

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM 2024 T351 MALZEMENİN DELİK DELME
İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETİ
ÖLÇÜMÜ İLE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Zübeyir TURGUT

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

OCAK 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM 2024 T351 MALZEMENİN DELİK DELME
İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETİ
ÖLÇÜMÜ İLE OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Zübeyir TURGUT

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Doç. Dr. Murat ÖZSOY

OCAK 2023

Yunus Zübeyir TURGUT tarafından hazırlanan “Alüminyum 2024 T351 Malzemenin Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Ölçümü ile Optimizasyonu” adlı tez çalışması 03.01.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Alüminyum 2024 T351 Malzemenin Delik Delme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti Ölçümü İle Optimizasyonu” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(03/01/2023).

Yunus Zübeyir TURGUT



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimin tüm aşamalarında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, beni yönlendiren, her konuda yardımını ve desteğini esirgemeyen başta değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat ÖZSOY olmak üzere; yüksek lisans sürecimdeki akademik çalışmalarında beni bilgilendiren ve yönlendiren Dr. Öğr. Üyesi Neslihan ÖZSOY hocama da teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen, üzerimde büyük emekleri olan aileme ve zor zamanlarımda yanımda olan, beni destekleyen arkadaşlarıma sonsuz teşekkürü borç bilirim.

Yunus Zübeyir TURGUT



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Talaşlı İmalat	1
1.2. Delik Delme	2
1.3. Talaşlı İmalatta Kuvvetler	3
1.3.1. Ortogonal kesme modeli	3
1.3.2. Kienzle bağıntısı	4
1.3.3. Delik delmede kuvvetler	4
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	5
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Alüminyum 2024 Malzemesine Delik Delinmesiyle İlgili Deneysel Çalışmalar	7
2.2. Diğer Alüminyum Alaşımlarına Delik Delinmesiyle İlgili Deneysel Çalışmalar	9
2.3. Alüminyum 2024 Malzemeye Uygulanan Diğer Talaş Kaldırma Deneysel Çalışmaları	10
3. MATERYAL ve YÖNTEM	13
3.1. Alüminyum 2024 T351 Alaşımı	13
3.2. Deneylerde Kullanılan Kesici Takımlar (Matkaplar)	14
3.3. Deney Düzenegi	15
3.4. Taguchi Deney Tasarımı	15
3.5. Taguchi Optimizasyonu	16
3.6. Varyans Analizi (ANOVA)	17
3.7. Regresyon Analizi	18
3.8. Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology)	19
3.9. Üstel Düzeltme Metodu	20
4. DENEYSEL BULGULAR	21
4.1. Maksimum Kuvvetlerin Tespiti	22
4.2. Deney Sonuçları	24
4.2.1. HSS matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları	24
4.2.2. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları	25

4.2.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları	26
4.3. Deney Sonuçlarının İstatiksel Analizleri.....	28
4.3.1. HSS matkap ile delinen deliklerin veri analizleri.....	28
4.3.1.1. HSS matkap ile delinen deliklerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu.....	28
4.3.1.2. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre varyans analizi	29
4.3.1.3. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre regresyon analizi	30
4.3.1.4. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu	31
4.3.2. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklerin veri analizleri	32
4.3.2.1. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu.....	32
4.3.2.2. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre varyans analizi	34
4.3.2.3. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre regresyon analizi.....	35
4.3.2.4. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu.....	36
4.3.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklerin veri analizleri	37
4.3.3.1. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu	37
4.3.3.2. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre varyans analizi	39
4.3.3.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre regresyon analizi.....	39
4.3.3.4. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu.....	40
5. SONUÇLAR	43
KAYNAKLAR.....	47
EKLER.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	57

KISALTMALAR

ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
DLC	: Diamond-Like Carbon (Elmas Benzeri Karbon)
HSS	: High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
KO	: Kareler Ortalaması
KT	: Kareler Toplamı
MMY	: Minimum Miktarda Yağlama
S/G	: Sinyal/Gürültü
SD	: Serbestlik Derecesi



SİMGELER

A	: Talaş kesit alanı [mm^2]
C	: Talaş açısı sabiti
D	: Takım çapı [mm]
F_c	: Kesici takım yüzeyine etki eden sürtünme kuvveti [N]
F_p	: Kesici takım yüzeyine etki eden asıl kesme kuvveti [N]
F_s	: Kayma düzlemine etki eden sürtünme kuvveti [N]
F_t	: Kesici takım yüzeyine etki eden pasif kesme kuvveti [N]
F_x	: X ekseninde ölçülen kuvvet [N]
F_y	: Y ekseninde ölçülen kuvvet [N]
f_z	: Diş başı ilerleme miktarı [mm/diş]
F_z	: Z ekseninde ölçülen kuvvet [N]
F_{z,maks}	: Z ekseninde ölçülen maksimum kuvvet [N]
k_a	: Takım aşınması faktörü
k_s	: Özgül kesme kuvveti [N/mm^2]
k_t	: Takım malzemesi faktörü
k_v	: Kesme hızı faktörü
k_γ	: Talaş açısı faktörü
n	: Devir sayısı [dev/dk]
N	: Deney parametresinin seviye sayısı
N_c	: Kesici takım yüzeyine etki eden normal kuvvet [N]
N_s	: Kayma düzlemine etki eden normal kuvvet [N]
R²	: Determinasyon katsayısı [%]
S²	: Örneklem varyansı
T	: Yanıtın hedef değeri
U	: Yanıt için kabul edilebilir üst sınır değeri
V_c	: Kesme hızı [m/dk]
V_f	: İlerleme hızı [mm/dk]
$\bar{Y}$	: Gözlem değeri
y_i	: Yanıt için kabul edilebilir alt sınır değeri

W : Ağırlık
 α : Talaş açısı [°]
 φ : Kayma açısı [°]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Alüminyum 2024 T521 alaşımının kimyasal bileşimi [29].	13
Tablo 3.2. Alüminyum 2024 T521 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri [29].	14
Tablo 3.3. Kullanılan kesici takımların teknik özellikleri.	14
Tablo 3.4. Deney parametre ve seviyeleri.	16
Tablo 3.5. Deney tasarımı.	16
Tablo 3.6. Örnek varyans analizi tablosu.	18
Tablo 4.1. HSS matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları.	24
Tablo 4.2. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları.	25
Tablo 4.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları.	27
Tablo 4.4. HSS matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü oranları.	28
Tablo 4.5. HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre parametrelerin sinyal/gürültü oranları.	28
Tablo 4.6. HSS matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi.	30
Tablo 4.7. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü oranları.	33
Tablo 4.8. HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre parametrelerin sinyal/gürültü oranları.	33
Tablo 4.9. HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi.	34
Tablo 4.10. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü oranları.	37
Tablo 4.11. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre parametrelerin sinyal/gürültü oranları.	38
Tablo 4.12. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi.	39



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Talaşlı imalat yöntemleri [1].	1
Şekil 1.2. Ortogonal kesme modeline göre kuvvet vektörleri [6].	3
Şekil 1.3. Delik delmede matkaba etki eden kuvvetler.	5
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan kesici takımlar.	14
Şekil 3.2. Deney Düzenegi.	15
Şekil 4.1. Alüminyum 2024 – T351 alaşımı numune.	21
Şekil 4.2. Üstel düzeltme metodunun sinyal gürültüleri üzerindeki etkisi.	22
Şekil 4.3. Kuvvet-Derinlik grafiğinde maksimum kuvvet noktası ve matkap konumları.	23
Şekil 4.4. HSS matkap ile delik delinen numune.	25
Şekil 4.5. HSSE-Co5 matkap ile delik delinen numune.	26
Şekil 4.6. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delik delinen numune.	27
Şekil 4.7. HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneyler için parametrelerin sinyal/gürültü oranı grafikleri.	29
Şekil 4.8. Denklem 4.1'in doğru grafiğine göre HSS matkap ile elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı.	31
Şekil 4.9. HSS matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları.	32
Şekil 4.10. HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneyler için parametrelerin sinyal/gürültü oranı grafikleri.	34
Şekil 4.11. Denklem 4.2'nin doğru grafiğine göre HSSE-Co5 matkap ile elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı.	35
Şekil 4.12. HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları.	36
Şekil 4.13. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneyler için parametrelerin sinyal/gürültü oranı grafikleri.	38
Şekil 4.14. Denklem 4.3'ün doğru grafiğine göre HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı.	40
Şekil 4.15. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları.	41



ALÜMİNYUM 2024 T351 MALZEMENİN DELİK DELME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETİ ÖLÇÜMÜ İLE OPTİMİZASYONU

ÖZET

Talaşlı imalat oldukça yaygın bir üretim yöntemidir. Ayrıca delik delme operasyonları da tüm talaşlı imalat proseslerinin %33'ünü ve tüm talaş kaldırma proseslerinde harcanan enerjinin %25'ini oluşturmaktadır. Delik delmenin imalat sektörü içerisindeki yaygınlığı göz önünde bulundurulduğunda, delik delinen proseslerde takım aşınmasını, harcanan enerjiyi ve süreyi minimize ederek maliyeti düşürmek amaçlanır. Bu da delik delmeye etki eden parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür.

Bu çalışma kapsamında havacılık ve uzay endüstrisinde oldukça fazla tercih edilen dolayısıyla binlerce delik delme işlemine tabi tutulan Al 2024 T351 alaşımı kullanılarak delik delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen kesme kuvveti değerlerine göre kesme parametrelerinin optimum seviyeleri tespit edilmiştir. Kesme parametreleri olarak, kesme hızı (50, 70, 90 ve 110 m/dk) ve dış başı ilerleme miktarı (0,06/0,08/0,1 ve 0,12 mm/diş) ele alınmıştır. Deneyler Taguchi L16(4²) deney tasarımına göre 8 mm çaplı üç takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirilip kuvvetlerin elde edilmesinde; FANUC kontrol paneline sahip Taksan TMC-700 V CNC dik işleme tezgâhı, ESİT AX3 yük hücresi, NI cDAQ-9188 veri toplama ünitesinin NI 9237 modülü ve FlexLogger yazılımı kullanılmıştır. Deneylerde elde edilen tüm kuvvet verilerine, Excel yazılımında üstel düzeltme veri çözümleme metodu uygulanarak sinyal gürültülerinin neden olduğu anlam ifade etmeyen veriler azaltılmaya çalışılmıştır. Her bir delik için işleme yönündeki (z eksen) maksimum kuvvetler tespit edilmiştir. Tespit edilen bu maksimum kesme kuvvetleri kullanılarak Minitab 19 yazılımı yardımıyla Taguchi optimizasyonları, varyans analizleri (ANOVA) ve regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca maksimum kesme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonları (yanıt yüzey metodu) da gerçekleştirilmiştir.

Üç takım türü için de maksimum kesme kuvvetleri açısından parametrelerin optimum seviyeleri; kesme hızı için 50 m/dk olarak, dış başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu ile tespit edilmiştir. Üç takım türünde de kesme kuvveti üzerinde en etkili kesme parametresinin dış başı ilerleme miktarı olduğu sonucuna varyans analizi yardımıyla varılmıştır. Regresyon analizleri neticesinde maksimum kesme kuvveti ile kesme parametreleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel modeller elde edilmiştir. Maksimum kesme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak dış başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak çoklu yanıt optimizasyonu ile tespit edilmiştir.



OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS WITH CUTTING FORCE MEASUREMENT IN DRILLING OF ALUMINUM 2024 T351 MATERIAL

SUMMARY

Machining is a common production method. In addition, drilling operations account for 33% of all metal cutting processes and 25% of the energy consumed in all metal removal processes. Considering the prevalence of drilling in the manufacturing sector, it is aimed to reduce the cost of drilling processes by minimizing tool wear, energy and time consumed. This is possible by optimizing the parameters that affect the drilling.

With methods such as theoretical calculation, experimental method and computer-aided finite element method, it is possible to achieve optimization of parameters by obtaining cutting forces in drilling holes. When Literature studies are examined, it is seen that the experimental method is more common than other methods and the accuracy of other methods is measured by comparing it with the experimental method. This is because the experimental method gives more accurate results as it better reflects the processing conditions compared to other methods.

Despite the development of composites and new lightweight materials, aluminum alloys are preferred in many sectors such as automotive, construction, maritime industries, especially in the aerospace industry. For this reason, the market share of aluminum alloys is increasing every year. The prominence of aluminum alloys in the aerospace industry brings with it thousands of hole drilling operations to make many riveted and bolted joints. Within the scope of this study, drilling experiments were carried out using Al 2024 T351 alloy, which is highly preferred in the aerospace industry and therefore subjected to thousands of drilling operations. The length measurements of the test specimens are 60x70x20 mm. The experiments were carried out using the liquid cooling method.

According to the cutting force values obtained from the experiments, the optimum levels of the cutting parameters were determined. Cutting speed (50, 70, 90 and 110 m/min) and feed rate (0.06/0.08/0.1 and 0.12 mm/tooth) are considered as cutting parameters. While determining the parameters and levels, support was received from the studies in the literature and companies in this field. The experiments were conducted according to the Taguchi L16(4²) experimental design. Taguchi experiment design aims to plan experiments with minimal time loss and cost. In the experiments, lower cost HSS (high speed steel) drills were preferred than carbide drills. 8 mm diameter HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN coated) drills belonging to Ruko brand were used.

The experiments were carried out in Sakaya University Faculty of Engineering Mechanical Engineering Laboratory. In obtaining of forces; Taksan TMC-700 V CNC vertical machining machine with FANUC control panel, ESİT AX3 load cell, NI 9237 module of NI cDAQ-9188 data acquisition unit and FlexLogger software were used.

All the force data obtained in the experiments were applied the exponential smoothing data analysis method in Excel software to reduce the meaningless data caused by signal noises. For each hole, the maximum forces in the machining direction (z-axis) are determined. The reason for taking only the forces on the z axis as a basis is that, as stated in Section 1.3.3., the forces formed on the x and y axis are at very low values compared to the forces formed in the z axis as a result of balancing. Generally, in drilling operations, the forces formed on the x and y axis are neglected and the forces formed on the z axis are taken into account as the cutting force.

Using these maximum cutting forces, Taguchi optimizations, analysis of variance (ANOVA) and regression analyzes were performed to minimize the cutting forces. However, it has been seen that only when the maximum cutting force is tried to be minimized, the production time increases. Since the increase in manufacturing time will adversely affect operating costs, multiple response optimizations (response surface method) of cutting parameters have also been carried out, which together minimize the maximum cutting force and processing time. All statistical analyses were performed with the help of Minitab 19 software.

In Taguchi optimization, the most appropriate parameter levels can be determined by evaluating the test results. This evaluation process (performance criterion) is carried out with a ratio called signal/noise ratio (S/N). The equation to be used to calculate the signal/noise ratio varies according to the target of the problems. Within the scope of this study, since the cutting forces are wanted to be minimized, signal/noise ratios were calculated according to the smallest best target type.

In the analysis of variance, the effect (effect ratio) of the experimental parameters on these outputs is determined by evaluating the dependent variable outputs obtained in the experiments. The experimental parameters, whose effects on the outputs are determined, are interpreted for the solution of the problem. By using these mathematical models created in regression analysis, the dependent variable output can be estimated according to the independent variable inputs. The prediction capabilities of mathematical models vary according to the regression model used. The prediction capabilities of the created mathematical models can be interpreted according to the coefficient of determination (R^2). With the increase in the value of R^2 , the prediction ability of the mathematical model increases.

The response surface method is the method that is extensively applied in many branches of science and in various industrial fields. The response expression represents the dependent variable. This method is used to find parameters that have an impact on the response, to determine the optimum levels of parameters for one or more responses, and to obtain mathematical models that represent the relationship between the response and the independent variables. In line with these objectives, processes or problems are optimized. Determining the optimum levels of parameters for a response using the response surface method is called response optimization. If the number of responses is more than one, the optimization performed is multi-response optimization.

The optimum levels of the parameters in terms of maximum cutting forces for all three tool types; 50 m/min for cutting speed and 0.06 mm/tooth for feed rate was determined by Taguchi optimization.

It was concluded with the help of variance analysis that the most effective cutting parameter on the cutting force in all three tool types was the feed rate. In the

experiments performed with HSS drill, the effect rate of feed rate on cutting force was determined as 80.63%, in experiments with HSSE-Co5 drill as 87.74% and in experiments with HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill as 89.23%.

Three regression analyses were performed according to the maximum cutting force results of the experiments conducted separately for the three types of drills. As a result of regression analysis, mathematical models were obtained that define the relationship between maximum cutting force and cutting parameters (cutting speed and feed rate). Compared to the maximum cutting force results obtained in the experiments, the prediction ability of the created mathematical model was found to have 90.58% accuracy for the HSS drill, 95.79% accuracy for the HSSE-Co5 drill, and 94.70% accuracy for the HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill.

The optimum levels of the cutting parameters, which together minimize the maximum cutting force and processing time, were determined by multiple response optimization as 110 m/min for cutting speed and 0.06 mm/tooth for feed rate. The desirability function values of the multiple response optimization findings were found as 0.8804 for the HSS drill, 0.8513 for the HSSE-Co5 drill, and 0.8750 for the HSSE-Co5 (TiAlN coated) drill. When these values were evaluated, it was concluded that the multiple response optimization was statistically significant.

These results, which are obtained in the drilling process of Al 2024 T351 alloy with 8 mm diameter HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN coated) drills, can be used in later academic studies and industrial applications.

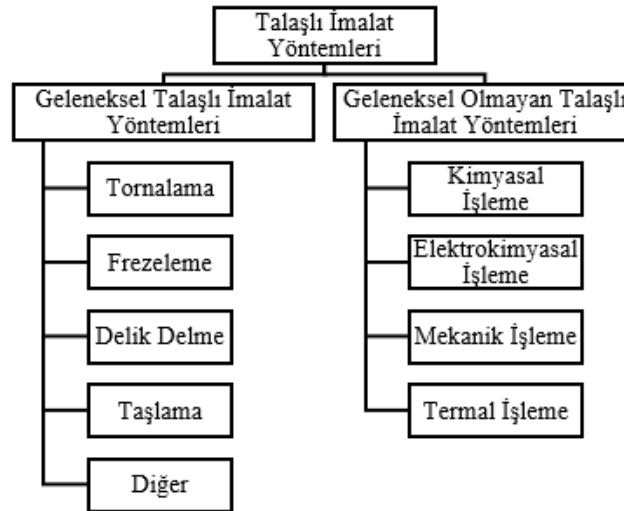


1. GİRİŞ

1.1. Talaşlı İmalat

Talaşlı imalat, istenen geometrinin sağlanması için çeşitli tezgâh ve çeşitli takımlar aracılığıyla iş parçası üzerinden talaş adı verilen istenmeyen kısımların uzaklaştırılması işlemidir. Temel imalat yöntemlerinden biri olmakla birlikte genellikle üretilen her parçanın son imalat aşaması talaşlı imalattır. Bunun sebebi talaşlı imalatın iyi bir yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti sağlamasıdır. Ön şekil verilmiş metallerin yanı sıra hiç şekil verilmemiş iş parçalarına da yaygın olarak uygulanır. Yaygın kullanımı ve avantajları ele alındığında talaşlı imalatın son derece önemli bir imalat operasyonu olduğu anlaşılmaktadır [1-3].

Talaşlı imalat kendi içerisinde çeşitli amaçlar doğrultusunda çeşitli yöntemlere ayrılmaktadır. En genel olarak iki gruba ayrılır. Bunlar geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ve geleneksel olmayan talaşlı imalat yöntemleridir. Bu iki grup da kendi içerisinde alt gruplara ayrılır. Şekil 1.1.'de bu yöntemlerden bazıları ifade edilmiştir [1].



Şekil 1.1. Talaşlı imalat yöntemleri [1].

1.2. Delik Delme

Delik delme, kesici takımın (matkap) hem ilerleme hem dönme hareketi yaparak iş parçası üzerinde silindirik boşluk oluşturmak için talaş kaldırması işlemidir. Broşlama, raybalama, havşa açma, delik büyütme gibi yöntemleri de kapsamaktadır [4]. Tüm talaş kaldırma operasyonlarının %33'ünü ve tüm talaş kaldırma proseslerinde harcanan enerjini %25'ini oluşturmaktadır [5]. Dolayısıyla en önemli talaş kaldırma yöntemlerinden biridir.

Delik delme proseslerinde bazı kavramlar kullanılmaktadır. Kesici takım veya iş parçası tarafından yapılan dönme hareketine iş mili hızı (n) denir. İş mili hızı dakikada yapılan devir sayısı olarak tanımlanır. Kesici takım tarafından yapılan çizgisel hıza ise kesme hızı (V_c) adı verilir. Denklem 1.1'e göre hesaplanır [4]. Denklemde belirtilen D harfi milimetre biriminde takım çapını, n harfi ise dakikada yapılan devir sayısını ifade etmektedir.

$$V_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000} \left(\frac{m}{dk} \right) \quad (1.1)$$

Takımın iş parçasına göre veya iş parçasının takıma göre birim zamanda ilerlemesine ilerleme hızı (V_f) denir. Delik delmede ilerleme hızı denklem 1.2'ye göre hesaplanır [4]. Denklemde belirtilen f_z harfi diş başı ilerleme miktarı (mm/diş), n harfi ise dakikada yapılan devir sayısını ifade etmektedir.

$$V_f = f_z \times n \left(\frac{mm}{dk} \right) \quad (1.2)$$

Delğin tüm kesit boyunca istenen ölçüde delinmesi için matkabın ilerleyeceği uzunluk tanımlanmalıdır. Bu ilerleme uzunluğu, delik derinliği ile matkap ucu yüksekliğinin toplamına eşittir. İlerleme uzunluğunun (mm) ilerleme hızına (mm/s) bölünmesiyle de delik delme işleminin süresi hesaplanabilir (denklem 1.3).

$$\text{Delik Delme Süresi} = \frac{\text{İlerleme Uzunluğu}}{V_f} (s) \quad (1.3)$$

1.3. Talaşlı İmalatta Kuvvetler

1.3.1. Ortogonal kesme modeli

Ortogonal kesme modeline göre kayma düzlemine ve kesici takım yüzeyine çeşitli kuvvetler etki etmektedir. Kayma düzlemine etki eden kuvvetler, sürtünme (F_s) ve normal (N_s) kuvvettir. Kesici takım yüzeyine etki eden kuvvetler ise sürtünme (F_c), normal (N_c), asıl kesme kuvveti (F_p) ve pasif kesme kuvveti (F_t)'dir. Asıl kesme kuvveti ve pasif kesme kuvveti deneyler neticesinde ölçülmektedir. Diğer kuvvetler ise aşağıda ifade edilen denklem 1.4, denklem 1.5, denklem 1.6 ve denklem 1.7 ile elde edilebilir. Denklemlerde belirtilen α ve φ açıları sırasıyla talaş açısı ($^\circ$) ve kayma açısını ($^\circ$) ifade etmektedir [6].

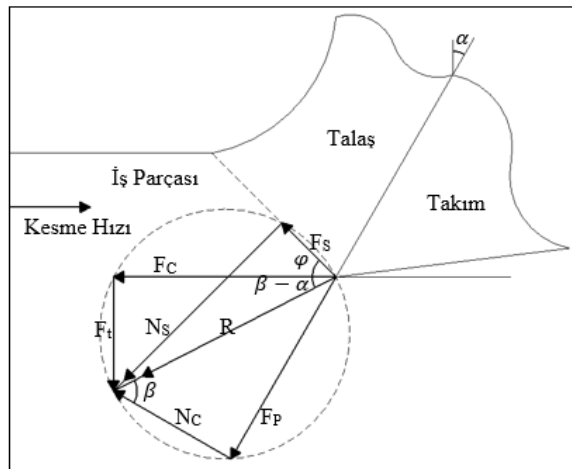
$$F_p = F_c \cdot \sin \alpha + F_t \cdot \sin \alpha \quad (N) \quad (1.4)$$

$$N_c = F_c \cdot \cos \alpha - F_t \cdot \sin \alpha \quad (N) \quad (1.5)$$

$$F_s = F_c \cdot \cos \varphi - F_t \cdot \sin \varphi \quad (N) \quad (1.6)$$

$$N_s = F_c \cdot \sin \varphi + F_t \cdot \cos \varphi \quad (N) \quad (1.7)$$

Şekil 1.2.'de ortogonal kesme modeline göre kuvvet vektörleri ifade edilmiştir [6]. β sürtünme açısını ($^\circ$) ifade etmektedir.



Şekil 1.2. Ortogonal kesme modeline göre kuvvet vektörleri [6].

1.3.2. Kienzle bağıntısı

Ortogonal kesme modelindeki açıların tayini oldukça zor olduğundan pratikte Kienzle bağıntısı uygulanabilir [3]. Kienzle bağıntısı, deneylerle belirlenmiş özgül kesme kuvveti (k_s), talaş kesit alanı (A) ve çeşitli faktör katsayılarının matematiksel olarak çarpımı neticesinde kesme kuvveti elde edilmesi esasına dayanır. Kesme hızı faktörü (k_v), talaş açısı faktörü (k_γ), takım aşınması faktörü (k_a) ve takım malzemesi faktörü (k_t) kesme kuvvetini etkileyen faktörlerdir. Denklem 1.8’de Kienzle kesme kuvveti denklemi ifade edilmiştir [7].

$$F_c = A \times k_s \times k_v \times k_\gamma \times k_a \times k_t (N) \quad (1.8)$$

Talaş açısı faktörü (k_γ), talaş açısı sabiti (C) ve derece biriminde takımın efektif talaş açısı (γ) verilerine göre hesaplanır (denklem 1.9). Talaş açısı sabiti (C) çelik malzemeler için 109, döküm malzemeler için ise 103 alınarak hesaba dahil edilir [7].

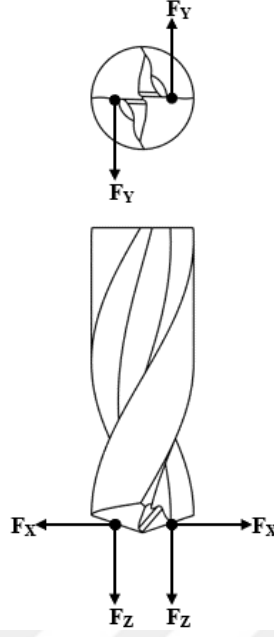
$$k_\gamma = \frac{C - 1,5\gamma}{100} \quad (1.9)$$

Takım aşınması faktörü (k_a) yeni takımlar için 1-1,01, yıpranmış takımlar için 1,3-1,4 olarak alınır [3]. Kesme hızı faktörü (k_v) ve takım malzemesi faktörü (k_t) değerlerini elde etmek için kesme hızı ve takım malzemesine göre literatürde ifade edilmiş verilerden yararlanılır.

1.3.3. Delik delmede kuvvetler

Delik delme sırasında matkapta talaş kaldırma kuvvetleri oluşmaktadır. Kesici ağızlara etki eden kuvvetler: x ekseninde oluşan radyal kuvvet (F_x), y ekseninde oluşan kuvvet (F_y) ve z ekseninde oluşan itme kuvveti (F_z)’dir. Matkaba etki eden bu kuvvetler Şekil 1.3.’te gösterilmiştir.

Şekil 1.3.’te görüldüğü gibi kesici ağızlardaki aynı eksende oluşan zıt yönlü kuvvetler birbirini dengeleme etkisi yapmaktadır. Dengeleme etkisi neticesinde z eksenine göre x ve y ekseninde çok daha düşük kuvvetler ölçülür. Bu sebeple delme işlemlerinde, x ve y ekseninde oluşan kuvvetler ihmal edilip z ekseninde oluşan itme kuvvetleri kesme kuvveti olarak dikkate alınabilmektedir.



Şekil 1.3. Delik delmede matkaba etki eden kuvvetler.

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bölüm 1.1. ve Bölüm 1.2.'de de belirtildiği üzere talaşlı imalat oldukça yaygın bir üretim yöntemidir. Yine bahsedildiği gibi delik delme tüm talaşlı imalat operasyonlarının %33'ünü ve tüm talaş kaldırma proseslerinde harcanan enerjinin %25'ini oluşturmaktadır. Dolayısıyla çok sayıda mamulün üretim prosesinde delik delme operasyonu mevcuttur. Bu sebeple delik delme operasyonlarında takım aşınmasını, harcanan enerjiyi ve süreyi minimize ederek maliyeti düşürmek önem arz etmektedir. Bu da delik delmeye etki eden parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür.

Teorik hesap, deneysel yöntem ve bilgisayar destekli sonlu elemanlar metodu gibi yöntemlerle, delik delmede kesme kuvvetlerini elde ederek parametrelerin optimizasyonunun gerçekleştirilmesi mümkündür. Fakat Bölüm 2.'deki literatür araştırması incelendiğinde deneysel yöntemin diğer yöntemlere göre daha yaygın olduğu, diğer yöntemlerin doğruluğunun deneysel yöntem ile kıyaslanarak ölçüldüğü görülmektedir. Bunun sebebi, deneysel yöntemin diğer yöntemlere kıyasla işleme şartlarını daha iyi yansıttığı için daha doğru sonuçlar vermesidir.

Bu çalışma kapsamında da havacılık ve uzay endüstrisinde tercih edilen dolayısıyla binlerce delik delme işlemine tabi tutulan Al 2024 T351 alaşımı kullanılarak delik

delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deliklerin delinmesi sırasında sıvı soğutma metodu kullanılmıştır. Kesme parametreleri olarak, kesme hızı (50, 70, 90 ve 110 m/dk) ve dış başı ilerleme miktarı (0,06/0,08/0,1 ve 0,12 mm/dış) ele alınmıştır. Deneyler, Taguchi L16(4²) deney tasarımına göre 8 mm çaplı üç takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirilip kuvvetlerin elde edilmesinde; FANUC kontrol paneline sahip Taksan TMC-700 V CNC dik işleme tezgâhı, ESİT AX3 yük hücresi, NI cDAQ-9188 veri toplama ünitesinin NI 9237 modülü ve FlexLogger yazılımı kullanılmıştır. Sinyal gürültüleri neticesinde oluşan işlevsiz veriler, Excel yazılımı kullanılarak üstel düzeltme metoduyla azaltılmıştır. Her bir deneyde işleme yönündeki (z eksen) maksimum kuvvet (kesme kuvveti) saptanmıştır. İşleme yönünde saptanan bu maksimum kuvvetler kullanılarak Minitab 19 yazılımı yardımıyla Taguchi optimizasyonları, varyans analizleri (ANOVA) ve regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Fakat sadece maksimum kesme kuvveti minimize edilmeye çalışıldığında imalat süresinin arttığı görülmüştür. İmalat süresindeki artış işletme maliyetlerini olumsuz yönde etkileyeceğinden, maksimum kesme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonları (yanıt yüzey metodu) da gerçekleştirilmiştir. Son olarak da gerçekleştirilen istatistiksel analizlerin sonuçlarına dair değerlendirmelerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Alüminyum 2024 Malzemesine Delik Delinmesiyle İlgili Deneysel Çalışmalar

Nouari ve arkadaşları [8], Al 2024 malzemenin kuru şartlarda delinmesinde delik çapı sapmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve kesme hızı ile kaplama malzemesinin bir fonksiyonu olan aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Deneyleri, üç kesme hızı seviyesinde (25, 65 ve 165 m/dk) ve sabit diş başı ilerleme miktarında (0,04 mm/diş) gerçekleştirmişlerdir. Kesici takım olarak kaplamalı/kaplamasız sementite tungsten karbür ve kaplamasız HSS matkap tercih etmişlerdir. Delik çapı sapması ve yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuçları tungsten karbür matkaplarla elde etmişlerdir. Kaplamasız sementite tungsten karbür matkaplarla yapılacak kuru delme işleminde düşük kesme hızlarının uygun olduğu ve kesme hızı fark etmeksizin HSS matkapların Al 2024 alaşımının kuru delinmesi için uygun olmadığı sonucuna varmışlardır.

Zhu ve arkadaşları [9], Al 2024 T351 alaşımının kuru delinmesi işleminde üç kesici takım geometrisinin itme kuvveti (F_z) ve talaş morfolojisi açısından işleme performansını araştırmışlardır. Kesici takımların ağız kısımlarını; çok noktalı, kademeli ve çift konik olarak imal etmişlerdir. Deneyleri, kesme hızı (30, 50, 70 ve 90 m/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,05/0,1/0,15 ve 0,2 mm/diş) parametreleri kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Çift konik ağız geometrisine sahip takımın diğer iki takım geometrisine kıyasla daha düşük itme kuvveti değerleri ve daha iyi talaş morfolojisi sağladığını tespit etmişlerdir.

Zhu ve arkadaşları [10], Al 2024 T351 alaşımına üç farklı soğutma koşulunda (kuru, hava ve minimum miktarda yağlama) delikler delmişlerdir. Bu üç soğutma koşulunu sıcaklık ve itme kuvveti açısından kıyaslamışlardır. Kesme hızı seviyelerini 60, 80, 100, 120 m/dk olarak, diş başı ilerleme seviyelerini ise 0,2/0,3/0,4/0,5 mm/diş olarak belirlemişlerdir. Sıcaklığının, kesme hızına kıyasla diş başı ilerleme miktarından daha çok etkilendiğini saptamışlardır. Minimum miktarda yağlama (MMY) soğutma tekniğinin kullanıldığı deneylerde, kuru ve hava soğutmaya kıyasla matkap üzerindeki

sıcaklık farklarının daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Fakat itme kuvveti ve sıcaklık açısından en iyi takım performansını hava soğutma tekniğinde elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Bonhin ve arkadaşları [11], cam elyaf takviyeli Al 2024-T3 malzeme üzerinde delik delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Devir sayısı (4000 ve 8000 dev/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,05/0,1 ve 0,2 mm/diş) parametrelerinin itme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneyleri 4,8 mm çaplı TiAlN kaplamalı karbür matkapla gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalar sonucunda itme kuvvetinin ve talaş kalınlığının, devir sayısına kıyasla diş başı ilerleme miktarından daha fazla etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Kutlu [12], Al 2024 alaşımını elmas benzeri karbon (DLC) kaplanmış matkaplarla delik delme deneylerine tabi tutmuştur. Kesme parametrelerinin (kesme hızı ile diş başı ilerleme miktarı) ve matkap çapının (6, 8 ve 10 mm) kesme kuvveti, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Taguchi optimizasyon metodu yardımıyla parametrelerinin optimum seviyelerini saptamıştır. Ayrıca Al 2024 alaşımının kuru işleme şartlarında DLC kaplamalı matkaplarla yüksek performansta işlendiğini ifade etmiştir.

Landon ve arkadaşları [13], Al 2024-T351 malzemenin delinmesi işleminde yüzey durumunu ve yorulma mukavemetini araştırmışlardır. Delikleri eksenel ve yörüngesel olarak iki farklı şekilde delmişlerdir. Yüzey durumunu; yüzey pürüzlülük ölçümleri, mikro yapı, sertleşme analizi ve artık gerilme değerlendirilmesi kapsamında incelemişlerdir. Düşük pürüzlülük değerlerinde, delik pürüzlülüğünün yorulma mukavemetine etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Geleneksel eksenel delmenin, yörüngesel delmeye kıyasla artık gerilme oluşturabileceğini ifade etmişlerdir.

Çakır [14], Al 2024 ve Al 7075 alaşımlarına minimum miktarda yağlama (MMY), kuru kesme, basınçlı hava ve sıvı soğutma koşullarında delik delme deneyleri uygulamıştır. Bu soğutma türlerinin delik kalitesine (dairesellikten sapma, silindiriklik ve pürüzlülük), ilerleme kuvvetine ve momente etkisini araştırmıştır. Kesme parametresi seviyeleri olarak, kesme hızı için 100, 125, 150 m/dk diş başı ilerleme miktarı için ise 0,1/0,15/0,2 mm/diş seçmiştir. Farklı soğutma şartlarında gerçekleşen ve kesme parametrelerinin de etkisinin incelendiği deneylerde, en iyi değerlerin geleneksel soğutma yönteminde (sıvı soğutma) görüldüğünü ifade etmiştir.

Aamir ve arkadaşları [15], Al 2024 T3 alaşımının delinmesinde devir sayısı (1020, 2035 ve 3050 dev/dk), dış başı ilerleme miktarı (0,04/0,08 ve 0,14 mm/diş) ve matkap çapı (6 ve 10 mm) parametrelerinin; itme kuvveti, delik kalitesi, talaş morfolojisi ve takım aşınması üzerindeki etkilerinin araştırmışlardır. Deneylerde kullandıkları matkapları kaplamasız olarak tercih etmişlerdir. Varyans analizi sonuçlarına göre itme kuvvetinin dış başı ilerleme miktarı ve matkap çapından büyük ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek devir sayılarında daha fazla yüzey pürüzlülüğü oluştuğunu ve matkap çapı arttıkça talaş kalınlığının da arttığını ifade etmişlerdir.

2.2. Diğer Alüminyum Alaşımlarına Delik Delinmesiyle İlgili Deneysel Çalışmalar

Saravanakumar ve arkadaşları [16], takviye ilave ettikleri Al 2219 alaşımı üzerinde delik delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Devir sayısı (800 ve 1600 dev/dk), ilerleme hızı (75 ve 150 mm/dk), matkap çapı (6 ve 10 mm) ve takviye türü (Grafit ve MoS₂) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin optimum seviyelerini; 1600 dev/dk devir sayısı, 75 mm/dk ilerleme hızı, 6 mm matkap çapı ve Grafit takviye olarak tespit etmişlerdir. Parametreler arasında yüzey pürüzlülüğü açısından en önemli parametrenin takviye türü olduğunu ve Grafit takviyesinin MoS₂ takviyesine göre daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Dahnel ve arkadaşları [17], Al 7075 alaşımının delinmesinde kesme hızı (22, 44 ve 66 m/dk) ve soğutma türü (kuru ve sıvı soğutma) parametrelerinin takım aşınması ve talaş yapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde, 6 mm çaplı matkap ve sabit dış başı ilerleme miktarı (0,15 mm/diş) kullanmışlardır. Kesme sıvısı kullanılan deneylerde kuru delmeye kıyasla daha az takım aşınması görüldüğünü ve daha küçük yapıda talaş oluştuğunu tespit etmişlerdir. Soğutma sıvısı kullanılarak 44 m/dk kesme hızı ile delinen deliklerde en az takım aşınması görüldüğünü de belirtmişlerdir.

Korkmaz ve arkadaşları [18], Al 2014 alaşımının delinmesi işleminde itme kuvvetlerini hem deneysel olarak hem de bilgisayar destekli simülasyon yardımıyla elde etmişlerdir. Deneylerde; kesme hızı için 170, 200, 230 m/dk, dış başı ilerleme için ise 0,1/0,2/0,3 mm/diş seviye değerleri kullanılmıştır. Sabit dış başı ilerleme miktarı için kesme hızının artırılmasının itme kuvvetini düşürdüğünü, sabit kesme hızı için dış

başı ilerleme miktarının artırılmasının ise itme kuvvetini artırdığını tespit etmişlerdir. Deneysel ve simülasyon çıktılarının birbiri ile benzerlik gösterdiğini de belirtmişlerdir.

Navaneethakrishnan ve arkadaşları [19], alüminyum alaşımının (IS737.Gr19000) delinmesinde matkaba uygulanan kriyojenik işlemin etkisini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin etkisini; talaş boyutu, itme kuvveti, tork, ovalite ve yüzey pürüzlülüğü çıktıları açısından incelemişlerdir. Deneylerde devir sayısı (1860, 2270 ve 4540 dev/dk) ve diş başı ilerleme miktarı (0,038/0,076 ve 0,203 mm/diş) parametrelerini dikkate almışlardır. Kriyojenik işlemin; matkap aşınması, ovalite, yüzey pürüzlülüğü ve talaş boyutu üzerinde olumlu etkileri olduğunu belirtmişlerdir.

Yaşar [20], Al 7075 alaşımının delinmesi işlemini hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar metodu yardımıyla itme kuvveti açısından araştırmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünü de incelemiştir. Deneylerde; kesme hızı (40, 80 ve 120 m/dk), diş başı ilerleme miktarı (0,05/0,1 ve 0,15 mm/diş), matkap uç açısı (120°, 130° ve 140°) ve kaplama türü (kaplamalı/kaplamasız) parametrelerini dikkate almıştır. Deney çıktıları açısından parametrelerin optimum seviyelerini; 40 m/dk kesme hızı, 0,05 diş başı ilerleme miktarı ve kaplamalı 140° uç açısına sahip matkap olarak tespit etmiştir.

Demir ve arkadaşları [21], 4 ve 6 mm kalınlıklarındaki ön delinmiş Al 7075 T651 iş parçalarına HSS matkaplarla 8 ve 10 mm çaplı delikler delmişlerdir. Ön delik çapının (1,5/2/2,5/3/3,5 ve 4 mm) ve derinliğinin (1, 2, 3 ve 4 mm), delik yüzey pürüzlülüğüne ve delikte oluşan kovan geometrisine etkisini araştırmışlardır. Oluşan etkileri göz önüne alarak 8 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının 2,5-3 mm, 10 mm çapındaki bir delik için en uygun ön delik çapının ise 3-3,5 mm olduğunu ve ideal ön delik derinliğinin 2-3 mm arasında olduğunu ifade etmişlerdir.

2.3. Alüminyum 2024 Malzemeye Uygulanan Diğer Talaş Kaldırma Deneysel Çalışmaları

Gupta ve arkadaşları [22], Al 2024 T351 alaşımının tornalamasında soğutma şartlarının (kuru, sıvı nitrojen ve karbondioksit) kesme kuvveti ve işleme sıcaklığına etkisini hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar metoduyla araştırmışlardır. Deney parametre seviyelerini kesme hızı için 100 ve 150 m/dk, diş başı ilerleme miktarı için ise 0,1 ve 0,2 mm/diş olarak belirlemişlerdir. Deneysel çıktılar ve sonlu

elemanlar yöntemi çıktıları karşılaştırıldığında, kesme kuvveti için %5,7 işleme sıcaklığı için ise %6,16 fark olduğunu ifade etmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğunu belirterek sonlu elemanlar yönteminin oldukça verimli ve etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Yalçın ve arkadaşları [23], CNC freze tezgahında gerçekleştirilen deneylerle Al 2024 alaşımına yapılan yaşlandırma (T3 ve T6) ısıt işlemlerinin talaş kaldırma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kesme parametreleri ve seviyelerini, kesme hızı (150, 200 ve 250 m/dk) ve diş başı ilerleme (0,1/0,2 ve 0,4 mm/diş) olarak belirlemişlerdir. Deney çıktıları olarak kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüklerini ölçmüşlerdir. Elde edilen bu ölçümlere göre Taguchi optimizasyonları ve ANOVA analizleri yapmışlardır. Analizler neticesinde yaşlandırma ısıt işlemlerinin talaş kaldırma üzerindeki etkisinin çok az olduğunu tespit etmişlerdir.

Koudri ve arkadaşları [24], Al 2024 T351 alaşımının sementite karbür WC-Co kesici takım ile işleminde talaş segmentasyonunu, literatürde mevcut bulunan bir deneysel çalışmanın verileriyle sonlu elemanlar metodundan elde ettikleri verileri karşılaştırarak incelemişlerdir. Talaş segmentasyonunun; titreşim, takım aşınması ve kesme kuvveti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Talaş segmentasyonu ve kesme kuvveti arasındaki korelasyonu oluşturmuşlardır ve talaş segmentasyon yoğunluğu arttıkça ortalama kesme kuvvetinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Yücel ve arkadaşları [25], Al 2024 T3 alaşımının tornalanması işleminde minimum miktarda yağlama (MoS_2 bazlı nanoakışkanlı) soğutma tekniği kullanmışlardır. Bu soğutma tekniğinin yüzey pürüzlülüğüne, maksimum sıcaklığa ve takım aşınmasına etkisini; kuru işlemeyle ve nanoakışkansız minimum miktarda yağlama tekniğiyle kıyaslayarak araştırmışlardır. Minimum miktarda yağlama (MoS_2 bazlı nanoakışkanlı) soğutma tekniğinin hem kuru işleme hem de nanoakışkansız minimum miktarda yağlama soğutma tekniğine göre daha az takım aşınması sağladığını tespit etmişlerdir.

Paresi ve arkadaşları [26], Al 2024 T351 alaşımının kaplamasız karbür takım ile torna tezgâhında kuru işlenebilirliği konusunda çalışmışlardır. Çalışma kapsamında kesme hızı (100 ve 300 m/dk) ve diş başı ilerleme miktarının (0,1 ve 0,3 mm/diş); kesme kuvveti, sürtünme katsayısı ve talaş morfolojisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Diş başı ilerleme miktarı arttıkça hem kesme kuvvetinin hem de ilerleme kuvvetinin

arttığını, sürtünme katsayısının ise azaldığını tespit etmişlerdir. Talaş oluşum sürecinin kesme parametrelerinden etkilendiğini belirterek kesme hızı ile dış başı ilerleme miktarının artmasının talaş yapısını süreksiz ve tırtıklı hâle dönüştürdüğünü ifade etmişlerdir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Alüminyum 2024 T351 Alaşımı

Alüminyum alaşımları, kompozitlerin ve yeni hafif malzemelerin geliştirilmesine rağmen başta havacılık ve uzay endüstrisi olmak üzere otomotiv, inşaat, denizcilik endüstrileri gibi birçok sektörde tercih edilmektedir. Bu sebeple alüminyum alaşımlarının pazar payı her sene daha da artmaktadır. Alüminyum alaşımlarının havacılık ve uzay endüstrisinde ön plana çıkması, birçok perçinli ve cıvatalı bağlantıların gerçekleştirilmesi için binlerce delik delme işlemini beraberinde getirir [27].

Alüminyum 2024 T351 alaşımı hafiflik ve iyi yorulma direnci sebebiyle havacılık ve uzay endüstrisinde uzun süredir kullanılmaktadır [28]. Dolayısıyla bu malzeme üzerinde çok sayıda delik delme işlemi gerçekleştirilir. Binlerce kez uygulanacak delik delme işlemlerinin, maksimum verimde ve kalitede gerçekleşmesi önem arz etmektedir. Bu da delik delme işlemlerine etki eden parametrelerin optimizasyonu ile mümkündür.

T351 kodu Al 2024 malzemenin çözeltiye alma işlemine, soğuk şekillendirmeye, gerilme gidermeye ve doğal yaşlandırmaya tabi tutulduğunu ifade etmektedir. Alüminyum 2024 T351 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 3.1.'de, bazı fiziksel ve mekanik özellikleri ise Tablo 3.2.'de ifade edilmiştir [29].

Tablo 3.1. Alüminyum 2024 T351 alaşımının kimyasal bileşimi [29].

Element Adı	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Diğer
Bileşim Oranı (%)	90,7 - 94,7	Maks. 0,1	3,8 - 4,9	Maks. 0,5	1,2 - 1,8	0,3 - 0,9	Maks. 0,5	Maks. 0,15	Maks. 0,25	Maks. 0,15

Tablo 3.2. Alüminyum 2024 T351 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri [29].

Özellik	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Poisson oranı	Brinell sertlik değeri
Değer	2,78	469	324	73,1	0,33	120

3.2. Deneylerde Kullanılan Kesici Takımlar (Matkaplar)

Bu çalışma kapsamında karbür matkaplara göre daha düşük maliyetli HSS (yüksek hız takım çeliği) matkaplar tercih edilmiştir. Ruko markasına ait 8 mm çaplı HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplar kullanılmıştır. Matkaplara ait teknik bilgiler Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Kullanılan kesici takımların teknik özellikleri.

Kesici takım	Çap (mm)	Toplam uzunluk (mm)	Kanal uzunluğu (mm)	Tepe açısı	Helis açısı
HSS	8	117	75	118°	25-30°
HSSE-Co5 (Kaplamasız)	8	117	75	130°	36°
HSSE-Co5 (Kaplama)	8	117	75	130°	36°

Şekil 3.1.'de yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplar gösterilmiştir.

**Şekil 3.1.** Deneylerde kullanılan kesici takımlar.

3.3. Deney Düzeneği

Şekil 3.2.'de deney düzeneği gösterilmiştir. Deneyler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'ndaki FANUC (O-M Serisi) kontrol paneline sahip Taksan TMC-700 V CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kuvvet verileri; ESİT AX3 yük hücresi, NI cDAQ-9188 veri toplama ünitesinin NI 9237 modülü ve Flexlogger yazılımı kullanılarak toplanmıştır.



Şekil 3.2. Deney düzeneği.

3.4. Taguchi Deney Tasarımı

Taguchi deney tasarımı, en az zaman kaybı ve maliyetle deneylerin planlanmasını amaçlar. Bu doğrultuda ilk olarak deney parametreleri (bağımsız değişkenler) ve seviyeleri belirlenir. Belirlenen parametre sayısı ve parametrelerin seviye sayısına

göre uygun ortogonal dizi seçilir. Seçilen ortogonal dizi baz alınarak her bir deneyde uygulanacak deney parametrelerinin seviyeleri planlanır [30]. Bu tez çalışması kapsamında ele alınan deney parametreleri ve seviyeleri Tablo 3.4.'te ifade edilmiştir.

Tablo 3.4. Deney parametreleri ve seviyeleri.

Deney Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Kesme Hızı (m/dk)	50	70	90	110
Diş başı İlerleme (mm/diş)	0,06	0,08	0,1	0,12

Tablo 3.4.'te belirtilen 2 parametre ve 4 seviye göz önüne alınarak $L_{16}(4^2)$ ortogonal dizisi seçilmiştir. Seçilen bu ortogonal diziye göre planlanmış deney tasarımı Tablo 3.5.'te ifade edilmiştir.

Tablo 3.5. Deney tasarımı.

Deney No.	Kesme hızı (m/dk)	Diş başı ilerleme (mm/diş)
1	50	0,06
2	50	0,08
3	50	0,1
4	50	0,12
5	70	0,06
6	70	0,08
7	70	0,1
8	70	0,12
9	90	0,06
10	90	0,08
11	90	0,1
12	90	0,12
13	110	0,06
14	110	0,08
15	110	0,1
16	110	0,12

3.5. Taguchi Optimizasyonu

Taguchi optimizasyonunda, deney sonuçları değerlendirilerek en uygun parametre seviyeleri tespit edilebilmektedir. Bu değerlendirme işlemi (performans kriteri) sinyal/gürültü oranı (S/G) denilen bir oranla gerçekleştirilmektedir. Problemlerin hedefine göre sinyal/gürültü oranı hesaplamak için kullanılacak denklem

değişmektedir. En küçük-en iyi, en büyük-en iyi, hedef değer-en iyi olarak üç tür hedef bulunmaktadır. Her bir hedef için sinyal/gürültü oranı denklemleri denklem 3.1, denklem 3.2 ve denklem 3.3'te ifade edilmiştir [31].

En küçük-en iyi hedefi bulunan problemlerde kalite değişkenin (Y) hedef değeri sıfırdır. Denklem 3.1'de bu duruma ait sinyal/gürültü oranı denklemi ifade edilmiştir.

$$\text{sinyal/gürültü oranı} = -10 \log[\sum(Y^2)/n] \text{ (dB)} \quad (3.1)$$

En büyük-en iyi hedefi bulunan problemler için kalite değişkeninin (Y) değeri sonsuzdur. Denklem 3.2'de bu duruma ait sinyal/gürültü oranı denklemi ifade edilmiştir.

$$\text{sinyal/gürültü oranı} = -10 \log[\sum(\frac{1}{Y^2})/n] \text{ (dB)} \quad (3.2)$$

Hedef değer-en iyi hedefi bulunan problemlerde kalite değişkeni (Y) belirli bir hedef değere sahiptir. Denklem 3.3'te bu duruma ait sinyal/gürültü oranı denklemi ifade edilmiştir.

$$\text{sinyal/gürültü oranı} = 10 \log(\bar{Y}^2/S^2) \text{ (dB)} \quad (3.3)$$

Denklemlerde ifade edilen $\bar{Y}$ simgesi gözlem değeri ortalamasını, n harfi gözlem sayısını, S^2 ise örneklem varyansını ifade etmektedir. Örneklem varyansının formülü denklem 3.4'te ifade edilmiştir [30].

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum(Y - \bar{Y})^2 \quad (3.4)$$

Üç hedefte de S/G oranını maksimize etmek amaçlanır. Maksimum S/G oranını veren parametre seviyesi optimum seviyedir. Bu tez çalışması kapsamındaki S/G oranı hesapları ve Taguchi optimizasyonları Minitab 19 yazılımı yardımıyla yapılmıştır.

3.6. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizinde, deneylerde elde edilen bağımlı değişken çıktıları değerlendirilerek deney parametrelerinin bu çıktılar üzerindeki etkisi (etki oranı) tespit edilir. Çıktılar

üzerindeki etkileri belirlenen deney parametreleri, problemin çözümüne yönelik yorumlanır.

Bu çalışmada her bir matkap türü için gerçekleştirilen deneylerin, kesme kuvveti çıktıları kullanılarak Minitab 19 yazılımı yardımıyla iki parametrelili (kesme hızı ve diş başı ilerleme) varyans analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.6.'da iki parametrelili varyans analizi sonuç tablosu örneği gösterilmektedir.

Tablo 3.6. Örnek varyans analizi tablosu.

Kaynak	SD	Ardışık KT	Etki oranı	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F	P
Parametre 1	2	823940	%87,86	823940	411970	18,19	0,010
Parametre 2	2	23195	%2,47	23195	11597	0,51	0,634
Hata	4	90606	%9,66	90606	22652		
Toplam	8	937741	%100				

Tablo 3.6.'daki SD ifadesi serbestlik derecesi anlamına gelir. Denklem 3.5'te hesaplama yöntemi belirtilmiştir. Denklemdaki N harfi parametre seviye sayısını ifade etmektedir.

$$SD = N - 1 \quad (3.5)$$

KT kareler toplamı, KO ise kareler ortalamasıdır. Bu ifadelerin matematiksel olarak birbiri ile ilişkisi denklem 3.6'da gösterilmiştir.

$$S^2 = \frac{\sum(Y - \bar{Y})^2}{N - 1} = \frac{KT}{SD} = KO \quad (3.6)$$

F değeri parametre varyansının hata varyansına oranıdır. P değeri ise veriler arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını ifade eder. P değeri %5'ten küçük bir değerde ise veriler arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu birçok bilim dalında kabul edilir.

3.7. Regresyon Analizi

Deney sonuçlarından yola çıkılarak bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi regresyon modelleri (lineer, ikinci dereceden, üstel vb.) ile matematiksel olarak ifade etmek mümkündür. Regresyon analizlerinde oluşturulan bu

matematiksel modeller kullanılarak bağımsız değişken girdilerine göre bağımlı değişken çıktısı tahmin edilebilmektedir. Matematiksel modellerin tahmin yetenekleri kullanılan regresyon modeline göre değişmektedir. Oluşturulan matematiksel modellerin tahmin yetenekleri determinasyon katsayısına (R^2) göre yorumlanabilir. R^2 değerinin yükselmesiyle matematiksel modelin tahmin yeteneği artar.

Bu çalışma kapsamında kesme hızı ve diş başı ilerleme miktarı parametrelerinin kesme kuvveti ile ilişkisini ifade eden matematiksel modeller elde edilmiştir. Denklemlerin elde edilmesinde Minitab 19 yazılımı yardımıyla çoklu lineer regresyon yöntemi kullanılmıştır. Denklem 3.7’de çoklu lineer regresyon modelinin matematiksel denklem formu gösterilmiştir. F bağımlı değişkeni, A ve B parametreleri (bağımsız değişkenler), k denklem sabitlerini ifade etmektedir.

$$F = k_0 + k_1A + k_2B + \dots (N) \quad (3.7)$$

3.8. Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology)

Yanıt yüzey metodu, birçok bilim dalında ve çeşitli endüstriyel alanlarda kapsamlı bir şekilde uygulanan yöntemdir [32]. Yanıt ifadesi bağımlı değişkeni temsil etmektedir. Bu yöntem yanıt üzerinde etkili olan parametreleri bulmak, bir veya daha fazla yanıt için parametrelerin optimum seviyelerini belirlemek, yanıt ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi temsil eden matematiksel modelleri elde etmek gibi amaçlarla kullanılır [33]. Bu amaçlar doğrultusunda süreçlerin veya problemlerin optimize edilmesi sağlanır.

Yanıt yüzey metodu kullanılarak bir yanıt için parametrelerin optimum seviyelerinin belirlenmesine yanıt optimizasyonu denilmektedir. Eğer yanıt sayısı birden fazla ise gerçekleştirilen optimizasyon çoklu yanıt optimizasyonudur. Çoklu yanıt veya yanıt optimizasyonlarında parametrelerin optimum seviyelerini tespit etmek için desirability fonksiyonu kullanılır (denklem 3.8). Desirability fonksiyonunun değeri (d_i) 0 ile 1 arasındadır. Değer 1’e yaklaştıkça optimizasyon işleminin istatistiksel olarak tutarlılığı artar. Denklem 3.8’deki T yanıtın hedef değerini, y_i yanıt için kabul edilebilir alt sınır değerini, U yanıt için kabul edilebilir üst sınırı ve W ağırlığı temsil etmektedir [34].

$$d_i = \begin{cases} 1 & y_i < T \\ \left(\frac{U - y_i}{U - T}\right)^w & T \leq y_i \leq U \\ 0 & y_i > U \end{cases} \quad (3.8)$$

Bu çalışma kapsamında Minitab 19 yazılımı yardımıyla çoklu yanıt optimizasyonları gerçekleştirilerek iki yanıtı minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri tespit edilmiştir. Çalışmada ele alınan yanıtlar, işlem süresi ve maksimum kesme kuvvetidir. Kullanılan her bir matkap (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı çoklu yanıt optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulguların desirability fonksiyonu değerleri incelenmiştir.

3.9. Üstel Düzeltme Metodu

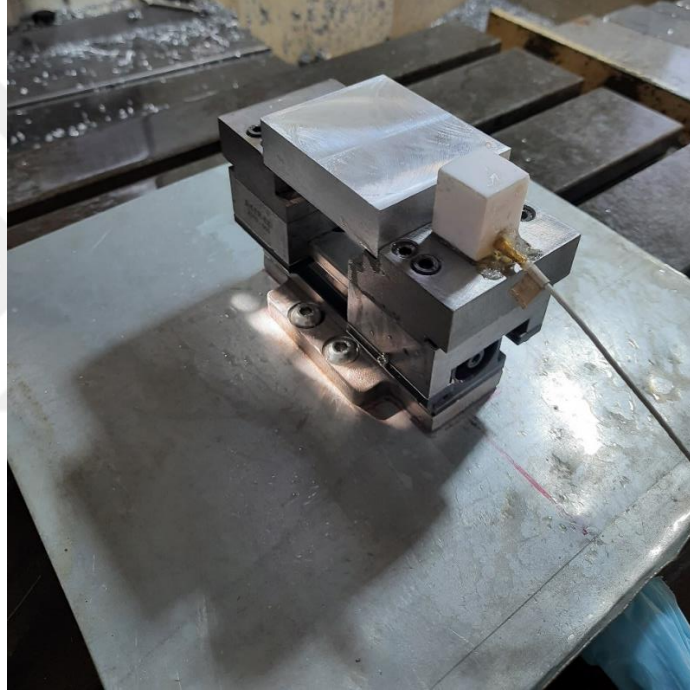
Üstel düzeltme metodu, veri toplama sırasında oluşan ve gürültü olarak tabir edilen sinyal sıçramalarını azaltan (yumuşatan) bir yöntemdir. Sinyal gürültüleri neticesinde oluşan verilerin yerine yeni öngörülerde bulunulur. Bu öngörüler, denklem 3.9 kullanılarak elde edilir.

$$Z_T = \alpha Z_{T-1} + (1 - \alpha) S_{T-1} \quad (3.9)$$

Z_T öngörülen değeri, Z_{T-1} öngörülen bir önceki değeri, S_{T-1} bir önceki gerçek değeri ve α düzeltme katsayısını ifade etmektedir. Bu çalışmadaki üstel düzeltme yöntemi hesaplamaları Excel yazılımında gerçekleştirilmiştir.

4. DENEYSEL BULGULAR

Delik delme deneyleri, 8 mm çaplı her bir takım türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için 60x70x20 mm uzunluklarında alüminyum 2024 T351 alaşımı numune kullanılarak Tablo 3.5.'teki deney tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1.'de delik delme deneyleri öncesinde deney düzeneğine bağlanan alüminyum 2024 T351 alaşımı numune gösterilmiştir.



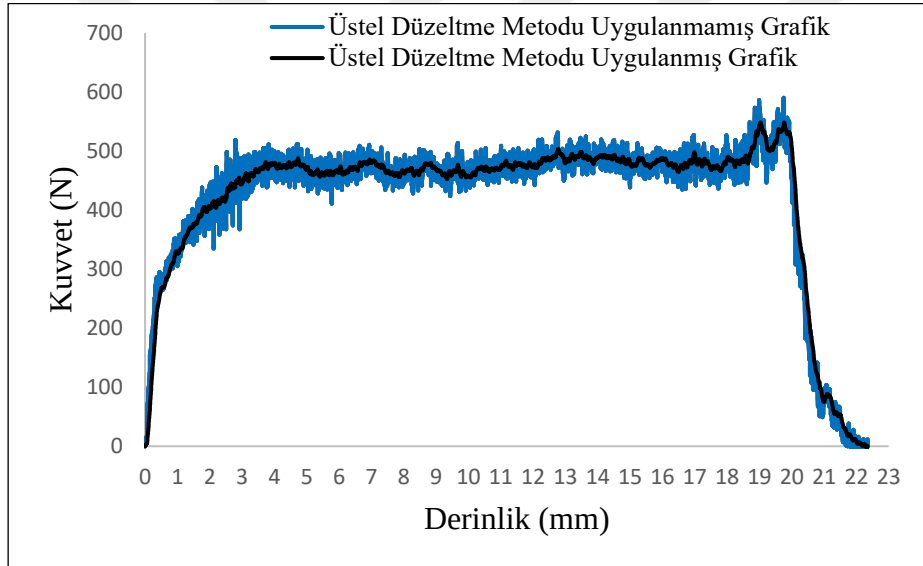
Şekil 4.1. Alüminyum 2024 – T351 alaşımı numune.

Deneyler sırasında oluşan kuvvetler Bölüm 3.3.'te belirtilen deney düzeneği vasıtasıyla 0,0006 saniye aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Kuvvet ölçümü üç ekseninde (F_x , F_y ve F_z) gerçekleştirilmiştir; fakat işleme yönündeki (z eksen) maksimum kuvvetler baz alınarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunun sebebi x ve y eksenlerinde oluşan kuvvetlerin işleme yönü olan z eksenindeki kuvvetlere nazaran oldukça düşük değerde olmasıdır. Bölüm 1.3.3.'te x ve y eksenlerinde oluşan kuvvetlerin z ekseninde oluşan kuvvetlere kıyasla çok küçük değerlerde olmasının teorik sebebi ifade edilmiştir.

4.1. Maksimum Kuvvetlerin Tespiti

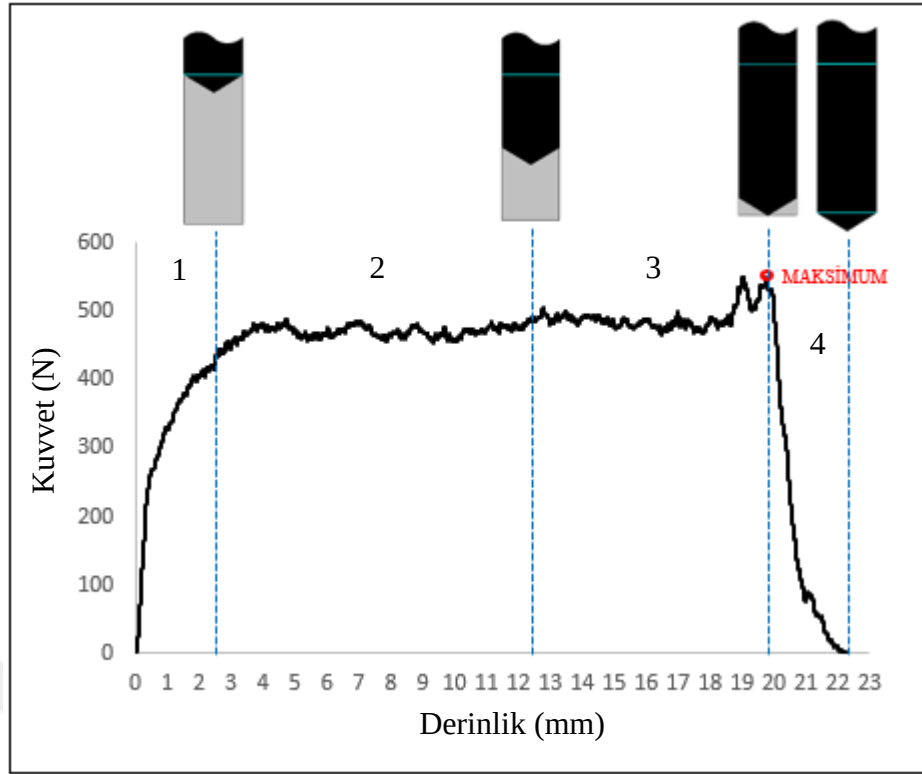
Üç matkap türü için ayrı ayrı gerçekleştirilmiş her bir deneyden elde edilen veriler kullanılarak Kuvvet-Derinlik ve Kuvvet-Zaman grafikleri oluşturulmuştur. Oluşturulan veri grafiklerinde sinyal gürültülerinin mevcut olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple verilere Excel yazılımında üstel düzeltme metodu uygulanarak sinyal gürültüleri minimize edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 4.2.'de üstel düzeltme veri çözümleme metodu uygulanmamış gürültülü sinyaller içeren deney verilerinin Kuvvet-Derinlik grafiği ile aynı deney verilerine üstel düzeltme metodu uygulanarak elde edilen Kuvvet-Derinlik grafiği gösterilmiştir. Bu veri grafiği, HSS matkapla 110 (m/dk) kesme hızında ve 0,1 (mm/diş) diş başı ilerleme miktarında delinen deliğe aittir.



Şekil 4.2. Üstel düzeltme metodunun sinyal gürültüleri üzerindeki etkisi.

Üstel düzeltme metodu uygulanmış Kuvvet-Derinlik grafiği üzerinde maksimum kuvvetin tespiti ve delik delme sırasında iş parçasına göre matkap konumları Şekil 4.3.'te gösterilmiştir. Maksimum kuvvetlerin nasıl tespit edildiğini açıklamak amacıyla bu bölümde sadece bir deliğe ait (HSS matkap 15. deney) grafik ifade edilmiştir. Fakat üstel düzeltme yöntemi tüm deliklerin deney verilerine uygulanmıştır ve her bir deney için işleme yönündeki (F_z) maksimum kuvvetler tespit edilmiştir. EK A'da her bir delik delme deneyinin Kuvvet-Zaman grafikleri ifade edilmiştir.



Şekil 4.3. Kuvvet-Derinlik grafiğinde maksimum kuvvet noktası ve matkap konumları.

Deneylerde kullanılan HSS matkabın omuz yüksekliği 2,4 mm'dir. Grafiğin 1. kısmının sonunda matkabın omuz kısmı iş parçasına tam olarak girmiştir. Matkap omzunun iş parçasına tam olarak girdiği anda kuvvet artışının ivmelendiği gözlemlenmiştir. Grafiğin 2. ve 3. kısmında, matkap iş parçasını boşaltarak ilerlemeye devam etmektedir. Bu kısımlarda ölçülen kuvvetlerde zaman zaman artış ve düşüşler mevcuttur. Grafiğin 3. kısmının sonunda matkap ucu parçanın en dip noktasına dayanmıştır. Aynı zamanda bu noktada maksimum kuvvet görülmüştür. Grafiğin 4. kısmında, matkabın omuz kısmı parça içerisinden dışarıya doğru ilerlemektedir ve ölçülen kuvvet değerleri azalmaktadır. Grafiğin 4. kısmının sonunda ise matkabın omuz kısmı iş parçası içerisinden tam olarak çıkmıştır. Dolayısıyla delik tam manasıyla açılmış, iş parçası ve takım üzerine gelen kuvvet sıfırlanmıştır.

Diğer deliklerden elde edilen grafikler de genellikle Şekil 4.3.'le benzerlik taşımaktadır (EK A). Fakat her delinen deliğin Kuvvet-Derinlik veya Kuvvet-Zaman grafiği Şekil 4.3.'teki gibi bir karakteristiğe sahip olmayabilmektedir. Maksimum kuvvet noktasının 22 mm'den farklı derinlik değerlerinde de ortaya çıktığı görülmüştür. Bu sebeple delik delme deneylerinde matkap uç noktası iş parçasının en

derin noktasına ulaştığında kuvvet maksimuma ulaşır şeklinde kesin bir yargıya varmak mümkün değildir.

4.2. Deney Sonuçları

4.2.1. HSS matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları

Tablo 4.1.'de HSS matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvveti ($F_{Z,maks}$) sonuçları belirtilmiştir. Kesme hızı (V_c) ve diş başına ilerleme miktarı (f_z) kesme parametreleridir. Süre, devir sayısı (n) ve ilerleme hızı (V_f) Bölüm 1.2.'de belirtilen denklemlere göre hesaplanan verilerdir.

Tablo 4.1. HSS matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları.

Deney No	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	n (dev/dk)	V_f (mm/dk)	Süre (s)	$F_{Z,maks}$ (N)
1	50	0,06	1989	119	11,29	306
2	50	0,08	1989	159	8,45	351
3	50	0,1	1989	199	6,75	450
4	50	0,12	1989	239	5,62	498
5	70	0,06	2785	167	8,05	306
6	70	0,08	2785	223	6,03	402
7	70	0,1	2785	279	4,82	471
8	70	0,12	2785	334	4,02	525
9	90	0,06	3581	215	6,25	333
10	90	0,08	3581	286	4,70	498
11	90	0,1	3581	358	3,75	531
12	90	0,12	3581	430	3,13	567
13	110	0,06	4377	263	5,11	349
14	110	0,08	4377	350	3,84	451
15	110	0,1	4377	438	3,07	526
16	110	0,12	4377	525	2,56	633

Şekil 4.4.'te HSS matkap ile delik delinen Al 2024 T351 alaşımı numune gösterilmiştir.



Şekil 4.4. HSS matkap ile delik delinen numune.

4.2.2. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları

Tablo 4.2.'de HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvveti ($F_{Z,maks}$) sonuçları belirtilmiştir. Kesme hızı (V_c) ve diş başına ilerleme miktarı (f_z) kesme parametreleridir. Süre, devir sayısı (n) ve ilerleme hızı (V_f) Bölüm 1.2.'de belirtilen denklemlere göre hesaplanan verilerdir.

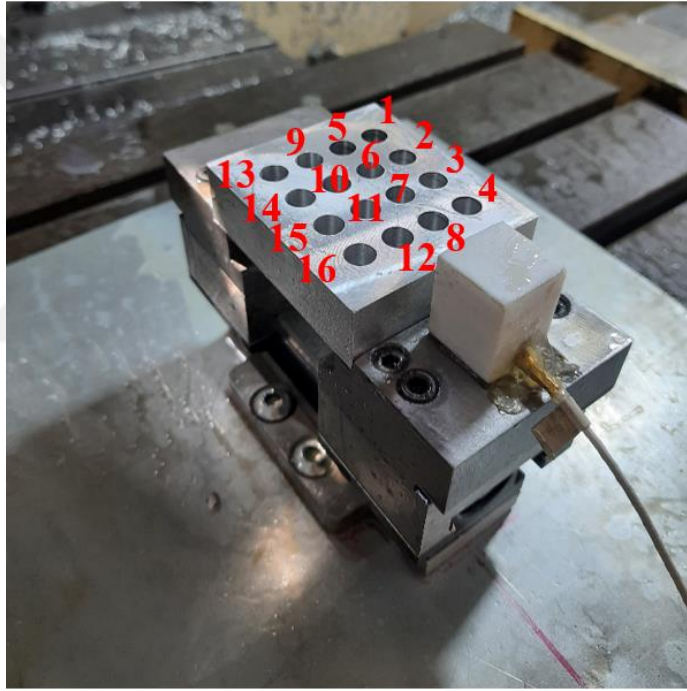
Tablo 4.2. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları.

Deney No	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	n (dev/dk)	V_f (mm/dk)	Süre (s)	$F_{Z,maks}$ (N)
1	50	0,06	1989	119	11,03	285
2	50	0,08	1989	159	8,25	352
3	50	0,1	1989	199	6,59	438
4	50	0,12	1989	239	5,49	544
5	70	0,06	2785	167	7,86	300
6	70	0,08	2785	223	5,88	383
7	70	0,1	2785	279	4,70	455
8	70	0,12	2785	334	3,93	549
9	90	0,06	3581	215	6,10	332
10	90	0,08	3581	286	4,59	446
11	90	0,1	3581	358	3,67	531

Tablo 4.2. (Devamı) HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları.

Deney No	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	n (dev/dk)	V_f (mm/dk)	Süre (s)	$F_{Z,maks}$ (N)
12	90	0,12	3581	430	3,05	585
13	110	0,06	4377	263	4,99	348
14	110	0,08	4377	350	3,75	468
15	110	0,1	4377	438	3,00	516
16	110	0,12	4377	525	2,50	582

Şekil 4.5.'te HSSE-Co5 matkap ile delik delinen Al 2024 T351 alaşımı numune gösterilmiştir. Şekil 4.5.'te gösterilen numaralar, deney tasarımındaki (Tablo 3.5.) deney numaralarını ifade etmektedir. HSS ve HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplarla delinen numunelerde de bu deney sırası takip edilmiştir.



Şekil 4.5. HSSE-Co5 matkap ile delik delinen numune.

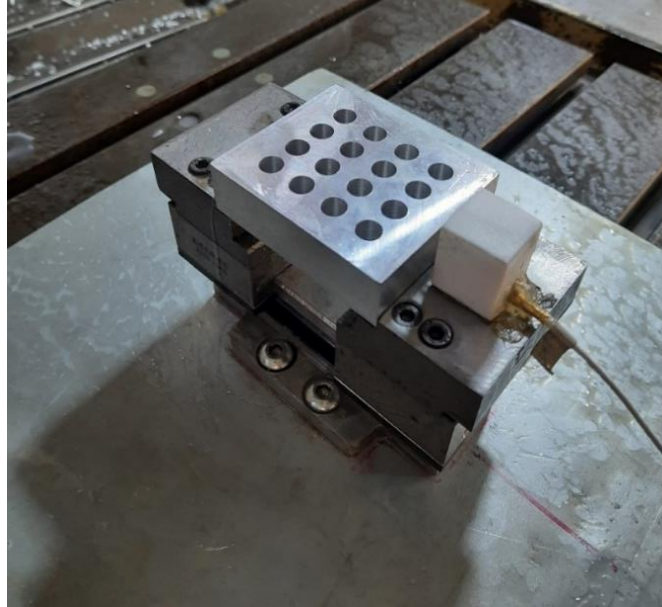
4.2.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları

Tablo 4.3.'te HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvveti ($F_{Z,maks}$) sonuçları belirtilmiştir. Kesme hızı (V_c) ve diş başına ilerleme miktarı (f_z) kesme parametreleridir. Süre, devir sayısı (n) ve ilerleme hızı (V_f) Bölüm 1.2.'de belirtilen denklemlere göre hesaplanan verilerdir.

Tablo 4.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklere ait deney sonuçları.

Deney No	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	n (dev/dk)	V_f (mm/dk)	Süre (s)	$F_{Z,max}$ (N)
1	50	0,06	1989	119	11,03	314
2	50	0,08	1989	159	8,25	395
3	50	0,1	1989	199	6,59	443
4	50	0,12	1989	239	5,49	513
5	70	0,06	2785	167	7,86	306
6	70	0,08	2785	223	5,88	418
7	70	0,1	2785	279	4,70	485
8	70	0,12	2785	334	3,93	566
9	90	0,06	3581	215	6,10	353
10	90	0,08	3581	286	4,59	464
11	90	0,1	3581	358	3,67	485
12	90	0,12	3581	430	3,05	578
13	110	0,06	4377	263	4,99	351
14	110	0,08	4377	350	3,75	460
15	110	0,1	4377	438	3,00	511
16	110	0,12	4377	525	2,50	631

Şekil 4.6.'da HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delik delinen Al 2024 T351 alaşımı numune gösterilmiştir.



Şekil 4.6. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delik delinen numune.

4.3. Deney Sonuçlarının İstatiksel Analizleri

4.3.1. HSS matkap ile delinen deliklerin veri analizleri

4.3.1.1. HSS matkap ile delinen deliklerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

Tablo 4.4.'te HSS matkap ile delinen deliklerden elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü (S/G) oranları ifade edilmiştir. V_c kesme hızını, f_z diş başına ilerleme miktarını ve $F_{Z,maks}$ maksimum kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Tablo 4.4. HSS matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü oranları.

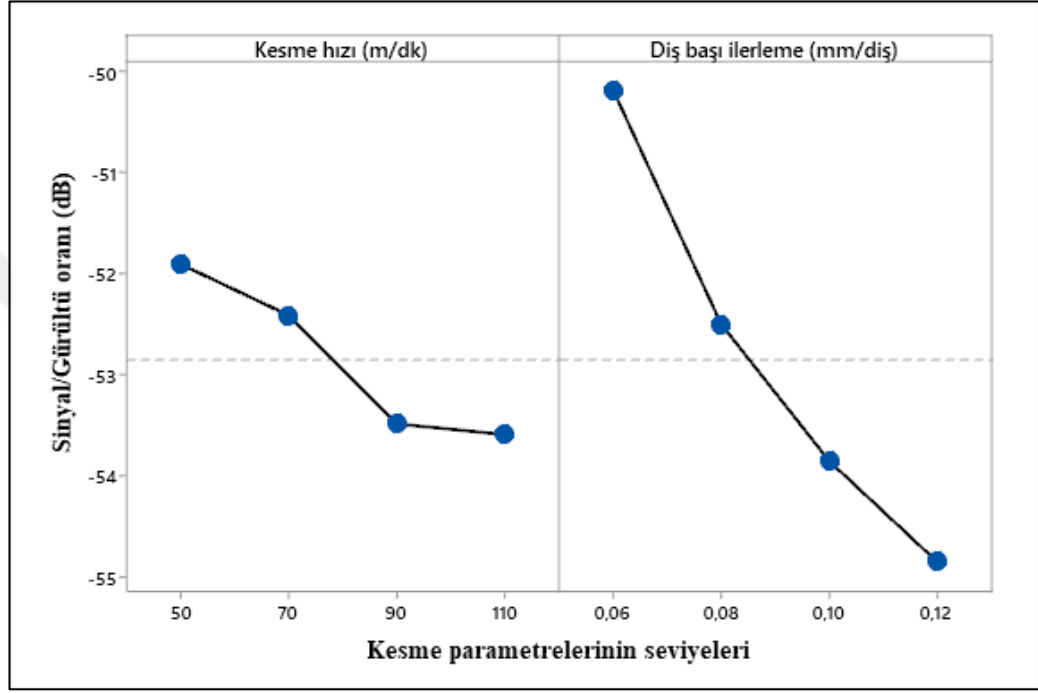
Deney No.	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	$F_{Z,maks}$ (N)	S/G oranı (dB)
1	50	0,06	306	-49,7144
2	50	0,08	351	-50,9061
3	50	0,1	450	-53,0643
4	50	0,12	498	-53,9446
5	70	0,06	306	-49,7144
6	70	0,08	402	-52,0845
7	70	0,1	471	-53,4604
8	70	0,12	525	-54,4032
9	90	0,06	333	-50,4489
10	90	0,08	498	-53,9446
11	90	0,1	531	-54,5019
12	90	0,12	567	-55,0717
13	110	0,06	349	-50,8565
14	110	0,08	451	-53,0835
15	110	0,1	526	-54,4197
16	110	0,12	633	-56,0281

Tablo 4.4.'teki maksimum kesme kuvveti verilerine göre hesaplanan kesme parametrelerinin sinyal gürültü oranları Tablo 4.5.'te belirtilmiştir. Kesme parametrelerin sinyal/gürültü oranları, en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanmıştır.

Tablo 4.5. HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre parametrelerin sinyal/gürültü oranları.

Parametre seviyesi	Kesme hızı S/G oranları (dB)	Diş başı ilerleme S/G oranları (dB)
1	-51,91	-50,18
2	-52,42	-52,50
3	-53,49	-53,86
4	-53,60	-54,86

Parametrelerin S/G oranı değerlerine göre oluşturulan grafikler Şekil 4.7.'de gösterilmiştir. Bölüm 3.5.'te de belirtildiği gibi maksimum S/G oranı veren parametre seviyesi optimum seviyedir. HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde; kesme hızı (V_c) parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla Tablo 4.5. ve Şekil 4.7.'den tespit edilmiştir.



Şekil 4.7. HSS matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneyler için parametrelerin sinyal/gürültü oranı grafikleri.

4.3.1.2. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre varyans analizi

HSS matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi sonuç tablosu Tablo 4.6.'da ifade edilmiştir. Varyans analizine ve varyans analizi sonuç tablosuna ait detaylı bilgiler Bölüm 3.6.'da açıklanmıştır.

Tablo 4.6. HSS matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi.

Kaynak	SD	Ardışık KT	Etki oranı	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F	P
V _c (m/dk)	3	22290	%15,10	22290	7430,1	10,61	0,003
f _z (mm/diş)	3	119063	%80,63	119063	39687,6	56,66	0,000
Hata	9	6304	%4,27	6304	700,4		
Toplam	15	147656	%100				

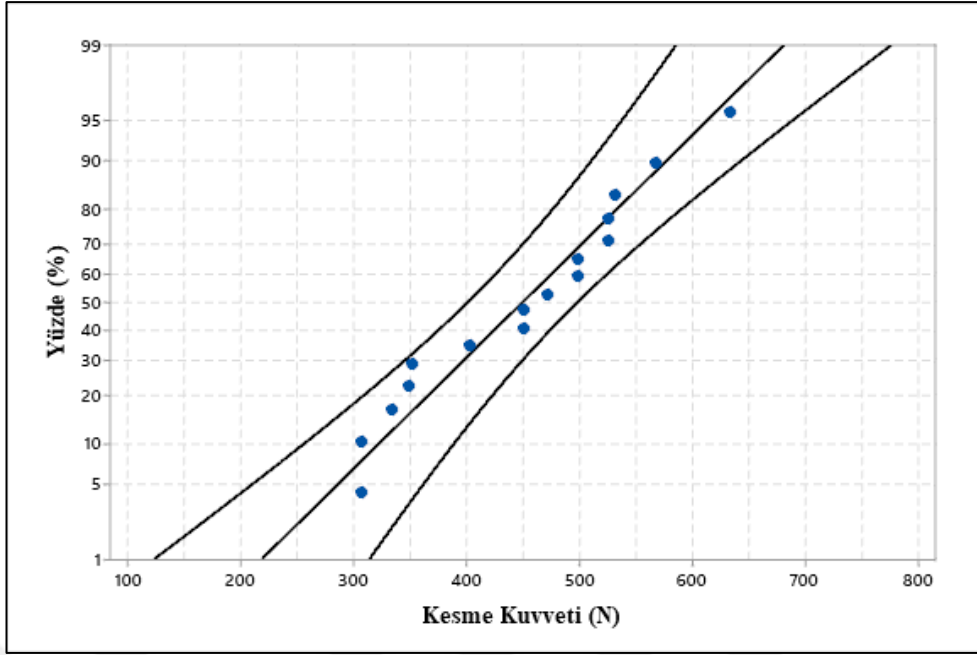
Tablo 4.6. incelendiğinde kesme parametrelerine ait P anlamlılık düzeylerinin %5'ten küçük olduğu görülmektedir. Bu da elde edilen veri ilişkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ifade etmektedir. HSS matkap kullanılan deneylerde, kesme kuvveti üzerindeki en etkili kesme parametresinin %80,63 etki oranıyla diş başı ilerleme olduğu varyans analizi sonucunda tespit edilmiştir. Kesme hızı parametresinin etki oranı ise yine varyans analizi sonucundan %15,10 olarak bulunmuştur.

4.3.1.3. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre regresyon analizi

HSS matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizi sonucunda elde edilen matematiksel ifade denklem 4.1'de belirtilmiştir. Bu denklem, kesme parametrelerinin maksimum kesme kuvveti ile matematiksel olarak ilişkisini ifade etmektedir. Regresyon analizi hakkında detaylı bilgiler Bölüm 3.7.'de ifade edilmiştir.

$$F_{Z,maks} = -23,5 + 1,609V_c + 3829f_z (N) \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'in tahmin yeteneğini ifade eden determinasyon katsayısı (R^2) değeri %90,58 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.8.'de bu matematiksel modeli ifade eden doğru grafiğine göre HSS matkapla elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı gösterilmiştir. Doğru grafiğinin yanındaki eğriler %95'lik güven aralığını ifade etmektedir. DeneySEL verilerin, hesaplanan değerlere göre %95'lik bir güven aralığında dağılım sergilediğini ifade etmek mümkündür.



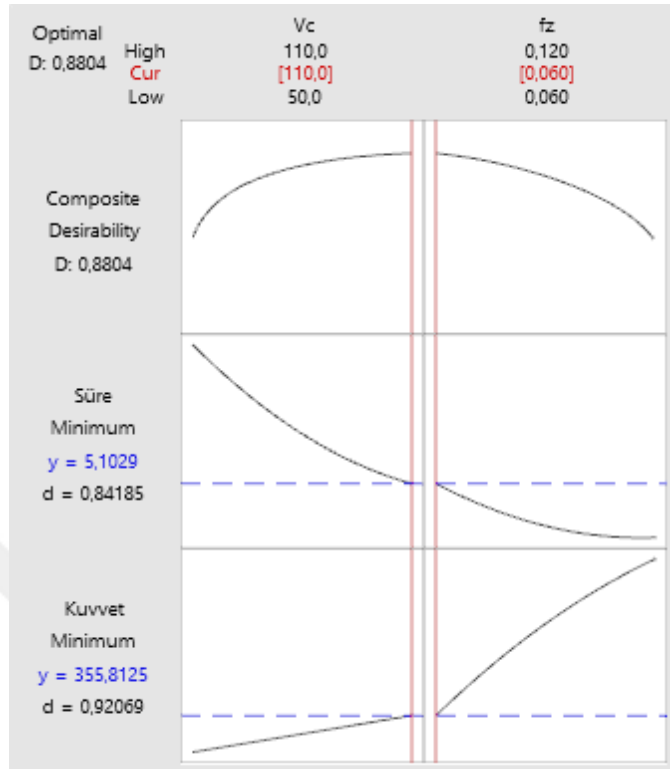
Şekil 4.8. Denklem 4.1'in doğru grafiğine göre HSS matkap ile elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı.

4.3.1.4. HSS matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

Delik delme sırasında oluşan kesme kuvvetlerini minimize etmek takım aşınmasını ve harcanan enerjiyi de minimuma indirerek maliyetleri düşürmektedir; fakat imalatla harcanan süre de işletme maliyetleri açısından önem arz etmektedir. Kesme kuvveti değerleri düşürülmeye çalışıldığında imalatla harcanan süre artmaktadır. Dolayısıyla işletme maliyetleri de artmaktadır. Bu sebeple maksimum kesme kuvveti ve işlem süresinin birlikte minimize edilmeye çalışıldığı kesme parametrelerinin optimizasyonu da gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak çoklu yanıt optimizasyonu kullanılmıştır. HSS matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 4.9.'da belirtilmiştir.

Maksimum kesme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. Kesme kuvveti için 355,8125 N, işlem süresi için 5,1029 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8804 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması

optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.9. HSS matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları.

4.3.2. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklerin veri analizleri

4.3.2.1. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

Tablo 4.7.'de HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklerden elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü (S/G) oranları ifade edilmiştir. V_c kesme hızını, f_z diş başına ilerleme miktarını ve $F_{Z,max}$ maksimum kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Tablo 4.7.'deki maksimum kesme kuvveti verilerine göre hesaplanan kesme parametrelerinin sinyal gürültü oranları Tablo 4.8.'de belirtilmiştir. Kesme parametrelerin sinyal/gürültü oranları, en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanmıştır.

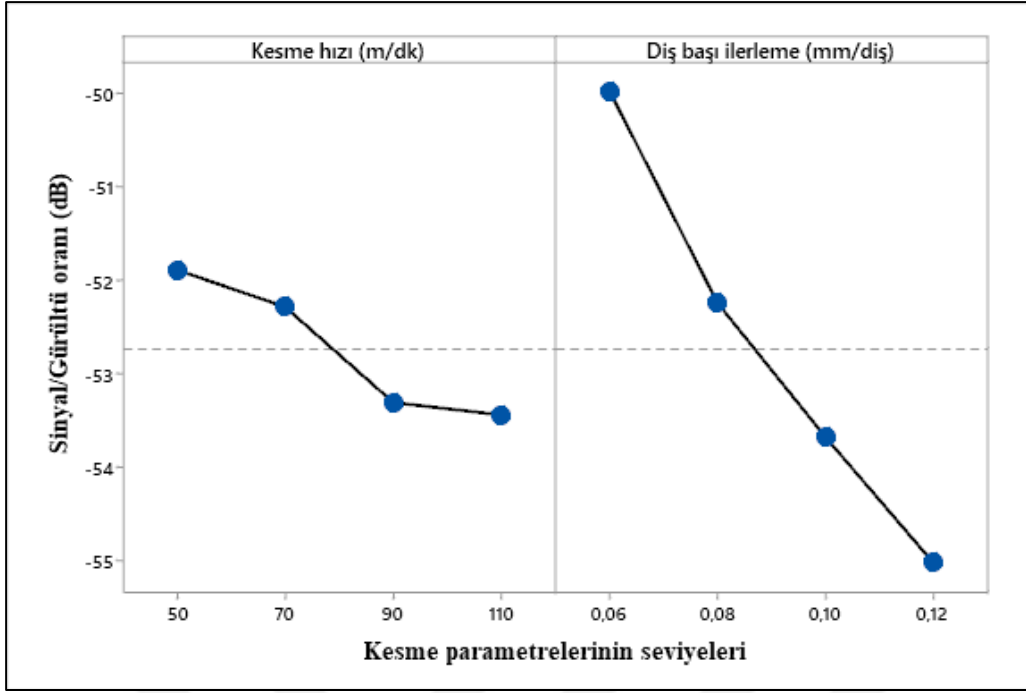
Tablo 4.7. HSSE-Co5 matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü oranları.

Deney No.	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	$F_{Z,maxs}$ (N)	S/G oranı (dB)
1	50	0,06	285	-49,0969
2	50	0,08	352	-50,9309
3	50	0,1	438	-52,8295
4	50	0,12	544	-54,7120
5	70	0,06	300	-49,5424
6	70	0,08	383	-51,6640
7	70	0,1	455	-53,1602
8	70	0,12	549	-54,7914
9	90	0,06	332	-50,4228
10	90	0,08	446	-52,9867
11	90	0,1	531	-54,5019
12	90	0,12	585	-55,3431
13	110	0,06	348	-50,8316
14	110	0,08	468	-53,4049
15	110	0,1	516	-54,2530
16	110	0,12	582	-55,2985

Tablo 4.8. HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre parametrelerin sinyal/gürültü oranları.

Parametre seviyesi	Kesme hızı S/G oranları (dB)	Diş başı ilerleme S/G oranları (dB)
1	-51,89	-49,97
2	-52,29	-52,25
3	-53,31	-53,69
4	-53,45	-55,04

Parametrelerin S/G oranı değerlerine göre oluşturulan grafikler Şekil 4.10.'da gösterilmiştir. Bölüm 3.5.'te de belirtildiği gibi maksimum S/G oranı veren parametre seviyesi optimum seviyedir. HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde; kesme hızı (V_c) parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla Tablo 4.8. ve Şekil 4.10.'dan tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. HSSE-Co5 matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneyler için parametrelerin sinyal/gürültü oranı grafikleri.

4.3.2.2. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre varyans analizi

HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi sonuç tablosu Tablo 4.9.'da ifade edilmiştir. Varyans analizine ve varyans analizi sonuç tablosuna ait detaylı bilgiler Bölüm 3.6.'da açıklanmıştır.

Tablo 4.9. HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi.

Kaynak	SD	Ardışık KT	Etki oranı	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F	P
V_c (m/dk)	3	16378	%10,68	16378	5459,4	20,28	0,000
f_z (mm/diş)	3	134594	%87,74	134594	44864,8	166,63	0,000
Hata	9	2423	%1,58	2423	269,3		
Toplam	15	153396	%100				

Tablo 4.9. incelendiğinde kesme parametrelerine ait P anlamlılık düzeylerinin %5'ten küçük olduğu görülmektedir. Bu da elde edilen veri ilişkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ifade etmektedir. HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerde, kesme kuvveti üzerindeki en etkili kesme parametresinin %87,74 etki oranıyla diş başı ilerleme olduğu varyans analizi sonucunda tespit edilmiştir. Kesme hızı

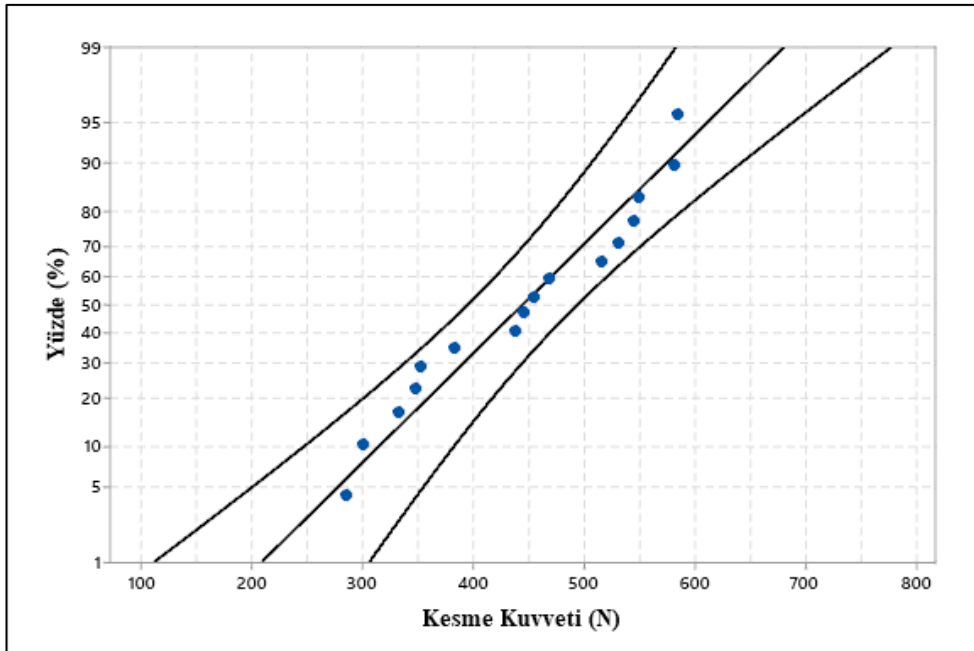
parametresinin etki oranı ise yine varyans analizi sonucundan %10,68 olarak bulunmuştur.

4.3.2.3. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre regresyon analizi

HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizi sonucunda elde edilen matematiksel ifade denklem 4.2’de belirtilmiştir. Bu denklem, kesme parametrelerinin maksimum kesme kuvveti ile matematiksel olarak ilişkisini ifade etmektedir. Regresyon analizi hakkında detaylı bilgiler Bölüm 3.7.’de ifade edilmiştir.

$$F_{Z,maks} = -33,1 + 1,365V_C + 4095f_z (N) \quad (4.2)$$

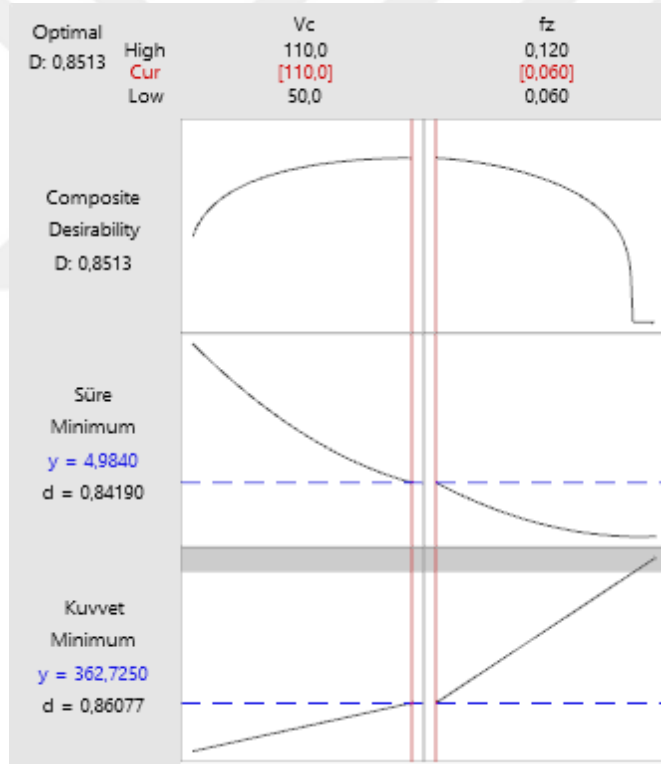
Denklem 4.2’nin tahmin yeteneğini ifade eden determinasyon katsayısı (R^2) değeri %95,79 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11.’de bu matematiksel modeli ifade eden doğru grafiğine göre HSS matkapla elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı gösterilmiştir. Doğru grafiğinin yanındaki eğriler %95’lik güven aralığını ifade etmektedir. Deneysel verilerin, hesaplanan değerlere göre %95’lik bir güven aralığında dağılım sergilediğini ifade etmek mümkündür.



Şekil 4.11. Denklem 4.2’nin doğru grafiğine göre HSSE-Co5 matkap ile elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı.

4.3.2.4. HSSE-Co5 matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 4.12.'de belirtilmiştir. Maksimum kesme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak dış başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. Kesme kuvveti için 362,7250 N, işlem süresi için 4,9840 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8513 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.12. HSSE-Co5 matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları.

4.3.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklerin veri analizleri

4.3.3.1. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre kesme parametrelerinin Taguchi optimizasyonu

Tablo 4.10.'da HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklerden elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü (S/G) oranları ifade edilmiştir. V_c kesme hızını, f_z diş başına ilerleme miktarını ve $F_{Z,maks}$ maksimum kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Tablo 4.10. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile delinen deliklere ait maksimum kesme kuvvetlerinin sinyal/gürültü oranları.

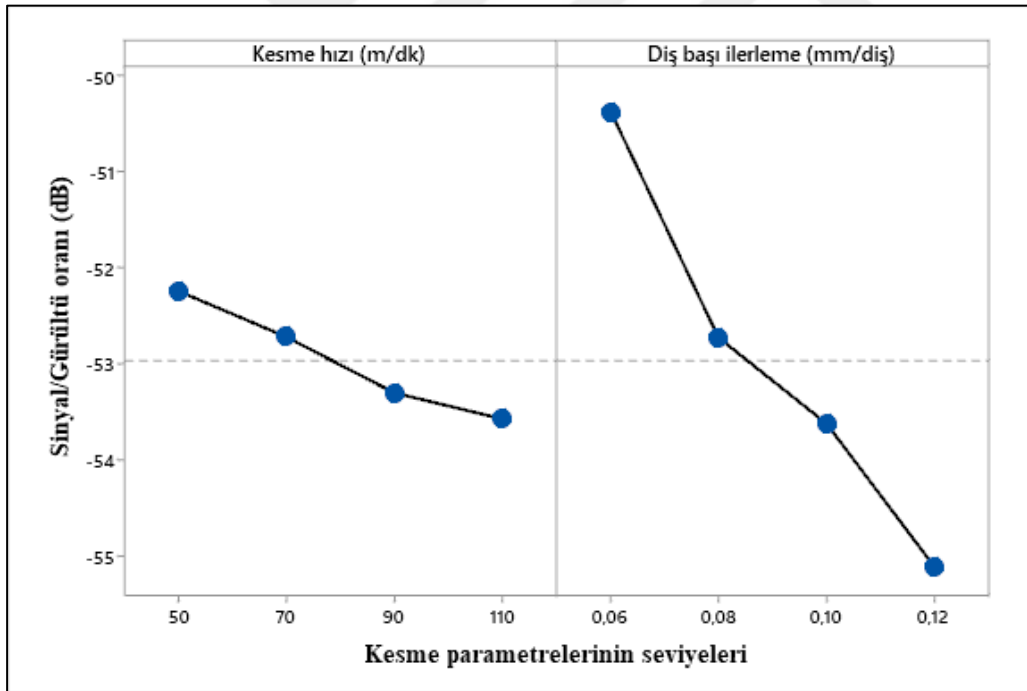
Deney No.	V_c (m/dk)	f_z (mm/diş)	$F_{Z,maks}$ (N)	S/G oranı (dB)
1	50	0,06	314	-49,9386
2	50	0,08	395	-51,9319
3	50	0,1	443	-52,9281
4	50	0,12	513	-54,2023
5	70	0,06	306	-49,7144
6	70	0,08	418	-52,4235
7	70	0,1	485	-53,7148
8	70	0,12	566	-55,0563
9	90	0,06	353	-50,9555
10	90	0,08	464	-53,3304
11	90	0,1	485	-53,7148
12	90	0,12	578	-55,2386
13	110	0,06	351	-50,9061
14	110	0,08	460	-53,2552
15	110	0,1	511	-54,1684
16	110	0,12	631	-56,0006

Tablo 4.10.'daki maksimum kesme kuvveti verilerine göre hesaplanan kesme parametrelerinin sinyal gürültü oranları Tablo 4.11.'de belirtilmiştir. Kesme parametrelerin sinyal/gürültü oranları, en küçük en iyi hedef türüne göre hesaplanmıştır.

Tablo 4.11. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre parametrelerin sinyal/gürültü oranları.

Parametre seviyesi	Kesme hızı S/G oranları (dB)	Diş başı ilerleme S/G oranları (dB)
1	-52,25	-50,38
2	-52,73	-52,74
3	-53,31	-53,63
4	-53,58	-55,12

Parametrelerin S/G oranı değerlerine göre oluşturulan grafikler Şekil 4.13.'de gösterilmiştir. Bölüm 3.5.'te de belirtildiği gibi maksimum S/G oranı veren parametre seviyesi optimum seviyedir. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde; kesme hızı (V_c) parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, diş başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak Taguchi optimizasyonu yardımıyla Tablo 4.11. ve Şekil 4.13.'den tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılarak gerçekleştirilen deneyler için parametrelerin sinyal/gürültü oranı grafikleri.

4.3.3.2. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre varyans analizi

HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi sonuç tablosu Tablo 4.12.'de ifade edilmiştir. Varyans analizine ve varyans analizi sonuç tablosuna ait detaylı bilgiler Bölüm 3.6.'da açıklanmıştır.

Tablo 4.12. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre varyans analizi.

Kaynak	SD	Ardışık KT	Etki oranı	Düzeltilmiş KT	Düzeltilmiş KO	F	P
V _c (m/dk)	3	11832	%8,75	11832	3943,9	13,01	0,001
f _z (mm/diş)	3	120683	%89,23	120683	40227,7	132,66	0,000
Hata	9	2729	%2,02	2729	303,2		
Toplam	15	135244	%100				

Tablo 4.12. incelendiğinde kesme parametrelerine ait P anlamlılık düzeylerinin %5'ten küçük olduğu görülmektedir. Bu da elde edilen veri ilişkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ifade etmektedir. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerde, kesme kuvveti üzerindeki en etkili kesme parametresinin %89,23 etki oranıyla diş başı ilerleme olduğu varyans analizi sonucunda tespit edilmiştir. Kesme hızı parametresinin etki oranı ise yine varyans analizi sonucundan %8,75 olarak bulunmuştur.

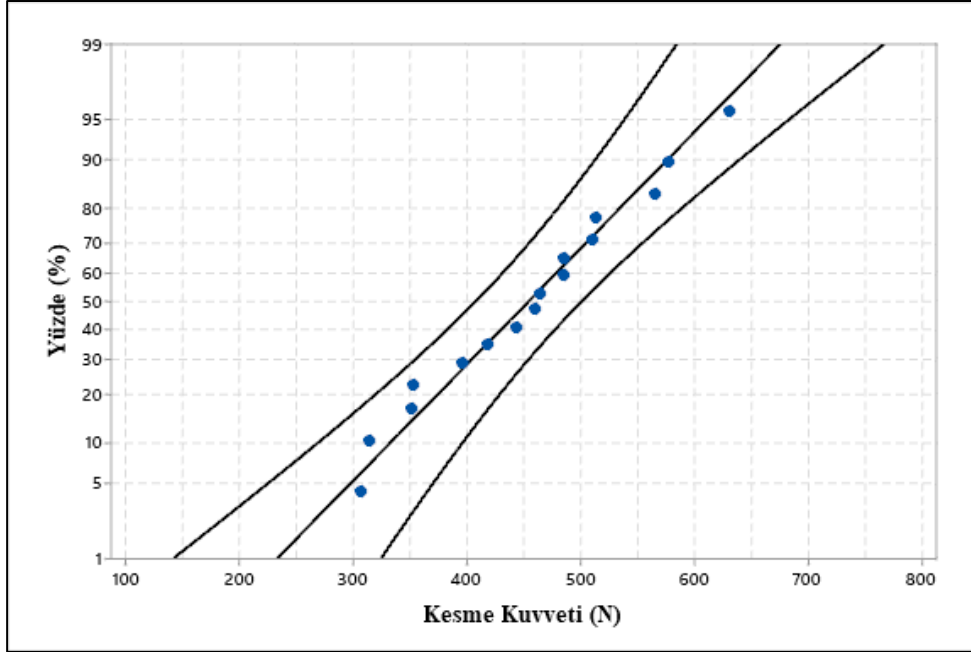
4.3.3.3. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti verilerine göre regresyon analizi

HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin maksimum kesme kuvveti çıktılarına göre çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizi sonucunda elde edilen matematiksel ifade denklem 4.3'te belirtilmiştir. Bu denklem, kesme parametrelerinin maksimum kesme kuvveti ile matematiksel olarak ilişkisini ifade etmektedir. Regresyon analizi hakkında detaylı bilgiler Bölüm 3.7.'de ifade edilmiştir.

$$F_{Z,maks} = 11,3 + 1,211V_C + 3849f_z (N) \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'ün tahmin yeteneğini ifade eden determinasyon katsayısı (R²) değeri %94,25 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.14.'de bu matematiksel modeli ifade eden doğru

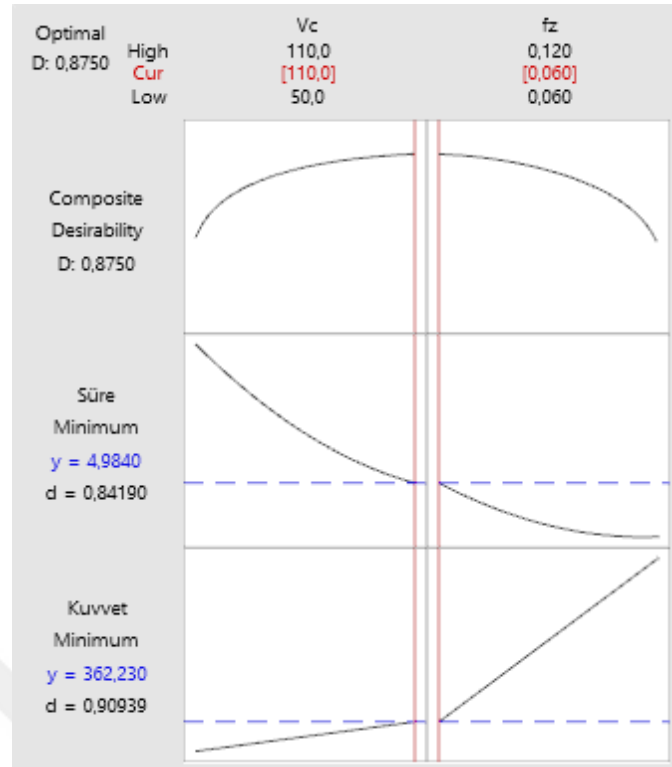
grafiğine göre HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkapla elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı gösterilmiştir. Doğru grafiğinin yanındaki eğriler %95'lik güven aralığını ifade etmektedir. Deneysel verilerin, hesaplanan değerlere göre %95'lik bir güven aralığında dağılım sergilediğini ifade etmek mümkündür.



Şekil 4.14. Denklem 4.3'ün doğru grafiğine göre HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile elde edilen maksimum kesme kuvvetlerinin dağılımı.

4.3.3.4. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile gerçekleştirilen deneylerin maksimum kesme kuvveti ve süre verilerine göre kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu

HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları Şekil 4.15.'te belirtilmiştir. Maksimum kesme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için 110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Y değerleri, deney çıktılarının optimize edilmiş değerleridir. Kesme kuvveti için 362,230 N, işlem süresi için 4,9840 saniye optimum değerlerdir. Optimizasyonun desirability fonksiyonu değeri 0,8750 olarak hesaplanmıştır. Desirability fonksiyonu değerinin 1'e yaklaşması optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlılığını artırmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen optimizasyonun istatistiksel olarak tutarlı olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.15. HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap kullanılan deneylerin verilerine göre gerçekleştirilen çoklu yanıt optimizasyonunun sonuçları.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında özellikle havacılık sektöründe oldukça fazla tercih edilen dolayısıyla binlerce delik delme işlemine tabi tutulan Al 2024 T351 alaşımı numuneler kullanılarak, 8 mm çaplı üç kesici takım (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) ve geleneksel sıvı soğutma ile delik delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kesme hızı (50, 70, 90 ve 110 m/dk) ve dış başı ilerleme miktarı (0,06/0,08/0,1 ve 0,12 mm/diş) parametreleri kullanılarak kesme kuvvetleri (F_z) ölçülmüştür. Her bir deneyde tespit edilen maksimum kesme kuvvetleri kullanılarak Taguchi optimizasyonları, varyans (ANOVA) ve regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca maksimum kesme kuvveti ve işlem süresinin birlikte minimize edildiği çoklu yanıt optimizasyonları (yanıt yüzey metodu) da gerçekleştirilmiştir. Şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Kesme kuvvetini minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri Taguchi optimizasyonu ile tespit edilmiştir. Üç matkap türü için de kesme hızı parametresinin optimum seviyesi 50 m/dk olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin optimum seviyesi ise 0,06 mm/diş olarak bulunmuştur.
- HSS matkap ile yapılan deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre kesme hızı parametresinin kesme kuvveti üzerindeki etki oranı %15,10 olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin kesme kuvveti üzerindeki etki oranı ise %80,63 olarak varyans analizi (ANOVA) ile tespit edilmiştir.
- HSSE-Co5 matkap ile yapılan deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre kesme hızı parametresinin kesme kuvveti üzerindeki etki oranı %10,68 olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin kesme kuvveti üzerindeki etki oranı ise %87,74 olarak varyans analizi (ANOVA) ile tespit edilmiştir.
- HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile yapılan deneylerin kesme kuvveti sonuçlarına göre kesme hızı parametresinin kesme kuvveti üzerindeki etki oranı %8,75 olarak, dış başı ilerleme miktarı parametresinin kesme kuvveti

üzerindeki etki oranı ise %89,23 olarak varyans analizi (ANOVA) ile tespit edilmiştir.

- Gerçekleştirilen üç varyans analizi birlikte incelendiğinde, kesme kuvveti üzerinde en etkili parametrenin diş başı ilerleme miktarı olduğu sonucuna varılmıştır.
- Üç matkap türü için ayrı ayrı yapılan deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarına göre üç regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizleri neticesinde maksimum kesme kuvveti ile kesme parametreleri (kesme hızı ve diş başı ilerleme miktarı) arasındaki ilişkiyi tanımlayan matematiksel modeller elde edilmiştir. Bu matematiksel modellerden, kesme parametrelerinin farklı değerleri için başka deneylere ihtiyaç duyulmadan tahmini maksimum kesme kuvveti elde edilebilmektedir.
- HSS matkap ile yapılan deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarından elde edilen matematiksel modelin tahmin yeteneğinin (R^2) %90,58 doğrulukta olduğu saptanmıştır.
- HSSE-Co5 matkap ile yapılan deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarından elde edilen matematiksel modelin tahmin yeteneğinin (R^2) %95,79 doğrulukta olduğu saptanmıştır.
- HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap ile yapılan deneylerin maksimum kesme kuvveti sonuçlarından elde edilen matematiksel modelin tahmin yeteneğinin (R^2) %94,25 doğrulukta olduğu saptanmıştır.
- Matematiksel modellerin doğru grafiklerine göre deneysel verilerin dağılımının %95'lik bir güven aralığında olduğu tespit edilmiştir.
- Delik delme sırasında oluşan kesme kuvvetlerini minimize etmek takım aşınması ve harcanan enerji yönünden maliyetleri düşürmektedir; fakat kesme kuvveti değerleri düşürülmeye çalışıldığında da imalatta harcanan süre artmaktadır. Dolayısıyla işletme maliyetleri artmaktadır. Bu sebeple maksimum kesme kuvveti ve işlem süresinin birlikte minimize edildiği kesme parametrelerinin çoklu yanıt optimizasyonu da gerçekleştirilmiştir. Çoklu yanıt optimizasyonu üç matkap türü (HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 TiAlN kaplamalı) için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar üç matkap türü için de aynı bulunmuştur. Maksimum kesme kuvveti ve işlem süresini birlikte minimize eden kesme parametrelerinin optimum seviyeleri, kesme hızı için

110 m/dk olarak diş başı ilerleme miktarı için ise 0,06 mm/diş olarak tespit edilmiştir. Çoklu yanıt optimizasyonu bulgularının desirability fonksiyonu değerleri; HSS matkap için 0,8804, HSSE-Co5 matkap için 0,8513 ve HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkap için 0,8750 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler değerlendirildiğinde yapılan çoklu yanıt optimizasyonunun istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılmıştır.

- Deneyler esnasında üç ekseninde de kuvvet (F_x , F_y , F_z) ölçümü gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneylerde, x ve y ekseninde ölçülen kuvvetlerin z ekseninde ölçülen kuvvetlere göre oldukça düşük değerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple bu tez çalışması kapsamında, z eksenindeki kuvvetler kesme kuvveti olarak değerlendirilip maksimum değerleri baz alınarak istatistiksel analizler yapılmıştır.
- Kuvvetlerin ölçümü sırasında sinyal gürültüleri neticesinde oluşan veriler tespit edilmiştir. Elde edilen tüm deney verilerine, Excel yazılımında üstel düzeltme veri özömleme metodu uygulanarak sinyal gürültülerinin neden olduğu anlam ifade etmeyen veriler azaltılmaya çalışılmıştır.

Al 2024 T351 alaşımının 8 mm çaplı HSS, HSSE-Co5, HSSE-Co5 (TiAlN kaplamalı) matkaplarla delinmesi işleminde elde edilen bu sonuçlar daha sonra yapılacak akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Aydın, M., Gavas, M., Yaşar M., Altunpak, Y. (2022). Talaşlı İmalat Yöntemleri. *Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri* (5. Baskı, ss. 257-378) içinde. Seçkin Yayıncılık.
- [2] Yazıcıoğlu, O., Borat, O. (2021). Talaş Kaldırma Yöntemleri. *İmalat Yöntemleri* (3. Baskı, ss. 211-225) içinde. Seçkin Yayıncılık.
- [3] Akkurt, M. (1998). *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları* (4. Baskı). Birsan Yayınevi.
- [4] Çakır, M. C. (2010). Delik Delme. *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri* (2. Baskı, ss. 349-473) içinde. Dora Yayınları.
- [5] Yıldız, A. (2021). *Delik delme işleminin simülasyonu ve delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı mekanik gerilmelerin incelenmesi* [Doktora tezi]. Gazi Üniversitesi.
- [6] Apaydın, D. (2009). *AISI 4340 malzemenin tornalanmasında oluşan kesme kuvvetlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi* [Yüksek lisans tezi]. Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi.
- [7] Mendi, F. (2006). *Takım Tezgâhları Teori ve Hesapları* (2. Baskı). Gazi Kitabevi.
- [8] Nouari, M., List, G., Girod, F., Géhin, D. (2005). Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12-13), 1436-1442. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.01.026>.
- [9] Zhu, Z., Guo, K., Sun, J., Li, J., Liu, Y., Zheng, Y., Chen, L. (2018). Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-T351/titanium Ti6Al4V stack. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 270-281. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.044>.
- [10] Zhu, Z., He B., Chen, J. (2020). Evaluation of tool temperature distribution in MQL drilling of aluminum 2024-T351. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.029>.
- [11] Bonhin, E. P., David-Müzel, S., Guidi, E. S., Botelho, E. C., Ribeiro, M. V. (2020). Influence of drilling parameters on thrust force and burr on fiber metal laminate (Al 2024-T3/glass fiber reinforced epoxy). *Procedia CIRP*, 101, 338-341. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.035>.
- [12] Kutlu, L. (2009). *Al2024-T4 alüminyumun elmas benzeri karbon (dlc) kaplanmış matkaplarla delinmesinde kesme parametrelerinin deneysel incelenmesi ve Taguchi yöntemiyle optimizasyonu* [Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi.

- [13] Landon Y., Lacombe, A., Souop, L. A. K., Daidié, A., Paredes, M., Chirol, C., Benaben, A. (2022). Impact of the drilling process on the surface integrity and residual fatigue strength of 2024-T351 aluminum parts. *Procedia CIRP*, 108, 459-464. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.03.072>.
- [14] Çakır, A. (2015). *AA 7075 ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi* [Doktora tezi]. Gazi Üniversitesi.
- [15] Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Din, I. U., Hanif, M. I., Kuklu, U., Pimenov, D. Y., Ikhlak M. (2021). Effect of cutting parameters and tool geometry on the performance analysis of one-shot drilling process of aa2024-t3. *Metals*, 11(6), 854-866. <https://doi.org/10.3390/met11060854>.
- [16] Saravanakumar, A., Sreenivas, P., Vijaya kumar, S., Pradeep kumar U., Rajeshkumar, L. (2022). Optimization of drilling process parameters for self-lubricants reinforced aluminium metal matrix composites. *Materials Today Proceedings*, 52, 1461-1465. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.196>.
- [17] Dahnel, A. N., Fauzi, M. H., Raof, N. A., Mokhtar, S., Khairussaleh, N. K. M. (2022). Tool wear and burr formation during drilling of aluminum alloy 7075 in dry and with cutting fluid. *Material Today Proceedings*, 59, 808-813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.110>.
- [18] Korkmaz, M. E., Çakıroğlu, R., Yaşar, N., Özmen, R., Günay, M. (2019). Al2014 alüminyum alaşımasının delinmesinde itme kuvvetinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(1), 193-199. <https://doi.org/10.31202/ecjse.449701>.
- [19] Navaneethakrishnan, G., Sureshkumar, B., Palanisamy, R., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., Kamel, S. (2022). Effect of cryogenic treatment on drill tool for enhancing metal cutting operation of aluminium alloy IS737.Gr19000. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1488-1501. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.069>.
- [20] Yaşar, N. (2019). Thrust force modelling and surface roughness optimization in drilling of AA-7075: FEM and GRA. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(10), 4771-4781. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-0918-5>.
- [21] Demir, Z., Adiyaman, O., Yakut, R. (2017). A7075-T651 Alaşımasının sürtünmeli delinmesinde ön-delik çap ve derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne ve kovanın geometrik boyutlarına etkisinin araştırılması. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2), 228-240.
- [22] Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G. M., Günay, M., Wojciechowski, S. (2022). Cutting forces and temperature measurements in cryogenic assisted turning of AA2024-T351 alloy: An experimentally validated simulation approach. *Measurement*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110594>.
- [23] Yalçın, N., Kayır Y., Erkal, S. (2017). AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma yöntemlerinin işlenebilirliğe etkisinin Taguchi ve Anova ile araştırılması. *Journal of Polytechnic*, 20(4), 743-751. <https://doi.org/10.2339/politeknik.368552>.

- [24] Kouadri, S., Necib, K., Atlati, S., Haddag, B., Nouari, M. (2013). Quantification of the chip segmentation in metal machining: Application to machining the aeronautical aluminium alloy AA2024-T351 with cemented carbide tools WC-Co. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 64, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.006>.
- [25] Yücel, A., Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Şirin, Ş., Kıvak, T., Gupta, M. K., Tomaz, Í. V. (2021). Influence of MoS₂ based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1688-1704. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.007>.
- [26] Paresi, P. R., Arunachalam, N., Lou, Y., Yoon, J. W. (2021). Machinability studies of AA2024-T351 alloy with uncoated carbide tool. *Materials Today: Proceedings*, 44, 1058-1064. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.179>.
- [27] Aamir, M., Giasin, K., Tolouei-Rad, M., Vafadar, A. (2020). A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12484-12500. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.003>.
- [28] Haddag, B., Atlati, S., Nouari, M., Moufki, A. (2016). Dry machining aeronautical aluminum alloy AA2024-T351: Analysis of cutting forces, chip segmentation and built-up edge formation. *Metals*, 6(9), 197-210. <https://doi.org/10.3390/met6090197>.
- [29] Aerospace Specification Metals Inc. (2022, 20 Ekim). Aluminum 2024-T351. <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma2024t4>
- [30] Özsoy, N. (2015). *Polimer esashlı fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Doktora tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [31] Taylan, D. (2009). *Taguchi deney tasarımı uygulaması* [Yüksek lisans tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- [32] Murat D., Ensarioğlu C., Gürsakal N., Oral A., Çakır M.C. (2018). Sert malzemelerin tornalanmasında takım aşınmasının tepki yüzeyi metodolojisi ile incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(4), 1299-1308. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416427>.
- [33] Özsoy N. (2022). Prediction and optimization of thrust force during the drilling of AISI 2080 steel. *Materials Testing*, 64(4), 602-609. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2098>.
- [34] Hazir E., Ozcan T. (2018). Response surface methodology integrated with desirability function and genetic algorithm approach for the optimisation of CNC machining parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 2795–2809. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3559-6>.

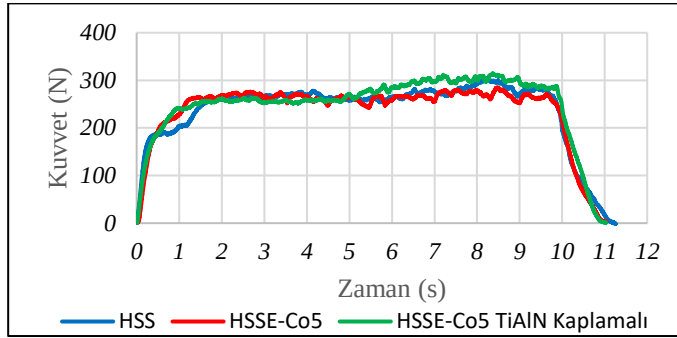


EKLER

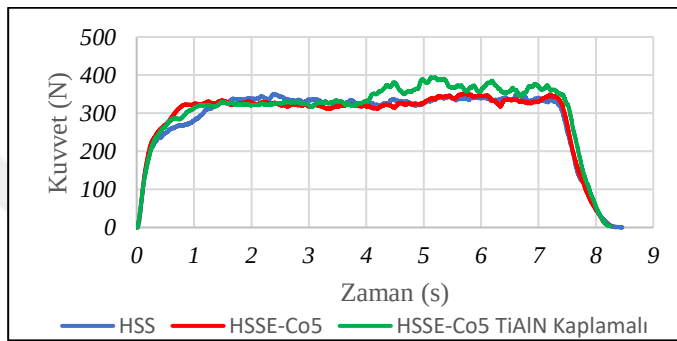
EK A. Deneylerin Kuvvet-Zaman Grafikleri



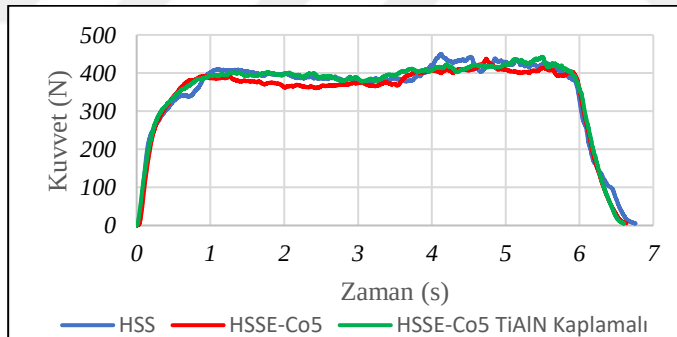
EK A



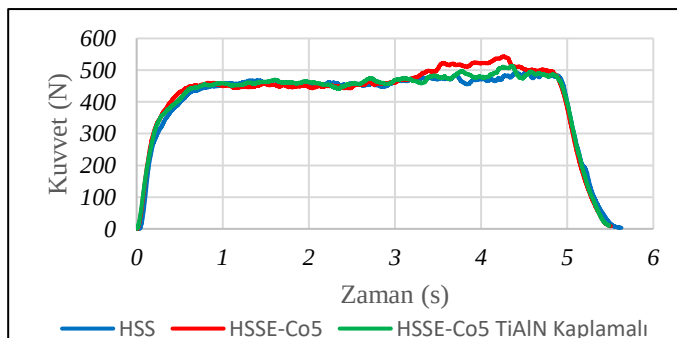
Şekil A.1. Deney 1'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



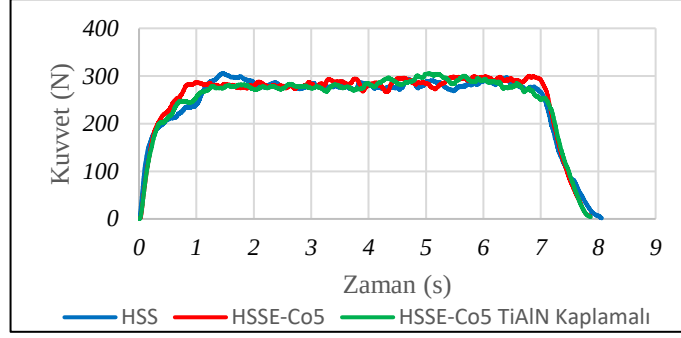
Şekil A.2. Deney 2'ye ait kuvvet-zaman grafikleri.



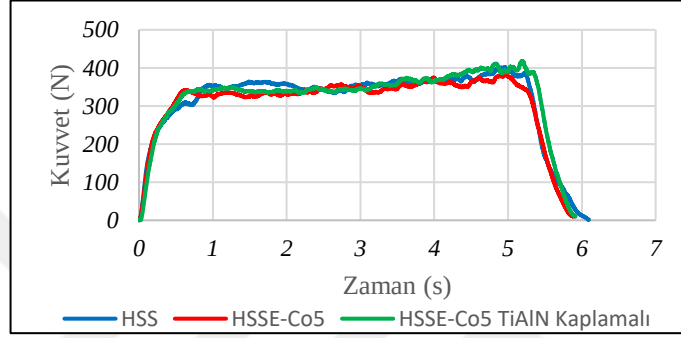
Şekil A.3. Deney 3'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



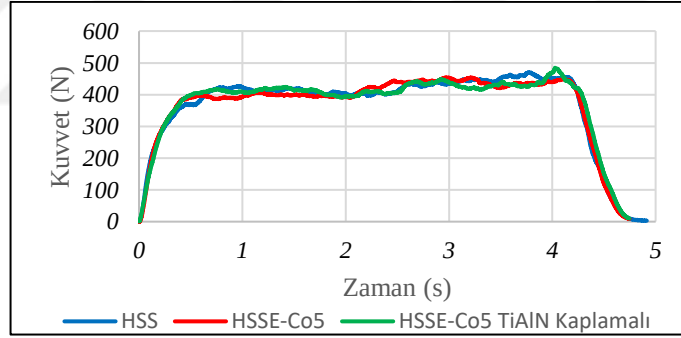
Şekil A.4. Deney 4'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



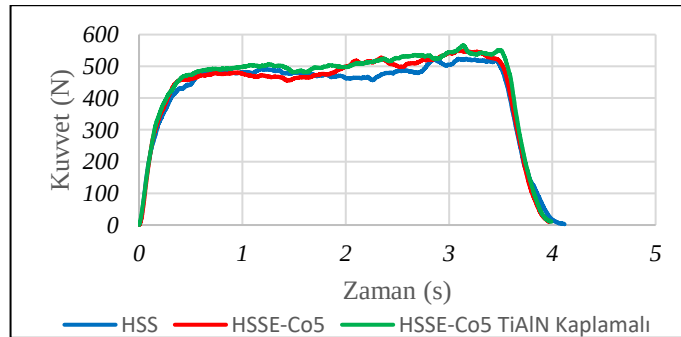
Şekil A.5. Deney 5'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



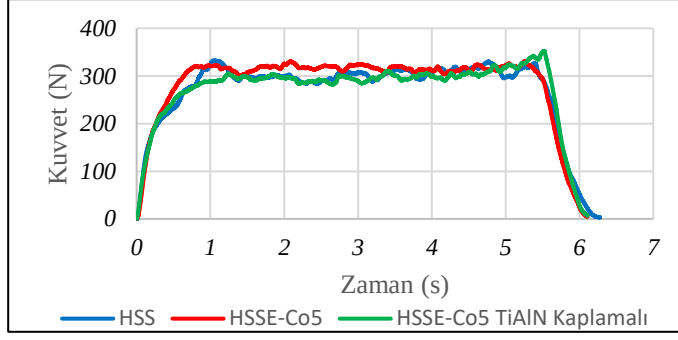
Şekil A.6. Deney 6'ya ait kuvvet-zaman grafikleri.



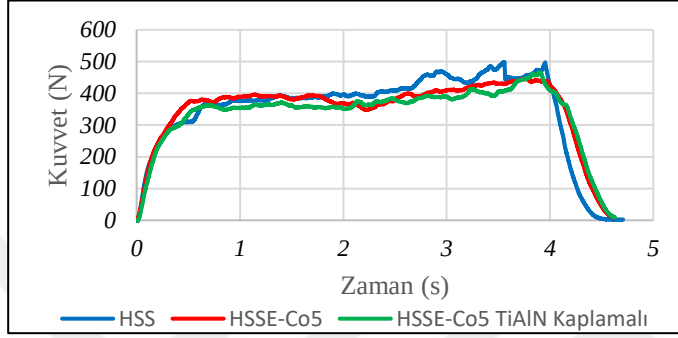
Şekil A.7. Deney 7'ye ait kuvvet-zaman grafikleri.



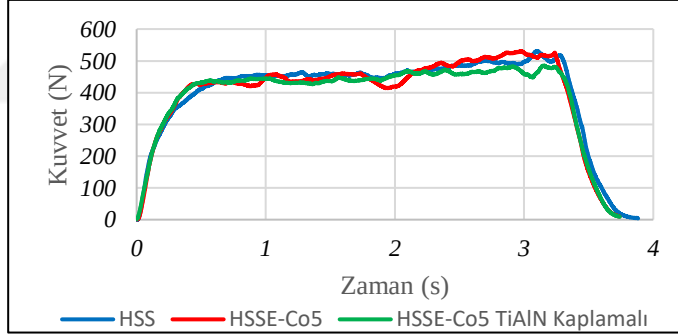
Şekil A.8. Deney 8'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



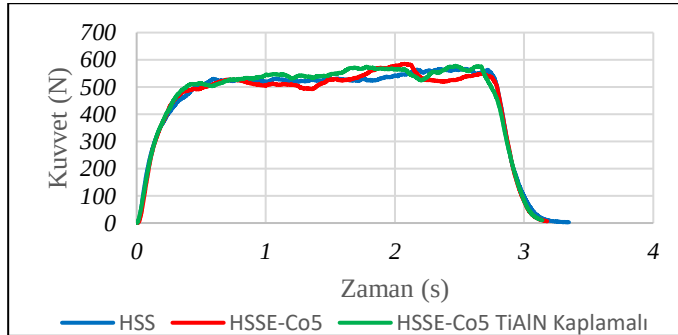
Şekil A.9. Deney 9'a ait kuvvet-zaman grafikleri.



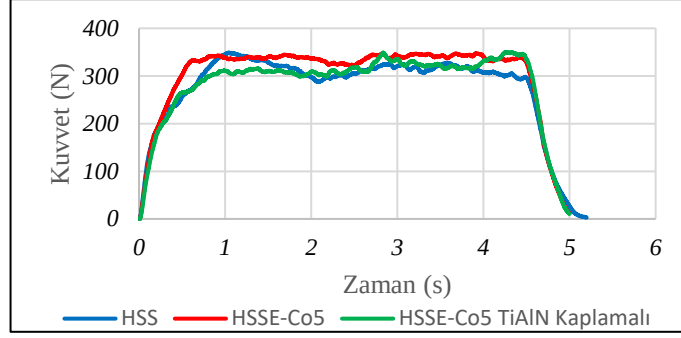
Şekil A.10. Deney 10'a ait kuvvet-zaman grafikleri.



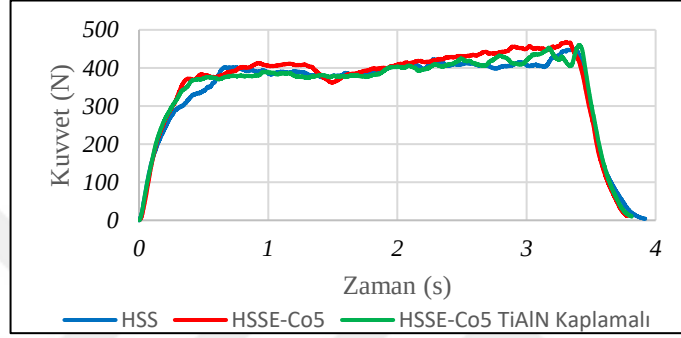
Şekil A.11. Deney 11'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



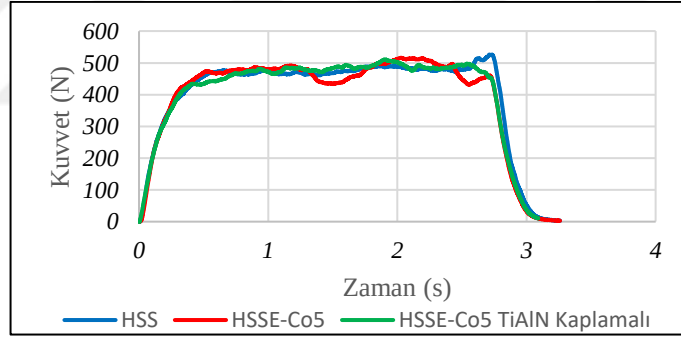
Şekil A.12. Deney 12'ye ait kuvvet-zaman grafikleri.



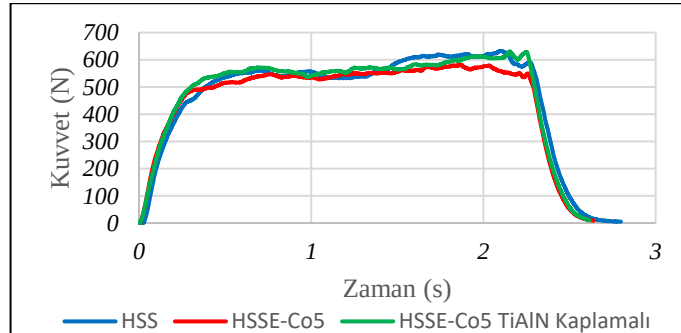
Şekil A.13. Deney 13'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



Şekil A.14. Deney 14'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



Şekil A.15. Deney 15'e ait kuvvet-zaman grafikleri.



Şekil A.16. Deney 16'ya ait kuvvet-zaman grafikleri.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yunus Zübeyir TURGUT

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans** : 2021, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Tasarım ve İmalat Bilim Dalı