

Yüksek İlerleme ile Frezeleme İşlemi Esnasında Oluşan Kesme Kuvvetinin ve İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

Ramazan ÇAKIROĞLU^{a,*}, Gültekin UZUN^b

^{a,*} Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 06560, Ankara, Türkiye.

^b Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği, 06560, Ankara, Türkiye.

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 20.03.2021
Kabul: 24.04.2021

Anahtar Kelimeler:
Östemperleme, yüksek ilerleme (High-Feed), bileşke kuvvet, yüzey pürüzlülüğü, yapay sinir ağları

ÖZ

Bu çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada vermüküler grafitli dökme demir numunelerine farklı östemperleme işlemi uygulayarak üç farklı sertlikte (42.77, 44.07 ve 45.6 HRC) malzemeler elde edilmiştir. İkinci aşamada frezeleme deneyleri yüksek ilerleme miktarı (High-Feed) (0.6-0.9 ve 1.2 mm/dak) değerlerinde, üç farklı kesme hızında (50-70 ve 98 m/dak) ve 0.5 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilerek bileşke kuvvet (Fr) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ölçülmüştür. Deneyler sonucunda Ra değeri 0.461 µm ile 4.635 µm değerleri arasında değişirken, Fr değerleri 1310 N ile 2563 N arasında oluşmuştur. Son aşamada ise elde edilen Fr ve Ra değerleri kullanılarak Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle matematiksel model geliştirilmiştir. Elde edilen model sonucu tahmin edilen değerler ile deney sonuçları arasında uyum olduğu görülmüştür.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.01.07>

Modeling of the Cutting Force and Workpiece Surface Roughness During the Milling Process with High Feed Using Artificial Neural Networks

ARTICLE INFO

Received: 20.03.2021
Accepted: 24.04.2021

Keywords:
Austempering, High-Feed, cutting force, surface roughness, artificial neural networks

ABSTRACT

This study consists of three stages. In the first stage, materials of three different hardness (42.77, 44.07 and 45.6 HRC) were obtained by applying different austempering process to cast iron samples with vermicular graphite. In the second stage, milling experiments are performed at high feed rate (0.6-0.9 and 1.2 mm/rev), three different cutting speeds (50-70 and 98 m/min) and 0.5 mm cutting depth, and the resultant force (Fr) and average Surface roughness (Ra) values were obtained. As a result of the experiments, Ra value varied between 0.461 µm and 4.635 µm, while Fr values were between 1310 N and 2563 N. In the last stage, a mathematical equation was developed by using the Artificial Neural Networks (ANN) method using the obtained Fr and Ra values. As a result of the obtained equation, it was observed that there was a harmony between the estimated values and the experimental results.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.01.07>

*Sorumlu yazar: rcakiroglu@gazi.edu.tr

To cite this article: R. Çakıroğlu and G. Uzun, "Modeling of the Cutting Force and Workpiece Surface Roughness During the Milling Process with High Feed Using Artificial Neural Networks", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.1, pp. 58-66, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.01.07

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Vermiküler grafitli dökme demir, hem gri dökme demirin hem de sfero dökme demirin mükemmel özelliklerine sahiptir. Çekme mukavemeti gri dökme demir ve sfero dökme demir arasındadır ve döküm özellikleri, titreşim emilimi ve ısı iletkenliği sfero dökme demirinkinden daha yüksektir [1]. Tüm bu faktörlerden dolayı vermiküler grafit dökme demir, büyük gelişme potansiyeline sahip, otomobil endüstrisinde ideal bir üretim malzemesi haline gelmiştir; yaygın olarak otomobil egzoz borularında, silindir gömleklerinde ve diğer otomobil parçalarında kullanılmaktadır [2-3]. Vermiküler grafit dökme demirin daha yüksek çekme mukavemetine ve sertliğine sahip olması motorun ağırlığını azaltır, deformasyon direncini artırır, böylece segman gerilimi ve sürtünme kaybını azaltılmasına yardımcı olmaktadır [4]. Ancak vermiküler grafitli dökme demirin düşük termal iletkenliğe sahip olması bu malzemenin işlenebilirliğini zorlaştırmaktadır [5]. Bu malzemenin mekanik özelliklerinin (çekme dayanımı, akma dayanımı ve yorulma dayanımı, sertlik vb.) ve işlenebilirliğinin iyileştirilmesi için östemperleme işlemleri uygulanmaktadır [6].

Östemperleme işlemlerinde sıcaklık ve süre mikro yapıyı dolayısı ile de mekanik özellikleri etkileyen en önemli faktörlerdir. Östemperleme sıcaklığı yüksek seçilirse (350-400 °C), mikro yapıdaki yüksek karbonlu östenit miktarı artar bu da yüksek süneklik ve kırılma tokluğuna, nispeten daha düşük sertlik ve dayanımın ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte daha düşük östemperleme sıcaklığı (<350 °C) seçilirse, yüksek dayanım, yüksek sertlik ve aşınma direnci fakat düşük kırılma tokluğu gözlemlenmektedir. Östemperleme süresi yüksek olursa, sert ve kırılma karbür parçacıkları sünekliği ve kırılma tokluğunu önemli ölçüde azaltmaktadır [7].

Frezeleme işlemlerinde özellikle, takım salgısı, kesme kuvvetlerinin [8] neden olduğu takım sapmaları veya titreşimleri [9] gibi çeşitli etki faktörleri iş parçası yüzey topografyasını etkilemektedir [10]. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için son yıllarda yüksek ilerlemeli frezeleme işlemiyle iş parçalarının yüzey kalitelerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntem yüksek talaş kaldırma oranlarını küçük çaplı takımlarla uygulanabilirliğinin yanında daha hızlı, daha verimli bir üretim için geleneksel işleme alternatif bir yöntemdir [11-12]. Tilman vd., iş parçası hem kuru kesme koşulunda hem de yüzeye yüksek hızda oksijen yakıt püskürtülerek yüksek ilerleme ile frezeleme işlemi sonrası işlenen yüzeylerin

yapılarını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kuru işleme koşullarına kıyasla sürtünme katsayısının yaklaşık %40 azaldığını belirlemişlerdir [13]. Tilman vd., bir başka çalışmalarında ise Cr bazlı sert PVD kaplamalar kullanarak yüksek ilerleme ile frezeleme performansını araştırmışlardır. CrAlN ve CrAlCN ince kaplamaların uygulanmasının, sertleştirilmiş yüksek hızlı takım çeliği 62.38 ± 0.18 HRC ile karşılaştırıldığında yüksek ilerlemeli frezelenmiş yüzey yapılarının aşınma direncini arttırdığını belirlemişlerdir [14]. Zhang vd., yüksek hızlı frezeleme işleminde enerji verimliliği üzerine araştırma yapmışlardır. Takımın dönüş hızı 2000 dev/dak'dan 8000 dev/dak'ya çıktığında gerinim sertleşmesi ve termal yumuşamanın etkisiyle enerji tüketimi azalmıştır. Devir, dış başına ilerleme, kesme derinliği ve frezeleme genişliğinin artmasıyla enerji verimliliğinin arttığını belirtmişlerdir [15]. Lin vd., kaplamalı seramik takımlar kullanılarak yüksek mukavemetli vermiküler grafit dökme demirin işlenmesi sırasında oluşan takım aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Kaplamalı seramik takımların vermiküler grafit dökme demirin işlenmesinde sinterlenmiş karbür takımlardan daha uygun olduğunu belirlemişlerdir. Kaplanmış seramik takımlar, düşük kesme hızında (Vc 200 m /dak) esas olarak adhesive, abrasive ve difüzyon aşınması sergilemişlerdir. Devir hızı arttıkça, kaplamalı seramik takımların difüzyon aşınması önce artmış sonra azalmıştır [16].

Kesme işlemi sırasında elde edilen veriler (kesme kuvvetleri, kesme bölgesi sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, titreşim vb.) işleme koşullarına ve işleme parametrelerine bağlı olduğundan tahmin etmek zordur. Ancak meydana gelebilecek olan olumsuz durumların önceden tahmin edilmesi işleme maliyetlerinin azalmasına önemli katkılar sağlayacaktır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan işleme parametrelerine bağlı olarak sonuçların tahmin edilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. Mundada vd., çalışmalarında, kesme hızı, ilerleme oranı, talaş açısı ve kesici takım uç yarıçapı parametrelerine bağlı olarak elde ettikleri yüzey pürüzlülüğü verilerini matematiksel model şeklinde etmişlerdir. Deneysel değerler ile tahmin edilen değerler arasında iyi bir uyum olduğunu belirtmişlerdir [17]. Çakıroğlu vd., kaplamalı ve kaplamasız karbür matkaplar kullanılarak delme işleminde matkap ucu sıcaklığını ve kesme kuvvetini tahmin etmek için yapay sinir ağları (YSA) metodundan faydalanmışlardır. Matematiksel modelleme sonuçları incelendiğinde tahmin edilen matkap ucu sıcaklığı ve kesme kuvvetleri sonuçlarının

deneysel sonuçlarla kabul edilebilir değerler dâhilinde olduğunu ifade etmişlerdir [18]. Parmar vd., yapay sinir ağı kullanarak frezeleme parametrelerinin modellenmesini yapmışlardır. Girdi parametreleri olarak kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliği çıktı parametreleri olarak da talaş kaldırma oranı, kesme kuvvetini, takım ömrünü, tork ve güç değerlerini kullanarak matematiksel model geliştirmişlerdir. YSA modelinin sonuçları ile deneyler arasında iyi bir uyum olduğunu açıklamışlardır [19].

Literatürün incelenmesi sonucunda yüksek ilerleme ile östemperlenmiş malzemelerin işlenebilirliğine yönelik çalışmaların az olduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan çalışmalarda kullanılan parametrelerin daha sonraki çalışmalarda değerlendirilmesine yönelik matematiksel modellemelerin yapılmadığı belirlenmiştir. Bu çalışmada östemperleme işlemi ile malzemenin mekanik özellikleri değiştirilerek farklı sertliklerde numunelerin yüksek ilerleme ile frezelenmesi sonucu elde edilen bileşke kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağı ile modellenmesi yapılmıştır.

2. MATERYAL YÖNTEM (MATERIAL METHOD)

2.1. Deneysel Ekipmanlar (Experimental Equipment)

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak 25x30x100 mm ölçülerinde vermüküler grafitli dökme demir kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Vermüküler grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi (Chemical composition of vermicular graphite cast iron) [2]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
3.82	1.80	0.33	0.03	0.01	0.07	0.01	0.00
Cu	Mg	Sn	Ti	Al	Zn	Bi	Fe
0.87	0.01	0.09	0.02	0.00	0.08	0.00	92.8

Aynı özelliklere sahip üç deney malzemesine (23 HRC) farklı sıcaklıklarda östemperleme ile sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemlerde Östemperleme işlemi, numuneler geleneksel östenitleme sıcaklığı $\sim 900^{\circ}\text{C}$ ’de 90 dakika östenitlendikten sonra hızlı bir şekilde, 315°C sıcaklığındaki %50 oranında potasyum nitrat ve %50 sodyum nitrat (%50 KNO_3 + %50 NaNO_3) karışımından oluşan tuz (Petrofer AS 135) banyosuna daldırılan numuneler farklı sürelerde (60, 120 ve 180 dakika) bekletilmiştir. Bu işlemler esnasındaki sıcaklık ölçümleri için K tipi ısı çifti kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinde Instron-Wolpert marka

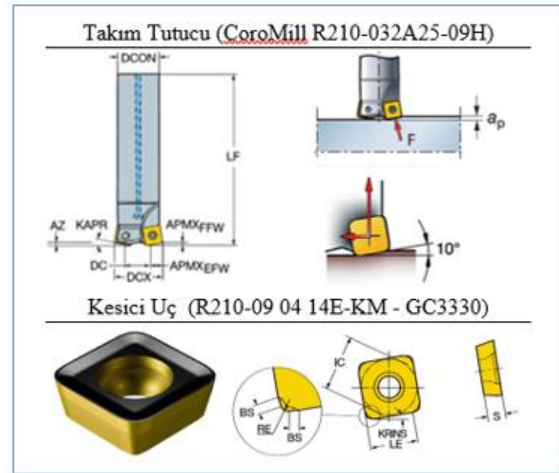
DIATESTOR 7551 tipi universal sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Tablo 2’de farklı bekleme sürelerine göre deney malzemelerinde oluşan sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Deney malzemesinin özellikleri (Experiment material properties)

Östemperlenme Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	315
Östemperlenme Süresi (min)	60 120 180
Malzeme Sertliği (HRC)	45,6 44,07 42,7

Deneylerde SANDVIK Coromant tarafından yüksek ilerleme miktarına sahip takım olarak üretilen silindirik saplı, maksimum kesme çapı 32 mm olan ve 10° kesici kenar açılı CoroMill R210-032A25-09H kodlu takım tutucu ile Coromant tarafından üretilen GC3330 kalite (R210-09 04 14E-KM) CVD yöntemi ile kaplanmış $\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ kaplamalı sementit karbür kesici uçlar kullanılmıştır (Şekil 1).

Deneyler, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan Johnford VMC550 işleme merkezinde yapılmıştır. Kesme parametreleri, literatür incelemesi ve kesici takım firmasının önerileri doğrultusunda yapılan ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Bu bağlamda üç farklı kesme hızında (60, 120 ve 180 m/dak), üç farklı ilerleme değerinde (0,6, 0,9 ve 1,2 mm/dak) ve sabit eksenel talaş derinliğinde (0,5 mm) kuru şartları altında 27 adet deney yapılmıştır.



Şekil 1. Takım tutucu ve kesici uç geometrisi (Tool holder and insert geometry)

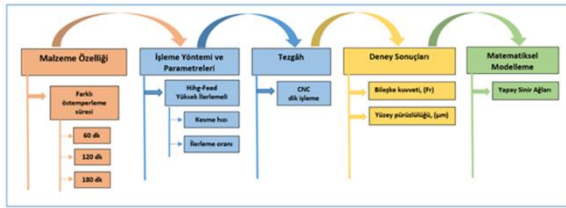
Yüzey frezelemede kesici takımın bir kesici ucunun üzerine etki eden kesme kuvveti bileşenleri F_x ’anlık ilerleme bileşeni (X yönünde elde edilen kesme kuvvetinin doğrultusu), F_y ’anlık normal bileşendir (Y yönünde elde edilen kesme kuvvetinin doğrultusu), F_z ’anlık dikey bileşen (Z yönünde elde edilen kesme kuvvetinin doğrultusu) ve FR ’anlık iş

parçası üzerinde oluşan bileşke kesme kuvvetidir. F_x , F_y ve F_z sırasıyla X, Y ve Z yönlerinde ilerleme bir kesici uç üzerindeki anlık kesme kuvvetleridir. Elde edilen F_x , F_y , F_z kesme kuvvetleri, bileşke kuvvet (FR) formülü ile hesaplanmıştır [20-21].

$$F_r = \sqrt{((F_x) + (F_y) + (F_z))} \quad (1)$$

Kesme kuvveti ölçümleri Kistler 9257B üç bileşenli piezoelektrik dinamometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu dinamometre Kistler 5070A çok kanallı şarj amplifiere bağlanmıştır. Kesme kuvveti verileri Dynoware yazılımı kullanılarak elde edilmiştir.

Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümü için MAHR-Perthometer M1 ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümü işleme yönünde ve üç bölgede (başlangıç bölgesi, orta bölge ve bitiş bölgesinden) belirlenen noktalardan üçer adet olmak üzere toplamda dokuz adet ölçülmüş ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Şekil 2’de çalışmanın işlem basamakları verilmiştir.



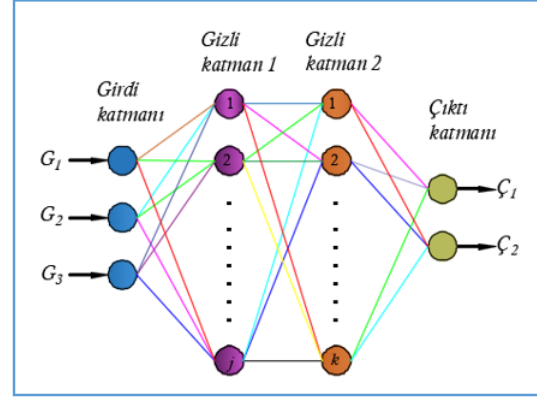
Şekil 2. Çalışmanın işlem basamakları (The process steps of the study)

2.2. Yapay Sinir Ağları (Artificial neural networks)

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninden esinlenerek geliştirilmiştir [22]. Eldeki verileri kullanarak öğrenme, hatırlama ve daha sonra hiç görmediği verilerle karşılaşınca öğrendiği bilgileri kullanarak yeni veri üretebilen matematiksel bir modelledir. Öğrenme sürecindeki girdi ve çıktı bilgilerine bağlı kalarak bilmediği çıktı(lar) için sonuç üretebildiğinden günümüzde çok farklı alanlarda (İmalat, otomotiv, havacılık, enerji, finans, tıp, yazılım) kullanılmaktadır.

Girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktı olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. YSA modelleri; tek katmanlı algılayıcılar, çok katmanlı algılayıcılar, ileri beslemeli yapay sinir ağları ve geri beslemeli olmak üzere dört çeşittir. Bu çalışmada geri beslemeli YSA modeli kullanılmıştır. Geri beslemeli yapay sinir ağlarında ileri beslemeli olanların aksine bir hücrenin çıktısı sadece kendinden sonra gelen hücrenin katmanına girdi olarak verilmez. Kendinden önceki katmanda veya kendi katmanında bulunan herhangi bir hücreye

de girdi olarak bağlanabilmektedir. Bu yapısı ile geri beslemeli yapay sinir ağları doğrusal olmayan dinamik bir davranış göstermektedir. Şekil 3’de geri beslemeli yapay sinir ağının çalışma şekli gösterilmiştir [23].



Şekil 3. Yapay sinir ağ yapısının örnek gösterimi (Sample representation of artificial neural network structure)

Bu ağ modeli girdi katmanı, gizli (ara) katman ve çıktı katmanı olmak üzere üç ana katmandan oluşmaktadır. YSA’da katmanlar ile nöronlar arasındaki her bağlantı ağırlık vektörü (w) olarak tanımlanmaktadır [18,21]. Modellemede malzeme sertliği (HRC), ilerleme oranı (f) ve kesme hızı (Vc) girdi katmanı olarak tanımlanırken bileşke kuvvet (Fr) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) çıktı katmanları olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamalara bağlı kalarak “PHYTICA” yazılımında Şekil 3’de gösterilen 3-4-5-2 ağ yapısında Levenberg-Marquardt algoritmasında kullanılan Eşitlikler aşağıda verilmiştir [18]:

Gizli katman hesaplamaları;

$$Net_i = \sum x_i w_{ij} \quad (2)$$

$$y_i = f(Net_i)$$

Çıktı katman hesaplamaları;

$$Net_k = \sum y_i w_{jk} \quad (3)$$

$$O_k = f(Net_k)$$

Burada x_i giriş verilerini, y_i katman birden elde edilen sonuçları ve O_k ikinci katman sonuçlarını ifade etmektedir.

Transfer fonksiyonu;

Fermi aktivasyon fonksiyonu hem gizli hem de çıktı katmanların hesaplamasında kullanılmıştır;

$$F_i = \frac{1}{1 + e^{-4(NE_{T1} - 0.5)}} \quad (4)$$

YSA modeli eğitim aşaması ve test aşaması olmak üzere iki aşamada gerçekleştirildiğinden tahmin değer ile gerçek değer arasındaki sapma (hata) miktarlarını belirlemek için istatistiksel analiz yapılmaktadır. Bunlar istatistiksel kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) ve mutlak değişim yüzdesi (R^2) değerleridir [24].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (y_{pre,m} - t_{mea,m})^2}{n}} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_j \left[\frac{t_{mea,m} - y_{pre,m}}{t_{mea,m}} \right] \times 100 \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{m=1}^n (y_{pre,m} - t_{mea,m})^2}{\sum_{m=1}^n (t_{mea,m})^2} \quad (7)$$

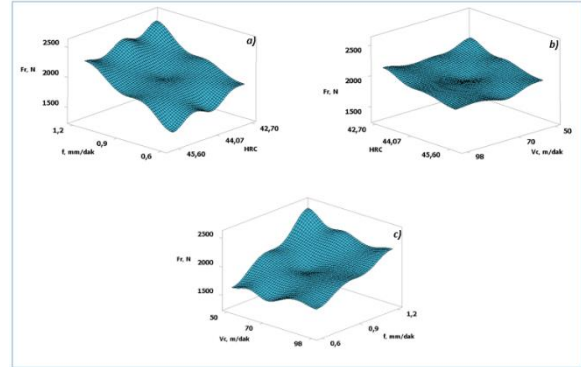
Burada n, veri desenlerinin sayısını, ypre, m, tmea, m, sırasıyla bir m veri noktasının tahmin edilen değeri ve ölçülen değerini göstermektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

3.1. Bileşke Kuvvetin Değerlendirilmesi (Evaluation of Resultant Force)

Kesme hızı, ilerleme oranı ve sertlik değerlerine göre elde edilen bileşke kuvvet sonuçlarına göre oluşturulan 3D grafikleri Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4a'da gösterilen sertlik ve ilerleme oranına bağlı olarak oluşturulan bileşke kuvvetin grafiği incelendiğinde sertlik arttıkça Fr azalmıştır. Sertlik ve ilerleme oranına bağlı kuvvet değişiminin %28-%39 arasında olduğu tespit edilmiştir. En düşük kesme kuvveti 45,6 HRC sertlikte 1310 N olarak 0,6 mm/dev ilerlemede elde edilmiştir. Bunun sebebi düşük östemplendirme süresinde ince ösferitik yapının oluşması ve bu yapının işlenebilirliğe olumlu etkisi olarak ifade edilebilir [2-3]. Ayrıca artan sertlik miktarı ile talaşın kırılması kolaylaştığı ve kuvvetleri azalttığı düşünülmektedir. Sertlik ve kesme hızına göre oluşturulan Şekil 4b incelendiğinde, kesme hızının artması Fr değerini belirgin bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Kesme hızının artışı ile kesme bölgesinde beklenen sıcaklık artışı frezeleme işleminde süreksiz talaş nedeni ile etki gösterememiştir. Bu durum kesme hızına bağlı sıcaklık etkisinin kuvvet değişimini minimize etmiştir. Şekil 4c incelendiğinde ise, Fr değerinin hem ilerleme oranına hem de kesme hızına göre değişimi görülmektedir. Grafikten Fr değeri ilerleme oranı ile doğru orantılı değişim göstermiştir. Talaş hacminin artmasına bağlı olarak kesme kuvvetinin artışı beklenen

bir sonuçtur. Kesme hızının sıcaklığa bağlı etkisinin olmayışı kuvvetleri minimize ettiği kanısına varılmıştır.

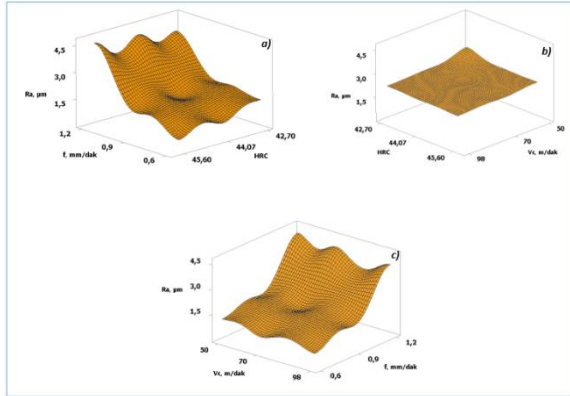


Şekil 4. Bileşke kuvvet grafikleri; a) sertlik-ilerleme oranı, b) sertlik-kesme hızı, c) kesme hızı-ilerleme oranı (Resultant force plots; a) hardness-feed rate, b) hardness-cutting rate, c) cutting speed-feed rate)

3.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

(Evaluation of Surface Roughness)

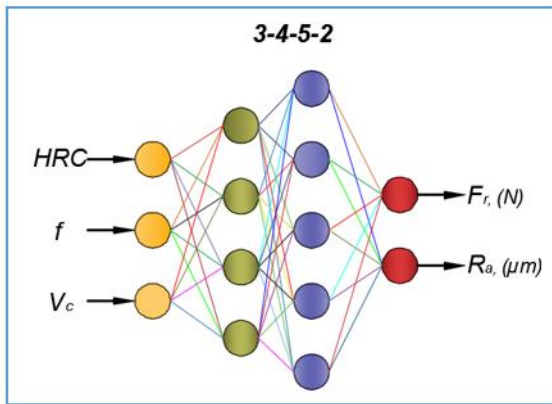
Girdi değişkenlerine göre elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre oluşturulan 3 boyutlu grafikleri Şekil 5'de verilmiştir. Ölçülen Ra değerleri, 0,461-4,635 μm aralığında değişmiştir. Şekil 5a'da gösterilen sertlik ve ilerleme oranına bağlı olarak oluşturulan yüzey pürüzlülüğü grafiği incelendiğinde ilerleme oranı arttıkça Ra değerinin arttığı görülmektedir. En düşük sertlik değeri olan 42,77 HRC malzemesinde en düşük ilerleme oranı ile en yüksek ilerleme oranı değerlerine göre Ra'daki artış yaklaşık %66 oranında olurken 45,6 HRC sertliğindeki malzemede ise bu oran yaklaşık %89 oranında olmuştur. Sertlik ve kesme hızına göre oluşturulan Şekil 5b incelendiğinde, en yüksek Ra değeri en düşük kesme hızında (50 m/dak) 4,635 μm olarak ölçülmüştür. Kesme hızı arttıkça Ra değerinde az da olsa bir azalma gerçekleşmiştir. Şekil 5c incelendiğinde ise, ilerleme oranı 0,6 mm/dev'den 1,2 mm/dev'e çıkarıldığında Ra değerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Kesme hızı 50 m/dak'dan 70 m/dak'ya çıkarıldığında Ra'nın başlangıçta hafifçe düştüğü gözlenmiştir. Daha sonraki aşamalarda ise, ilerleme oranındaki artış nedeniyle Ra'da kademeli olarak artmıştır.



Şekil 5. Yüzey pürüzlülüğü grafiği; a) sertlik-ilerleme oranı, b) sertlik-kesme hızı, c) kesme hızı-ilerleme oranı (Surface roughness plot; a) hardness-feed rate, b) hardness-cutting rate, c) cutting speed-feed rate)

3.3. Modelleme Sonucu (Modeling Result)

Bu çalışmada; üç girişli, iki gizli katmanlı ve iki çıkışlı ağ modeli uygulanarak Fr ve Ra değerlerinin sonuçları modellenmiştir. Vermiküler grafitli dökme demirin yüksek ilerleme ile frezelenmesi için yapılan 27 deneyin 21 tanesi eğitim için kullanılmış olup 6 deney sonucu ise ağ yapısının test edilmesi için ayrı tutulmuştur. Deney sonuçlarının eğitimi ve ağ yapılarının belirlenmesinde Pythia yazılımından yararlanılmıştır. Yapılan modellemelerde Şekil 6'da gösterilen 3-4-5-2 ağ yapısı kullanılmıştır. Fr ve Ra sonuçları için oluşturulan modellemelerin girdi katmanı, gizli katmanı ve çıkış katmanının ağırlık değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Vermiküler grafitli dökme demirin yüksek ilerleme ile frezelenmesi sonucu elde edilen Fr ve Ra değerleri için herhangi bir deneysel çalışmaya ihtiyaç olmaksızın hesaplanabilecek en iyi YSA modellemelerinin matematiksel denklemleri Eş. 7 ve 8'de verilmiştir. Deney ve YSA modelinin eğitim/test sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 6. Kullanılan YSA modeli (The ANN model used)

Tablo 3. Seçilen modelin ağırlıkları (The weights of the selected model)

Bileşke kuvvet, (Fr) - Yüzey pürüzlülüğü, (Ra)				
$NET_{j(1-4)} = w_{1i} \cdot xHRC + w_{2i} \cdot xf + w_{3i} \cdot xVc$				
i	W_{1i}	W_{2i}	W_{3i}	W_{4i}
1	4.299687	-1.821207	1.916135	
2	-0.589665	-2.143265	-0.286139	
3	-0.875122	-0.022023	0.046007	
4	-0.052944	1.000483	-0.006077	
$NET_{k(5-9)} = w_{1i} \cdot xF_1 + w_{2i} \cdot xF_2 + w_{3i} \cdot xF_3 + w_{4i} \cdot xF_4 + w_{5i} \cdot xF_5$				
5	-0.979067	-3.974732	-1.484790	0.690837
6	-1.116290	-0.955121	-7.505080	2.320721
7	0.526570	0.964413	0.539747	0.727727
8	-2.906060	1.975210	2.023518	-1.300785
9	0.269967	0.488085	-3.913328	-1.121614

$$F_r = (1 + \exp(-4x(1.958551xF_1 + 0.050568xF_2 + 0.737112xF_3 + 1.696945xF_4 - 1.766269xF_5 - 0.5)))^{-1} \quad (7)$$

$$R_a = (1 + \exp(-4x(-1.010790xF_1 + 1.272682xF_2 + 0.275862xF_3 + 2.926367xF_4 - 1.961603xF_5 - 0.5)))^{-1} \quad (8)$$

Tablo 4. Deney ve YSA modelinin eğitim/test sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of the training / test results of the experiment and ANN model)

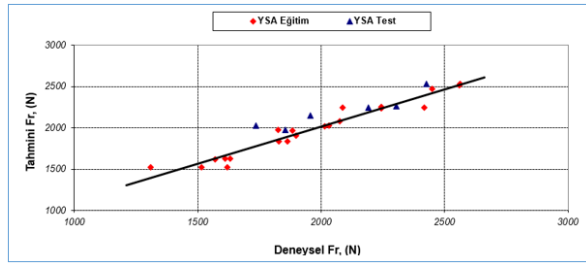
Deney No	HRC	f mm/dak	V_c m/dak	Deney Fr, (N)	YSA Fr, (N)	Deney Ra, (μ m)	YSA Ra, (μ m)
1	45.6	0.6	50	1515	1526	0.852	0.685
2	45.6	0.6	70	1310	1525	0.494	0.686
3	45.6	0.6	98	1620	1525	0.461	0.688
4	45.6	0.9	50	1825	1974	1.365	1.494
5*	45.6	0.9	70	1856	1973	1.365	1.482
6	45.6	0.9	98	1883	1970	1.321	1.466
7	45.6	1.2	50	2418	2242	4.635	4.422
8*	45.6	1.2	70	2191	2241	4.486	4.418
9	45.6	1.2	98	2087	2241	4.400	4.413
10	44.07	0.6	50	1571	1621	0.945	0.794
11	44.07	0.6	70	1611	1625	0.805	0.807
12	44.07	0.6	98	1633	1631	0.800	0.823
13	44.07	0.9	50	2016	2017	1.575	1.614
14*	44.07	0.9	70	1736	2027	1.435	1.512
15	44.07	0.9	98	2033	2028	1.384	1.492
16	44.07	1.2	50	2560	2517	4.378	4.262
17*	44.07	1.2	70	2304	2265	4.330	4.423
18	44.07	1.2	98	2244	2239	4.193	4.264
19	42.77	0.6	50	1829	1836	2.047	2.035
20	42.77	0.6	70	1863	1834	1.357	1.205
21	42.77	0.6	98	1900	1907	1.276	1.263
22	42.77	0.9	50	2243	2250	2.113	1.993
23*	42.77	0.9	70	1956	2151	1.693	1.571

24	42.77	0.9	98	2075	2083	1.633	1.483
25	42.77	1.2	50	2563	2534	4.144	4.051
26*	42.77	1.2	70	2428	2531	3.870	4.046
27	42.77	1.2	98	2450	2472	3.753	4.108

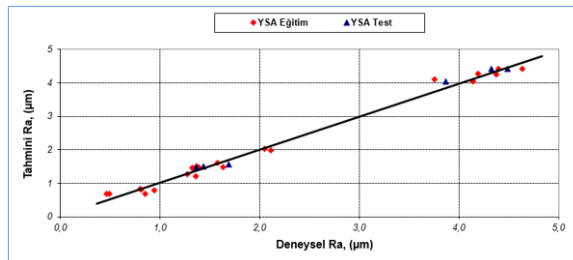
Yapılan modelleme sonucu tahmin edilen değerler ile gerçek değerler Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 6 ve 7’de görüldüğü gibi tahmin değerleri ile deney sonucu elde edilen değerler benzer sonuçlar vermiştir. Ek olarak YSA modelinin doğruluğu R2, RMS ve MAPE değeri ile kontrol edilmiştir. Fr ve Ra sonuçları için bu üç istatistiksel değerin sonuçları Tablo 5’te verilmiştir. Ayrıca, Fr ve Ra’nın test ve eğitim sonuçları için YSA tarafından tahmin edilen deneysel değerlerin ve deney sonuçları ile karşılaştırması, Şekil 9 ve 10’da verilmiştir.

Tablo 5. Fr ve Ra için istatistiksel sonuçlar (Statistical results for Fr and Ra)

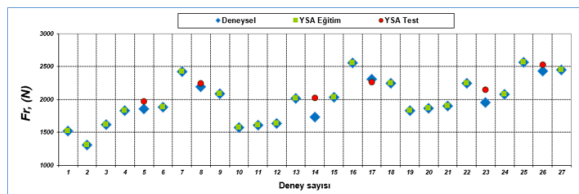
	R ² test	RMS test	MAPE test
Fr, N	0.982312	0.091904	0.008446
Ra, µm	0.994272	0.053139	7.987364



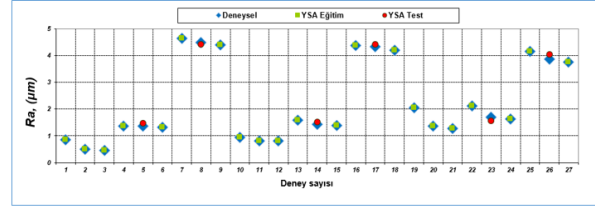
Şekil 7. Fr'nin YSA modeli sonuçlarıyla karşılaştırılması (Comparison of Fr with ANN model results)



Şekil 8. Ra'nın YSA modeli sonuçlarıyla karşılaştırılması (Comparison of Ra with ANN model results)



Şekil 9. Fr için deney, YSA eğitim ve YSA test sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of test, ANN training and ANN test results for Fr)



Şekil 10. Ra için deney, YSA eğitim ve YSA test sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of test, ANN training and ANN test results for Ra)

2. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada östempereleme işlemi ile malzemenin mekanik özellikleri değiştirilerek farklı sertliklerde numunelerin yüksek ilerleme ile frezelenmesi sonucu elde edilen bileşke kuvveti ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağları ile modellenmesi yapılarak elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Östempereleme süresindeki artış, malzemenin sertliğinin azalmasına neden olmuştur. Düşük östempereleme süresinin malzemenin işlenebilirliği üzerinde olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir.
- En düşük bileşke kuvvet 45.6 HRC sertliğinde 0.6 mm/dev ilerleme oranında ve 70 m/dak kesme hızında 1310 N olarak elde edilmiştir.
- En düşük yüzey pürüzlülüğü 45.6 HRC sertliğinde 0.6 mm/dev ilerleme oranında ve 90 m/dak kesme hızında 0.461 µm olarak elde edilmiştir.
- Bu çalışma ile YSA yöntemini kullanarak matematiksel modeller oluşturularak bileşke kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının tahmin edilebileceğini kanıtlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

- [1] J. Keller, V. Fridrici, Kapsa, P., S. Vidaller, and J. F. Huard, "Influence of chemical composition and microstructure of gray cast iron on wear of heavy duty diesel engines cylinder liners," *Wear*, vol. 263, no. 7-12, pp. 1158-1164, September 2007. Doi:https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.091
- [2] G. Uzun, "Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons," *Measurement*, vol. 142, pp. 122-130, August 2019.

Doi:

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.059>

[3] A. Mavi, and I. Korkut. "The effects of austempering temperature and time on the machinability of vermicular graphite iron," *Materials Testing*, vol. 56.4 pp. 289-293, September 2014. Doi: <https://doi.org/10.3139/120.110559>

[4] H. Zhou, Q. C. Guo, P. Y. Lin, X. L. Zhang, and L. Q. Ren, "Influence of H13 steel unit on wear behavior of vermicular cast iron," *Applied Surface Science*, vol. 255, no. 5, 3394-3399, December 2008. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.09.065>

[5] D. Holmgren, "Review of thermal conductivity of cast iron," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 18, no. 6, pp. 331-345, November 2005. Doi: <https://doi.org/10.1179/136404605225023153>

[6] M. X. Zhang, J. C. Pang, Y. Qiu, S. X. Li, M. Wang, and Z. F. Zhang, "Influence of microstructure on the thermo-mechanical fatigue behavior and life of vermicular graphite cast irons," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 771, 138617, January 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138617>

[7] E. Öztürk, and M. Yıldırım, "Östemperleme Sıcaklık ve Süresinin Östemperlenmiş Sünek Dökme Demirlerin Mikro Yapı ve Sertliğine Etkisi". *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 3, pp. 604-611, September 2019. Doi: <https://doi.org/10.36306/konjes.613878>

[8] S. H. Ryu, D. K. Choi, and C. N. Chu, "Roughness and texture generation on end milled surfaces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 3-4, pp. 404-412, March 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.010>

[9] D. Biermann, P. Kersting, T. Surmann. "A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades. CIRP Ann," *Manuf Technol* vol. 59, no. 1, pp.125–128, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.057>

[10] R. Hense, C. Wels, P. Kersting, U. Vierzigmann, M. Löffler, D. Biermann, and M. Merklein, "High-feed milling of tailored surfaces for sheet-bulk metal forming tools," *Production Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 215-223, September 2015. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11740-014-0597-0>

[11] F. J. Amigo, G. Urbikain, O. Pereira, P. Fernández-Lucio, A. Fernández-Valdivielso, and L. L. de Lacalle, "Combination of high feed turning with cryogenic cooling on Haynes 263 and Inconel 718 superalloys," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 208-222, October 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.029>

[12] A. Zabel, T. Surmann, A. Peuker "Surface structuring and tool path planning for efficient milling of dies," In: 7th international conference on high speed machining proceedings, *Bamberg*, pp 155–160, 2008.

[13] W. Tillmann, D. Stangier, L. Hagen, D. Biermann, D. Freiburg, and A. Meijer, "Tribological investigation of surface structures processed by high-feed milling on HVOF sprayed WC-12Co coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 395, 125945, August 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125945>

[14] W. Tillmann, D. Stangier, I. A. Laemmerhirt, D. Biermann, and D. Freiburg, "Investigation of the tribological properties of high-feed milled structures and Cr-based hard PVD-coatings," *Vacuum*, vol. 131, pp. 5-13, September 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.024>

[15] T. Zhang, Z. Liu, X. Sun, J. Xu, L. Dong, & G. Zhu, "Investigation on specific milling energy and energy efficiency in high-speed milling based on energy flow theory," *Energy*, vol. 192, 116596, February 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116596>

[16] Y. Lin, S. He, D. Lai, J. Wei, Q. Ji, J. Huang, and M. Pan, "Wear mechanism and tool life prediction of high-strength vermicular graphite cast iron tools for high-efficiency cutting," *Wear*, vol. 454, 203319, August 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203319>

[17] V. Mundada, & S. K. R. Narala, "Optimization of milling operations using artificial neural networks (ANN) and simulated annealing algorithm (SAA)," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 4971-4985, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.075>

[18] R. Çakıroğlu, S. Yağmur, A. Acır, and U. Şeker, Modelling of Drill Bit Temperature and Cutting Force in Drilling Process Using Artificial Neural Networks, pages: 333-340. *Politeknik Dergisi*, vol. 20, no. 2, pp.

333-340, April 2017. Doi:
<https://doi.org/10.2339/2017.20.2.333-340>

[19] J. G. Parmar, K. G. Dave, A. V. Gohil, and H. S. Trivedi, "Prediction of end milling process parameters using artificial neural network," *Materials Today: Proceedings*. Vol. 38, Part 5, pp. 3168-3176, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.644>

[20] M. Günay, A. Kaçal and Y. Turgut , "Optimization of Machining Parameters in Milling of Ti-6Al-4V Alloy Using Taguchi Method", *Engineering Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 428-440, Feb. 2011. Doi:10.12739/nwsaes.v6i1.5000067046

[21] Y. Altintas, and A. A. Ber, "Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 54, no. 5, B84-B84, September 2001. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.1399383>

[22] Ç. Elmas. Yapay Sinir Ağları. Ankara: Seçkin Yayıncılık, pp.192, 2003

[23] E. Sütçü, "Kaynaklı İmalat Operasyon Sürelerinin Matlab Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, vol. 4, no. 1, pp. 16-24, 2018. <https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2018.04.01.003>

[24] İ. Şahin , "Yapay Sinir Ağları İle Al/Sic Kompozit Malzemenin Yüzey Pürüzlülüğünün Tahmini", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no. 1, pp. 209-216, Mar. 2014, doi:10.17341/gummfd.82690