



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN
İŞLENMESİNDE KESİCİ TAKIM
SEHİMİNİN LAZER ÖLÇÜM
YÖNTEMLERİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

SERAP KAHRAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Eğitimi

Anabilim Dalı

Makine Eğitimi Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Gürcan ATAKÖK

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR

İSTANBUL, 2024



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN
İŞLENMESİNDE KESİCİ TAKIM
SEHİMİNİN LAZER ÖLÇÜM
YÖNTEMLERİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

SERAP KAHRAMAN

(522422605)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Eğitimi

Anabilim Dalı

Makine Eğitimi Programı

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Gürcan ATAKÖK

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Barkın BAKIR

İSTANBUL, 2024

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans çalışmasında, Nikel esaslı süper alaşım olan Hastelloy C22'nin frezeleme işleminde takımda meydana gelen sehim, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür.

Yüksek öğrenim hayatım boyunca bana hayattaki en önemli değerini dürüstlük ve çalışkanlık olduğunu öğreten Sayın. Prof. Dr. Mustafa Kurt Hocam'a;

Her zaman bir telefon kadar uzakta olduğunu bildiğim ve her türlü sorunuma bir abla şefkatiyle yaklaşıp en zor zamanımda desteğini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bilçen Mutlu Mitil Hocam'a;

Tez çalışması süresince her türlü konuda desteğini, tecrübesini, bilgisini ve sabrını esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gürcan Atakök ile Dr. Öğr. Üyesi Barkın Bakır ve Prof. Dr. Uğur Köklü hocalarıma;

Tüm yaşamım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bugünlere gelebilmemi sağlayan sevgili Aileme;

Çalışmam süresince benden dostluğunu ve desteğini eksik etmeyen Çalışma arkadaşlarım Makine Mühendisi Burak Baş, Makine Mühendisi Mehmet Buğra Maden ve Yusuf Dilmen'e;

Her zaman yanımda olduklarını bildiğim ve desteklerini hissettiğim arkadaşlarıma, hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma;

Teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

KASIM, 2024

Serap KAHRAMAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER.....	vii
KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar.....	5
2.2. Kesici Takımda Meydana Gelen Eğilme (Sehim)	6
2.3. Frezeleme Prosesi	8
2.4. Literatür Taraması.....	10
3. MATERYAL ve METOT	11
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme	11
3.2. Frezeleme Testleri	173
3.3. Deney Düzenneği ve Parametreler	17
3.4. Ölçüm ve Görüntüleme Yöntemleri	17
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	22
4.1. Frezeleme İşleminin Sehim Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi	22
4.2. Frezeleme İşleminin Kuvvet Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi	27

4.3. Frezeleme İşleminin YüzeyPürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi	36
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	42
KAYNAKLAR.....	44
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN İŞLENMESİNDE KESİCİ TAKIM SEHİMİNİN LAZER ÖLÇÜM YÖNTEMLERİYLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Nikel bazlı süper alaşımlar, toklukları, yüksek ısı dirençleri ve yüksek çalışma sıcaklıkları, sertlikleri, mukavemet özellikleri, spesifik ağırlık oranları ve kesici takım malzemeleriyle reaksiyona girecek kimyasal özellikleri, düşük termal iletkenlikleri ve sürünme dirençleri nedeniyle genellikle işlenmesi zor malzemeler olarak bilinirler. Karbür, seramik ve CBN gibi daha iyi sertliğe sahip takımlar ile, Nikel esaslı Süper alaşımların işlenmesinde kullanılmaktadır.

Deniz, uçak, endüstriyel ve araç gaz türbinlerinde kullanımlarına ek olarak Nikel bazlı süper alaşımlar artık roket motorlarında, uzay araçlarında, nükleer reaktörlerde, denizaltılarda, deneysel uçaklarda, petrokimya ekipmanlarında, buhar santrallerinde ve diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu çalışmada Nikel esaslı süper alaşımlardan Hastalloy C22 alaşımının frezelenmesinde kesici takımda işleme esnasında meydana gelen sehim lazer sensör ile temassız olarak ölçülmüştür. Buna ilaveten kesme kuvvetleri ve işlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü de ölçülmüştür. Farklı kesme parametreleri ve farklı soğutma stratejilerinin sehim, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nikel Esaslı Süper Alaşım, Sehim, kesme kuvveti

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF CUTTING TOOL DEFLECTION BY LASER MEASUREMENT METHODS IN THE MACHINING OF NICKEL BASED SUPER ALLOYS

Nickel-based superalloys are generally known as difficult-to-machine materials due to their toughness, high heat resistance and high operating temperatures, hardness, strength properties, specific gravity ratios and chemical properties that will react with cutting tool materials, low thermal conductivity and creep resistance. Carbide, ceramic and CBN tools with better hardness are used in the machining of Nickel-based superalloys.

In addition to their use in marine, aircraft, industrial and vehicle gas turbines, Nickel-based superalloys are now used in rocket engines, spacecraft, nuclear reactors, submarines, experimental aircraft, petrochemical equipment, steam power plants and other high-temperature applications. In this study, the amount of deflection that occurs during the milling of Hastalloy C22 alloy, one of the Nickel-based superalloys, was measured non-contactly with a laser sensor. In addition, the cutting forces and the surface roughness of the machined surfaces were also measured. The effects of different cutting parameters and different cooling strategies on deflection, cutting forces and surface roughness were investigated.

Keywords: Nickel Based Super Alloy, Deflection, cutting force

SEMBOLLER

F_t	: Teğetsel kuvvet
F_n	: Normal kuvvet
F_x	: X yönündeki kesme kuvveti
F_y	: Y yönündeki kesme kuvveti
R_a	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
S/N oranı	: Sinyal gürültü oranı
μm	: Mikrometre

KISALTMALAR

C	: Karbon
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CNC	: Bilgisayar Destekli Nümerik Kontrol
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
E	: Uzama
Fe	: Demir
Mn	: mangan
Mo	: Molibden
N	: Nitrojen
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
Ta	: Tantalum
Ti	: Titanyum

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Süper Alaşımların Sınıflandırılması.....	2
Şekil 2.1 Bir jet motorunun kesiti.....	6
Şekil 2.2 Kesici eğilme modeli a) kesici eğilme sistemi, b) basitleştirilmiş iki adımlı silindirik konsol giriş.....	7
Şekil 2.3 Çevresel frezeleme operasyonu.....	8
Şekil 2.4 Alın frezeleme operasyonu	9
Şekil 2.5 (a) Zıt yönlü frezeleme (b) Eş yönlü frezeleme	9
Şekil 3.1 İş parçasının yüzeyinin temizlenmesi	11
Şekil 3.2 9257 B tipi dinamometrenin üstten görünüşü ve bağlantı delik yerleri	13
Şekil 3.3 Deney anında bir görüntü ve sehim ölçme sistemi.....	14
Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan kesici takım	15
Şekil 3.5 Kesme kuvvet ölçümlerinin yapıldığı dik işlem merkezi	16
Şekil 3.6 Deneylerde kesme kuvveti ölçüm düzeneği	18
Şekil 3.7 Kesme kuvvetleri ölçümünde kullanılan ekipmanlar.....	19
Şekil 3.8 Kanal açma işleminde oluşan kuvvetler	20
Şekil 3.9 Yüzey pürüzlülüğü ölçümü	21
Şekil 4.1 Takımda oluşan sehim dataları	24
Şekil 4.2 Frezeleme parametre seviyelerinin sehime etkisi	26
Şekil 4.3 F_x ve F_y kesme kuvvetleri	30
Şekil 4.4 Frezeleme parametre seviyelerinin F_x etkisi	32
Şekil 4.5 Frezeleme parametre seviyelerinin F_y etkisi	35
Şekil 4.6 Ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği	38
Şekil 4.7 Frezeleme parametre seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi	40

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Hastelloy C-22'nin kimyasal bileşimi	12
Tablo 3.2 Hastelloy C-22'nin mekanik özellikleri.....	12
Tablo 3.3 Deney tasarımı.....	17
Tablo 4.1 Kesici takımında oluşan sehim dataları	23
Tablo 4.2 Sehim için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi	25
Tablo 4.3 Sehim için Varyans analizi sonuçları	27
Tablo 4.4 Frezeleme sonucunda oluşan kesme kuvvetleri	29
Tablo 4.5 Fx için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi	31
Tablo 4.6 Fx için Varyans analizi sonuçları	33
Tablo 4.7 Fy için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi	33
Tablo 4.8 Fy için Varyans analizi sonuçları	36
Tablo 4.9 Yüzey pürüzlülük değerleri	37
Tablo 4.10 Yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi	39
Tablo 4.11 Yüzey pürüzlülüğü için Varyans analizi sonuçları	41

1. GİRİŞ

Bir ürünün kalitesi ve performansı, son işleme ile elde edilen yüzey bütünlüğü ile doğrudan ilişkilidir. Yüzey bütünlüğü, işleme sırasında iş malzemesinin mekanik özelliklerini (kalıntı gerilmeler, sertlik vb.), metalurjik durumlarını (faz dönüşümü, mikro yapı ve ilgili özellik değişimleri vb.) ve topolojik parametreleri (yüzey kalitesi ve diğer karakteristik yüzey topoğrafik özellikleri) içerir. Havacılık endüstrisindeki kritik yapısal bileşenler yüksek güvenilirlik seviyelerine ulaşma amacıyla işlendiğinde, yüzey bütünlüğü işlenmiş yüzeyin kalitesini değerlendirmek için kullanılan en önemli parametrelerden biridir. Titanyum alaşımları ve nikel bazlı alaşımların işlenmesiyle oluşan kalıntı gerilmeler, güvenlik ve sürdürülebilirlik endişeleri nedeniyle çok kritiktir [1].

Süper alaşımlar, nikel, nikel-demir veya kobaltın ısıya dayanıklı alaşımlarıdır ve mekanik mukavemet ile yüzey bozulmasına karşı direnç kombinasyonunu genellikle diğer metalik bileşiklerle karşılaştırılmaz düzeyde gösterirler. Bu süper alaşımlar (Ni, Fe-Ni, Co-base) dövme, döküm ve toz metalurjisi alaşımları olarak daha da alt bölümlere ayrılır. Şekil 1 de süper alaşımların sınıflandırmasını gösterilmektedir [2]. Süper alaşımların ana yapısında demir, nikel, kobalt, yüksek miktarda krom, volfram, alüminyum, titanyum ve az miktarda da çok yüksek sıcaklıklarda ergiyen molibden bulunmaktadır [3].



Şekil 1.1 Süper Alaşımların Sınıflandırılması [4].

Calamaz ve arkadaşlarına göre talaşlı imalat (tornalama, frezeleme, delme, vb.) en eski endüstriyel süreçlerden biridir ve endüstriyel iş parçalarının üretiminde en sık kullanılanıdır. Dünyada üretilen tüm mekanik bileşenlerin değerinin yaklaşık %15'inin bir talaşlı imalat operasyonundan geldiği tahmin edilmektedir. Ekonomik ve teknik önemine rağmen, metal kesme, modellerin kötü tahmin kapasitesi nedeniyle en az anlaşılan süreçlerden biri olmaya devam etmektedir [5]. Nikel alaşımlı bileşenler imal eden endüstriler, işlenmiş parçaların üretiminde yüksek maliyet sunmalarıyla karakterize edilir.

Bu nedenle, parçaların işleme süresini azaltmak ve kesici takım aşınmalarını minimize etmek ve kesme koşullarını iyileştirmek için araştırmalar yapmaktadırlar [4].

Zayıf işlenebilirliğe sahip olan Nikel esaslı alaşımların özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

(i) yüksek sıcaklık özellikleri nedeniyle mukavemetlerinin büyük bir kısmı işleme sırasında korunur

(ii) işleme sırasında iş sertleşmesi hızla gerçekleşir, bu da takım burnunda ve/veya kesme hattı derinliğinde çentik aşınmasına katkıda bulunan önemli bir faktördür

(iii) kesici takımlar, süper alaşımdaki sert aşındırıcı karbürlerin varlığı nedeniyle yüksek aşındırıcı aşınmaya maruz kalır

(iv) ticari olarak temin edilebilen kesici takım malzemeleriyle işleme sırasında yüksek kesme sıcaklıklarında kimyasal reaksiyon meydana gelir ve bu da yüksek difüzyon aşınma oranına yol açar

(v) talaşlı imalat sırasında nikel alaşımlarının kesici takıma kaynaklanması/yapışması sıklıkla meydana gelir ve takım malzemelerinde ciddi çentiklenme ve dökülmelere neden olur

(vi) işleme sırasında kontrol edilmesi zor olan, tok ve sürekli bir talaş üretimi, böylece sıkışma ve krater oluşumu yoluyla kesici takımın bozulmasına katkıda bulunur ve

(vii) nikel esaslı alaşımların zayıf termal yayılımı, kesici takımda yüksek termal gradyanların yanı sıra takım ucunda da yüksek sıcaklık üretir [6].

Bu tez çalışmasında aşağıda sunulduğu gibi organize edilmiştir: İkinci bölüm literatür bilgilerini (nikel esaslı süper alaşımlar, kesici takımda meydana gelen eğilme (sehim), frezeleme prosesi, literatür taraması) içermektedir. Üçüncü bölümde materyal ve metot (frezeleme testleri, deney düzeneği ve parametreler, ölçüm ve görüntüleme yöntemleri), dördüncü bölümde ise bulgular ve tartışma (frezeleme işleminin sehim üzerindeki etkisinin incelenmesi, frezeleme işleminin kuvvet oluşumuna etkisinin incelenmesi ve

frezeleme işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi) araştırılmıştır. Son bölümde sonuç ve öneriler sunulmasıyla çalışma tamamlanmıştır.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

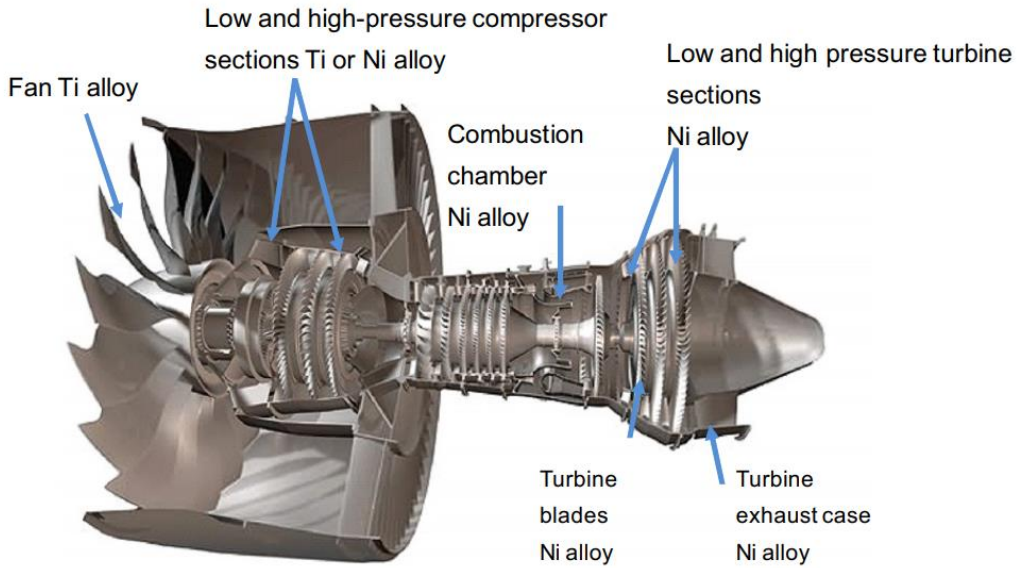
Aşağıda nikel esaslı süper alaşımlar, kesici takımda meydana gelen eğilme (sehim), frezeleme prosesi ve literatür taraması verilecektir.

2.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel esaslı alaşımlar, titanyum bazlı alaşımlara göre avantajları nedeniyle endüstride oldukça popülerdir. Nikel bazlı alaşımların başlıca güçlü yönleri ısıya dayanıklı olmaları, yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik ve kimyasal özelliklerini korumaları, yüksek erime sıcaklıklarına, yüksek korozyon direncine ve termal yorgunluğa, termal şoka, sürünmeye ve erozyona karşı dirençli olmalarıdır. Nikel bazlı alaşımlar arasında IN-718 en yaygın kullanılan alaşımdır ve bu nedenle yüzey bütünlüğü, kalıntı gerilme ve işlenebilirlik analizinde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. İşleme çalışmaları IN-718 ile sınırlı olmayıp diğer nikel bazlı alaşımları da içermektedir [1]. Nikel bazlı alaşımlar en az %50 nikel içerirken, nikel-demir bazlı alaşımda nikel ana çözünen bileşendir. Ayrıca, silisyum, fosfor, kükürt, oksijen ve azot gibi zararlı elementler uygun eritme uygulamalarıyla kontrol edilmelidir. Selenyum, bizmut ve kurşun gibi diğer eser elementler kritik parçalarda çok küçük (ppm) seviyelerde tutulmalıdır. Birçok işlenmiş nikel bazlı süper alaşım %10-20 Cr, yaklaşık %8'e kadar Al ve Ti birleşimi, %5-15 Co ve az miktarda bor, zirkonyum, magnezyum ve karbon içerir. Diğer katkı maddeleri molibden, niyobyum ve tungstendir. Yüzey kararlılığını artırmak için krom ve alüminyum da gereklidir. Ticari olarak temin edilebilen süper alaşımlar arasında 718, üretimdeki en baskın alaşım olarak öne çıkmaktadır ve işlenmiş nikel bazlı alaşım üretiminin %45'ini ve döküm nikel bazlı ürünlerin %25'ini oluşturmaktadır [2].

Nikel esaslı süper alaşımlar, toklukları, yüksek ısı direnci, yüksek çalışma sıcaklıkları, sertlikleri, ağırlık oranına göre mukavemetleri, kesici takım malzemeleriyle kimyasal reaksiyona girme özellikleri, düşük ısı iletkenlikleri ve sürünme dirençleri nedeniyle genellikle işlenmesi zor malzemeler olarak bilinir. Bu özelliklerinin yanında, işlenmesi sırasında oluşan yüksek sıcaklıklar ve gerilimler nedeniyle de daha büyük zorluk oluştururlar. Karbürler, seramikler ve CBN gibi daha iyi sertliğe sahip takım malzemeleri, nikel bazlı süper alaşımların işlenmesinde kullanılır [7]. Nikel bazlı süper alaşımlar uçaklarda, enerji üretim türbinlerinde, roket motorlarında, nükleer enerji ve kimyasal

işleme tesisleri de dahil olmak üzere diğer zorlu ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [8]. Nikel bazlı süper alaşımlar, bu tezin yazıldığı tarihte yaklaşık 85 yaşındadırlar; demir, alüminyum, hatta titanyuma dayalı diğer yapısal alaşımlarla karşılaştırıldığında, nispeten yeni malzemelerdir. Kullanımları özellikle 750 °C nin ötesinde belirgindir, çünkü ferritik çeliklerin özellikleri bu sıcaklığın ötesinde belirgin şekilde bozulur. Bu tür enerji dönüşüm sistemlerinin yakıt ekonomisini ve buna bağlı CO₂ emisyonlarını iyileştirme aciliyeti, önemli ekonomik, toplumsal ve yasal baskılarla desteklenen bu amaca yönelik teknolojik teşviki sağlamaktadır [9]. Nikel esaslı alaşımlar içerisinde en çok kullanılan Inconel 600, 617, 625, 706 ve 718 alaşımlarıdır [3]. Nikel alaşımları (Ni–Co–Cr, Ni–Fe–Cr veya Ni–Co–Fe), son derece yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kaldıktan sonra bile mukavemetlerini koruyabilme özelliğine sahiptir ve jet motorlarının türbin bölümleri için tercih edilen tek malzemedir (Şekil 2.1) [1].



Şekil 2.1 Bir jet motorunun kesiti

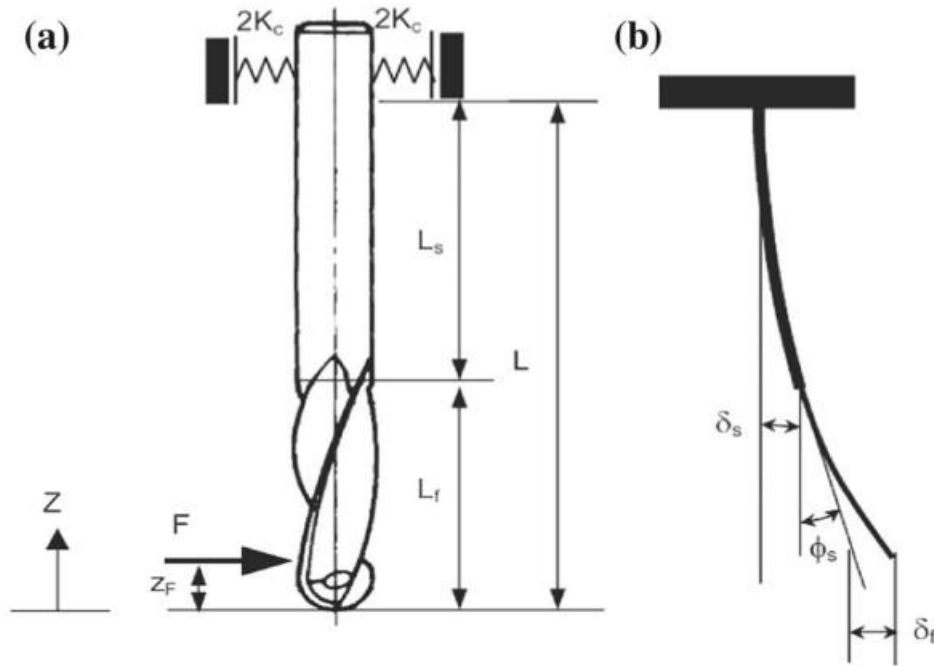
2.2. Kesici Takımda Meydana Gelen Eğilme (Sehim)

Frezeleme işleminde kaliteli yüzeyler oluşturulabilmesi için takımda oluşan deflection/eğilmeyi göz ardı edilmemesi gerekir. Frezeleme işleminde kesme kuvvetleri, tork, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması gibi kalite karakteristiklerinin yanında parçada oluşan geometrik hatalar ile takımdeki eğilmeyi belirlemek için farklı yaklaşımlar

sunulmuştur [10]. Kesici takım sap (shank size) boyutu için ana tasarım kriteri rijitliktir. Kesici kenardaki sehim, makinenin boyutuna, kesme koşullarına ve takımın uzun bağlaması olarak belirli bir değerle sınırlıdır. Takım uzun bağlaması (L_e), kesici takım sap boyutu ve uç sabitleme koşullarıyla da ilişkilidir. Kesici takım shank boyu izin verilen sapması, son kesimlerde 0,04 mm'den, kaba kesimlerde 0,1 mm'ye kadar değişir. Sapın bir konsol olduğu düşünülünce:

$$\Delta = \frac{F_c L_e^3}{3EJ} = \frac{4F_c L_e^3}{EBH^3} \leq 0.04 \quad (2.1)$$

Burada Δ takım sapması, B ve H takım boyutları, E malzemenin elastisite modülü ve J kesit atalet momentidir [11]. Şekil 2.2a'de gösterildiği gibi, bir bilyalı uçlu freze iki parçadan oluşur, flüt ve shaft parçaları. Bu çalışmada, kesici, 2.2b'de gösterildiği gibi iki adımlı silindirik konsol giriş olarak basitleştirilmiştir.



Şekil 2.2 Kesici eğilme modeli a) kesici eğilme sistemi, b) basitleştirilmiş iki adımlı silindirik konsol giriş

Sonuçtaki kesici eğilme sapması şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned}
\delta_t &= \delta_s + \delta_f + \phi_s (L_f - z) \\
\delta_t &= \frac{F}{E \cdot I} \left[-(L - L_f)^3 + 3(L - L_f)^2 (L - z_F) \right] \\
&+ \frac{F}{E \cdot I_f} \left[(z_F - z)^3 - (L_f - z)^3 \right. \\
&\quad \left. + 3(L_f - z)^2 (L_f - z_F) \right] \\
&+ \frac{F}{E \cdot I} \left[-(L - L_f)^2 + 3(L - L_f)(L - z_F) \right] (L_f - z)
\end{aligned} \tag{2.2}$$

burada δ_s sapın sapması; δ_f flütün sapması; ϕ_s sapın sapma açısı; L_f flütün uzunluğu; ve I_f flütün eylemsizlik momentidir.

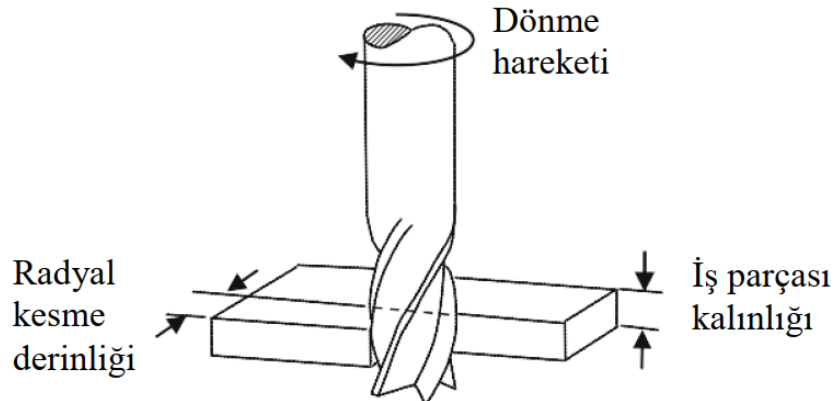
Bu nedenle takım sisteminin sapması aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\delta = \delta_t + \delta_c = \delta_t + F/K_c \tag{2.3}$$

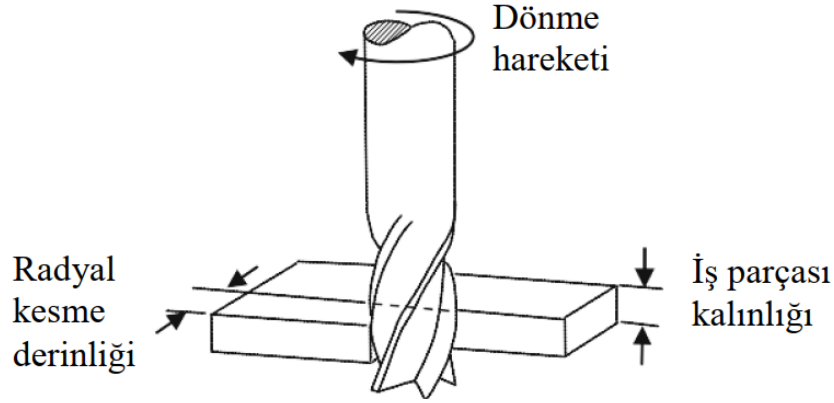
K_c ölçülen kesici sıkıştırma sertliğidir [12].

2.3. Frezeleme Prosesi

Çevresinde birden fazla kesici olan kesici takım ile malzemenin istenilen şekle getirilme prosesine frezeleme adı verilmektedir. Kesici takım Z ekseninde dönme hareketi yaparken tezgah tablası ise X ve Y doğrultusunda lineer hareket etmektedir. Frezeleme işleminde genellikle prizmatik parçalar işlenmektedir. Alın frezeleme, yüzey frezeleme, cep işleme gibi operasyonlar yapılmaktadır. Endüstride farklı frezeleme işlemleri vardır. En yaygın kullanılanlar alın frezeleme ve çevresel frezeleme işlemleridir (Şekil 4) [13].

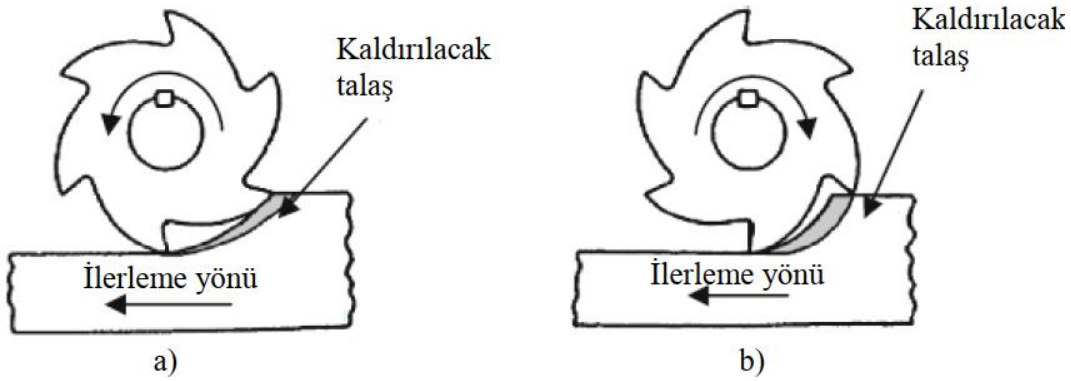


Şekil 2.3 Çevresel frezeleme operasyonu



Şekil 2.4 Alın frezeleme operasyonu

Frezeleme prosesinde kesici ile malzeme bağıl hareketine göre frezeleme işlemi değişmektedir. Bu iki frezeleme operasyonları aynı yönlü ve zıt yönlü frezeleme diye adlandırılmaktadır. Zıt yönlü frezeleme işleminde kesici malzemenin ilerleme yönüne karşı dönmekte ve frezeleme operasyonu alttan üste doğru olmaktadır. Frezeleme anında oluşan kuvvetler malzemeyi tezgah tablasından üste doğru zorlamaktadırlar (Şekil 6a). Aynı yönlü frezeleme prosesinde takım malzemenin ilerleme yönüne ile aynı yönde döner. Kesme işlemi üstten alta doğru olmaktadır. Frezeleme anında oluşan kuvvetler malzemeyi aşağıya doğru zorlamaktadır (Şekil 2.5b) [13].



Şekil 2.5 (a) Zıt yönlü frezeleme (b) Eş yönlü frezeleme

2.4. Literatür Taraması

Bakır [14] doktora tez çalışmasında DIN 1.2379 X155CrVMo12 malzemesinin frezeleme operasyonunu gerçekleştirmiştir. Farklı kesme parametreleri ile bu malzeme işlenmiş, kesme kuvvetleri, sehim, talaş oluşumu ve yüzey pürüzlülüğü araştırılmıştır. Kesici takımında oluşan sehim endüktif sensörler ile ölçülmüştür. Çalışma sonucunda kesici takımdaki eğilmenin ana sebebinin ilerleme hızı olduğu vurgulanmıştır. Buna ilaveten ikinci etkili parametrenin kesme derinliği olduğu vurgulanmıştır. Bunları sırasıyla kesme hızı, kesici takım ağız sayısı, kesici takım çapı ve talaş açısı izlemektedir.

Basmacı [15] yüksek lisans tez çalışmasında nikel esaslı süper alaşım kullanılmıştır. 3 farklı ilerleme hızında, 3 farklı fener mili hızında ve 3 farklı talaş derinliği ile kesme testleri yapılmıştır. Deneylerde kesme kuvveti ölçülmüştür.

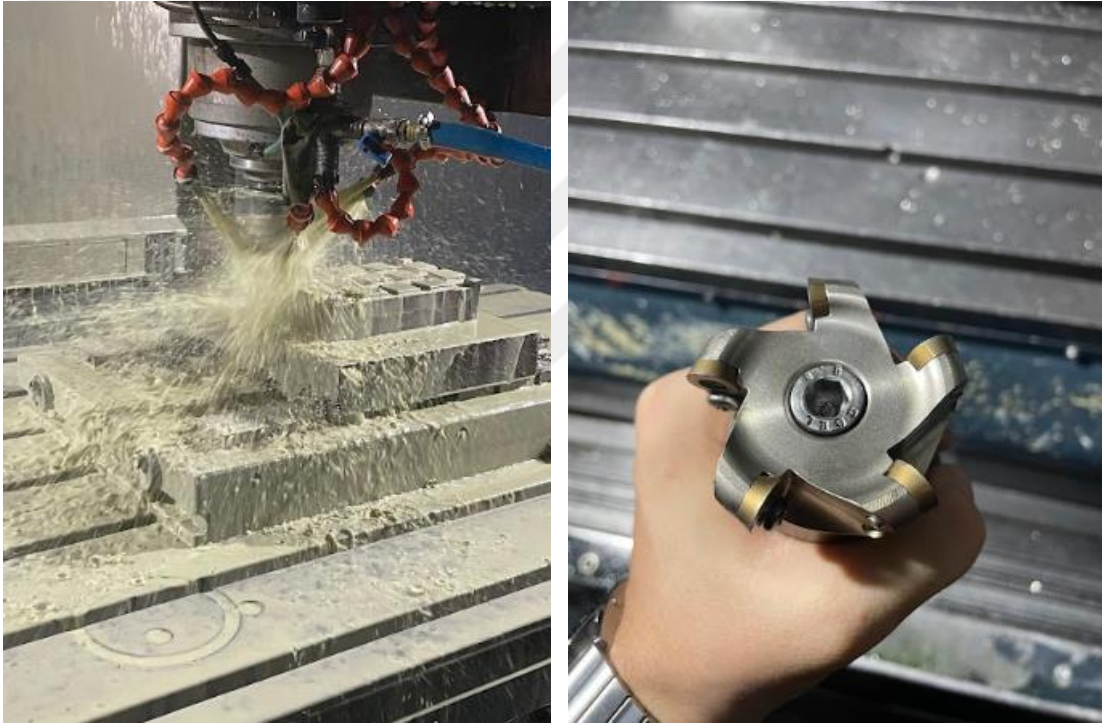
Hartomacıoğlu [16] yüksek lisans tez çalışmasında free form surfacelerin frezelenmesinde parmak freze geometrisinin yüzey pürüzlülüğü ve şekil hatasına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Deneylerde küresel uçlu parmak freze yapılmıştır. Testlerde parmak frezede oluşan eğilme ve frezeleme kesme kuvvetleri belirlenmiştir. Frezelenen yüzeyler optik tarama ile taranarak şekil hataları belirlenmiştir. Parmak freze geometrisi ve frezeleme stratejileri araştırılan sonuçlara etkilediği bulunmuştur.

Özdemir [17] doktora tez çalışmasında, endüstride yaygınca kullanılan delik delme prosesi ile frezeleme işlemleri anında oluşan kesici takımdaki deflection-eğilme on line belirleyen yöntem geliştirmiştir. Yeni yöntemde delik delme ve frezeleme operasyonlarında takım kamera ile görüntülenmiştir. Bu operasyonla birlikte kesme anında kesme kuvvetleri de ölçülmüştür. Kesme anında oluşan kuvvetler nedeniyle kesici takımında meydana gelen sehim hesaplanmıştır.

Fata ve Nikuei [11] kesme kuvvetleri ölçülerek takım şekli, takım nitelikleri (keskin ve aşınmış V ve bıçak ağızlı kesici takımlar) ve kesme koşullarının (kesme derinliği ve kesme hızı) sehim ve kesme kuvveti üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

3. MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışmasında Hastelloy C22 süper süper alaşımı kuru, hava soğutmalı ve soğutma sıvısı kullanarak farklı kesme parametreleri ile frezelenmesi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde on-line olarak kesici takımda meydana gelen sehim ve kesme kuvvetleri, deneylerden sonra ise işlenmiş yüzeylerin pürüzlülükleri ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan malzeme, kesici takım, ölçüm yöntemleri detaylı bir şekilde aşağıda sunulmuştur. Deneylerden önce malzeme tezgaha paralel bir şekilde bağlanabilmesi ve yüzeyindeki temizlenmesi için tarama kafa ile temizlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. İş parçasının yüzeyinin temizlenmesi

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme

Tescilli ticari marka adı olan Hastelloy C22, Haynes International, Inc. tarafından üretilen yirmiden fazla farklı yüksek korozyon dirençli metal alaşımına ön ad olarak uygulanır. Haynes International tarafından geliştirilen bu süper alaşımlar veya yüksek performanslı alaşımlar, tekdüze saldırıya karşı yüksek direnç, yerel korozyon/oksidasyon direnci, gerilim korozyon çatlama direnci ve kaynak ve üretim kolaylığı gibi özellikler gösteren

nikel bazlı çelik alaşımlarıdır [18]. Frezeleme testlerinde nikel esaslı süper alaşımlardan olan Hastelloy C22 süper alaşımı kullanılmıştır. Hastelloy C22, alaşım C22 olarak da bilinir, çatlak korozyonuna ve gerilim korozyon çatlamasına karşı gelişmiş dirence sahip çok yönlü bir ostenitik nikel krom-molibden-tungsten alaşımıdır. Yüksek krom içeriği oksitleyici ortamlara karşı iyi direnç sağlarken molibden ve tungsten içeriği indirgeyici ortamlara karşı iyi direnç sağlar. Bu nikel çelik alaşımı ayrıca ıslak klor ve nitrik asit veya klor iyonlarıyla oksitleyici asitler içeren karışımlar dahil olmak üzere oksitleyici sulu ortamlara karşı mükemmel dirence sahiptir. Hastelloy C-22'nin direnci olan diğer aşındırıcılar oksitleyici asit klorürler, ıslak klor, formik ve asetik asitler, ferrik ve bakır klorürler, deniz suyu, tuzlu su ve hem organik hem de inorganik birçok karışık veya kirli kimyasal çözeltilerdir. Deneylerde kullanılan Hastelloy C-22'nin kimyasal bileşimi Tablo 3.1 de verilmiştir.

Tablo 3. 1 Hastelloy C-22'nin kimyasal bileşimi

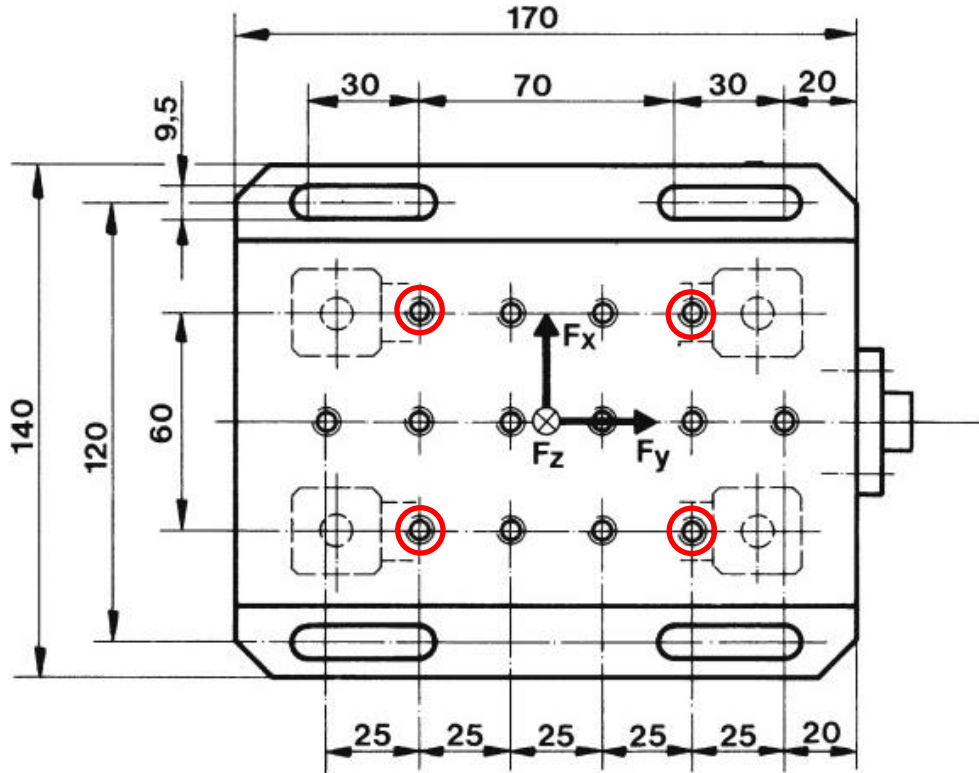
Cr	Co	Fe	Mn	Mo	Ni	W	V
20-22.5	2.5 max	2.0-6.0	.50 max	12.5-14.5	Balance	2.5-3.5	.35 max

Deneylerde kullanılan Hastelloy C-22'nin mekanik özellikleri Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3. 2 Hastelloy C-22'nin mekanik özellikleri

Çekme Mukavemeti (ksi)	.2% akma mukavemeti (ksi)	% uzama	Sertlik (HRb)
112	53	62	89

Deneylerde kullanılan malzemenin (Hastelloy C22 süper alaşımı) kuvvet dinamometresine bağlanabilmesi için aşağıda gösterildiği gibi bağlama delikleri açılmıştır. M8 alyen başlı cıvata ile malzeme kuvvet dinamometresine emniyetli bir şekilde bağlanmıştır (Şekil 3.2). Kesme testleri X eksenini boyunca yapılmıştır. Deneylerden önce dinamometre kalibre edilmiştir.



Şekil 3.2. 9257 B tipi dinamometrenin üstten görünüşü ve bağlantı delik yerleri

3.2. Frezeleme Testleri

Deneysel çalışma için lazer sehim ölçüm sistemi ile entegre edilmiş 3 eksenli freze tezgahı kullanılmıştır. Kesici takımının kesme bölgesine en yakın mesafeden lazer odak noktasındaki bölgeden sehim ölçümleri alınmıştır. Kesme parametreleri seçimi ve farklı soğutma kombinasyonları için nikel esaslı süper alaşımın işlenebilirliği araştırılmıştır. Kesme sıvısı, hava soğutmalı ve kuru kesme mukayeseleri yapılmıştır. Şekil 3.3'te deney anından bir görüntü verilmiştir. Deneylerde 60 mm lik tam slot işlenmiştir. Frezeleme testlerinde 240x120x40 mm ebatlarında Hastalloy plaka kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Deney anında bir görüntü ve sehim ölçme sistemi

Deneylerde MBC firmasına ait ST AP 10 021 kodlu şaftlı tarama kullanılmıştır. Deneylerde RDHX12T3MDT / JN1040 kodlu insert kesici takımlar kullanılmıştır. 20 mm çapa, 100 mm uzunluğa ve 3 ağıza sahip olan kesici takım Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan kesici takım

Hastelloy süper alaşımının kuru, hava soğutmalı ve soğutma sıvısı kullanarak farklı kesme parametreleri ile frezelenmesinde oluşan kesme kuvvet ölçümleri Quaser MV 154C CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3. 5 Kesme kuvvet ölçümlerinin yapıldığı dik işlem merkezi

Hastelloy C-22 işlenmesi zor malzeme olduğu için kesici takımı hızlı aşındırmaktadır. Takım aşınmasının deney sonuçlarına etkisini minimize etmek için her bir kesme işleminde yeni bir takım kullanılmıştır.

3.3. Deney Düzeneği ve Parametreler

Kesme parametreleri belirlenmede literatürdeki önceki çalışmalar incelenmiş, ayrıca kesici takım kataloğundaki öneriler de dikkate alınmıştır. Frezeleme testlerinde 3 bağımsız değişken seçilmiştir. Bu değişkenler 3 farklı fener mili hızı ile, 3 farklı ilerleme hızında ve 3 farklı soğutma şartlarında (kuru, hava soğutmalı ve kesme sıvısı) yapılmıştır. Deney tasarımı Tablo 3.3 de verilmiştir. Deney tasarımı ve optimizasyon için literatürde kabul gören ve kullanımı yaygın olan Taguchi metodu kullanılmıştır.

Tablo 3.3 Deney tasarımı

Sıra numarası	Devir sayısı (dev/dak)	Soğutma şartları	İlerleme hızı (mm/dak)
1	800	Kuru	100
2	800	Hava	200
3	800	Kesme yağı	300
4	1200	Kuru	200
5	1200	Hava	300
6	1200	Kesme yağı	100
7	1600	Kuru	300
8	1600	Hava	100
9	1600	Kesme yağı	200

3.4. Ölçüm ve Görüntüleme Yöntemleri

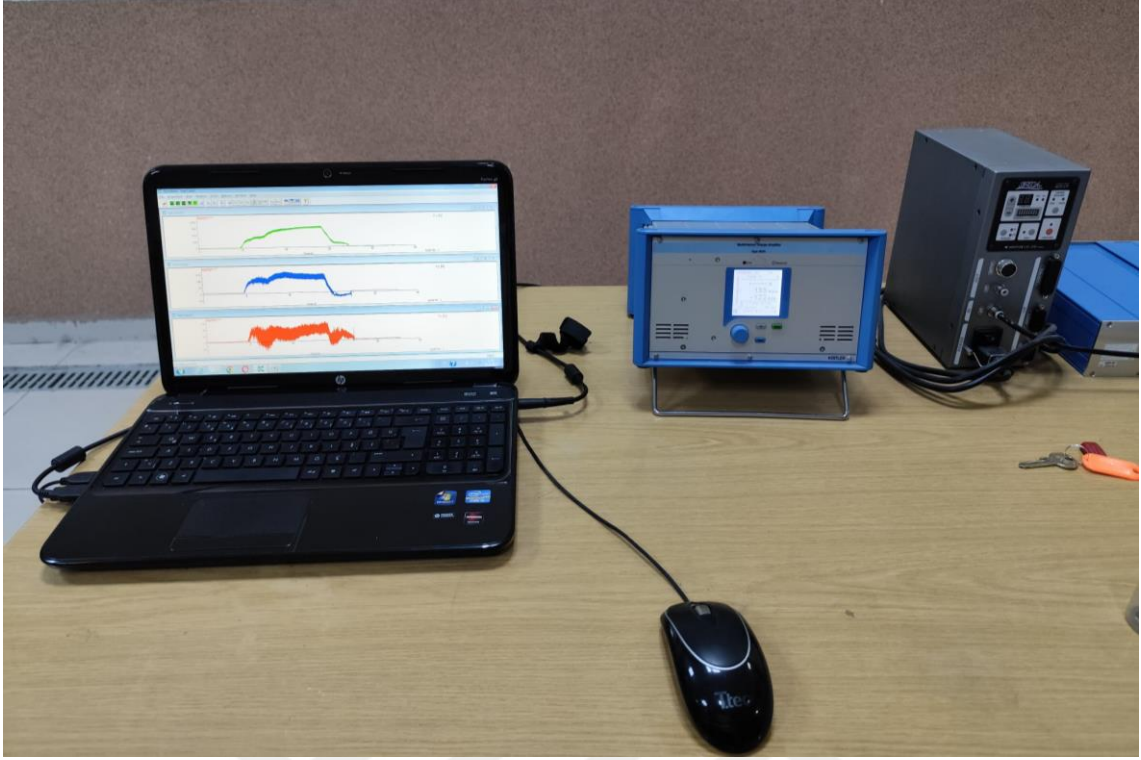
Sehim ölçümleri Micro Epsilon optoNCDT 1320 yüksek doğrulukta temassız mesafe ölçümü sağlayan kompakt bir laser deplasman sensörü ile yapılmıştır. Küçük boyutu ve hızlı tepki süresi (0.001 saniye) ile dar alanlarda kullanım için idealdir. 10 mm, 25 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm ve 500 mm ölçüm aralıkları sunan cihaz, 10 µm'ye kadar doğruluk ve 1 µm'ye kadar tekrarlanabilirlik sağlar. Ölçüm hızı 4 kHz olup, entegre

kontrol ünitesi ile ek donanım gerektirmez. Cihazda 3 metre uzunluğunda uçları açık sensör kablosu, ölçeklenebilir analog çıkış, tetikleme girişi ve RS422, PROFINET, EtherNet/IP, EtherCAT gibi arayüzler mevcuttur. IP67 koruma sınıfına sahip sağlam alüminyum gövdesi ile zorlu endüstriyel ortamlarda kullanılabilir.

Kesme kuvvetleri Kistler 9257 B tipi kuvvet dinamomteresi ve bileşenleri yardımıyla yapılmıştır. Kesme kuvvetleri Kistler Type 9257B dinamometre ile deney anında her bir kanal için ölçülmüştür. Deney verilerinin dijital ortama aktarılması için kullanılan ekipmanlar (Kistler 5070A amplifikatör, Kistler 5697A veri toplama sistemi (DAQ kartı) ve DynoWare yazılımı) Şekil 3.6. ve 3.7’de gösterilmiştir [13].

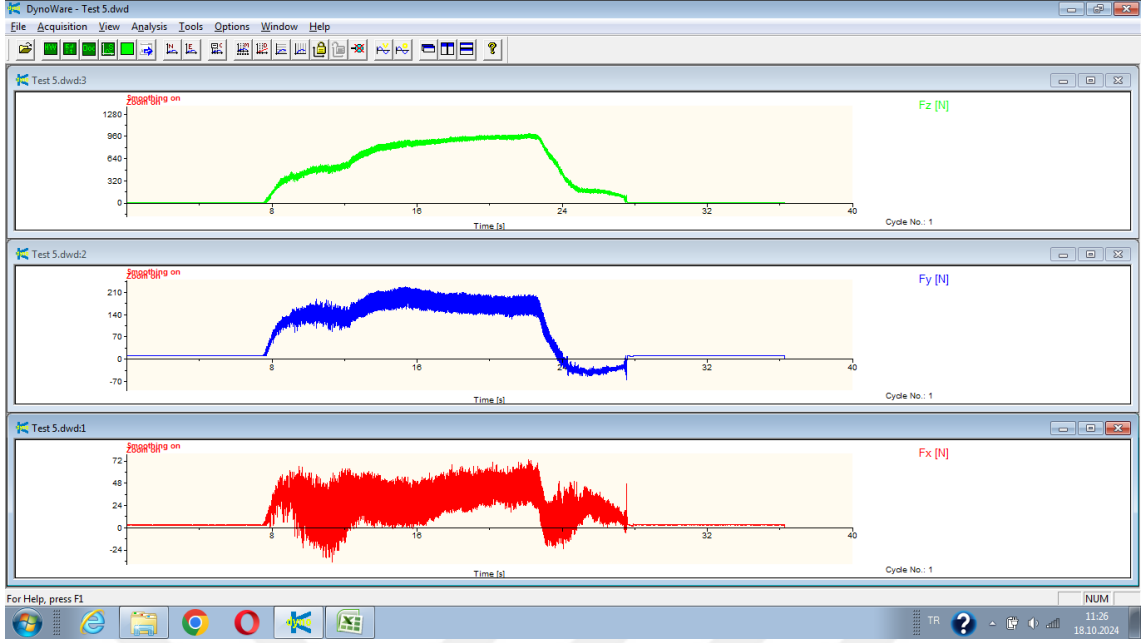


Şekil 3.6. Deneylerde kesme kuvveti ölçüm düzeneği



Şekil 3.7. Kesme kuvvetleri ölçümünde kullanılan ekipmanlar

Frezeleme kuvvetlerinin yatay bileşenleri teğetsel kuvvet (F_t) ve normal kuvvet (F_n)’den oluşmaktadır. Bu kuvvetlere ek olarak eksenel yönde oluşan F_z kuvveti de üç bileşenli dinamometre ile ölçülebilmektedir. Frezelemede ilerleme yönü doğrultusunda oluşan kuvvet ilerleme kuvveti olarak adlandırılırken bu kuvvete yatay düzlemde dik olan ve temel kesme etkilerinden dolayı oluşan kuvvet ise asıl kesme kuvveti olarak adlandırılmaktadır [19]. Kanal açma işlemi sırasında dinamometre tarafından ölçülen kesme kuvvetler Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kanal açma işleminde oluşan kuvvetler

İşlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümü için otomatik kalibrasyon özelliğine sahip, 1,75 / 5,6 / 17,5 mm tarama boyu seçimli, profil çözünürlüğü 0,012 μ m, MAHR Perthometer M1 kullanılmıştır. Frezelenen slotların yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ölçümleri için kesme uzunluğu 0.8 mm ve örnekleme uzunluğu 5.6 mm olarak alınmıştır. Deneylerden sonra işlenen kanalların yüzey pürüzlükleri ölçülmüştür. Her bir deney şartı için kanalın 3 farklı bölgesinden ölçüm alınmıştır. Daha sonra bu alınan dataların aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

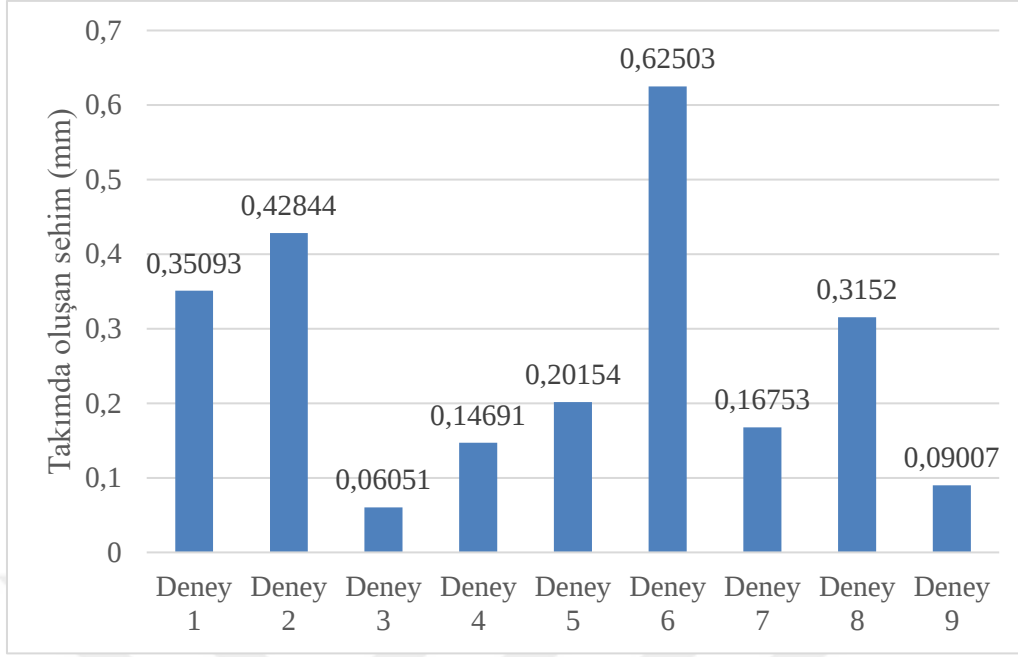
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Frezeleme İşleminin Sehim Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Sehim ölçme cihazı önce tezgaha rijit bir şekilde bağlanmıştır. Deney tasarımında belirtilen kesme kombinasyonları ayarlanmıştır. Daha sonra tezgah boşta çalıştırılarak sehim ölçülmüştür. Daha sonra tezgah talaş kaldırırken yani frezeleme anında on-line olarak takımda oluşan sehimler ölçülerek aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 4.1). Tablodan da görüleceği gibi en düşük sehim (0.06051 mm) 800 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak. İlerleme hızı ile ve kesme yağı kullanılan deney kombinasyonunda elde edilmiştir (Deney 3). İkinci düşük sehim değeri (0.09007 mm) ise 1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak. İlerleme ile ve kesme yağı kullanılan deney kombinasyonunda elde edilmiştir (Deney 9). Elde edilen dataların daha kolay yorumlanabilmesi için Tablo 4.1 de verilen datalardan grafik oluşturulmuştur (Şekil 4.1).

Tablo 4.1 Kesici takımında oluşan sehim dataları

S.NO	Devir	Soğutma koşulu	İlerleme	Boşta	İşlem	Sehim (mm)
Deney 1	800	Kuru	100	48,86731	48,51638	0,35093
Deney 2	800	Hava	200	48,72884	48,3004	0,42844
Deney 3	800	Kesme yağı	300	48,44716	48,38665	0,06051
Deney 4	1200	Kuru	200	48,2557	48,10879	0,14691
Deney 5	1200	Hava	300	48,33639	48,13485	0,20154
Deney 6	1200	Kesme yağı	100	48,21351	47,58848	0,62503
Deney 7	1600	Kuru	300	47,46335	47,29582	0,16753
Deney 8	1600	Hava	100	47,68515	47,36995	0,3152
Deney 9	1600	Kesme yağı	200	47,11087	47,0208	0,09007



Şekil 4.1 Takımda oluşan sehim dataları

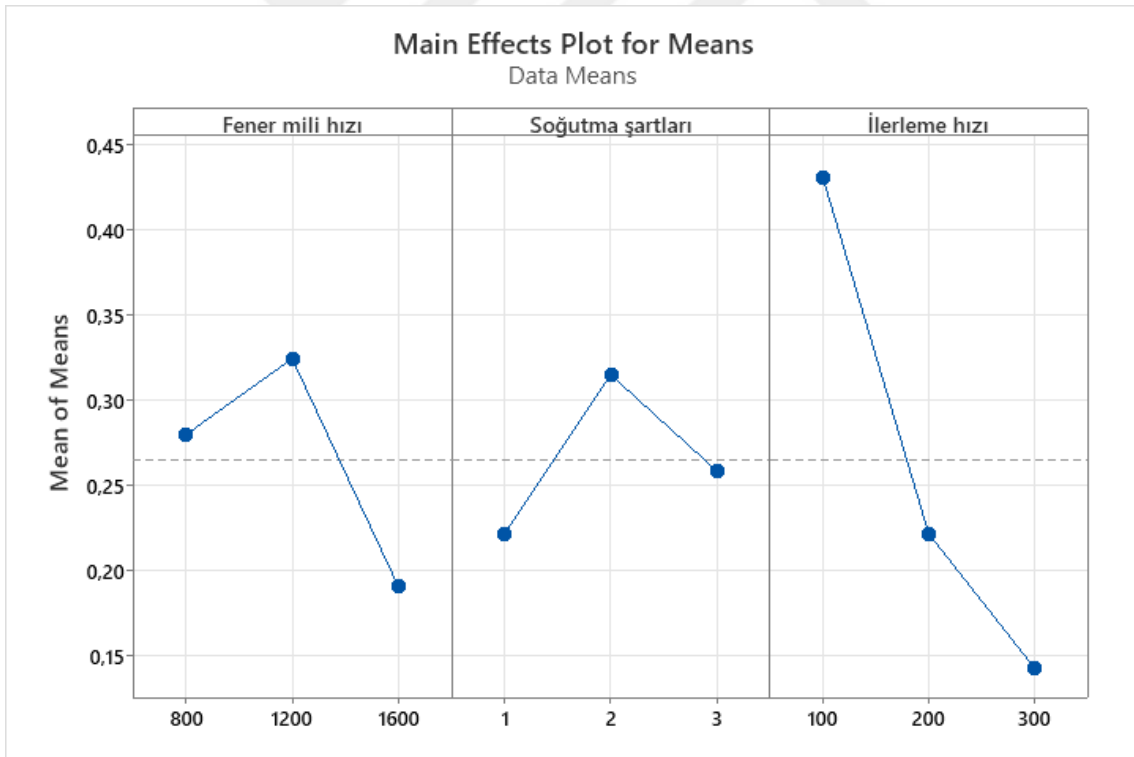
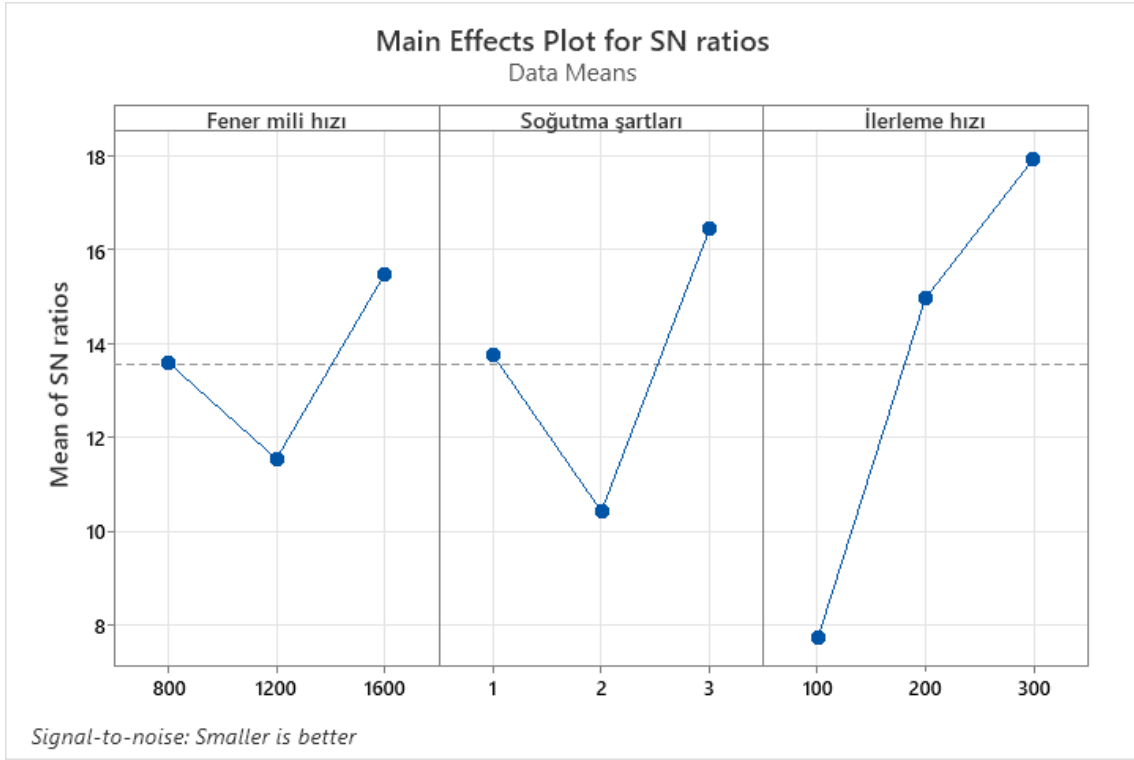
Taguchi deney tasarımına göre yapılan frezeleme deneylerinden elde edilen sehim datalarına ait S/N değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Frezeleme parametrelerinin her bir seviyesinin sehime etkisinin grafiği ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2’ de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, frezeleme testlerinde minimum sehim elde etmek için kesme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değerlerdir. Sehim artışında en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise soğutma şartlarıdır. En az etkili parametre ise fener mili hızıdır. Minimum sehim 1600 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C3).

Tablo 4.2 Sehim için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Seviyeler	Devir sayısı	Soğutma şartları	İlerleme hızı
1	13,607	13,758	7,735
2	11,551	10,434	14,977
3	15,485	16,451	17,931
Max-Min	3,934	6,017	10,196
Sıralama	3	2	1

Taguchi deney tasarımına göre yapılan frezeleme deneylerinde elde edilen sehim için S/N yanıt ve ortalama grafikleri Şekil 4.2 de verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) sehim değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartlarının artmasıyla S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum sehimin azalması anlamına gelmektedir. Ortalamalar grafiğinden de görüldüğü gibi deneysel çalışmalar sonucunda, fener mili hızı ve ilerleme hızı artışı ile sehim azalmaktadır. Soğutma şartlarının ise farklı bir durum oluşmuştur.



Şekil 4.2 Frezeleme parametre seviyelerinin sehime etkisi

Hastelloy C22 süper alaşımlarının farklı kesme parametreleri ve farklı soğutma stratejileri ile frezelenmesinde her bir seviyesinde farklı sehim dataları elde edilmiştir. Oluşan bu farklı değerler tesadüfen mi yoksa, bağımsız değişkenlerden mi kaynaklandığı ve her bir değişkenin bu sonuca etkisini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Minitab paket programı yardımıyla oluşturulan varyans analizi tablosundaki P değeri 0.05’den (% 95 önem seviyesinde) küçükse, en az bir grup ortalaması farklıdır ve gruplar arasında farklılık vardır. Tablo değeri, deneysel veriden hesaplanan F değerinden daha küçükse grup ortalamaları farklı olduğu sonucu çıkarılır. % dağılım ise araştırılan yanıt üzerinde proses parametrelerinin önemini verir [20]. Sehim için yapılan varyans analizi sonuçları Tablo 4.3’de verilmiştir. Fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartları faktörleri yüzey sehimi üzerinde önemli etkiye sahip değildir ($P>0,05$).

Tablo 4.3 Sehim için Varyans analizi sonuçları

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F-değeri	P- değeri
Devir sayısı	2	0,02775	0,013874	0,30	0,770
Soğutma şartları	2	0,01324	0,006622	0,14	0,875
İlerleme hızı	2	0,13217	0,066083	1,42	0,413
Hata	2	0,09297	0,046485		
Toplam	8	0,26613			

4.2. Frezeleme İşleminin Kuvvet Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi

Talaş kaldırma anında oluşan kesme kuvvetleri, en önemli işlenebilirlik kriterlerinden birisidir ve ısı oluşumu, güç tüketimi, takım aşınması, yüzey kalitesi ve iş parçasının hassasiyeti üzerinde doğrudan etkiye sahiptir [21].

Frezeleme testleri anında kesme kuvvetleri online olarak ölçülmüştür. Kuru, soğutma sıvılı ve hava soğutmalı kesme koşullarında 800, 1200 ve 1600 dev/dk olmak üzere üç farklı fener mili hızlarında ve 100, 200 ve 300 mm/dk olmak üzere üç farklı ilerleme

hızlarında yapılan frezeleme deneyleri sonucu elde edilen kesme kuvvetlerine ilişkin değerler Tablo 4.4’de yer almaktadır. İlerleme +X yönünde yapılmıştır.

X yönünde en düşük kesme kuvveti 55.28 N olarak 1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak ilerleme hızında ve kesme yağı kullanılarak elde edilmiştir (Deney 9). X yönündeki ikinci en düşük kesme kuvveti 73.08 N olarak 1200 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak ilerleme hızında ve hava soğutmalı şartlarda elde edilmiştir (Deney 5).

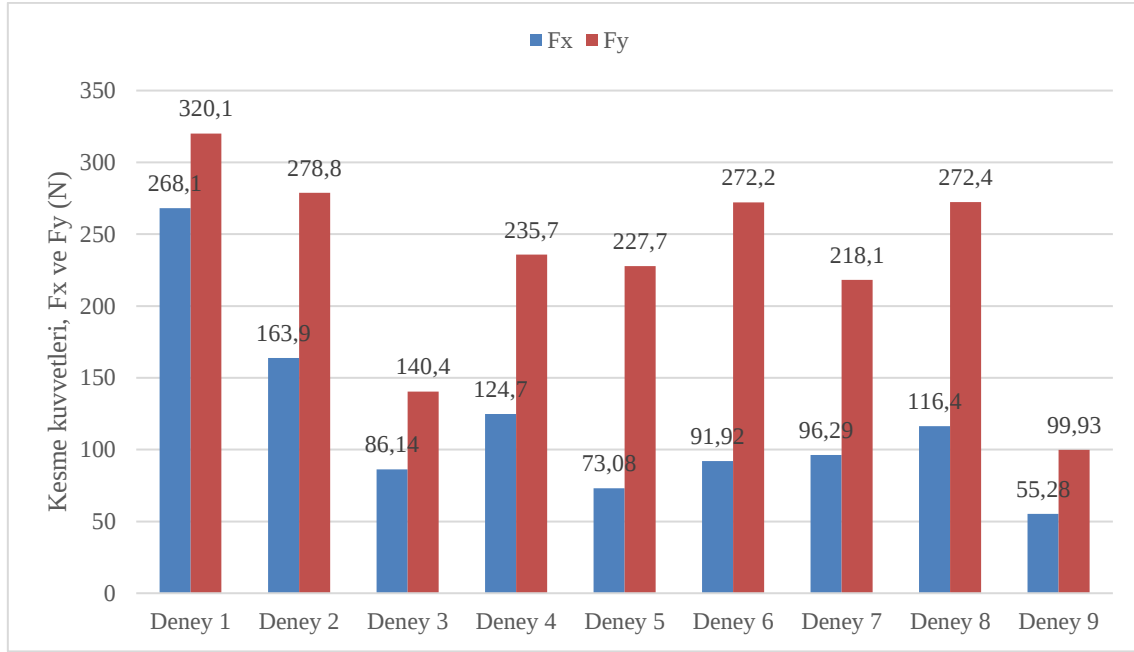
Y yönünde oluşan kuvvetler X yönünde oluşan kuvvetlerden çok daha yüksektir. Y yönünde en düşük kesme kuvveti 99.93 N olarak 1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak ilerleme hızında ve kesme yağı kullanılarak elde edilmiştir (Deney 9). Y yönündeki ikinci en düşük kesme kuvveti 140.4 N olarak 800 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak ilerleme hızında ve kesme yağı kullanılarak elde edilmiştir (Deney 3).

X ve Y yönlerindeki kesme kuvvetleri birlikte değerlendirildiğinde 9 numaralı deneyin en düşük kesme kuvvetlerini (F_x ve F_y) oluşturduğu söylenebilir. Frezeleme operasyonunda Z yönündeki kuvvetler diğer yönlerdeki kadar etkili değildir. Z yönündeki itme kuvveti daha çok delik delme işleminde ilgilenilmektedir.

Elde edilen dataların daha kolay yorumlanabilmesi için Tablo 4.4 de verilen datalardan grafik oluşturulmuştur (Şekil 4.3). Soğutma koşulları kıyaslamasında en düşük kesme kuvvetlerinin kesme yağı kullanımında olduğu aşıkardır. Tüm datalar genel değerlendirildiğinde kuru kesme şartlarında kuvvetler diğer yöntemlerden daha yüksek oluşmuştur. Kesme parametreleri açısından değerlendirildiğinde yüksek fener mili hızı ve yüksek ilerleme daha düşük kuvvet oluşturduğu söylenebilir. Özellikle düşük ilerleme daha yüksek kuvvet oluşmasına neden olmaktadır.

Tablo 4.4 Frezeleme sonucunda oluşan kesme kuvvetleri

Sıra No	Devir sayısı (dev/dak)	Soğutma koşulu	İlerleme hızı (mm/dak)	F _x (N)	F _y (N)
Deney 1	800	Kuru	100	268,1	320,1
Deney 2	800	Hava	200	163,9	278,8
Deney 3	800	Kesme yağı	300	86,14	140,4
Deney 4	1200	Kuru	200	124,7	235,7
Deney 5	1200	Hava	300	73,08	227,7
Deney 6	1200	Kesme yağı	100	91,92	272,2
Deney 7	1600	Kuru	300	96,29	218,1
Deney 8	1600	Hava	100	116,4	272,4
Deney 9	1600	Kesme yağı	200	55,28	99,93



Şekil 4.3. Fx ve Fy kesme kuvvetleri

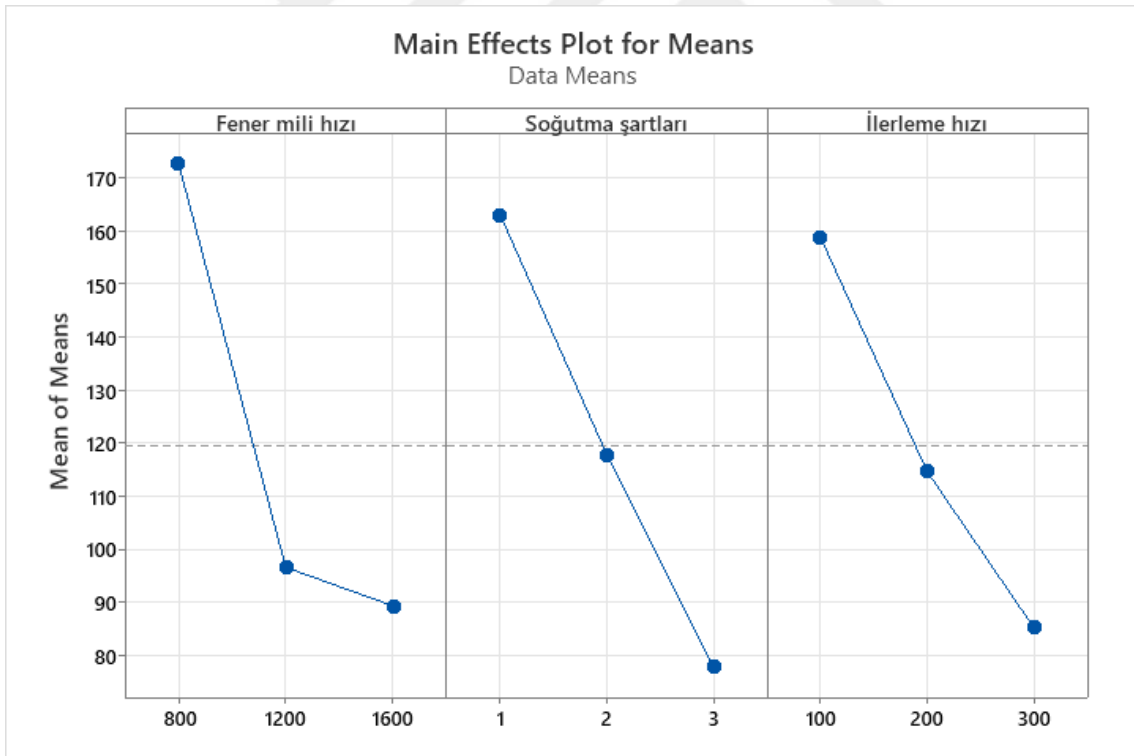
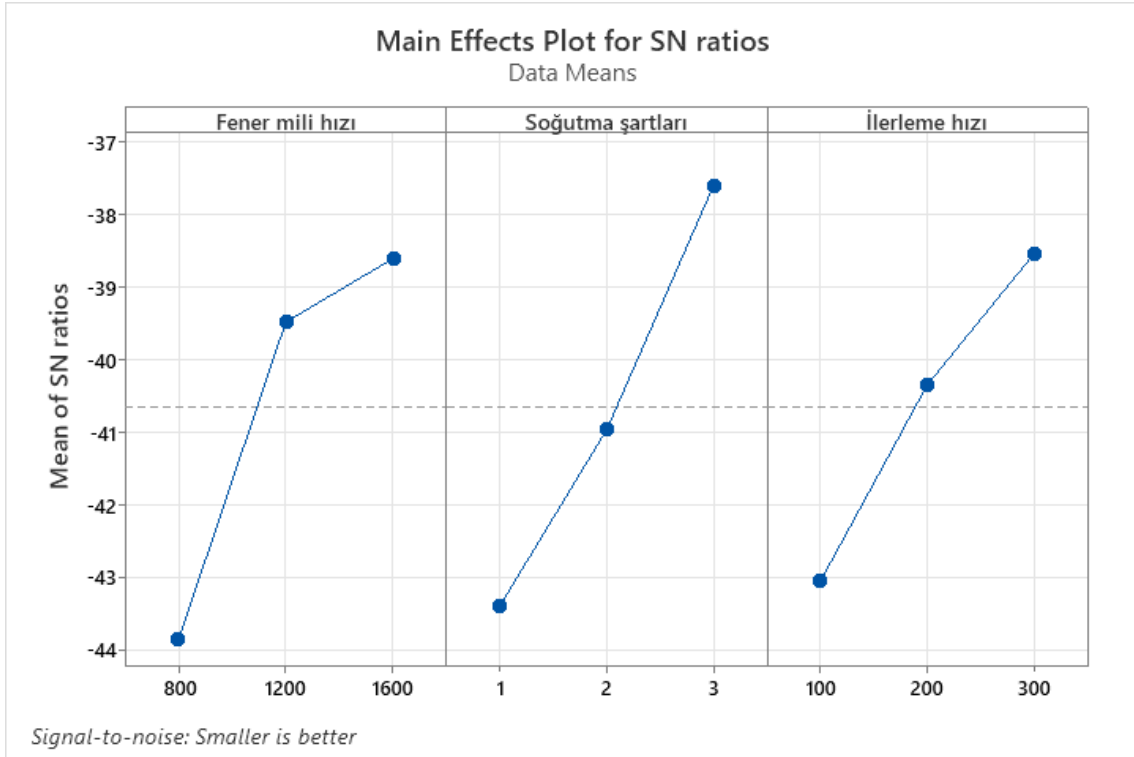
Taguchi deney tasarımına göre yapılan frezeleme testlerinden elde edilen Fx kuvvet datalarına ait S/N değerleri Tablo 4.5’de verilmiştir. Frezeleme parametrelerinin her bir seviyesinin Fx etkisinin grafiği ise Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4.5’de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, frezeleme testlerinde minimum Fx elde etmek için kesme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değerlerdir. Fx artışında en etkili parametrenin soğutma şartları olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise fener mili hızıdır. En az etkili parametre ise ilerleme hızıdır. Minimum Fx 1600 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C3).

Tablo 4.5 Fx için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Seviyeler	Devir sayısı	Soğutma şartları	İlerleme hızı
1	-43,85	-43,38	-43,05
2	-39,49	-40,96	-40,35
3	-38,61	-37,61	-38,55
Max-Min	5,24	5,78	4,50
Sıralama	2	1	3

Taguchi deney tasarımına göre yapılan frezeleme testlerde elde edilen Fx için S/N yanıt ve ortalama grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) Fx değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartlarının artmasıyla S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum Fx azalması anlamına gelmektedir. Ortalamalar grafiğinden de görüldüğü gibi deneysel çalışmalar sonucunda, fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartlarının artış ile Fx azalmaktadır.



Şekil 4.4 Frezeleme parametre seviyelerinin Fx etkisi

Fx için yapılan varyans analizi sonuçları Tablo 4.6’da verilmiştir. Fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartları faktörleri Fx üzerinde önemli etkiye sahip değildir ($P>0,05$).

Tablo 4.6 Fx için Varyans analizi sonuçları

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F-değeri	P- değeri
Devir sayısı	2	12804,7	6402,3	15,62	0,060
Soğutma şartları	2	10915,0	5457,5	13,32	0,070
İlerleme hızı	2	8241,9	4121,0	10,06	0,090
Hata	2	819,6	409,8		
Toplam	8	32781,2			

Taguchi deney tasarımına göre yapılan testlerde elde edilen Fy kuvvet datalarına ait S/N değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir. Frezeleme parametrelerinin her bir seviyesinin Fy etkisinin grafiği ise Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

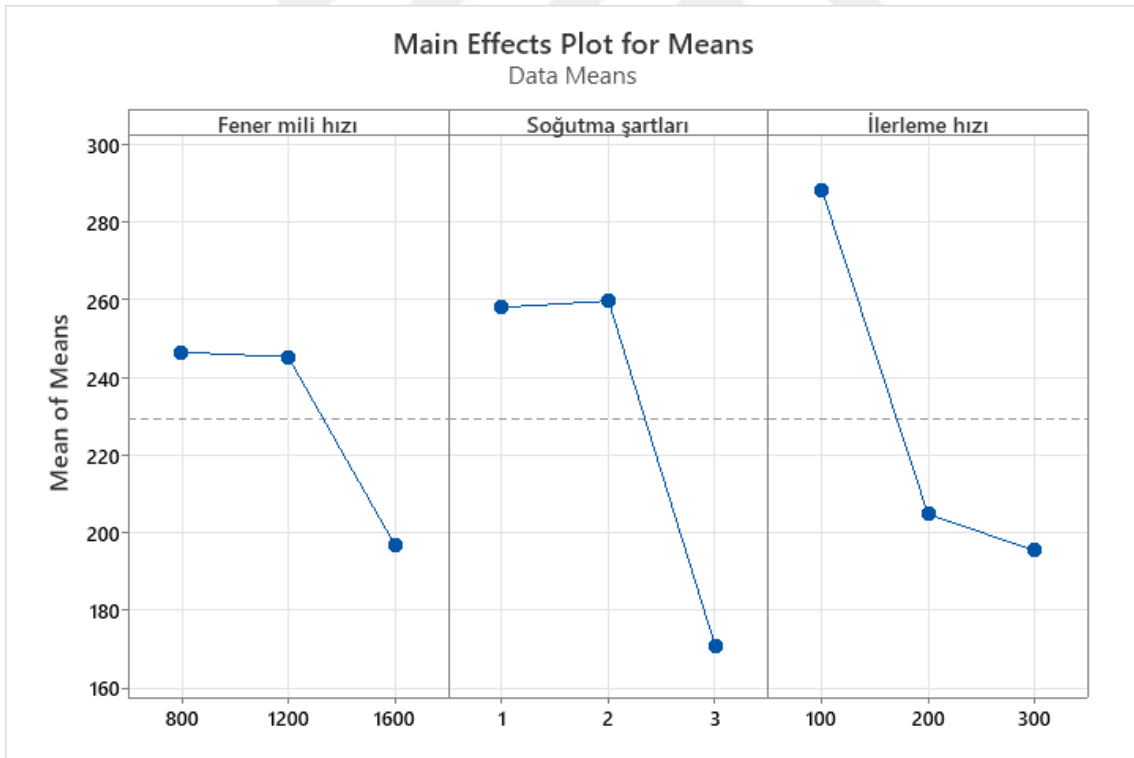
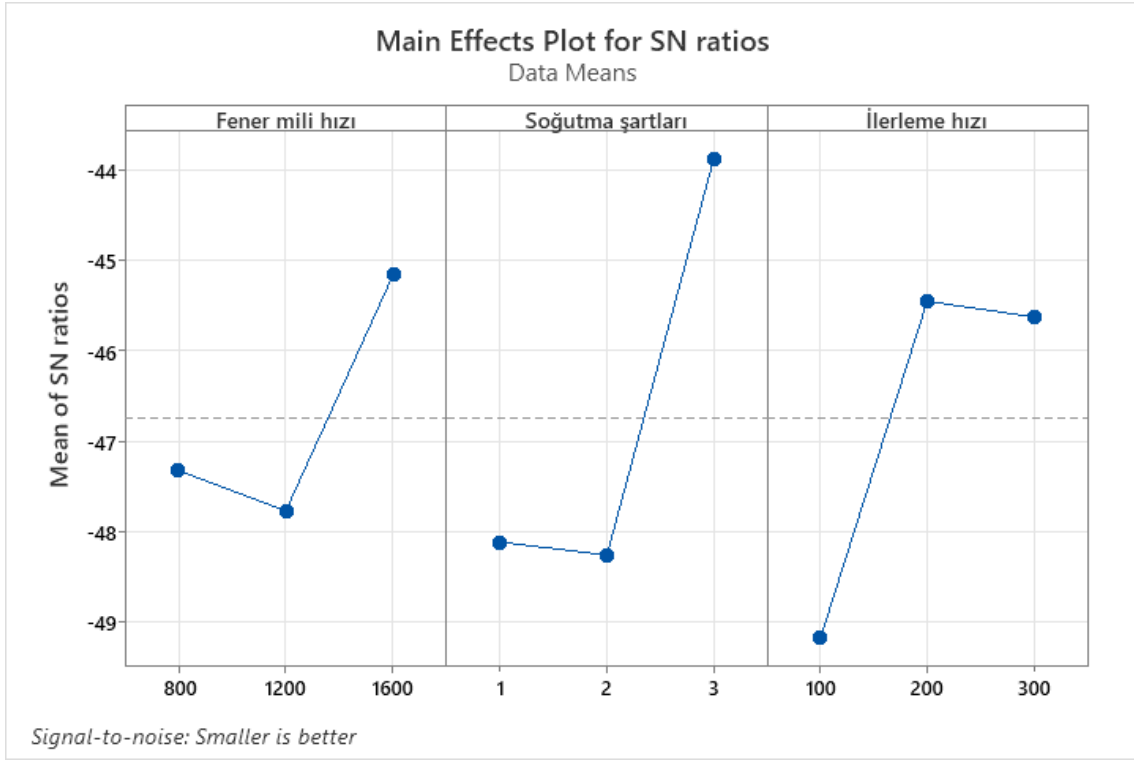
Tablo 4.7’ de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, frezeleme testlerinde minimum Fy elde etmek için kesme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değerlerdir. Fy artışında en etkili parametrenin soğutma şartları olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise ilerleme hızıdır. En az etkili parametre ise fener mili hızıdır. Minimum Fy 1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme yağı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C2).

Tablo 4.7 Fy için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Seviyeler	Devir sayısı	Soğutma şartları	İlerleme hızı
1	-47,32	-48,11	-49,17
2	-47,76	-48,25	-45,45
3	-45,16	-43,88	-45,62
Max-Min	2,61	4,37	3,72
Sıralama	3	1	2

Frezeleme deneylerinde Taguchi deney tasarımına göre yapılan testlerde elde edilen seh m için S/N yanıt ve ortalama grafikleri verilmiştir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) F_y değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartlarının artmasıyla S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum F_y azalması anlamına gelmektedir. Ortalamalar grafiğinden de görüldüğü gibi deneysel çalışmalar sonucunda oluşan F_y , fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartlarının artış ile F_y azalmaktadır.





Şekil 4.5 Frezeleme parametre seviyelerinin F_y etkisi

Fy için yapılan varyans analizi sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. Fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartları faktörleri Fy üzerinde önemli etkiye sahip değildir ($P>0,05$).

Tablo 4.8 Fy için Varyans analizi sonuçları

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F-değeri	P- değeri
Devir sayısı	2	4806	2403	1,48	0,404
Soğutma şartları	2	15477	7738	4,76	0,174
İlerleme hızı	2	15666	7833	4,82	0,172
Hata	2	3253	1626		
Toplam	8	39201			

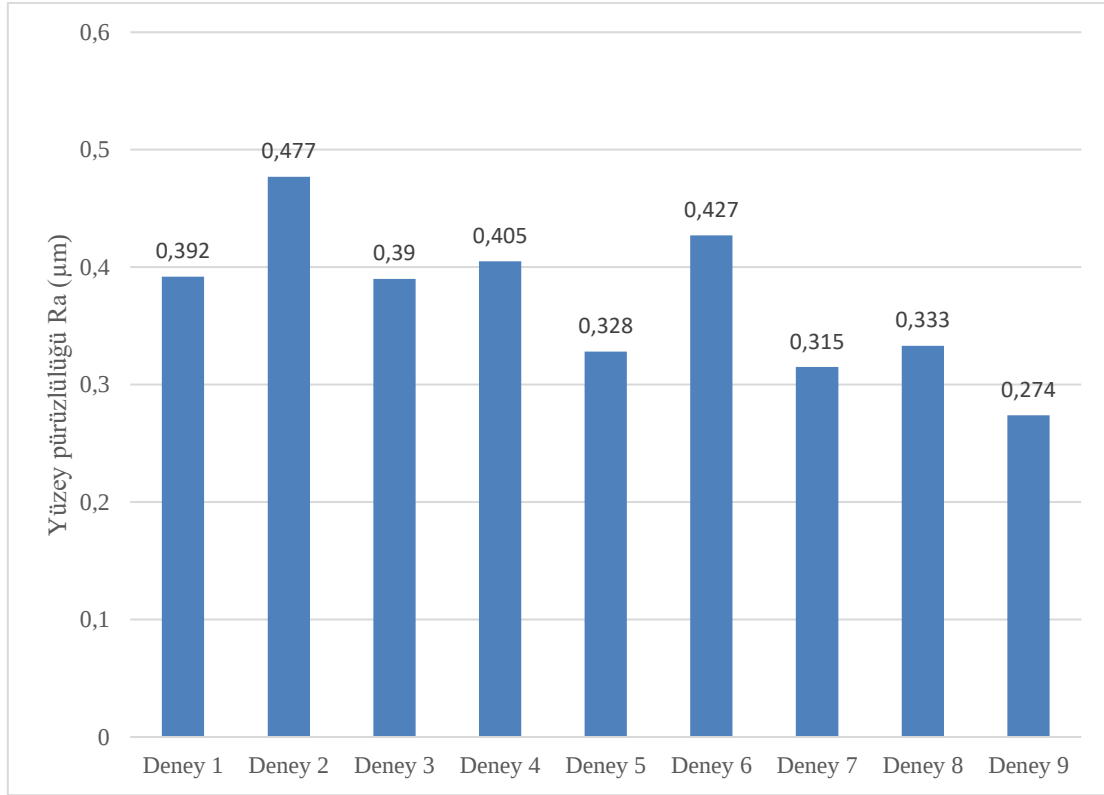
4.3. Frezeleme İşleminin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi

Yüzey pürüzlülüğü, iş parçasının yüzey kalitesi değerlendirmesi için önemli bir faktördür ve yüzey pürüzsüzlüğünü belirler. Düşük yüzey pürüzlülüğü, yüksek yüzey pürüzsüzlüğünü yansıtır. Yüzey pürüzlülüğü, iş parçasının yorulma mukavemetini, sertliği ve korozyon direncini etkileyebilir. Dahası, yüzey pürüzlülüğü makine ürünlerinin hizmet ömrünü ve güvenilirliğini etkiler [21].

Deneylerden sonra kanalların yüzey pürüzlükleri ölçülmüştür. Her bir deney şartı için kanalın 3 farklı bölgesinden ölçüm alınmıştır. Daha sonra bu alınan dataların aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir (Tablo 4.9). Elde edilen dataların daha kolay yorumlanabilmesi için Tablo 4.9 de verilen datalardan grafik oluşturulmuştur (Şekil 4.6). En iyi yüzey kalitesi (en düşük yüzey pürüzlülüğü: 0,274 μm) 9 numaralı deneyde (1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak ilerleme hızında ve kesme yağı kullanılarak) elde edilmiştir. Yüksek fener mili hızında yapılan testlerde düşük fener mili hızında yapılan deneylerde daha kaliteli yüzeyler elde edilmiştir. İlerleme hızı için genel bir trend den söz etmek mümkün değildir. Hem kesme kuvveti hem de yüzey pürüzlülüğü dataları birlikte değerlendirildiğinde 9 numaralı deneyin en düşük kesme kuvvetleri ve en iyi yüzey kalitesini verdiği söylenebilir.

Tablo 4.9 Yüzey pürüzlülük değerleri

	Devir sayısı (dev/dak)	Soğutma koşulu	İlerleme hızı (mm/dak)	1. Ölçüm (μm)	2. Ölçüm (μm)	3. Ölçüm (μm)	Ortalama (μm)
Deney 1	800	Kuru	100	0,396	0,393	0,386	0,392
Deney 2	800	Hava	200	0,511	0,436	0,484	0,477
Deney 3	800	Kesme yağı	300	0,44	0,376	0,353	0,390
Deney 4	1200	Kuru	200	0,381	0,362	0,473	0,405
Deney 5	1200	Hava	300	0,328	0,326	0,331	0,328
Deney 6	1200	Kesme yağı	100	0,345	0,436	0,294	0,427
Deney 7	1600	Kuru	300	0,284	0,385	0,276	0,315
Deney 8	1600	Hava	100	0,367	0,351	0,28	0,333
Deney 9	1600	Kesme yağı	200	0,289	0,251	0,282	0,274



Şekil 4.6. Ortalama yüzey pürüzlülüğü grafiği

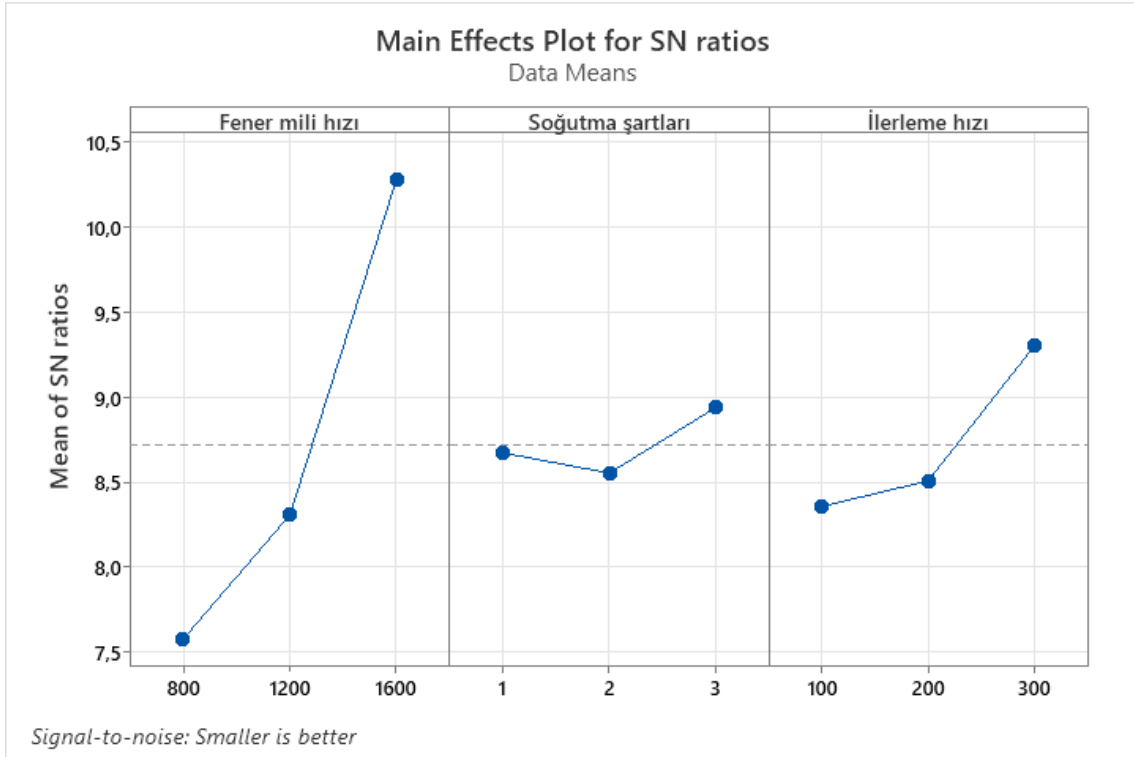
Frezeleme deneylerinde Taguchi deney tasarımına göre yapılan testlerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü datalarına ait S/N değerleri Tablo 4.10’da verilmiştir. Frezeleme parametrelerinin her bir seviyesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiği ise Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

Tablo 4.10’ de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise, frezeleme testlerinde minimum yüzey pürüzlülüğü elde etmek için kesme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değerlerdir. Yüzey pürüzlülüğü artışında en etkili parametrenin devir sayısı olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir. İkinci etkili parametre ise ilerleme hızıdır. Yüzey pürüzlülüğü oluşumunda en az etkili parametre ise soğutma şartlarıdır. Minimum yüzey pürüzlülüğü 1600 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C3).

Tablo 4.10 Yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi

Seviyeler	Devir sayısı	Soğutma şartları	İlerleme hızı
1	7,581	8,673	8,359
2	8,308	8,554	8,509
3	10,277	8,938	9,298
Max-Min	2,696	0,384	0,939
Sıralama	1	3	2

Frezeleme deneylerinde Taguchi deney tasarımına göre yapılan testlerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt ve ortalama grafikleri verilmiştir (Şekil 4.7). Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) yüzey pürüzlülüğü değerlerini vermektedir. S/N grafiği incelendiğinde fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartlarının artmasıyla S/N oranlarının büyüdüğü görülmektedir. Bu durum yüzey pürüzlülüğünün azalması anlamına gelmektedir. Ortalamalar grafiğinden de görüldüğü gibi deneysel çalışmalar sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğü, fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartlarının artış ile yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır.



Şekil 4.7. Frezeleme parametre seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Hastelloy C22 süper alaşımlarının farklı kesme parametreleri ve farklı soğutma stratejileri ile frezelenmesinde her bir seviyesinde farklı yüzey pürüzlülüğü dataları elde edilmiştir. Oluşan bu farklı değerler tesadüfen mi yoksa, bağımsız değişkenlerden mi kaynaklandığı ve her bir değişkenin bu sonuca etkisini belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Minitab paket programı yardımıyla oluşturulan varyans analizi tablosundaki P değeri 0.05’den (% 95 önem seviyesinde) küçükse, en az bir grup ortalaması farklıdır ve gruplar arasında farklılık vardır. Tablo değeri, deneysel veriden hesaplanan F değerinden daha küçükse grup ortalamaları farklı olduğu sonucu çıkarılır. Yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizi sonuçları Tablo 4.11’de verilmiştir. Fener mili hızı, ilerleme hızı ve soğutma şartları faktörleri yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkiye sahip değildir ($P>0,05$).

Tablo 4.11. Yüzey pürüzlülüğü için Varyans analizi sonuçları

Frezeleme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Varyans	F-değeri	P- değeri
Devir sayısı	2	0,020002	0,010001	2,34	0,299
Soğutma şartları	2	0,000370	0,000185	0,04	0,959
İlerleme hızı	2	0,003256	0,001628	0,38	0,724
Hata	2	0,008540	0,004270		
Toplam	8	0,032168			

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmada nikel esaslı süper alaşımlardan olan Hastelloy C22 süper alaşımı farklı kesme parametreleri ve farklı soğutma kombinasyonları ile frezelenmiştir. 3 farklı fener mili hızı, 3 farklı ilerleme ve 3 farklı soğutma şartlarında işlenmiştir. Deneyler anında online olarak takımda oluşan sehim ve kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Deneylerden sonra ise işlenen slotların yüzey pürüzlülüğüne bakılmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özet halinde verilmiştir.

- Kesici takımda oluşan en düşük sehim (0.06051 mm) 800 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak ilerleme ile ve kesme yağı kullanılan deney kombinasyonunda elde edilmiştir (Deney 3). İkinci düşük sehim değeri (0.09007 mm) ise 1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak. İlerleme ile ve kesme yağı kullanılan deney kombinasyonunda elde edilmiştir (Deney 9). Sehim artışında en etkili parametrenin ilerleme hızı, ikinci etkili parametre ise soğutma şartları, en az etkili parametre ise fener mili hızıdır. Minimum sehim 1600 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C3).
- X ve Y yönlerindeki kesme kuvvetleri birlikte değerlendirildiğinde 9 numaralı (1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak. ilerleme ile ve kesme yağı kullanılan deney kombinasyonunda) deneyin en düşük kesme kuvvetlerini oluşturduğu söylenebilir. Soğutma koşulları kıyaslamasında ise en düşük kesme kuvvetlerinin kesme yağı kullanımında olduğu ortaya çıkmaktadır. Tüm datalar genel değerlendirildiğinde kuru kesme şartlarında kuvvetler diğer yöntemlerden daha yüksek oluşmuştur. Kesme parametreleri açısından değerlendirildiğinde yüksek fener mili hızı ve yüksek ilerleme daha düşük kuvvet oluşturduğu belirtilebilir. Özellikle düşük ilerleme daha yüksek kuvvet oluşmasına neden olmaktadır. F_x artışında en etkili parametrenin soğutma şartları olduğu, ikinci etkili parametre ise fener mili hızı, en az etkili parametre ise ilerleme hızıdır. Minimum F_x 1600 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C3). F_y artışında en etkili parametrenin soğutma şartları olduğu, kinci etkili parametre ise ilerleme hızı, en az etkili parametre ise fener mili hızıdır. Minimum F_y 1600 dev/dak fener

mili hızında, 200 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme yağı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C2).

- En iyi yüzey kalitesi (en düşük yüzey pürüzlülüğü: 0,274 μm) 9 numaralı deneyde (1600 dev/dak fener mili hızında, 200 mm/dak ilerleme hızında ve kesme yağı kullanılarak) elde edilmiştir. Yüksek fener mili hızında yapılan testlerde daha kaliteli yüzeyler elde edilmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü artışında en etkili parametrenin devir sayısı olduğu, ikinci etkili parametre ise ilerleme hızı, en az etkili parametre ise soğutma şartlarıdır. Minimum yüzey pürüzlülüğü 1600 dev/dak fener mili hızında, 300 mm/dak. İlerleme hızında ve kesme sıvısı kullanılarak yapılan testlerde elde edilmiştir (A3B3C3).

KAYNAKLAR

- [1] Ulutan, D., & Ozel, T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3), 250-280.
- [2] El-Baradie, M. (1995). Machinability of nickel-base super alloys: a general review. *Journal of Materials Processing Technology(Netherlands)*, 77(1), 278-284.
- [3] Bayraktar, Ş., & Demir, O. (2017). Nikel Esaslı İnconel Alaşımlarının İşlenebilirliği”. In 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS’17) (pp. 1-10).
- [4] Batista, R., Fernanda, R., de Oliveira, T., Valério, M., & Silva, M. B. Application of Taguchi Method in Turning Process of a Superalloy NIMONIC 80A to Improve the Surface Roughness.
- [5] Calamaz, M., Coupard, D., & Girot, F. (2008). A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(3-4), 275-288.
- [6] Ezugwu, E. O., Wang, Z. M., & Machado, A. R. (1999). The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 86(1-3), 1-16.
- [7] Thellaputta, G. R., Chandra, P. S., & Rao, C. S. P. (2017). Machinability of nickel based superalloys: a review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3712-3721.
- [8] Pollock, T. M., & Tin, S. (2006). Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties. *Journal of propulsion and power*, 22(2), 361-374.
- [9] Reed, R. C., & Rae, C. M. F. (2014). Physical metallurgy of the nickel-based superalloys. In *Physical metallurgy* (pp. 2215-2290). Elsevier.
- [10] Aydın, M. (2014). Parmak freze takımı ile talaş kaldırmada kesme kuvvetleri ve boyut hatalarının kesme kuvveti dağılımı metodu ile analizi

- [11] Fata, A., & Nikuei, B. (2010). The effect of the tool geometry and cutting conditions on the tool deflection and cutting forces. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 45, 161-166.
- [12] Zeroudi, N., & Fontaine, M. (2015). Prediction of tool deflection and tool path compensation in ball-end milling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26, 425-445.
- [13] Morkavuk, S. (2016). Karbon fiber takviyeli plastiklerin kuru ve kriyojenik işleme koşullarında frezelenmesi
- [14] Bakır, B. (2012). Frezelemede talaş oluşumunun ve geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi (Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi.
- [15] Basmacı, G. (2002). Nikel esaslı süper alaşım malzemelerinin CNC freze tezgâhlarında işlenmesinde kesme parametrelerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi Marmara Üniversitesi.
- [16] Hartomacıoğlu, S. (2011). Serbest şekilli yüzeylerin işlenmesinde kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğü ve şekil hatasına etkisi, Yüksek lisans tezi Marmara Üniversitesi.
- [17] Burak Özdemir, Talaşlı İmalatta Görüntü İşleme Metodu İle Takım Sehimli Tespiti Ve Hata Analizi, Doktora tezi, İnönü Üniversitesi.
- [18] <https://megamex.com/hastelloy>
- [19] Jia, Z., Fu, R., Wang, F., Qian, B. ve He, C., 2016, Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced polymer composites, *Polymer Composites*
- [20] Köklü, U. (2009). Değişik şekillerde aralıklı (Kesikli) yüzeylerin, taşlanması oluşmuş şekil hatalarının Deneysel İncelenmesi Doktora tezi, Marmara Üniversitesi.
- [21] Basmacı, G., Taşkın, A., & Köklü, U. (2019). Effect of tool path strategies and cooling conditions in pocket machining of AZ91 magnesium alloy.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serap KAHRAMAN

Doğum Yeri ve Tarihi :

İletişim :

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans : Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi
Bölümü, Tasarım ve Konstrüksiyon Eğitimi Ana Bilim Dalı
(2003-2007)

İŞ TECRÜBESİ

2005/2010 Marmara Üniversitesi – Kısmi Zamanlı Öğrenci

2010-2012 Ekstra Mühendislik ve Mak.Sn. Tic.Ltd – Üretim Müdürü

2012/ Halen Baleks Mühendislik ve Mak.San. Tic.Ltd.Şti – Genel Müdür- Kurucu

AKADEMİK YAYINLAR

Atakök G., Bakır B., Kahraman, S.; “Süper Alaşımların İşlenmesinde Kesici Takım
Sehiminin İşlenebilirliğe Etkisinin İncelenmesi”, 5. Uluslararası Mühendislik ve Fen
Bilimleri Kongresi, Orp Danışmanlık ve Organizasyon, 12-13 Ekim 2024, İstanbul.

Girit O., Mutlu B., Atakök G., Basmacı G., Kahraman S.; Hastelloy C-22 Süperalaşım
Malzemesinin DLC kaplamalı Parmak Frezelerle İşlenebilirliğinin Deneysel İncelenmesi,
14th International Materials Symposium (IMSP’2012), October 10-12 2012, Denizli,
(2012), Denizli, Türkiye, 10 - 12 Ekim 2012, ss.121-125

BİLGİSAYAR BECERİLERİ

Microsoft Office

Solidworks

Autocad