

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HAVACILIK SANAYİNDE KULLANILAN 6061 VE 6013 ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARIN İŞLEME PARAMETRELERİNİN ENERJİ
TÜKETİMİNE ETKİSİ**

HAZIRLAYAN

İLKYAZ NALBANT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2025

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**HAVACILIK SANAYİNDE KULLANILAN 6061 VE 6013 ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARIN İŞLEME PARAMETRELERİNİN ENERJİ
TÜKETİMİNE ETKİSİ**

HAZIRLAYAN

İLKYAZ NALBANT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF. DR. YUSUF TANSEL İÇ

ANKARA - 2025

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde İlkyaz Nalbant tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 17 /05/ 2025

Tez Adı: Havacılık Sanayinde Kullanılan 6061 ve 6013 Alüminyum Alaşımların İşleme Parametrelerinin Enerji Tüketimine Etkisi

Tez Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Mehmet KABAK , Gazi Üniversitesi

.....

Prof. Dr. D. Kumru ATALAY, Başkent Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ, Başkent Üniversitesi

.....

ONAY

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Dilek ÇÖKELİLER SERDAROĞLU

Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 19 /06 / 2025

Öğrencinin Adı, Soyadı: İlkyaz Nalbant

Öğrencinin Numarası: 21610323

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

Tez Başlığı: Havacılık Sanayinde Kullanılan 6061 ve 6013 Alüminyum Alaşımların İşleme Parametrelerinin Enerji Tüketimine Etkisi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/ tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 46 sayfalık kısmına ilişkin, 19/06/2025 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: 19 / 06 / 2025

Öğrenci Danışmanı:

Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ

.....

TEŞEKKÜR

Sayın Prof. Dr. Yusuf Tansel İÇ' e (tez danışmanı), çalışmanın sonuca ulaştırılmasında ve karşılaşılan güçlüklerin aşılmasında her zaman yardımcı ve yol gösterici olduğu için teşekkür ederim.



ÖZET

İlkyaz NALBANT

HAVACILIK SANAYİNDE KULLANILAN 6061 VE 6013 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2025

Havacılık sanayi, malzeme performansının ve enerji verimliliğinin kritik öneme sahip olduğu stratejik bir sektördür. Bu bağlamda, 6061 ve 6013 gibi 6xxx serisi alüminyum alaşımları; hafiflik, yüksek mekanik dayanım, korozyon direnci ve işlenebilirlik gibi üstün özellikleri sayesinde bu sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, söz konusu alaşımların frezeleme işlemi sırasında enerji tüketimine etki eden işleme parametrelerinin analizi ve optimizasyonu amaçlanmıştır.

DeneySEL çalışmalar 2⁴ faktöriyel deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmiş; yatay mil hızı, kesme derinliği, takım kalınlığı ve malzeme türü olmak üzere dört bağımsız değişken ele alınmıştır. Deney sonuçları minitab yazılımı ile analiz edilmiş; varyans analizi (ANOVA), regresyon modelleme, kodlanmış katsayılar, grafiksel analizler ve yanıt optimizasyonu yöntemleri kullanılmıştır.

Analizler sonucunda, özellikle mil hızı ve takım tipi faktörlerinin enerji tüketimi üzerinde anlamlı etkiler yarattığı belirlenmiş; 6013 alaşımının daha düşük enerji tüketimi sağladığı görülmüştür. Elde edilen optimum parametre kombinasyonu doğrulama deneyleri ile test edilmiş ve tahmin edilen değerlerle karşılaştırıldığında hata oranlarının kabul edilebilir sınırların altında olduğu saptanmıştır.

Bu çalışma, havacılık sektöründe sürdürülebilir üretim ve enerji verimliliği hedeflerine katkı sağlamakta olup, talaşlı imalat süreçlerinin optimizasyonuna yönelik uygulamalı bir yaklaşım sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Havacılık Sanayi, 6013 Al Alaşımı, 6061 Alaşımı, Enerji Verimliliği, Faktöriyel Deney Tasarımı.

ABSTRACT

İlkyaz NALBANT

OPTİMİZATION OF PARAMETERS AFFECTİNG ENERGY CONSUMPTION İN 6061 AND 6013 ALUMİNUM ALLOYS USED İN THE AVIATION INDUSTRY

Başkent University Institute Of Science

Department of Industrial Engineering

2025

The aerospace industry is a strategic sector where material performance and energy efficiency are of critical importance. In this context, 6xxx series aluminum alloys such as 6061 and 6013 are widely used due to their superior properties, including lightweight, high mechanical strength, corrosion resistance, and machinability. This thesis aims to analyze and optimize the machining parameters that affect energy consumption during the milling of these alloys.

Experimental studies were carried out using a 2^4 full-factorial design, considering four independent variables: spindle speed, depth of cut, tool diameter, and material type. The results were analyzed using Minitab software through analysis of variance (ANOVA), regression modeling, coded coefficients, graphical evaluations (Contour Plot, Main Effects Plot, Interaction Plot, Cube Plot), and response optimization methods.

The analyses revealed that spindle speed and tool diameter significantly affect energy consumption and that the 6013 alloy results in lower energy use. The optimal parameter combination is verified using confirmation experiments. The differences between predicted and experimental values remained within acceptable limits.

This study contributes to the goals of sustainable production and energy efficiency in the aerospace industry and provides an applied approach to the optimization of machining processes.

KEYWORDS: Aviation Industry, 6013 Al Alloy, 6061 Alloy, Energy Efficiency, Factorial Experimental Design.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Havacılık Sanayinde Alüminyum Kullanımı	3
2.2. Havacılık Sanayinde 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Kullanımı.....	3
2.3. 6061 ve 6013 Alüminyum Alaşımlarının İşleme Teknikleri	4
2.4. İşleme Parametrelerinin Enerji Tüketimine Etkisi	4
2.5. Literatürde Yer Alan DeneySEL ve Teorik Çalışmalar.....	5
2.6. Enerji Verimliliği	5
3. METODOLOJİ	6
3.1. Deney Tasarımı	6
3.2. Faktöriyel Deney Tasarımı.....	7
4. BULGULAR	11
4.1. Regresyon Analizi	11
4.2. Kodlanmış Katsayılar.....	12
4.3 Model Özeti	14
4.4. Regresyon Denklemi.....	16
4.5. Varyans Analizi	17
4.6. Grafikler	19
4.6.1. Eş yükseklik grafikleri.....	19
4.6.2. Tüketilen enerji – y için ana etki grafiği.....	33
4.6.3 Tüketilen enerji – y için etkileşim grafiği	36
4.6.4 Küp grafiği analizi	38
4.6.5. Yanıt optimizasyonu grafiği	42
5. DOĞRULAMA DENEYİ	45
6. SONUÇ	46
KAYNAKLAR	47

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Bağımsız Faktörler ve Değerleri	6
Tablo 3.2. Faktöriyel Deney Tasarımı	7
Tablo 4.1. Kodlanmış Katsayılar	13
Tablo 4.2. Model Özeti.....	15
Tablo 4.3. Regresyon Denklemi	16
Tablo 4.4. Varyans Analizi.....	18
Tablo 4.5. Eş Yükseklik Grafikleri – 1 Değerleri.....	21
Tablo 4.6. Eş Yükseklik Grafikleri – 2 Değerleri.....	22
Tablo 4.7. Eş Yükseklik Grafikleri – 3 Değerleri.....	24
Tablo 4.8. Eş Yükseklik Grafikleri – 4 Değerleri.....	25
Tablo 4.9. Eş Yükseklik Grafiklerinin Karşılaştırılması	26
Tablo 4.10. Eş Yükseklik Grafikleri – 5 Değerleri.....	27
Tablo 4.11. Eş Yükseklik Grafikleri – 6 Değerleri.....	28
Tablo 4.12. 6061 Al Alaşım için 12 ve 55 Takım Tipi Karşılaştırılması.....	29
Tablo 4.13. Eş Yükseklik Grafikleri – 7 Değerleri.....	30
Tablo 4.14. Takım Tipi (55) Sabitken Malzeme Türü Karşılaştırılması	31
Tablo 4.15. Eş Yükseklik Grafikleri – 8 Değerleri.....	32
Tablo 4.16. Malzeme Türü (6013 Al) Sabitken Takım Tipi Karşılaştırılması.....	33
Tablo 4.17. Tüketilen Enerji – Y İçin Ana Etki Grafiği Değerleri	35
Tablo 4.18. Küp Grafiği-1 Değerleri	39
Tablo 4.19. Malzeme Türü ve Takım Tipinin Enerji Tüketimine Etkisi	40
Tablo 4.20. Küp Grafiği – 2 Değerleri	41

Tablo 4.21. Yatay Mil Hızı ve Kesme Derinliğinin Enerji Tüketimine Etkisi	42
Tablo 4.22. Yanıt Optimizasyonu Grafiği Değerleri	44
Tablo 5.1. Doğrulama Deneyi ve Tahmin Karşılaştırması	45



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Z12 Takım Tipi.....	8
Şekil 3.2. Z55 Takım Tipi.....	9
Şekil 3.3. Universal Kalıpcı Freze Tezgâhı.....	9
Şekil 3.4. Kanal Açılımı	9
Şekil 3.5. İşlemenin şematik gösterimi [17].....	10
Şekil 3.6. Uç Freze ve Modül Freze Çakısı Arasındaki İlişki [17]	10
Şekil 4.1. Eş Yükseklik Grafikleri - 1	21
Şekil 4.2. Eş Yükseklik Grafikleri - 2	22
Şekil 4.3. Eş Yükseklik Grafikleri - 3	23
Şekil 4.4. Eş Yükseklik Grafikleri - 4	25
Şekil 4.5. Eş Yükseklik Grafikleri - 5	26
Şekil 4.6. Eş Yükseklik Grafikleri - 6	28
Şekil 4.7. Eş Yükseklik Grafikleri - 7	30
Şekil 4.8. Eş Yükseklik Grafikleri - 8	32
Şekil 4.9. Tüketilen Enerji – Y İçin Ana Etki Grafiği	35
Şekil 4.10. Tüketilen Enerji – Y İçin Etkileşim Grafiği.....	37
Şekil 4.11. Küp Grafiği - 1	39
Şekil 4.12. Küp Grafiği-2.....	41
Şekil 4.13. Yanıt Optimizasyonu Grafiği	43

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	Alüminyum
A	Amper
Dev	Devir
Dev/Dak	Devir/Dakika Cinsinden İş Mili Devir Hızı
Dk	Dakika
DT	Deney Tasarımı
M/Dak	Metre/Dakika Cinsinden İlerleme Hızı
ANOVA	Varyans Analizi



1. GİRİŞ

Havacılık sanayii, modern teknolojinin en ileri mühendislik uygulamalarını içeren, stratejik ve ekonomik açıdan büyük öneme sahip bir sektördür. Hem sivil hem de askeri kullanım alanlarına sahip olan bu sektör, dünya genelinde ulaşım, güvenlik, savunma ve ticaret gibi birçok alanda kritik bir rol oynamaktadır. Bu sektörde kullanılan malzemelerin üretim süreçlerinin optimize edilmesi, enerji tüketiminin azaltılması ve çevresel etkilerin en aza indirilmesi, sürdürülebilirlik hedefleri açısından da büyük bir öneme sahiptir.

Enerji verimliliği, hem ekonomik hem de çevresel etkileri nedeniyle günümüzde büyük bir öneme sahiptir. Savunma sanayisinde enerji verimliliği, yüksek performanslı sistemlerin ve teknolojilerin geliştirilmesi açısından önemli bir gerekliliktir. Bu bağlamda, enerji verimliliğinin artırılması, hem maliyetlerin düşürülmesine hem de çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Havacılık sanayii, yüksek teknoloji gerektiren süreçleri nedeniyle enerji verimliliği sağlamak için sürekli araştırma ve geliştirme faaliyetlerine ihtiyaç duyar. Bu nedenle, üretim parametrelerinin optimizasyonu, enerji tüketimini minimize etmek adına büyük önem taşımaktadır.

Dünyada en fazla mevcut metaller sıralamasında alüminyum ikinci sırayı alır. Alüminyum metalinden muhtelif alaşımlama ve farklı ısı işlem şartı ile çok farklı fiziksel ve mekanik özellikler elde etmek mümkün olmuştur. Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluğu, kolay şekillendirilebilmesi, yüksek korozyon direnci, geliştirilebilen fiziksel ve mekanik özelliklerine sahip olması bu alaşımların kullanım alanını artırmaktadır [1]. Alüminyum alaşımları, havacılık sektöründe sık tercih edilen malzemelerdendir. Özellikle 6xxx serisi alüminyum alaşımları, hem mekanik hem de kimyasal özellikleri bakımından bu sektörde yoğun ilgi görmektedir. 6XXX serisi bu alaşım, silisyum ve magnezyumun birlikte oluşturdukları seriyi temsil etmektedir.

Bu çalışmada, havacılık sanayisinde sıkça kullanılan 6061 ve 6013 alüminyum alaşımlarının işleme parametrelerinin enerji tüketimine etkisi incelenecektir. Özellikle frezeleme işlemi üzerinde durularak, farklı kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliği gibi parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki etkileri deneysel olarak analiz edilecektir. 6061 alüminyum alaşımı, uçak gövdeleri ve yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılırken, 6013 alüminyum alaşımı daha yüksek mukavemetli yapısıyla havacılık endüstrisinde kritik uygulamalar için tercih edilmektedir [2].

Malzemelerin işlenmesi sırasında kullanılan parametreler, doğrudan enerji tüketimini etkileyen faktörlerdir. Bu parametreler, genellikle malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerine, işleme türüne ve kullanılan makinelerin özelliklerine göre belirlenmektedir. Özellikle son yıllarda üretim endüstrisinin önemli alanlarında kullanılan malzemelerin daha güçlü, hafif ve uygun maliyetli olmasına yönelik talep artmıştır. Havacılık, otomotiv, inşaat ve enerji gibi sektörlerde mükemmel korozyon direnci, yüksek özgül dayanım, düşük maliyet ve geri dönüşüm kabiliyetleri nedeniyle alüminyum alaşımlar yaygın olarak tercih edilmektedir [3].

İşleme parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisini anlamak için kesme hızı, ilerleme hızı, kesici takım geometrisi ve malzemesi ve işleme yöntemi (tornalama, frezeleme, delme) parametrelerinin her iki alaşım için de dikkate alınması gerekir.

Kesme hızı, iş parçasının kesilme hızıdır ve doğrudan işleme süresini etkiler. Yüksek kesme hızı, genellikle işleme süresini kısaltırken enerji tüketimini artırabilir. Ancak, çok düşük kesme hızları da verimsizdir ve enerji tüketimini artırabilir.

İlerleme hızı, takımın iş parçası üzerindeki ilerleme hızıdır. İlerleme hızı, işleme süresini ve kesme kuvvetini etkileyerek enerji tüketimine doğrudan etki eder. Çok düşük ilerleme hızları, takımın daha uzun süre iş parçası ile temas etmesine neden olarak daha fazla enerji harcamasına yol açar. Öte yandan, yüksek ilerleme hızları, enerji verimliliğini artırabilir, ancak bu durumda takım aşınması da hızlanabilir.

Kesici takımın geometrisi, iş parçası üzerinde uygulanan kuvvetleri etkiler. Kesici takımın malzemesi de enerji verimliliğini etkileyebilir; örneğin, sert ve dayanıklı kesici takımlar daha az enerji ile işleme yapabilir.

Alüminyum alaşımlarının işlenmesi sırasında kullanılan işlem türü de enerji tüketimini etkileyebilir. Tornalama ve frezeleme işlemleri genellikle daha fazla enerji tüketirken, doğru parametrelerle yapılan delme işlemleri daha verimli olabilir.

Bu çalışmanın amacı, 6061 ve 6013 alüminyum alaşımlarının işleme parametrelerinin enerji tüketimine etkisini analiz ederek enerji verimliliği sağlamak için öneriler sunmaktır. Faktöriyel deney tasarımı yöntemi ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, istatistiksel analizlerle değerlendirilmiş ve en uygun işleme koşullarının belirlenmesine yönelik modellemeler yapılmıştır. Literatürde yapılan çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, bu çalışma, havacılık sanayinde enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik önemli bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Havacılık Sanayinde Alüminyum Kullanımı

Havacılık sanayii, modern mühendislik uygulamalarının en ileri örneklerini içeren ve stratejik açıdan büyük öneme sahip bir sektördür. Hem sivil hem de askeri alanlarda kritik bir rol oynayan bu sektör, dünya genelinde ulaşım, güvenlik ve savunma alanlarında önemli katkılar sağlamaktadır. Havacılık sanayiinde kullanılan malzemelerin enerji verimliliği, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, alüminyum alaşımlarının enerji tüketimi üzerindeki etkilerini anlamak, sanayideki enerji verimliliği çalışmalarını doğrudan etkilemektedir [4].

2.2. Havacılık Sanayinde 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Kullanımı

Alüminyum alaşımları, havacılık sektöründe yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle 6xxx serisi (Al-Mg-Si) alüminyum alaşımları, bu özellikleri sayesinde uçak gövdeleri, iç paneller, yakıt hatları ve bağlantı elemanları gibi birçok yapısal bileşende kullanılmaktadır. 6061 ve 6013 alüminyum alaşımları, bu serinin öne çıkan iki türüdür. Yurdakul ve arkadaşları, alüminyum alaşımı seçiminde mukavemet, işlenebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi faktörlerin kritik rol oynadığını belirtmiş ve 6xxx serisinin havacılık uygulamaları için ideal bir denge sunduğunu vurgulamıştır [5]. Şahin, 6061 alaşımının uygun kaynak yöntemleriyle uçak bileşenlerinde etkin şekilde kullanılabildiğini ortaya koymuştur [6].

Literatürde yapılan çalışmalar, 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının özellikle taşıma sistemleri, uçak iskeleti, iç donanımlar ve bağlantı parçaları gibi uygulamalarda tercih edildiğini göstermektedir [7]. Bu alaşımlar, ısıtılma işleme uygunlukları, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve iyi korozyon direnci sayesinde geniş kullanım alanı bulmaktadır [8].

2.3. 6061 ve 6013 Alüminyum Alaşımlarının İşleme Teknikleri

6061 ve 6013 alüminyum alaşımları, havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Bu alaşımlar, yüksek mukavemet, hafiflik ve iyi işlenebilirlik özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. 6061 alüminyum alaşımı, uçak gövdeleri, kanat yapıları ve çeşitli yapısal bileşenlerde kullanılırken, 6013 alüminyum alaşımı daha yüksek mukavemetli yapısıyla zorlu havacılık uygulamaları için tercih edilmektedir [9].

6013 alüminyum alaşımı, 6061'e kıyasla daha yüksek dayanım ve yorulma direnci sunmasına rağmen, literatürde bu alaşım üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. 6013'ün yüksek performans gerektiren alanlarda kullanım potansiyeline rağmen, işlenebilirlik ve enerji verimliliği açısından detaylı araştırmaların azlığı bu çalışmayı özgün kılmaktadır. Mevcut literatürde 6013 üzerine yapılmış sınırlı sayıda deneysel çalışma, havacılık sanayisinde bu alaşımın daha fazla araştırılması gerektiğini göstermektedir.

Bu alaşımların işlenmesinde genellikle CNC işleme, frezeleme ve tornalama gibi yöntemler kullanılmaktadır. İşleme parametrelerinin doğru seçimi enerji tüketimini doğrudan etkileyebildiği için, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi faktörler dikkatlice optimize edilmelidir [10]. Ayrıca, ısıtılma işlem sonrası işleme koşulları ve takım geometri tasarımı gibi etkenler de enerji tüketimi üzerinde önemli rol oynamaktadır [11].

2.4. İşleme Parametrelerinin Enerji Tüketimine Etkisi

İşleme sırasında kullanılan parametrelerin enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Kesme hızı ve ilerleme hızındaki artışın enerji tüketimini artırdığı, ancak uygun parametre kombinasyonları ile enerji verimliliğinin sağlanabileceği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır [12]. Yüksek hızda işleme teknikleri, enerji tüketimini artırmakla birlikte, yüzey kalitesi ve işleme süresi açısından avantaj sağlayabilmektedir [4].

Bunun yanında, enerji verimliliği yalnızca parametrelerle değil, aynı zamanda kullanılan takım malzemesi, soğutma sıvısı türü ve iş parçası sabitleme yöntemleriyle de ilişkilidir. Örneğin, Sadeghi ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, soğutmasız ve minimum miktarda yağlama (MQL) sistemlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiş ve MQL'nin önemli ölçüde tasarruf sağladığı görülmüştür [13].

2.5. Literatürde Yer Alan DeneySEL ve Teorik Çalışmalar

Yapılan deneySEL çalışmalarda, 6061 ve 6013 alüminyum alaşımlarının işleme parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi kapsamlı olarak incelenmiştir. Zhang ve Wang, enerji verimliliği perspektifinden, bu alaşımların işlenmesi sırasında enerji tüketimini analiz etmiş ve sürdürülebilir üretim teknikleri geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır [14]. Diğer çalışmalar da, enerji tüketimini minimize etmek için işleme parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir [9]. Bununla birlikte, 6013 alaşımı üzerine yapılan çalışmaların azlığı, bu alaşımın potansiyelinin tam olarak anlaşılmasını engellemekte ve bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Öte yandan, Najiha ve arkadaşları, çok faktörlü deneySEL tasarım yöntemlerinin enerji verimliliği analizinde ne kadar etkili olduğunu ortaya koymuş ve faktöriyel tasarım ile Taguchi yöntemlerinin enerji analizi üzerine uygulamalarına yer vermiştir [15]. Bu tür metodolojilerin enerji optimizasyonu için oldukça uygun olduğu literatürde çeşitli çalışmalarda da vurgulanmıştır.

2.6. Enerji Verimliliği

Havacılık sanayinde enerji verimliliği, sadece ekonomik avantajlar sağlamamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar, enerji verimliliğini artırmaya yönelik stratejilerin, işleme parametrelerinin doğru seçimi ile güçlendirilebileceğini ortaya koymuştur [14]. Bu bağlamda, üretim süreçlerinin enerji tüketimini en aza indirgeyecek şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Özellikle düşük karbon salınımı hedefleri doğrultusunda, üretim süreçlerinin çevreci hale getirilmesi artık sektörel bir zorunluluk haline gelmiştir [16].

Bu tez çalışması, havacılık sanayinde kullanılan 6061 ve 6013 alüminyum alaşımlarının işleme parametrelerinin enerji tüketimine etkisini araştırarak, enerji verimliliği sağlama yollarını belirlemeyi amaçlamaktadır. Yapılan literatür taramaları, bu iki alaşımın işlenebilirliğinin enerji açısından değerlendirilmesinde özellikle 6013 için literatürdeki boşluğu dolduracak nitelikte bir çalışma ortaya koyma potansiyeli taşımaktadır.

3. METODOLOJİ

3.1. Deney Tasarımı

Deney tasarımı, bir süreci etkileyen faktörler/değişkenler ile bu sürecin çıktısı arasındaki ilişkiyi belirlemek için uygulanan sistematik bir istatistik yöntemidir. Deney tasarımında ilk adımda performansı ortaya koyacak kriterler faktörler tespit edilir. Böylece en iyi sonuçların bulunabileceği koşullar sağlanmış olur. Sonraki adımda bu faktörlerin performansını gösteren özelliklere bağlı etkilerin belirlenmesi ve sisteme en uyumlu kombinasyonunun tespit edilmesi yönünde sistemde kontrol dışı-kontrol edilmeyen faktörler de göz önüne alınarak deneyler gerçekleştirir. Gerçekleştirilen deneyler sonucuna bağlı olarak performans ölçütü dikkate alınarak en uygun optimum koşullar-olanaklar belirlenir. Deney tasarımı, girdi değişkenlerinin kontrollü varyasyonu ile süreç çıktıları üzerindeki etkilerin incelenmesine izin veren bir yöntemdir [8].

Bu çalışmada ise enerji tüketimini etkileyen temel işleme parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametrelerin enerji verimliliği üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi hedeflenmiştir. Bağımsız değişkenler her faktör için düşük ve yüksek olarak iki seviye belirlenmiştir. Faktörler (Bağımsız değişkenler) bunların seviyeleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Bağımsız Faktörler ve Değerleri

FAKTÖRLER (Bağımsız değişkenler)	DÜŞÜK SEVİYE DEĞERLERİ	YÜKSEK SEVİYE DEĞERLERİ
A: Yatay Mil Hızı	680 dev/dk	1300 dev/dk
B: Malzeme Türü (Al Alaşımı)	6061	6013
C: Takım Tipi	Z 12	Z 55
D: Kesme Derinliği	2 mm	4 mm

Amaç, bu faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkileşimlerini belirlemek ve optimum değerleri ortaya koymaktır.

3.2. Faktöriyel Deney Tasarımı

Faktöriyel tasarım, birden fazla faktörün aynı anda değerlendirilmesine olanak tanır. Bu çalışmada, dört faktörlü tam faktöriyel deney tasarımı kullanılmıştır. Tam faktöriyel tasarım, tüm olası faktör kombinasyonlarının değerlendirilmesine olanak tanıyan bir yaklaşımdır. Bu sayede faktörlerin hem ana etkileri hem de etkileşimleri detaylı olarak analiz edilebilmektedir. 2^p faktöriyel deneyler faktöriyel tasarımın özel halidir. Burada p faktör numarasını göstermektedir ve tüm parametrelerin 2 seviyesi vardır [9]. Bu çalışmada da her faktörün iki seviyesi bulunmaktadır. Faktör kombinasyon sayısı: $2^4 = 16$ 'dır. Her bir deney kombinasyonu üç kez tekrarlanarak, deneysel hataların minimize edilmesi sağlanmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Faktöriyel Deney Tasarımı

NO	A YATAY MİL HIZI (dev/dk)	B MALZEME (Al Alaşım)	C TAKIM TİPİ (Z değeri)	D KESME DERİNLİĞİ (mm)	Y TÜKETİLEN ANLIK ENERJİ BİRİMİ (Amper)
1	1300	6061	12	4	2.60
2	680	6013	12	4	2.30
3	1300	6061	55	4	3.00
4	1300	6013	55	2	2.65
5	680	6013	55	4	2.30
6	680	6061	12	2	2.30
7	1300	6013	12	2	2.80
8	680	6061	55	2	2.25
9	1300	6061	12	4	2.60
10	680	6013	12	4	2.30
11	1300	6061	55	4	3.00
12	1300	6013	55	2	2.60
13	680	6013	55	4	2.40
14	680	6061	12	2	2.30

15	1300	6013	12	2	2.80
16	680	6061	55	2	2.20
17	1300	6061	12	4	2.60
18	680	6013	12	4	2.30
19	1300	6061	55	4	3.00
20	1300	6013	55	2	2.70
21	680	6013	55	4	2.20
22	680	6061	12	2	2.30
23	1300	6013	12	2	2.80
24	680	6061	55	2	2.30

Deneyler Başkent Üniversitesi laboratuvarında Şekil 3.3'te görseli paylaşılan freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Universal tezgah tipi yatay ve dikey işleme yapabilmektedir. Kalıpcılık, hassas parça üretimi, genel imalat alanlarında kullanılmaktadır. Yüzey frezeleme, kanal açma, delik büyütme, yarık açma, kalıp hazırlama ve açılı işleme yapılabilir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de paylaşılan takım uçları kullanılarak 20*70*70 ölçülerindeki 6061 ve 6013 Al alaşımlara 2 mm ve 4 mm derinliğinde kanal açılımları yapılmıştır. Şekil 3.4'te kanal açılımı örneği bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Z12 Takım Tipi



Şekil 3.2. Z55 Takım Tipi

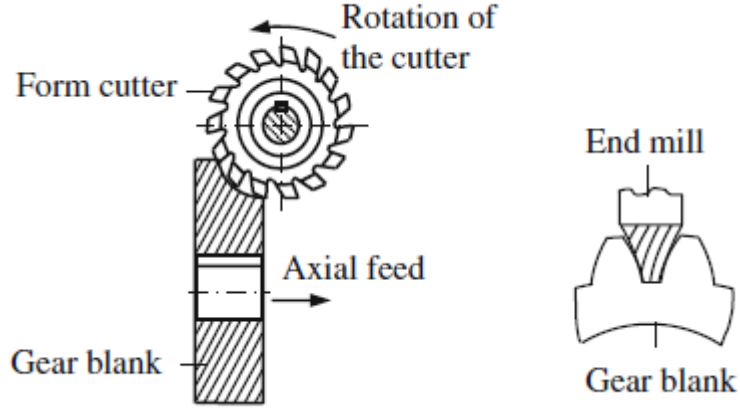


Şekil 3.3. Universal Kalıpcı Freze Tezgâhı



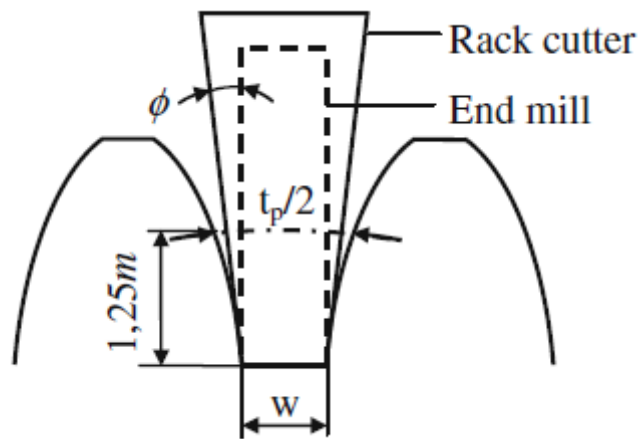
Şekil 3.4. Kanal Açılımı

Yapılan kesme işleminin şematik gösterimi Şekil 3.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.5. İşlemenin şematik gösterimi [17]

Talaş kaldırma operasyonunda No:2 (Z 12-13) ve No:7 (Z 55-134) modül freze çakıları kullanılmış olup, tez çalışmasında sırasıyla “12” ve “55” kodlarıyla anılacaktır. Her iki modül çakı için parmak freze çakısı eşlenikleri de farklılık göstereceğinden bu durum aşağıdaki Şekil 3.6'ya dayalı olarak formülize edilebilir [17].



Şekil 3.6. Uç Freze ve Modül Freze Çakısı Arasındaki İlişki [17]

$$w = \frac{\pi}{2}m - 2.5m \tan\emptyset \quad (1)$$

Burada m ve $\emptyset$ sırasıyla modül ve diş basınç açısıdır. Basınç açısı $\emptyset$, en her iki dişli için 20° dir. Dişlilerin modülleri (m=2 mm) Eş. 1'e yerleştirilir ve diş kanalının alt genişliği $w \cong 1.322$ mm olarak elde edilir [17].

Verilerin analizinde minitab yazılımının release 14 versiyonu kullanılmıştır. Faktörlerin ana etkileri ve etkileşim etkileri, regresyon analizi ve varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Faktörlerin enerji tüketimine olan etkileri grafiksel olarak da görselleştirilmiştir.

4. BULGULAR

4.1. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı bir değişken ile bir veya birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu analiz, özellikle mühendislik ve üretim süreçlerinde değişkenlerin çıktı üzerindeki etkilerini modellemek ve tahminlerde bulunmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında regresyon analizi, enerji tüketimini etkileyen işleme parametrelerinin (yatay mil hızı, kesme derinliği, takım tipi ve malzeme türü) enerji üzerindeki etkilerini sayısal olarak ifade etmek için uygulanmıştır.

Çok değişkenli regresyon modelleri, süreç parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki doğrudan etkilerini hesaplamanın yanı sıra, faktörler arası etkileşimleri de değerlendirme imkânı sunar. Minitab yazılımı kullanılarak elde edilen modelde, enerji tüketimi (Y) bağımlı değişken olarak ele alınmış ve A (mil hızı), B (malzeme), C (takım tipi), D (kesme derinliği) bağımsız değişken olarak tanımlanmıştır.

Çalışmada elde edilen regresyon denklemi, bağımsız değişkenlerin her bir birimlik değişiminin enerji tüketiminde ne kadar artış veya azalışa sebep olduğunu sayısal olarak ortaya

koymaktadır. Ayrıca bu model, enerji tüketimini minimize edecek parametre kombinasyonlarının belirlenmesinde temel araç olarak kullanılmıştır.

Regresyon analizleri özellikle deney tasarımı ve optimizasyon süreçlerinde temel analiz yöntemlerinden biridir. Literatürde yapılan birçok çalışmada da regresyon modelleri kullanılarak işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri modellenmiştir [18]. Örneğin, Kumar ve Patel'in çalışmasında, çoklu regresyon yöntemiyle kesme hızı ve ilerleme oranının enerji tüketimine olan etkisi incelenmiş ve anlamlı sonuçlar elde edilmiştir [12]. Zhang ve Wang tarafından yapılan çalışmada ise, havacılık uygulamalarında kullanılan alüminyum alaşımlarının sürdürülebilir işlenmesi için regresyon temelli modellerin oldukça etkili olduğu vurgulanmıştır [14].

Bu tez çalışmasında kullanılan regresyon analizi yöntemi, elde edilen deneysel verilerin değerlendirilmesi ve enerji tüketimini etkileyen en önemli parametrelerin belirlenmesi açısından kritik bir rol oynamıştır.

4.2. Kodlanmış Katsayılar

Kodlanmış Katsayılar, faktöriyel deney tasarımlarında faktörlerin standartlaştırılmış (-1 ve +1 gibi) seviyeleri ile regresyon analizi yapılmasına imkân sağlayan bir dönüşüm tekniğidir. Bu yöntem, faktörlerin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini daha kolay ve karşılaştırılabilir şekilde analiz edebilmek için kullanılmaktadır [19]. Faktöriyel deneylerde, faktör seviyeleri sabit değerlerden çok, ortalama etrafında normalize edilmiş kodlanmış değerlere dönüştürülür. Bu dönüşüm, regresyon katsayılarının yorumlanmasını kolaylaştırır ve etkilerin büyüklüğü hakkında doğrudan bilgi sunar [20].

Minitab tarafından elde edilen " Kodlanmış Katsayılar " tablosunda şu bilgiler yer almaktadır:

- Terimler: Regresyon modeline dâhil edilen değişkenler (ana etkiler: A, B, C, D ve etkileşim terimleri: AC, BC, C*D gibi)
- Etki: Her bir faktör veya etkileşimin bağımlı değişken (enerji tüketimi) üzerindeki etkisinin büyüklüğünü gösterir
- Katsayı: Regresyon modelinde faktörlerin katkısını belirleyen katsayılar

- Standart Hata: Katsayının doğruluğunu ve tahminin güvenilirliğini belirler
- T-Değeri: Katsayının istatistiksel anlamlılığını belirlemek için kullanılan t-istatistiğidir
- P- Değeri: Katsayının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirten olasılık değeridir. Genellikle 0.05'ten küçük P-değerleri anlamlı kabul edilir
- Varyans Artış Faktörü: Çoklu doğrusal bağlantı olup olmadığını test eder.

Bu çıktılar sayesinde, enerji tüketimini etkileyen en önemli parametreler belirlenebilir. Ayrıca, faktörlerin hem bireysel hem de etkileşimli olarak ne ölçüde enerji tüketimini etkilediği sayısal olarak yorumlanabilir. Kodlanmış katsayılar özellikle deney tasarımı ve regresyon analizinin birleşim noktası olup, optimizasyon çalışmaları için güçlü bir analiz tabanı sunmaktadır [21]. Tablo 4.1'de minitade elde edilen değerler verilmiştir.

Tablo 4.1. Kodlanmış Katsayılar

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		2.52500	0.00884	285.67	0.000	
A	0.47500	0.23750	0.00884	26.87	0.000	1.00
B	0.02500	0.01250	0.00884	1.41	0.176	1.00
C	0.05000	0.02500	0.00884	2.83	0.012	1.00
D	0.05000	0.02500	0.00884	2.83	0.012	1.00
A*C	0.07500	0.03750	0.00884	4.24	0.001	1.00
B*C	0.12500	0.06250	0.00884	7.07	0.000	1.00
C*D	0.15000	0.07500	0.00884	8.49	0.000	1.00

Sabit Terim = 2.525 modelin tüm faktörler en düşük seviyede enerji tüketilen tahmini başlangıç değeridir ve P = 0.000 olduğundan çok anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. A (Yatay Mil Hızı) = 0.2375 ve P = 0.000 olduğundan en büyük etkiye sahip olduğu ve yatay mil hızı arttığında enerji tüketiminin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. A*C (Yatay Mil Hızı *

Takım tipi) = 0.03750 ve $P = 0.001$ değerleri yatay mil hızı ve takım tipi birlikte anlamlı olduğunu ve değiştiğinde enerji tüketiminde önemli bir artış olmaktadır.

B (Alaşım Türü) = 0.01250 ve $P = 0.176$ olduğundan etkisinin çok küçük ve anlamsızdır. Alaşım türünün tek başına enerji tüketimi üzerinde önemli bir fark yaratmadığı anlaşılmaktadır. Ancak B*C (Alaşım Türü * Takım Tipi) = 0.12500 ve $P = 0.000$ olduğundan alaşım türünün tek başına anlamlı değilken, takım tipi ile birlikte enerji tüketimini etkilemektedir.

C (Takım tipi) ve D (Kesme Derinliği) = 0.02500 ve $P=0.012$ olduğundan kalınlık ve derinlik arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. C*D (Takım Tipi * Kesme Derinliği) = 0.07500 ve $P = 0.000$ değerleri elde edildiğinden takım tipi ve kesme derinliği birlikte arttığında enerji tüketimi en fazla etkilemektedir. En güçlü etkileşim C*D arasındadır.

Çoklu doğrusal regresyon analizlerinde kullanılan bir istatistiksel ölçümdür. Çoklu doğrusal regresyon, bağımsız değişkenlerin birbirleriyle olan çoklu doğrusal ilişkisinin şiddetini ölçer ve her bir bağımsız değişkenin modeldeki bağımlı değişkenin tahminindeki katkısını değerlendirmemize yardımcı olur. Çoklu doğrusal regresyon = 1: Bağımsız değişkenin diğer değişkenlerle hiçbir doğrusal ilişkisi yoktur, yani mükemmel bağımsızlık anlamına gelmektedir. Minitab'de de çoklu doğrusal regresyon değeri 1.00 olarak görünüyorsa, bu genellikle o faktörün diğer faktörlerle güçlü bir ilişkisinin olmadığını ve modelin istikrarlı olduğunu gösterir. Tabloda görüldüğü üzere Tüm çoklu doğrusal regresyon değerleri = 1.00 'dır. Bu da bağımsız değişkenlerin birbirleriyle fazla ilişkili olmadığını ve modelin güvenilir olduğunu gösterir.

4.3 Model Özeti

Model Özeti, regresyon analizinin genel geçerliliğini ve tahmin performansını değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir tablodur. Bu özet; S (Standart Hata), R^2 (Determination Coefficient), R^2_{adj} (Düzeltilmiş R^2) ve R^2_{pred} (Tahmin Edilmiş R^2) değerlerini içerir. Her bir değer modelin başarımını farklı bir açıdan ölçmektedir. S (Standart Hata): Tahmin edilen değerler ile gerçek gözlemler arasındaki ortalama hata miktarını temsil eder. S değeri ne kadar düşükse modelin tahminlerinin o kadar doğru olduğu anlaşılır. Örneğin, $S = 0.05$ değeri modelin tahminlerinin ortalama 0.05 birim hata içerdiğini gösterir. Bu da modelin yüksek doğrulukla tahmin yaptığını işaret eder [22]. R^2 (R-Kare): Modelin bağımlı değişkendeki (örneğin enerji tüketimi) toplam varyansın ne kadarını açıkladığını gösterir. $R^2 =$

0.90 ise, model tüm varyansın %90'ını açıklıyor demektir. Bu değer 1'e ne kadar yakınsa, modelin veri ile uyumu o kadar yüksektir [23]. R^2_{adj} (Düzeltilmiş R-Kare): R^2 'nin bağımsız değişken sayısına göre düzeltilmiş hâlidir. Regresyon modeline yeni bir değişken eklendiğinde R^2 değeri genellikle artar. Ancak bu değişkenin model performansına anlamlı bir katkısı yoksa, R^2_{adj} bunu dikkate alarak düşebilir. Bu nedenle R^2_{adj} , özellikle çok değişkenli modellerde modelin gerçek açıklayıcılığını daha iyi yansıtır [24]. R^2_{pred} (Tahmin Edilmiş R-Kare): Modelin yeni ve bağımsız veri setleri üzerindeki tahmin gücünü ölçer. R^2_{pred} değeri yüksekse, model yalnızca mevcut verilerde değil, aynı zamanda yeni veriler üzerinde de başarılı tahminler yapabilir. Bu değer, modelin genelleme kabiliyetini yansıttığı için özellikle önemli bir metriktir [25].

Bu özet istatistikler yardımıyla, kurulan regresyon modelinin doğruluğu, geçerliliği ve genellenebilirliği değerlendirilir. Eğer S düşük, R^2 , R^2_{adj} ve R^2_{pred} değerleri yüksekse, model güçlü ve güvenilir bir yapıdadır. Bu da işleme parametrelerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde yansıttığını gösterir. Minitab'de elde edilen model özet (model summary) Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Model Özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0433013	98.21%	97.43%	95.98%

S (Standart Hata) = 0.0433'tür. Modelin tahminlerindeki ortalama hata 0.0433 birimdir. Bu düşük değer, modelin tahminlerinin oldukça hassas olduğunu göstermektedir. R^2 (R-Kare, Determinasyon Katsayısı) = 98.21% 'dir. Bağımsız değişkenler (A, B, C, D ve etkileşimler), bağımlı değişkenin değişkenliğinin %98.21'ini açıklamaktadır. Oldukça yüksek bir değer, modelin veriye çok iyi uyum sağladığı anlaşılmaktadır. R^2_{adj} (Adj. R-Square, Düzeltilmiş R-Kare) = 97.43% bu da Modelin açıklayıcılığının %97.43 olduğu görülmektedir. R^2 değeri ile yakın olması, modelde gereksiz değişkenlerin olmadığını ve modelin dengeli olduğunu göstermektedir. R^2_{pred} (Pred R-Square, Tahmin Edilmiş R-Kare) = 95.98% 'dir. Modelin yeni veriler üzerinde nasıl performans göstereceğini ifade eder. %95.98 olması, modelin yeni veriler üzerinde de güçlü tahmin yeteneğine sahip olduğunu göstermektedir. Genel olarak Standart hata düşük, yani modelin tahminleri oldukça güvenilirdir. R^2 (R -Kare, Determinasyon Katsayısı), R^2_{adj} (Adj. R-Square, Düzeltilmiş R-Kare), R^2_{pred} (Pred R-Square, Tahmin Edilmiş R-Kare) değerleri birbirine çok yakın, bu da modelin dengeli ve genellenebilir olduğunu göstermektedir.

4.4. Regresyon Denklemi

Regresyon analizi sonucunda elde edilen regresyon denklemi, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini sayısal olarak ifade eden matematiksel bir modeldir. Bu denklem genel olarak şu şekilde yazılır: $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$ Burada Y bağımlı değişkeni, $X_1, X_2, \dots, X_n$ bağımsız değişkenleri, β_0 sabit terimi (intercept), $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ regresyon katsayıları ve ε hata terimini temsil eder. Denkleminde yer alan her bir β katsayısı, ilgili bağımsız değişkenin Y üzerindeki birim etkisini ifade eder. Katsayının pozitif veya negatif olması, ilişkinin yönünü belirler [26].

Bu tezde kullanılan regresyon denkleminde yer alan katsayılar, Minitab yazılımı ile analiz edilerek belirlenmiş ve enerji tüketimini etkileyen faktörlerin her biri için katkı oranları hesaplanmıştır. Örneğin, mil hızı katsayısı pozitifse, mil hızının artması enerji tüketimini artırıyor demektir. Benzer şekilde, negatif katsayılar, ilgili değişkenin enerji tüketimini azalttığını gösterir. Bu denklem yalnızca mevcut veri setinde değil, aynı zamanda uygun koşullarda yeni veri setleri için de enerji tüketimi tahmini yapılmasına imkân sunar. Bu yönüyle regresyon denklemi, deneysel çalışmalardan elde edilen bulguların genellenebilirliğini artıran ve sürecin matematiksel kontrolünü sağlayan önemli bir araçtır [27].

Bağımsız değişkenler A, B, C, D'nin bağımlı değişken üzerindeki etkisini görmek için minitab'dan elde edilen denlem Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Regresyon Denklemi

$Y = 2.525 + 0.2375 A + 0.0125 B + 0.025 C + 0.025 D + 0.0375 A * C + 0.0625 B * C + 0.075 C * D$

Sabit terim = 2.525 'tir. Bu da tüm değişkenler temel seviyedeyken (kodlanmış değerde sıfırken), enerji tüketiminin 2.525 A olduğu göstermektedir. Bir değişkenin değeri bir birim arttığında, enerji tüketiminde katsayı kadar değişim olmaktadır. A (Yatay Mil Hızı) = 0.2375 olması mil hızı arttıkça enerji tüketiminin de artacağı anlaşılmaktadır. B (Malzeme Türü (Al Alaşımı: 6061 veya 6013)) = 0.0125 alaşım türündeki değişimin daha az etkili olduğu hatta istatistiksel olarak anlamlı değildir. C (Takım Tipi) ve D (Kesme Derinliği) = 0.025 ikisi de arttıkça enerji tüketimi artmaktadır. A (Yatay Mil Hızı) * C (Takım tipi) etkileşimi = 0.0375 mil hızı ile takım tipi ile birlikte arttığında enerji tüketimi daha fazla artmaktadır. B (Malzeme Türü) * C (Takım tipi) etkileşimi = 0.0625 alaşım türü ile takım tipi birlikte enerji tüketimini

etkilemektedir. Alaşım türü tek başına etkili olmadığı ancak takım tipi ile beraber enerji tüketimini etkilediği gözlemlenmektedir. C (Takım Tipi)*D (Kesme Derinliği) etkileşimi = 0.075 Takım tipi ile kesme derinliği birlikte arttığında enerji tüketimi belirgin şekilde artıyor. En güçlü etkileşim C ve D arasında olduğu elde edilen denklemden de görülmektedir. En etkili faktörlerin mil hızı, takım tipi ve kesme derinliği olduğu görülmektedir.

4.5. Varyans Analizi

Varyans analizi (ANOVA), bir veya birden fazla bağımsız değişkenin (faktörlerin), bağımlı değişken üzerindeki etkisini istatistiksel olarak test etmek için kullanılan bir yöntemdir. Faktöriyel deney tasarımlarında faktörlerin ve bunların etkileşimlerinin anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla ANOVA temel bir analiz yöntemidir. Bu analiz, faktörlerin ana etkilerini ve etkileşim etkilerini ayrı ayrı incelemeye imkân tanır.

Faktöriyel tasarımdan elde edilen verilerin analizinde kullanılan ANOVA yöntemi, modelin genel anlamlılığını ve deney faktörlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini test eder. Bu çalışmada, 2⁴ faktöriyel deney tasarımına uygun şekilde elde edilen veriler Minitab yazılımı ile analiz edilmiştir. ANOVA tablosunda yer alan temel kavramlar şu şekildedir:

- Kaynak: Varyansa katkıda bulunan bileşenleri gösterir. Bu bileşenler genellikle model (ana etkiler ve etkileşimler) ve hata (residual/error) olarak ikiye ayrılır.
- Serbestlik Derecesi: Her kaynak için varyansı hesaplamakta kullanılan serbestlik derecesidir. Genellikle grup sayısı veya gözlem sayısına bağlıdır.
- Kareler Toplamı: Her kaynağın toplam varyansa katkısını sayısal olarak gösterir.
- Ortalama Kare: Ortalama kare değerinin, ilgili kaynağın serbestlik derecesine bölünmesiyle elde edilir.
- F-Value: Modelin, hata terimiyle karşılaştırıldığında ne kadar anlamlı olduğunu gösterir. Yüksek F değeri, ilgili faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisinin daha anlamlı olduğunu gösterir.
- P-Value: İlgili F değeri için anlamlılık testinin sonucunu gösterir. Genellikle $p < 0.05$ ise, bu sonuç istatistiksel olarak anlamlı kabul edilir.

Bu tez kapsamında yapılan varyans analizi, deney tasarımında kullanılan A (yatay mil hızı), B (malzeme türü), C (takım tipi) ve D (kesme derinliği) bağımsız değişkenlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin anlamlılığını test etmiştir. Analiz sonucunda elde edilen veriler Tablo 6'da verilmiştir. Eğer P-değeri 0.05'ten küçükse, bu durum ilgili faktörün enerji tüketimi

üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca, etkileşim terimlerinin (örneğin *AC* veya *BD*) P-değeri de bu kombinasyonların enerji tüketimi üzerinde anlamlı etkisi olup olmadığını gösterir. Böylece faktörlerin yalnızca tek başlarına değil, birlikte değerlendirildiklerinde de etkileri ortaya konmuş olur [28]. ANOVA analizi sonucunda elde edilen F ve P değerleri, bu tezde ele alınan modelin güvenilirliğini ve anlamlılığını göstermiş; elde edilen sonuçların bilimsel geçerliliğini desteklemiştir. ANOVA, deneysel sonuçların yorumlanması ve modelin istatistiksel olarak geçerliliğinin ortaya konması açısından önemli bir adımdır [29].

Tablo 4.4. Varyans Analizi

Source of Variation	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	1.65000	0.23571	125.71	0.000
Linear	4	1.38750	0.34688	185.00	0.000
A	1	1.35375	1.35375	722.00	0.000
B	1	0.00375	0.00375	2.00	0.176
C	1	0.01500	0.01500	8.00	0.012
D	1	0.01500	0.01500	8.00	0.012
2-Way Interactions	3	0.26250	0.08750	46.67	0.000
A*C	1	0.03375	0.03375	18.00	0.001
B*C	1	0.09375	0.09375	50.00	0.000
.C*D	1	0.13500	0.13500	72.00	0.000
Error	16	0.03000	0.00188		
Total	23	1.68000			

Tablo 4.4'te F-Value = 125.71 ve P-Value = 0 .000 modelin anlamlı olduğunu gösteriyor. Bu, bağımsız değişkenlerin (A, B, C, D ve etkileşimler) enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu anlamına gelmektedir. A (Yatay Mil Hızı): F-Value = 722.00, P-Value = 0.000 olduğundan yatay mil hızı (A), enerji tüketimi üzerinde çok güçlü bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. B (Alaşım Türü): F-Value = 2.00, P-Value = 0.176 olduğundan Alaşım türünün (B) enerji tüketimi üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur. P değeri 0.05'ten büyük olduğu için istatistiksel olarak anlamlı değildir. C (Takım tipi): F-Value = 8.00, P-Value = 0.012 olduğundan takım tipi (C) enerji tüketimi üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir. P değeri 0.05'ten küçük olduğu için istatistiksel olarak anlamlıdır. D (Kesme Derinliği): F-Value = 8.00, P-Value

= 0.012 olduğundan kesme derinliği (D) de enerji tüketimi üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir. Yine, p değeri 0.05'ten küçük olduğu için istatistiksel olarak anlamlıdır. A*C (Yatay Mil Hızı * Takım tipi):F-Value = 18.00, P-Value = 0.001 olduğundan bu etkileşim anlamlıdır. Yatay mil hızı ve takım tipi ile birlikte değişmesi enerji tüketimini etkileyen önemli bir faktördür. B*C (Alaşım Türü * Takım Tipi):F-Value = 50.00, P-Value = 0.000 olduğundan bu etkileşim de anlamlıdır ve alaşım türü ile takım tipi arasındaki etkileşim enerji tüketimi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. C*D (Takım Tipi * Kesme Derinliği): F-Value = 72.00, P-Value = 0.000 olduğundan bu etkileşim de çok anlamlıdır. Takım tipi ve kesme derinliği arasındaki etkileşim, enerji tüketimini önemli derecede etkiliyor. Hata Varyansı: Hata için F-değeri hesaplanmamış çünkü modelin etkisini gösteren ana terimler ve etkileşimlerin tümü anlamlıdır.

Sonuç olarak A (Yatay Mil Hızı), C (Takım Tipi), D (Kesme Derinliği) ve etkileşimler (A*C, B*C, C*D) enerji tüketimi üzerinde anlamlı etkilere sahiptir. B (Alaşım Türü) ise tek başına anlamlı bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmaktadır.

4.6. Grafikler

4.6.1. Eş yükseklik grafikleri

Faktöriyel deney tasarımı ile elde edilen verilerin analizinde regresyon ve ANOVA yöntemlerinden elde edilen sonuçlar, görselleştirme aşamasında genellikle eş yükseklik grafiği ile desteklenir. Eş yükseklik grafiği, üç değişken arasındaki ilişkiyi 2 boyutlu düzlemde gösteren, özellikle iki bağımsız değişkenin (X ve Z ekseninde yer alan) bağımlı değişken (Y) üzerindeki etkisini anlamak için kullanılan güçlü bir grafiksel analiz aracıdır [30].

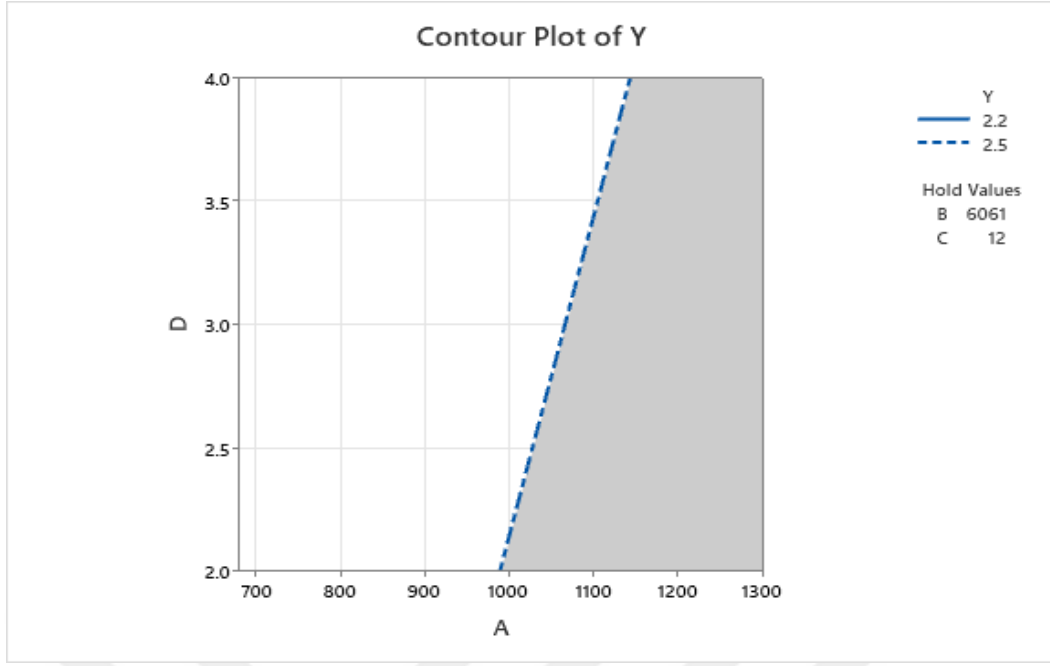
Bu grafik, yüzey grafiklerinin iz düşümü gibi düşünülebilir ve genellikle sabit Y değerlerine karşılık gelen eğrilerle (eş eğriler) ifade edilir. Enerji tüketiminin hangi parametre kombinasyonlarında düşük veya yüksek olduğunu gösteren eş yükseklik grafiği, deneysel sonuçların yorumlanmasını kolaylaştırmakta ve optimum parametrelerin görsel olarak belirlenmesini sağlamaktadır.

Eş Yükseklik Grafikleri Bileşenleri:

- Eş Eğriler: Grafikte aynı Y (enerji tüketimi) değerine sahip noktaları birleştiren eğrilerdir. Bu eğriler, bağımsız değişkenlerin kombinasyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkilerini gösterir.
- Renk Değişimleri: Eğer renkli grafik kullanılmışsa, renk geçişleri Y değerinin düşükten yükseğe nasıl değiştiğini temsil eder. Örneğin, mavi alanlar düşük enerji tüketimini, kırmızı alanlar ise yüksek enerji tüketimini gösterebilir.
- Eğim ve Yoğunluk: Eğrilerin birbirine yakın olduğu alanlarda, bağımlı değişken (Y) üzerinde hızlı bir değişim söz konusudur. Eğriler arası mesafe arttıkça, değişim hızı yavaşlar. Bu, hangi değişkenin daha baskın etkide bulunduğunun görsel bir göstergesidir [31].

Bu çalışmada oluşturulan eş yükseklik grafiklerinde, sabit tutulan iki faktör dışında kalan iki faktör X ve Z eksenlerine yerleştirilmiş, Y ekseninde ise enerji tüketimi değerleri gösterilmiştir. Bu sayede, örneğin sabit takım kalınlığı ve sabit malzeme tipi için farklı kesme derinliği ve mil hızı kombinasyonlarının enerji tüketimine etkisi analiz edilebilmiştir. eş yükseklik grafiklerinin yorumlanmasıyla birlikte, enerji tüketimini minimize eden parametre aralıkları görsel olarak tespit edilmiş, optimum bölgeler belirlenmiştir. Ayrıca, bu grafikler faktörler arası etkileşimin görsel temsili açısından da oldukça bilgilendirici olmuş ve regresyon analizinden elde edilen bulguların doğruluğunu desteklemiştir.

Değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri anlamak için güçlü bir araçtır. Minitab'de oluşturulan eş yükseklik grafikleri Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de, renk değişimleri grafikleri ise Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.



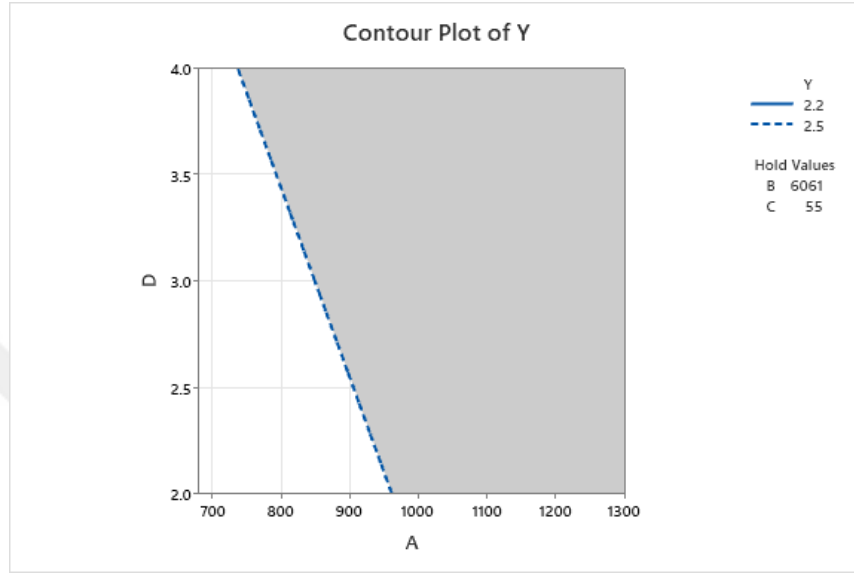
Şekil 4.1. Eş Yükseklik Grafikleri - 1

Tablo 4.5. Eş Yükseklik Grafikleri – 1 Değerleri

Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6013 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	Z12
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi):	2.2 ve 2.5 Amper eş yükseklik çizgileri

Tablo 4.5’te $Y=2.2$ ve $Y = 2.5$ seviyelerini temsil eden izotermeler, enerji tüketiminin hangi yatay mil hızı ve kesme derinliği kombinasyonlarında oluştuğunu gösterir. Y: tüketilen enerji değerinin artması, yatay mil hızı (A) ve kesme derinliği (D) faktörlerinin belirli bir aralıkta birlikte artmasıyla ilişkilidir. Yatay mil hızı (A) ve kesme derinliği (D) kombinasyonu, enerji tüketimini $Y=2.2$ gibi daha düşük seviyelere çektiği görülmektedir. Yatay mil hızı ve kesme derinliği arttıkça, enerji tüketiminin $Y=2.5$ seviyesine çıktığı görülmektedir. Daha düşük yatay

mil hızları (A) enerji tüketimini düşürmektedir. Kesme derinliği (D) sabit tutulduğunda, A'nın artışı Y'yi (enerji tüketimini) artırmaktadır. Verimli enerji kullanımı için $A < 1000$ dev/dk tercih edilmelidir (6061 Al alaşım ve 12 mm uç kullanıldığında).



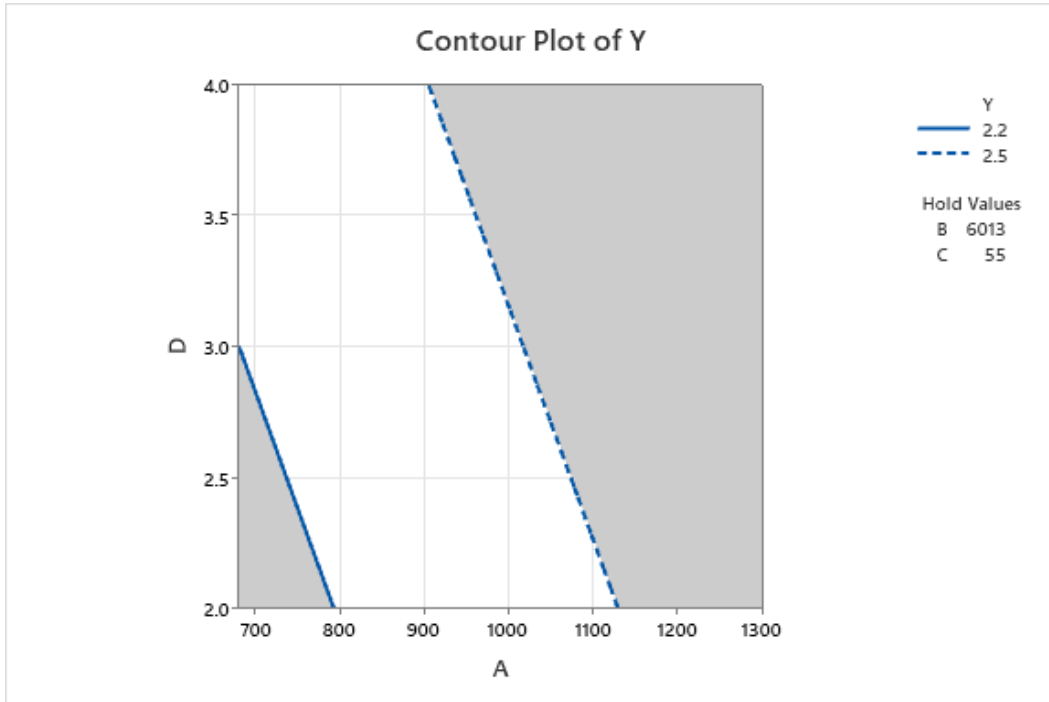
Şekil 4.2. Eş Yükseklik Grafikleri - 2

Tablo 4.6. Eş Yükseklik Grafikleri – 2 Değerleri

Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6061 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	55 mm
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi):	2.2 ve 2.5 Amper eş yükseklik çizgileri

Düşük yatay mil hızı ve düşük kesme derinliği değerlerinde enerji tüketimi $Y=2.2$ 'ye yaklaşırken, değerler arttıkça $Y=2.5$ 'e doğru yükselmektedir. Mavi kesikli çizgi, 900–1000 dev/dk arasında, yaklaşık olarak 2.2 amper tüketim sınırını göstermektedir. Daha düşük yatay mil hızı ($A<900$) ve düşük kesme derinliği ($D<3$), enerji tüketimini minimum seviyede tutmak için uygun görünmektedir. Düşük mil hızında bile enerji tüketimi yüksek çıkmakta, yani takım kalınlığı arttığında enerji tüketimi daha yüksek hale gelmektedir. Kontur çizgileri, eğimli bir şekilde yukarıdan sola doğru uzanmakta; bu da hem mil hızı hem de kesme derinliği arttıkça enerji tüketiminin yükseldiğini gösterir. Gri alan, analiz edilen enerji eşliğinin (2.5 amper) üzerinde kalan bölgelerdir. Takım tipi arttığında (55 mm), enerji tüketimi genel olarak yükselmekte ve bu durum hem mil hızına hem de kesme derinliğine daha duyarlı hale gelmektedir. Bu durum, daha büyük kesici uçların daha fazla güç gerektirdiğini ve bu nedenle enerji tüketimini artırdığını destekler niteliktedir.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 karşılaştırıldığında aynı malzeme türü (6061) kullanıldığında, yalnızca takım tipi değişmesiyle kontur eğrilerinin yataydan dikey yönler kaydığı görülmektedir. Buda takım tipinin enerji tüketiminde belirleyici bir faktör olduğunu açıkça göstermektedir.



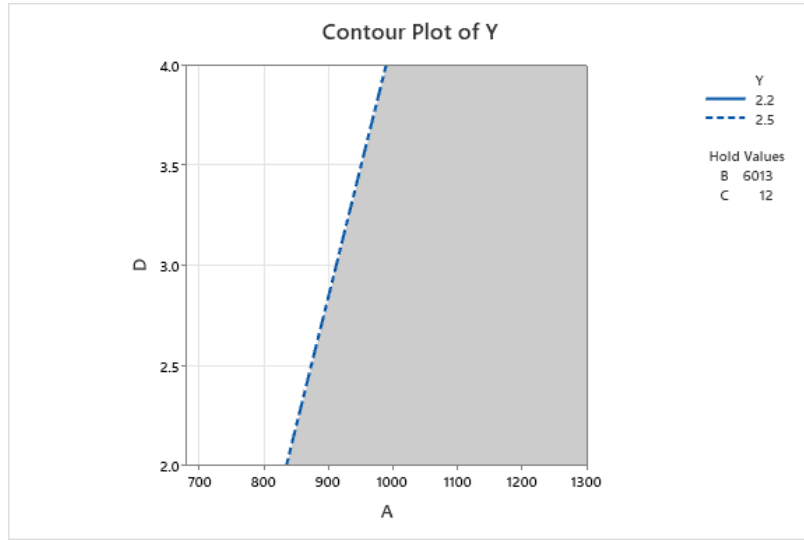
Şekil 4.3. Eş Yükseklik Grafikleri - 3

Tablo 4.7. Eş Yükseklik Grafikleri – 3 Değerleri

Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6013 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	Z55
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi):	2.2 ve 2.5 Amper eş yükseklik çizgileri

Düşük yatay mil hızı ve düşük kesme derinliği kombinasyonunda enerji tüketiminin $Y=2.2$ 'ye yakın olduğu görülmektedir. 2.2 amper sınırı yalnızca çok düşük mil hızlarında (700–750 dev/dk) ve düşük kesme derinliğinde (2–3 mm) elde edilebilmiştir. Daha yüksek yatay mil hızı ve düşük kesme derinliği enerji tüketimi 2.5 seviyesine yaklaşıyor. 2.5 amper çizgisi ise yaklaşık 1000 dev/dk seviyesine karşılık gelmektedir. Daha düşük yatay mil hızı ve düşük kesme derinliği, enerji tüketimini minimum seviyede tutmak için uygun görünmektedir. Gri alan yine enerji tüketiminin 2.5 amperin üzerine çıktığı bölgeyi göstermektedir.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'teki grafikler karşılaştırıldığında Şekil 4.3'teki grafikte 6061 kullanılırken, bu grafikte 6013 kullanılmış ve aynı takım kalınlığı (55 mm) sabit tutulmuştur. 6013 kullanıldığında enerji tüketimi daha erken yükselmekte ve düşük mil hızlarında bile tüketim 2.2 amper sınırını aşmaktadır. Bu da 6013'ün daha sert veya daha dirençli bir yapı göstermesiyle açıklanabilir. İşlenebilirlik açısından 6061'e göre daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4. Eş Yükseklik Grafikleri - 4

Tablo 4.8. Eş Yükseklik Grafikleri – 4 Değerleri

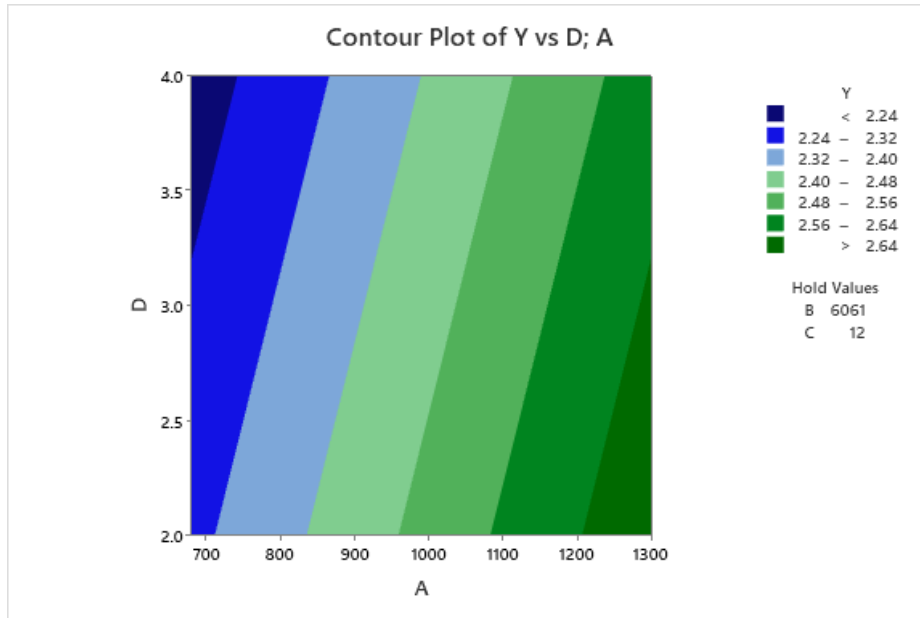
Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6013 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	Z12
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi):	2.2 ve 2.5 Amper eş yükseklik çizgileri

Mavi kesikli çizgi (2.5 amper sınırı), yaklaşık 950–1000 dev/dk aralığında yer almaktadır. Düşük kesme derinliklerinde 2.2 amper değeri gözlemlenebilirken, mil hızı arttıkça enerji tüketimi hızla yükselmektedir. Z12 takım tipi kullanımı, önceki grafikteki Z55 takım tipi ile karşılaştırıldığında enerji tüketimini belirgin şekilde azaltmaktadır. Gri alan yine sınırın üzerinde kalan enerji tüketimi bölgelerini temsil etmektedir.

Tablo 4.9. Eş Yükseklik Grafiklerinin Karşılaştırılması

Durum	Malzeme	Takım Tipi	Enerji Eğilimi	Verimli Hız (Yaklaşık)
Şekil 4.1	6061	12	En düşük tüketim	$\sim < 1000$ dev/dk
Şekil 4.2	6061	55	Orta seviye	$\sim 850\text{--}950$ dev/dk
Şekil 4.3	6013	55	En yüksek tüketim	$\sim < 750$ dev/dk
Şekil 4.4	6013	12	Orta seviye	$\sim < 950$ dev/dk

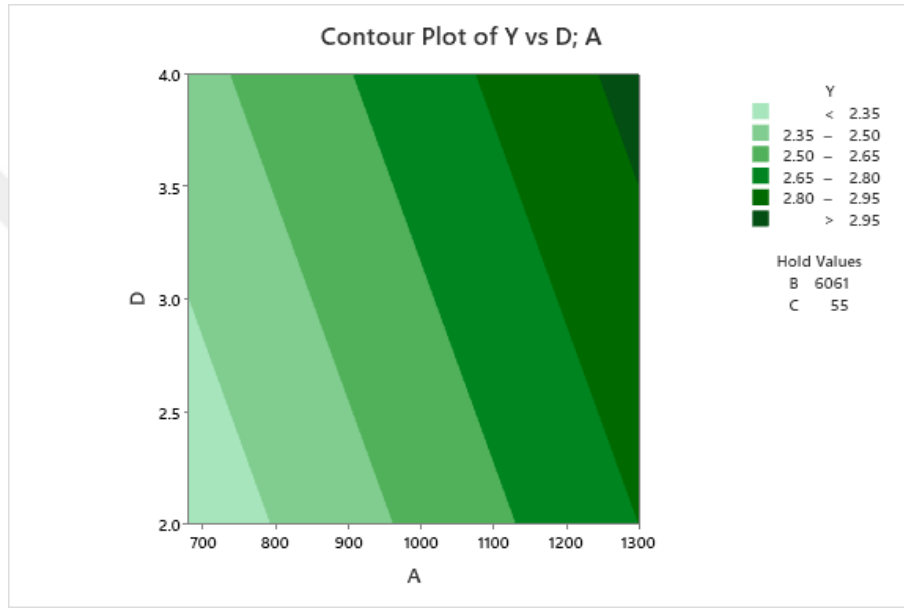
6013 alaşımı 6061'e göre daha fazla enerji tüketmektedir, bu durum hem $Z=12$ hem $Z=55$ takım tipi için geçerlidir. Ancak takım tipi $Z=12$ mm olduğunda, 6013 bile daha düşük mil hızlarında kontrollü enerji kullanımı sağlar. Yani malzeme türü ve takım tipi, enerji tüketimini birlikte şekillendiren anahtar faktörlerdir.

**Şekil 4.5.** Eş Yükseklik Grafikleri - 5

Tablo 4.10. Eş Yükseklik Grafikleri – 5 Değerleri

Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6061 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	Z12
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi)	2.24- 2.64 Amper eş
Renk Skalası (Enerji Aralıkları)	Değerler
Koyu Mavi	< 2.24 A
Açık Mavi	2.24 – 2.32 A
Açık Yeşil	2.32 – 2.48 A
Yeşil	2.48 – 2.56 A
Koyu Yeşil	2.56 – 2.64 A
Daha Koyu Yeşil	> 2.64 A

En düşük enerji tüketimi mavi alanda gözlemlenmektedir. Mil hızı 700–800 dev/dk ve kesme derinliği 2–3 mm aralığında elde edilmektedir. Mil hızı ve kesme derinliği arttıkça renkler yeşile, ardından koyu yeşile geçmektedir ve enerji tüketimi artmaktadır. Y ekseninde yukarı doğru gidildikçe mil hızının etkisi kesme derinliğine göre daha belirgin görünmektedir. A mil hızı arttıkça enerji tüketimi yükselmektedir. Optimum enerji tüketimi için mil hızı: 700–800 dev/dk ve kesme derinliği: 2–2.5 mm’dir.



Şekil 4.6. Eş Yükseklik Grafikleri - 6

Tablo 4.11. Eş Yükseklik Grafikleri – 6 Değerleri

Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6061 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	Z55
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi)	2.35 - 2.95 Amper

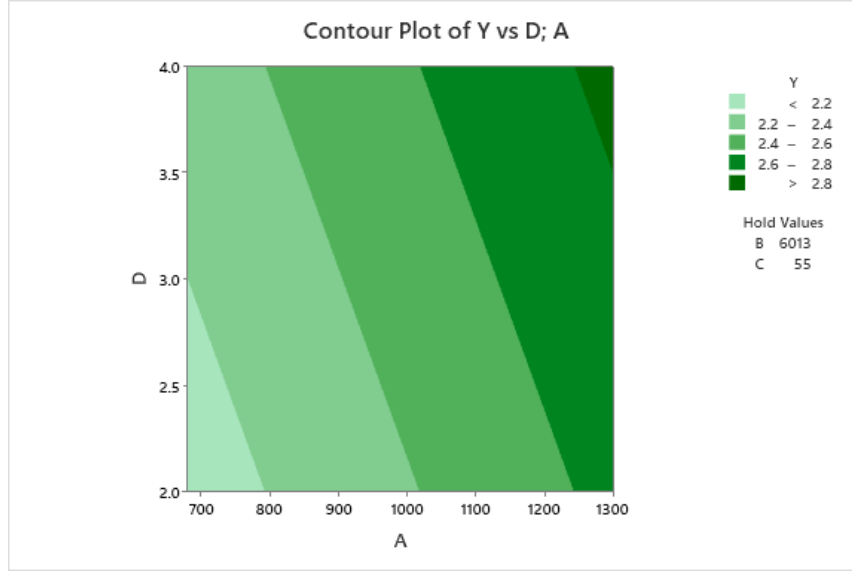
Renk Skalası (Enerji Aralıkları)	Değerler
Açık Yeşil	< 2.35 A
Yeşil Tonları	2.35 – 2.95 A
Koyu Yeşil	> 2.95 A

En düşük enerji tüketimi, mil hızı 700–800 dev/dk ve kesme derinliği 2 mm seviyesindedir. Enerji tüketimi, mil hızı arttıkça ve kesme derinliği yükseldikçe belirgin biçimde artmaktadır. Daha koyu yeşil alanlar, 1000 dev/dk ve üzeri hızlarda 2.95 A’yi aşan enerji tüketim değerlerini göstermektedir. Önceki grafikte (Z=12 takım tipi), en yüksek Y değeri > 2.64 A iken burada > 2.95 A seviyelerine çıkmaktadır. Bu da takım kalınlığının enerji artışına neden olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 4.12. 6061 Al Alaşım için 12 ve 55 Takım Tipi Karşılaştırılması

Özellik	Z12 Takım Tipi	Z55 Takım Tipi
Düşük Enerji Bölgesi	700–900 dev/dk, 2–2.5 mm	700–800 dev/dk, 2 mm
En Yüksek Y Değeri	> 2.64 A	> 2.95 A
Renk Gradyanı Eğilimi	Daha dengeli	Daha hızlı

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 karşılaştırıldığında takım tipindeki artış enerji artışını hızlandırmaktadır.



Şekil 4.7. Eş Yükseklik Grafikleri - 7

Tablo 4.13. Eş Yükseklik Grafikleri – 7 Değerleri

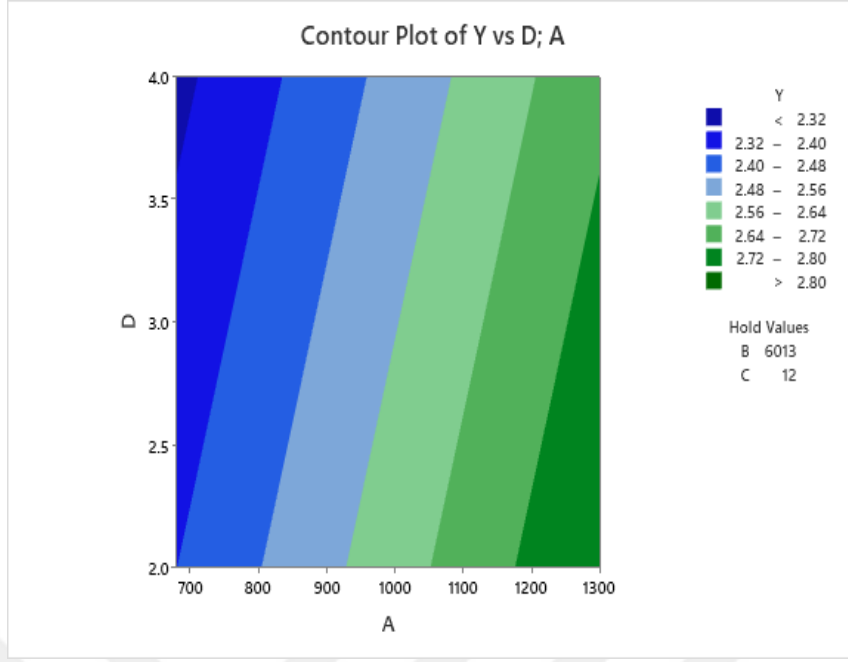
Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6013 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	55
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi)	2.35 - 2.95 Amper
Renk Skalası (Enerji Aralıkları)	Değerler
Açık Yeşil	< 2.2 A
Yeşil Tonları	2.2 – 2.8 A
Koyu Yeşil	> 2.8 A

En düşük enerji tüketimi 700 – 800 dev/dk mil hızında ve 2 – 2.5 mm kesme derinliğinde görülmektedir. Enerji tüketimi, hem mil hızı hem de kesme derinliği arttıkça belirgin şekilde yükselmektedir. En koyu yeşil alan, yaklaşık 1200 – 1300 dev/dk ve 3.5 – 4 mm derinlikte > 2.8 A seviyesine ulaşan tüketimi temsil etmektedir. Renk geçişi, enerji artış hızının yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.14. Takım Tipi (55) Sabitken Malzeme Türü Karşılaştırılması

Özellik	6061 Al Alaşım	6013 Al Alaşım
En düşük Y bölgesi	700–800 dev/dk	700–800 dev/dk
Maksimum Y değeri	> 2.95 A	> 2.8 A
Renk Gradyanı Eğilimi	Daha hızlı	Daha dengeli

Şekil 4.6 ve Şekil 4.8 karşılaştırıldığında takım tipi Z=55 sabitken 6061 Al alaşımının 6013 Al alaşımına göre daha fazla enerji tükettiği görülmektedir. Ancak mutlak enerji değeri 6013 Al alaşımı için de yüksek seviyelerdedir.



Şekil 4.8. Eş Yükseklik Grafikleri - 8

Tablo 4.15. Eş Yükseklik Grafikleri – 8 Değerleri

Sabit Faktörler	Değerler
B (Malzeme Türü)	6013 Alüminyum Alaşımı
C (Takım Tipi)	12
Değişken Faktörler	Değerler
A (Yatay Mil Hızı)	700–1300 dev/dk
D (Kesme Derinliği)	2–4 mm
Y (Enerji Tüketimi)	2.35 - 2.95 Amper
Renk Skalası (Enerji Aralıkları)	Değerler
Koyu Mavi	< 2.32 A
Açık Mavi → Yeşil	2.32 – 2.72 A
Koyu Yeşil	> 2.8 A

En düşük enerji tüketimi (koyu mavi), mil hızı 700–800 dev/dk ve kesme derinliği 2–2.5 mm aralığında gerçekleşmektedir. Enerji tüketimi, mil hızı arttıkça kademeli olarak artmakta, grafik yaklaşık düzgün eğimli renk geçişleri ile bu değişimi sunmaktadır. Daha düşük takım kalınlığına rağmen, 6013 malzemesi kullanıldığında enerji tüketimi belirgin şekilde artmaktadır.

Tablo 4.16. Malzeme Türü (6013 Al) Sabitken Takım Tipi Karşılaştırılması

Özellik	55	12
En düşük Y bölgesi	700–800 dev/dk	700–850 dev/dk
Maksimum Y değeri	> 2.8 A	> 2.8 A
Renk Gradyanı Eğilimi	Daha hızlı	Daha dengeli

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 karşılaştırıldığında takım kalınlığı azalsa bile 6013 Al alaşımının işlenirken enerji tüketiminin yüksek olduğu ve malzeme türünün enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili olduğunu anlaşılmaktadır.

4.6.2. Tüketilen enerji – y için ana etki grafiği

Y için Ana Etki Grafiği, faktöriyel deney tasarımlarında kullanılan önemli görselleştirme araçlarından biridir. Bu grafik, her bir bağımsız değişkenin (faktörün), bağımlı değişken (bu çalışmada tüketilen enerji - Y) üzerindeki ana etkisini analiz etmek için kullanılır. Grafik, faktörlerin farklı seviyelerinde Y'nin ortalama değerlerini gösteren çizgilerle oluşturulur ve etkilerin yönü ile büyüklüğü hakkında görsel bilgi sağlar [33].

Şekil 4.8’de elde edilen grafik, A (yatay mil hızı), B (malzeme türü), C (takım tipi) ve D (kesme derinliği) faktörlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini ayrı ayrı göstermektedir. Bu grafik, faktör seviyeleri değiştiğinde ortalama enerji tüketiminin nasıl değiştiğini gösterir.

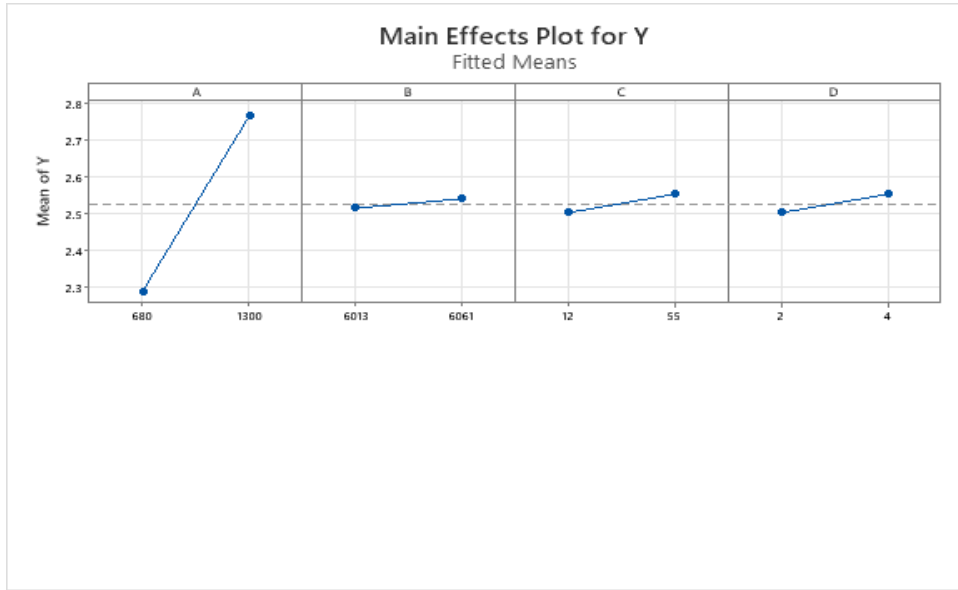
Grafik Yorumu:

- Faktör A (Yatay Mil Hızı): Grafikteki eğim en belirgin bu faktörde gözlemlenmiştir. Mil hızı arttıkça enerji tüketimi anlamlı düzeyde artmaktadır. Bu durum, mil hızının enerji tüketimi üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu gösterir.
- Faktör B (Malzeme Türü): 6061 ve 6013 alüminyum alaşımları arasında enerji tüketimi açısından çok büyük bir fark gözlenmemiştir. Bu nedenle bu faktörün ana etkisi sınırlı olabilir.
- Faktör C (Takım Tipi): Kalınlık arttıkça enerji tüketimi de artmakta olup bu da işleme direncinin artmasına bağlanabilir.
- Faktör D (Kesme Derinliği): Kesme derinliği arttıkça enerji tüketiminde gözle görülür bir artış gözlemlenmiştir.

Grafik Özellikleri:

- Y ekseninde ortalama enerji tüketimi (Y), X ekseninde her bir faktörün iki seviyesi (-1 ve +1) yer alır.
- Eğimli çizgiler etkili faktörleri, yataya yakın çizgiler ise etkisiz faktörleri gösterir.

Y için Ana Etki Grafiği, yalnızca hangi faktörlerin enerji tüketimi üzerinde etkili olduğunu göstermekle kalmaz, aynı zamanda bu etkinin yönünü de görsel olarak ortaya koyar. Bu yönüyle, faktöriyel deneylerde etkili değişkenlerin belirlenmesi ve model doğrulama süreçleri için kritik bir analiz aracıdır [34].



Şekil 4.9. Tüketilen Enerji – Y İçin Ana Etki Grafiği

Tablo 4.17. Tüketilen Enerji – Y İçin Ana Etki Grafiği Değerleri

Faktörler	Değerler
A: Yatay Mil Hızı	680 - 1300 dev/dk
B: Malzeme Türü	6013 - 6061
C: Takım Tipi	12 - 55
D: Kesme Derinliği	2 mm - 4 mm

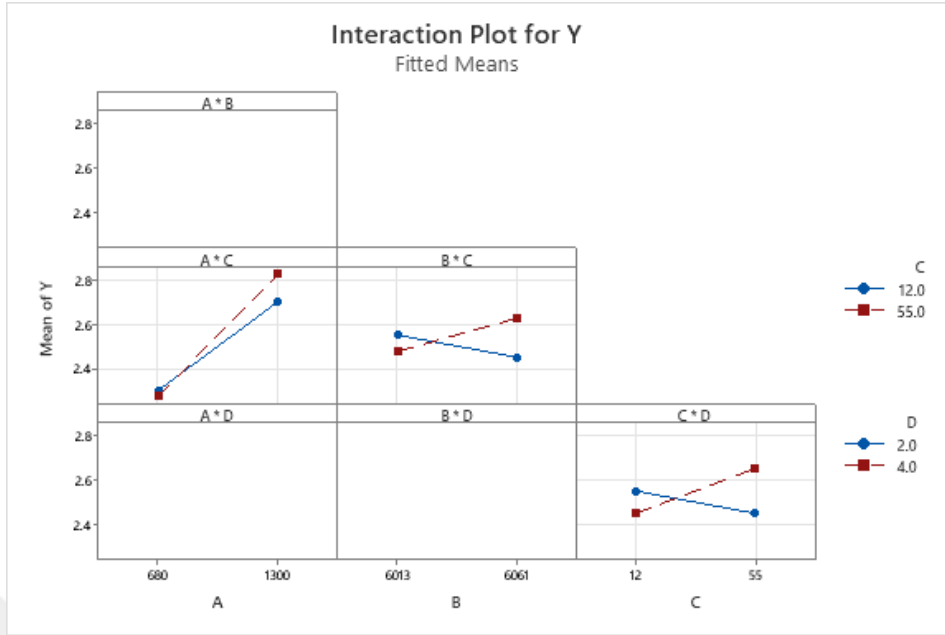
A (Yatay Mil Hızı): En etkili faktör olduğu görülmektedir. Mil hızı 680 dev/dk'dan 1300 dev/dk'ya çıktığında enerji tüketimi ortalama 2.3'ten 2.8 amper seviyesine çıkmaktadır. Bu büyük fark, mil hızının enerji tüketimi üzerindeki ana belirleyici olduğunu gösteriyor. B (Malzeme Türü): 6013'ten 6061'e geçildiğinde çok küçük bir artış görülmektedir. Etkisi oldukça sınırlı; grafik çizgisi neredeyse yatay yani tek başına anlamlı bir değişim yaratmamaktadır. C (Takım Tipi: 12'den 55'ye geçildiğinde küçük fakat belirgin bir artış olmaktadır. Kalın takım ucu daha fazla enerji tüketmektedir. Çünkü kesme kuvveti artmaktadır. D (Kesme Derinliği): 2 mm'den 4 mm'ye geçildiğinde yine az bir artış gözlenmektedir. Derin kesme, daha fazla direnç yaratmaktadır. Bu da daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır.

Sonuç olarak en etkili faktör: A – yatay mil hızıdır. Diğer tüm faktörler (B, C, D), daha az etkiye sahip ama yine de enerji tüketimi üzerinde etkileri vardır.

4.6.3 Tüketilen enerji – y için etkileşim grafiği

Y için Etkileşim Grafiği, faktöriyel deney tasarımlarında faktörler arası etkileşimleri görselleştirmek için kullanılan istatistiksel bir analiz aracıdır. Bu grafik, iki veya daha fazla faktörün birlikte değiştiğinde bağımlı değişken (Y) üzerindeki etkisini nasıl değiştirdiğini görsel olarak ortaya koyar [35].

Bu çalışmada, enerji tüketimi üzerindeki etkileşimlerin belirlenebilmesi amacıyla Minitab yazılımı kullanılarak " Y için Etkileşim Grafiği " oluşturulmuştur. Elde edilen grafik Şekil 14'te sunulmuştur. Grafik, A (mil hızı), B (malzeme türü), C (takım tipi) ve D (kesme derinliği) faktörlerinin ikili kombinasyonlarını analiz ederek, bu faktörlerin birlikte enerji tüketimini nasıl etkilediğini ortaya koymuştur.



Şekil 4.10. Tüketilen Enerji – Y İçin Etkileşim Grafiği

Paralel Çizgiler: Eğer iki faktörün grafikteki çizgileri paralel ise, bu iki faktör arasında etkileşim olmadığı veya çok zayıf olduğu anlamına gelir. Bu durumda her bir faktör bağımsız olarak etki göstermektedir. **Yaklaşan veya Uzaklaşan Çizgiler:** Çizgiler birbirine yaklaşıyor veya uzaklaşıyorsa, bu durum orta düzeyde bir etkileşim olduğunu gösterir. Faktörlerden birinin etkisi, diğer faktörün seviyesine bağlı olarak değişmektedir. **Kesişen Çizgiler:** Eğer iki çizgi kesişiyorsa, bu faktörler arasında güçlü bir etkileşim olduğu anlamına gelir. Yani bir faktörün etkisi, diğer faktörün seviyesine göre büyük ölçüde değişmektedir. Bu tür kesişmeler etkileşimin anlamlı olduğunu gösterir [36]. Y için etkileşim grafikleri, ANOVA ve regresyon analizlerinden elde edilen nicel sonuçların görsel doğrulamasını sağlar. Faktörlerin sadece bireysel etkilerini değil, birlikte gösterdikleri etkileşimi de değerlendirerek daha güçlü bir modelleme yapılmasına olanak tanır. Bu yönüyle, deneysel verilerin çok boyutlu analizinde temel grafik araçlarından biridir.

A * B (Mil Hızı * Malzeme Türü) etkileşim gözlemlenmiyor. A * C (Mil Hızı * Takım Tipi) keskin eğim farkı, güçlü bir etkileşim olduğunu göstermektedir. Mil hızı arttıkça, takım tipi etkisi belirginleşmektedir. Kalın takım ucu (55 mm), özellikle yüksek mil hızında enerji tüketimini çok arttırmaktadır. B * C (Malzeme Türü * Takım Tipi) Hafif bir eğim değişimi var, yani orta düzeyde bir etkileşim olmaktadır. Alaşım Türü değiştiğinde takım tipi bağlı olarak enerji tüketiminde farklılıklar oluşmaktadır. 6013 Al alaşım kalın takım ucuyla işlendiğinde daha fazla enerji tüketmektedir. A * D (Mil Hızı * Kesme Derinliği) etkileşim gözlemlenmiyor.

B * D (Malzeme Türü * Kesme Derinliği) etkileşim gözlemlenmiyor. C * D (Takım Tipi * Kesme Derinliği) Eğrilerin kesişmeye yakın olması, anlamlı bir etkileşim olduğunu göstermektedir. Kalın takım ucu ve yüksek kesme derinliği bir araya gelince enerji tüketimi ciddi oranda artmaktadır. En Etkili Etkileşimler: A * C (Mil Hızı * Takım Tipi) Ve C * D (Takım Tipi * Kesme Derinliği)'dir.

Sonuçta takım kalınlığı hem mil hızı hem de kesme derinliği ile birlikte düşünüldüğünde enerji tüketimini ciddi şekilde etkilemektedir.

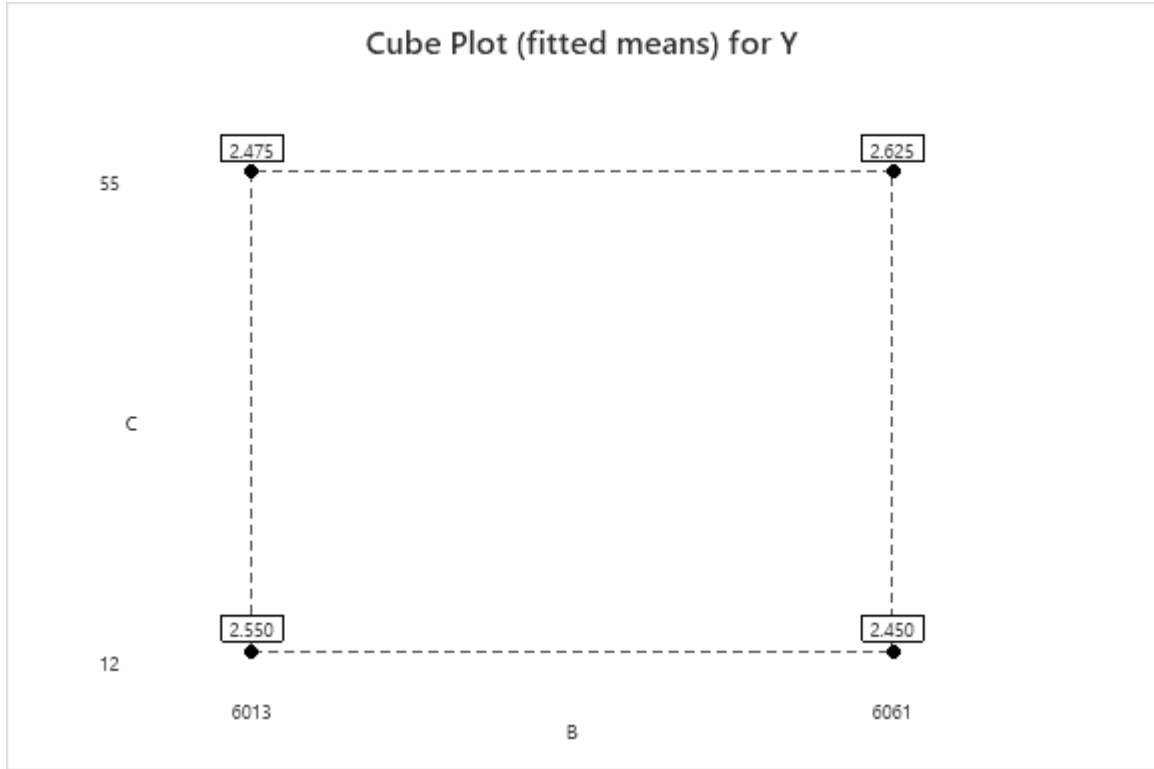
4.6.4 Küp grafiği analizi

Küp Grafiği, faktöriyel deney tasarımlarında bağımlı değişkenin (Y) nasıl değiştiğini görselleştirmek için kullanılan etkili bir grafik türüdür. Bu grafik, iki veya daha fazla faktörün belirli seviyelerde nasıl bir etkileşim oluşturduğunu ve bu etkileşimin bağımlı değişken üzerindeki etkisini anlamak için kullanılır [37].Küp grafiği, bir küp şeklinde düzenlenen kombinasyonlar aracılığıyla faktör seviyelerine göre ortalama Y (enerji tüketimi) değerlerini gösterir. Bu grafik, faktör kombinasyonlarının görsel olarak karşılaştırılmasına imkân tanır ve özellikle optimum kombinasyonları belirlemek açısından oldukça değerlidir.

Bu tez kapsamında, Minitab yazılımı kullanılarak oluşturulan Küp grafiği Şekil 15'te verilmiştir. Şekilde, enerji tüketiminin farklı faktör seviyelerine göre nasıl değiştiği gösterilmiş ve belirli faktör çiftlerinin (örneğin malzeme türü ve takım kalınlığı) etkileşimi görselleştirilmiştir.

Küp köşelerinde yer alan her nokta, iki faktör seviyesinin belirli bir kombinasyonuna karşılık gelir. Bu köşelerde yer alan enerji tüketimi değerleri (Y), hangi kombinasyonun daha düşük veya daha yüksek enerji gerektirdiğini ortaya koyar. Örneğin, 6013 malzeme ile Z12 takım tipi kullanıldığında enerji tüketimi daha düşükken, 6061 ve Z55 kombinasyonu daha yüksek tüketim göstermektedir.

Küp grafikleri sayesinde faktörler arası etkileşimlerin hangi kombinasyonlarda enerji tüketimini artırdığı veya azalttığı açıkça görülebilmektedir. Ayrıca bu grafikler, elde edilen deneysel sonuçların doğrulanmasında ve tasarım optimizasyonu sürecinde rehber olarak kullanılmaktadır [38].



Şekil 4.11. Küp Grafiği - 1

Tablo 4.18. Küp Grafiği-1 Değerleri

Faktörler	Değerler
B: Malzeme Türü	6013 - 6061
C: Takım Ucu Tipi	12 - 55

Tablo 4.19. Malzeme Türü ve Takım Tipinin Enerji Tüketimine Etkisi

Malzeme Türü (B)	Takım tipi (C)	Ortalama Enerji Tüketimi için Akım Değeri (Y)	Enerji tüketim değeri (kWh)
6013	12	2.550 A	0.561
6013	55	2.475 A	0.545
6061	12	2.450 A	0.539
6061	55	2.625A	0.576

Tablo 4.19'daki veriler için Enerji tüketim değerleri hesaplanmış olup bir örnek hesaplama aşağıda detaylandırılmıştır:

- Akım (I) = 2.550 Amper
- Gerilim (V) = 220 Volt

Güç formülü:

$$P = V \times I = 220 \text{ V} \times 2.550 \text{ A} = 561 \text{ Watt}$$

Bu, tezgahın anlık güç tüketimidir (Watt cinsinden). Eğer bu cihazın ne kadar süre çalıştığını da biliyorsak, enerji tüketimini (kWh cinsinden) şu şekilde bulabiliriz:

$$\text{Enerji (kWh)} = (P \times t) / 1000$$

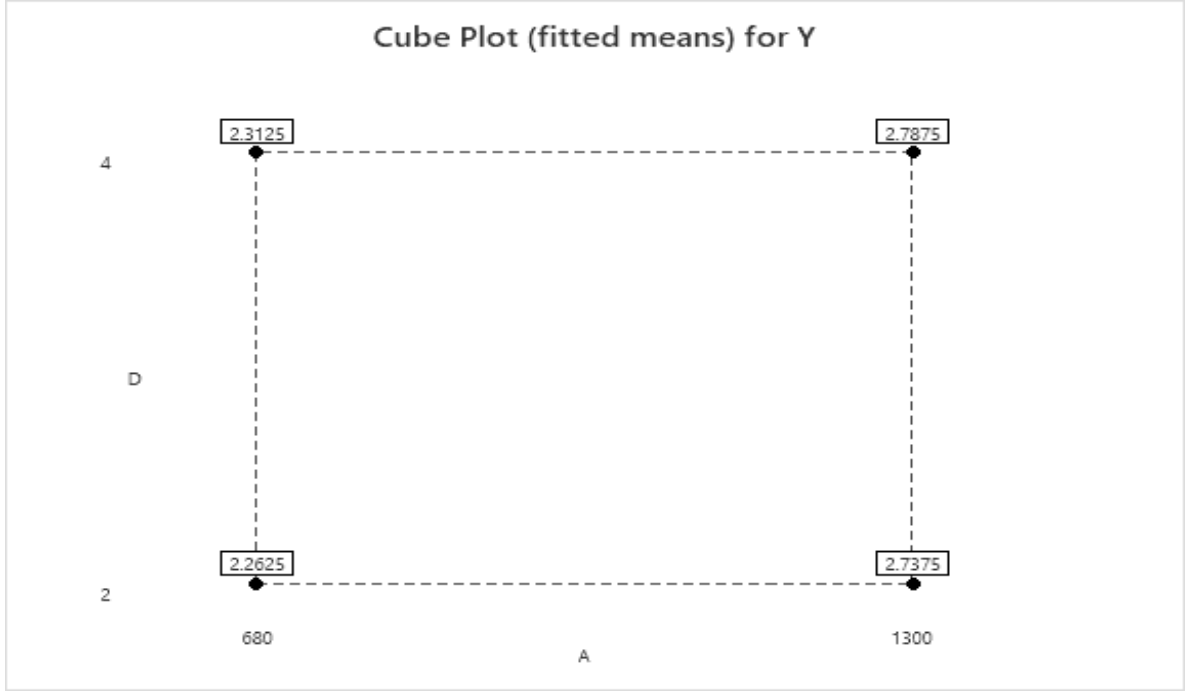
Örneğin tezgah 1 saat çalıştıysa:

$$\text{Enerji} = (561 \times 1) / 1000 = 0.561 \text{ kWh.}$$

Yani bu cihaz 1 saat çalıştığında 0.561 kilowatt-saat enerji tüketir.

B (Malzeme Türü) Değişimi (6013 → 6061) takım tipi kalınlığı arttığında 6061 Al kullanıldığında enerji tüketiminin arttığı görülmektedir. Takım tipi kalınlığı arttığında 6013 Al kullanıldığında ise tam tersi enerji tüketiminin azaldığı görülmektedir. Bu durum faktörler arası

bir etkileşime olduğunu göstermektedir. C (Takım Tipi) değişimi (12 → 55) enerji tüketimi üzerindeki etkisi malzeme türüne göre değişmektedir. Malzeme türü ile takım kalınlığı arasında anlamlı bir etkileşim olabileceğini görülmektedir.



Şekil 4.12. Küp Grafiği-2

Tablo 4.20. Küp Grafiği – 2 Değerleri

Faktörler	Değerler
A: Yatay Mil Hızı	680 - 1300 dev/dk
D: Kesme Derinliği	2 mm - 4 mm

Tablo 4.21. Yatay Mil Hızı ve Kesme Derinliğinin Enerji Tüketimine Etkisi

Yatay Mil Hızı (A)	Kesme Derinliği (D)	Ortalama Enerji Tüketimi için Akım Değeri (Y)	Enerji tüketim değeri (kWh)
680	2 mm	2.2625 A	0.498
680	4 mm	2.3125 A	0.509
1300	2 mm	2.7375 A	0.602
1300	4 mm	2.7875	0.613

Hem mil hızı hem de kesme derinliği arttıkça enerji tüketimi de paralel şekilde artmaktadır. İki faktör de enerji tüketimi üzerinde etkili olmakla birlikte, özellikle mil hızındaki artış 0.45 A'lık bir artışa neden olmaktadır. Kesme derinliği arttıkça enerji tüketiminde hafif bir artış olmaktadır. En düşük enerji tüketimi, düşük mil hızı (680) ve düşük kesme derinliği (2 mm) olduğunda görülmektedir. En yüksek tüketimi ise yüksek mil hızı (1300) ve yüksek kesme derinliği (4 mm) olduğunda görülmektedir.

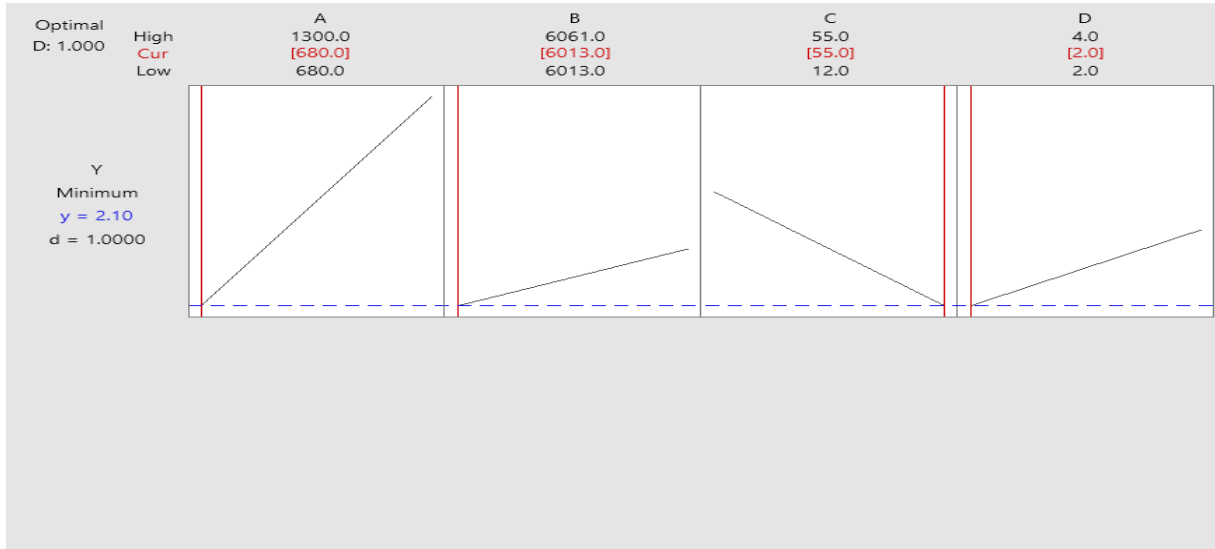
4.6.5. Yanıt optimizasyonu grafiği

Yanıt optimizasyonu grafiği, bir sürecin ya da sistemin istenen hedefe ulaşmasını sağlayacak en uygun parametre kombinasyonunu belirlemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir araçtır. Bu grafik, bağımsız değişkenlerin (girdilerin) bağımlı değişken (çıktı) üzerindeki etkilerini görselleştirerek optimum noktanın belirlenmesini sağlar [39].

Bu tez kapsamında oluşturulan yanıt optimizasyonu Grafiği, enerji tüketimini minimuma indirmek için en uygun frezeleme parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Grafik üzerinden, belirli faktör seviyelerinde enerji tüketiminin nasıl değiştiği ve bu değişkenlerin optimum noktadaki duyarlılığı gözlemlenmiştir. Grafik Bileşenleri:

- X Eksen: Bağımsız değişkenleri (yatay mil hızı, takım tipi kalınlığı, kesme derinliği, malzeme türü) gösterir.
- Y Eksen: Bağımlı değişken olan enerji tüketimini temsil eder.
- Siyah Çizgiler: Her bir değişkenin enerji tüketimi üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu çizgilerin eğimi, etkili olup olmadığını belirler.
- Kırmızı Dikey Çizgiler: Faktörlerin alt ve üst limitlerini ve çalışma aralıklarını gösterir.
- Mavi Noktalı Çizgi: İlgili faktör için enerji tüketimini minimuma indiren optimum değeri temsil eder.
- D Katsayısı: Optimum çözümün güvenilirliğini ifade eder. 1'e yakınsa optimum nokta güvenilir. Bu çalışmada d katsayısı 1'e oldukça yakın olup, önerilen parametre kombinasyonunun güvenilir olduğunu göstermektedir.

Yanıt Optimizasyonu Grafiği, çoklu faktörlerin etkilerini aynı anda analiz etme ve en uygun kombinasyonu belirleme açısından etkili bir analiz yöntemidir. Deney sonuçlarına dayalı bu grafiksel analiz, üretim sürecinde minimum enerji tüketimi hedefi doğrultusunda karar verme sürecine katkı sağlamaktadır [40].



Şekil 4.13. Yanıt Optimizasyonu Grafiği

Tablo 4.22. Yanıt Optimizasyonu Grafiği Değerleri

Değişkenler	Değerler
A: Yatay Mil Hızı	680 - 1300 dev/dk
B: Malzeme Türü	6013 - 6061
C: Takım Tipi	Z12 - Z55
D: Kesme Derinliği	2 mm - 4 mm
Minimum Enerji Tüketimi (Y)	2.10 A
Optimum Değer	D = 1.0000

Grafikte B=6061'den B=6013'e geçişin enerji tüketimini azaltma eğiliminde olduğunu görülmektedir. Bu, 6061 alaşımının daha kolay işlenebilir olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, kesme hızına bağlı olarak enerji tüketiminde farklı değişimler olabilir. Takım Tipi (C:12 → 55) Değişimi Grafikte bu değişimin enerji tüketimini düşürdüğünü görüyoruz. Bunun nedeni, daha kalın takım uçlarının kesme sırasında daha stabil olması ve kesme direncini azaltması olabilir. Ancak, aşırı kalınlık belirli hızlarda ek yük getirebilir. Kesme hızı arttıkça enerji tüketimi arttığı görülmektedir. Bu daha yüksek hızlarda daha fazla sürtünme ve kesme kuvveti oluşmasından kaynaklanabilir. Kesme derinliği arttığında da (D: 2 mm → 4 mm), enerji tüketimi artış eğilimindedir. Bu da beklenen bir durum, çünkü daha derin kesimler daha fazla malzeme kaldırılmasını gerektirdiğinden daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu verilere göre, en düşük enerji tüketimi için şu parametreler uygun olabilir: Malzeme: 6013, takım kalınlığı kalınlığı: 55 mm, düşük kesme hızı: 680 mm/dk (yüksek hız yerine düşük hız enerji açısından avantajlı olabilir), düşük kesme derinliği: 2 mm ve optimum noktada enerji tüketimi minimum 2.10 birim seviyesindedir. Buna göre harcanan enerji 2.1 A akım değeri için 0.462 kWh olarak bulunur.

5. DOĞRULAMA DENEYİ

Belirlenen optimum parametreler doğrultusunda üç adet deney yapılmıştır. Elde edilen deneysel değerler ile faktöriyel deney tasarımı sonucunda Minitab tarafından tahmin edilen değerler karşılaştırılmış ve hata oranları hesaplanmıştır. Sonuçlar aşağıdaki tabloda sunulmuştur:

Tablo 5.1. Doğrulama Deneyi ve Tahmin Karşılaştırması

Deney No	Optimal Değerler	Yanıt Türü	Deneysel Değer	Tahmin Değeri	Hata (%)
1	680 dev/dk , 6013, Z55, 2 mm	Amper	2.00 A	2.10 A	4.76 %
2	680 dev/dk, 6013, Z55, 2 mm	Amper	2.40 A	2.10 A	14.29 %
3	680 dev/dk, 6013, Z55, 2 mm	Amper	2.70 A	2.10 A	28.57 %
4	ORTALAMA	Amper	2.367A	2.10A	12.71%

Tablo 5.1’de verilen sonuçlara göre ortalama hata oranı literatürde kabul edilen %20’lik sınırın altında kalmıştır. Bu da modelin güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Üçüncü deneydeki hata oranının yüksek olmasının sebebi çevresel değişkenlik, takım aşınması veya ölçüm toleransları gibi etkenlerden kaynaklanabilir. Genel olarak, doğrulama deneyleri sonucunda faktöriyel tasarım ile elde edilen optimum parametrelerin enerji verimliliğini artırma açısından başarılı sonuçlar verdiği teyit edilmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılan 6061 ve 6013 alüminyum alaşımlarının işlenmesi sırasında kullanılan çeşitli parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dört faktörlü tam faktöriyel deney tasarımı yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmada; yatay mil hızı, malzeme türü, takım tipi kalınlığı ve kesme derinliği bağımsız değişkenler olarak belirlenmiştir.

Deneysel verilerin analizinde ANOVA ve regresyon analizi yöntemleri kullanılmış, ayrıca eş yükseklik ve küp grafiklerinden yararlanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular; Regresyon analizinden elde edilen modelin R^2 değeri = %98.21, $\text{adj } R^2$ = %97.43 ve predictive R^2 %95.98 olarak belirlenmiş olup, modelin yüksek güvenilirliğe sahip olduğu görülmüştür. Yatay mil hızı (A), enerji tüketimi üzerinde en yüksek etkiye sahip parametre olarak belirlenmiştir ($p = 0.000$). Takım tipi (C) ve kesme derinliği (D) de enerji tüketimini anlamlı derecede etkileyen faktörlerdir ($p = 0.012$). Malzeme türü (B) tek başına anlamlı bulunmamıştır ($p = 0.176$), ancak diğer faktörlerle etkileşime girdiğinde önemli etkiler oluşturmuştur. A * C, B * C ve C * D etkileşimleri anlamlı bulunmuştur, bu da parametrelerin birlikte ele alınmasının enerji verimliliği açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Enerji tüketimini minimize etmek için düşük mil hızı ve düşük kesme derinliği tercih edilmelidir. Ancak üretim sürecindeki zaman ve yüzey kalitesi gereksinimleri de göz önünde bulundurularak bu parametrelerin dengelenmesi gerekmektedir. Elde edilen bulgulara göre; düşük hızda işleme (680 dev/dk), daha ince takım tipi (55) ve daha düşük kesme derinliği (2 mm) kullanımı enerji tüketimini azaltmada etkili olmuştur. Ancak yüzey kalitesi gibi performans kriterleri de göz önünde bulundurularak çoklu optimizasyon çalışmaları önerilmektedir.

Faktöriyel tasarım yöntemiyle elde edilen tahmin değeri ile doğrulama deneyi sonucunda elde edilen test sonuçlarının karşılaştırması Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Tahmin edilen değer ile deneysel değer birbirine oldukça yakındır. Literatürde, istatistiksel analizlerin güvenilir kabul edilebilmesi için hata değerlerinin %20’nin altında olması gerektiği vurgulanmaktadır [41]. Enerji tüketimi değerleri için yapılan karşılaştırma sonucunda, test sonuçları ile faktöriyel tasarım yöntemiyle elde edilen değerler arasındaki fark önemsiz düzeydedir. Sonuç olarak, başarılı optimizasyon sonuçları deneysel verilerle doğrulanmıştır. Gelecekte takım malzemesi, soğutma tipi gibi faktörler de eklenerek çalışma geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Serkan Şahin, “Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması”, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2005
- [2] Bodunrin M.O., Alaneme K.K. and Chown L.H., “Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics”, J. Mater. Res. Technol. 4(4):434-445, (2015).
- [3] C. Lee, D. Kim , "Energy Efficiency in Turning of 6013 Aluminum Alloys" , International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- [4] Smith, J., & Johnson, R. (2023). Energy Efficiency in Modern Aerospace Manufacturing. Journal of Aerospace Engineering, 35(2), 145-159.
- [5] Yurdakul, M., Özbay, O., & İç, Y. T. (2002). Havacılık Alanında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Seçimi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(2).
- [6] Şahin, S. (2005). Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması. Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [7] Kumar, P., & Singh, R. (2018). Selection of Aluminum Alloys for Aircraft Structures. Materials Today: Proceedings, 5(9), 19565–19573.
- [8] Zhou, X., Chen, Y., & Tang, H. (2021). Advances in 6xxx Series Aluminum Alloys. Journal of Materials Processing Technology, 288, 116856.
- [9] Lee, S., & Kim, J. (2022). Comparative Machinability of 6061 and 6013 Aluminum Alloys. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 121, 3221–3232.

- [10] Martinez, H., & Gonzalez, P. (2021). Cutting Parameter Optimization in CNC Milling of Aluminum. *Procedia Manufacturing*, 45, 302–309.
- [11] Chandra, V., & Rao, R. S. (2019). Influence of Tool Geometry and Heat Treatment on Energy Consumption in Machining. *Journal of Cleaner Production*, 231, 984–991.
- [12] Kumar, A., & Patel, R. (2019). Investigation on Cutting Speed and Feed Rate Impact on Energy Consumption. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 24, 12–20.
- [13] Sadeghi, M., Moazami, F., & Emami, M. (2020). Application of MQL in Aluminum Alloy Machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 125–132.
- [14] Zhang, Y., & Wang, L. (2020). Sustainable Machining of Aerospace Aluminum Alloys. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(8), 081006.
- [15] Najiha, M. S., Rahman, M. A., & Wahid, A. (2021). Multi-factor Experimental Design Approaches for Energy Efficiency. *International Journal of Production Research*, 59(4), 1042–1055.
- [16] Fernandez, C., Garcia, M., & Lopez, R. (2022). Green Manufacturing Strategies in Aerospace Sector. *Sustainable Manufacturing and Materials*, 14(3), 210–225.
- [17] Özel, C. (2011). Research of production times and cutting of the spur gears by end mill in CNC milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54, 203–213.
- [18] Ali, H., & Rao, T. (2021). Regression-Based Modeling for Sustainable Machining Parameters Optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(7), 1893–1905.

- [19] Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons.
- [20] Antony, J. (2014). Design of Experiments for Engineers and Scientists. Elsevier.
- [21] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons.
- [22] Frost, J. (2019). Regression Analysis: An Intuitive Guide. Statistics by Jim Publishing.
- [23] Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2004). Applied Linear Statistical Models. McGraw-Hill Education.
- [24] Draper, N. R., & Smith, H. (1998). Applied Regression Analysis. Wiley-Interscience.
- [25] Field, A. (2013). Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. Sage Publications.
- [26] Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). Introduction to Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons.
- [27] Weisberg, S. (2005). Applied Linear Regression. Wiley Series in Probability and Statistics.
- [28] Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons.

- [29] Field, A. (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. Sage Publications.
- [30] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons.
- [31] Antony, J. (2014). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier.
- [32] Box, G. E. P., Hunter, W. G., & Hunter, J. S. (2005). *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. Wiley-Interscience.
- [33] Dean, A., & Voss, D. (2000). *Design and Analysis of Experiments*. Springer.
- [34] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- [35] Box, G. E. P., Hunter, W. G., & Hunter, J. S. (2005). *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. Wiley-Interscience.
- [36] Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- [37] Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley.
- [38] Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214–219.

- [39] Anderson, M. J., & Whitcomb, P. J. (2016). RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments. Productivity Press.
- [40] Box, G. E. P., Hunter, W. G., & Hunter, J. S. (2005). Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery. Wiley-Interscience.
- [41] Öztürk, B., & Kara, F. (2020). Calculation and estimation of surface roughness and energy consumption in milling of 6061 alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020(1), 5687951.



