

Buse Güney*^{ID}

Ege Güvenir^{ID}

Hüseyin Emre Çakırca^{ID}

Yaşar Emre Ünal^{ID}

Ahmet Şimşek^{ID}

Yusuf Furkan Yapan^{ID}

Orhan Çakır^{ID}

Yıldız Teknik Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, Makine Müh. Bölümü
İstanbul/Türkiye.

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 14 Mart 2025

Kabul: 2 Haziran 2025

*Sorumlu Yazar: Buse Güney

Email: buseguney193@gmail.com,

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1657815>

IMPAX ve NIMAX Takım Çeliklerinin Parmak Freze ile İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Karşılaştırılması

Bu çalışmada talaşlı imalatla kullanılan işleme parametrelerinin NIMAX ve IMPAX (DIN 1.2738) takım çeliklerinin talaşlı işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla belirlenen talaşlı işleme parametreleri olarak; kesme hızı (75, 100 ve 125 m/dak), ilerleme hızı (0,05, 0,10 ve 0,15 mm/dev) ve kesme koşuldur (Kuru ve Hibrit Nano Minimum Miktar Yağlama- HNMMY). Taguchi'nin L18 ($2^1 \times 3^2$) ortogonal dizisi ve Varyans Analizi (ANOVA) kullanılarak seçilen talaşlı işleme parametreleri, sistematik olarak incelenmiş ve optimize edilmiştir. Deneyisel sonuçlar, HNMMY koşulları altında yüzey pürüzlülüğünde önemli iyileşmeler olduğunu ortaya koymuştur. NIMAX çeliği için HNMMY koşulları yüzey pürüzlülüğünde %51,35'e varan bir iyileşme sağlarken kesme koşulu %81,6'lık bir oranla en etkili parametre olmuştur. Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, IMPAX çeliği için HNMMY koşulları, yüzey pürüzlülüğünde %40,2'ye varan bir iyileşme sağlamış; bu iyileşmede kesme koşulu %72 oranında belirleyici bir etken olmuştur. IMPAX çeliği için HNMMY koşulu, yüzey pürüzlülüğünde %40,2'ye varan bir iyileşme sağlamıştır. Ayrıca kesme koşulu, %72 oranında katkı sağlayarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre olmuştur. Bu durum, NIMAX takım çeliği için elde edilen sonuçlarla da paralellik göstermektedir. Deney sonuçları genel olarak incelendiğinde, NIMAX malzemesinin aynı kesme parametreleri altında IMPAX malzemesine kıyasla %43,68'e kadar daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri verdiği ortaya çıkmıştır. Yapılan deneyisel çalışma sonucunda; IMPAX ve NIMAX takım çeliği malzemeleri için optimum talaşlı işleme parametreleri, her iki malzeme için HNMMY kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı imalat, Takım çelikleri (IMPAX, NIMAX), Yüzey Pürüzlülüğü, Optimizasyon

1. GİRİŞ

Günümüzde plastik endüstrisi sürekli bir büyüme içindedir ve özellikle plastik enjeksiyon işlemleri için kullanılan plastik kalıpların imalatı için imalatı önemli bir yer almaktadır. Plastik kalıpların tüm gereksinimleri göz önünde bulundurulduğunda, enjekte edilen plastik malzemesi, ortaya çıkacak plastik parçanın işlenen kalıp yüzeyindeki hatalar da dahil olmak üzere, tüm detayları eksiksiz yansıttığından, plastik kalıpların imalatında kalıp yüzey bitirme işlemi ayrı bir önem oluşturur. Plastik enjeksiyon kalıplama, plastik parçaları üretmek için kullanılan işlemlerden sadece bir tanesidir [1-3].

Bununla birlikte, ekstrüzyon [4,5], termoform [6,7], şişirme [8,9] ve talaşlı işleme [10,11] gibi üretim yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasından plastik enjeksiyon kalıplama, hassas toleranslara ve yüksek kaliteli yüzey kalıplamalarına sahip kalıplar gerektiren plastik bileşenlerin üretilmesi için oldukça popüler bir yöntemdir.

Plastik kalıpların imalatında yaygın olarak kullanılan malzemeler DIN 1.2738 kodlu olarak bilinirler. Bu malzeme grubu içinde, malzeme üreticilerinin kendi deneyimlerine bağlı olarak

kimyasal içerikleri değişik ama aynı grup içinde yer alan takım çeliklerinin endüstriyel kullanıma sunulduğu bilinmektedir [1,2]. NIMAX ve IMPAX malzemeler de takım çeliği grubunda, DIN 1.2738 yer almakta, fakat kimyasal içerikleri farklılık göstermektedir. Bu malzemelerin talaşlı işlenebilirlik konusunda NIMAX ve IMPAX kodlu takım çeliklerinin iyi olduğu üretici firma tarafından belirtilmiştir. Plastik kalıpların imalatında yaygın olarak kullanılan bu iki takım çeliğinin farklı özelliği, sertlik değerlerindeki farklılıklarıdır; IMPAX takım çeliğinin sertlik değeri 290-340 HB iken, NIMAX takım çeliğinin sertlik 360-400 HB değerindedir [12, 13].

Plastik enjeksiyon kalıplarında, kalıbın yüzey kalitesi, plastik ürünün görünümü üzerindeki doğrudan etkileri nedeniyle önemli bir gerekliliktir ve bu nedenle kalıp üretiminde iyi yüzey kalitesi elde etmek için optimum işleme parametrelerinin seçilmesi oldukça önemlidir. Bu parametrelere genellikle operatör deneyimi veya pratik bilgilere dayalı olarak karar verilir [11,14]. Bu çalışmada, farklı koşullar altında pratik sonuçlar ortaya konmaya çalışılmıştır. Kalıp imalatında takım çeliklerinin işlenmesinde yaygın olarak tercih edilen frezeleme yönteminin uygulanması ile ortaya çıkan sonuçlar detaylı şekilde analiz edilmiş ve optimizasyon işlemi yapılmıştır.

Yüzey kalitesi konusunun ortaya konmasında, dört talaşlı işleme parametresinin (kesme hızı, ilerleme, radyal derinlik ve eksenel kesme derinliği) yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha büyük etkisi vardır [14]. Abou-El-Hossein ve arkadaşları, parmak frezelemede kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğine bağlı olarak kesme kuvvetlerini tahmin etmek için bir yanıt yüzey modeli kullanmışlardır [14]. Kara ve Öztürk, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını analiz etmiş ve kesme hızının sert tornalama koşullarında her ikisini de önemli ölçüde etkilediğini bulmuştur [15]. Literatürde, NIMAX ve IMPAX takım çeliklerinin talaşlı işlenebilirliğinde kesme hızı [16-19], ilerleme hızı [16-19], kesme derinliği [16-19], uç yarıçapı [16,17,19], kesme ortamı [16], radyal kesme derinliği ve ısıl işlem (soğuk ortamda bekletme) [18-19], seçilen kesici takımın özellikleri (kesici kaplaması, geometrisi ve kesme yolu) [17] gibi işlem parametreleri olduğu belirlenmiştir. Bu işleme parametreleri ile birlikte yüzey pürüzlülüğü [18-19], kesme kuvveti [16], malzeme kaldırma oranı [18], takım aşınması [18], takım ömrü [16, 19], güç tüketimi [16], talaşlı işleme süresi ve talaş özellikleri gibi işlenebilirlik kriterleri karakterize edilmiştir.

Kesme sıvılarının kullanımı talaşlı işleme süreçlerinde oldukça önemli bir rol oynar. İstenen yüzey kalitesini ve boyutsal işleme hassasiyetini

elde etmek için kullanılması konusunda olumlu sonuçlar ortaya konmuştur [20-22]. Günümüzde, talaşlı işleme operasyonları sırasında iş parçasını ve kesici takımı yağlamak/soğutmak ve nihai ürünün kalitesini artırmak için çeşitli kesme sıvıları kullanılmaktadır. Belirli işleme koşullarına göre uyarlanmış uygun bir yağlayıcı ve yöntem seçmek, takım aşınmasını azaltmak, yüzey kalitesini artırmak ve genel işleme süreci performansını sürdürmek için büyük önem teşkil etmektedir [20]. Minimum miktarda yağlama (MMY) teknolojisi, talaşlı imalatla artan verimlilikleri ve çevre dostu özellikleri nedeniyle giderek daha fazla tercih edilen bitkisel yağ bazlı yağlayıcıları kullanarak özellikle ilgili olduğunu kanıtlamaktadır [21]. Son yıllarda çok sayıda çalışmada farklı malzemelerin işlenebilirliğini artırmak için çeşitli soğutma teknikleri kullanılmıştır. Detaylı literatür taraması sonucunda NIMAX ve IMPAX takım çeliklerinin işlenmesinde kuru, HNMMY ve MMY gibi soğutma koşullarının araştırıldığı analiz edilmiştir [22].

Bu çalışmanın amacı, IMPAX ve NIMAX takım çeliği malzemelerin parmak freze ile işlenmesinde, üç farklı kesme hızı ve ilerleme hızı kullanılırken kesme koşullarının (kuru işleme ve HNMMY kullanılarak yapılan işleme) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu faktörleri sistematik olarak karşılaştırmak için Taguchi'nin $L_{18}(2^1 \times 3^2)$ ortogonal dizisi kullanılmıştır. Sonuçları analiz etmek için hem Taguchi yöntemi hem de Varyans Analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Bu deneysel tasarım, her bir parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini ve işleme süreçlerinin optimize edilebilmesi için değerli bilgiler sağlamıştır.

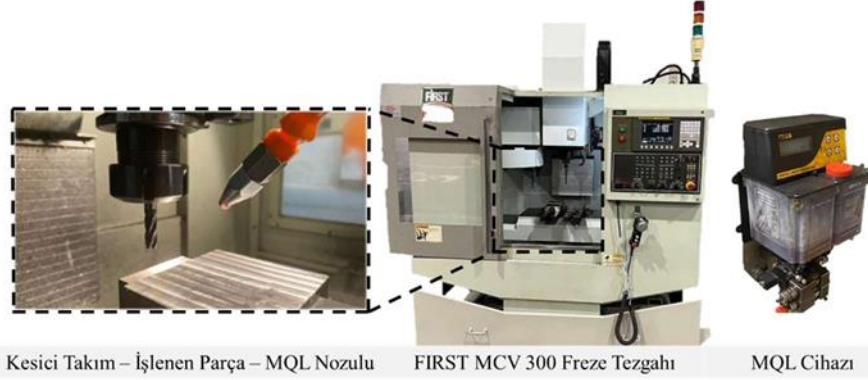
2. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, belirlenen iki takım çeliği malzemesinin kodu aynıdır ve DIN 1.2738 olarak standartlaştırılmıştır. Plastik enjeksiyon takım çeliğinin modifiye edilmiş türleri IMPAX ve NIMAX işleme operasyonlarını gerçekleştirmek için kullanılmıştır.

Belirlenen iki takım çeliği malzemesinin kimyasal içeriği Tablo 1'de verilmiştir. NIMAX iyi işlenebilirliğe ve çok iyi kaynak özelliklerine sahiptir ve IMPAX yüksek saflığa ve iyi homojenliğe sahiptir [12,13]. İş parçası malzemelerinin boyutları sırasıyla kalınlık, uzunluk ve genişlik olarak 30x100x100 mm'dir. Frezeleme işlemi sırasında işleme uzunluğu ve kesme derinliği 100 mm ve 1 mm'de sabit tutulmuştur.

Tablo 1. IMPAX ve NIMAX malzemelerin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri.

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Akma Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Sertlik (HB)
IMPAX	0,37	0,3	1,4	2,0	1,0	0,2	900	1020	330
NIMAX	0,1	0,3	2,5	3,0	0,3	0,3	785	1265	400



Şekil 1. Deneysel kurulum.

Deneysel çalışma parmak freze ile yapılmış ve deneylerde kullanılan First MCV-300 CNC freze tezgâhı Şekil 1’de verilmiştir. NIMAX ve IMPAX malzemeleri için MMY soğutma sisteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm deneyler için karbür parmak freze (K40) kaplamasız kesici takım kullanılmıştır [22]. Kesici takım seçimi, ülkemizde yaygın kullanımı nedeniyle yapılmıştır. Kesici takımın çapı 8 mm ve diş sayısı 4’tür. Her deney için yeni bir kesici takım kullanılarak, kuru işleme ve HNMMY ile frezeleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Frezeleme işlemlerinde kullanılan HNMMY, ticari bir bitkisel bazlı kesme sıvısı olan Werte KT2000’e iki farklı mono-nanofluid eklenerek hazırlanmıştır. NanoGraphene Platelets (nGP) ve nano molibden disülfürün ($nMoS_2$) ağırlık yüzdesi oranı literatüre göre seçilmiştir [23,24]. Nanopartiküllerin oranı ağırlıkça %0,2 MoS_2 ve %0,8 nGP’dir. Bu nanopartiküllerin seçimi ilgili özelliklerine dayanmaktadır: $nMoS_2$, nGP’ye kıyasla daha üstün yağlama sağlarken, nGP, $nMoS_2$ ’den daha yüksek bir termal iletkenlik katsayısına sahiptir [25]. Hazırlanan kesme sıvısı, deneylerden önce Wise-Tis HG-15D model homojenizatörde 5000 rpm’de 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma sonrasında önemli bir sıcaklık artışı gözlemlenmemiş ve kesme sıvısı MMY cihazına aktarılmıştır. HNMMY uygulamak

için Werte STN 15 model MMY cihazı kullanılmıştır. Seçilen talaşlı işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemek için Mitutoyo Surftest SJ210 model yüzey pürüzlülüğü test cihazı kullanılarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçülmüştür. Toplam 15 adet yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülmüş ve ölçme işlemleri 5 adet başlangıç, 5 adet orta ve son talaşlı işlenmiş yüzeylerden alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ISO 4287:1997 standardına göre yapılmıştır. Ölçümlerde 0.5 mm/s, ve ölçme uzunluğu (λ_c) 0.8 mm olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, IMPAX ve NIMAX kalıp çelikleri için, iki seviyeli (2^1) kesme koşulu ve üç seviyeli (3^2) kesme hızı ve ilerleme hızı olmak üzere üç girdi parametresi için deney tasarımı Taguchi mix L18 ($2^1 \times 3^2$) dizisine göre yapılandırılmıştır. Deney yapılandırmasına ait girdi parametreleri ve parametrelerin seviyeleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneylerde kesme derinliği (1 mm), nozul açısı (30°), nozul mesafesi (30 mm) ve HNMMY akış hızı (60 ml/sa) sabit tutulmuştur. Her iki malzeme için 18 deney gerçekleştirilmiş ve malzemelerin sertlik değerlerinin aynı girdi parametreleri altında yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemek için yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür.

Tablo 2. Talaşlı işlemede girdi parametreleri ve seviyeleri

Seviye Parametre	1	2	3	Birim
Kesme Koşulu	Kuru	HNMMY	-	-
Kesme Hızı	75	100	125	m/dak
İlerleme Hızı	0,05	0,10	0,15	mm/dev

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Deneysel Sonuçlar

Talaşlı imalatla yüzey pürüzlülüğü kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, takım geometrisi ve kullanılan soğutma veya yağlama sisteminin türü gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu faktörler, kesici takım ile iş parçası arasındaki etkileşimi değiştirerek yüzey dokusunda değişikliklere yol açabilir [26,27]. Bu çalışmada, farklı işleme koşullarının yüzey kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, ortalama yüzey pürüzlülüğü birincil çıktı parametresi olarak seçilmiş ve kesme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen veriler üzerinde gerçekleştirilen ANOVA analizi ile her bir işleme parametresinin istatistiksel anlamlılığı ve katkı oranları belirlenmiştir. Sonuçlar, farklı malzemelerin ve kesme koşullarının performansını karşılaştırmaya odaklanarak en iyi yüzey kalitesinin elde edilebileceği koşulları belirlemek için analiz edilmiştir.

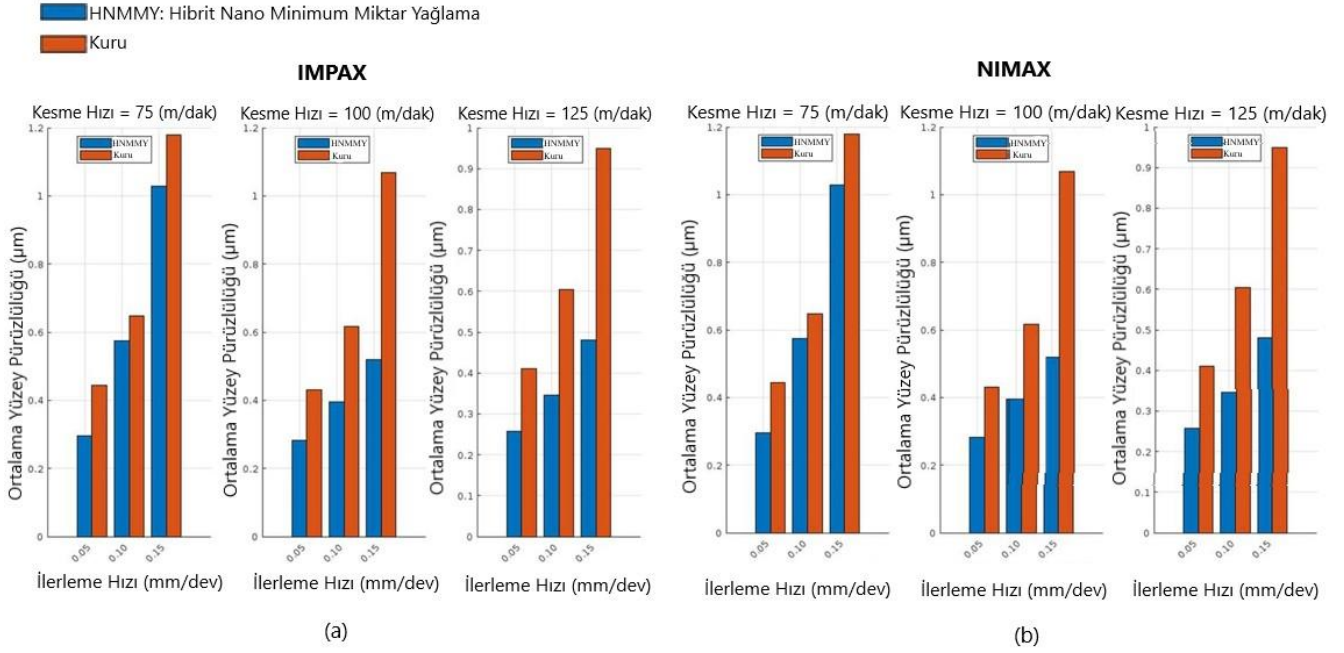
Deneysel çalışma ile NIMAX ve IMPAX takım çeliklerinin parmak freze ile işlenmesi üç farklı talaşlı işleme parametresi esas alınarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, Şekil 2’de grafiksel olarak sunulmuştur. Bu araştırmadan elde edilen sonuçlara dayanarak, yüzey pürüzlülüğü için en uygun talaşlı işleme parametrelerini belirlemek üzere çeşitli optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Şekil 2, IMPAX ve NIMAX malzemeleri için seçilen işleme parametrelerine göre ortalama yüzey pürüzlülüğünü göstermektedir. Her iki malzeme için de HNMMY koşullarının, literatürde belirtildiği üzere, daha düşük sıcaklık ve sürtünme nedeniyle kuru koşullardan daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağladığı görülmektedir [28-30]. Ayrıca, kesme hızının artırılması ve ilerleme hızının azaltılmasının yüzey kalitesini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Kesme hızının artırılması, takım ile iş parçası arasındaki temas süresini azaltarak daha düzgün talaş oluşmasını sağlamış ve bu sayede yüzeyde oluşan plastik deformasyon miktarını azaltarak daha düşük yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlandırmıştır. Benzer şekilde, ilerleme hızının azaltılması, takımın iş parçası üzerinde bıraktığı izlerin daha sık ve daha az belirgin olmasını sağlamış, bu da yüzey dalgalanmalarının azalmasına ve dolayısıyla yüzey kalitesinin iyileşmesine katkı sağlamıştır [31,32]. Bu sonuçlar, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki

etkilerini araştıran literatürdeki çalışmalarla tutarlıdır. HNMMY yönteminin kullanılmasının diğer tüm parametreler sabit tutulduğunda yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri $R_a = 0,258 \mu\text{m}$ olarak 16 numaralı deneyde 125 m/dak kesme hızı, 0,05 mm/dev ilerleme hızı ve HNMMY sisteminin uygulandığı durumda gözlemlenmiştir. Talaşlı işleme koşulu kuru olduğunda elde edilen en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri $R_a = 0,410 \mu\text{m}$ olup 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı altında 7 numaralı deneyde kaydedilmiştir. Tablo 3’te gösterildiği gibi diğer parametreler sabit tutulurken HNMMY kullanımı, yüzey pürüzlülüğünde minimum %11,48 ile maksimum %51,35 arasında değişen bir iyileşme ile sonuçlanmıştır. HNMMY kullanımından bağımsız olarak ilerleme hızı parametresinin artırılmasının yüzey pürüzlülüğünün üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğu da Tablo 3 ve Tablo 4’teki değerlerde görülmektedir. İki kalıp çeliği malzemesi karşılaştırıldığında aynı parametreler altında NIMAX malzemesinin %43,68’e kadar daha iyi yüzey pürüzlülüğü sergilediği bulunmuştur.

3.2. Taguchi Tasarımı ve Sinyal-Gürültü (Signal-to-Noise, S/N) Oranları

Taguchi yönteminde “sinyal-gürültü oranı” (Signal-to-Noise, S/N) kalite özelliklerinin varyasyonunu azaltmak ve istenen hedefe ulaşmak için kullanılan önemli bir metriktir. S/N oranları, kontrol faktörlerinin performans üzerindeki etkisini değerlendirmek için kullanılır ve genellikle üç farklı kategoriye ayrılır: daha büyük daha iyidir (Larger is Better), nominal daha iyidir (Nominal is Better) ve daha küçük daha iyidir (Smaller is Better) [33,34]. Bu çalışmada performans kriteri olarak minimize edilmek istenen yüzey pürüzlülüğü ölçüldüğünden, her iki deney malzemesi için sinyal-gürültü oranı “daha küçük daha iyidir” (Smaller is Better) kategorisine göre değerlendirilmiş ve sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Sinyal-gürültü oranı (S/N) değerleri özellikle Taguchi yöntemince yaygın olarak kullanılan bir performans ölçütüdür. Bu S/N değerleri sistemin istenen değişken olan sinyalden ve istenmeyen değişken olan gürültüden ne kadar etkilendiğini gösterse de S/N değerleri yüksek olduğunda sistem tepkisinin gürültüden daha az olduğunu gösterdiğinden daha iyi olarak kabul edilir.



Şekil 2. (a) IMPAX malzemesinin parmak freze ile Kuru ve HNMMY koşullarında işlenmesi sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (b) NIMAX malzemesinin parmak freze ile Kuru ve HNMMY koşullarında işlenmesi sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Tablo 3. IMPAX malzeme için deney sonuçları.

Deney No	Gerçek Değerler						S/N oranları	
	Kesme Koşulu	Kesme Hızı (m/dak)	Hızı	İlerleme Hızı (mm/dev)	Hızı	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Pürüzlülüğü	SNRA1
1	Kuru	75		0,05		0,680		3,3498
2	Kuru	75		0,1		0,719		2,8634
3	Kuru	75		0,15		1,232		-1,8146
4	Kuru	100		0,05		0,600		4,4370
5	Kuru	100		0,1		0,665		3,5479
6	Kuru	100		0,15		1,193		-1,5328
7	Kuru	125		0,05		0,548		5,2301
8	Kuru	125		0,1		0,634		3,9628
9	IMPAX Kuru	125		0,15		0,989		0,0936
10	HNMMY	75		0,05		0,525		5,5956
11	HNMMY	75		0,1		0,600		4,4370
12	HNMMY	75		0,15		1,078		-0,6546
13	HNMMY	100		0,05		0,502		5,9946
14	HNMMY	100		0,1		0,580		4,7314
15	HNMMY	100		0,15		0,907		0,8459
16	HNMMY	125		0,05		0,349		9,1358
17	HNMMY	125		0,1		0,541		5,3441
18	HNMMY	125		0,15		0,805		1,8868

Tablo 4. NIMAX malzeme için deney sonuçları.

Deney No	Gerçek Değerler							S/N oranları
	Kesme Koşulu	Kesme Hızı (m/dak)	Hızı	İlerleme (mm/dev)	Hızı	Yüzey (µm)	Pürüzlülüğü	SNRA1
1	Kuru	75		0,05		0,444		7,0499
2	Kuru	75		0,1		0,648		3,7628
3	Kuru	75		0,15		1,178		-1,4229
4	Kuru	100		0,05		0,430		7,3407
5	Kuru	100		0,1		0,617		4,1943
6	Kuru	100		0,15		1,068		-0,5714
7	Kuru	125		0,05		0,410		7,7390
8	Kuru	125		0,1		0,605		4,3649
9	NIMAX Kuru	125		0,15		0,950		0,4455
10	HNMMY	75		0,05		0,296		10,5709
11	HNMMY	75		0,1		0,574		4,8218
12	HNMMY	75		0,15		1,029		-0,2483
13	HNMMY	100		0,05		0,282		10,9813
14	HNMMY	100		0,1		0,396		8,0388
15	HNMMY	100		0,15		0,520		5,6866
16	HNMMY	125		0,05		0,258		11,7676
17	HNMMY	125		0,1		0,346		9,2157
18	HNMMY	125		0,15		0,480		6,3691

Tablo 5. IMPAX malzemenin Sinyal-gürültü oranı için yanıt tablosu.

Seviye	Kesme Koşulu	Kesme Hızı	İlerleme Hızı
1	4,1463	2,2961	5,6238
2	2,2375	3,0040	4,1478
3		4,2755	-0,1959
Delta	1,9088	1,9794	5,8198
Sıralama	3	2	1

Tablo 6. NIMAX malzemenin Sinyal-gürültü oranı için yanıt tablosu

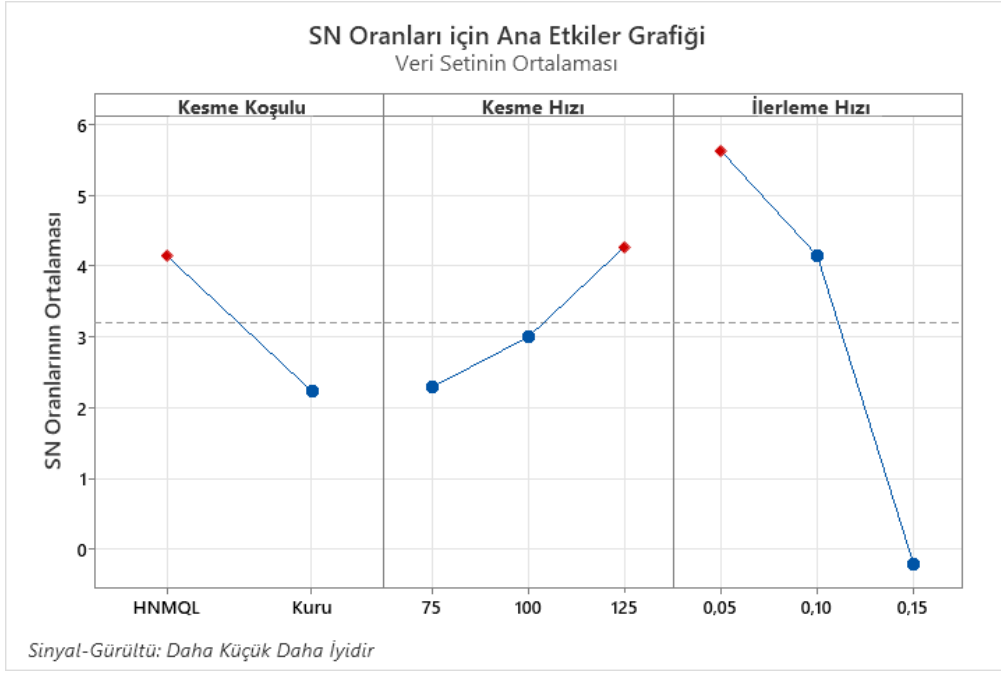
Seviye	Kesme Koşulu	Kesme Hızı	İlerleme Hızı
1	7,467	4,089	9,242
2	3,656	5,945	5,733
3		6,650	1,710
Delta	3,811	2,561	7,532
Sıralama	2	3	1

IMPAX ve NIMAX takım çelikleri için hesaplanan Sinyal-gürültü (S/N) oranları için yanıt tablosu Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Tablolarda verilen her bir seviye, ilgili girdi parametresinin deney tasarımındaki farklı ayarlarını temsil etmektedir. Belirtilen seviyeler, kesme ve ilerleme hızı parametreleri için düşük, orta ve yüksek düzeyleri; kesme koşulu parametresi için ise

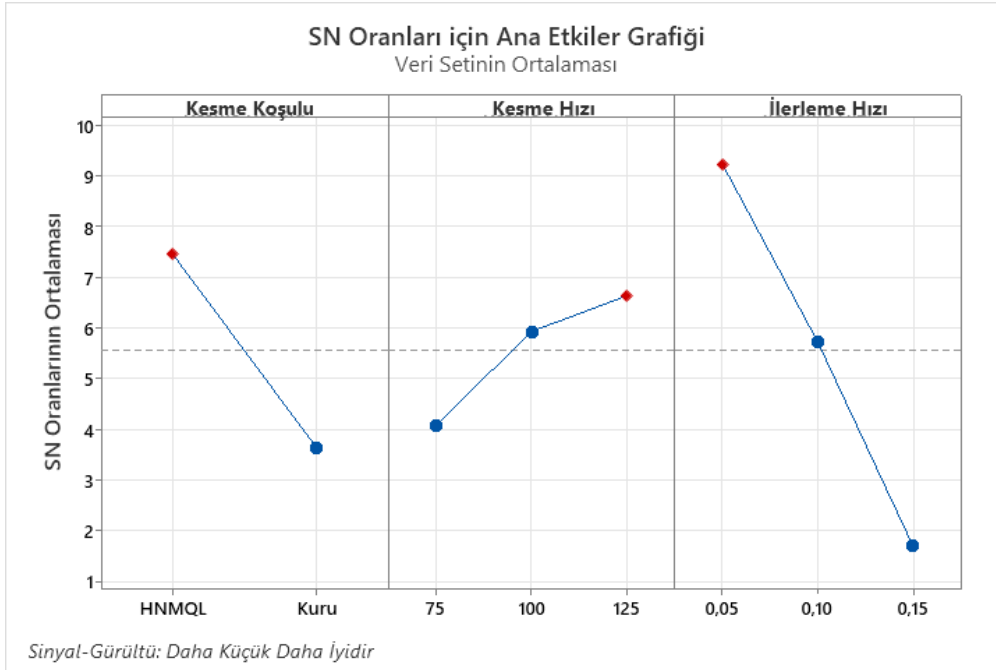
kuru ve HNMMY koşullarını temsil etmektedir. Delta, her bir faktör için en yüksek ve en düşük Sinyal-gürültü (S/N) oranları arasındaki farkı ve her bir faktörün yanıt değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Son olarak, sıralama her bir faktörün göreceli önemini belirler; yanıt değişkeni üzerinde en büyük etkiye sahip faktör 1 ve en az etkiye sahip faktör 3 olarak sıralanır [35], [36].

$$S/N \text{ Oranı} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

S/N oranları, yüzey pürüzlülüğü azaldıkça oranların arttığı ve yüzey pürüzlülüğü arttıkça oranların azaldığı “küçük olan daha iyidir” kriterine göre Roy tarafından belirtilen Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır [34]. Tablo 3'teki yüksek S/N oranları sistem performansının daha istikrarlı olduğunu ve gürültüden daha az etkilendiğini göstermektedir. Örneğin, Tablo 3'te gösterildiği gibi IMPAX malzeme için 75 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızıyla HNMMY koşulları altında 5,59563'lük bir S/N oranı mükemmel olarak kabul edilir. Düşük S/N oranları, yüzey pürüzlülüğünün istenenden daha yüksek olduğunu ve sistem performansının daha değişken olduğunu gösterir. Örneğin, kuru işlemede 75 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme hızı için değer -1,81456'dır, bu oldukça düşüktür ve kötü performansa işaret eder.



Şekil 3. IMPAX malzemesinin S/N oranları için Ana Etkiler Grafiği (Main Effects Plot).



Şekil 4. NIMAX malzemesinin S/N oranları için Ana Etkiler Grafiği (Main Effects Plot).

Her bir talaşlı işleme girdi parametresinin kalite karakteristiği üzerindeki etkileri S/N oranları kullanılarak analiz edilmiş ve her bir deney için hesaplanan S/N oranları Tablo 3'te verilmiştir. Her iki malzeme için S/N oranlarına ilişkin ana etki grafikleri Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur ve bu grafikler optimum kesme parametrelerini analiz

etmek için kullanılmıştır. IMPAX malzemesi için bu optimum giriş parametreleri HNMMY kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı olarak belirlenirken, NIMAX malzemesi için benzer optimum giriş parametreleri HNMMY kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı 0,05 mm/dev ilerleme hızı olarak belirlenmiştir.

3.3. ANOVA ve Faktörlerin Etkisi

Bu deneysel çalışmada, her bir önemli talashlı işleme parametresinin belirlenmesi ve bu parametrelerin deney sonunda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerini etkileme oranlarının tespit edilmesi için %95 güven düzeyinde ANOVA istatistiksel yöntemi kullanılmıştır [37]. ANOVA sonuç tablosundaki katkı oranı her bir parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin oranıdır, bu durumda yüksek katkı oranı güçlü bir etkiyi, tersi durumda ise düşük katkı oranı zayıf bir etkiyi gösterir. Sıralı Kareler Toplamı (Sequence Sum of Squares, “Seq SS”), bir faktörün modele eklendiği anda açıkladığı özgün varyans miktarını gösteren ve faktörlerin modele giriş sırasına bağlı olarak değişen bir ANOVA ölçütüdür [38-40]. Serbestlik derecesi (Degrees of Freedom, “DF”), modeldeki bağımsız bilgi miktarını sayısal olarak ifade eden ve ANOVA’da varyansın kaynaklara bölünmesinde temel rol oynayan bir ölçüttür [40,41]. “F-değeri”, grup ortalamaları arasındaki farklılıkları ölçen Gruplar Arası Ortalama Karenin, her bir grup içindeki değişkenliği ölçen Gruplar İçi Ortalama Kareye, yani gruplar arası varyansa oranı olarak hesaplanır. Tanım gereği, yüksek bir F-değeri, grup ortalamaları arasındaki varyansın grup içi varyanstan daha önemli olduğunu gösterir; bu da en az bir grup ortalamasının diğerlerinden farklı olduğu anlamına gelir [34,42,43]. “p-değeri”, grup ortalamaları arasında gözlenen farklılıkların rastgele varyasyondan kaynaklanma olasılığını gösterir ve 0,05’ten küçük bir p-değeri önemli farklılıklar olduğunu gösterirken, bu değerden büyük bir p-değeri önemli bir farklılık olmadığını gösterir [44].

Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuç tablosu, Tablo 7 incelendiğinde kesme hızı 3 seviyeli olduğundan Serbestlik Derecesi (DF) 2, Sıralı Kareler Toplamı (Seq SS) değeri 0,07939, F değeri 13,83, p-değeri 0,0007 ve son olarak katkı oranının 7 olduğu görülmektedir. Bu değerler

incelendiğinde kesme hızının IMPAX malzemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve p-değeri 0,05’ten küçük olduğu için kesme hızları arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde, kesme koşulları için ANOVA tablosu incelendiğinde bu girdi parametresinin 2 seviyesine sahip olması nedeniyle serbestlik derecesi değerinin 1 olduğu yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu ve p-değeri 0,05’ten küçük olduğu için kuru ve HNMMY koşulları altında istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Son olarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde %79,63 ile en büyük katkıya sahip olan ilerleme hızının p-değeri 0,05’ten çok daha küçüktür ve bu nedenle ilerleme hızı değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak oldukça anlamlıdır. Hata teriminin toplam varyansın %3,21’i gibi nispeten düşük bir oranda olması modelin iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen verilere dayanarak, IMPAX malzeme için yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmek amacıyla girdi parametreleri optimize edilebilir. İlerleme hızı, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinde en yüksek katkı oranına sahip olduğu için optimize edilmesi gereken en kritik girdi parametresidir.

NIMAX takım çeliği malzemesi için ANOVA sonuçları olan Tablo 7 incelendiğinde, tüm parametreler için hesaplanan p- değerinin 0,05’ten küçük olduğu ve dolayısıyla kesme koşulları, kesme hızları ve ilerleme hızları arasındaki farklılıkların yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri olduğu görülmektedir. NIMAX malzemesi için hata terimi yüksek ancak makul bir değerle toplam varyansın %13,02’sini oluşturmaktadır. Yine de en yüksek katkı IMPAX malzemesinde olduğu gibi %59,87’lik bir değerle ilerleme hızında görülmektedir. NIMAX malzemesi için kesme koşulu girdi parametresi %18,86’lık bir katkı ile en etkili ikinci parametredir. Buna karşılık kesme hızı %8,25’lik bir oranla en düşük katkıya sahiptir.

Tablo 7. IMPAX ve NIMAX malzemelerin yüzey pürüzlülüğü için ANOVA tablosu.

Malzeme	Kaynak	Seq SS	DF	F-Değeri	p-Değeri	% Dağılım
IMPAX	Kesme Koşulu	0,10475	1	36,49	0,00005	%9,76
	Kesme Hızı	0,07939	2	13,83	0,0007	%7,40
	İlerleme Hızı	0,85438	2	148,79	0,000000003	%79,63
	Hata	0,03445	12			%3,21
	Toplam	1,07298	17			%100,00
NIMAX	Kesme Koşulu	0,2612	1	17,38	0,001	%18,86
	Kesme Hızı	0,1143	2	3,8	0,05	8,25%
	İlerleme Hızı	0,8294	2	27,59	0,00003	59,87%
	Hata	0,1803	12			13,02%
	Toplam	1,3853	17			100,00%

3.4. Regresyon Analizi

Bu deneysel çalışmada, regresyon analizi için Minitab Statistical Software 22 programı kullanılmış ve regresyon denklemleri Denklem 2 ve Denklem 3'te gösterilmiştir. Küçük olan daha iyidir kriterine göre, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için en düşük

katsayıya sahip parametre koşulları seçilmelidir. Verilen regresyon denklemlerine ait R^2 yani determinasyon katsayısı değerleri IMPAX ve NIMAX malzeme için sırasıyla %96,79 ve %86,98'dir. R^2 değeri modelin, toplam varyansın yüzde kaçını açıkladığını göstermektedir.

$$\text{IMPAX Yüzey Pürüzlülüğü } (\mu\text{m}) = 0.7304 + 0.0763 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{Kuru}} - 0.0763 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{HNMMY}} + 0.0755 * \text{Kesme Hızı}_{75} + 0.0107 * \text{Kesme Hızı}_{100} - 0.0862 * \text{Kesme Hızı}_{125} - 0.1964 * \text{İlerleme Hızı}_{0.05} - 0.1074 * \text{İlerleme Hızı}_{0.10} + 0.3038 * \text{İlerleme Hızı}_{0.15} \quad (2)$$

$$\text{NIMAX Yüzey Pürüzlülüğü } (\mu\text{m}) = 0.5851 + 0.1205 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{Kuru}} - 0.1205 * \text{Kesme Koşulu}_{\text{HNMMY}} + 0.1098 * \text{Kesme Hızı}_{75} - 0.0330 * \text{Kesme Hızı}_{100} - 0.0768 * \text{Kesme Hızı}_{125} - 0.2317 * \text{İlerleme Hızı}_{0.05} - 0.0540 * \text{İlerleme Hızı}_{0.10} + 0.2857 * \text{İlerleme Hızı}_{0.15} \quad (3)$$

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kuru ve HNMMY koşulları altında parmak freze ile talaşlı işlenmesi sırasında NIAMX takım çeliğinin yüzey pürüzlülüğündeki değişimleri göstermiştir. Ayrıca sonuçlar aynı parametreler altında IMPAX takım çeliğinin yüzey pürüzlülüğü yanıtları ile karşılaştırılmıştır. Bulgular aşağıdaki gibidir:

1. Kuru kesme koşuluyla karşılaştırıldığında, HNMMY kesme koşulunun kullanılması sonucunda yüzey pürüzlülüğünü ortalama %36,22 oranında azaltmıştır.
2. IMPAX takım çeliği malzemesi için ANOVA sonuçlarında yüzey pürüzlülüğü üzerinde %79,63 ile en yüksek katkı oranına sahip girdi parametresinin ilerleme hızı olduğu ve benzer şekilde NIMAX takım çeliği için de ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri için en yüksek katkı oranının %59,87 değeri ile ilerleme hızı parametresinde olduğu görülmüştür.
3. Geliştirilen matematiksel model, deneylerde kullanılmayan kesme parametreleri seviyeleri için yüzey pürüzlülüğü değerlerini tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır. Tahmin edilen bu sonuçlara göre, HNMMY kesme koşulu, 125 m/dak kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı kombinasyonunun en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini verdiği görülmüştür. Benzer şekilde, NIMAX malzemesi için de aynı parametre kombinasyonu en uygun yüzey kalitesi sonuçlarını vermiştir. Bu bağlamda, her iki malzeme açısından optimum performans sağlayan kesme parametrelerinin örtüştüğü söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmaya sağladığı destek ve kesici takımların temini için Fatih Çakıroğlu'na (CKR Kesici Takımlar Sanayi ve Dış Ticaret Ltd. Şirketi – İstanbul/Türkiye) teşekkür ederler.

COMPARISON OF SURFACE ROUGHNESS IN END MILLING OF IMPAX AND NIMAX TOOL STEELS

In this study, the effects of cutting parameters used in machining on the surface roughness of NIMAX and IMPAX (DIN 1.2738) tool steels were investigated. The cutting parameters evaluated were cutting speed (75, 100 and 125 m/min), feed rate (0.05, 0.10 and 0.15 mm/rev) and cutting condition (Dry and Hybrid Nano Minimum Quantity Lubrication – HNMQL). These parameters were systematically investigated and optimized using Taguchi's L18 ($2^1 \times 3^2$) orthogonal array and Analysis of Variance (ANOVA). The experimental results revealed significant improvements and improvements in surface roughness under HNMQL conditions. For NIMAX steel, HNMQL conditions provided an improvement of up to 51.35% in surface roughness, while the cutting condition was the most effective parameter with a rate of 81.6%. When evaluated comparatively, HNMQL conditions for IMPAX steel provided an improvement of up to 40.2% in surface roughness; cutting condition was the determining factor in this improvement by 72%. For IMPAX steel, the HNMMY condition provided an improvement of up to 40.2% in surface roughness. In addition, the cutting condition was the most effective parameter on surface roughness with a contribution of 72%. This is in parallel with the results obtained for NIMAX steel. When the experimental results are analyzed in general, it is seen that NIMAX material gives up to 43.68% lower surface roughness values compared to

IMPAX material under the same cutting parameters. As a result of the study, the optimum input parameters for IMPAX and NIMAX materials were determined as HNMQL cutting condition, 125 m/min cutting speed and 0.05 mm/rev feed rate for both materials.

Keywords: Machining, Tool steels (IMPAX, NIMAX), Surface Roughness, Optimization

KAYNAKLAR

1. Mesquita, R.A. ve Schneider, R.S.E., *Tool Steel Quality and Surface Finishing of Plastic Molds*, Exacta, 8 (2011) 3, 307-318.
2. Dang, X.-P., *General Frameworks for Optimization of Plastic Injection Molding Process Parameters, Simulation Modelling Practice and Theory*, 41 (2014) 15-27.
3. Chen, W.C., Nguyen, M.H., Chiu, W.H., et al., *Optimization of the Plastic Injection Molding Process Using the Taguchi Method, RSM, and Hybrid GA-PSO*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83 (2016) 1873-1886.
4. Sofuoğlu, H. ve Gedikli, H., *Physical and Numerical Analysis of Three Dimensional Extrusion Process*, Computational Materials Science, 31 (2004) 1-2, 113-124
5. Mu, Y., Zhao, G., Chen, A., Wu, X., *Modeling and Simulation of Polymer Melts Flow in the Extrusion Process of Plastic Profile with Metal Insert*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67 (2013) 629-646.
6. O'Connor, C.P.J., Martin, P.J., Menary, G., *Viscoelastic Material Models of Polypropylene for Thermoforming Applications*, International Journal of Material Forming, 3 (2010) 599-602.
7. Gaspar-Cunha, A., Costa, P., Galuppo, W.D.C., Duarte, F., Costa, L., *Multi-Objective Optimization of Plastics Thermoforming*, Mathematics, 9 (2021) 1760-1780.
8. Schmidt, F., Agassant, J.-F., Bellet, M., *Experimental Study and Numerical Simulation of the Injection Stretch/Blow Molding Process*, Polymer Engineering and Science, 38 (1998) 9, 1399-1412.
9. Laroche, D., Kabanemi, K.K., Pecora, L., Diraddo, R.W., *Integrated Numerical Modeling of the Blow Molding Process*, Polymer Engineering and Science, 39 (1999) 1223-1233.
10. Hamdi, A., Furkan, Y., Alper, U., Hammoudi, U., *Multi-Objective Analysis and Optimization of Energy Aspects During Dry and MQL Turning of Unreinforced Polypropylene (PP): An Approach Based on ANOVA, ANN, MOWCA, and MOALO*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 128 (2023) 4933-4950.
11. Hamdi, A., Furkan, Y., Alper, Y., Sidi, U., Merghache, M., *Investigation of MQL and CNC Turning Parameters on the Machinability of Unreinforced Polypropylene: Study of Surface Roughness, Temperature, and Specific Cutting Energy*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2024) 717-730.
12. Internet: Uddeholm. Impax Supreme. Retrieved from <https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/41/2017/10/Impax-Supreme-eng.pdf>, Erişim Tarihi: Temmuz 10, 2024.
13. Internet: Uddeholm Nimax Technical Data Sheet. Retrieved from https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/46/2017/11/Uddeholm_nimax-eng_p_12_1612_e7.pdf, Erişim Tarihi: Temmuz 10, 2024.
14. Abou-El-Hossein, K.A., Kadirgama, K., Hamdi, M., Benyounis, K.Y., *Prediction of Cutting Force in End-Milling Operation of Modified AISI P20 Tool Steel*, Journal of Materials Processing Technology, 182 (2007) 1-3, 241-247.
15. Fuat, K., Öztürk, B., *Comparison and Optimization of PVD and CVD Method on Surface Roughness and Flank Wear in Hard Machining of DIN 1.2738 Mold Steel*, Sensor Review, 1 (2018) 24-33.
16. Gupta, A., Singh, H., Aggarwal, A., *Taguchi-Fuzzy Multi Output Optimization (MOO) in High-Speed CNC Turning of AISI P-20 Tool Steel*, Expert Systems with Applications, 38 (2011) 6822-6828.
17. Reddy, B.S., Kumar, J.S., Reddy, K.V.K., *Optimization of Surface Roughness in CNC End Milling Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm*, International Journal of Engineering, Science and Technology, 3 (2011) 102-109.
18. Mukkoti, V.V., Mohanty, C.P., Gandla, S., Sarkar, P., P, S.R., Dhanraj, B., *Optimization of Process Parameters in CNC Milling of P20 Steel by Cryo-Treated Tungsten Carbide Tools Using NSGA-II*, Production & Manufacturing Research, 8 (2020) 291-312.
19. Vardhan, M.V., Mohanty, C.P., Dhanraj, B., *Experimental Study on Parameters of P-20 Steel in CNC Milling Machine*, Journal of

- Physics: Conference Series, 1495 (2019) 1-9.
20. Hamdi, A., Yapan, Y.F., Uysal, A., Merghache, S.M., *The Effects of Minimum Quantity Lubrication Parameters on the Lubrication Efficiency in the Turning of Plastic Mold Steel*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 132 (2024) 5803-5821.
 21. Zhang, X., Li, C., Zhou, Z., Liu, B., Zhang, Y., Yang, M., Gao, T., Liu, M., Zhang, N., Said, Z., Sharma, S., Ali, H.M., *Vegetable Oil-Based Nanolubricants in Machining: From Physicochemical Properties to Application*, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36 (2023) 1-39
 22. Iqbal, A., Dar, N.U., He, N., Khan, I., Li, L., *Optimizing Cutting Parameters in Minimum Quantity of Lubrication Milling of Hardened Cold Work Tool Steel*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 223 (2008) 43-54.
 23. Tougui, Y., Uysal, A., Emiroglu, U., et al., *Evaluation of MQL Performances Using Various Nanofluids in Turning of AISI 304 Stainless Steel*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115 (2021) 3983-3997.
 24. Saatçi, E., Yapan, Y.F., Uslu Uysal, M., & Uysal, A., *Orthogonal Turning of AISI 310S Austenitic Stainless Steel Under Hybrid Nanofluid-Assisted MQL and a Sustainability Optimization Using NSGA-II and TOPSIS*, Sustainable Materials and Technologies, 36 (2023) e00628.
 25. Zeng, X., Peng, Y., Lang, H., et al., *Probing the Difference in Friction Performance Between Graphene and MoS2 by Manipulating the Silver Nanowires*, Journal of Materials Science, 54 (2019) 540–551.
 26. Lou, M.S., Chen, J.F., Li, C.M., Liu, J.C.H., *Surface Roughness Prediction Technique for CNC End-Milling*, Journal of Industrial Technology, 15 (1999) 1-6.
 27. Kalpakjian, S., Schmid, S.R., Sekar, V., *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th edition, Pearson Publications, Singapore, 2013.
 28. Sharma, A.K., Tiwari, A.K., Dixit, A.R., *Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review*, J. of Cleaner Production, 127 (2016) 1–18.
 29. Sarıkaya, R., Güllü, H., *Taguchi Design and Response Surface Methodology Based Analysis of Machining Parameters in CNC Turning Under MQL*, J. of Cleaner Production, 65 (2014) 604–616.
 30. Dhar, N., Islam, S., Kamruzzaman, M., *Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear, Surface Roughness and Dimensional Deviation in Turning AISI-4340 Steel*, Gazi University Journal of Science, 20 (2010) 2, 23–32.
 31. Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A.G., Herrmann, C., *Metalworking fluids—Mechanisms and performance*, CIRP Annals, 57 (2015) 2, 605–628.
 32. Nalbant, M., Gökkaya, H., Sur, G., *Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning*, Materials & Design, 28 (2007) 4, 1379–1385.
 33. Risbood, K.A., Dixit, U.S., Sahasrabudhe, A.D., *Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process*, Journal of Materials Processing Technology, 132 (2003) 1–3, 203–214.
 34. Roy, R.K., *A Primer on the Taguchi Method*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 2010.
 35. Kurt, M., Hortomacioğlu, S., Mutlu, B., Köklü, U., *Minimization of the surface roughness and form error on the milling of free-form surfaces using a grey relational analysis*, Materiali in Tehnologije / Materials and Technology, 46 (3) (2012) 205–213.
 36. Krishankant, J.T., Bector, M., Kumar, R., *Application of Taguchi method for optimizing turning process by the effects of machining parameters*, Int. J. Eng. Adv. Technol., 2 (1) (2012) 263–274.
 37. Yan, J., Li, L., *Multi-objective optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality*, J. Clean. Prod., 52 (2013) 462–471.
 38. Penn State University. (n.d.). Sequential (or Extra) Sums of Squares | STAT 501. Available at <https://online.stat.psu.edu/stat501/lesson/6/6.3>
 39. Minitab. (n.d.). Analysis of variance table for Fit Regression Model and Linear Regression. Available at <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regressionmodel/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/>
 40. Minitab. (n.d.). Analysis of Variance table for One-Way ANOVA. Available at <https://support.minitab.com/en->

us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/one-way-anova/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/#:~:text=Sequential%20sums%20of%20squares%20are,the%20adjusted%20sums%20of%20squares

41. Penn State University. (n.d.). 13.2 - The ANOVA Table. Available at <https://online.stat.psu.edu/stat415/book/export/html/822>
42. Abdullah, T., Rao, P.S., Rao, P.S., Maqsood, Z., *Optimization of Cutting Parameters in CNC Turning by using Taguchi Method: A Review*, International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science, 5 (2019) 5, 1068-1072.
43. Samtaş, G., *Optimisation of cutting parameters during the face milling of AA5083-H111 with coated and uncoated inserts using Taguchi method*, Int. J. Machining Machinability Mater., 17 (2015) 3, 211-232.
44. Saini, S., Ahuja, I.S. & Sharma, V.S., *Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in hard turning of AISI H11 tool steel using ceramic tools*, Int. J. Precis. Eng. Manuf., 13 (2012), 1295–1302.