



Alınış tarihi (Received): 07.11.2023

Kabul tarihi (Accepted): 24.11.2023

## AISI 316L Paslanmaz Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Kuvvetlerinin DeneySEL ve Sonlu Elemanlar Analiziyle Araştırılması Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi

Barış ÖZLÜ<sup>1,\*</sup>, Levent UĞUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Aksaray, barisozlu@aksaray.edu.tr

<sup>2</sup> Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, leventozge@gmail.com

\*Sorumlu yazar: leventozge@gmail.com

**ÖZET:** Bu çalışmada, AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme kuvveti üzerine işleme parametrelerinin etkileri deneysel olarak araştırması amaçlanmıştır. Ayrıca yapılan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve Yapay Sinir Ağ (YSA) ile tahmin edilen kesme kuvvetlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması hedeflenmiştir. Deneyler ve sonlu elemanlar analizi kesme hızının, ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin üç farklı seviyesinde yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri ThirdWave AdvantEdge programında yapılmıştır. YSA ile kesme kuvvetlerinin tahmininde Regresyon ve YSA metotlarından yararlanılmıştır. Sonuç olarak, deneysel, SEY, Regresyon ve YSA sonuçlarına göre optimum işleme parametrelerinin 0,8 mm kesme derinliği, 170 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme miktarı olarak belirlenmiştir. Deneylerde en düşük kesme kuvveti 260,1 N ölçülmüştür. Elde edilen deneysel sonuçları ile SEY, Regresyon ve ANN sonuçlarının örtüştüğü ve kabul edilebilir olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** – AISI 316L, tornalama, kesme kuvvetleri, sonlu elemanlar analizi, YSA

## Investigation of Cutting Forces in Turning of AISI 316L Stainless Steel with Experimental and Finite Element Analysis on Prediction with Artificial Neural Networks

**ABSTRACT:** In this study, the effects of machining parameters on cutting force in turning AISI 316L stainless steel are aimed to experimentally investigated. In addition, it is aimed to compare the cutting forces predicted by the finite element method (FEM) and Artificial Neural Network (ANN) with the experimental results. Experiments and finite element analysis were carried out at three different levels of cutting speed, feed rate and depth of cut. Finite element analyzes were performed in the ThirdWave AdvantEdge program. Regression and ANN methods were used to predict cutting forces with ANN. As a result, according to experimental, FEM, Regression and ANN results, the optimum machining parameters were determined as 0.8 mm cutting depth, 170 m/min cutting speed and 0.12 mm/rev feed rate. In the experiments, the lowest cutting force was measured as 260.1 N. It has been determined that the obtained experimental results and FEM, Regression and ANN results overlap and are acceptable.

**Keywords** – AISI 316L, turning, cutting forces, finite element analysis, ANN

### 1. Giriş

Paslanmaz çelik malzemeler arasında yer alan AISI 316L, elastiklik modülü, tokluk, korozyon direnci, dayanıklılık, dövülebilirlik, akma dayanımı, kayma modülü, kaynak edilebilirlik ve termal genleşme gibi mükemmel özellikleri nedeni ile deniz yapılarında, gıda, medikal, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın kullanılmaktadır. Ancak AISI 316L paslanmaz çelik yüksek sünekliliği, yüksek mukavemeti, düşük ısı iletkenliği,

sertleşme eğilimi ve yüksek talaş yığılma (BUE) oluşumu nedeniyle işlenmesi zor malzemeler arasında yer almaktadır (Aydın & Kazan, 2023; Bharasi et al., 2019; Tesler et al., 2015; Uysal et al., 2016; Yakubu et al., 2020). AISI 316L paslanmaz çeliğin işlenmesi sırasında takımın aşırı aşınması ve işlenmiş parçanın yüzey kalitesinin bozulması karşılaşılan zorluklardan bazılarıdır (Oussama et al., 2023). Özellikle talaşlı imalat işlemlerinde kesme kuvveti bileşenlerinin belirlenmesi ve kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği gibi kesme parametrelerini optimize ederek kesme kuvvetinin azaltılması, talaşlı imalat işlemlerinde güç tüketimini doğrudan düzenleyebilir ve bu da daha yeşil ve çevre dostu bir üretim süreci oluşturulmasına yol açar (Korkmaz & Günay, 2018).

Literatürde AISI 316L paslanmaz çeliğin işlenmesinde kesme parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkileri deneysel, sonlu elemanlar yöntemi ve bu sonuçların YSA ile modellendiği farklı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Örneğin; Galanis ve ark. (Galanis & Manolakos, 2014), AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisini belirlemede deneysel ve sonlu elemanlar modellemesi kullanmıştır. Deneysel kesme kuvveti değerleri sonlu elemanlar sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar modellemesi elde edilen verilerin yüksek doğrulukta olduğu sonucuna varılmıştır. Parihar ve ark. (Parihar et al., 2017), seramik takım kullanılarak AISI H13 çeliğinin farklı kesme parametrelerinde tornalanması sonucu oluşan kesme kuvvetleri deneysel ve sonlu elemanlar modellemesi ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak deneysel kesme kuvveti sonuçları ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen kesme kuvvetlerinin birbirine çok yakın olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu sonuçlarla da maliyetli ve zaman alıcı deneyler yapmadan yaklaşık kesme kuvvetlerini sonlu elemanlar yöntemleri ile tahmin edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Akgün (Akgün, 2022), AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkilerini deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir. Ayrıca deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen kesme kuvvetleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak yapılan analiz sonuçlarına göre deneysel ve sonlu elemanlar analizi için en etkin kesme parametresi sırası ile %80.97 ve %80.32 katkı oranları ile en etkin parametrenin talaş derinliği olduğunu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada deneysel verilerle sonlu elemanlar analizi ile elde edilen veriler arasında %9'luk bir farkın olduğu görülmüştür. Özlü ve Uğur (Özlü & Uğur, 2021), yaptıkları çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında oluşan kesme kuvvetlerine etki eden optimum kesme parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Kesme parametrelerinin optimum seviyelerini belirlemek için Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanmış ve sayısal simülasyon sonuçlarının çıktılarına göre kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkilerini belirlemek için Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Sonuç olarak yaptıkları FEM analizi ile literatürdeki benzer çalışmaların örtüştüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca yapılan analizler sonucu kesme kuvveti üzerine en etkin kesme parametresinin kesme derinliği olduğunu tespit etmişlerdir. Literatürde deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile farklı malzemelerin tornalanmasında, frezelenmesinde ve delinmesinde oluşan kesme kuvvetlerinin, kesme sıcaklığının ve talaş oluşumunun olduğu farklı çalışmaların olduğu görülmüştür (Akgün, 2022; Aydın et al., 2021; Guo & Dornfeld, 2000; Mebrahitom et al., 2017; Rai & Xirouchakis, 2009; Raju & Swamy, 2012).

Literatür araştırmasında, AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında meydana gelen kesme kuvvetinin deneysel ve sonlu elemanlar modellemesi ile karşılaştırılması ve YSA ile tahmini üzerine yapılmış bir çalışmanın sınırlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi kesme parametrelerine bağlı AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme kuvvetlerinin deneysel ve sonlu

elemanlar modellemesi yapılmıştır. Ayrıca deneysel ve sonlu elemanlar modelleme verilerine bağlı YSA modellemesi yapılarak karşılaştırılmıştır

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. İş parçası malzemesi

Yapılan çalışmada iş parçası olarak  $\varnothing 35 \times 250$  mm boyutlarında yüksek sünekliliği, yüksek mukavemeti, düşük ısı iletkenliği, sertleşme eğilimi ve yüksek talaş yığılma (BUE) oluşumu nedeniyle işlenmesi zor malzemeler arasında yer alan AISI 316L paslanmaz çelik seçilmiştir. İş parçasının kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de sunulmuştur.

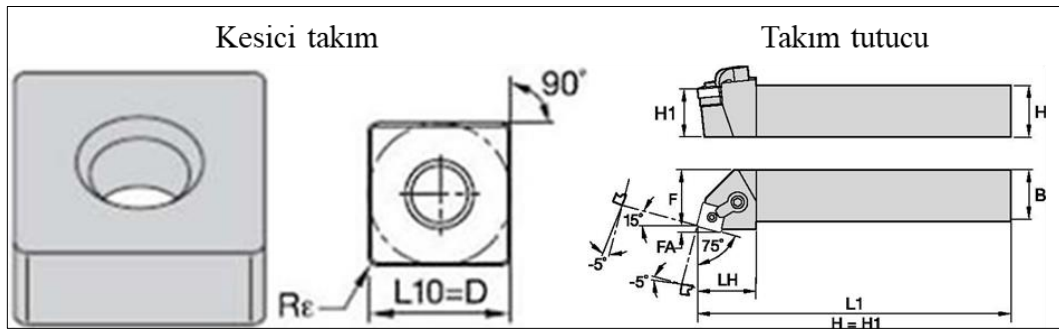
Tablo 1. AISI 316L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu.

Table 1. Chemical composition of AISI 316L stainless steel.

Elementler	Elementler								
	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	S	P
Wt%	18,10	12,70	2,32	0,95	0,56	0,11	0,03	0,01	0,01

### 2.2. Kesici takımlar, kesme parametreleri ve takım tezgâhı

Kesme işlemleri boyunca kesici takım kaplamasını ihmal edebilmek için Kennametal firması tarafından üretilen K68 kalite gurubunda yer alan ve SNMA 120408 geometriye sahip kaplamasız sinterlenmiş karbür takım seçilmiştir. Kesici takımın CNC torna tezgâhının taretine sabitlenmesinde aynı firma tarafından üretilen MSRNL204D kodlu takım tutucu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takımın ve takım tutucunun görseli Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Kesici takım ve takım tutucu.

Figure 1. Cutting tool and tool holder.

Yapılan literatür çalışması ve kesici takım firma yetkililerinin önerisi üzerine tornalama deneylerinde kullanılmak üzere seçilen kesme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Çalışmalar kuru kesme şartlarında toplan 27 deney yapılmıştır. Tornalama deneyleri 10kW iş mili gücüne, maksimum 3500 dev/dak çıkabilen ve Fanuc OT kontrol ünitesine sahip Johnford TC-35 model CNC Torna tezgâhında yapılmıştır.

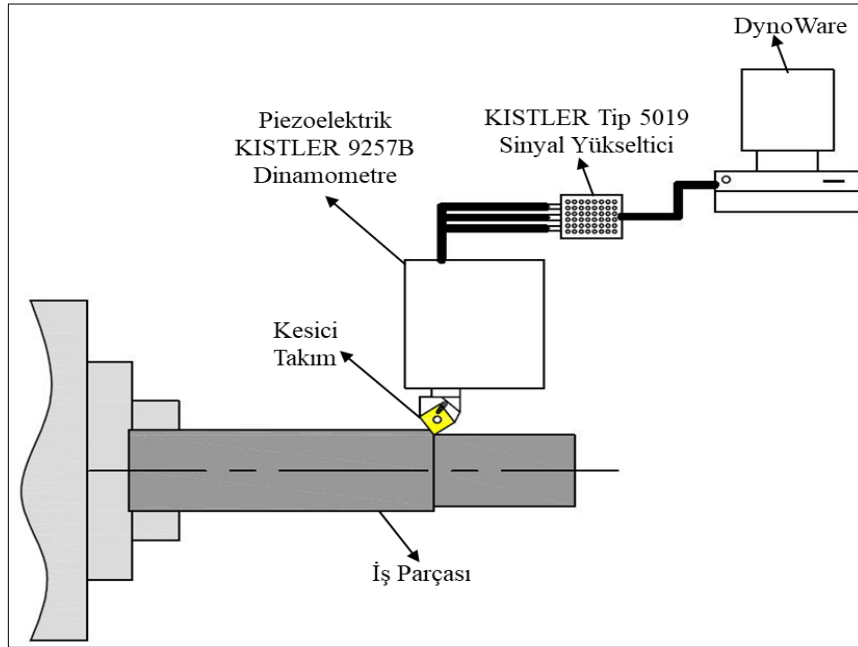
Tablo 2. Kesme parametreleri ve seviyeleri

Table 2. Cutting parameters and levels

Kesme Parametreleri	Seviyeler		
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme Hızı, $V_c$ (m/dak)	90	130	170
İlerleme Miktarı, $f$ (mm/dev)	0,12	0,16	0,2
Kesme Derinliği, $a_p$ (mm)	0,8	1,3	1,8

### 2.3. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi

Tornalama deneyleri sırasında kesme kuvvetinin üç bileşenin ölçümü tarete sabitlenmiş piezoelektrik KISTLER 9257B dinamometre ile gerçekleştirilmiştir. Dinamometre ve bilgisayar arasında bağlanan KISTLER Tip 5019 sinyal yükseltici ile veriler bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veriler aynı firmanın DynoWare yazılımı ile sayısal verilere dönüştürülerek değerlendirilmiştir. Deneylerde kullanılan test düzeneği Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik görünümü.  
Figure 2. Schematic view of the experimental setup.

### 2.4. Nümerik analiz

Bu çalışmada, AISI 316L Paslanmaz Çelik malzemenin üç boyutlu tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak araştırılmıştır. Tornalama operasyonun nümerik analizleri (kesme simülasyonları) Third Wave AdvantEdge yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEY simülasyonlarından elde edilen sonuçlar daha sonra deneysel çalışmadan elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. AISI 316L paslanmaz çelik malzemenin mekanik özellikleri Tablo 3’de verilmiştir (Akkök; Maranhão & Davim, 2010).

Tablo 3. AISI 316L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri (Akkök; Maranhão & Davim, 2010).

*Table 3. Mechanical properties of AISI 316L stainless steel [17, 18].*

	Sertlik (Rockwell B)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson oranı	Young modülü (GPa)	Isıl iletkenlik katsayısı (W/mxK 100 °C)
AISI 316L	79	8000	0.29	193	15,9

AISI 316L paslanmaz çeliğin plastik deformasyon davranışı, Johnson-Cook (JC) modeli tarafından tanımlanmıştır. Kullanılan Johnson-Cook malzeme modeli, Eşitlik 1’de ifade edilmiştir. AISI 316L paslanmaz Çelik için Johnson-Cook Parametreleri Tablo 4’de verilmiştir. Bu malzeme modeli özellikle metallerin yüksek gerinim deformasyon hızını modeller ve genellikle adyabatik geçici dinamik analizlerde kullanılır. Sertleştirme, akma gerilmesinin  $\sigma^0$  olarak kabul edildiği belirli bir izotropik sertleşme türünü içerir (Dorogoy; Johnson; Yan). Analizlerde 3B orthogonal ve Lagrange yöntemi kullanılmıştır. Program giriş parametreleri Tablo 5’de verilmiştir.

$$\sigma^0 = (A + B(\epsilon^p)^n) \left(1 + C \log\left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\epsilon_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^m\right) \quad (1)$$

Tablo 4. Johnson-Cook model parametreleri (Kara et al., 2016; Tounsi et al., 2002).

*Table 4. Johnson-Cook model parameters [22, 23].*

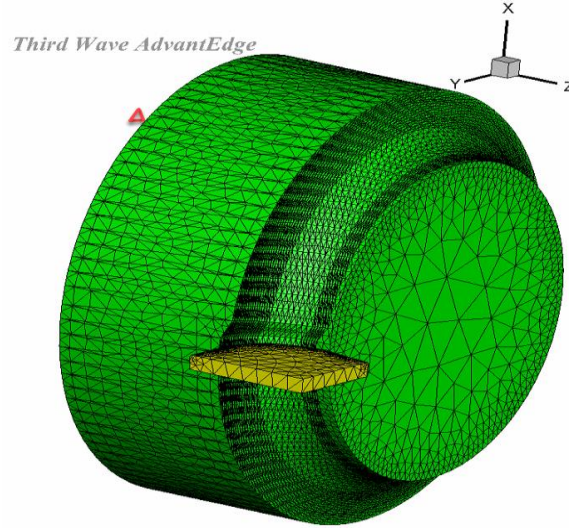
AISI 316L	A (MPa)	B (MPa)	n	T <sub>melt</sub> (°C)	T <sub>room</sub> (°C)	m	C	$\epsilon_0$ (1/s)
	514	514	0.508	1399	20	0.533	0.042	0.001

Tablo 5. Program giriş parametreleri

*Table 5. Program input parameters*

Malzeme			
Malzeme Uzunluğu	3 mm		
Malzeme Dış Çapı	6 mm		
Takım			
Talaş açısı	6.0°		
Boşluk açısı	6.0°		
Kesme kenarı yarıçapı	0.02 mm		
İşleme Parametreleri			
Kesme Hızı, Vc (m/dak)	90	130	170
İlerleme Miktarı, f (mm/dev)	0,12	0,16	0,2
Kesme Derinliği, ap (mm)	0,8	1,3	1,8

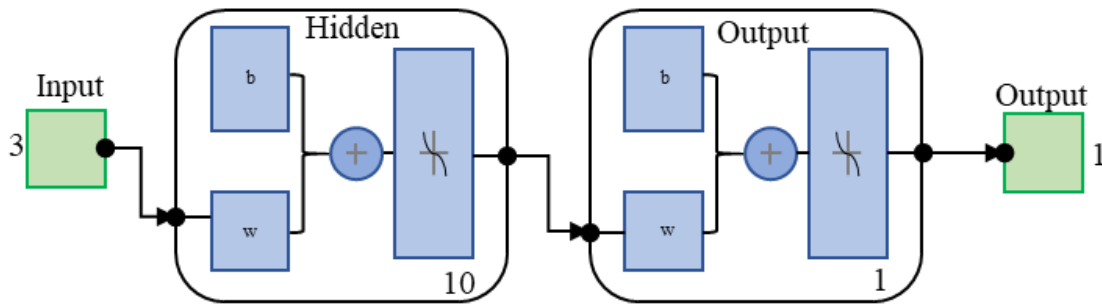
FEM analizlerinde ağ yapısı, malzeme modeli kadar önemli bir faktördür. Özellikle talaş kaldırma operasyonlarının FEM analizinde, çözümü belirleyen önemli bir etken yeniden mesh oluşturma yaklaşımıdır. Bu bağlamda, iş parçasının eleman boyutu ve yeniden mesh oluşturma parametrelerinin doğru seçilmesi, analizin doğruluğunu belirleyen kritik unsurlardan biridir (Niesłony et al., 2015). 3D tornalama FEM modeli, mesh yapısı ve sınır şartları Şekil 3’te gösterilmektedir.



Şekil 3. FEM modelinin sınır koşulları ve ağ yapısı  
Figure 3. Boundary conditions and network structure of the FEM model

## 2.5. Yapay sinir ağları

İşlenebilirlik çalışmalarında, kesme parametrelerinin deneysel sonuçlar üzerindeki etkilerini araştırmak için tahmine dayalı modeller, gerekli işleme süreçlerinde değerli araçlar olarak kabul edilmektedir. Yapay Sinir Ağları (YSA), incelenen kesme parametreleri aralığında deneysel sonuçları tahmin etmek için sıkça kullanılan ve bilinen bir tahmine dayalı modeldir. Özellikle YSA, birçok araştırmada, özellikle tornalama deneylerinde sürecin başarılı bir şekilde modellenmesinde araştırmacılar tarafından etkili bir araç olarak benimsenmiştir. (Davim et al., 2008; Djavanroodi et al., 2013; Ranganathan et al., 2010). Bu nedenle bu çalışma, kesme parametrelerine (kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği) dayalı olarak kesme kuvvetini modellemek ve tahmin etmek için bir YSA tekniği kullanmıştır. Genel bir YSA'nın basit birçok katmanlı mimarisi Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Şematik ANN diyagramı (Ramezani & Afsari, 2015)  
Figure 4. Schematic ANN diagram [28]

MATLAB® yazılımı ve Neural Networks Toolbox kullanılarak kodlanan ANN eğitim ve tahmin analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan ANN parametreleri Tablo 6'da belirtilmiştir. Optimum ANN parametrelerini belirlemek için farklı öğrenme algoritmaları, nöron sayıları ve benzeri parametrelerle çeşitli ANN ağları denenmiştir. En iyi model seçimi için performans kriteri olarak ortalama karesel hata (MSE) ve regresyon katsayısı

(R) değerleri kullanılmıştır. Analizlerde eğitim algoritması olarak Bayesian regularization kullanılmıştır. Bu algoritma genellikle daha uzun çözüm süreleri gerektirse de, zorlu, küçük veya gürültülü veri kümeleri için etkili bir çözüm sunar (MacKay, 1992). ANN modelinde 1 gizli katman ve 100 nöron kullanılmış, 3-10-1 ağ yapısı kurulmuştur. Girdi ve çıktı verileri, dividerand fonksiyonu kullanılarak %70 oranında eğitim ve %30 oranında test için rastgele olarak ayrıştırılmıştır. Transfer fonksiyonu olarak, Eşitlik 5'te belirtilen hiperbolik tanjant sigmoid transfer fonksiyonu (tansig) kullanılmıştır.

Table 6. YSA modelinin eğitim parametreleri  
Table 6. Training parameters of the ANN model

Parameter	Value
Gizli katman	1
Nöron sayısı	10
Number of epochs (max)	1000
Learning rate (lr)	0.00005
Rate of train data (random)	70%
Rate of test data (random)	30%
Learning algorithm	trainbr (bayesian regularization)
Transfer function	tansig (tangent sigmoid)
Learning rule	Back propagation

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar

Deneyel ve nümerik analiz ile AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında kesme parametrelerine bağlı esas kesme kuvveti sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca Tablo 7'de deneysel sonuçlara bağlı yapılan modellemeler sonucu elde edilen tahmini esas kesme kuvvetleri ve hata oranları görülmektedir.

Tablo 7. Kesme parametrelerine bağlı esas kesme kuvvetleri ve hata oranları.  
Table 7. Main cutting forces and error rates depending on cutting parameters.

Den. No	Kesme Parametreleri			Çıktı Parametreleri				Hata Oranları		
	ap (mm)	Vc (m/dak)	f (mm/dev)	Den. Fc (N)	Fem Fc (N)	Regression Fc (N)	ANN Fc (N)	Hata FEM	Hata Regression	Hata ANN
1	0,8	90	0,12	386,49	410,26	384,479	373,160	6,150	0,520	3,449
2	0,8	90	0,16	489,65	468,55	491,923	492,233	4,309	0,464	0,528
3	0,8	90	0,2	596,95	581,19	599,367	600,889	2,640	0,405	0,660
4	0,8	130	0,12	318,6	312,10	309,611	309,544	2,040	2,821	2,842
5	0,8	130	0,16	412,7	437,26	417,055	403,407	5,951	1,055	2,252
6	0,8	130	0,2	507,31	485,70	524,499	505,968	4,260	3,388	0,265
7	0,8	170	0,12	260,1	253,96	234,743	279,828	2,361	9,749	7,585
8	0,8	170	0,16	351,21	342,64	342,187	354,261	2,440	2,569	0,869
9	0,8	170	0,2	438,02	419,97	449,631	437,536	4,121	2,651	0,111
10	1,3	90	0,12	432,95	460,88	438,604	429,842	6,451	1,306	0,718
11	1,3	90	0,16	546,11	532,78	546,048	557,774	2,441	0,011	2,136
12	1,3	90	0,2	663,41	643,38	653,492	661,204	3,019	1,495	0,332
13	1,3	130	0,12	360,49	345,49	363,736	355,524	4,161	0,900	1,378
14	1,3	130	0,16	477,81	467,68	471,180	470,246	2,120	1,388	1,583
15	1,3	130	0,2	565,13	598,76	578,624	577,124	5,951	2,388	2,122
16	1,3	170	0,12	292,6	285,46	288,868	298,970	2,440	1,275	2,177
17	1,3	170	0,16	396,71	387,03	396,312	389,433	2,440	0,100	1,834
18	1,3	170	0,2	490,52	469,62	503,756	488,246	4,261	2,698	0,464
19	1,8	90	0,12	476,38	465,14	492,729	480,790	2,359	3,432	0,926
20	1,8	90	0,16	611,37	596,45	600,173	599,986	2,440	1,831	1,862

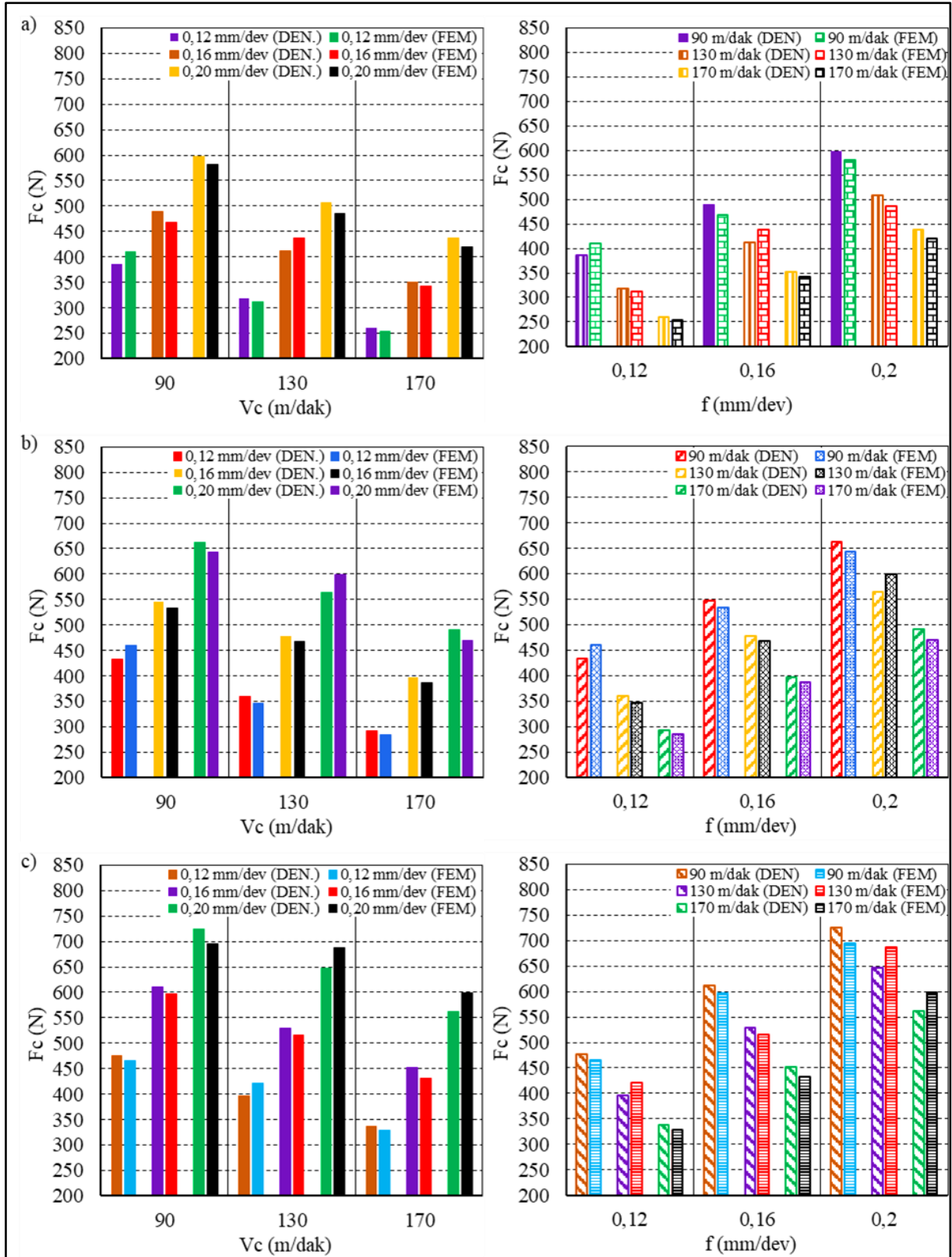
21	1,8	90	0,2	724,99	695,12	707,617	693,616	4,120	2,396	4,328	
22	1,8	130	0,12	395,97	421,51	417,861	413,662	6,450	5,528	4,468	
23	1,8	130	0,16	528,85	515,95	525,305	541,721	2,439	0,670	2,434	
24	1,8	130	0,2	646,19	687,87	632,749	644,062	6,450	2,080	0,329	
25	1,8	170	0,12	337,35	329,12	342,993	338,380	2,440	1,673	0,305	
26	1,8	170	0,16	451,77	432,07	450,437	448,715	4,361	0,295	0,676	
27	1,8	170	0,2	562,41	598,69	557,881	554,119	6,451	0,805	1,474	
								mean	3,891	1,996	1,782
								maks	6,451	9,749	7,585
								min	2,040	0,011	0,111

### 3.1. Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Tornalama işlemi sırasında işleme kalitesi, kesici takıma gelen yükleri ve tezgâhın tükettiği gücü belirlemek için kesme kuvvetlerinin incelenmesi hayati önem taşımaktadır. Takım iş parçası arasındaki sürtünme ve kesme bölgesinde oluşan ısı ile doğrudan bağlantılıdır. Ayrıca yüksek kesme kuvvetleri takım aşınmasını ve yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemektedir. Genel olarak kesme kuvveti bileşenleri içerisinde işleme kalitesi, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimi üzerine en etkin bileşen esas kesme kuvveti (Fc) olduğu bilinmektedir. Bu nedenlerden dolayı farklı kesme parametrelerde AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalanmasında oluşan esas kesme kuvvetleri deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır.

AISI 316L paslanmaz çeliğin deneysel ve nümerik olarak yapılan tornalanma işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı esas kesme kuvveti değişimleri Şekil 5’de verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde deneysel olarak yapılan deneylerde kesme parametrelerine bağlı esas kesme kuvvetleri 260,1 N ile 724,99 N arasında değiştiği görülmektedir. Ayrıca bu değerle nümerik analizler sonucu 253,96 N ile 695,12 N arasında değişmiştir.





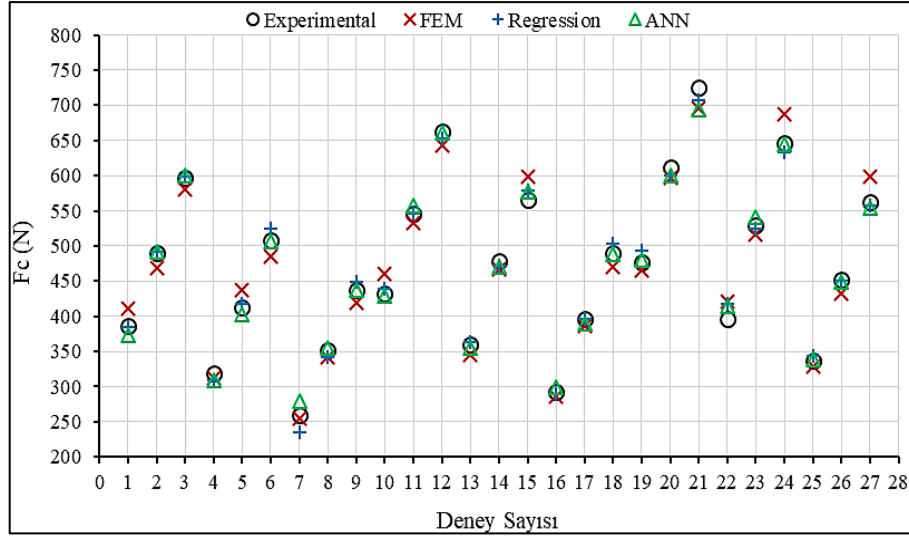
Şekil 5. Farklı kesme parametrelerde esas kesme kuvvetinin deneysel ve nümerik analiz sonuçları. a) 0,8 mm, b) 1,3 mm ve c) 1,8 mm

Figure 5. Experimental and numerical analysis results of the main cutting force at different cutting parameters. a) 0.8mm, b) 1.3mm and c) 1.8mm

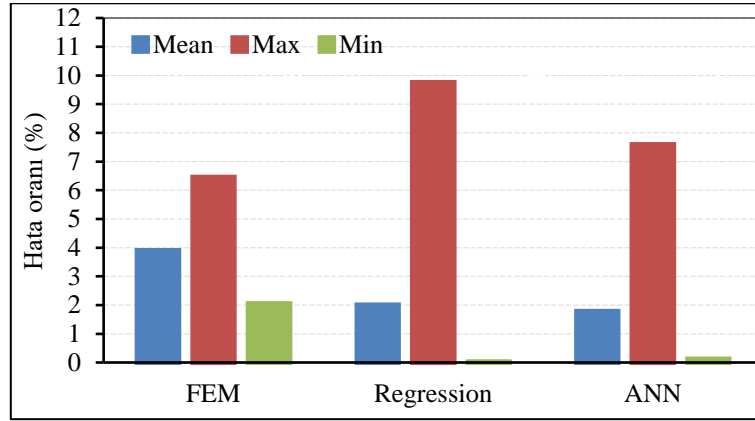
Genel olarak Şekil 5'e bakıldığında sabit kesme derinliklerinde ve sabit ilerleme miktarlarında deneysel ve nümerik analiz sonuçlarında esas kesme kuvveti kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Kesme hızının artması ile esas kesme kuvvetinin azalması, işleme sırasında takım iş parçası arasında kesme sıcaklığının artması ile ilişkilidir. Dolayısı ile artan kesme sıcaklığı iş malzemesinin mukavemetini, talaş kalınlığını ve takım/talaş temas uzunluğunda azalmaya neden olmasına bağlanabilir (Aydın et al., 2021; Camuşcu, 2006; Ciftci, 2006; Gürbüz et al., 2020). Örneğin; 0,8 mm kesme derinliğinde, 0,12 mm/dev ilerleme miktarında ve 90 m/dak kesme hızında deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile kesme kuvveti sırası ile 386,49 N ve 410,26 N ölçülmüştür. Kesme hızının sırası ile 130 m/dak ve 170 m/dak çıkarılması ile deneysel sonuçlarda kesme kuvveti sırası ile %17,57 ve %32,70 oranlarda azaldığı görülürken, sonlu elemanlar analizi sonuçlarında ise bu değerlerin %23,93 ve 38,10 olduğu görülmüştür. Şekil 5'e bakıldığında sabit kesme derinliklerinde ve sabit kesme hızında deneysel ve nümerik analiz sonuçlarında esas kesme kuvveti ilerleme miktarının artırılması ile arttığı izlenmiştir. İlerleme miktarının artışına bağlı esas kesme kuvvetindeki artış, ilerleme miktarındaki artışa paralel olarak birim zamanda kaldırılan talaş hacmi arttığı için bu sonuç sürpriz değildir (Barış, 2021; Kumar & Choudhury, 2008). Örneğin; 1,3 mm kesme derinliğinde, 90 m/dak kesme hızında ve 0,12 mm/dev ilerleme miktarında deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile kesme kuvveti sırası ile 432,95 N ve 460,88 N ölçülmüştür. İlerleme miktarının sırası ile 0,16 mm/dev ve 0,20 mm/dev'e çıkarılması ile deneysel sonuçlarda sırası ile %20,72 ve %34,74 oranlarda arttığı görülürken, sonlu elemanlar analizi sonuçlarında ise bu değerlerin %13,50 ve %28,37 oranlarında artma olmuştur. San olarak Şekil 5'de sabit kesme hızında ve ilerleme miktarında kesme derinliğinin artırılması ile deneysel ve nümerik analiz sonuçlarında esas kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. Kesme derinliğinin artırılması ile kesme kuvvetinin artması beklenen bir durum olduğu literatürde de bildirilmiştir (Gürbüz et al., 2012; Yaşar, 2020). Örneğin, 90 m/dak kesme hızında, 0,20 mm/dev ilerleme miktarında ve 0,8 mm kesme derinliğinde deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile kesme kuvveti sırası ile 438,02 N ve 419,97 N ölçülmüştür. Kesme derinliğinin sırası ile 1,3 mm ve 1,8 mm çıkarılması ile deneysel sonuçlarda sırası ile %10,70 ve %22,12 oranlarda arttığı görülürken, sonlu elemanlar analizi sonuçlarında ise bu değerlerin %10,57 ve %29,85 oranlarında artma olmuştur. Genel olarak yapılan tornalama deneyleri sonucu esas kesme kuvvetleri sonlu elemanlar analizine göre ortalama %0,61 oranında yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durumda literatürde kabul edilebilecek değerler olduğu bildirilmiştir (Akgün, 2022; Korkmaz & Günay, 2018).

### 3.2. Eğitim ve Tahmin Değerleri

Tornalama deneyleri sonucu elde edilen değerler ile SEY, Regresyon ve ANN metotları ile elde edilen tahmini sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma veri dağılımı Şekil 6'da gösterilmiştir. Karşılaştırma yüzdesel hata oranları da Şekil 7'de gösterilmiştir. SEY sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki ortalama hata oranı %3,89 maksimum hata oranı %6,45 minimum hata oranı ise %2,04 olarak belirlenmiştir. Regresyon sonuçları ile deneysel sonuçlar



Şekil 6. Deneysel sonuçlar ile SEY, Regresyon ve ANN sonuçlarının karşılaştırılması  
Figure 6. Comparison of experimental results with SEY, Regression and ANN results



Şekil 7. SEY, Regresyon ve YSA eğitiminin hata oranları  
Figure 7. Error rates of SEY, Regression and ANN training

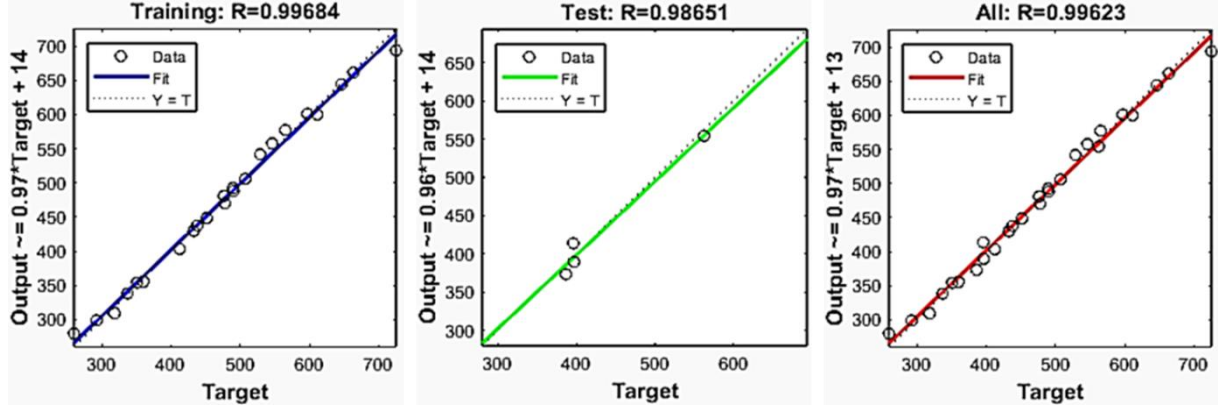
sonuçlar arasındaki ortalama hata oranı %2 maksimum hata oranı %9,75 minimum hata oranı ise %0,01 olarak kaydedilmiştir. Regresyon modelinin özeti Tablo 8’de verilmiştir. Kurulan regresyon modelinde R<sup>2</sup> değeri %99,11, R adj %98,99 ve Rsq değeri %98,71 olarak belirlenmiştir. Analizler sonucu elde edilen Regresyon eşitliği Eşitlik 2’de verilmiştir.

Tablo 8. Regresyon model özeti  
Table 8. Regression model summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
11,8812	99,11%	98,99%	98,71%

$$F_c = 144.0 + 108.25 a_p - 1.8717 V_c + 2686.1 f \quad (2)$$

ANN sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki ortalama hata oranı %1,78 maksimum hata oranı %7,58 minimum hata oranı ise %0,11 olarak belirlenmiştir. ANN modelinden elde edilen R değerleri, eğitim verileri için 0,99684 ve test verileri için R değeri 0,98651 olarak elde edilmiştir (Şekil 8). SEY, Regresyon ve ANN modellerinden elde edilen hata oranları, R ve R<sup>2</sup> değerleri incelendiğinde deneysel ölçümler ile uyuşma sağlandığı görülmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde deneysel sonuçlarla tahmin edilen SEY, Regresyon ve ANN sonuçlarının kabul edilebilir değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 8. ANN modelinden elde edilen R değerleri  
Figure 8. R values obtained from the ANN model

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı kesme parametrelerinde AISI 316L paslanmaz çeliğin tornalama deneyleri sonucu elde edilen değerler ile SEY, Regresyon ve ANN metotları ile elde edilen tahmini sonuçların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Sonuç olarak;

- ❖ Yapılan tornalama deneyleri sonucu kesme kuvvetlerinin 260,1 N ile 724,99 N arasında değiştiği görülmüştür.
- ❖ SEY analizi sonucu kesme kuvvetleri 253,96 N ile 695,12 N arasında olduğu görülmüştür.
- ❖ ANN analizi sonucu kesme kuvvetleri 279,828 N ile 693,616 N ve Regresyon analizi sonucu kesme kuvvetleri 234,743 N ile 707,617 N aralarında tahmin edilmiştir.
- ❖ Çalışmada deneysel, SEY, Regresyon ve ANN sonuçlarına göre optimum kesme parametrelerinin 0,8 mm kesme derinliği, 170 m/dak kesme hızı ve 0,12 mm/dev ilerleme miktarı olarak belirlenmiştir.
- ❖ Elde edilen deneysel sonuçları ile SEY, Regresyon ve ANN sonuçlarının örtüştüğü ve kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

#### 5. Kaynaklar

- Akgün, M. (2022). AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin işlenmesinde kesme kuvvetinin deneysel, nümerik ve istatistiksel olarak incelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), 1758-1769.
- Akkök, M., Acar, B., & Açmaz, E. (2013). Experimental analysis and wear modeling for mechanical components of a typical rail launcher. *Wear*, 306(1-2), 1-9. In.
- Aydin, K., Katmer, S., Gok, A., & Seker, U. (2021). Experimental and statistical investigation of the machining performance of wave form end mills on AISI 316L stainless steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4), 2225-2238.

- Aydın, K., Katmer, Ş., Gök, A., & Şeker, U. (2021). Experimental and statistical investigation of the machining performance of wave form end mills on AISI 316L stainless steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(4), 2225-2238.
- Aydın, K., & Kazan, H. (2023). AISI 316L Alaşımın Tel Erozyon Yöntemi ile İşlenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 575-584.
- Barış, Ö. (2021). Slepner soğuk iş takım çeliğinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve talaş şekli üzerine etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1241-1252.
- Bharasi, N. S., Pujar, M., Das, C., Philip, J., Thyagarajan, K., Paneerselvi, S., Moitra, A., Chandramouli, S., Karki, V., & Kannan, S. (2019). Microstructure, corrosion and mechanical properties characterization of AISI type 316L (N) stainless steel and modified 9Cr-1Mo steel after 40,000 h of dynamic sodium exposure at 525° C. *Journal of Nuclear Materials*, 516, 84-99.
- Camuşcu, N. (2006). Effect of cutting speed on the performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based ceramic tools in turning nodular cast iron. *Materials & Design*, 27(10), 997-1006.
- Ciftci, I. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 39(6), 565-569.
- Davim, J. P., Gaitonde, V., & Karnik, S. (2008). Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models. *Journal of materials processing technology*, 205(1-3), 16-23.
- Djavanroodi, F., Omranpour, B., & Sedighi, M. (2013). Artificial neural network modeling of ECAP process. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(3), 276-281.
- Dorogoy, A., & Rittel, D. (2009). Determination of the Johnson–Cook material parameters using the SCS specimen. *Experimental mechanics*, 49(6), 881.
- Galanis, N., & Manolakos, D. E. (2014). Finite element analysis of the cutting forces in turning of femoral heads from AISI 316L stainless steel. *Proceedings of the World Congress on Engineering*.
- Guo, Y., & Dornfeld, D. (2000). Finite element modeling of burr formation process in drilling 304 stainless steel. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 122(4), 612-619.
- Gürbüz, H., Kafkas, F., & Şeker, U. (2012). AISI 316L Çeliğinin İşlenmesinde Kesici Takım Kesici Kenar Formu ve Talaş Kırıcı Formlarının Kesme Kuvvetleri Ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 1(2), 173-184.
- Gürbüz, H., Şeker, U., & Kafkas, F. (2020). Effects of cutting tool forms on the surface integrity in turning of AISI 316L stainless steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 225-240.
- Johnson, G. R. A. c. m. a. d. f. m. s. t. l. s., high strain rates, and high temperatures. *Proc. 7th Inf. Sympto. Ballistics*, 541-547. In.
- Kara, F., Aslantaş, K., & Cicek, A. (2016). Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI 316L using artificial neural network. *Applied Soft Computing*, 38, 64-74.
- Korkmaz, M. E., & Günay, M. (2018). Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media BV)*, 43(9).
- Kumar, K. K., & Choudhury, S. (2008). Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments. *Journal of materials processing technology*, 203(1-3), 95-101.
- MacKay, D. J. (1992). Bayesian interpolation. *Neural computation*, 4(3), 415-447.
- Maranhão, C., & Davim, J. P. (2010). Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: numerical simulation and experimental validation. *Simulation modelling practice and theory*, 18(2), 139-156.
- Mebrahitom, A., Choon, W., & Azhari, A. (2017). Side milling machining simulation using finite element analysis: prediction of cutting forces. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5215-5221.
- Niesłony, P., Grzesik, W., Chudy, R., & Habrat, W. (2015). Meshing strategies in FEM simulation of the machining process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(1), 62-70.
- Oussama, B., Yapan, Y. F., Uysal, A., Abdelhakim, C., & Mourad, N. (2023). Assessment of turning AISI 316L stainless steel under MWCNT-reinforced nanofluid-assisted MQL and optimization of process parameters by NSGA-II and TOPSIS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-14.
- Özlu, B., & Uğur, L. (2021). Optimization of cutting forces on turning of Ti-6Al-4V Alloy by 3D FEM simulation analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 10(2), 1789-1795.
- Parihar, R. S., Sahu, R. K., & Srinivasu, G. (2017). Finite element analysis of cutting forces generated in turning process using deform 3D software. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8432-8438.

- Rai, J. K., & Xirouchakis, P. (2009). FEM-based prediction of workpiece transient temperature distribution and deformations during milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 429-449.
- Raju, B. P., & Swamy, M. K. (2012). Finite element simulation of a friction drilling process using deform-3D. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), 716-721.
- Ramezani, M., & Afsari, A. (2015). Surface roughness and cutting force estimation in the CNC turning using artificial neural networks. *Management Science Letters*, 5(4), 357-362.
- Ranganathan, S., Senthilvelan, T., & Sriram, G. (2010). Evaluation of machining parameters of hot turning of stainless steel (Type 316) by applying ANN and RSM. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(10), 1131-1141.
- Tesler, A. B., Kim, P., Kolle, S., Howell, C., Ahanotu, O., & Aizenberg, J. (2015). Extremely durable biofouling-resistant metallic surfaces based on electrodeposited nanoporous tungstite films on steel. *Nature communications*, 6(1), 8649.
- Tounsi, N., Vincenti, J., Otho, A., & Elbestawi, M. (2002). From the basic mechanics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(12), 1373-1383.
- Uysal, A., Demiren, F., & Altan, E. (2016). Investigation of surface roughness and chip forms in milling of stainless steel by MQL method. *Acta Physica Polonica A*, 129(4), 439-441.
- Yakubu, S. I., Mohammed, S. A., & Ogheneborhie, C. O. (2020). Characterization and corrosion behaviours of AISI 316 in hydrochloric environment at various concentrations. *Zaštita materijala*, 61(3), 220-228.
- Yan, H., Hua, J., & Shivpuri, R. (2007). Flow stress of AISI H13 die steel in hard machining. *Materials & design*, 28(1), 272-277. In.
- Yaşar, S. A. (2020). 17-4 PH ve 15-5 PH paslanmaz çeliklerinin tornalanmasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin araştırılması. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10(1), 71-81.