



Makale / Research Paper

AISI 4140 Çeliğinin Frezelemesinin Taguchi-DEAR Yöntemiyle
Optimizasyonu

Yusuf FEDAI^{1a}

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 80000
Osmaniye/TÜRKİYE yusuffedai@osmaniye.edu.tr

Received/Geliş: 17.11.2021

Accepted/Kabul: 01.02.2022

Öz: İmalatta, maliyetlerin düşürülmesi ve kalitenin iyileştirilmesi için uygun proses parametrelerinin seçimi için oldukça önemli bir konudur. Farklı çelişkili faktörlerin bir arada bulunduğu parametrelerin seçiminde Çok Kriterli Karar Verme (MCDM) yöntemleri başarıyla uygulanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, AISI 4140 çeliğinin Frezelenmesi esnasında çıktı parametreleri olan, üç farklı yüzey pürüzlülük (Ra,Rz ve Rq) ve işleme zamanını en düşük düzeyde tutmak, talaş kaldırma oranını ise en yüksek değere çıkarma için kontrol faktörlerinin etkisini incelemek ve bu faktörlerin doğru ayarlarını seçmektir. Çalışma için seçilen kontrol faktörleri kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğidir. Deneyler, Taguchi'nin L9 tasarımına göre planlanmıştır. Çoklu kalite karakteristik optimizasyonu için Taguchi-Veri Zarflama Analizi Tabanlı Sıralama tekniği (Taguchi-DEAR) çok yanıtli optimizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Deneysel araştırmalardan, kesme derinliğinin talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisinden dolayı performans ölçümlerinin belirlenmesinden en yüksek etkiye sahip olduğu görülmüştür. Optimum proses parametreleri kombinasyonu A3B3C3 şeklinde kesme hızı 325 m/dak, ilerleme 0,16 mm/dev ve kesme derinliği 1,5 mm değerlerinde bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Taguchi-DEAR optimizasyonu uygulanmasıyla elde edilen sonuçların Doğrulama deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre optimum yanıt değerleri Ra:0,51 µm, Rz 2,3, Rq: 0,90 µm ve Tm: 4,11 dakika olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140, Taguchi Tekniği, Çok kriterli Karar Verme, Optimizasyon, DEAR tekniği

Optimization of Milling AISI 4140 Steel By Taguchi - DEAR Methods

Abstract: In manufacturing, it is a very important issue for the selection of appropriate process parameters to reduce costs and improve quality. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods have been successfully applied in the selection of parameters where different conflicting factors coexist. The aim of this study is to examine the effect of control factors on three different surface roughness (Ra, Rz and Rq) output parameters, minimizing the machining time, and maximizing the metal removal rate during milling of AISI 4140 steel. The control factors selected for the work are cutting speed, feed and depth of cut. Experiments were planned according to Taguchi's L9 design. Taguchi-Data Envelopment Analysis Based Ranking Method (Taguchi-DEAR) multi-response optimization approach was used for the optimization of multiple quality characteristics. From experimental research, it has been found that depth of cut has the highest impact on the determination of performance metrics due to its effect on metal removal rate. The optimum combination of process parameters was found to be A3B3C3, cutting speed 325 m/min, feed 0.16 mm/rev and cutting depth 1.5 mm. Confirmation experiments of the results obtained by the Taguchi-DEAR optimization application were carried out. According to the results obtained, the optimum response values were found as Ra: 0.51 µm, Rz 2.3, Rq: 0.90 µm and Tm: 4.11 minutes.

Keyword: AISI4140, Taguchi, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Optimisation, Taguchi-Dear

1. Giriş

Günümüzde imalat sanayisi, gelişen teknolojiye paralel olarak ürünlerin artan yüksek kalite ihtiyacını karşılamak için sürekli bir iyileştirme ve geliştirme çalışmalarına devam etmektedir. Aynı zamanda rakebetin temel kuralı olan düşük maliyet yüksek kalite ve verim dengesinin çok iyi korunması gerekmektedir. İmalat sanayinde bir ürünü elde etmek için tornalama Frezeleme ve delme kullanılan en önemli talaşlı imalat yöntemlerinin başında birçok imal usulleri tercih edilmekte ve genellikle bütün imal usullerinden sonra nihai işlem olarak talaşlı imalat yöntemleri (tornalama, frezeleme ve delme) yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kesilen malzemenin özellikleri, tipik olarak "işlenebilirlik" olarak adlandırılan işleme sürecinin performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Bununla birlikte, yüzey özelliği, takım tezgahlarının ve işlenmiş parçaların verimliliğini değerlendirmek için temel bir kriterdir. Bu nedenle, gerekli yüzey kalitesini elde etmek için işlenmiş bileşenlerin mekanik performansının incelenmesi son derece gereklidir [1,2]. Frezeleme, mekanik işlemede kullanılan en yaygın işleme yöntemlerinden biridir. CNC teknolojisinin yüksek hassasiyet ve yüksek işlenebilirliğe sahip kesici takımlarla uygulanması, yüksek hassasiyet gerektiren yüzeyleri işlemek için giderek daha popüler bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle frezeleme yöntemiyle işleme verimliliği de her geçen gün artmaktadır [15].

Talaşlı imalat yöntemlerinde, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı ürün kalite özelliklerini göstermektedir. Bu kalite özellikleri ürünün performans, verimlilik ve üretim maliyetleri ile doğrudan ilişkilidir. Optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi, TKO ve yüzey kalitesini artırarak işleme maliyetini azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, yüksek performanslı işlenebilirlik elde etmek için kesme koşullarını optimize etmek amacıyla birçok araştırma yapılmıştır [3]. Son zamanlarda, yüzey pürüzlülüğü için birçok optimizasyon modeli, kesme sürecini simüle etmeye ve optimize etmeye yardımcı olan işleme faktörleriyle birlikte düşünülmüştür [4]. Çeliğin kuru işleme işlemi sırasında yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. El-Tamimi, karbür kesici takımları benimseyerek AISI 420 paslanmaz çeliği çok sayıda işleme kriterinde analiz etti. Çalışmada en belirgin etkiler, ortalama etki ve etkileşim grafikleriyle gösterilmiştir [5].

Hem yüzey pürüzlülüğü hem de talaş kaldırma oranı, kesme işlemi parametrelerinin değişmesiyle büyük ölçüde değişir. Bu nedenle, CNC frezeleme işleminde yüzey kalitesi (düşük Ra değeri) ve malzeme kaldırma oranının tahmini ile birlikte işlem parametrelerinin doğru seçimi de önemlidir. Literatürde tartışılan çalışmaların çoğu, bireysel bir yanıtı yönelik optimizasyon yöntemlerine odaklanmıştır [6]. Özellikle Taguchi yönteminin uygulanmasıyla ilgili literatür incelendiğinde, mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanıldığı çok fazla çalışmaya rastlanmaktadır [6,11]. Frezeleme işlemleri sırasında yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve işleme zamanının optimize edilmesi birçok yazar tarafından gerçekleştirilmiştir. Yayınlanmış çalışmalar arasında yazarların, deneysel araştırma süreci için girdi parametreleri olarak genellikle kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğini seçtikleri görülmektedir [12].

AISI 4140 çeliği, kimyasal bileşimindeki karbon miktarı nedeniyle yüksek sertlik değerleri elde edilebilen bir malzemedir [13]. Makine ve imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çeliği başta otomotiv, petro-gaz, savunma ve uçak sanayisi olmak üzere birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Makinalar ve makine aparatları, yedek parça, tarım makinaları, krank mili, aks mili ve kovani, dişli çark ve somunlar AISI 4140 çeliğinin başlıca kullanım alanları içerisinde yer almaktadır [14]. Bu çelik, yüksek işlenebilirlik, kolay ısıl işlem ve düşük maliyet avantajına sahiptir. Ancak şu ana kadar bu çeliğin frezeleme işlemlerinde farklı yüzey pürüzlülük değerleri, talaş kaldırma oranı ve kesme zamanı parametrelerinin birlikte optimize edildiği çalışmalara rastlanılmamıştır.

Taguchi yöntemi frezeleme işlemlerinde, yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı, işleme zamanı, kesme kuvveti ve titreşim gibi birçok mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, tasarımları maliyet, performans ve kalite açısından optimize etmek için basit ve etkili sistematik bir yol sergiler. Geleneksel Taguchi tekniği, tek yanıtlı problemlerin optimizasyonunda başarılı bir şekilde uygulanmasına rağmen, birden fazla çıktının olması durumunda çok cevaplı problemlerin çözümünde kullanılmamaktadır [7]. Buna karşın, frezeleme işlemlerindeki optimizasyon problemlerinin çözümü için Taguchi yönteminin diğer optimizasyon teknikleri ile birleştirilmesine yönelik birçok çalışma da vardır [15].

Genel olarak işleme süreci, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, malzeme kaldırma oranı, vb. gibi çoklu performans ölçümlerini içerir. Bu çoklu tepkiler, süreç parametrelerinin seçimini büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle, tek bir yanıtı optimize etmek için kullanılan geleneksel yöntem, birden fazla yanıtı ölçen işleme süreci için uygun görünmemektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek ve işleme etkinliğini elde etmek için çoklu yanıt optimizasyonu gereklidir [16,19]. Bu nedenle, proses parametrelerinin optimize edilmesi için, ağırlık atama yöntemi, Gri ilişkisel analiz (GRA), İdeal Çözümüne Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği (TOPSIS), Taguchi- DEAR analizi gibi çok yanıtlı optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. [20,24].

Üretim süreci parametrelerini optimize etmek için çeşitli optimizasyon teknikleri uygulansa da, daha basit ve verimli bir çok kriterli karar verme tekniğini (MCDM) belirlemek için hala yüksek düzeyde bir beklenti var. Bir optimizasyon tekniği olan Taguchi-DEAR tekniği, işleme süreçlerini optimize etmek için kullanılabilir [25]. Bununla bağlantılı olarak Taguchi-DEAR tekniğinin diğer optimizasyon araçlarından elde edilen çıktı değerleri doğrultusunda en basit metodoloji ve benzer sonuçlar açısından diğer yöntemlere göre üstünlüğü vardır [26,28]. Ayrıca bazı çalışmalar, DEAR tekniğinin diğer bazı optimizasyon yöntemlerinden daha etkili olduğunu göstermiştir. Birçok yazar çalışmalarında, işleme sırasında çoklu tepkileri optimize etmek için bu tekniği kullanmıştır [25,32]. Bunlardan Moganapriya ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, AISI 420 martensitik paslanmaz çeliği işlerken birden çok kalite özelliğini içeren bir optimizasyon modeli oluşturmak için Taguchi-DEAR analizini kullanmıştır. Aynı zamanda bu çalışma, AISI 420 çeliğinin kuru tornalanması için en uygun kesme koşullarını belirlenmesi ve Titanyum Alüminyum Silisyum Nitrür (TiAlSiN) sert kaplama malzemesi geliştirme hedefleri doğrultusunda yapılmıştır [33]. Vaddi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, DEAR yöntemiyle talaş kaldırma oranı (MRR), takım aşınma oranı (TWR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) gibi performans özellikleri gibi işlem parametrelerini optimize etmişlerdir [34]. Reddy ve arkadaşı Taguchi-DEAR yöntemini, aşındırıcı su jeti ile işleme sürecinde eşzamanlı çok kriterli karar verme için ihtiyaç duyulan optimal işleme parametrelerini seçmek için uygulamışlardır. Deneysel araştırmaların sonuçları, işlem parametresi ilerleme hızının, dikkate alınan dört girdi parametresinin tamamından malzeme kaldırma hızı üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Önerilen yöntemle, doğrulama deneyinden sonra bulunan MRR ve SR için %16.64 ve %4 artırılmış değer ile iyi bir uyum gösterdiğini belirtmişlerdir [35].

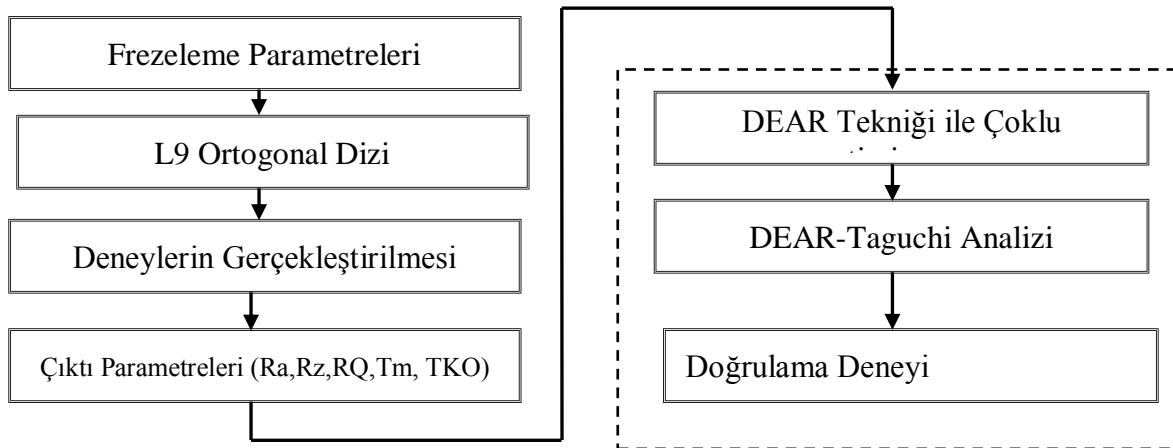
Ayrıntılı literatür taramasından, frezeleme işleminde de optimizasyon problemlerini uygulamak için birçok araştırma çalışmasının yapılmasına karşın DEAR yaklaşımı kullanılarak numunelerin işlenmesi için en uygun teknoloji parametresinin belirlenmesine yönelik çalışmaların da çok az olduğu görülmüştür. Yukarıda analiz edilen bu sonuçlar doğrultusunda, AISI 4140 çeliğinin frezelemesinde hem yüzey pürüzlülüğü parametrelerini hem kesme zamanını ve hem de talaş kaldırma oranını optimize etmek için Taguchi yöntemi ve DEAR tekniğinin kombinasyonunun gerekli olduğu sonucuna varılarak bu çalışma yapılmıştır. Çalışmada giriş parametreleri olarak kesme derinliği (mm), ilerleme hızı (mm/dev), kesme hızı (m/dak) ve kesme derinliği (mm) seçilmiştir; yüzey pürüzlülük özellikleri Ra (μm), Rz (μm) ve Rq (μm) ile kesme zamanı (Tm) ve talaş kaldırma oranı çıkış parametreleri olarak seçilmiştir.

2. Malzeme ve Metod

Yapılan çalışmanın deneysel akış şeması Şekil 1’de görülmektedir.

2.1. Malzeme

Çalışmada ticari olarak satılan kütük şeklindeki AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. Malzeme, önce şerit testerede soğutma sıvısı kullanılarak kesilmiş daha sonra kesilen iş parçalarının yüzey bütünlüğünü ve paralellliğini sağlamak amacıyla freze tezgahında düzeltilmiştir.



Şekil 1. Deneysel akış şeması

Böylece, deney numuneleri deneye başlamadan önce yüzeydeki kirlilik ve oksit tabakalarından arındırılmış hale getirilmiştir. Son olarak, deney numuneleri 260x150x25 mm ölçülerine getirilmiştir. 4140 çeliğinin kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: AISI 4140 Çeliğinin Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)					
C	Si	Mn	P	S	Ti
0,378	0,223	0,688	0,015	0,007	0,007
Al	Cr	Mo	Ni	V	Co
0,018	0,970	0,199	0,032	0,010	0,009
Mekanik özellikleri					
Çekme mukavemeti MPa	Akma mukavemeti MPA	% Uzama	Brinell sertlik değeri (HB)	Elastik modülü (GPa)	Poisson oranı
655	415	25,70	197	190-210	0,27-0,30

2.2. Takım Tezgahı ve Kesici Takım

Frezeleme deneyleri, kuru işleme şartlarında, SPINNER MVC1000 marka CNC dik işleme merkezinde,



Şekil 2. (a) CNC Tezgahı, (b) Kesici takım ve üç ağızlı Tutucu

Sandvik marka R 390-11 T308M-PM 1030 PVD ile TiAlN+TiN kaplı karbür kesici takım ile Sandvik marka R 390-020B20 11M üç ağızlı takım tutucuda, üç takım kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

2.3. Deney Tasarımı

Bu çalışmada, üç parametre ve üç değişken seviyesi seçilmiştir. Deneyler, en uygun kombinasyon olarak önerilen Taguchi Ortogonal diziler içinden, Taguchi L9 ortogonal tasarım matrisine göre yapılmış ve sonuçlar Minitab 19 yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. (Tablo 1) Bu seçim, deney sayısını ve deney maliyetini azaltmıştır.

Tablo 1. Taguchi L9 tabanlı ortogonal deney tasarımı

Deney No	V	f	A _p
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Bu çalışma için seçilen Kesme parametreleri ve parametrelere karşılık gelen değişken seviyeleri tablo 2’de verilmiştir. Frezeleme prosesinde işlem parametrelerinin önemi nedeniyle Kesme hızı (V), ilerleme (f) ve kesme derinliği (A_p) giriş parametreleri olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme hızları, ilerleme miktarı ve kesme derinliği seviyeleri kesici takım firmaları tarafından tavsiye edilen malzemelerin işlenmesinde kullanılan değerler arasından belirlenmiştir.

Tablo 2. Deney parametreleri ve Değişken Seviyeleri

Faktörler	Sembol	Birim	Değişken seviyeleri		
Kesme Hızı	V	m/dak	175	250	325
İlerleme	f	mm/dev	0,08	0,12	0,16
Kesme Derinliği	A _p	mm	0,5	1	1,5

2.4. Çıkış Parametrelerinin Ölçülmesi

Frezeleme sonucu Yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz, Rq), İşleme zamanı (T_m) ve Talaş kaldırma oranı (TKO) çoklu cevap optimizasyonu için seçilen çıktılardır. Yüzey pürüzlülük parametreleri, Ra (Pürüzlülük ortalaması), Rz (Ortalama pürüz yüksekliği) ve Rq (Ortalama karekök (RMS) pürüzlülüğü) değerleri MITUTOYO SJ-400 taşınabilir yüzey pürüzlülük test cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 3). İş parçalarının yüzeylerinde üç kez yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmış ve ortalama pürüzlülük parametreleri alınmıştır. Talaş kaldırma oranının hesaplanmasında Denklem 1 ve 2 kullanılmıştır. Talaş kaldırma oranı TKO;

$$TKO = A_e * A_p * f_r \quad (1)$$

formülde; TKO, Talaş Kaldırma Oranı (mm³/min), A_e Kesme genişliği (mm), A_p Kesme derinliği (mm) ve f_r ise ilerleme hızı (mm/dak)

$$f_r = N * n_t * f \quad (2)$$

Burada; N: iş mili dönüş hızı (dev/dak), n_t: freze çakısında bulunan diş sayısı, f: talaş yükü (mm/diş)

İşleme zamanı T_m(dak);

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (3)$$

formülde; işleme zamanı, (dak.), Kesilen boy L (mm) [8]



Şekil 3. Yüzey pürüzlülük cihazı ve pürüzlülük ölçümü

2.5. Taguchi Yöntemi

Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen Taguchi felsefesi, yüksek kaliteli üretim sisteminin tasarımı için etkili bir araçtır. Taguchi'nin Ortogonal Dizisi (OA), istenen çıktının logaritmik fonksiyonları olan bir dizi iyi dengelenmiş deney (daha az sayıda deneysel çalışma) ve Taguchi'nin sinyal-gürültü oranları (S/N) ile sağlanır. Taguchi yöntemi, sinyal-gürültü oranı adı verilen istatistiksel bir performans ölçüsü kullanır. S/N oranı hem ortalamayı hem de değişkenliği hesaba katar. S/N oranı, ortalamanın (Sinyal) standart sapmaya (Gürültü) oranıdır.

Optimize edilecek ürünün ya da işlemin kalite özelliklerine bağlı olarak S/N oranının hesaplanmasında sıklıkla kullanılan üç farklı karakteristik; daha küçük daha iyi (en düşük en iyi: $\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$) ve daha büyük daha iyi (en yüksek en iyi: $\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$), nominal (Ortalama) (ortalama en iyi: $\frac{S}{N} = 10 \log \left[\frac{\bar{y}}{y_x s^2} \right]$) değer en iyidir. Burada amaç S/N oranını maksimize etmektir. Dolayısıyla değerlendirmelerde, her bir parametre için hesaplanan ortalama S/N oranları içinde en büyük S/N oranına sahip seviye, en iyi sonucu belirlemede kullanılmaktadır.

2.6. DEAR Tekniği

Giriş parametrelerinin yanıtlar üzerindeki etkisi, yanıtların ortalama etki grafiklerine dayalı olarak değerlendirilir. Ortalamadan önemli bir sapma, yanıt işlevi üzerinde önemli bir etkiye işaret eder. Ortalamadan küçük sapmalara sahip herhangi bir değişken faktör üzerinde daha az etkiye sahiptir. Çıktılar bağımsız olmadığından ve aralarında bir korelasyon olduğundan, tek bir hedefin optimizasyonu diğer hedefler için maliyetli olabilir. Tipik bir ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) problemi, her biri aynı anda dikkate alınacak farklı karar kriterleri tarafından açıkça tanımlanan sınırlı sayıda alternatif çözümü sıralama görevini içerir. Çalışmadaki çelişen hedefler nedeniyle, 'çok kriterli' optimizasyon, tüm amaç fonksiyonlarını aynı anda optimize eder ve optimum kombinasyon seçilir. DEAR yöntemi, tüm çıktı yanıtlarını aynı anda optimize etmek için deney çerçevesi içinde en uygun parametre ayarlarını seçmektedir. DEAR tekniği için uygulama aşamaları adım adım aşağıda verilmiştir.

DEAR yönteminde, proses parametrelerinin optimal kombinasyonunu bulmak için çoklu yanıt performans indeksi (MRPI-Multi Responce Performance Index) değeri kullanılır. Bu MRPI değeri, bir dizi orijinal yanıtın eşlenmesiyle elde edilir. MRPI değerini hesaplamak için aşağıdaki adımlar kullanılır.

- i. Tüm deneyler için yanıt ağırlıkları(w) belirlenir. Ağırlıkların hesaplanmasında maksimizasyon ve minimizasyon yapılacak parametrelere durumları farklı değerlendirilir. Maksimizasyon yapılacak çıktılar hesaplanırken, her bir deney sonucunun ağırlığı için, tüm deney sonuçlarının toplamına oranı alınırken minimizasyon yapılacak parametrelerde her bir deney sonucunun tersi, tüm deney sonuçlarının terslerinin toplamının sonucuna oranıdır.

$$w_{R_a} = \frac{1/R_a}{\sum 1/R_a} \quad R_a : \text{pürüzlülük ağırlıklandırılması} \quad (4)$$

$$w_{R_z} = \frac{1/R_z}{\sum 1/R_z} \quad R_z : \text{pürüzlülük ağırlıklandırılması} \quad (5)$$

$$w_{R_Q} = \frac{1/R_Q}{\sum 1/Q} \quad R_Q : \text{pürüzlülük ağırlıklandırılması} \quad (6)$$

$$w_{T_m} = \frac{1/T_m}{\sum 1/T_m} \quad T_m; \text{işleme zamanı ağırlıklandırılması} \quad (7)$$

$$w_{TKO} = \frac{TKO}{\sum TKO} \quad TKO : \text{Talaş kaldırma oranı ağırlıklandırılması} \quad (8)$$

- ii. Aşağıdaki denklemleri kullanarak her bir yanıt değerini kendi ağırlığıyla çarparak yanıt verilerini ağırlıklı verilere dönüştürülür.

$$Q = R_a * w_{R_a} \quad (9)$$

$$P = R_z * w_z \quad (10)$$

$$R = R_Q * w_{R_Q} \quad (11)$$

$$S = T_m * w_{T_m} \quad (12)$$

$$T = TKO * w_{TKO} \quad (13)$$

- iii. MRPI (Multi Responce Performance Index- Çoklu yanıt performans endeksi) değerini elde etmek için daha büyük daha iyi olan veriyi daha küçük daha iyi olan daha iyi olan veriyeye bölünür.

$$MRPI = \frac{T}{(Q + P + R + S)} \quad (14)$$

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Problemin Tek Yanıtlı Optimizasyonu

260x150x25 ölçülerindeki AISI 4140 Çelik malzeme, CNC işleme merkezinde, L9 Ortogonal dizisindeki deney tertibine uygun olarak frezelenmiştir. Proses parametrelerinin önemini araştırmak için toplam dokuz deney yapılmıştır. Tablo 3'te deneysel tasarım, çıktı parametreleri ve çıktıların S/N oranları verilmiştir.

Tablo 3. L9 tasarımı, Deney sonuçları ve S/N oranları

Deney No	Faktörler			Ra	S/N Ra	Rz	S/N Rz	RQ	S/N RQ	Tm	S/N Tm	TKO	S/N TKO
	V	f	Ap										
1	175	0,08	0,5	0,34	9,37	2	-6,02	0,42	7,54	15,25	-23,67	6,69	16,51
2	175	0,12	1	0,78	2,19	3,7	-11,36	0,90	0,89	10,18	-20,16	20,04	26,04
3	175	0,16	1,5	1,16	-1,29	4,83	-13,68	1,31	-2,37	7,62	-17,64	40,14	32,07
4	250	0,08	1	0,49	6,14	2,40	-7,60	0,58	4,69	10,69	-20,58	19,08	25,61
5	250	0,12	1,5	0,67	3,44	3,73	-11,44	0,84	1,55	7,13	-17,06	42,93	32,66
6	250	0,16	0,5	1,10	-0,83	5,07	-14,10	1,30	-2,28	5,34	-14,55	19,11	25,63
7	325	0,08	1,5	0,51	5,90	2,30	-7,23	0,58	4,73	8,21	-18,29	37,26	31,42
8	325	0,12	0,5	0,73	2,73	3,47	-10,80	0,87	1,21	5,48	-14,78	18,63	25,40
9	325	0,16	1	1,31	-2,35	5,13	-14,21	1,45	-3,25	4,11	-12,28	49,68	33,92

Ra, Rz, Rq, Tm ve TKO gibi bireysel yanıtlar Taguchi'nin S/N'si aracılığıyla ayrı ayrı analiz edilmiştir. S/N oranını hesaplamak için Ra, Rz, Rq ve Tm için 'en küçük en iyi' ve TKO için 'en büyük en iyi' özellikleri uygulanmıştır.

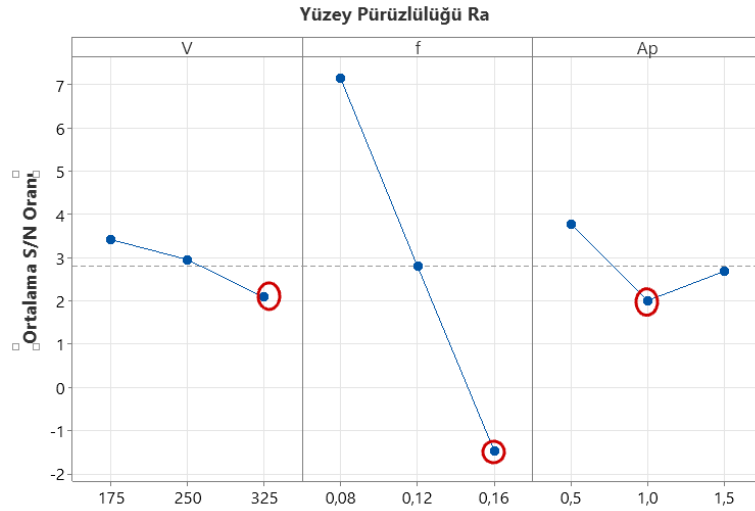
Tablo 4'te görüldüğü gibi Yüzey pürüzlülük değerleri Ra, Rz ve RQ değerlerinin minimum olduğu deneylerde S/N oranları da beklendiği gibi maksimum değerleri almıştır. Tablo 4 ise faktörlere göre

S/N oranının maksimum değerinde çıktığı deney şartları görülmektedir. Tabloda, R_a : 0,34, R_z :2 ve R_Q :0,42 değerleri dokuz değer içerisinde en en küçük en iyi şartını gerçekleştiren değerlerdir. Bu sonuç Her üç değer için 1 numaralı değer şartlarında gerçekleşmiş ve A1B1C1 değerleri yüzey pürüzlülüğü için en iyi kalite değerlerini sağlayan deney değerleridir. Yine işleme zamanı olarak (T_m) -12,28 S/N oranına karşılık gelen 4,11 dakika ile 33,92 S/N oranına karşılık gelen 49,68 mm^3/dak Talaş Kaldırma Oranı 9 numaralı deneye karşılık gelen A3B3C2 deney şartlarında meydana gelen en iyi değerlerdir.

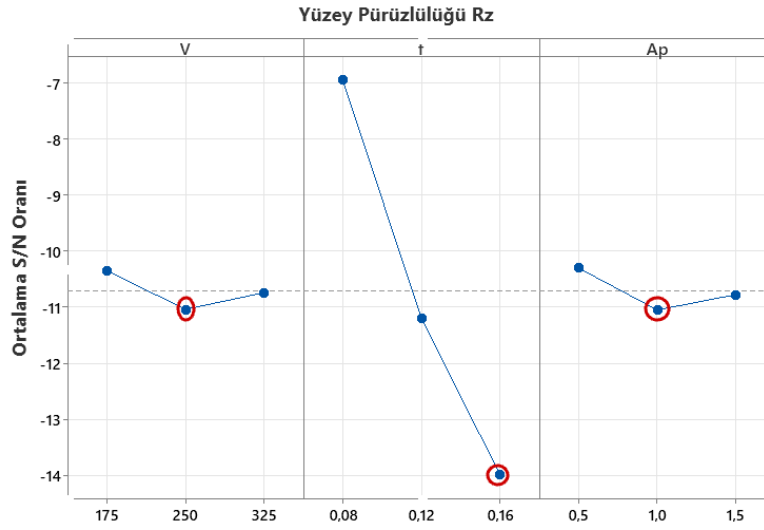
Tablo 4. Çıktıların optimum kontrol faktörleri

Yanıtlar	A	B	C	Yanıt değerleri
R_a	1	1	1	0,34
R_z	1	1	1	2
R_Q	1	1	1	0,42
T_m	3	3	2	4,11
TKO	3	3	2	49,68

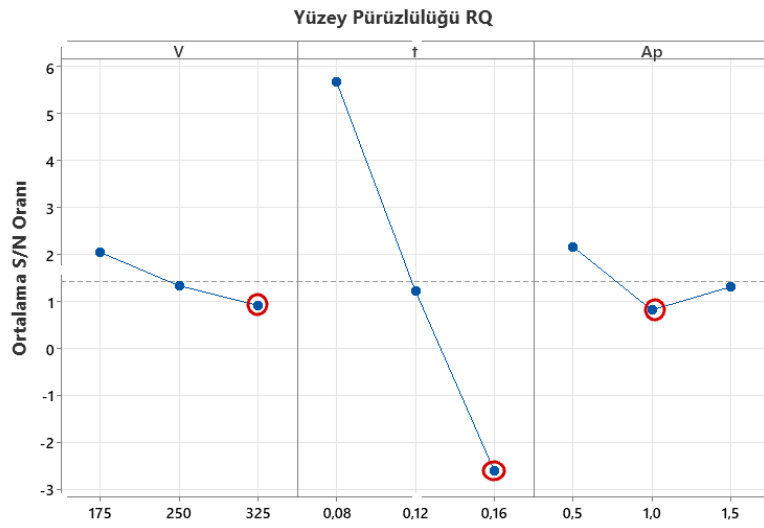
Şekil 4-8. Ana etki grafikleri incelendiğinde ilerlemenin tüm yanıtlar üzerindeki etkisinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlükleri R_a , R_z ve R_q değerlerinde ilerlememenin düşmesiyle pürüzlülük değerlerinde büyük oranda iyileşme olduğu görülmektedir. Bu durum literatürde uygundur. Kesme hızı ve kesme kalınlığının yanıtlar üzerinde çok az etkiye sahip olduğu görülmektedir. İşleme zamanı ve talaş kaldırma oranlarında ilerleme değerinin yanında kesme hızının da etkili olduğu görülmektedir. Özellikle talaş kaldırma oranında en etkili parametre olarak kesme derinliği ortaya çıkmaktadır ki bu durumda literatüre paralellik göstermektedir. Optimum parametre değerleri R_a için A3B3C2, R_z için A2B3C2, R_q için A3B3C2, işleme zamanı için A1B1C2 ve Talaş kaldırma oranı için A1B1C1 deney tasarımı şeklinde gerçekleşmiştir.



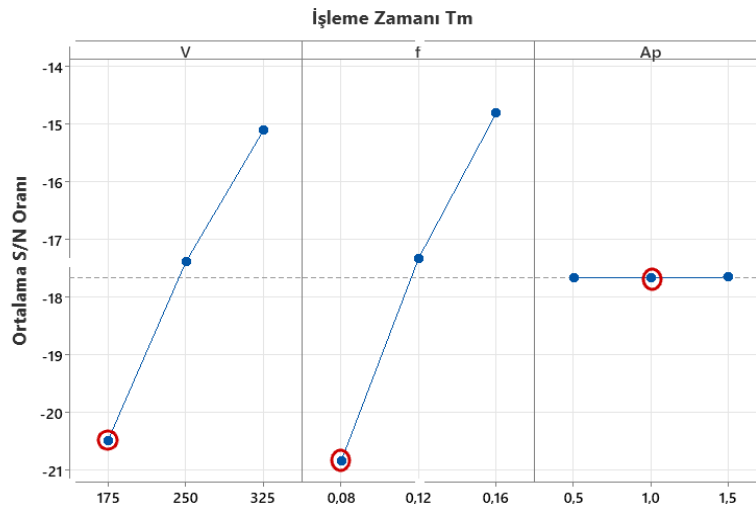
Şekil 4. Ra Değerinin S/N Oranı İçin Ana Etki Grafiği



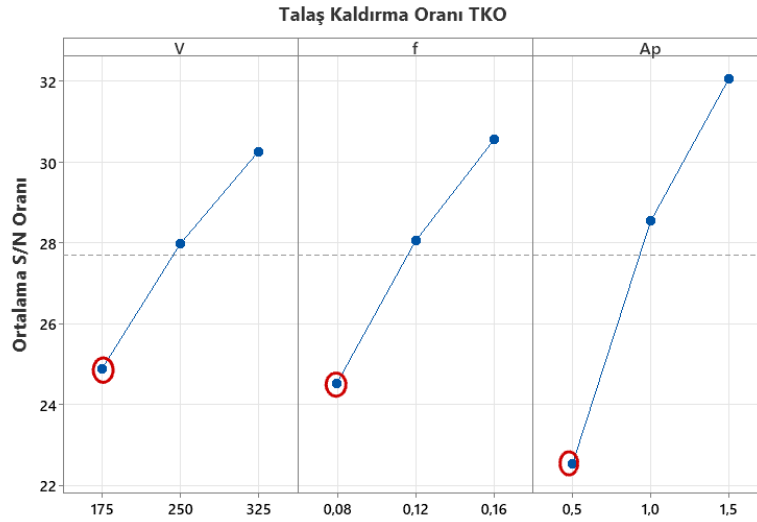
Şekil 5. Rz Değerinin S/N Oranı İçin Ana Etki Grafiği



Şekil 6. R_Q Değerinin S/N Oranı İçin Ana Etki Grafiği



Şekil 7. T_m Değerinin S/N Oranı İçin Ana Etki Grafiği



Şekil 8. TKO Değerinin S/N Oranı İçin Ana Etki Grafiği

Bu çalışmada en düşük Yüzey pürüzlülük değerleri Ra, Rz ve Rq değerleri ve işleme zamanı Tm en iyi performansı ifade edeceğinden ve literatürde de kullanıldığı için daha küçük daha iyi, Talaş kaldırma oranı ise en büyük daha iyi S/N karakteristiği ile kullanılmıştır.

3.2. Problemin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden DEAR Yöntemiyle Optimizasyonu

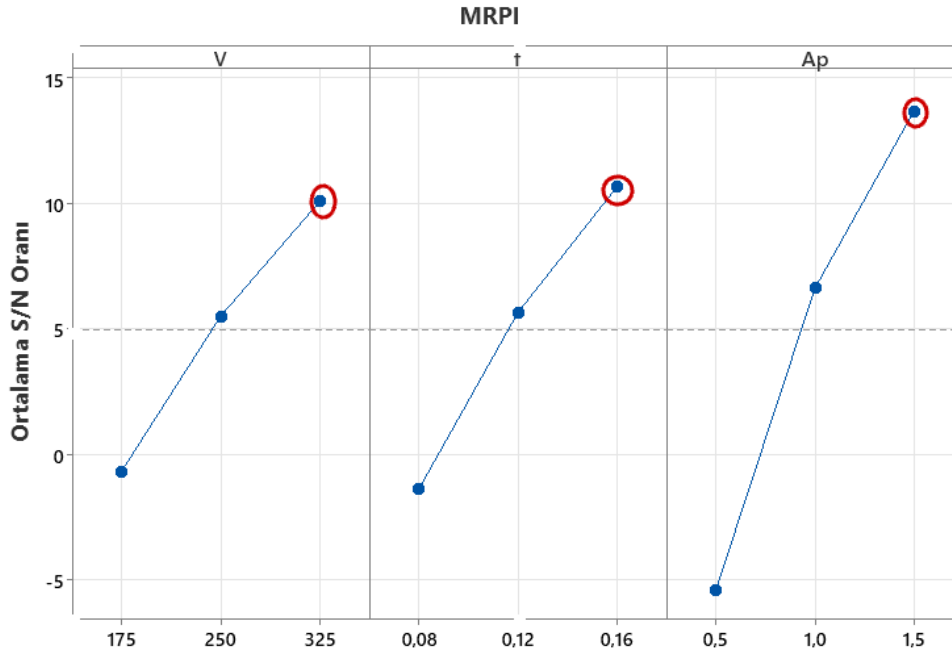
DEAR yönteminde, proses parametrelerinin optimal kombinasyonunu bulmak için çoklu yanıt performans indeksi (MRPI) değeri kullanılır. Bu MRPI değeri, bir dizi orijinal yanıtın eşlenmesiyle elde edilir. Değerler, her bir proses parametresinin karşılık gelen seviyesi için tüm MRPI değerleri toplanarak hesaplanmıştır. Her bir proses parametresinin maksimum seviye değeri, işleme karakteristiklerini belirlemede girdi parametrelerinin optimal seviyesini gösterir[36].

Tablo 5. Deney Yanıtlarının Ağırlıklandırılması, MRPI ve S/N oranı

Deney No	Ağırlıklandırma					MRPI	S/N
	WRa	WRz	WRQ	WTm	WMRR		
1	0,216	0,180	0,207	0,052	0,026	0,135	-17,421
2	0,095	0,097	0,096	0,078	0,079	1,208	1,638
3	0,063	0,075	0,066	0,104	0,158	4,845	13,705
4	0,149	0,150	0,149	0,074	0,075	1,095	0,785
5	0,109	0,096	0,104	0,111	0,169	5,542	14,873
6	0,067	0,071	0,067	0,148	0,075	1,098	0,813
7	0,145	0,157	0,150	0,096	0,147	4,174	12,412
8	0,101	0,104	0,100	0,144	0,073	1,044	0,371
9	0,056	0,070	0,060	0,193	0,196	7,421	17,410

Şekil 9'da kesme parametreleri ve seviyelerinin MRPI'ye etkileri S/N oranı ile hesaplanmıştır. En büyük en iyi oranı kullanılarak kesme parametrelerinin optimum seviyeleri belirlenmiştir. Şekil

9’da, S/N oranının en büyük değerleri dikkate alınır; optimum seviyeler olarak kesme derinliğinin 3. seviyesi olan 1.5 mm, ilerleme oranının 3. seviyesi olan 0.16 mm/dev ve kesme hızının 3. seviyesi olan 325 mm/dak olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. MRPI Değerlerinin S/N Oranları İçin Ana Etki Grafiği

Tablo 4’te S/N oranlarına göre kesme parametrelerinin MRPI değerlerine göre etkinlik (anlamlılık) sırası verilmiştir. Çizelgeye göre Kesme derinliği en etkin parametre olmuştur. İkinci etkin parametre de ilerleme çıkmıştır. Kesme hızı MRPI değerlerine etki sırasında üçüncü sırada çıkmıştır. Ayrıca seviyelerin karşısında verilen değerler incelendiğinde 3. seviyelerin değerleri diğerlerine göre daha büyük olduğu görülmektedir. Buradan da kesme parametrelerinin optimum seviyeleri anlaşılabilir. Çizelgede her üç parametrenin (kesme hızı, ilerleme oranı, kesme derinliği) optimum seviyesi üçüncü seviyeler olmuştur. Taguchi analizi ile elde edilen bu veriler Şekil 9’u ve Tablo 6’yı doğrulamaktadır.

Tablo 6. MRPI için S/N oranına göre cevap tablosu

Seviye	V	f	Ap
1	-0,6924	-1,4078	-5,4124
2	5,4903	5,6272	6,611
3	10,0641	10,6425	13,6633
Delta	10,7565	12,0503	19,0758
Sıra	3	2	1

Tablo 7. Ortalama MRPI üzerindeki ana etkileri

Seviye	1	2	3	Mak-Min	Sıralama
V	2,0623	2,5781	4,2131	2,1508	3
f	1,8012	2,5976	4,4547	2,6535	2
Ap	0,7588	3,2411	4,8536	4,0948	1

3.3. Doğrulama deneyi

Taguchi-DEAR optimizasyon metodunu kullanarak, yapılan deneysel çalışma da yüzey pürüzlülük değerleri R_a , R_z , R_Q , işleme zamanı ve Talaş kaldırma oranı değerlerinin optimal sonuçları minitab 19 programı ile elde edilmiştir. Çıkan sonuçlar bazen mevcut deneylerden herhangi biri olabilirken, bazen ise yapılan deneylerin haricinde bir deney sonucu olabilmektedir. Nitekim yaptığımız bu çalışmada da durum bu şekilde ortaya çıkmıştır. Tablo 7 denden de görüldüğü gibi, MRPI değerleri için optimum sonuç mevcut deneylerden farklı olarak kesme hızı 325 m/dak, ilerleme 0,16 mm/dev ve kesme derinliği 1,5 mm ye karşılık gelen A3B3C3 deney şartlarında ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçların doğrulanması için optimum parametrik koşullarda doğrulama deneyi yapılmıştır. Çıkan sonuçlar Tablo 8’de sunulmuştur. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen bütün sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi-DEAR optimizasyonunun başarıyla uygulandığı görülmektedir.

Tablo 8. Doğrulama deney sonuçları

Yanıtlar	R_a μm	R_z μm	R_Q μm	T_m μm	TKO-dk
Yanıt değerleri	0,51	2,3	0,9	4,11	74,52

4. Sonuçlar

Bu çalışmada,AISI 4140 çeliğinin Frezelenme prosesinde kesme parametrelerinin olan Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlülük parametrelerinden R_a , R_z ve R_q ile ayrıca işleme zamanı ve Talaş kaldırma oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yöntem olarak Taguchi-Veri Zarflama Analizi Tabanlı Sıralama (DEAR) tabanlı çok yanıtli optimizasyon tekniği seçilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler şu şekilde sıralanabilir.

- Taguchi ortogonal dizi terkiibiyle yapılan deneylerin bu makalede tanımlanan Yüzey pürüzlülük parametreleri R_a , R_z ve R_q ile işleme zamanı ve Talaş kaldırma oranlarını birbirinden bağımsız olarak analiz etme yeterliliğine haiz olduğu görülmüştür. Ancak birbirleriyle çelişen optimizasyon amaçlarında Dear yönteminin Çok Kriterli Karar verme yöntemlerinden biri olarak problemin çözümüne çok uygun olduğu görülmektedir.
- Her üç yüzey pürüzlülük (R_a , R_z ve R_q) değeri farklı karakteristiklere göre yüzeyin pürüzlülük durumunu gösteren değerlerdir. Değerler cihazdan, ölçüm esnasında aynı anda elde edilmektedir. Literatürde, pürüzlülük ölçümünde çok yaygın bir şekilde R_a değeri kullanılmasına rağmen birçok çalışmada da diğer yüzey pürüzlülük parametrelerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmada bu üç parametrenin seçilmesinin en önemli nedenlerinden birisi de Fedai ve arkadaşları [10] tarafından yapılan bir çalışmanın devamı niteliğinde olup, metodizasyonu (Taguchi-DEAR) değiştirerek sonuçların gözlemlenmesidir. Çıkan sonuçlardan da anlaşıldığı üzere giriş faktörleri üzerine her üç yüzey pürüzlülük parametrelerinin benzer oranda etkidiği açıkça anlaşılmaktadır. DEAR yöntemine göre optimum parametre kombinasyonu A3B3C3 olarak belirlenmiştir.
- DEAR yöntemi, her yanıt için belirli bir ağırlık oranı atamayı gerektirmemesi, basitlik, esneklik ve daha az matematiksel hesaplama adımları bu optimizasyon aracının avantajlarıdır. Bu nedenle, DEAR yöntemi, herhangi bir acemi kullanıcı tarafından işleme endüstrilerinde optimizasyon yapmak için kullanılabilir.
- Çıkan sonuçlarda özellikle talaş kaldırma oranında büyük bir artış sağlarken bazı yüzey pürüzlülük değerlerinde kötüleşme olduğunu göstermektedir. Bu durum optimizasyonun yetersizliğinden değil çıktılar arasında çatışan değerlerden kaynaklanmaktadır. DEAR yönteminde kriterlere ağırlık ataması yapılmadığından dolayı yöntemden çıkan sonuçlar bazı kriter değerlerinin istenilen şekilde çıkmamasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, eğer kriterler farklı önem seviyesine göre sınıflandırılarak optimizasyon yapılmak istenirse

TOPSİS, VİKOR GRA vs gibi çok kriterli karar verme yöntemlerinden birisini seçilmesi daha uygun olabilir.

Yapılan bu araştırma çalışması ile, uygun işleme süreci parametrelerini verimli bir şekilde elde etmek için basitleştirilmiş bir optimizasyon aracı olan Taguchi-DEAR tekniği kullanımının artacağı düşünülmektedir.

Yazar (lar)ın Katkıları

Yazar YF, tüm analiz çalışmalarını yaptı ve makaleyi yazdı. Yazar makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Moganapriya, C., Rajasekar, R., Mohanraj, T., Gobinath, V. K., Kumar, P. S., Poongodi, C. “Dry Machining Performance Studies on TiAlSiN Coated Inserts in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel and Multi-Criteria Decision Making Using Taguchi-DEAR Approach”. *Silicon*, 2021, 13(6): 1-14.
- [2]. İç, Y. T., Duran, H., Keçeci, B., İlik, E., Bilgiç, B. “Çok Yanıtlı Taguchi Eniyilemesine Yönelik Bir Bilgisayar Uygulamasının Geliştirilmesi”. *Politeknik Dergisi*, 2016, 19 (3): 311-323
- [3]. Kuntoğlu M., Aslan A., Sağlam P. D., “AISI 5140 Çeliğinin Tornalanması Esnasında Yaklaşma Açısı ve Kesme Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi”. *Politeknik Dergisi*. 2021, 1(1)
- [4]. Asiltürk I., Neşeli S., “Multi Response Optimisation of CNC Turning Parameters Via Taguchi Method-Based Response Surface Analysis”. *Measurement*, 2012, 45(4): 785–794
- [5]. El-Tamimi A., El-Hossainy T., “Investigating the Machinability of AISI 420 Stainless Steel Using Factorial Design”. *Mater Manuf Process*, 2008, 23(4): 419–426
- [6]. Albayrak, S., Yeşildal, F., Yıldırım, C. “SAE 4140 Çeliğin Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin Ses Seviyesi ve Yüzey Pürüzlüğüne Etkileri: Parametrelerin Optimizasyonu” *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2020, 10: 2759-2769
- [7]. Kahraman, F., Başar, G., Koçoğlu, Z., Yeniyl, E. “Delik Büyütme İşleminde Kesme Parametrelerinin Çok Yanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Yaklaşımı Kullanılarak Optimizasyonu”. *Politeknik Dergisi*, 2018, 21: 283-290
- [8]. Başar G., “Topsis Yöntemi ile AISI 4140 Malzemesinin Yüzey Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu”, *Mühendislik Konstrüksiyon İmalat Ve Malzeme Üzerine Güncel Araştırmalar, İksad yayıncılık*, 2021, 91-114
- [9]. Şirin E., Şirin Ş., Turgut Y., Korkut İ., “AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Metodu İle Optimizasyonu”. *DUBİTED*, 2015, 3(1): 132-144.
- [10]. Basar, G., Kirli Akin, H., Kahraman, F., & Fedai, Y. “Modeling And Optimization Of Face Milling Process Parameters for AISI 4140 Steel”. *Tehnički Glasnik*, 2018, 12(1): 5-10.
- [11]. Harun, Y. A. K. A. “Tornalama Sonrası Çıkan Talaşlardan Elde Edilen Alüminyum 5000 Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Yöntemi ile Analizi”. *Journal of the Institute of Science and Technology* 11.1 (2021): 464-473.
- [12]. Fedai, Y., Kahraman, F., Kirli Akin, H., Basar, G., “Optimization Of Machining Parameters In Face Milling Using Multi-Objective Taguchi Technique”, *Technical Journal*, 2018,12(2): 104

- [13]. Şahinoğlu, A., Rafighi, M., “AISI 4140’ın Tornada İşleme Sırasında Titreşim, Ses Şiddeti, Makine Akımı ve Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin İncelenmesi”. Arab J Sci Eng, 2020, 45: 765–778
- [14]. Kara, F., Özbek, O., Kam, M., Saruhan, H., “AISI 4140 İslah Çeliğinin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü ve Titreşimin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu”. International Academic Research Congress, Alanya, 2017.
- [15]. Moshat, S., Datta, S., Bandyopadhyay, A., Pal, P. “Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi Method”. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, (1), 95-102.
- [16]. Vignesh V, Ilangovan S, Radhika N., “Statistical Analysis Of Process Parameters İn Drilling Of SS410 Stainless Steel”. Materials Today, 2020.Proceedings, 46, 3313-3319
- [17]. Garg A, Lam JSL, “Modeling Multiple-Response Environmental And Manufacturing Characteristics Of EDM Process”. J Clean Prod, 2016, 137:1588–1601
- [18]. Kumar H, Ilangovan S, Radhika N., “Optimization Of Cutting Parameters For MRR, Tool Wear And Surface Roughness Characteristics İn Machining ADC12 Piston Alloy Using DOE”. Tribol Ind, 2020, 42(1):32–40
- [19]. Chate, G. R., GC, M. P., Harsha, H. M., Urankar, S. U., Sanadi, S. A., Jadhav, A. P., Deshpande, A. S., “Sustainable Machining: Modelling And Optimization Using Taguchi, MOORA and DEAR methods”. Materials Today: Proceedings. 2021, 46(18): 8941-8947
- [20]. Shankar, S., Mohanraj T., Pramanik, A., “Tool Condition Monitoring While Using Vegetable Based Cutting Fluids During Milling Of Inconel 625”. J Adv Manuf Syst. 2014, 18(04):563–581
- [21]. Sumesh CS, Ramesh A., “Numerical Modelling And Optimization Of Dry Orthogonal Turning Of Al6061 T6 Alloy. Period Polytech Mech Eng. 2018. 62(3):196–202.
- [22]. Mohanraj, T., et al. "Experimental Investigation Of Coconut Oil With Nanoboric Acid During Milling Of Inconel 625 Using Taguchi-Grey Relational Analysis". Surface Review and Letters, 2021, 28(03)
- [23]. Moganapriya, C., Rajasekar, R., Kumar, P., S., Mohanraj, T., Gobinath, V. K., Saravanakumar, J., "Achieving Machining Effectiveness For AISI 1015 Structural Steel Through Coated Inserts And Grey-Fuzzy Coupled Taguchi Optimization Approach". Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(3): 1169-1186
- [24]. Muthuramalingam T., Mohan B., “Application Of Taguchigrey Multi Responses Optimization On Process Parameters İn Electro Erosion”. Measurement , 2014, 58:495–502
- [25]. Manoj M., Jinu GR., Muthuramalingam T., “Multi Response Optimization Of AWJM Process Parameter on Machining Tib2 Particles Reinforced Al7075 Composite Using Taguchi-DEAR methodology”, Silicon, 2018, 10:2287–2293.
- [26]. Muthuramalingam T., Vasanth S, Vinothkumar P., Geethapriyan T, Mohamed Rabik M, “Multi Criteria Decision Making Of Abrasive Flow Oriented Process Parameters İn Abrasive Water Jet Machining Using Taguchi–DEAR Methodology”, Silicon, 2018. 10: 2015-2021.
- [27]. Thangaraj, M., Loganathan, G. B., Atif, A., Palanisamy, S. “Multi Response Optimization On Machining Titanium Alloy Using Taguchi-DEAR Analysis İn Abrasive Water Jet Cutting” SAE Technical Paper 2019, 28(70)
- [28]. Huu Phan, P., H., Muthuramalingam T., “Multi Criteria Decision Making of Vibration Assisted EDM Process Parameters on Machining Silicon Steel Using Taguchi-DEAR Methodology”, Silicon, 2020, 13:1879–1885
- [29]. Hong, S. Nguyen, and U. Vo Thi Nhu. “Multi-objective Optimization in Turning Operation of AISI 1055 Steel Using DEAR Method”. Tribology in Industry 2021, 43.(1):57-65
- [30]. Phan, N. H., Van Dong, P., Dung, H. T., Van Thien, N., Muthuramalingam, T., Shirguppikar, S., Lye, N. T. “Multi-Object Optimization Of EDM By Taguchi-DEAR Method Using Alcrni Coated Electrode”. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 1,(7):1429–1435

- [31]. Do Duc, T., Nguyen, N. T., Tien, D. H., & Dang, H. L. "A Research on Multi-Objective Optimization of the Grinding Process Using Segmented Grinding Wheel by Taguchi-DEAR Method". *EUREKA: Physics and Engineering*, 2021, 1: 67-77.
- [32]. Lakshmi, V. V., Subbaiah, K. V., Kothapalli, A. V., Suresh, K. "Parametric optimization while turning Ti-6Al-4V alloy in Mist-MQCL (Green environment) using the DEAR method". *Manufacturing Review*, 2020, 7(38):1-13
- [33]. Moganapriya, C., Rajasekar, R., Mohanraj, T., Gobinath, V. K., Kumar, P. S., Poongodi, C. "Dry Machining Performance Studies on TiAlSiN Coated Inserts in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel and Multi-Criteria Decision Making Using Taguchi-DEAR Approach". *Silicon*. 2021, 1:1-14.
- [34]. Vaddi, V.R., Sridhar Reddy, Ch., Pogaku, V.K., and Bushaboina, S.K., "Optimization of Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4 V) Using Taguchi-DEAR Method", *SAE Technical Paper* 2018, 28(32)
- [35]. Reddy, S., & Goteti, C. "Optimization Of Process Parameters For Multi Criterion Decision Making In Abrasive Water Jet Machining Of Magnesium-Silicon Based Aluminium Alloys", *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2021, 8(1):2067–3604
- [36]. Manoj, M., Jinu, G. R., Muthuramalingam, T. "Multi Response Optimization Of AWJM Process Parameters On Machining Tib 2 Particles Reinforced Al7075 Composite Using Taguchi-DEAR Methodology". *Silicon*, 2018, 10(5): 2287-2293.