvveti için $CI_{FC} = 106.46$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8. Güven aralığı hesaplamalarda kullanılan değerler

	V_e	$F_{a,1,fe}$	α	fe	N	R	T_{dof}	n_{eff}
Fc	94	18.51	0.05	2	9	1	6	1.285
Fc(FEA)	344.4							

Diğer taraftan, Çizelge 3'ten çıkarılabileceği gibi, en düşük Fc ve Fc(FEA) için ideal seviye grubu $A_3B_1C_1$ 'dir. Tahmini optimum Fc ve Fc(FEA) değerlerinin hesaplanmasında Eşitlik 9 kullanılmıştır. T_{FC} (337N) ve $T_{FC(FEA)}$ (351N) değerleri her bir kesme ve tornalama simülasyonu şartı için elde edilen değerlerin ortalamasıdır. Sonuç olarak, $F_{c_{opt}}$ değeri 149 N olarak hesaplanırken $F_{c_{opt}(FEA)}$ değeri de 151.3N olarak hesaplanmıştır.

$$F_{c_{opt}} = (A_3 - T_{FC}) + (B_3 - T_{FC}) + (C_1 - T_{FC}) + T_{FC} \quad (9)$$

Değerler yerine konulduğunda;

$$[F_{c_{opt}} - CI_{FC}] < F_{c_{exp}} < [F_{c_{opt}} + CI_{FC}] = [149 - 55.62] < 158 < [149 + 55.62] = 93.38 < 158 < 204.62$$

$$[F_{c_{opt}} - CI_{FC}] < F_{c_{FEA}} < [F_{c_{opt}} + CI_{FC}] = [151.3 - 106.46] < 170 < [151.3 + 106.46] = 44.84 < 170 < 257.76$$

Çıktı parametresi (Fc ve Fc(FEA)) için optimum kesme parametrelerinde elde edilen değerler güven aralığı sınırları içindedir. Bu, optimizasyon işleminin (0.05 anlamlılık seviyesinde) doğruluğunun bir göstergesidir. Ayrıca, optimizasyon işleminin doğruluğu girdi faktörlerinin optimum ve rastgele seviyelerinde test edilmiş ve sonuçlar Çizelge 9'da verilmiştir. Çizelge 9 incelendiğinde, deneysel ve tahmini değerler arasındaki sapmanın kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu ve optimizasyon sürecinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği söylenebilir.

Çizelge 9. Doğrulama test sonuçları

Level	Doğrusal denklem			Kuatratik denklem		
	Deneysel	Tahmin	Hata (%)	Deneysel	Tahmin	Hata (%)
Fc (N)						
$A_3B_1C_1$ (optimum) 158		139.56	11.67	158	163.47	3.16
$A_2B_2C_1$ (Rastgele) 194.5		216.6	11.36	194.5	186.46	4.13
Fc(FEA) (N)						
$A_3B_1C_1$ (optimum) 170		142.90	15.88	170	183.29	7.64
$A_2B_2C_1$ (Rastgele) 210.3		224.56	6.78	210.3	199.96	4.91

SONUÇ

Bu çalışmada AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin farklı kesme parametrelerinde tornalanmasında oluşan esas kesme kuvveti (Fc) değerleri deneysel ve sonlu elemanlar analizi (FEA) ile incelenmiştir.

Ayrıca, Taguchi yöntemi ile en uygun kesme parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Her iki yöntem ile elde edilen kuvvet değerleri için ideal seviye grubu A3B1C1 (kesme hızı = 240 m dak-1, ilerleme miktarı = 0.12 mm dev-1 ve talaş derinliği = 0.6mm)'dir. Bu parametrelerde yapılan tornalama deneyinde en düşük Fc değeri 158 N olarak ölçülürken tornalama simülasyonunda 170N olarak elde edilmiştir.
- Varyans analiz sonuçlarına göre hem deneysel olarak elde edilen esas kesme kuvveti değerleri hem de tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti değerleri üzerinde sırasıyla %80.97 ve %80.32 etki oranları ile talaş derinliği en etkili parametredir.
- Deneysel olarak ölçülen esas kesme kuvveti (Fc) değerlerinin ve tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti (Fc) değerleri karşılaştırıldığında, kesme parametrelerinin etkileşimine bağlı olarak benzer bir eğilim sergilediği ve ayrıca, tornalama simülasyonlarında elde edilen esas kesme kuvveti (Fc) değerlerine göre deney olarak elde edilen kesme kuvveti değerlerinin yaklaşık %9 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
- Her iki yöntem ile elde edilen kuvvet değerlerini tahmin etmek için geliştirilen denklemlerin, Fc ve Fc(FEA) için sırasıyla 0.985 ve 0.998 belirleme katsayısı ile gerçek değerlere çok yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Doğrulama testi sonuçlarına göre optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Akgün M, Demir H, 2021. Estimation of surface roughness and flank wear in milling of Inconel 625 superalloy. *Surface Review and Letters*, 28(04): 2150011.
- Aydın M, Köklü U, 2017. Identification and modeling of cutting forces in ball-end milling based on two different finite element models with Arbitrary Lagrangian Eulerian technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1): 1465-1480.
- Cebeci İ, Özlü B, Demir H, 2021. AISI 310 kalite östenitik paslanmaz sac malzemenin lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin kesim kalitesine etkisinin incelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2791-2799.
- Cui X, Wang D, Guo J, 2016. Influences of tool rake angle and cutting speed on ceramic tool failure in continuous and intermittent turning of hardened steel. *Ceramics International*, 42(10): 12390–400.
- Çiçek A, Kara F, Kivak T, Ekici E, 2013. Evaluation of Machinability of Hardened and Cryo-Treated AISI H13 Hot Work Tool Steel with Ceramic Inserts. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41: 461–69.
- Demir H, Gündüz S, Erden MA, 2018. Influence of the Heat Treatment on the Microstructure and Machinability of AISI H13 Hot Work Tool Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5): 2951–58.
- Davis JR, 1995. *ASM Specialty Handbook: Tool Materials*. ASM International, pp. 251-255, Ohio-ABD.
- Fallböhmer P, Rodríguez CA, Özel T, Altan T, 2000. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 98(1), 104-115.
- Işık Y, 2014. The performance evaluation of ceramic and carbide cutting tools in machining of austempered ductile irons. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 19(2), 67-76.
- Kivak T, 2014. Optimization of Surface Roughness and Flank Wear Using the Taguchi Method in Milling of Hadfield Steel with PVD and CVD Coated Inserts. *Measurement*, 50: 19–28.

- Korkmaz ME, Günay M, 2018. Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(9): 4863–70.
- Medvedeva A, Bergström J, Gunnarsson S, Andersson J. 2009. High-Temperature Properties and Microstructural Stability of Hot-Work Tool Steels. *Materials Science and Engineering: A*, 523(1–2): 39–46.
- Nas E, Altan Özbek N, 2019. Optimization of the Machining Parameters in Turning of Hardened Hot Work Tool Steel Using Cryogenically Treated Tools. *Surface Review and Letters*, 27(05): 1950177.
- Özbek N, Özbek O, Kara F, 2021. Statistical Analysis of the Effect of the Cutting Tool Coating Type on Sustainable Machining Parameters. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(10): 7783–95.
- Özlü B, Akgün M, Demir H, 2019. Analysis and Optimization of Effects on Surface Roughness of Cutting Parameters on Turning of AA6061 Alloy. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 5(2): 151–58.
- Özel T, 2003. Modeling of hard part machining: effect of insert edge preparation in CBN cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(2): 284-293.
- Parida AK, Maity K, 2019. FEM Analysis and Experimental Investigation of Force and Chip Formation on Hot Turning of Inconel 625. *Defence Technology*, 15(6): 853–60.
- Parida AK, Maity K, 2018. Numerical Analysis of Chip Geometry on Hot Machining of Nickel Base Alloy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(10): 498.
- Persson A, Hogmark S, Bergström J, 2004. Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels. *International Journal of Fatigue*, 26(10): 1095-1107.
- Reimer A, Luo X, 2018. Prediction of Residual Stress in Precision Milling of AISI H13 Steel. *Procedia CIRP*, 71: 329–34.
- Stenberg N, Proudian J, 2013. Numerical Modelling of Turning to Find Residual Stresses, *Procedia CIRP*, 8: 258.
- Sun X, Li J, Cameron D, Zhou A, 2021. Field monitoring and assessment of the impact of a large eucalypt on soil desiccation, *Acta Geotechnica*, 1-14.
- Taştemur D, Gündüz S, 2021. The Effect of Tempering and Strain Aging Processes on the Mechanical Properties of AISI H10 Hot Work Tool Steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3): 1387–97.
- Tekaüt İ, Demir H, Şeker U, 2018. Experimental Analysis and Theoretical Modelling of Cutting Parameters in the Drilling of AISI H13 Steel with Coated and Uncoated Drills. *Transactions of FAMENA*, 42(2): 83–96.
- Umbrello D, Rizzuti S, Outeiro JC, Shivpuri R, M'Saoubi R, 2008. Hardness-Based Flow Stress for Numerical Simulation of Hard Machining AISI H13 Tool Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 199(1–3): 64–73.
- Yaka H, 2021. Tornalama Sonrası Çıkan Talaşlardan Elde Edilen Alüminyum 5000 Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Yöntemi ile Analizi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11 (1): 464-473.
- Yaşar N, Yurtkuran H, Günay M, 2018. Sertleştirilmiş X40CrMoV5-1 Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Kuvvetinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4): 765-773.
- Yaşar N, Sekmen M, Korkmaz ME, 2016. AISI P20 Çeliğinin İşlenmesinde Kesme Kuvvetinin Deneysel ve Nümerik Analizi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım ve Teknoloji*, 4(1): 13–19.
- Yan H, Hua J, Shivpuri R, 2005. Numerical simulation of finish hard turning for AISI H13 die steel. *Science and Technology of Advanced Materials*, 6(5): 540-547.
- Zhang Q, Zhang S, Li J, 2017. Three-Dimensional Finite element simulation of cutting forces and cutting temperature in hard milling of AISI H13 steel. *Procedia Manufacturing*, 10: 37–47.