



Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.10.2024
Kabul Tarihi : 15.02.2025

Received Date : 17.10.2024
Accepted Date : 15.02.2025

KAPLAMALI VE KAPLAMASIZ KESİCİ TAKIMLARLA İŞLENEN INCONEL 718 İŞ PARÇASININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİNİN ANFİS İLE MODELLENMESİ

ANFIS MODELING OF SURFACE ROUGHNESS VALUES OF INCONEL 718 WORKPIECE MACHINED WITH COATED AND UNCOATED CUTTING TOOLS

Hüseyin GÜRBÜZ^{1*} (ORCID: 0000-0003-1391-172X)
Şehmus BADAY² (ORCID: 0000-0003-4208-8779)

¹ Batman Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Batman, Türkiye
² Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi MYO, Batman, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hüseyin GÜRBÜZ, huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, farklı işleme parametreleri kullanarak kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla Inconel 718 süper alaşımının frezelenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerini incelemek ve deneysel sonuçların tahmini için Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFİS) kullanarak bir model geliştirmektir. ANFİS modelinde, giriş parametreleri olarak kesici takım türü (kaplamalı ve kaplamasız), ilerleme hızı f (mm/diş) ve kesme hızı V (m/dak), çıkış parametresi olarak ise ortalama yüzey pürüzlülüğü R_a (μm) kullanılmıştır. Oluşturulan modelde, deneysel verilerin sırasıyla %70'i, %15'i ve %15'i eğitim, test verileri ve doğrulama verileri olarak girilmiştir. En uygun ANFİS modelinin belirlenmesinde giriş üyelik fonksiyonu ve bunların sayısı tek tek denenerek en düşük hata oranına sahip model seçilmiştir. En düşük hata oranına sahip model için çıkış üyelik fonksiyonu, üyelik fonksiyonu ve sayısı sırasıyla lineer, Gauss2mf ve 333 olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar ile ANFİS modelinin tahmin sonuçları karşılaştırıldığında, hata oranı değeri 0,069596 ve belirlilik katsayısı (R^2) değeri ise 0,9902 hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak ANFİS modelinin Inconel 718 frezeleme işleminde yüzey pürüzlülük sonuçlarını tahmin edilmesinde başarılı bir yöntem olabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Frezeleme, Inconel 718, kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar, yüzey pürüzlülüğü, ANFİS

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the surface roughness values resulting from milling of Inconel 718 super alloy with coated and uncoated cutting tools using different machining parameters and to develop a model using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) to predict the experimental results. In the ANFIS model, the cutting tool type (coated and uncoated), feed rate f (mm/tooth) and cutting speed V (m/min) were used as input parameters, and the average surface roughness R_a (μm) was used as output parameter. In the created model, 70%, 15% and 15% of the experimental data were entered as training, test data and validation data, respectively. In determining the most suitable ANFIS model, the input membership function and their number were tested one by one and the model with the lowest error rate was selected. For the model with the lowest error rate, the output membership function, membership function and number were determined as linear, Gauss2mf and 333, respectively. When the experimental results were compared with the prediction results of the ANFIS model, the error rate value was calculated as 0.069596 and the coefficient of determination (R^2) value was calculated as 0.9902. Depending on the obtained results, it was shown that the ANFIS model can be a successful method in predicting the surface roughness results in the milling

process of Inconel 718.

ToCite: GÜRBÜZ, H., & BADAY, Ş., (2025). KAPLAMALI VE KAPLAMASIZ KESİCİ TAKIMLARLA İŞLENEN INCONEL 718 İŞ PARÇASININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK DEĞERLERİNİN ANFİS İLE MODELLENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 369-379.

Keywords: Milling, Inconel 718, coated and uncoated cutting tools, surface roughness, ANFIS

GİRİŞ

Metallerin şekillendirilmesinde kesici takımlar büyük bir önem arz etmektedir. Talaş kaldırma işlemlerinde kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar kullanılmaktadır. Kesici takımlarda kaplama; kesici takım ömrü, işleme verimliliği ve kesici takım aşınması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir iş parçasının şekillendirilmesinde, aşınmış bir kesici takım işlenmiş yüzeyin kalitesini ve boyutsal tamlığını olumsuz etkilemektedir. Yüzey kalitesini belirleyen en önemli göstergelerden biri de yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesici takım yanında uygun seçilmemiş kesme parametreleri de olumsuz etkiye neden olmaktadır. Özellikle savunma sanayisi, uzay, havacılık vb. alanlarda sıklıkla kullanılan işlenmesi zor olan Inconel 718 malzemesinde düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek oldukça önemlidir (Yılmaz vd., 2018; Rakesh & Datta, 2019; Halim vd., 2019; Çelik vd., 2017; Kasim vd., 2019; Ma vd., 2014; Kannan & Kui, 2019; Luo vd., 2018; Nath vd., 2015). Son yıllarda özellikle deneysel sonuçlar üzerinde işleme parametrelerinin optimum şartlarını ortaya koymak ve deneysel sonuçları tahmin etmek için matematiksel modeller ve istatistiksel çalışmalar yapılmaktadır. Deneysel sonuçları tahmin etmede kullanılan matematiksel metotlardan bir tanesi de Adaptif Sinir Ağına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) yöntemidir (Dedeakayoğulları vd., 2022; Dere & Filiz, 2019; Fedai vd., 2019). ANFIS, bulanık mantık ile yapay sinir ağının birlikte çalıştığı bir metottur. ANFIS girdilerin çıktılar üzerindeki etkisini belirleyen ve her bir girdi değerinin ağı nasıl etkilediğini analiz eden ağı tabanlı bir sistemdir (Dedeakayoğulları vd., 2022; Dere & Filiz, 2019; Fedai vd., 2019). Literatürde ANFIS ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetle verilmiştir.

Asal vd., yüzey frezeleme işlemlerinde minimum miktarda yağlama ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerindeki etkisini modellemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün tahminine yönelik ANFIS yaklaşımı kullanılarak matematiksel modeller oluşturmuşlardır. Yazarlar, regresyon analizi ve ANFIS ile elde edilen sonuçları karşılaştırmış, regresyon modeli %71 oranında bir doğruluk sağlar iken ANFIS modelinin %100 doğruluk sağladığını bulmuşlardır (Asal vd., 2021). Maher vd., kesme parametrelerine bağlı olarak frezeleme sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerini ANFIS yardımı ile tahmin etmişlerdir. ANFIS modelinde kesme parametrelerini giriş parametreleri olarak belirlerken çıkış parametresi olarak yüzey pürüzlülük değerlerini seçmişlerdir. ANFIS ile tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerleri ile deneylerden elde edilen değerleri karşılaştırmışlar ve en yüksek ortalama hata oranını %6,25 ortalama tahmin hatası oranını % 2,75 olarak bulmuşlardır (Maher vd., 2014). Sen vd., kaplamalı kesici takımlar ile Inconel iş parçasının frezelenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmek için ANFIS ve ANN (Yapay Sinir Ağı) modellerini kullanmışlardır. ANFIS ile tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin çok düşük hata oranlarında olduğunu ve ANN ile tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden daha iyi sonuçlar elde ettiklerini vurgulamışlardır (Sen vd., 2017). Abdulshahed ve Badi, frezeleme işleminde farklı kesme parametrelerine bağlı olarak işlenmiş yüzeylerde oluşan yüzey pürüzlülük değerlerini ANFIS yardımıyla modellemişlerdir. Modellemede giriş parametreleri olarak kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı kullanırken çıkış parametresi olarak ise yüzey pürüzlülük değerlerini kullanmışlardır. ANFIS ile tahmin edilen değerlerin %3,47 - 3,49 aralığında ortalama hata değerleriyle deney sonuçları ile mükemmel bir uyum içinde olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, yazarlar çalışmada, önerilen ANFIS modelini diğer Yapay Zeka yaklaşımlarıyla karşılaştırmışlardır. Önerilen ANFIS modelin literatürdeki diğer Yapay Zeka yaklaşımlarına kıyasla yüksek doğruluğa sahip olduğunu belirtmişlerdir (Abdulshahed ve Badi, 2018). Hegab vd., Inconel 718'in işlenmesinde nano katkı maddeli minimum miktarda yağlamanın işleme sonuçları üzerindeki etkisini görmek için analiz, modellenme ve optimizasyon yapmışlardır. Deney sonuçlarını modellemek için yapay sinir ağı, ANFIS ve genetik programlama kullanmışlardır. Ayrıca, deney sonuçlarının tahmini için en doğru yaklaşımı seçmek amacıyla geliştirilen modeller arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Genetik algoritma modelinin yapay sinir ağları ve ANFIS'ten daha iyi sonuçlar verdiğini bulmuşlardır (Hegab vd., 2021). Zafar vd., farklı işleme şartlarında frezeleme işlemlerinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin tahmini için ANFIS ve Yüzey Yanıt Modeli ile modelleme oluşturmuşlardır. Her iki modeli karşılaştırdıklarında ANFIS ile modellemenin daha iyi sonuçlar verdiğini ve yüzey pürüzlülük değerlerinin tahminde daha sık kullanılabileceğini ifade etmişlerdir (Zafar vd., 2014). Pande ve Patil, karbür kesici takımlarla farklı kesme parametrelerinde Inconel 718'in işlenmesinde yüzey pürüzlülük sonuçlarını tahmin etmek için regresyon ve ANFIS modeli kullanmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerine en etkili parametrelerin fener mili hızı ile ilerleme hızının olduğunu bulmuşlardır. Regresyon modeli ile ANFIS modelinin yüzey pürüzlülük sonuçlarını çok yüksek

oranda tahmin ettiğini ifade etmişlerdir (Pandea ve Patil, 2014). Jithendra vd., yaptıkları çalışmada giriş parametreleri (fener mil hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği) ile çıkış parametreleri (yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı) arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde ortaya koymak için bir optimizasyon algoritması olan ANFIS-Coati Optimizasyon Algoritması (COA) modelini geliştirmişler. Elde ettikleri sonuçlara bağlı olarak COA optimizasyonunun ANFIS performansını iyileştirmek için en uygun parametreleri tahmin etmede iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır (Jithendra vd., 2024). Stephen ve Sethuramalingam deneysel sonuçlardan elde etmiş oldukları yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve kesme kuvvetleri sonuçlarını modellemek için ANFIS kullanmışlardır. Deneysel sonuçları tahmin etmede (talaş kaldırma oranı - %0,15, yüzey pürüzlülüğü - %2,13 ve kesme kuvvetleri - %4,24) ANFIS modelinin iyi olduğunu ve tahminlerin kabul edilebilir olduğunu göstermişlerdir (Stephen ve Sethuramalingam, 2024). Raju ve vd., farklı işleme şartlarında yüzey frezeleme işleminden elde ettikleri yüzey pürüzlülüğü değerlerini tahmin etmek için ANFIS modelleme kullanmışlardır. Yüzey pürüzlülük değerlerini tahmin etmede ANFIS modelinin %98 tahmin doğruluğuna sahip olduğunu ortaya koymuşlardır (Raju ve vd., 2024).

Yapılan bu test ve modelleme çalışmasında, farklı kesme parametreleri kullanılarak kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar ile Inconel 718 süper alaşımının frezelenmesi sonucu oluşmuş yüzey pürüzlülük sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla, elde edilen deneysel sonuçlar ANFIS ile modellenerek yüzey pürüzlülük sonuçlarının tahmini gerçekleştirilmiştir. Modelin geçerliliği için doğrulama deneyleri yapılmış ve hata oranları tespit edilmiştir.

MATERYAL METOT

Kesici Takımlar ve CNC Tezgâhi

İşleme deneylerinde kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere iki farklı kesici takım kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar SANDVIK kesici takım firmasından temin edilmiştir. Temin edilen kesici takımlar “2P341-1000 MA” kodlu yekpare karbür parmak frezelerdir. Frezeleme deneylerinde kullanılan kaplamalı kesici takımların kaplama yöntemi PVD (Fiziksel buhar biriktirme) kaplama türü ise TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrür) dür. Kesici takımlara ait özellikler ise kesme çapı 10 mm, aksenal talaş açısı 13,5°, radyal talaş açısı 15°, kesici kenar sayısı 4 ve helis açısı 41° şeklindedir. Inconel 718 iş parçasının frezeleme deneyleri kuru işleme şartlarında “Hummer VMC-1000” markalı dik işleme merkezi CNC tezgahta gerçekleştirilmiştir. Deneylerin tümünde aynı şartları oluşturmak için, her bir deneyde hiç kullanılmamış yeni bir kesici takım kullanılmıştır.

İş Parçası Malzemesi

Bu deneysel çalışmada iş parçası malzemesi olarak yüksek mekanik dayanımlı nikel bazlı bir süper alaşım olan Inconel 718 seçilmiştir. Bu süper alaşıma ait üstün özellikler, bu malzemenin havacılık, uzay araştırmaları ve nikel hidrojen pilleri gibi birçok alanda kullanılmasını sağlamaktadır. Harald Phil firmasından satın alınan Inconel 718 iş parçası 100 × 100 × 12,7 mm boyutlarındadır. Inconel 718'e ait kimyasal bileşim Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Inconel 718 İş Parçasının Kimyasal Bileşimi

C	Si	Ni	S	Fe	Mn	Cu	Cr	Al
0,03	0,065	53,45	0,001	17,64	0,09	0,22	18,55	0,56
Mo	TA	Co	Nb	Ti	B	P	Pb	Se
2,92	0,004	0,23	5,17	0,98	0,002	0,008	0,00002	<,000001

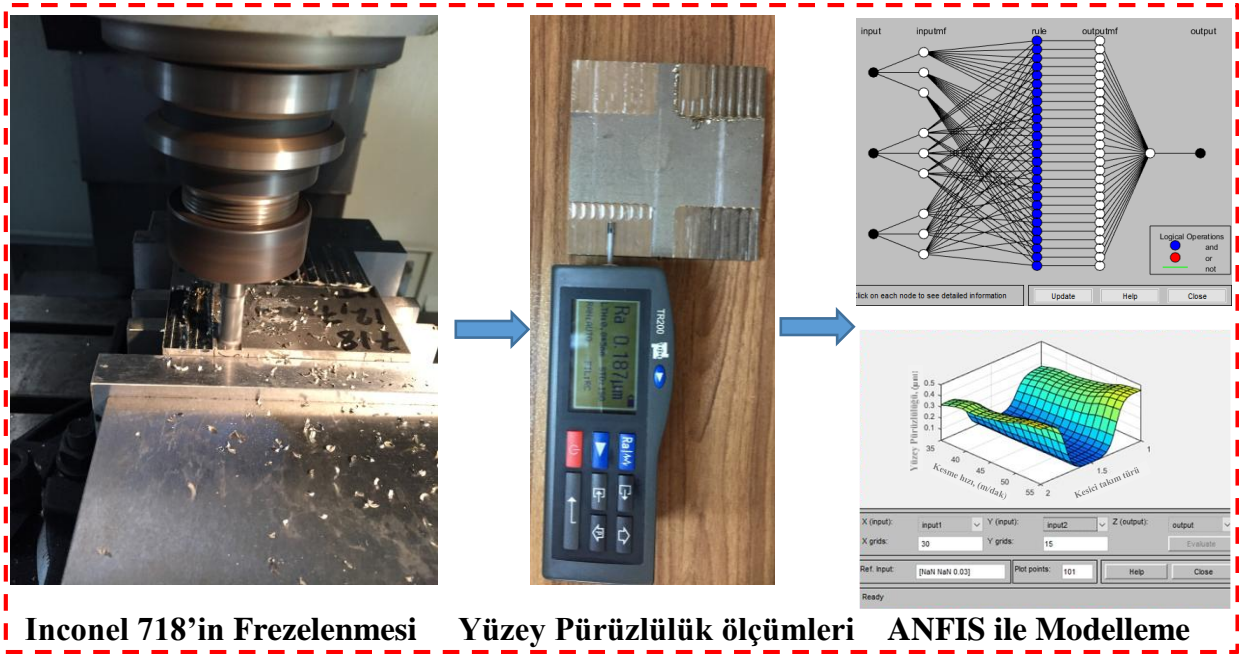
Kesme Parametreleri

İşleme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri, Inconel 718 iş parçasının frezelenmesi için üretici kesici takım firmasının tavsiye etmiş olduğu değerler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Frezeleme deneylerinde kesme parametreleri olarak sabit kesme derinliğinde (a=0,2 mm) üç farklı kesme hızı (V= 35 - 45 - 55 m/dak) ve üç farklı ilerleme miktarı (f= 0,02 - 0,03 - 0,04 mm/diş) kullanılmıştır.

Yüzey Pürüzlülüğü

Frezeleme sonucu işlenmiş yüzeylerde oluşan ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri “TR 200” yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri, her bir deney için işlenmiş yüzeyden 4 (8x0,5) mm ölçme boyunda beş ayrı yerden mikron (µm) cinsinden ölçülerek alınmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük

değerleri ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak ISO 4287 standardına göre hesaplanmıştır. Test ve modelleme çalışmalarının şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir.



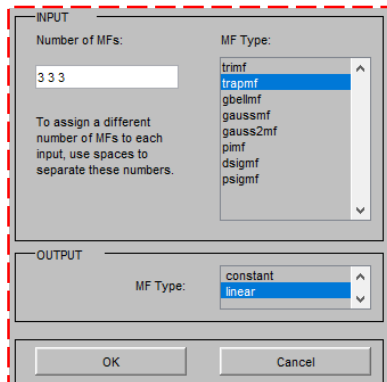
Inconel 718’in Frezelenmesi Yüzey Pürüzlülük ölçümleri ANFIS ile Modelleme

Şekil 1. Test ve Modelleme Çalışmalarının Şematik Gösterimi

BULGULAR

ANFIS Modelinin Oluşturulması ve Sonuçların Değerlendirilmesi

ANFIS, genelde melez öğrenme algoritmasını kullanarak modeller oluşturmaktadır. ANFIS, hem bulanık mantık çıkarım yöntemlerini hem de sinir ağlarını entegre ettiği için bu yapıların her ikisinden de faydalanmaktadır (Asal vd., 2021). Yüzey pürüzlülük değerlerinin tahmini için ANFIS modeli Matlab programlama dilinde yer alan araç kutusundan faydalanılmıştır. ANFIS araç kutusu, bir geri yayılım algoritması (a back propagations algorithm) ve/veya en küçük kareler (least squares) yöntemiyle beraber kullanılarak bulanık sistemleri oluşturur (Çakir vd., 2013). Oluşturulan ANFIS modelinde, deneysel verilerin, %70’i eğitim ve %15’i test verileri ve geriye kalan %15’i doğrulama verileri olarak seçilmiş ve Matlab programına yüklenmiştir. ANFIS’te girdi parametreleri olarak; kesici takım türü (kaplamalı ve kaplamasız), kesme hızı V (m/dak) ve ilerleme f (mm/diş) alınmıştır. Çıktı parametresi olarak ise ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra (μm) belirlenmiştir. ANFIS girdi parametrelerinde kesici takım türü sayısal değer olarak girilebilmesi için kaplamalı kesici takım “1” ve kaplamasız kesici takım ise “2” şeklinde tanımlanmıştır. Kesme parametrelerine ve kesici takım türüne bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 2’de verilmiştir. ANFIS modelinde kullanılan üyelik fonksiyonları ve bunlara ait özellikler Şekil 2’de gösterilmiştir.

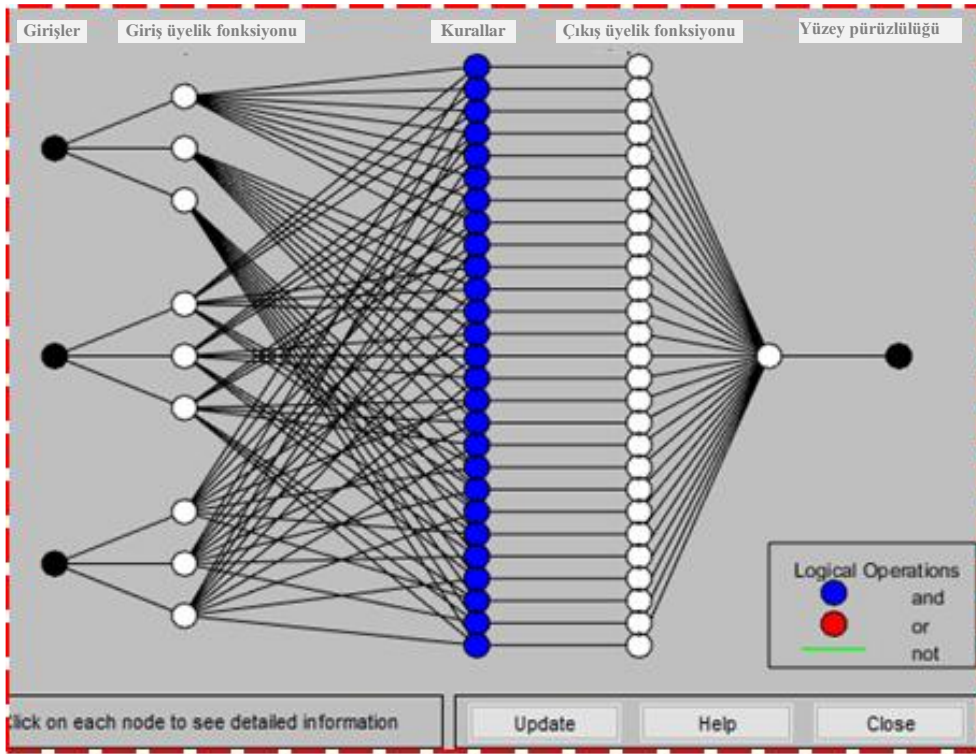


Şekil 2. ANFIS Üyelik Fonksiyonları ve Özellikleri

Tablo 2. Deney şartlarına bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

Kesici takım türü, (Kaplama ve kaplamasız)	Kesme hızı, (m/dak)	İlerleme, (mm/diş)	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri, (μm)
Kaplama (1)	35	0,02	0,241
Kaplama	35	0,03	0,2736
Kaplama	35	0,04	0,3358
Kaplama	40	0,02	0,24876
Kaplama	40	0,03	0,31673
Kaplama	40	0,04	0,3847
Kaplama	45	0,02	0,265
Kaplama	45	0,03	0,3438
Kaplama	45	0,04	0,4162
Kaplama	50	0,02	0,33964
Kaplama	50	0,03	0,40761
Kaplama	50	0,04	0,47558
Kaplama	55	0,02	0,3836
Kaplama	55	0,03	0,4554
Kaplama	55	0,04	0,5456
Kaplamasız (2)	35	0,02	0,288
Kaplamasız	35	0,03	0,3184
Kaplamasız	35	0,04	0,3814
Kaplamasız	40	0,02	0,29996
Kaplamasız	40	0,03	0,36793
Kaplamasız	40	0,04	0,4359
Kaplamasız	45	0,02	0,334
Kaplamasız	45	0,03	0,392
Kaplamasız	45	0,04	0,4622
Kaplamasız	50	0,02	0,39084
Kaplamasız	50	0,03	0,45881
Kaplamasız	50	0,04	0,52678
Kaplamasız	55	0,02	0,4288
Kaplamasız	55	0,03	0,5006
Kaplamasız	55	0,04	0,6148

Şekil 2’de giriş parametreleri olarak verilen üyelik fonksiyonları türü, sayısı ve çıkış parametreleri üyelik fonksiyonu türleri ve bunların kombinasyonları alınarak ANFIS modelleri oluşturulmuştur. Bu modeller tek tek denenerek en düşük hata oranı aranmıştır. ANFIS ağ yapısının şematik gösterimi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. ANFIS Ağ Yapısı

Şekil 3'teki giriş parametreleri (Input) kesici takım türü, ilerleme ve kesme hızı olarak seçilmiştir. Çıkış parametresi (Output) olarak ise ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri seçilmiştir. ANFIS giriş ve çıkış kuralları Şekil 4'te verilmiştir. ANFIS ve ANN yapıları birbirine benzemektedir, fakat ANFIS'te bulanıklaştırmak için Şekil 4'te verilen kurallar ve bu kurallarda kullanılan üyelik fonksiyonları yer almaktadır. Bu çalışmada Matlab programında yer alan üyelik fonksiyonlarının tümü tek tek denenerek en uygun ANFIS modeli araştırılmıştır.



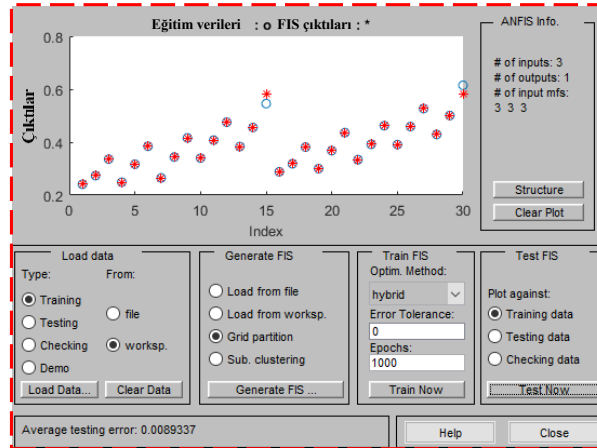
Şekil 4. ANFIS Giriş ve Çıkış Kuralları

Optimum yüzey pürüzlülüğü değerlerini belirlemek için ANFIS ile oluşturulan modellerde, en uygun üyelik fonksiyonu tek tek seçilmiş ve her bir üyelik fonksiyonu için hesaplanan eğitim ve test verilerinin hata oranı sonuçları incelenmiştir. Programın sunmuş olduğu tüm üyelik fonksiyonları (member function) denenmiş olup en düşük hataya sahip ANFIS modeli belirlenmiştir. Çıkış parametresi için doğrusal (lineer), tüm üyelik fonksiyon tiplerinde denemeler yapılmıştır. Üyelik fonksiyon sayıları 3-3-3'ten 5-5-5'e kadar değiştirilerek denedikten sonra kabul edilebilir hata değeri ve en iyi tahmin sonuçlarına ulaşıldığında seçilmiştir. Bu doğrultuda elde edilen ANFIS mimarileri ve parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Farklı ANFIS Modellerinin Yapısındaki Üyelik Fonksiyon Tipleri ve Sayıları için Elde Edilen Eğitim Hataları

Giriş Üyelik Fonksiyonları	Üyelik Fonksiyon Sayısı	Test Sonucu Hata Oranları
Gauss2mf	333	0,089337
Trimf	333	0,10051
Trapmf	333	0,079613
Gbellmf	333	0,099666
Gaussmf	333	0,08182
“Gauss2mf”	“333”	“0,069596”
Pimf	333	0,079665
Dsigmf	333	0,080013
Psigmf	333	0,089062
Gauss2mf	444	0,096422
Gauss2mf	555	0,10683

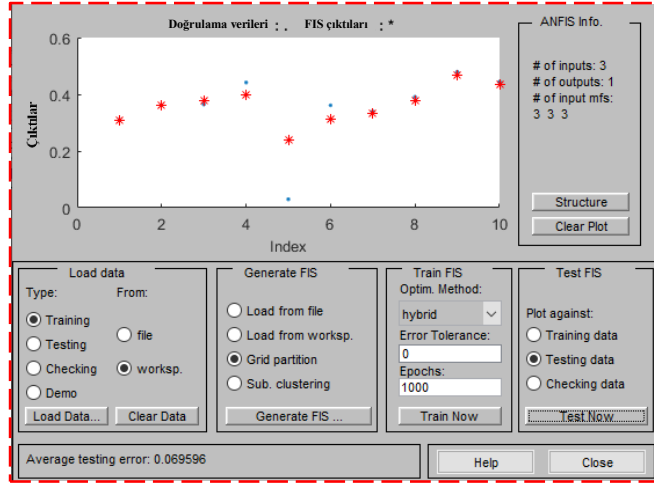
Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin eğitilmesi ile ilgili parametreler ve bunların çıktısı Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te verilen grafik incelendiğinde mavi daireler yüzey pürüzlülüğü, kırmızı yıldızlar ise eğitilen deney değerlerini ifade etmektedir. İki değer dışında geriye kalan deney değerlerinin birbiri ile örtüştüğü ve oluşturulan modelin değerleri düşük hata oranlarında tahmin ettiği anlaşılmaktadır.



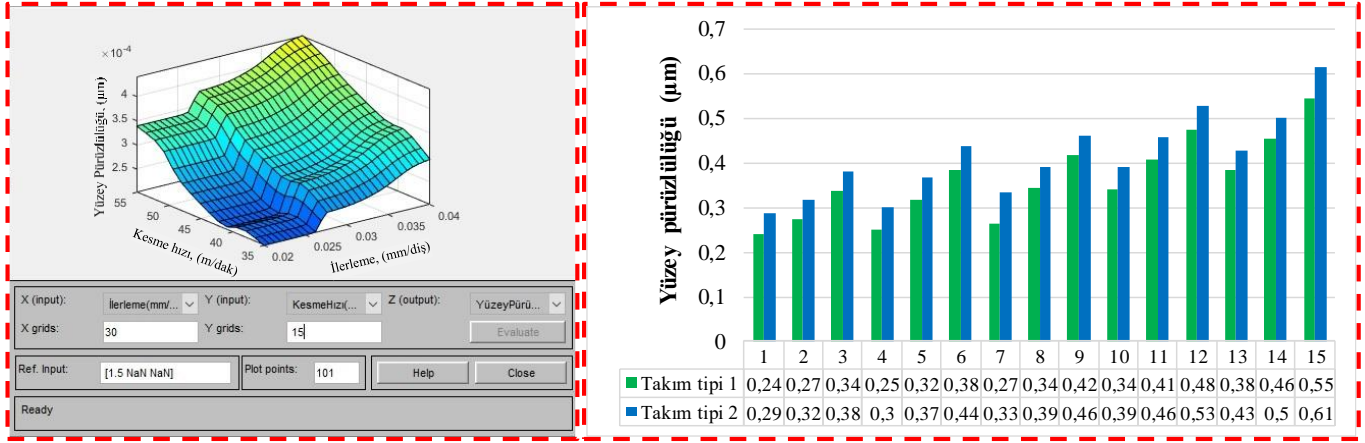
Şekil 5. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Eğitilmesi

Eğitimin geçerliliğini test etmek için test edilen deney sonuçları Şekil 6'da verilmiştir ve bunlara ait sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 6'daki grafik incelendiğinde test için ayrılan yüzey pürüzlülüğü değerlerinin büyük bir çoğunluğunun birbiri ile örtüştüğü görülmektedir. Bu durum oluşturulan ANFIS modelinin geçerliliğini ve hata oranlarının düşük olduğunu göstermektedir. Farklı giriş üyelik fonksiyonları ve sayılarına ve sabit alınan lineer çıkış fonksiyonuna göre oluşturulan ANFIS modelleri ve bunların hata oranları değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 incelendiğinde en düşük hata oranı “0,069596”, giriş üyelik fonksiyonu “Gauss2mf” ve sayısının “333” olarak elde edildiği tespit edilmiştir. En düşük hata oranları seçilerek elde edilen giriş ve çıkış parametrelerine bağlı olarak oluşan grafikler Şekil 7'de verilmiştir. Burada: output, yüzey pürüzlülüğünü; input1, kesici takım türünü; input2, kesme hızını; input3, ilerlemeyi ifade etmektedir.



Şekil 6. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Test Edilmesi



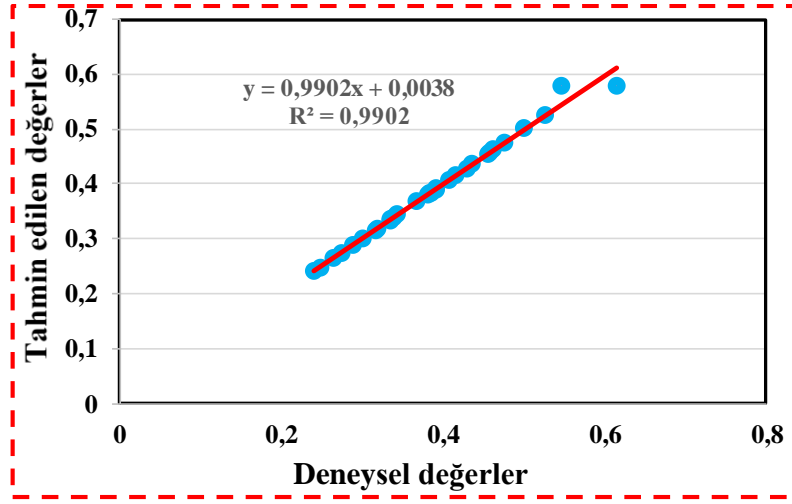
a)

b)

Şekil 7. Yüzey Pürüzlülüğü İçin a) Kesme Hızı ve İlerleme b) Kesici Takım 1 ve Kesici Takım 2 Grafikleri

Şekil 7'deki grafiğe bakılırsa ilerleme ve kesme hızının artması iş parçası yüzey pürüzlülük değerlerini olumsuz etkilemektedir. Genel olarak kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düştüğü literatürde ifade edilmektedir. Fakat işlenmesi güç olan Inconel 718 gibi iş parçalarında kesme hızının artması ile iş parçası ve takım arasındaki sıcaklık artışı ve Inconel 718'in yüksek afinitesinden dolayı talaş, kesici takıma yapışmakta ve bu da kesici takımın daha hızlı aşınmasına ve işlenmiş yüzeylerin daha kötü olmasına sebebiyet vermektedir (Gürbüz ve Baday, 2021). Kesici takım türüne göre, kaplamalı kesici takımlarla işlenmiş yüzeylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri, kaplamasız kesici takımlarla olanlara göre daha düşük çıkmıştır. Elde edilen ANFIS modelinin hassasiyeti ve doğruluğu belirlilik katsayısı ile (R^2) değerlendirilmiştir. ANFIS modeli tarafından elde edilen değerler ile deney sonuçlarının karşılaştırılması grafiksel olarak Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8'deki grafik incelendiğinde, doğrusal kırmızı çizgi etrafında, ANFIS ile tahmin edilen değerlerin yoğunlaştığı görülmektedir. Belirlilik katsayısı R^2 değeri 0,9902 olarak hesaplanmıştır. Belirlilik katsayısının 1'e yakın olması modelin geçerliliğinin yüksek olmasını ifade etmektedir. Bu durum deneysel sonuçların tahmin edilmesinde oluşturulan modelin geçerliliğini göstermektedir.



Şekil 8. Deneyisel ve ANFIS ile Tahmin Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, işlenmesi güç olan Inconel 718 iş parçasının kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla frezelenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerleri ANFIS modeli kullanılarak incelenmiştir. En uygun ANFIS modelini belirlemek için üyelik fonksiyonları tipleri ve sayıları denenerek en düşük hata oranı seçilmiştir. Elde edilen test ve modelleme sonuçları aşağıda özetle verilmiştir.

- İlerleme ve kesme hızı değerinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde kaplamalı kesici takımların kaplamasız kesici takımlara göre daha etkili olduğu bulunmuştur.
- En düşük hata oranını veren ANFIS modeli için çıkış üyelik fonksiyonu, üyelik fonksiyonu ve sayısı sırasıyla lineer, Gauss2mf ve 333 olarak tespit edilmiştir.
- ANFIS modelinin tahmin sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, belirlilik katsayısı (R^2) değeri 0,9902 ve hata oranı değeri ise 0,069596 hesaplanmıştır.
- Oluşturulan ANFIS modelinin, deneysel sonuçları yüksek doğrulukta tahmin edebilme kapasitesine sahip olduğu ve imalat endüstrisinde işlenmesi güç olan parçalarda düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde etmede işleme parametrelerinin uygun ve doğru seçiminde yardımcı olabileceği görülmüştür. Bu durum, çalışmada kullanılan $a=0,2$ mm sabit kesme derinliği, $V=35 - 55$ m/dak kesme hızı ve $f=0,02 - 0,04$ mm/diş ilerleme miktarı için doğrulanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından “18.004” numaralı projeye sunulmuş olan finansal destek için BTÜBAP'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Abdulshahed, A., & Badi, I. (2018). Prediction and control of the surface roughness for the end milling process using ANFIS. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 1(1), 1-12. <https://doi.org/10.31181/oresta1901201011a>

Asal, Ö., Dilipak, H., Yalçınkaya, A., & Ünal, Ş. (2021). Minimum Miktarda Yağlama Tekniği ile Frezeleme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğünün Anfis ile Modellenmesi. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 5(2), 162-170. <https://doi.org/10.46460/ijiea.952306>

Cakir, M. V., Eyercioglu, O., Gov, K., Sahin, M., & Cakir, S. H. (2013). Comparison of soft computing techniques for modelling of the EDM performance parameters. *Advances in Mechanical Engineering*, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2013/392531>

- Çelik, A., Alağaç, M. S., Turan, S., Kara, A., & Kara, F. (2017). Wear behavior of solid SiAlON milling tools during high speed milling of Inconel 718. *Wear*, 378, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.025>
- Dedeakayoğulları, H., Kaçal, A., & Keser, K. (2022). Modeling and prediction of surface roughness at the drilling of SLM-Ti6Al4V parts manufactured with pre-hole with optimized ANN and ANFIS. *Measurement*, 203, 112029. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112029>
- Dere, M., & Filiz, I. H. (2019). Experimental investigation of the effects of workpiece diameter and overhang length on the surface roughness in turning of free machining steel and modelling of surface roughness by using ANFIS. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2), 676-686. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416524>
- Fedai, Y., Ünüvar, A., Akın, H. K., & Başar, G. (2019). 316L Paslanmaz çeliklerin frezeleme işlemindeki yüzey pürüzlülüğünün ANFIS ile modellenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 98-110. <https://doi.org/10.29130/dubited.466629>
- Gürbüz, H., & Baday, Ş. (2021). Milling Inconel 718 workpiece with cryogenically treated and untreated cutting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 3135-3148. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07688-x>
- Halim, N. H. A., Haron, C. H. C., Ghani, J. A., & Azhar, M. F. (2019). Tool wear and chip morphology in high-speed milling of hardened Inconel 718 under dry and cryogenic CO₂ conditions. *Wear*, 426, 1683-1690. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.095>
- Hegab, H., Salem, A., Rahnamayan, S., & Kishawy, H. A. (2021). Analysis, modeling, and multi-objective optimization of machining Inconel 718 with nano-additives based minimum quantity coolant. *Applied Soft Computing*, 108, 107416. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107416>
- Jithendra, T., Basha, S. S., Divya, A., & Rajyalakshmi, G. (2024). Machine learning technique ANFIS-COA for enhancing micro-milling performance by investigating the surface roughness and material removal rate. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02061-0>
- Kannan, S., & Kui, L. (2019). Experimental investigation of surface integrity during abrasive edge profiling of nickel-based alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.052>
- Kasim, M. S., Hafiz, M. S. A., Ghani, J. A., Haron, C. H. C., Izamshah, R., Sundi, S. A., & Othman, I. S. (2019). Investigation of surface topology in ball nose end milling process of Inconel 718. *Wear*, 426, 1318-1326. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.076>
- Luo, M., Luo, H., Zhang, D., & Tang, K. (2018). Improving tool life in multi-axis milling of Ni-based superalloy with ball-end cutter based on the active cutting edge shift strategy. *Journal of Materials Processing Technology*, 252, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.010>
- Ma, J. W., Wang, F. J., Jia, Z. Y., Xu, Q., & Yang, Y. Y. (2014). Study of machining parameter optimization in high speed milling of Inconel 718 curved surface based on cutting force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1-4), 269-277. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6115-x>
- Maher, I., Eltaib, M. E. H., Sarhan, A. A., & El-Zahry, R. M. (2014). Investigation of the effect of machining parameters on the surface quality of machined brass (60/40) in CNC end milling - ANFIS modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 531-537. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6016-z>
- Nath, C., Brooks, Z., & Kurfess, T. R. (2015). Machinability study and process optimization in face milling of some super alloys with indexable copy face mill inserts. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.09.006>
- Pandea, P. P., & Patilb, N. G. (2014). Investigations into Machining of Inconel 718 By Using Adaptive Fuzzy Based Inference System. *International Journal of Engineering Research*, 3(5).

- Raju, R. U., Kottala, R. K., Varma, B. M., Barmavatu, P., & Aepuru, R. (2024). Precision enhancement in CNC face milling through vibration-aided AI prediction of surface roughness. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01948-2>
- Rakesh, M., & Datta, S. (2019). Effects of Cutting Speed on Chip Characteristics and Tool Wear Mechanisms During Dry Machining of Inconel 718 Using Uncoated WC Tool. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03785-y>
- Sen, B., Mandal, U. K., & Mondal, S. P. (2017). Advancement of an intelligent system based on ANFIS for predicting machining performance parameters of Inconel 690—A perspective of metaheuristic approach. *Measurement*, 109, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.050>
- Stephen, D. S., & Sethuramalingam, P. (2024). ANFIS prediction modeling of surface roughness and cutting force of titanium alloy ground with carbon nanotube grinding wheel. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00411-9>
- Yılmaz, B., Karabulut, Ş., & Güllü, A. (2018). Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 553-563. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.03.025>
- Zafar, R. R., Karim, M., & Rahman, K. B. (2014). Neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for ball end milling operation. *International Research Journal of Mechanical Engineering*, 2(6),174-190.