

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

The Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness and Theoretical Fatigue Life in Milling of P20S Plastic Mold Steel

Barış Özlü^{a*}

Submitted: 10.06.2022 Revised: 06.08.2022 Accepted: 13.08.2022 doi:10.30855/gmbd.0705018

ABSTRACT

Keywords: Compression P20S Steel, Milling, Surface Roughness, Fatigue Life, Surface Response Method

^{a*} Aksaray University,
Technical Sciences Vocational School,
Dept. of Machine and Metal Technology
68100-Aksaray, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8594-1234

*Corresponding author:
barisozlu@aksaray.edu.tr

In this study, it was aimed to determine the effects of theoretical fatigue life depending on surface roughness and surface roughness of cutting parameters in milling P20S plastic mold steel with different cutting parameters. For the statistical analysis of the data, the experimental design was determined as 18 experiments with the Central Composite Experiment design. As a result of the experiments, output parameters such as Ra, Rz, Sm and hardness were measured to evaluate the surface roughness and theoretical fatigue life. Fatigue life was calculated by using Rz, Sm and hardness values in the \sqrt{area} model and changes in theoretical fatigue life depending on cutting parameters were evaluated. As a result, highest theoretical fatigue life with lowest surface roughness has been detected as 0.188 μm and 507.796 Mpa at 220 m/min cutting speed, 0.05 mm/tooth feed and 0.5 mm cutting depth, respectively. It has been observed that increasing cutting speed and Depth of cut decreases with feed rate have a positive effect on surface roughness and theoretical fatigue life. According to the results of analysis of variance, the most effective cutting parameter for surface roughness and theoretical fatigue life was feed rate with 68.6% and 59.34%, respectively.

P20S Plastik Kalıp Çeliğinin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Teorik Yorulma Ömrüne Etkisi

ÖZ

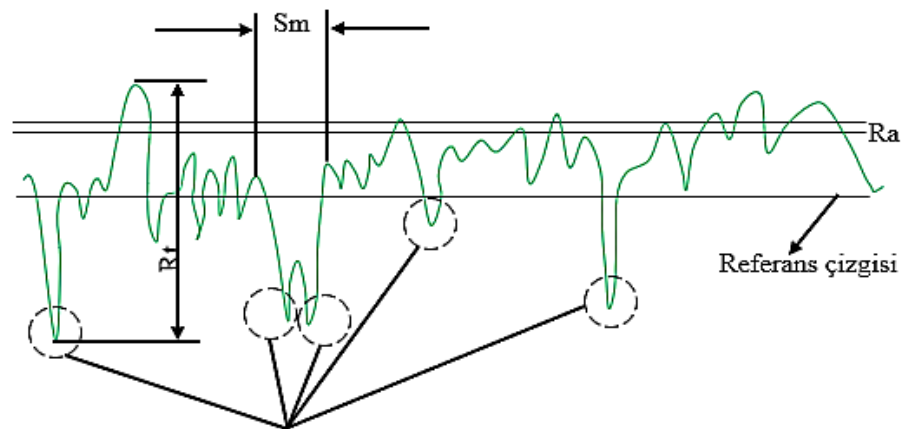
Bu çalışmada, P20S plastik kalıp çeliğinin farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı teorik yorulma ömrüne etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Verilerin istatistiksel analizi için deney tasarımı Merkezi Kompozit Deney tasarımı ile 18 deney olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünü ve teorik yorulma ömrünü değerlendirmek için Ra, Rz, Sm ve sertlik gibi çıktı parametreleri ölçülmüştür. Rz, Sm ve sertlik değerleri \sqrt{area} modelinde kullanılarak yorulma ömrü hesaplanmış ve kesme parametrelerine bağlı teorik yorulma ömründeki değişimler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, en düşük yüzey pürüzlülüğü ile en yüksek teorik yorulma ömrü 220 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0.5 mm kesme derinliğinde sırası ile 0.188 μm ve 507.796 Mpa olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızının artması ve ilerleme miktarı ile kesme derinliğinin azalması yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Varyans analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için en etkin kesme parametresi sırası ile %68.6 ve %59.34 oranıyla ilerleme miktarı olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektro erozyonlaşma, AISI H13 çeliği, Ölçü tamlığı, Taguchi, Anova

1. Giriş (Introduction)

Farklı teknikler ve koşullarda işlenmiş metal parçaların yüzey kalitesi ve pürüzlülük profili yüzeydeki gerilmeler, yorulma ömrü ve kırılma mekanizmaları üzerinde önemli etkiye sahiptir [1-2]. İşlenmiş parçalardaki ortalama yüzey pürüzlülük değerinin artması, yorulma ömrünü etkileyen en güçlü faktör olduğu rapor edilmiştir [3]. Özellikle işlenmiş parçalardaki yorulma çatlaklarının serbest yüzeylerde başladığı uzun zamandır bilinmektedir. Bunun nedeni, iş parçasının yüzey katmanlarının en yüksek yüklere ve çevresel etkilere maruz kalmasıdır. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi, çoğu durumda, işleme ile üretilen parçaların yüzey bütünlüğüne atfedilebilir [4-5]. İşlenen parçanın yüzeyinin tanımlanması ve kontrol edilmesi gereken iki önemli yön vardır. Birincisi, yüzeydeki geometrik düzensizlikler, ikincisi ise yüzey ve yüzey tabakasındaki metalürjik değişikliklerdir. Özellikle ikinci yön, yüzey bütünlüğü olarak adlandırılmıştır. Yüzey bütünlüğünü, yüzeyin geometrik değerleri ile yüzey katmanlarının artık gerilme, sertlik ve mikro yapısı gibi fiziksel özellikleri arasındaki ilişki olarak tanımlanmaktadır. Yüzey bütünlüğü, yüksek statik ve dinamik gerilmelere dayanması gereken yapısal bileşenlerin imalatında son derece önemli hale gelen işlenmiş yüzey ve yüzey altının kalitesini etkiler [6-8]. Yüzey pürüzlülüğüne bağlı yorulma dayanımının ilk kılcak çatlakların olduğu dip vadi bölgeleri Şekil 1'de görülmektedir.

Özellikle imal edilen makine elemanlarının, imalat türüne bağlı oluşan yüzey pürüzlülüğünün yorulma dayanımını nasıl etkileyeceğini belirlemek için yapılan teorik hesaplamalar yorulma ömrünün kestirimi için oldukça önemlidir [9].



Yüzey pürüzlülüğü profilinde yorulma hasar mekanizmasının kılcak çatlak olarak başladığı pürüzlülük vadi dip bölgeleri

Şekil 1. Yorulma ömrü için yüzey pürüzlülüğü profilinde kılcak çatlakların başladığı bölgeler (Regions where capillary cracks start in the surface roughness profile for fatigue life)

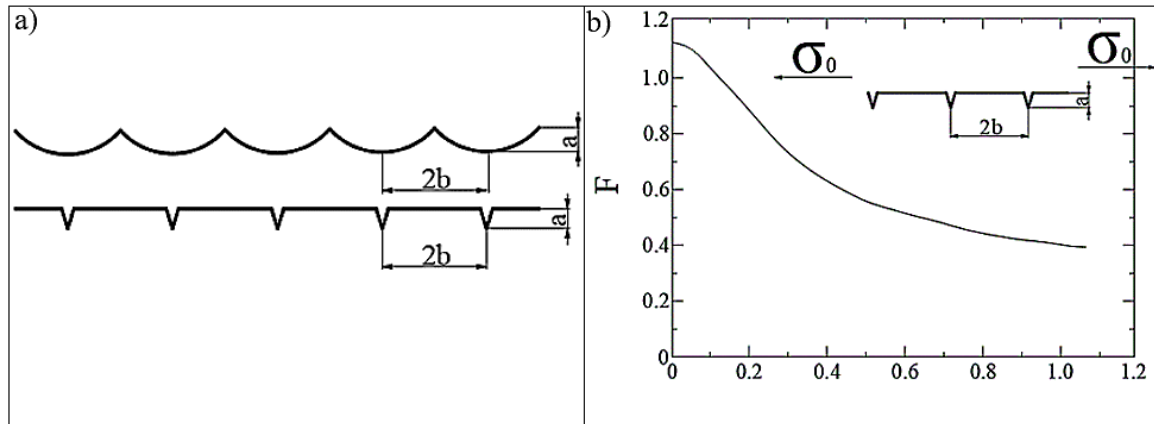
Yapılan literatür araştırmasında yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrüne etkisini değerlendirmek için deneysel ve teorik olmak üzere farklı çalışmalar yapılmıştır. Novovic vd. [10] 0,1 μm 'den fazla olan yüzey pürüzlülüğü Ra'nın, artık gerilme olmaksızın yorulma ömrü üzerinde dikkate değer bir etkiye sahip olacağını bildirmişlerdir. Yao vd. [11] yüksek kesme parametrelerinde Ti1023 malzemesinin frezelenmesinde iş parçalarının yüzey topografyası ve yorulma davranışı üzerindeki etkilerini sunmuşlardır. Yüzey gerilim konsantrasyon faktörüne dayalı olarak numunelerin yorulma ömrünün tahmin edilmesinin, yüzey pürüzlülüğüne dayalı olandan daha doğru olduğunu göstermiştir. Tekait [12] AISI 4050 çeliğinin farklı parametrelerde kesilmesi ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünün ve teorik yorulma ömrüne etkilerini sunmuştur. Çalışmanın sonucunda ilerleme hızının artması yüzey pürüzlülük değerlerinde artışa neden olduğu ve durumunda malzemenin yorulma ömrünü kısalttığını rapor etmiştir. Özerkan [9] alüminyum 6061-T913 alaşımının değişik kesme parametreleri ile tormalanması sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı yorulma ömürlerinin teorik olarak hesaplanmasını gerçekleştirmiştir. Kesme hızının artırıldığında yüzey pürüzlülüğünün azaldığını, ilerleme miktarının artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını bunlara bağlı olarak teorik hesaplamalar ile yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla yorulmanın daha düşük gerilmelerde, azalması ile yorulma hasarının daha yüksek gerilme değerlerinde meydana gelebileceğini bildirmiştir. Javidi vd. [4] 34CrNiMo6 çeliğinin tormalanmasında kesici takım uç radyüsü ve ilerleme hızının yüzey bütünlüğüne ve yorulma ömrünü nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Artık gerilmenin

yorulma ömrü üzerindeki etkisinin, yüzey pürüzlülüğü etkisinden daha belirgin olduğunu göstermektedir. Field ve Kahles [13] yüzey bütünlüğünü, yüzeyin geometrik değerleri ile yüzey katmanlarının artık gerilme, sertlik ve mikro yapısı gibi fiziksel özellikleri arasındaki ilişki olarak tanımlamaktadır. Yüzey bütünlüğü, yüksek statik ve dinamik gerilmelere dayanması gereken yapısal bileşenlerin imalatında son derece önemli hale gelen işlenmiş yüzey ve yüzey altı kalitesini etkiler. Murakami [14] yaptığı çalışmada deneysel ve teorik olarak geliştirdiği “√area” modeliyle yüzey pürüzlülük değerlerini kullanarak teorik yorulmayı hesaplamada kullanmıştır. Deneysel verilerle teorik hesaplamalar sonucu elde ettiği sonuçların birbiri ile örtüşüğünü rapor etmiştir. Yapılan literatür araştırmasında P20S kalıp çeliğinin farklı kesme parametrelerinde frezelenmesi sonucu yüzey pürüzlülüğünün teorik veya deneysel yorulma ömrüne etkisi üzerine çalışmanın yapılmadığı ya da çok sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada farklı kesme parametrelerde P20S kalıp çeliğinin frezelenmesi sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi ve yüzey pürüzlülük değerlerinin teorik yorulma ömrü üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğüne ve teorik yorulma ömrüne etki eden kesme parametreleri istatistiksel olarak (Yüzey Yanıt Metodolojisi (YYM) yöntemi) analizi yapılmıştır.

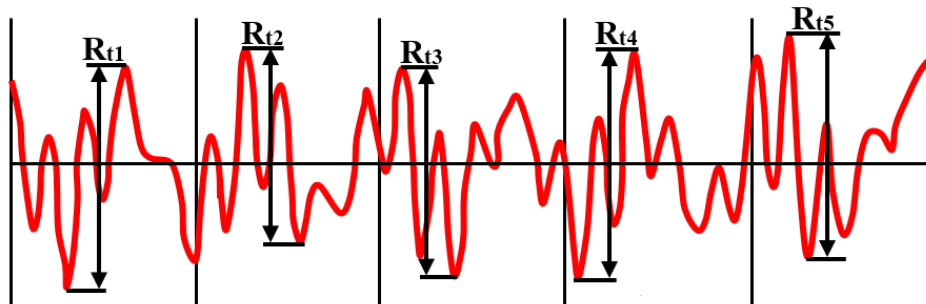
2. Teorik Yorulma Ömrü √area Modeli (Theoretical Fatigue Life √area Model)

Yapılan çalışmada, frezeleme sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı √area modeli kullanılarak teorik yorulma ömrü hesaplanmıştır. Teorik yorulma ömrünün hesaplanmasında periyodik yüzey pürüzlülüğü çentiğinin yorulma hasarını başlatan çatlak hasarı eşdeğeri Şekil 2a’da ve periyodik yüzey pürüzlülüğü çatlaklarının gerilme yoğunluğu faktörü K_t Şekil 2b’de verilmiştir. Şekil 2b’deki F yüzey pürüzlülüğünün tepe ve vadi profilinin derinliğine ve genişliğine bağlı geometrik bir düzeltme faktörü olarak tanımlanır. K_t Eşitlik 1’de iş parçasının vickers sertlik değerinin (HV) bir fonksiyonudur. Eşitlik 1’de verilen √area işlenen yüzeydeki pürüzlülük dalga yapısı sığ aralıkla derin çetik olarak ifade edilmiştir [9,14].



Şekil 2. (a) Periyodik yüzey pürüzlülüğü çentikleri ve eşdeğer çatlakları, (b) Periyodik yüzey çatlakları için gerilme yoğunluk faktörü ((a) Periodic surface roughness notches and equivalent cracks, (b) Stress intensity factor for periodic surface cracks))

$$K_t = \Delta K t h = (3.3) * 10^{-3} (HV + 120) * (\sqrt{area})^{1/3} \quad (1)$$

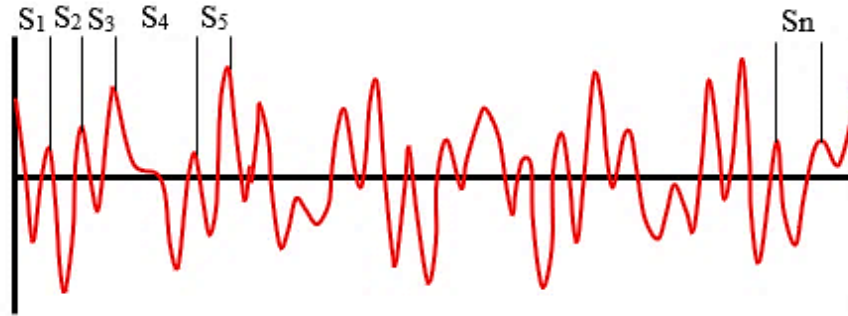


Şekil 3. Ölçüm skalasında referans çizgisine göre en yüksek tepe ve en düşük vadi değeri (The highest peak and lowest valley value relative to the reference line on the measurement scale)

İşlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü yorulmaya göre modellenirken Şekil 2'de pürüzlülük dalgasının genişliğini $2b$ ve derinliği ise a olarak gösterilmiştir. Yapılan çalışmada teorik yorulma ömrünün hesaplamasında dalga genişliği ve derinliği R_z ve S_m olarak ifade edilmiştir. Şekil 3'de ve Eşitlik 2'de verilen, R_z ölçüm skalasında ölçülen en yüksek tepe ve en düşük çukur değerlerinin ortalaması R_t olarak alınmıştır [9,14].

$$R_z(DIN) = \frac{R_{t1}+R_{t2}+R_{t3}+\dots+R_m}{n} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n R_{ti} \quad (2)$$

Pürüzlülük ölçümünde kullanılan ölçüm uzunluğundaki tepe noktaları arası mesafeyi S_n olarak ifade edilmektedir (Şekil 4). Bu da yorulma ömründe kullanılan $2b$ terimine karşılık gelmektedir [9,14].



Şekil 4. Pürüzlülük ölçüm uzunluğundaki tepe noktaları arası mesafe (The distance between the peaks in the roughness measurement length)

Teorik yorulma ömrü hesabında gerilim oranı ($R=-1$) olarak tanımlanmıştır. Burada tam değişken dinamik yorulma ömrü göz önünde bulundurulmuştur. İşlenen yüzeydeki pürüzlülük profilindeki dalgalarındaki hata boyutu " \sqrt{area} " olarak ifade edilmiştir. Yorulma ömrü formülünde yüzey pürüzlülüğündeki tepe ve çukur değerlerinin hangi aralıkta olduğu Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'de gösterilmiştir.

$a/2b < 0.195$ için;

$$(area)^{1/2}/2b \cong 2.97(a/2b) - 3.51(a/2b)^2 - 9.74(a/2b)^3 \quad (3)$$

$a/2b > 0.195$ için;

$$(area)^{1/2}/2b \cong 0.38 \quad (4)$$

Yüzey pürüzlülüğündeki çukur ve aralıklara bağlı yorulma ömrü hesabı Eşitlik 5'de \sqrt{area} değerlerinde yerine koyarak yapılabilir. Eşitlik 6'da kabul edilen yarılama ömrü σ_w ile gerilme hassasiyet faktörü α ile gösterilmiştir.

$$\sigma_w = (1.43(H_V + 120))/(area)^{1/6} [(1 - R)/(2)]^\alpha \quad (5)$$

$$\alpha = 0.226 + H_V 10^{-4} \quad (6)$$

Eşitlik 7'de gerilme oranı R olarak ve σ_m ortalama gerilmeyi göstermektedir.

$$R = \frac{\sigma_m - \sigma_w}{\sigma_m + \sigma_w} \quad (7)$$

\sqrt{area} modelindeki bir diğer parametre ise pürüzlülükteki süreksizlikten meydana gelecek gerilme yığımlarını tanımlanan gerilme şiddet faktörüdür. Çentik bölgesindeki bütün gerilme ve genlemelerin büyüklüğü bu faktörün bilinmesiyle belirlenebilir. Çatlağın ilerlemesi bu gerilme değerlerinin belli bir eşik değere ulaşması ile başlar.

3. MATERYAL VE METOT (Material and Method)

3.1. İş parçası, Takım Tezgâhı, Kesici Takım ve Ölçümler (Workpiece, Machine Tool, Cutting Tool and Measurements)

Yapılan çalışmada, iş parçası olarak ticari temin edilen P20S plastik kalıp çeliği seçilmiştir. Çalışmada kullanılan iş parçasının kimyasal bileşimi ağırlık yüzdesi olarak Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. P20S plastik kalıp çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Chemical composition of P20S plastic mold steel (% weight))

Elementler	C	Cr	Mn	Si	Mo	Ni	S	P
	Wt.%	0.40	1.95	1.45	0.30	0.20	0.39	0.08

Frezeleme denemeleri maksimum 6000 rpm iş mili hızına, iş mili motoru 18.5 kw güce ve Fanuc kontrol ünitesine sahip Hanssa YH 1600-A CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Walter firması tarafından üretilen WKP35S kalite gurubunda ve SDMT09T308-F57 geometriye sahip CVD yöntemi ile TiCN/Al₂O₃/TiN kaplı karbür kesici takım kullanılmıştır. Deneylere başlamadan önce ticari olarak temin edilen P20S plastik kalıp çeliği üzerinde üretim sırasında meydana gelebilecek hataların yüzey pürüzlülüğünü etkilememesi için iş parçasının yüzeyinden 1 mm talaş kaldırıldı. İşlenmiş yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin ölçümünde Mitutoyo (Surftest SJ-210) taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanıldı. Yüzey pürüzlülüğü işlenen yüzeylere paralel dört farklı noktadan yapılmıştır. Bu ölçümlerin aritmetik ortalamalarının hesaplanması ile ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değeri belirlendi.

3.2. Deney Tasarımı (Experimental Design)

Talaşlı imalat sektöründe ürün kalitesini artırmak ve maliyeti düşürmek için farklı optimizasyon teknikleri kullanılmaktadır [15]. Bu teknikler arasında en fazla kullanılanlardan biride yanıt yüzeyi metodudur (YYM). YYM, kesme parametreleri arasındaki etkileşimi ve ikinci dereceden etkileri geliştirmek ve analiz etmek için en etkili istatistiksel yöntemlerden biridir. İmalat ve işleme uygulamalarında nicel modeller geliştirmek için iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [16]. Bu bağlamda deneysel çalışmada kullanılan deney tasarımı Minitap 18 yazılımı ile yapılmıştır. Hazırlanan deney tasarımı Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri Tablo 3’de görülmektedir.

Tablo 2. Deney tasarımının hazırlanması (Preparation of the experimental design)

Faktör	Ad	Min.	Mak.	Düşük Kod	Yüksek Kod	Ortalama	Standart Sapma
A	Kesme Hızı, Vc, (m/dak)	100	220	-1 ↔ 100	+1 ↔ 220	160	46.02
B	İlerleme Miktarı, f, (mm/diş)	0.05	0.1	-1 ↔ 0,05	+1 ↔ 0.1	0.075	0.0192
C	Kesme Derinliği, ap, (mm)	0.5	1.5	-1 ↔ 0,50	+1 ↔ 1.5	1	0.3835

Tablo 3. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler ve değerleri (Parameters and values used in the experimental study. Parameters)

Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)	Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)
1	100	0.05	0.5	10	220	0.075	1
2	220	0.05	0.5	11	160	0.05	1
3	100	0.1	0.5	12	160	0.1	1
4	220	0.1	0.5	13	160	0.075	0.5
5	100	0.05	1.5	14	160	0.075	1.5
6	220	0.05	1.5	15	160	0.075	1
7	100	0.1	1.5	16	160	0.075	1
8	220	0.1	1.5	17	160	0.075	1
9	100	0.075	1	18	160	0.075	1

4. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

P20S kalıp çeliğinin CNC freze tezgahında işlenmesinde kesme parametrelerindeki değişime bağlı yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü değerlendirilmiştir. Ayrıca YYM ile kullanılarak kesme parametrelerindeki değişime bağlı yüzey pürüzlülüğünün ve teorik yorulma ömrünün analizi yapılmıştır. Tablo 4’de deneyler sonucu ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile teorik yorulma ömrü

için hesaplanan gerekli veriler verilmiştir.

Tablo 4. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile hesaplanmış yorulma ömür verileri (Fatigue life data calculated with measured surface roughness values)

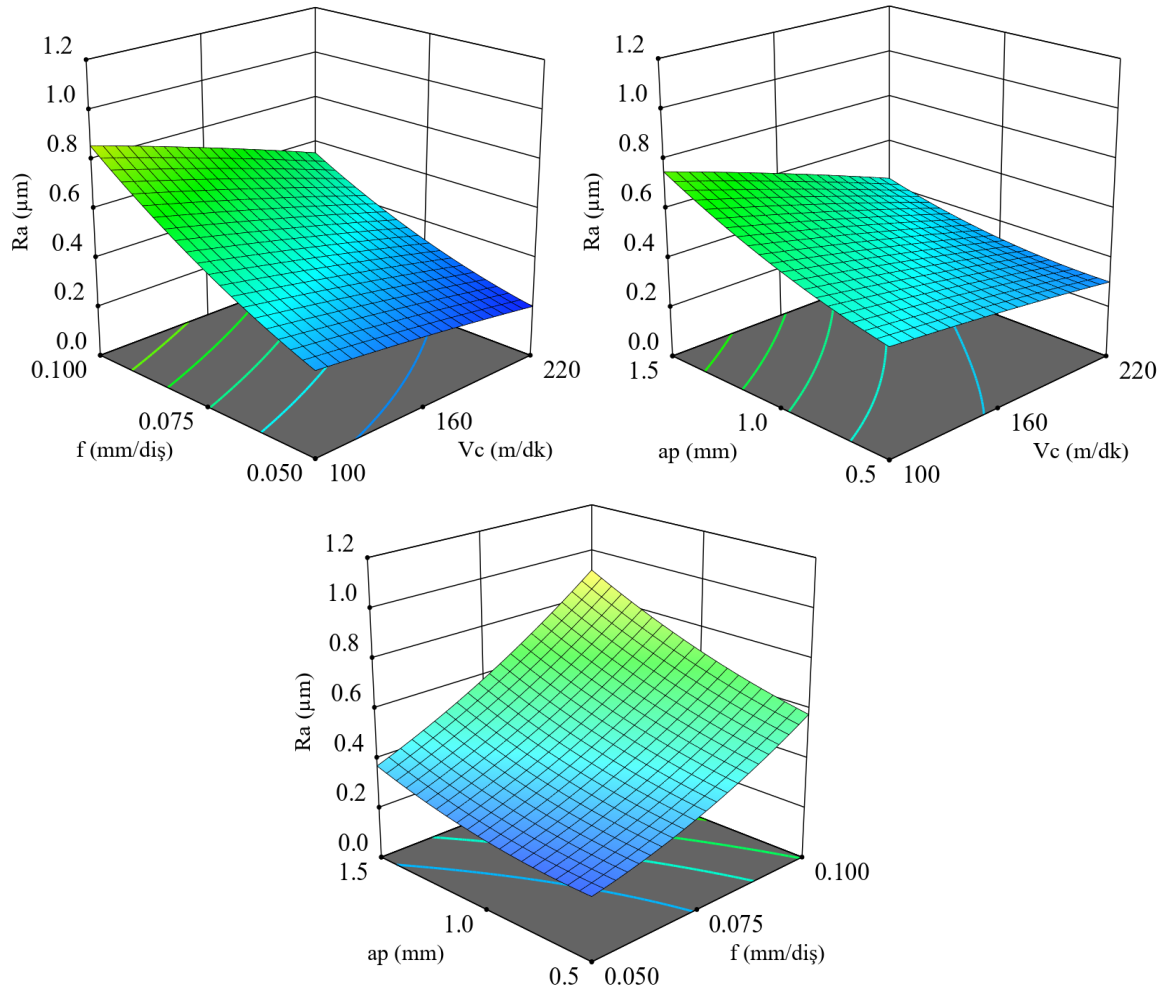
Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)	Rz (µm)	Sm (µm)	Ra (µm)	HV	\sqrt{area} (mm)	σ_w (Mpa)	Kth
1	100	0.05	0.5	1.313	69.448	0.279	308	3.808	489.777	2.206
2	220	0.05	0.5	1.055	60.625	0.188	308	3.066	507.796	2.052
3	100	0.1	0.5	3.827	108.416	0.655	308	10.846	411.375	3.126
4	220	0.1	0.5	2.747	97.845	0.512	308	7.867	433.990	2.809
5	100	0.05	1.5	2.339	96.061	0.455	308	6.733	445.390	2.667
6	220	0.05	1.5	1.398	72.229	0.286	308	4.052	484.732	2.252
7	100	0.1	1.5	7.147	148.203	1.152	308	19.855	371.936	3.825
8	220	0.1	1.5	4.284	109.262	0.684	308	12.070	404.107	3.240
9	100	0.075	1	3.075	99.581	0.564	308	8.771	426.192	2.913
10	220	0.075	1	1.826	74.828	0.359	308	5.256	464.160	2.456
11	160	0.05	1	1.528	73.923	0.303	308	4.421	477.743	2.318
12	160	0.1	1	5.137	110.117	0.718	308	14.307	392.816	3.429
13	160	0.075	0.5	1.909	75.933	0.393	308	5.490	460.812	2.492
14	160	0.075	1.5	3.14	102.854	0.614	308	8.961	424.673	2.934
15	160	0.075	1	1.729	74.553	0.445	308	4.985	468.271	2.413
16	160	0.075	1	1.894	75.049	0.437	308	5.446	461.429	2.485
17	160	0.075	1	1.828	76.787	0.443	308	5.266	464.011	2.457
18	160	0.075	1	1.901	77.194	0.468	308	5.470	461.080	2.489

4.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Surface Roughness)

Talaşlı imalat işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü en önemli çıktı parametrelerinden biridir. İşlenen parçanın yüzey kalitesi özellikle mekanik parçaların performansı ve üretim maliyetlerini doğrudan etkiler. Ayrıca yüzey pürüzlülüğündeki değişim işlenen parçalar üzerindeki gerilmeler, yorulma ömrü ve kırılma mekanizmaları üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek için optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi hayati önem taşımaktadır. [1,2,17,18]. Bu bağlamda farklı kesme parametrelerinde yapılan deneylerde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğündeki değişim Şekil 5’de verilmiştir.

Şekil 5’de kesme hızı ilerleme miktarı, kesme hızı kesme derinliği ve ilerleme miktarı kesme derinliği değişimlerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi verilmiştir. Yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü değerleri 0.188 µm ile 1.152 µm arasında değişmiştir. Genel olarak kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine neden olurken ilerleme miktarının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğu görülmüştür. 100 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0,5 mm kesme derinliğinde yüzey pürüzlülüğü 0.279 µm ölçülmüştür. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %32.62 oranında azalırken ilerleme miktarının 0.1 mm/diş çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %134.78 oranında artışı görülmüştür. Kesme hızı ile kesme derinliği değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimine bakıldığında; 100 m/dk kesme hızında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 0.1 mm/diş ilerleme miktarında yüzey pürüzlülüğü 0.655 µm ölçülmüştür. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %21.83 oranında azalırken kesme derinliğinin 1.5 mm artırılmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin %75.88 oranında artışı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde ilerleme miktarı ile kesme derinliği değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimine bakıldığında; 0.05 mm/diş ilerleme miktarında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 100 m/dk kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 0.279 µm ölçülmüştür. İlerleme miktarının 0.1 mm/diş kadar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değeri %134.77 oranında artarken kesme derinliğinin 1.5 mm çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülük değeri %63.1 oranında artışı görülmüştür.

Genel olarak yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü ağırlıklı olarak ilerleme miktarına, kesme derinliğine ve kesme hızına bağlı değişimler göstermiştir. Literatürde frezeleme çalışmalarında ortaya konduğu üzere kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileşeceği ancak ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin artışına bağlı yüzey pürüzlülüğünün artacağı bildirilmiştir [18-22]. Ayrıca yapılan deney sonuçlarına göre ilerleme miktarının artışına bağlı olarak Rz ve Sm değerlerinde de belirgin bir artışın olduğu görülmüştür.



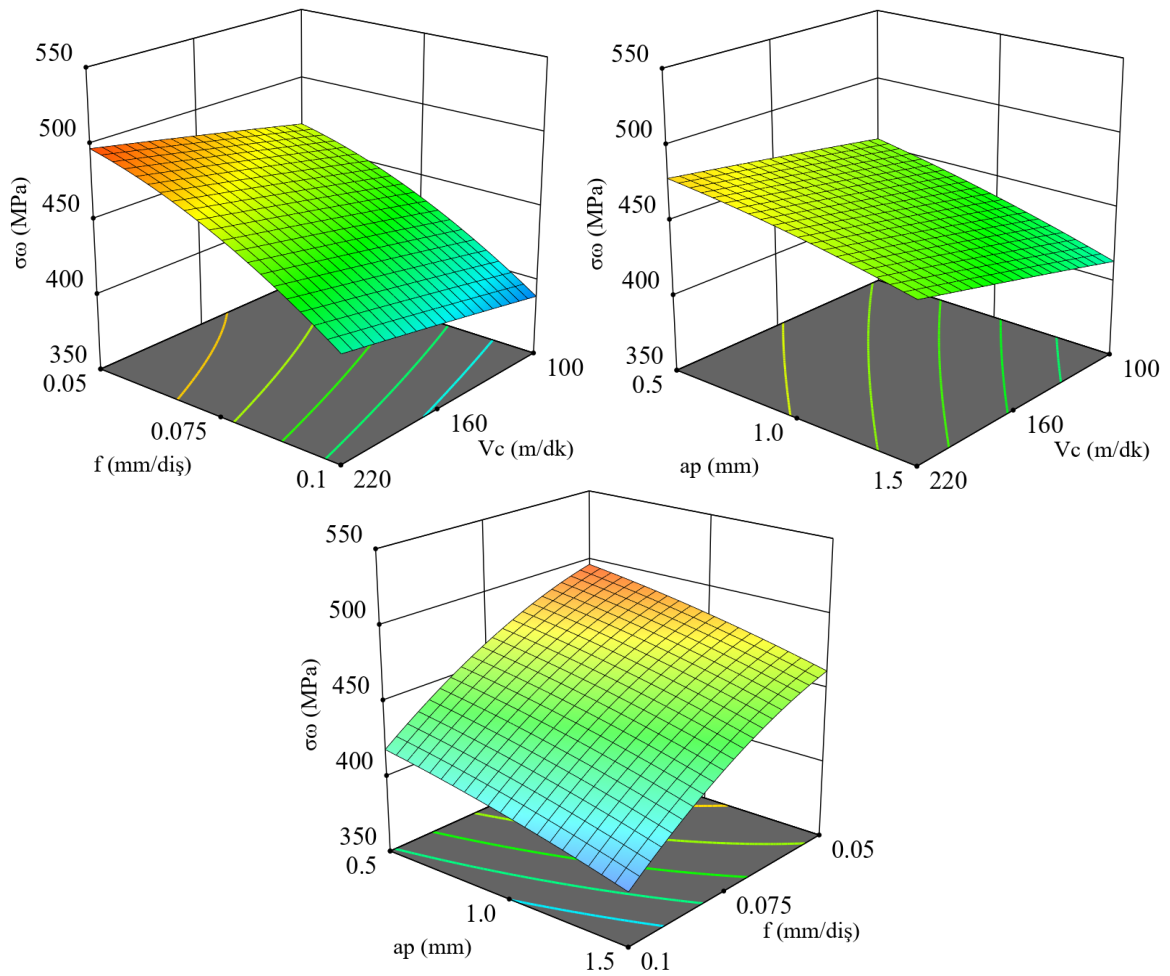
Şekil 5. Kesme parametrelerdeki değişime bağlı yüzey pürüzlülük değişimi (Surface roughness change depending on the change in cutting parameters)

4.2. Yüzey Pürüzlülüğüne Bağlı Olarak Teorik Yorulma Ömrünün Değerlendirilmesi (Evaluation of Theoretical Fatigue Life Based on Surface Roughness)

P20S plastik kalıp çeliğinin farklı kesme parametrelerinde frezelenmesi sonucu yüzey pürüzlülük ölçüm değerlerinden R_z , S_m ve mikrosertlik değerleri \sqrt{area} modelinde yerine konarak işlenen parça için teorik yorulma ömrü için gerilme ve eşik gerilme şiddet faktör değerleri hesaplanarak sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Yüzey pürüzlülük parametrelerine bağlı teorik yorulma ömründe, R_z yüzey profilindeki en yüksek tepe ve en düşük çukur arasındaki mesafe, S_m ise yüzey profilindeki dalga tepe noktaları arası mesafeyi ifade etmektedir. Yorulma hasarını harekete geçiren yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerinden R_z ve S_m \sqrt{area} modelinde en uygun yüzey pürüzlülük değerleri olarak kabul edilmektedir. Ayrıca deneyler sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile hesaplanan önemli başka bir faktörde eşik gerilme şiddetidir. Bu faktör pürüzlülükteki en yüksek tepe ile en düşük çukurda çatlakın tetiklenebileceği bölgedeki sınır kırılma tokluğunu (eşik gerilme şiddeti) ifade etmektedir. Başka bir deyişle kırılma tokluğu şiddeti aşıldığında çatlak meydana gelmeye başlayarak ilerleme yönünde hasar kendini gösterir [9, 23]. Tablo 4'te hesaplanan eşik gerilme şiddeti değerleri verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde en düşük eşik gerilme şiddeti 220 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0.5 mm kesme derinliğinde $2.052 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/3}$ iken en yüksek eşik gerilme şiddeti 100 m/dk kesme hızında, 0.1 mm/diş ilerleme miktarında ve 1.5 mm kesme derinliğinde $3.825 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/3}$ hesaplanmıştır.

Yüzey pürüzlülük değerlerine bağlı kesme parametrelerindeki değişim ile teorik yorulma ömrü arasındaki ilişki Şekil 5'de verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu teorik yorulma ömrü değerleri 371.936 Mpa ile 507.796 Mpa arasında değişiklik göstermiştir. Şekil 5'e bakıldığında kesme hızının

artması ve ilerleme miktarının azalması ile teorik yorulma ömrünün arttığı görülmüştür. 100 m/dk kesme hızında, 0.05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0.5 mm kesme derinliğinde teorik yorulma ömrü 489.777 Mpa hesaplanmıştır. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %3.68 oranında artarken ilerleme miktarının 0.1 mm/diş çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %16 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Kesme hızı ile kesme derinliği değişimine bağlı teorik yorulma ömründeki değişim incelendiğinde; 100 m/dk kesme hızında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 0.1 mm/diş ilerleme miktarında teorik yorulma ömrü 411.375 Mpa hesaplanmıştır. Kesme hızının 220 m/dk kadar çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %5.5 oranında artarken kesme derinliğinin 1.5 mm artırılmasıyla teorik yorulma ömrü %9.6 oranında azaldığı izlenmiştir. Benzer şekilde ilerleme miktarı ile kesme derinliği değişimine bağlı teorik yorulma ömründeki değişim incelendiğinde; 0.05 mm/diş ilerleme miktarında, 0.5 mm kesme derinliğinde ve 100 m/dk kesme hızında teorik yorulma ömrü 489.777 Mpa hesaplanmıştır. İlerleme miktarının 0.1 mm/diş kadar çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %16 oranında azalırken kesme derinliğinin 1.5 mm çıkarılmasıyla teorik yorulma ömrü %9.06 oranında azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Kesme parametrelerdeki değişime bağlı yüzey pürüzlülük değişimi (Surface roughness change depending on the change in cutting parameters)

Tablo 4, Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ancak teorik yorulma ömrü artış olduğu görülmüştür. Teorik yorulma ömründeki artış kesme hızındaki artışla yüzey pürüzlülüğünün azalmanın neden olmuştur. Böylelikle yüzey pürüzlülüğü ne kadar düşük olursa yorulma hasar mekanizmasını tetikleme olasılığı o kadar düşük olur. Bu durum işlenen parçalarda yorulma ömrünün yüksek gerilmelerde ortaya çıkmasına neden olacaktır. Elde edilen sonuçlar ve grafiklerle incelendiğinde ilerleme miktarının artışına paralel olarak yorulma ömrümde de artışa neden olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeninin ilerleme miktarının artışı ile işlenmiş yüzeylerde pürüzlülük değerlerini artırıcı yönde bir etkiye sahip olmasıdır [9,23]. Kısaca, kesme hızının artması, ilerleme miktarının ve kesme derinliğinin azalması yorulma ömrünü düşüreceği

yönde bir etki sağlayacağı söylenebilir.

4.3. Varyans Analizi (ANOVA) (Analysis of Variance (ANOVA))

Varyans analizi (ANOVA), deney tasarımındaki tüm kesme parametrelerini bireysel ve arasındaki etkileşimleri belirlemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [24,25]. $P>F$ değeri 0.05'ten küçük olduğunda model istatistiksel olarak anlam olduğu ve parametrenin yanıt üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir [26,27]. Yapılan çalışmada kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve teorik yorulma ömrüne etkilerini belirlemek için varyans analizi kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için varyans analiz sonuçları Tablo 5'de görülmektedir.

Tablo 5'deki varyans analiz sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü için Linear modelde kesme hızının ($V_c = 0.000 < 0.05$), ilerleme miktarının ($f = 0.000 < 0.05$), kesme derinliğinin ($a_p = 0.000 < 0.05$) etkileşimde kesme hızı*ilerleme miktarı ($V_c * f = 0.008 < 0.05$), kesme hızı*kesme derinliği ($V_c * a_p = 0.004 < 0.05$) ve ilerleme miktarı* kesme derinliği ($f * a_p = 0.004 < 0.05$) etkilerin anlamlı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Tablo 5'deki varyans analiz sonuçlarına göre teorik yorulma ömrü için Linear modelde kesme hızının ($V_c = 0.003 < 0.05$), ilerleme miktarının ($f = 0.000 < 0.05$) ve kesme derinliğinin ($a_p = 0.001 < 0.05$) etkilerin anlamlı olduğu görülmektedir. Varyans analizleri sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü üzerine katkı oranı (%) değeri Şekil 6'daki pasta grafiğinde verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için en etkin kesme parametresi sırası ile %68.6 ve %59.34 oranıyla ilerleme miktarı olmuştur. Varyans analizi sonucu elde edilen hata oranı %10'nun altındaysa deneysel hata kabul edilebilir [28]. Şekil 6 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için hata oranları sırası ile %4.44 ve %1.2 olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için hata oranları %10 altında olduğu için hesaplanan ikinci derece denklemin doğruluğu kabul edilebilir seviyededir.

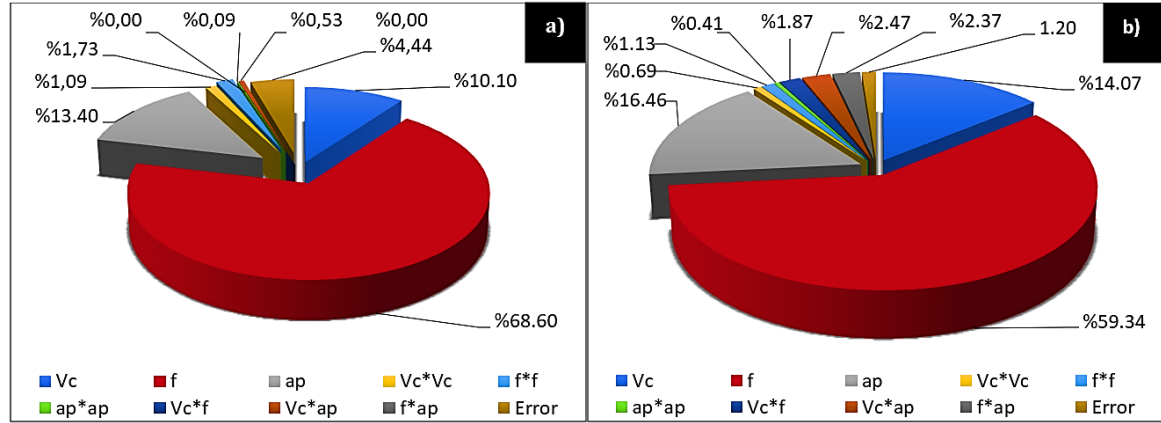
Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için elde edilen ikinci derece denklemler sırası ile Eşitlik 8 ve Eşitlik 9'da verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için elde edilen ikinci derece denklemler için R^2 sırası ile %98.8 ve %95.56 olarak elde edilmiştir. Elde edilen ikinci derece denklemlerin R^2 büyük çıkması bu denklemin doğruluk oranını artırmaktadır [29].

$$Ra(\mu m) = -0.002 + 0.00268V_c - 0.56 * f - 0.076 * a_p - 0.000002 * V_c * V_c + 67.5 * f * f + 0.1408 * a_p * a_p - 0.02925 * V_c * f - 0.00116 * V_c * a_p + 3.950 * f * a_p \quad (8)$$

$$\sigma_w(MPa) = 478.3 + 0.164 * V_c + 935 * f - 31.9 * a_p - 0.00008 * V_c * V_c - 16312 * f * f - 10.9 * a_p * a_p - 0.21V_c * f + 0.129 * V_c * a_p - 19 * f * a_p \quad (9)$$

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için varyans analizleri. (Analysis of variance for surface roughness and theoretical fatigue life.)

Source	Ra (μm)					σ_w (MPa)				
	DF	Seq SS	Adj MS	F Value	P Value	DF	Seq SS	Adj MS	F Value	P Value
Model	9	0.813201	0.813201	73.43	0.000	9	21319.2	2368.8	19.12	0.000
Linear	3	0.739677	0.739677	200.38	0.000	3	20548.1	6849.4	55.30	0.000
Vc	1	0.115778	0.115778	94.09	0.000	1	2253.5	2253.5	18.19	0.003
f	1	0.488410	0.488410	396.94	0.000	1	15304.8	15304.8	123.56	0.000
a _p	1	0.135490	0.135490	110.11	0.000	1	2989.9	2989.9	24.14	0.001
Square	3	0.018319	0.018319	4.96	0.031	3	650.6	216.9	1.75	0.234
Vc*Vc	1	0.005688	0.000125	0.10	0.758	1	244.0	0.2	0.00	0.966
f*f	1	0.009273	0.004826	3.92	0.083	1	386.4	281.7	2.27	0.170
a _p *a _p	1	0.003358	0.003358	2.73	0.137	1	20.2	20.2	0.16	0.697
Way Interaction	3	0.055204	0.055204	14.96	0.001	3	120.5	40.2	0.32	0.808
Vc*f	1	0.015400	0.015400	12.52	0.008	1	0.8	0.8	0.01	0.937
Vc*a _p	1	0.020301	0.020301	16.50	0.004	1	119.2	119.2	0.96	0.355
f*a _p	1	0.019503	0.019503	15.85	0.004	1	0.4	0.4	0.00	0.954
Error	8	0.009844	0.009844			8	990.9	123.9		
Lack-of-Fit	5	0.009289	0.009289	10.05	0.043	5	957.9	191.6	17.41	0.020
Pure Error	3	0.000555	0.000555			3	33.0	11.0		
Total	17	0.823045				17	22310.1			



Şekil 6. Kesme parametrelerinin % katkı oranları (a) Yüzey pürüzlülüğü, (b) Teorik yorulma ömrü (The % contribution ratios of cutting parameters (a) Surface roughness, (b) Theoretical fatigue life)

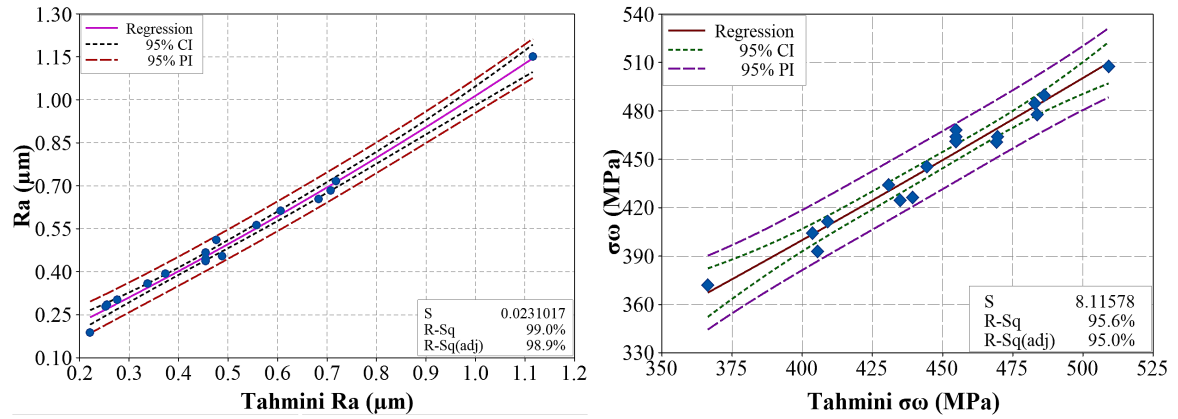
4.4. Yüzey pürüzlülüğünün ve Teorik Yorulma Ömrünün Optimum Tahmini (Optimum Estimation of Surface Roughness and Theoretical Fatigue Life)

DeneySEL sonuçlar ile tahmini değerler arası ilişkiyi belirlemek için YYM kullanılarak İkinci derece regresyon analizi yapılmıştır. İkinci derece regresyon analizini, yapılan deney sonuçları ile tahmini sonuçların güven aralığına dahil olup olmadığını belirlemek için uygulanmıştır. Deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonucu ile hesaplanan teorik yorulma ömrü sonuçları ve bunlara karşılık gelen tahmini değerler Şekil 7 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Şekil 7'de verilen CI güven düzeyi aralığı ve PI tahmini güven aralığını ifade etmektedir [30,31]. Gerçek deney sonuçları ise mavi daire ve kare noktalarla gösterilmiştir. Bu noktaların merkezde bulunan çizgiye yakın bölgelerde toplanması elde edilen ikinci derece denklemlerin sonraki deneylerde ve çalışmalarda zaman kaybını minimuma düşürerek hızlı çözüm sağlayacağı kanısındayız.

Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için gerçek ve tahmini değerler. (Actual and estimated values for surface roughness and theoretical fatigue life.)

Deney No	Vc (m/dak)	f (mm/diş)	ap (mm)	Ra (µm)	Tahmini Ra (µm)	σ (Mpa)	Tahmini σ (Mpa)
1	100	0.05	0.5	0.279	0.253	489.777	486.120
2	220	0.05	0.5	0.188	0.221	507.796	509.208
3	100	0.1	0.5	0.655	0.683	411.375	409.005
4	220	0.1	0.5	0.512	0.476	433.990	430.833
5	100	0.05	1.5	0.455	0.488	445.390	444.370
6	220	0.05	1.5	0.286	0.255	484.732	482.938
7	100	0.1	1.5	1.152	1.116	371.936	366.305
8	220	0.1	1.5	0.684	0.708	404.107	403.613
9	100	0.075	1	0.564	0.557	426.192	439.370
10	220	0.075	1	0.359	0.338	464.160	469.568
11	160	0.05	1	0.303	0.276	477.743	483.672
12	160	0.1	1	0.718	0.718	392.816	405.452
13	160	0.075	0.5	0.393	0.373	460.812	469.2745
14	160	0.075	1.5	0.614	0.607	424.673	434.7895
15	160	0.075	1	0.445	0.455	468.271	454.757
16	160	0.075	1	0.437	0.455	461.429	454.757
17	160	0.075	1	0.443	0.455	464.011	454.757
18	160	0.075	1	0.468	0.455	461.080	454.757



Şekil 7. Gerçek ve tahmini yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü grafiği. (Graph of actual and estimated surface roughness and theoretical fatigue life.)

5. SONUÇLAR (Conclusions)

Bu çalışma, P20S plastik kalıp çeliğinin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmesine odaklanmaktadır. Ayrıca deneyler boyunca ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerine (Rz ve Sm) bağlı \sqrt{area} modeliyle teorik yorulma ömrü hesaplanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen deneysel ve teorik olarak elde edilen bazı önemli sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Frezeleme deneylerinde en düşük yüzey pürüzlülüğü 220 m/dk kesme hızında, 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0,5 mm kesme derinliğinde 0,188 μm ölçülmüştür.
- En yüksek yüzey pürüzlülük değerinin 100 m/dk kesme hızında, 0,1 mm/diş ilerleme miktarında ve 1,5 mm kesme derinliğinde 1,152 μm olduğu ölçülmüştür.
- Yüzey pürüzlülüğünün Ra değerinin en yüksek ve en düşük çıktığı kesme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğünün diğer değerleri Rz ve Sm değerleri paralellik göstermiştir.
- Yüzey pürüzlülüğüne bağlı teorik yorulma ömrünün hesaplanmasında en yüksek yorulma ömrü yüzey pürüzlülüğünün en düşük çıktığı 220 m/dk kesme hızında, 0,05 mm/diş ilerleme miktarında ve 0,5 mm kesme derinliğinde 507,796 Mpa hesaplanmıştır.
- En düşük teorik yorulma ömrü yüzey pürüzlülüğünün en yüksek çıktığı 100 m/dk kesme hızında, 0,1 mm/diş ilerleme miktarında ve 1,5 mm kesme derinliğinde 371,936 Mpa hesaplanmıştır.
- \sqrt{area} modelinde yüzey pürüzlülüğünün Rz ve Sm değerlerini kullanılarak yapılan teorik yorulma ömründe ilerleme miktarının artması ile yüzey profilindeki tepe ve çukurların artması yorulma ömrünü olumsuz etkilemiştir. İlerleme değerinin artışı yorulma ömrünü olumsuz yönde etkilerken kesme hızının artması yorulma ömrünü olumlu yönde etkilemiştir.
- Yorulma ömründe çatlak oluşumunu tetikleyen başka bir parametre ise eşik gerilme şiddeti faktörüdür. Eşik gerilme şiddeti faktörünün kesme hızının artması ile azaldığı ancak ilerleme hızındaki artışa bağlı artmıştır.
- Varyans analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için en etkin kesme parametresi sırası ile %68,6 ve %59,34 oranıyla ilerleme miktarı olmuştur.
- Yüzey pürüzlülüğü ve teorik yorulma ömrü için hata payı sırası ile %4,44 ve %1,2 olarak hesaplanmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (References)

- [1] W. L. Xiao, H. B. Chen, Y. Yin, "Effects of surface roughness on the fatigue life of alloy steel," *Key Engineering Materials*, vol. 525-526, pp. 417-420, Nov. 2013. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.417
- [2] Y. Xiong, W. Wang, Y. Shi, R. Jiang, K. Lin, X. Liu, "Fatigue behavior of in-situ TiB₂/7050Al metal matrix composites: Fracture mechanisms and fatigue life modeling after milling," *International Journal of Fatigue*, vol. 138, pp. 105698, Sep. 2020. doi:10.1016/j.ijfatigue.2020.105698

- [3] E. Santecchia, A. M. S. Hamouda, F. Musharavati, E. Zalnezhad, M. Cabibbo, M. El Mehtedi, S. Spigarelli, "A review on fatigue life prediction methods for metals," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol.2016, pp. 1-26, Sep 2016. doi:10.1155/2016/9573524
- [4] A. Javidi, U. Rieger, W. Eichseder, "The effect of machining on the surface integrity and fatigue life," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 2050-2055, Oct-Nov 2008. doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.01.005
- [5] E. Zahavi and V. Torbilo, "Fatigue design: life expectancy of machine parts," CRC Press, 1996.
- [6] C. R. Liu, S. Mittal, "Optimal pre-stressing the surface of a component by superfinish hard turning for maximum fatigue life in rolling contact," *Wear*, vol. 219, pp. 128-140, Aug. 1998. doi:10.1016/S0043-1648(98)00240-3
- [7] M. Jacobson, "Surface integrity of hard-turned M50 steel," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 216, pp. 47-54, Jan. 2002. doi:10.1243/0954405021519681
- [8] M. Jacobson, D. Patrik, G. Fredrik, "Cutting speed influence on surface integrity of hard turned bainite steel" *J. Mater. Proc. Technol.*, vol. 128, pp. 318-323, Oct. 2002. doi:10.1016/S0924-0136(02)00472-7
- [9] H. B. Özerkan, "Tornalamada oluşan yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrüne etkisinin teorik değerlendirilmesi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 33, ss. 189-198, Haziran, 2018.
- [10] D. Novovic, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, W. Voice, P. Bowen, "The effect of machined topography and integrity on fatigue life," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. 125-134, Feb 2004. doi:10.1016/j.ijmachtools.2003.10.018
- [11] C. Yao, D. Wu, Q. Jin, X. Huang, J. Ren, D. Zhang, "Influence of high-speed milling parameter on 3D surface topography and fatigue behavior of TB6 titanium alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, pp. 650-660, Mar. 2013. doi:10.1016/S1003-6326(13)62512-1
- [12] İ. Tekait, "Theoretical evaluation of the effect of surfaces processed with abrasive water jet on fatigue life," *Transactions of Famena*, vol. 43, pp. 85-98, 2019. doi:10.21278/TOF.43207
- [13] M. Field, J. Kahles, "Review of surface integrity of machined components," *Ann CIRP*, vol. 20, pp. 153-163, 1971.
- [14] Y. Murakami, "Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions," *Elsevier Science, Oxford*, pp. 305-320, 2002.
- [15] E. Nas, S. Akıncioğlu, "Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu," *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, pp. 115-126, Ocak 2019. doi:10.21541/apjes.412042
- [16] R. Soundararajan, A. Ramesh, N. Mohanraj, N. Parthasarathi, "An investigation of material removal rate and surface roughness of squeeze casted A413 alloy on WEDM by multi response optimization using RSM," *J. Alloys Compd.*, vol. 685, pp. 533-545, Nov. 2016. doi:10.1016/j.jallcom.2016.05.292
- [17] A. Das, S. R. Das, S. K. Patel, B. B. Biswal, "Effect of MQL and nanofluid on the machinability aspects of hardened alloy steel," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 24, pp. 291-320, Sep. 2020. doi:10.1080/10910344.2019.1669167
- [18] F. Günan, T. Kivak, Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, "Performance evaluation of MQL with AL203 mixed nanofluids prepared at different concentrations in milling of Hastelloy C276 alloy," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 9, pp. 10386-10400, Oct. 2020, doi:10.1016/j.jmrt.2020.07.018
- [19] B. Özlu, "Investigation of the effect of cutting parameters on cutting force, surface roughness and chip shape in turning of Sleipner cold work tool steel," *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, vol. 36, pp. 1241-1251, 2021. doi:10.17341/gazimmfd.668169
- [20] B. Özlu, H. Demir, M. Türkmen, S. Gündüz, "Examining the machinability of 38MnVS6 microalloyed steel, cooled in different mediums after hot forging with the coated carbide and ceramic tool," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 235, pp. 6228-6239, Nov. 2021. doi:10.1177/0954406220984498
- [21] M. Akgün, H. Demir, "Estimation of surface roughness and flank wear in milling of Inconel 625 Superalloy," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 28, pp. 2150011, 2021. doi:10.1142/S0218625X21500116
- [22] M. Akgün, "Optimization of process parameters affecting cutting force, power consumption and surface roughness using taguchi-based gray relational analysis in turning AISI 1040 steel," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 29, pp. 2250029, 2022. doi:10.1142/S0218625X22500299
- [23] R. Çakıroğlu, M. Günay, "Elektro erozyonla tornalama yöntemiyle işlenen soğuk iş takım çeliğinin yorulma ömrünün tahmini," *Journal of Polytechnic*, vol. 24, pp. 495-502, 2021. doi:10.2339/politeknik.705903
- [24] B.Özlu, "Experimental and statistical investigation of the effects of cutting parameters on kerf quality and surface roughness in laser cutting of Al 5083 alloy," *Surf. Rev. Lett.*, vol. 28, pp. 2150093, 2021. doi:10.1142/S0218625X21500931

- [25] A. Uğur, E. Nas, H. Gökkaya "Investigation of the machinability of SiC reinforced MMC materials produced by molten metal stirring and conventional casting technique in die-sinking electrical discharge machine," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 186, pp. 105875, Nov. 2020. doi:10.1016/j.ijmecs.2020.105875
- [26] R. Işık, B. Özlü, H. Demir, "St-37 malzemesinin lazer ile kesme işleminde seçilen parametrelerin etkisinin deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi," *Firat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, vol. 33, no. 1, pp. 161-171, 2021. doi:10.35234/fumbd.769716
- [27] F. Çırakoğlu, B. Özlü, H. Demir, "Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesinde kesme parametrelerinin delik kalitesi üzerine etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu," *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 8, no. 2, pp. 913-923, 2021. doi:10.35193/bseufbd.977412
- [28] R. G. Hills, T.G. "Trucano, Statistical validation of engineering and scientific models: Background," *Sandia National Laboratories SAND99-1256*. 36, 1999.
- [29] A. Çiçek, T. Kıvak, E. Ekici, "Optimization of drilling parameters using taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 26, pp. 295-305, May. 2015. doi:10.1007/s10845-013-0783-5
- [30] F. Kara, "Taguchi optimization of surface roughness and flank wear during the turning of DIN 1.2344 tool steel," *Mater. Test*, vol. 59, pp. 903-908, Oct. 2017. doi:10.3139/120.111085
- [31] E. Nas, B. Öztürk, "Optimization of surface roughness via the taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials," *Mater. Test*, vol. 60, pp. 519-525, Nov. 2018. doi:10.3139/120.111181

This is an open access article under the CC-BY license

