

Ti6Al4V MALZEMESİNİN TORNALAMA İŞLEMİNDE ÖZGÜL KESME ENERJİSİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜĞÜNÜN İNCELENMESİ VE YAPAY SİNİR AĞLARI TEMELLİ TAHMİN MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

*Gökberk SERİN**
*Müge KAHYA**
Murat ÖZBAYOĞLU†
*Hakkı Özgür ÜNVER**

Alınma: 27.03.2017 ; düzeltme: 29.04.2019 ; kabul: 31.07.2019

Öz: Havacılık ve medikal sanayii gibi isterleri yüksek olan sektörlerde kullanılan parçaların imalatı genellikle yüksek hassasiyete sahip talaşlı imalat yöntemleri ile yapılmakta olup, bu işlemler sırasında yüksek teknoloji ürünü takım tezgahları kullanılmaktadır. Diğer yandan, son on yılda, önemli bir maliyet girdisi olan ve çevre etkisi bulunan enerji tüketimini, talaşlı imalat sırasında en aza indirme amaçlı çalışmalar yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla, düşük enerji tüketimi ile yüksek kaliteli iş parçalarının üretimi, giderek önem kazanmaktadır. Tornalama işlemi, talaş kaldırma işlemleri arasında en fazla tercih edilen işlemlerden birisidir. Günümüzde, Ti6Al4V malzemesi, sağladığı mekanik ve ısıl avantajlardan dolayı hem havacılık hem de medikal sanayiinde yaygın olarak kullanılmakta ve yüksek hassasiyetli torna tezgahlarında işlenmektedir. Bu çalışmada, malzemesi Ti6Al4V olan iş parçasının yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve bu iş parçasının üretimi sırasında elde edilen özgül kesme enerjisi (ÖKE) incelenmiştir. İşlem girdi parametreleri olarak; kesme derinliği (a_p), kesme hızı (V_c) ve ilerleme (f) belirlenmiştir. Belirlenen çıktı parametrelerinin tahmini için Yanıt Yüzey Metodu (YYM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılmıştır. YSA ve YYM modellerinde kullanılan veriler Box-Behnken deney tasarımı ile elde edilmiştir. Bunun yanı sıra girdi parametrelerinin etkilerini incelemek adına, Merkezi Kompozit Deney Tasarımı (MKT) kullanılarak elde edilen sonuçlar üzerinden Varyans Analizi yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda minimum yüzey pürüzlülüğü elde etmek için kesme derinliği 0,2 mm, ilerleme 0,0637 mm/dev ve kesme hızı 36 m/dak olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda minimum özgül kesme enerjisi için gerekli girdi parametreleri; $a_p=0,53$ mm, $f=0,0963$ mm/dev ve $V_c=44$ mm/dak'dır. YSA modeli ile geliştirilen tahmin modelinin YYM tahmin modeline göre daha iyi sonuçlar ortaya koyduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ti6Al4V talaşlı imalat, Yapay Sinir Ağları, Yanıt Yüzey Metodu

Investigation of Specific Cutting Energy and Surface Roughness for Turning of Ti6Al4V Workpiece and Development of an Artificial Neural Network Based Prediction Model

Abstract: Parts used in high-demanding industries such as aerospace and medical, are manufactured with high precision machining. Also, studies on reduction of energy consumption, which has vital effects on environment and is a significant cost component, have been on the rise since the last decade. So, in many industries, manufacturing of high-quality parts with minimum energy consumption is gaining importance.

* TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Söğütözü Caddesi, No:43,06510, Söğütözü/Ankara/Türkiye

† TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Söğütözü Caddesi, No:43,06510, Söğütözü/Ankara/Türkiye

Turning is one of the most commonly used machining methods. Nowadays, Ti6Al4V material, due to its mechanical and thermal advantages, is widely used in both the aerospace and medical industries and machined in high precision machine tools. In this study, the surface roughness (R_a) of turned workpieces from Ti6Al4V alloy and specific cutting energy (SEC) during turning this alloy were examined. Control parameters were specified as depth of cut (a_p), cutting speed (V_c), and feed (f). In order to estimate the output parameters, Response Surface Method and Artificial Neural Network (ANN) were employed. The data used by ANN and RSM models was obtained by Box-Behnken Design. Furthermore, Central Composite Design (CCD) which is one of the Response Surface Methods (RSM) was used to examine the influences of input parameters and ANOVA was conducted. As a result of these studies, it was figured out that the depth of cut was 0.2 mm, the feed was 0.0637 mm/rev and the cutting speed was 36 m/min for minimum surface roughness. The input parameters required to sustain minimum specific cutting energy was determined as $a_p= 0.53$ mm, $f= 0.0963$ mm/rev and $V_c= 44$ m/min. It was observed that the prediction model developed using ANN yielded better results than RSM based regressions.

Keywords: Machining, Ti6Al4V, Artificial Neural Network, Response Surface Methodology

1. GİRİŞ

Son yıllarda, insanlığın küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi önemli sorunlar ile yüzleşmesinden dolayı, enerji tüketimi giderek önem kazanmaktadır. Ayrıca yüksek teknolojiye sahip sanayilerde üretilen iş parçalarının, giderek artan kalite isterleri ile üretim için harcanan enerji miktarı arasındaki çekişme dikkat çekici hale gelmektedir. Bir iş parçasının en önemli isterleri, boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü olup, bu ölçütlerdeki zor isterler, parçanın geometrik karmaşıklığının da artması ile birlikte, takım tezgâhı üreticilerini, daha karmaşık geometride, daha hassas üretim yapabilen ve zor malzemeleri de işleyebilen takım tezgâhları geliştirmeye yöneltmiştir.

Tornalama işlemi, pek çok endüstride yaygın olarak kullanılan bir talaş kaldırma işlemidir. Silindirik iş parçalarının işlenmesinde kullanılan bu yöntem, birçok araştırmaya ilgi odağı olmuştur. Özellikle Ti6Al4V gibi sert ve mukavemeti yüksek malzemelerin tornalama işlemleri sırasında, düşük yüzey pürüzlülüğü elde edebilmek için genel anlamda daha karmaşık takım tezgahlarına ihtiyaç duyulur ve dolayısıyla talaşlı imalat işlemi sırasında enerji tüketimi artmaktadır. İlaveten, iyi yüzey kalitesi elde edebilmek için ilerleme düşürüleceğinden işlem süresi doğrudan artmaktadır. Ti6Al4V özellikle medikal ve savunma sanayinde, mekanik özelliklerinin uygunluğu bakımından tercih edilen bir malzemedir. Bu malzeme ile torna tezgahında üretilen iş parçalarının yüksek kalitede olması, kullanım alanları gereği önem arz etmektedir. Aynı zamanda, düşük enerji tüketimi de önemli bir ölçüttür.

Literatürde tornalama işlemi ile üretilen iş parçalarının yüzey pürüzlülükleri ve üretim sırasındaki enerji tüketimleri ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Gutowski ve diğ.'nin 2006 yılında geliştirmiş olduğu ilk genel imalat için enerji tahmin modelinden bu yana, model bazlı ve deneysel pek çok çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda temel olarak Taguchi yöntemi ve yanıt yüzey metodu izlendiği görülmektedir. Bilga ve diğ., (2016) tornalama işleminde enerji verimliliği, makine tarafından tüketilen aktif enerji ve güç faktörü değerlerini incelemek adına Taguchi L27 dikey deney tasarımı kullanmışlardır. Çalışmada, kontrol parametrelerinin yalın etkilerinin yanı sıra birlikte kullanımları ile daha fazla etkili oldukları gözlemlenmiştir. Kara ve Li (2011), parça tasarım ve işlem planlama evrelerinde, işlem enerji sarfiyatını azaltmak için özgül kesme enerjisinin tahmin modelini önermişlerdir. Bu sebeple, talaş kaldırma işlem parametreleri ile enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmak adına torna ve freze tezgahlarında deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda %90'nın üzerinde doğruluk ile özgül işlem enerjileri belirlenmiştir. Altıntaş ve diğ., 2016 yılında yaptıkları çalışmada, STEP AP 224 protokolünden faydalanarak farklı özelliklere sahip iş parçalarının freze ile imali esnasında enerji tüketimi tahmini için yeni bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, tezgâhın enerji tüketimi modellenerek, yanıt yüzey yöntemlerinden yüzey merkezli kompozit tasarım ve varyans analizi kullanılarak işlem parametrelerinin enerji tüketimi üzerine etkileri de

irdelenmiştir. Ardından, en küçük enerji tüketimi için uygun işlem parametreleri belirlenmiştir. Mativenga ve Rajemi (2011), minimum enerji tüketimi amacıyla uygun tornalama işlem parametrelerini eniyilemişlerdir. İşlem bazlı çalışmaların yanı sıra işlem planlama aşamasında da enerji tüketimi göz önünde bulundurulmaktadır. Newman ve diğ. (2012), talaşlı imalatta bilgisayar destekli üretim planlama ile enerji verimliliğini bir arada değerlendirerek bir teorik sistem geliştirilmiştir. Uluer ve diğ. (2016), pilot uygulamasını Türkiye, Arçelik A.Ş.'de gerçekleştirdikleri çalışmada, ISO/STEP 10303 224 uygulama protokolünden faydalanarak mekanik parçalarının gömülü enerjilerini belirleyerek, enerji odaklı parça tasarım ve işlem tasarlanması üzerine çalışmışlardır. Ayrık olaylı benzetim yöntemleri kullanılarak işlem zincirinin enerji tüketimi ortaya çıkarılmış ve enerji tüketimini azaltmaya yönelik senaryolar tasarım ve operasyon bazlı belirlenmiştir. Talaşlı imalat için son yıllarda geliştirilmiş bütün enerji tahmin çalışmalarını içeren bir derlemeyi okuyucular, Moradnashad ve Ünver'in (2016), derleme makalesinde bulabilirler.

Tahmin modeli geliştirmede etkili bir diğer yöntem ise yanıt yüzey metodudur. Neşeli ve diğ. (2012), tornalama işleminde kesme parametrelerinin kesme kuvvetine etkilerini yanıt yüzey metodu kullanarak modellemişlerdir. Taguchi L27 ortogonal deney tasarımı tercih edilen bu çalışmada, radyal, ilerleme ve teğetsel kuvvetler incelenmiştir. Deney sonuçları ANOVA ile analiz edilmiş ve en etkili parametrenin kesme derinliği olduğu saptanmıştır. Asiltürk ve Akkuş (2011), sert tornalama işleminin işlem parametrelerinin iki yüzey pürüzlülüğü parametresi (R_a ve R_z) üzerine etkilerini incelemek adına Taguchi'nin L9 dikey deney tasarımından faydalanmışlardır. AISI 4140 çeliği kullanılan deneyler sonucunda en etkili parametrenin ilerleme olduğu belirtilmiştir. Öktem ve diğ. (2005), üç seviyeli tam faktöriyel deney tasarımı ile freze işleminin işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarını yanıt yüzey metodu ile inceledikten sonra genetik algoritma ile parametre eniyilemesi yapmışlardır.

Yüksek hassasiyetli işleme alanında, doğruluk, form hataları ve yüzey pürüzlülüğü tahmini üzerinde pek çok çalışma yapılmış olup, daha karmaşık geometrilerin ve zor malzemelerin işlenebilmesi adına bu çalışmalar sürekli devam etmektedir. Literatürde genellikle yapay sinir ağları ve çeşitli evrimsel algoritmalar bir arada kullanılarak, talaşlı imalatta yüzey kalitesi için tahmin modelleri geliştirilmiştir. Khorasani ve Yazdi (2015) tarafından, Al7075 ve St52 numunelerinin freze işleminde dinamik yüzey pürüzlülüğü tahmini için yapay sinir ağları kullanılmıştır. Deney tasarımı sırasında tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmış olup, sonuç aşamasında tasarlanan modelin doğruluğunu araştırmak için doğrulama süreci sürdürülmüştür. Modelin doğruluğu %99,8 olarak elde edilmiştir. Senthilkumar ve diğ. (2011) tarafından Inconel 718 süper alaşımının torna ile işlenmesi sırasında elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım kenar aşınması incelenmiştir. Bu incelemede genetik algoritma ile yapay sinir ağları birlikte kullanılmıştır. Karpat ve Özel (2006) tarafından yapılan çalışmada AISI H13 çeliğinin tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı, takım ömrü gibi işlem çıktıları incelenmiştir. Bu aşamadaki çok amaçlı eniyileme probleminin çözümü için yapay sinir ağları ve dinamik komşulu parçacık sürü eniyilemesi kullanılmıştır. Üretim planlama gereklilikleri açısından Pareto en iyi sonuçları içeren grafikler de oluşturulmuştur. Sonuç olarak geliştirilen metodolojinin çok amaçlı problemleri üretim planlama kısıtları dahilinde çözmeye etkili ve verimli bir yöntem olduğu açıklanmaktadır.

Bu çalışmada, öncelikle kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı olarak belirlenen girdi parametreleri ile merkezi kompozit deney tasarımı kullanılarak, Ti6Al4V numuneleri torna tezgahında işlenmiştir. İşlem çıktıları olarak belirlenen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi değerleri elde edilmiştir. Bu değerler kullanılarak varyans analizi yapılmış ve yanıt yüzey grafikleri MINITAB™ ortamında oluşturulmuştur. Ardından işlem çıktıları ve girdi parametreleri ile MATLAB™ ortamında yapay sinir ağları modeli geliştirilmiştir. Box-Behnken deney tasarımı ile hazırlanan ikinci deney seti hazırlanmış ve yapay sinir ağları modeli

doğrulanmıştır. Ayrıca, yapay sinir ağları modeli ve yanıt yüzey modeli tornalama işlemi üzerinde tahmin performansları açısından karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

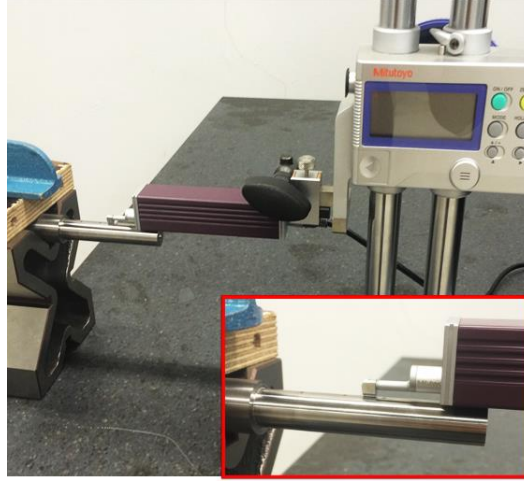
Merkezi kompozit tasarım, yanıt yüzey metodu (YYM) için uygulanabilecek, işlem eniyilemesi için kullanışlı bir deney tasarımıdır. Tornalama işleminde girdi parametreleri kesme derinliği (a_p), ilerleme (f) ve kesme hızı (V_c) olarak belirlenmiştir. Çıktı parametreleri olarak ise ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve özgül kesme enerjisi (ÖKE) belirlenmiştir. Her bir girdi parametresi için 3'er seviye belirlenen deney tasarımı ve deney sonuçları Tablo 1 ile gösterilmiştir. Deneyler Ti6Al4V malzemesi kullanılarak Mazak Integrex i200-st torna-freze takım tezgahında gerçekleştirilmiştir. Ti6Al4V alaşımlarından α - β fazına sahip alaşımlar yaygın bir şekilde kullanılır. Talaşlı imalat işleminden önce α taneleri eşeksensel (neredeyse dairesel) şekle sahiptirler (Siemers ve diğ. (2003)). Kesici uç olarak SECO VCGT160404F-AL kodlu ürün kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterildiği gibi deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1:
Ti6Al4V numunenin işlenmesi

Numunenin yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile Şekil 2'deki gibi ölçülmüştür. Ölçüm sırasında ISO-1997 standardı kullanılmıştır (Mitutoyo User Manual). Deneyler sırasında çekilen güç, tezgâhın şebekeye bağlantısında bulunan bir akıllı metre (SOCOMEK-Diris A40) ile ölçülüp, 1 saniye aralıklarla kaydedilmiştir. Kaydedilen güç değerleri makinenin toplam güç tüketiminden oluşmaktadır. Talaş kaldırma için harcanan gücün elde edilebilmesi için makinenin boşta çalışması, soğutma sistemi, ayna devri ve Z ekseninde ilerleme için harcanan güç miktarları, toplam harcanan güç değerinden çıkarılmıştır. (Bahsedilen güç kalemleri, Moradnazhad (2015) tarafından oluşturulan regresyon modelleri üzerinden hesaplanmıştır.) Ardından, Denklem 1'de gösterildiği gibi elde edilen güç değeri (P) talaş kaldırma debisine (TKD) bölünerek özgül kesme enerjisi (ÖKE) hesaplanmıştır.

$$\text{ÖKE} = \frac{P}{TKD} \quad (1)$$



Şekil 2:
Yüzey pürüzlülüğü ölçüm düzeneği

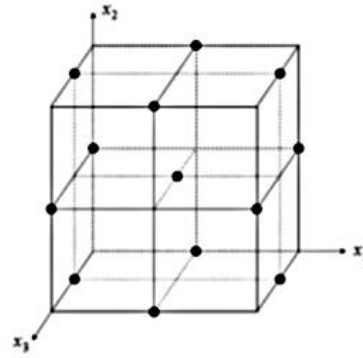
Tablo 1. Merkezi kompozit deney tasarımı ve deney sonuçları

Deney No.	Kesme Derinliği (a_p) (mm)	İlerleme (f) (mm/dev)	Kesme Hızı (V_c) (m/dak)	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) (μm)	Özgül Kesme Enerjisi (ÖKE) (J/mm^3)
1	0,400	0,080	40	0,561	132,187
2	0,400	0,080	40	0,576	132,222
3	0,522	0,090	38	0,765	96,058
4	0,278	0,090	42	0,550	161,549
5	0,278	0,090	38	0,553	182,179
6	0,522	0,070	38	0,456	123,282
7	0,522	0,090	42	0,729	85,867
8	0,278	0,070	38	0,344	232,647
9	0,400	0,080	40	0,575	132,243
10	0,400	0,080	40	0,543	132,311
11	0,278	0,070	42	0,332	206,527
12	0,522	0,070	42	0,474	110,182
13	0,400	0,064	40	0,286	165,950
14	0,400	0,080	36	0,425	148,767
15	0,200	0,080	40	0,420	261,470
16	0,600	0,080	40	0,606	88,973
17	0,400	0,096	40	0,581	111,729
18	0,400	0,080	40	0,508	132,016
19	0,400	0,080	40	0,446	131,953
20	0,400	0,080	44	0,425	122,392

YYM modeli dışında özgül kesme enerjisini ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek amacıyla YSA modeli geliştirilmiştir. YSA tahmin modelini oluştururken kullanılan girdi parametreleri ise kesme hızı (m/dak), ilerleme (mm/dev) ve kesme derinliğidir (mm). Çıktı parametreleri ise yüzey pürüzlülüğü (μm) ve özgül kesme enerjisidir (J/mm^3). Girdi ve çıktı

parametrelerinin birlikte kullanılarak oluşturulacak YSA modeli için pek çok deneyler yapılmıştır. Tablo 1’de görülen 20 adet deney verisinin ilk 15 adeti modeli eğitmek için, sonraki 5 adeti çapraz doğrulama yapmak içindir. Bu verileri kullanarak özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlülüğü için YSA tahmin modeli geliştirilmiştir. Daha sonra geliştirilen tahmin modelini test etmek için eğitim ve çapraz doğrulamada kullanılmayan Box-Behnken deney tasarımı ile oluşturulmuş 15 adet deney verisi kullanılmıştır.

Anderson ve Whitcomb’un (2004) yayınında Box-Behnken tasarımının, iki-seviye faktöriyel tasarım ile tamamlanmamış blok tasarımının birleştirilmesi ve belirli sayıda kopya merkez noktası eklenmesiyle elde edildiği açıklanmıştır. Vining ve Kowalski’nin (2011) çalışmasında, ikinci-seviyeden modelin uygulanması Box-Behnken tasarımında en iyi ikinci tasarım olarak görülmektedir. Box-Behnken tasarımının bir avantajı da daha az sayıda deney ile başarılı sonuçlar elde edilebilmesidir (Lawson, 2015). Şekil 3’te 3 faktörlü Box-Behnken tasarımı için temsili bir grafiksel gösterim yer almaktadır.



Şekil 3:
3 faktörlü Box-Behnken tasarımı (Lawson, 2015)

Bu çalışmada YSA modelini test etmek için kullanılacak girdi parametreleri ve işlem parametreleri Tablo 2’de yer almaktadır.

Tablo 2. Box-Behnken deney tasarımı ve deney sonuçları

Deney No.	Kesme Derinliği (a_p) (mm)	İlerleme (f) (mm/dev)	Kesme Hızı (V_c) (m/dak)	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) (μm)	Özgül Kesme Enerjisi (ÖKE) (J/mm^3)
1	0,600	0,070	40,0	0,362	94,614
2	0,400	0,080	40,0	0,427	125,776
3	0,200	0,070	40,0	0,352	293,488
4	0,600	0,090	40,0	0,617	73,858
5	0,200	0,080	42,0	0,424	245,221
6	0,400	0,090	38,0	0,606	117,713
7	0,600	0,080	42,0	0,451	78,872
8	0,200	0,080	38,0	0,421	269,712
9	0,600	0,080	38,0	0,457	85,417
10	0,400	0,070	38,0	0,358	146,166
11	0,400	0,090	42,0	0,598	109,557
12	0,400	0,070	42,0	0,357	140,756
13	0,400	0,080	40,0	0,432	126,735

14	0,200	0,090	40,0	0,585	228,018
15	0,400	0,080	40,0	0,431	126,650

3. YANIT YÜZEY METODU ve VARYANS ANALİZİ

Yanıt yüzey metodu, işlem parametreleri ve çıktılar arasındaki ilişkiyi analiz etmeyi oldukça kolaylaştıran bir yöntemdir. İşlem eniyilemesi için yanıt yüzey metodunun kullanılan popüler yöntemlerden biri olduğu, Vining ve Kowalski (2010) tarafından da belirtilmiştir. Yanıt yüzey metodu matematiksel ve istatistiksel tekniklerin karışımı olarak ortaya çıkan bir yöntemdir. Bu yöntem özellikle, çıktı parametreleri birden fazla parametrenin etkisi altındaysa ve amaç işlem çıktısının eniyilenmesi ise avantajlıdır (Myers ve Montgomery, 2001).

Varyans analizi (ANOVA), bir grup veri içerisinde belirlenen çıktı parametrelerini girdi parametrelerinin nasıl etkilediğini belirleyen istatistiksel bir analiz yöntemidir. Tablo 1’de elde edilen veriler kullanılarak, Ti6Al4V malzemesinin tornalama işlemi sırasında özgül kesme enerjisini ve işlem sonrasında numunenin yüzey pürüzlülüğünü en fazla etkileyen girdi parametrelerini belirleyebilmek için Varyans Analizinden faydalanılmıştır. Tablo 3’te R_a , Tablo 4’te ise özgül kesme enerjisi için elde edilen ANOVA sonuçları yer almaktadır. Sırasıyla A, B ve C, kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı parametrelerini temsil etmektedir. ANOVA %95’lik güven aralığında tanımlandığı için P değerinin 0,05’in altında olması o girdi parametresinin, çıktı parametresi üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, Tablo 3 incelendiğinde, R_a için kesme derinliği ve ilerlemenin en etkili işlem parametreleri olduğu görülmektedir. F değerinden faydalanarak, ilerlemenin kesme derinliğinden daha etkili olduğu söylenebilmektedir. Özgül kesme enerjisi için ise Tablo 4’te yer alan parametrelerin P değerleri 0,05 değerinden küçük olduğu için belirlenen üç işlem parametresinin de etkili olduğu anlaşılmaktadır. Ancak F değerlerine bakıldığında, sırasıyla en etkili parametrelerin kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) için varyans analizi

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalamaların Karesi	F-Değeri	P-Değeri
Model	10	0,274397	0,02744	27,81	0
Blok	1	0,027725	0,027725	28,1	0
Doğrusal	3	0,230384	0,076795	77,84	0
A	1	0,0674	0,0674	68,32	0
B	1	0,162892	0,162892	165,11	0
C	1	0,000092	0,000092	0,09	0,767
Hata	9	0,008879	0,000987		
Toplam	19	0,283276			

Tablo 4. Özgül kesme enerjisi (ÖKE) için varyans analizi

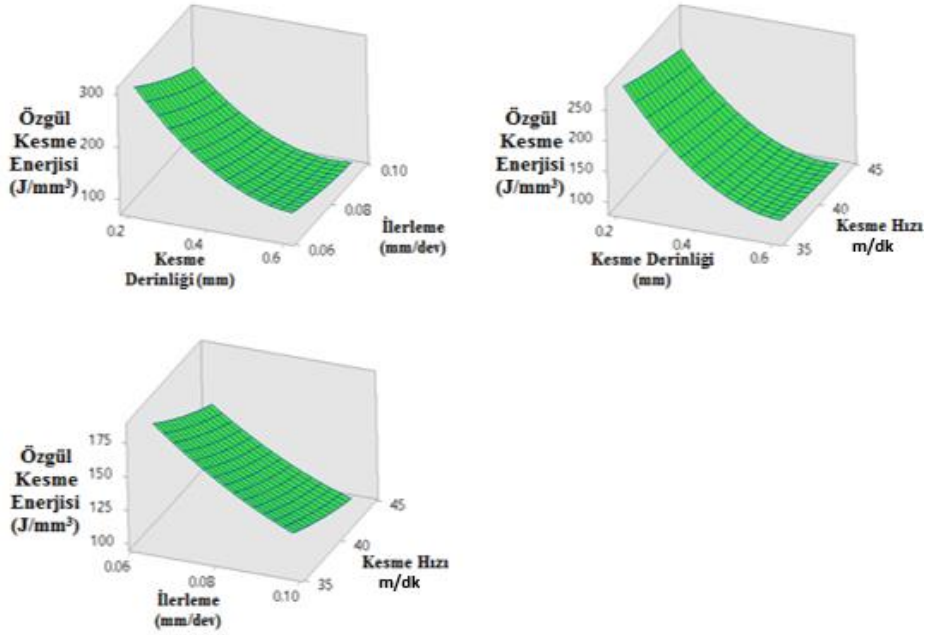
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalamaların Karesi	F-Değeri	P-Değeri
Model	10	40291,5	4029,2	214,35	0
Blok	1	10,3	10,3	0,55	0,477
Doğrusal	3	36729,6	12243,2	651,35	0
A	1	31609,5	31609,5	1681,65	0
B	1	4160,5	4160,5	221,34	0

C	1	959,5	959,5	51,05	0
Hata	9	169,2	18,8		
Toplam	19	40460,7			

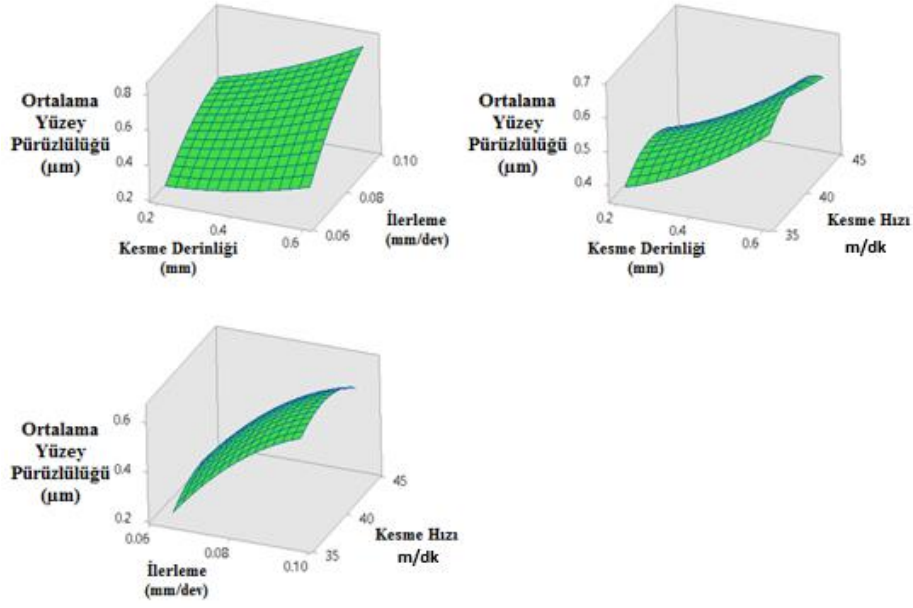
Şekil 4 ve Şekil 5'te yer alan yanıt yüzey grafiklerinden, işlem parametrelerindeki değişim ile işlem çıktılarının nasıl etkilendiği görülebilmektedir. Özgül kesme enerjisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için elde edilen regresyon modelleri Denklem 2 ve Denklem 3 ile gösterilmiştir. Şekil 4'te özgül kesme enerjisi için yüzey grafikleri yer almaktadır. Grafiklere göre, kesme derinliği ve ilerleme arttığında özgül kesme enerjisinde belirgin bir azalma söz konusudur. Kesme hızı arttığında ise özgül kesme enerjisi daha az azalmaktadır. Şekil 5'te R_a için yüzey grafikleri yer almaktadır. Bu grafiklerden ise kesme derinliği ve ilerleme arttığında belirgin bir şekilde R_a değerinin arttığı görülmektedir.

$$\begin{aligned} \text{ÖKE} = & 1501 - 1980 * a_p - 8431 * f - 20,8 * V_c + 1041,1 * a_p * a_p + 19737 * f * f \\ & + 0,125 * V_c * V_c + 4481 * a_p * f + 9,77 * a_p * V_c + 42,9 * f * V_c \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R_a = & -8,21 - 1,03 * a_p + 46,4 * f + 0,327 * V_c + 0,652 * a_p * a_p - 199,1 * f * f \\ & - 0,00387 * V_c * V_c + 14,02 * a_p * f - 0,0008 * a_p * V_c - 0,228 * f * V \end{aligned} \quad (3)$$

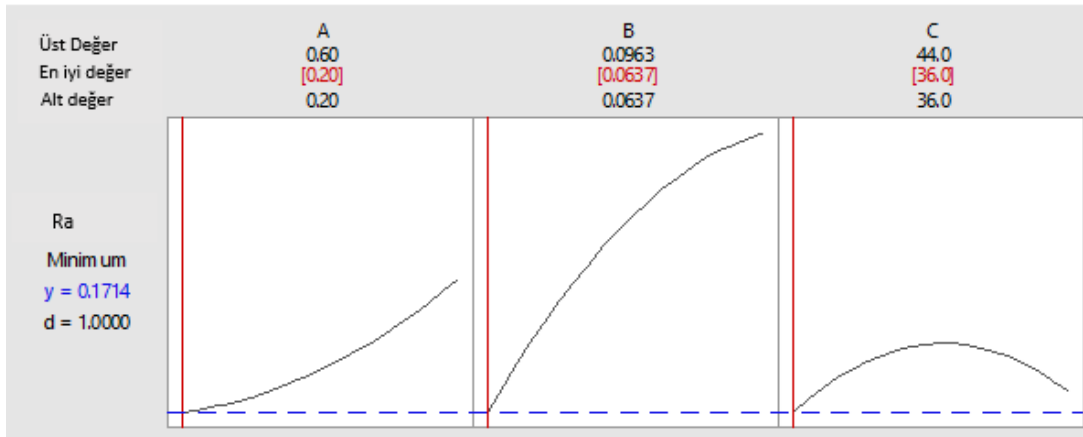


Şekil 4:
Özgül kesme enerjisinin (ÖKE) yanıt yüzey grafikleri

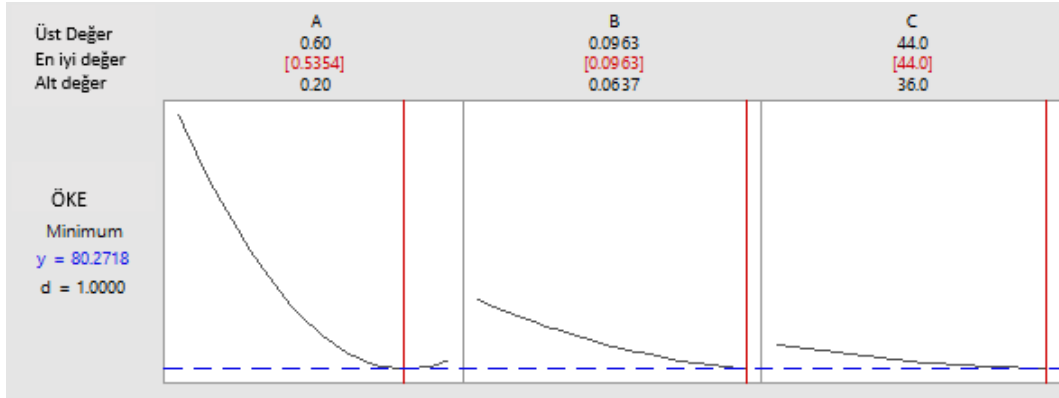


Şekil 5:
Ortalama yüzey pürüzlülüğünün (R_a) yanıt yüzey grafikleri

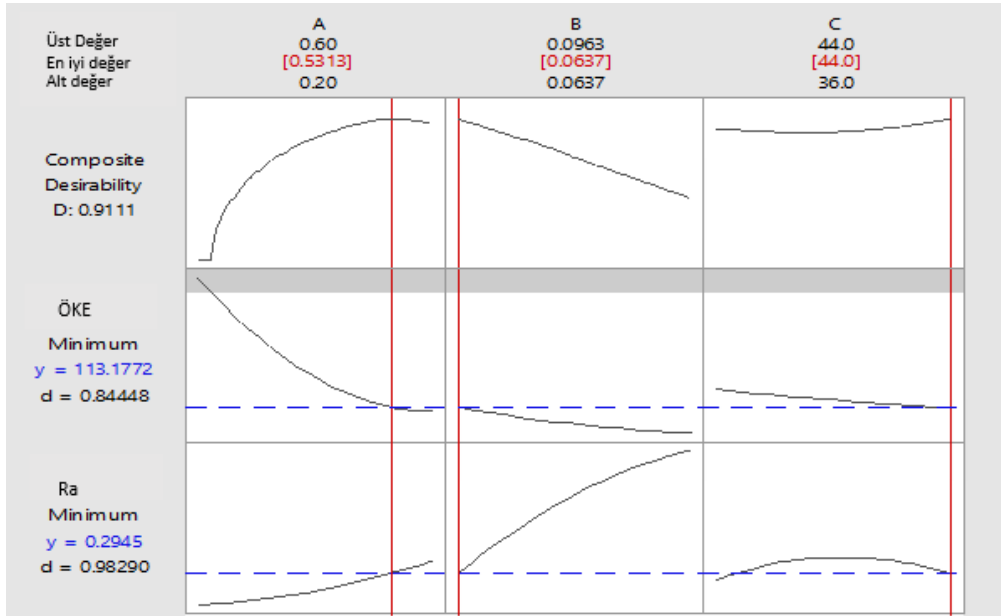
YYM modelinden minimum yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi değeri elde edebilmek için MINITAB™ ortamında eniyileme yapılmıştır. Şekil 6'da minimum R_a için kullanılması gereken işlem parametreleri sırasıyla; 0,2 mm, 0,0637 mm/dev ve 36 m/dak olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile öngörülen R_a değeri 0,1714 μm olarak hesaplanmıştır. Şekil 7'de ise minimum özgül kesme enerjisi için uygun işlem parametreleri 0,5354 mm, 0,0963 mm/dev ve 44 m/dak olarak saptanmıştır. Hesaplanan minimum özgül kesme enerjisi ise 80,2718 J/mm^3 olarak belirtilmiştir. Model çok amaçlı eniyileme problemi olarak çözdürülüp Pareto en iyi çözümler elde edildiğinde, minimum R_a ve minimum özgül kesme enerjisi elde etmek için gerekli işlem parametreleri 0,5313 mm kesme derinliği, 0,0637 mm/dev ilerleme ve 44 m/dak kesme hızı olarak Şekil 8'de gösterilmiştir. Her iki yanıt için de eniyileme yöntemi uygulandığında, her bir yanıtın minimum değerlerinden bir miktar uzaklaştığı görülmektedir. Bu çözümün sonucunda minimum R_a ve ÖKE değerleri sırasıyla; 0,2945 μm ve 113,177 J/mm^3 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6:
Ortalama yüzey pürüzlülüğü için en iyi parametre değerleri



Şekil 7:
Özgül kesme enerjisi için en iyi parametre değerleri



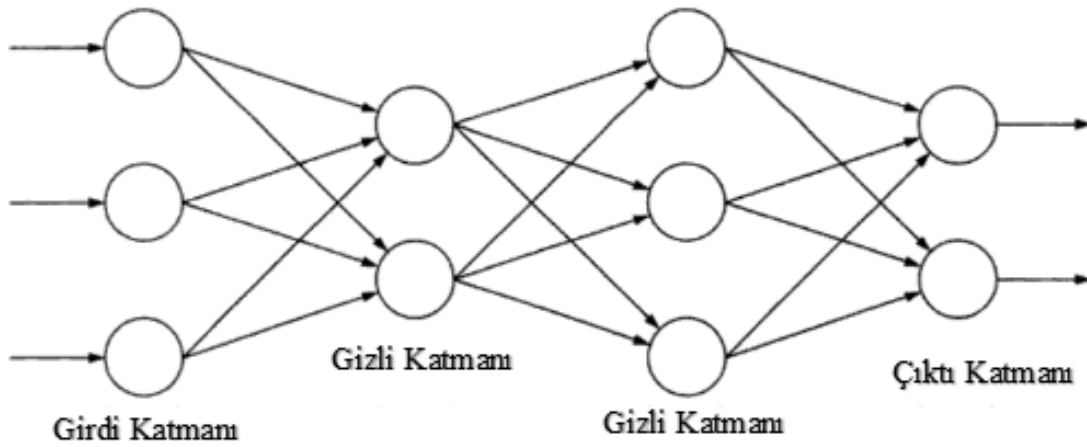
Şekil 8:
Özgül kesme enerjisi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü birlikte en iyi parametre değerleri

4. YAPAY SİNİR AĞLARI TEMELLİ TAHMİN MODELİ

Yapay Sinir Ağı (YSA) insan beyindeki sinirlerin çalışma mantığından esinlenerek tasarlanmış eğitim, çapraz doğrulama ve test etme gibi aşamaları olan bir bilgi işleme yöntemidir. Bu yöntem aracılığıyla hem sınıflandırma hem de regresyon yapılabilir (Yegnanarayana ve diğ. (2006) ve Haykin (2005)). YSA yönteminin temel amacı, girdi ve çıktı parametreleri arasında bir genelleme yapmaktır. Genellemenin doğruluğu, farklı bir girdi parametresi sisteme girildiğinde, modelin verdiği çıktı değeri ile istenilen değer arasında çok fazla % hata olmamasıyla ölçülür. Hatanın çok fazla olması modelde aşırı öğrenmenin meydana geldiğini gösterir. (Haykin (2005)). Aşırı öğrenmenin meydana geldiği anda ya model durdurulmalı ya da modele tanıtılan eğitim verisine göre yeterli miktarda çapraz doğrulama verisi modele tanıtılmalıdır. Aşırı öğrenmeye sebep olan durumlar, gizli katman sayısının gereğinden fazla olması ya da yeterli miktarda eğitim verisi ile çapraz doğrulama verisinin ayarlanamamasıdır. Modelin eğitimi tamamlandıktan sonra test verileri ile model test edilir. Test sırasında kullanılan veriler, eğitim sırasında hiç kullanılmamış veriler olmalıdır. Daha

önceden modele tanıtılmamış girdi verileri tasarlanan modele verildiğinde model çıktı değerleri verir. Modelden elde edilen çıktı değerleri ile istenilen çıktı değerleri karşılaştırılır ve hata hesaplanır.

Şekil 9’da görüldüğü gibi model, girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı olarak 3’e ayrılmaktadır. Girdi katmanı deneylerde kullanılan girdi verilerinin tanımlandığı katman, gizli katman (ara katman) ise girdi katmanından gelen girdi verilerini transfer fonksiyonundan yararlanarak çıkış katmanına işlenmiş olarak gönderen katmandır. Gizli katmanın miktarı elde veriye bağlı olarak ayarlanmalıdır. Elde çok fazla veri varsa gizli katman miktarı artırılır. Eğer az veri ile model oluşturulmak isteniyorsa, gizli katman miktarı çok fazla olduğu zaman aşırı öğrenme meydana gelebilir. Aşırı öğrenme meydana gelmeyecek ve eldeki veriyi de düzgün bir şekilde eğitebilecek şekilde gizli katman miktarı ayarlanır (Mehrotra ve diğ. (2000) ve Priddy ve diğ. (2005)).



Şekil 9:
Yapay Sinir Ağı Modeli (Yegnanarayana ve diğ. (2006))

Çıktı katmanı, çıktı verilerini veren son katmandır. Bu katman, gizli katmandan gelen veriler sayesinde ve çıktı katmanında bulunan nöronlardaki transfer fonksiyonu sayesinde çıktı verilerini üretirler.

Transfer fonksiyonu, genellikle doğrusal olmayan fonksiyonlardan oluşmaktadır. Transfer fonksiyonu modeli tasarlayacak olan kişinin neyi elde etmek istediğine ve deney verilerine bağlıdır. Genelde kullanılan transfer fonksiyonları; signum fonksiyonu, tan-sigmoid, log-sigmoid ve Gauss dağılım fonksiyonudur. YSA modellerinde kullanılabilen başlıca fonksiyonların matematiksel ifadeleri sırasıyla Denklem 3, 4 ve 5 ile gösterilmiştir (Haykin (2005) ve Priddy ve diğ. (2005)).

$$\text{Signum fonksiyonu} = \frac{x}{|x|} \quad (3)$$

$$\text{Tan - sigmoid} = \left(\frac{2}{1 + e^{-2n}} \right) - 1 \quad (4)$$

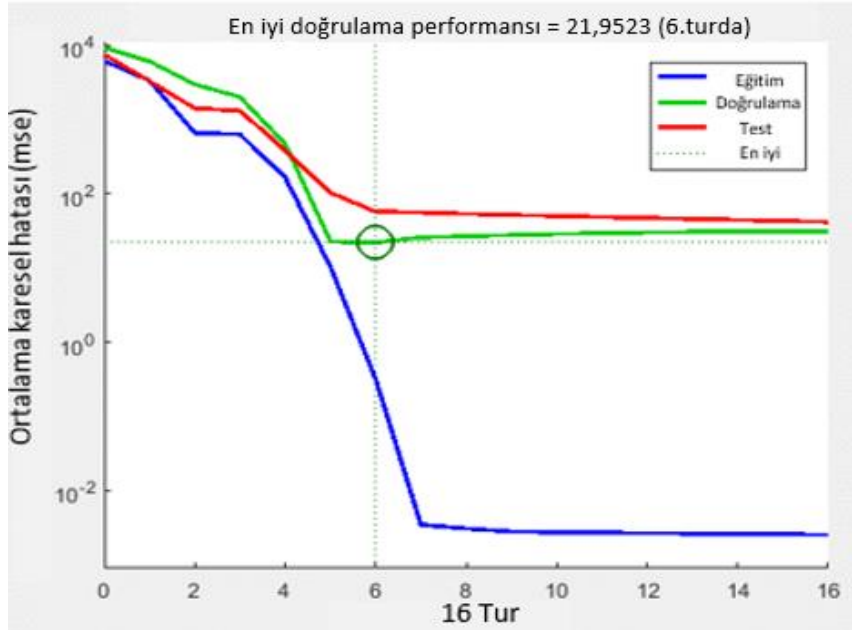
$$\text{Log - sigmoid} = \left(\frac{1}{1 + e^{-x}} \right) \quad (5)$$

Yapay sinir ağları yapılarına göre geri beslemeli ve ileri beslemeli ağlar olmak üzere ikiye ayrılır. İleri beslemeli ağlarda giriş katmanından çıktı katmanına doğru tek bir yön vardır. Başka

bir deyişle çıktı katmanından ya da gizli katmandan çıkan veri tekrar girdi katmanına bağlanmaz. Geri beslemeli ağlarda ise gizli katmanın sonucu ya da çıktı katmanının sonucu girdi katmanına ya da herhangi bir ara katmana tekrar bağlanır. İleri beslemeli ağlara MLP (multi-layer perceptron), RBF (radial basis function) ve LVQ (learning vector quantization) ağları örnek verilebilir. Geri beslemeli ağlara ise RNN (recurrent neural network) ve Hopfield ağları örnek verilebilir. Geri beslemeli sinir ağları ileri beslemeli sinir ağlarına göre daha dinamik bir yapıya sahiptirler ve bu yüzden daha çok hafızaya ihtiyaç duyarlar (Yegnanarayana ve diğ. (2006), Haykin (2005) ve Priddy ve diğ. (2005)).

YSA modeli oluşturulduğu zaman Ti-6Al-4V malzemesini torna tezgahında kesmeden çıktılar (yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi) tahmin edilmeye çalışılır ve çıkan sonuca göre girdi parametreleri ayarlanır. Böylece istenilen yüzey pürüzlülüklerinde parçaları üretmek daha az zaman alacağı gibi bu model sayesinde işlem sırasında kesici takımın ömrünü uzatmak da mümkündür. Ayrıca bütün bu işlemleri gerçekleştirirken talaş kaldırma işlemi sırasında ne kadar enerji tüketileceğinin hesabını yapmak oluşturulan model aracılığıyla mümkündür.

Tablo 1’de yer alan 20 adet veri eğitim ve çapraz doğrulama verisidir. Tablo 2’de gösterilen 15 adet veri de geliştirilen YSA modelini test etmek için kullanılan verilerdir. YSA modeli için eğitim, çapraz doğrulama ve test verileri belirlendikten sonra YSA tipi olarak ileri besleme geri yayımlı ağ tipi seçilmiştir. Ayrıca eğitim fonksiyonu olarak Levenberg-Marquardt algoritması (trainlm) ve transfer fonksiyonu olarak ise log-sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Eğitim ve transfer fonksiyonları belirlendikten sonra deney verilerinden yararlanarak YSA modeli oluşturulup eğitilmiştir. Eğitim ve çapraz doğrulama verilerinin yüzdeleri 1’e yakın olması, modelin yeterli olabileceğini göstermektedir. Fakat tek gösterge eğitim ve çapraz doğrulama verilerinin yüzdelerinin 1’e yakın olup olmaması değildir. Ayrıca test verilerindeki istenilen değer ile çıktı değerlerinin birbirlerinden çok farklı olmamalıdır ve test verisinin yüzdesinin de 1’e yakın olması gerekmektedir. Bu yüzden deneyler sonucunda elde edilen verilerden geriye kalan 15 adet veri, oluşturulmuş modeli test edebilmek için kullanılmıştır. Oluşturulan bu modelin kabul edilebilirliğinin bir diğer göstergesi ise modelin Şekil 10’deki performans grafiğine bakıldığında 6 iterasyondan sonra model eğitiminin durduğu gözükmektedir. Bu noktadan sonra devam eden fazla miktardaki iterasyonlar modelde hatayı artırabilecek aşırı öğrenmeye neden olur.



Şekil 10:
YSA modelinin performans eğrisi

5. DOĞRULAMA VE KARŞILAŞTIRMA

Yapay Sinir Ağları modelinin doğrulanması için Box-Behnken deney tasarımı oluşturulmuştur. Merkezi Kompozit Tasarımın deney sonuçları ile eğitilmiş olan Yapay Sinir Ağları modeli, Box-Behnken Tasarımının verileri ile teste tabi tutulmuştur. Aynı Box-Behnken Tasarımı kullanılarak, Yanıt Yüzey Modeli de test edilmiştir. Bu doğrulama testlerinin sonuçlarına göre, iki model karşılaştırılmıştır.

5.1. YSA Modelinin Doğrulanması

YSA modeli oluşturulup model yeteri kadar eğitildikten sonra model, daha önceden tanımlanmayan parametre değerleri ile test edilmelidir. Dolayısıyla, Box-Behnken deney tasarımı kullanılarak elde edilen deney verileri ile YSA modeli doğrulanmıştır ve hatalar Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. YSA modeli ile tahmin edilen proses çıktıları ve elde edilen hatalar

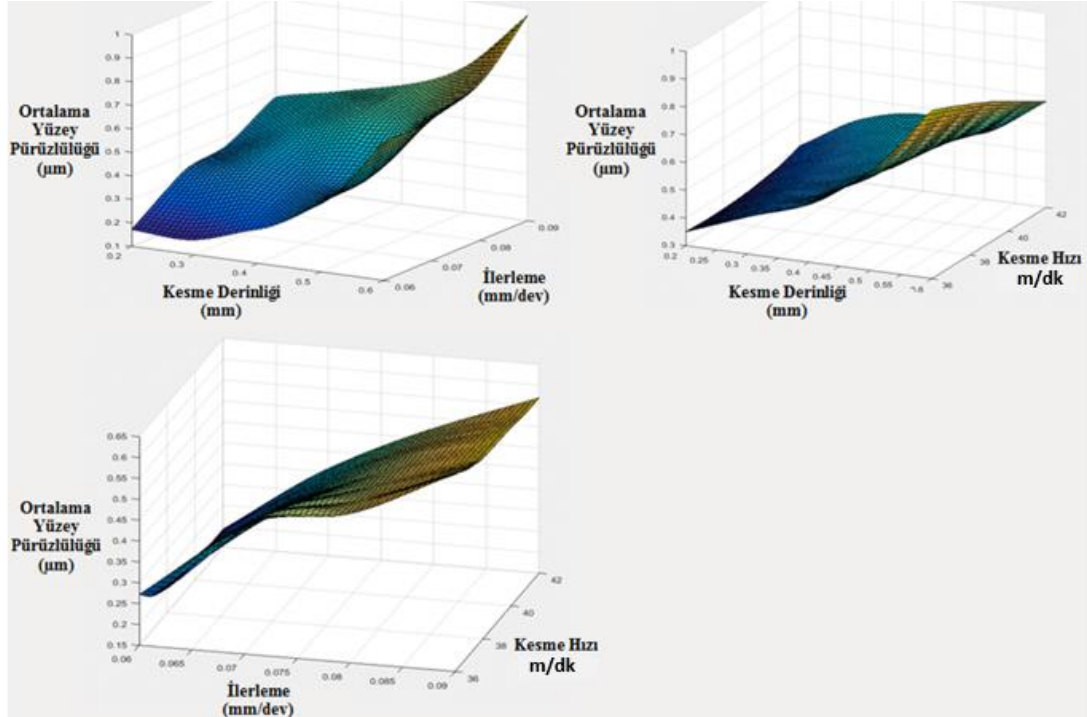
Ölçülen Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	Tahmin Edilen Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm)	Hata (%)	Ölçülen Özgül Kesme Enerjisi (J/mm^3)	Tahmin Edilen Özgül Kesme Enerjisi (J/mm^3)	Hata (%)
0,362	0,377	4,2	94,614	90,930	3,9
0,427	0,454	6,5	125,776	131,874	4,8
0,352	0,332	5,7	293,488	279,498	4,8
0,617	0,560	9,2	73,858	78,458	6,2
0,424	0,430	1,4	245,221	248,383	1,3
0,606	0,541	10,7	117,713	120,854	2,7
0,451	0,420	7,0	78,872	85,826	8,8
0,421	0,396	5,9	269,712	265,065	1,7
0,457	0,443	3,0	85,417	83,812	1,9
0,358	0,381	6,4	146,166	150,194	2,8
0,598	0,551	7,8	109,557	117,501	7,3
0,357	0,384	7,5	140,756	130,241	7,5
0,432	0,454	5,2	126,735	131,874	4,1
0,585	0,556	4,9	228,018	240,849	5,6
0,4313	0,4542	5,3	126,650	131,874	4,1

Tablo 5'e bakıldığında yüzde hatalarının kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmektedir. Oluşturulan YSA modelinin istatistiki olarak doğruluğunun kabul edilebilmesi adına, aynı eğitim stratejisi kullanılarak 10 kez aynı girdiler ile YSA modelleri oluşturulmuştur. Elde edilen modeller arasındaki hataya bakıldığında, YSA modelinin farklı 10 denemesinin birbirine oldukça yakın olduğu Tablo 6'da görülmektedir.

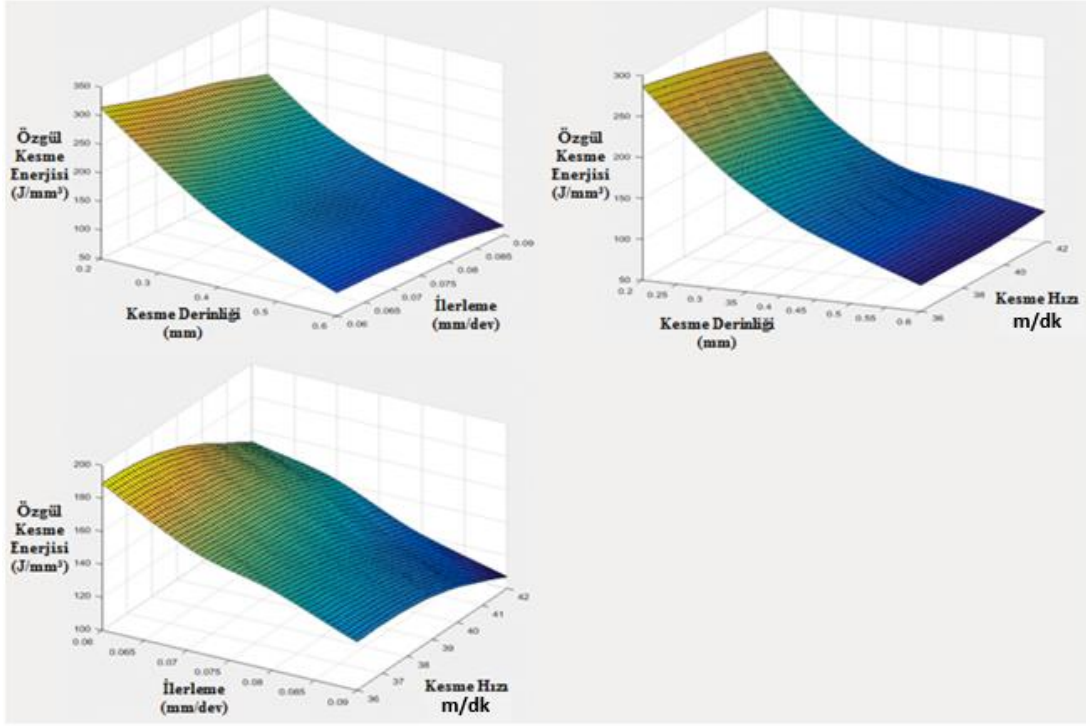
Tablo 6. YSA modelinin farklı 10 denemesinin ortalama hataları

Deneme	Yüzey Pürüzlülüğü Ortalama Hatası (%)	Özgül Kesme Enerjisi Ortalama Hatası (%)
1	8,5	6,6
2	7,4	4,4
3	5,9	4,9
4	7,3	5,0
5	6,1	4,5
6	6,5	4,0
7	6,1	5,5
8	7,3	5,5
9	7,3	5,2
10	7,0	5,2

Hazırlanan modelden yararlanarak ilk önce girdi parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerini görebilmek adına, 3-boyutlu yüzey grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 11’de görülen grafikler yorumlandığı zaman; kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, ilerleme ve kesme derinliği arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Şekil 12’de görülen grafikler yorumlandığı zaman; kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği arttıkça özgül kesme enerjisinin azaldığı görülmektedir.

**Şekil 11:**

YSA modeli ile tahmin edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yüzey grafikleri



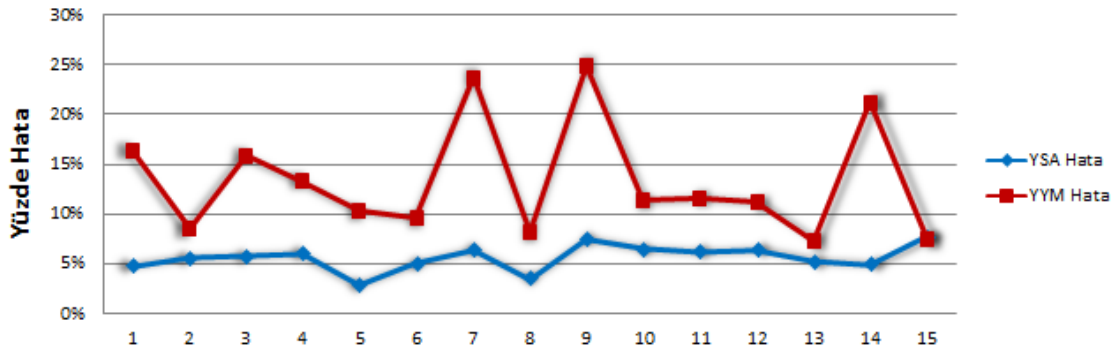
Şekil 12:

YSA modeli ile tahmin edilen özgül kesme enerjisi değerlerinin yüzey grafikleri

5.2. YSA ve YYM Karşılaştırması

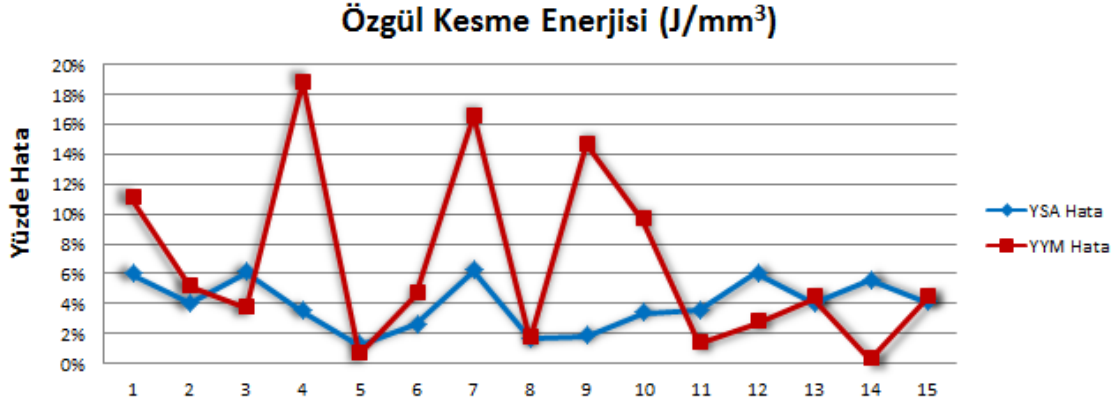
Bu bölümde yanıt yüzey metodu modelinin ve yapay sinir ağları modelinin deney sonuçlarına göre elde edilen hata oranları karşılaştırılmıştır. Yapay sinir ağları modeli, merkezi kompozit tasarım ile türetilen deney sonuçlarınınca eğitilmiş, Box-Behnken tasarımına göre elde edilen sonuçlar ile de test edilmiştir. Benzer şekilde yanıt yüzey metodu kullanılarak, yapay sinir ağları modelinde test edilen Box-Behnken tasarımının parametre değerlerine göre işlem çıktıları tahmin edilmiştir. Bu değerler karşılaştırılarak Şekil 13 ve Şekil 14'deki grafikler elde edilmiştir.

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm)



Şekil 13:

Ortalama yüzey pürüzlülüğü için yanıt yüzey metodu modeli ile yapay sinir ağları modelinin hatalarının karşılaştırması



Şekil 14:

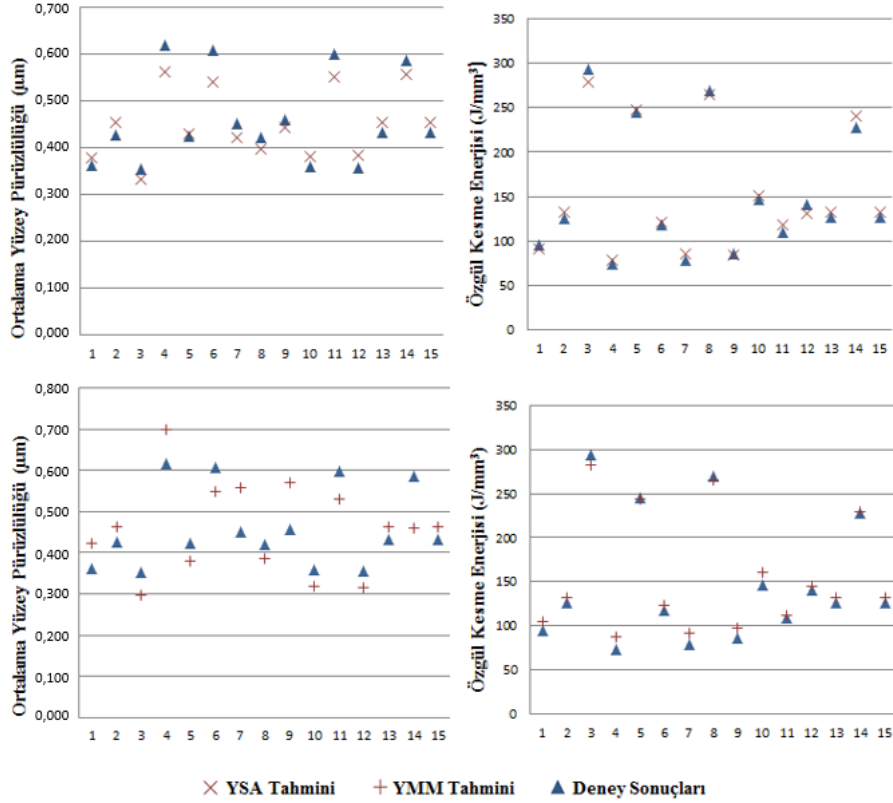
Özgül kesme enerjisi için yanıt yüzey metodu modeli ile yapay sinir ağları modelinin hatalarının karşılaştırması

Hata oranları incelendiğinde, yanıt yüzey metodu için (merkezi kompozit tasarım ile yapılan deneylerde) daha önce denenen parametre değerlerine yakın değerlerin tahmin hatası daha düşük olurken, farklı değerler için hata oranı yükselmektedir. Bu durum, yapay sinir ağları modelinin daha tutarlı sonuçlar elde ettiğini göstermektedir.

Walpole ve diğ. (1998), korelasyon analizinde iki değişken arasındaki bağıın ne derece güçlü olduğunu, korelasyon katsayısı ile ölçülebileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde Tablo 7’de yer alan korelasyon katsayıları incelendiğinde yapay sinir ağlarının deney sonuçlarına daha uygun değerler verdiği görülmektedir. Şekil 15’de YSA ve YYM modelinin çıktıları ile deney sonuçlarının (yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi) karşılaştırılması yer almaktadır. Buradaki grafikler korelasyon değerlerini doğrular niteliktedir. YYM tahminleri ile deney sonuçlarının R_a değerleri incelendiğinde, değerler arasındaki farkın yanı sıra birbirinden düşük ya da yüksek değerler yer almasının korelasyon değerini düşürdüğü görülmektedir.

Tablo 7. YYM ve YSA için korelasyon değerleri

	YYM		YSA	
	R_a	ÖKE	R_a	ÖKE
Korelasyon Katsayısı (%)	78,06	99,8	95,95	99,5



Şekil 15:

YSA ve YYM tahminlerinin deney sonuçları ile karşılaştırılması

6. SONUÇLAR

Sanayide isterlerin yüksek olmasından dolayı kaliteli ürün üretebilmek için hem yüksek teknolojiye sahip tezgahların kullanımı, hem de talaşlı imalat sırasında tüketilen enerji artmaktadır. Özellikle enerji tüketimindeki artışı azaltabilmek için bilim adamları ve araştırmacılar bu konuda çalışmalarına son yıllarda ağırlık vermişlerdir. Bu çalışmada, enerji tüketimindeki artışı azaltabilmek adına Ti6Al4V malzemesinin Mazak i-200st torna-freze tezgahında işlenmesi sırasında, enerji tüketimi ve işlem sonrasında ortaya çıkan parçanın yüzey pürüzlüğü verileri toplanmış ve toplanan verilerden yararlanılarak YYM ve YSA tahmin modelleri oluşturulmuştur. YSA ve YYM tahmin modellerini oluşturabilmek için belli miktarda deney yapılması gerekmektedir. Fakat torna tezgahlarında Ti6Al4V malzemesini işlemek kolay olmadığı için çok fazla miktarda deney yapmak pek mümkün değildir. Bu yüzden, daha az miktarda deney yapmak için tam faktöriyel deney tasarımı yerine Merkezi Kompozit ve Box-Behnken deney tasarımlarından yararlanılmıştır. Merkezi Kompozit deney tasarımı yöntemi ile tasarlanan deneyin sonuçları, yanıt yüzey ve yapay sinir ağları modellerini eğitmek için kullanılmıştır. Box-Behnken deney tasarımı verileri ise Merkezi Kompozit deney tasarımı verileriyle eğitilen YYM ve YSA modellerini test etmek için kullanılmıştır.

İlaveten, elde edilen deney sonuçlarından yararlanarak yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve özgül kesme enerjisinin (ÖKE) varyans analizi yapılmıştır. Kesme derinliği ve ilerleme yüzey pürüzlüğünü etkilerken, kesme hızının yüzey pürüzlüğünü etkilemediği görülmüştür. Ayrıca ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi kesme derinliğine nazaran daha fazla olduğu gözlenmiştir. Özgül kesme enerjisini ise sırasıyla en çok kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı etkilemiştir. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak oluşturulan YYM modeli sayesinde minimum yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisini elde edebilmek amacıyla MINITAB™

ortamında kontrol parametrelerinin (kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı) eniyilemesi yapılmıştır. Minimum yüzey pürüzlülüğünü elde edebilmek için gerekli girdi parametreleri, kesme derinliği 0,2 mm, ilerleme 0,0637 mm/dev ve kesme hızı 36 m/dak olarak belirlenmiştir. Minimum özgül kesme enerjisi için gerekli girdi parametreleri ise kesme derinliği 0,5354 mm, ilerleme 0,0963 mm/dev ve kesme hızı 44 m/dak olarak belirlenmiştir.

Deney sonuçları sayesinde eğitilen ve test edilen YSA modelinin çıktıklarına bakıldığı zaman, model tarafından elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi değerleri ile ölçülen değerler karşılaştırıldığında hataların çok yüksek olmadığı görülmüştür. YSA modelinin de istatistiksel olarak kabul edilebilir olması için aynı girdi parametreleri kullanılarak 10 farklı YSA modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan 10 farklı YSA modelinde yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi için ortalama hatalar hesaplanmıştır ve ortalama hatalar birbirine oldukça yakındır. Başka bir deyişle kullanılan torna tezgâhında, Ti6Al4V işlenmek istenildiğinde yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi tahmin etmek için oluşturulan YSA modeli güvenilir olarak kullanılabilir.

YSA ve YYM modellerinden yararlanılarak yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi için oluşturulan yüzey grafikleri birbirlerine benzer çıkmıştır. Her iki modelin yüzey grafiklerine bakıldığında yüzey pürüzlülüğünün kesme derinliği azaldıkça, ilerleme azaldıkça ve kesme hızı arttıkça, azaldığı görülmüştür. Diğer yandan kesme hızındaki değişim, ilerleme ve kesme derinliğindeki değişim kadar yüzey pürüzlülüğünü etkilememiştir. Özgül kesme enerjisinin ise kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği arttıkça, azaldığı görülmüştür.

YSA ve YYM modellerinin korelasyon değerleri karşılaştırıldığında YSA modelinin değerleri yüzey pürüzlülüğü için YYM modelininkinden daha yüksek çıkmıştır. Özgül kesme enerjisi için korelasyon değerlerine baktığımızda ise YSA ve YYM modellerinin sonuçları birbirine yakın olmuştur. Aynı şekilde her iki modelin yüzde hatalarına bakıldığında yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi için YSA modelinin yüzde hatasının daha düşük olduğu hesaplanmıştır. Yüzde hata ve korelasyon karşılaştırmalarına bakıldığında YSA modelinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Deney verileri kullanılarak oluşturulan YSA modelinin yüzey pürüzlülüğü için hata oranı %6,1 ve özgül kesme enerjisi için ise %4,5 olarak tespit edilmiştir. Sonuçta, YYM modeline göre genel olarak YSA modeliyle daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu yüzden yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisi için oluşturulan YSA modeli, hem zamandan kazanmak hem de daha az kaynak kullanmak için çok fazla deney yapmadan istenilen yüzey pürüzlülüğüne sahip ürünleri üretebilmek amacıyla rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca üretim sırasında tüketilecek enerji miktarı da düşük hata oranlarında tahmin edilecektir.

Gelecek çalışmalar olarak, torna-freze gibi daha karmaşık talaşlı imalat işlemleri için de YSA modelleri oluşturulması planlanmaktadır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve özgül kesme enerjisinin yanı sıra takım ömrü ve boyutsal hassasiyet gibi çıktı parametrelerini de kapsayan YSA modeli oluşturulacaktır. Oluşturulan YSA modellerinin sonuçları yardımıyla işlemler için çeşitli evrimsel algoritmalar kullanılarak eniyileme çalışmalarına gidilmesi de planlanmaktadır.

TERMİNOLOJİ

R_a	Yüzey pürüzlülüğü	STEP AP 224	ISO 10303 bulunan uygulama protokolü
ÖKE	Özgül kesme enerjisi	R_z	5 tane en yüksek 5 tane en alçak noktanın ortalama yüzey pürüzlülüğü
a_p	Kesme derinliği	CBN	Kübik bor nitrit
V_c	Kesme hızı	YYM	Yanıt yüzey metodu
f	İlerleme	YSA	Yapay sinir ağı
TKD	Talaş kaldırma debisi		

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmada yazarlar, Sayın Kamil ARSLAN'a TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi İleri İmalat Laboratuvarı'nda Ti6Al4V malzemesinin işlenmesindeki yardımlarından dolayı ve Seco Türkiye'de satış mühendisi olarak görev alan Fatih SARI'nın bu çalışmaya vermiş olduğu teknik desteklerinden ötürü teşekkürü borç bilir.

KAYNAKLAR

1. Altıntaş, R.S., Kahya, M. ve Ünver, H.Ö. (2016) Modelling and optimization of energy consumption for feature based milling, *International journal of advance manufacturing technology*, 86, 3345-3363. doi: 10.1007/s00170-016-8441-7.
2. Asiltürk, İ. ve Akkuş, H. (2011) Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method, *Measurement*, 44, 1697–1704. doi:10.1016/j.measurement.2011.07.003.
3. Bilga, P.S., Singh, S., Kumar, R. (2016) Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method, *Journal of Cleaner Production*, 137, 1406-1417. doi: 10.1016/j.clepro.2016.07.220.
4. Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A. (2006) Electrical energy requirements for manufacturing processes, *The 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Leuven, Belgium.
5. Haykin, S. (2005) *Neural Networks a Comprehensive Foundation*, Pearson Education, Canada.
6. Kara, S., ve Li, W. (2011) Unit process energy consumption models for material removal processes, *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 60, 37–40. doi:10.1016/j.cirp.2011.03.018.
7. Karpat, Y. ve Özel T. (2006) Multi-objective optimization for turning processes using neural network modeling and dynamic-neighborhood particle swarm optimization, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 35, 234-247. doi: 10.1007/s00170/s00170-0006-0719-8.
8. Khorasani, A.M. ve Yazdi, M.R.S. (2015) Development of a dynamic surface roughness monitoring system based on artificial neural networks (ANN) in milling operation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. doi: 10.1007/s00170-015-7922-4.
9. Lawson, J. (2015) *Design and Analysis of Experiments with R*, CRC Press, New York.
10. Mativenga, P.T. ve Rajemi, M.F. (2011) Calculation of optimum cutting parameters based on minimum energy footprint, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 60, 149-152. doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.088.
11. Mehrotra, K., Mohan, C.K. ve Ranka, S. (2000) *Elements of Artificial Neural Networks*, The MIT Press, USA.
12. Mitutoyo User Manual, https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2015/08/Surftest_SJ210.pdf, Erişim Tarihi: 22.05.2019

13. Moradnazard, M. (2015) Energy consumption modeling of turn-mill systems and related machining processes, *Yayımlanmamış yüksek lisans tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
14. Moradnazard, M. ve Ünver, H.Ö. (2015) Energy efficiency of machining operations: A review. *Journal of Engineering Manufacture*, 1-19. doi: 10.1177/0954405415619345.
15. Myers, R.H. ve Montgomery, D.C. (2001) Response Surface Methodology, *John Wiley & Sons*, New Jersey.
16. Neşeli, S., Asiltürk, İ., Yıldız, S. ve Sağlam, H. (2012) Tornalama işleminde cevap yüzey metodu ile kesme kuvvetlerinin kesme parametrelerine bağlı olarak modellenmesi, *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara, Türkiye.
17. Newman, S.T., Nassehi, A., Imani-Asrafi, R. ve Dhokia, V. (2012) Energy efficient process planning for CNC machining, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5, 127-136. doi: 10.1016/j.cirpj.2012.03.007.
18. Öktem, H., Erzurumlu, T. ve Kurtaran, H. (2005) Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness, *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 11–16. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.096
19. Priddy, K.L. ve Keller, P.E. (2005) Artificial neural networks: an introduction, *SPIE Press*, Washington, USA. doi: 10.1016/B978-0-12-801559-9.00001-6.
20. Senthilkumaar, J. S., Selvarani, P. V. ve Arunachalam, R.M. (2012). Intelligent optimization and selection of machining parameters in finish turning and facing of Inconel 718, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. 58, 885-894. doi: 10.1007/s00170-011-3455-7
21. Siemers, C., Baker, M., Mukherji, D., Rösler, J. (2003) Microstructure evolution in shear bands during the chip formation of Ti6Al4V, Tenth World Conference on Titanium, 839-846.
22. Uluer, M.U., Ünver, H.O., Gök, G., Fescioğlu-Ünver, N. ve Kılıç, S.E. (2016) A framework for energy reduction in manufacturing process chains (E-MPC) and a case study from the Turkish household appliance industry, *Journal of Cleaner Production*, 112, 3342-3360. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.106.
23. Vining, G. ve Kowalski, S. M. (2011) Statistical Methods for Engineers, *Cengage Learning*, USA.
24. Walpole, R.E., Myers, R. H. ve Myers, S. L. (1998) Probability and statistics for engineers and scientists, *Printice Hall*, New Jersey.
25. Whitcomb, P.J. ve Anderson M.J. (2004) RSM Simplified, *Productivity Press*, New York.
26. Yegnanarayana, B. (2006) Artificial Neural Networks, *Prentice Hall of India, Private Limited*, New Delhi.