

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

**TAGUCHİ DENEY TASARIMI YÖNTEMİ İLE
ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON PROSESİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Mesut ÖZTOP**

**Tezi Yöneten
Yrd. Doç. Dr. Fazıl CANBULUT**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Haziran 2007
KAYSERİ**

Yrd. Doç. Dr. Fazıl CANBULUT danışmanlığında Mesut ÖZTOP tarafından hazırlanan “Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi ile Alüminyum Ekstrüzyon Prosesinin İyileştirilmesi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

07.06.2007

JÜRİ:

Başkan : Doç. Dr. Sedat Özden

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hale ÖZRAKIR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fazıl CANBULUT

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 03/07/2007 tarih ve 2007/19-09 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

03.07.2007.



N. Aygildiz
Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Yardım ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Fazıl CANBULUT'a yüksek lisans çalışmalarımındaki ilgi ve emeğinden ötürü teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında hep yanımda olan okul arkadaşlarıma ve bilimsel bilginin ticari ürüne dönüşmesi ve katma değer yaratması amacıyla özveri ve fedakarlık ile çalışan ve bu çalışmamı da mümkün olduğunca bu doğrultuda yönlendiren tüm KOSGEB Erciyes TEKMER ve TÜBİTAK TEYDEB çalışanlarına şükranlarımı iletirim.

Zorlu ve yorucu çalışmalar esnasında moral ve özgüvenimi hep yüksek tutmaya çalışan aileme sabır ve iyi niyetlerinden dolayı teşekkür ederim.

TAGUCHİ DENEY TASARIMI YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON PROSESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Mesut ÖZTOP

**Erciyes Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2007
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fazıl CANBULUT**

ÖZET

Bu çalışmada, Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak alüminyum ekstrüzyon prosesinin parametreleri olan ekstrüzyon hızı, biyet sıcaklığı, ekstrüzyon oranı ve kalıp kılavuz mesafesinin, kalıp ömründe belirleyici olan profil sıcaklığı, zımba kuvveti ve kalıp yüzey basıncı üzerindeki etki dereceleri ve birbirleri ile etkileşimleri irdelenmiştir. L8 ortogonal dizimi karmaşık-düzey esasına göre yeniden düzenlenerek ekstrüzyon hızının 3, kılavuz mesafesi, biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon oranının 2 düzeyi için bir deney planı oluşturulmuştur. MINITAB Release 13 programı ile yapılan analizlerde profil sıcaklığı için en etkili parametrenin ekstrüzyon hızı, zımba kuvveti ve kalıp yüzey basıncı için en etkili parametrenin ise kılavuz mesafesi olduğu sonucuna varılmıştır.

Taguchi yöntemi ile yeniden düzenlenmiş L8 ortogonal dizimi esasına göre yapılan deneyde etkileşim etkileri belirlenememiş, yeniden düzenlenen L16 dizimi ile kullanılan 16 deney sonucu, bu etkileşim etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir. L8 ve L16 esaslarına göre yapılan deneylerin çok etkenli deney sonuçları ile paralellik göstermesi Taguchi metodunun endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliği açısından oldukça önemlidir. 24 deneme yerine 8 deneme ile benzer sonuçlara ulaşılması, deney sayısı dolayısıyla deney maliyetini 1/3 oranında indirgeyecektir. Taguchi yönteminin, endüstriyel kuruluşlarda özellikle proses parametre tasarımında, varyasyon problemlerinde, proses eniyilemesinde ve yeni ürün geliştirme süreçlerinde kullanılmasının önemli faydaları olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Taguchi Yöntemi, Deney Tasarımı, Ekstrüzyon, Alüminyum

IMPROVEMENT OF ALUMINUM EXTRUSION PROCESS BY USING TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN METHOD

Mesut ÖZTOP

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Science

M.Sc. Thesis, June 2007

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Fazıl CANBULUT

ABSTRACT

In this study, effects and interaction effects of factors of aluminum extrusion process, which are extrusion velocity, initial billet temperature, extrusion ratio and bearing-length ratio, on the characteristics that decide the die life such as profile temperature, ram force and die-face pressure were investigated by using Taguchi experimental design method. An experimental plan was constituted in order to make an analysis for three levels of extrusion velocity and two levels of bearing-length ratio, initial billet temperature and extrusion ratio, by modifying L8 ortogonal array for the mixed-level experiment. In the statistical analysis performed via MINITAB Release 13 software, it is concluded that the most effective parameter is the extrusion velocity for the profile temperature and bearing-length ratio for the ram force and die face pressure.

Taguchi experiment performed by using modified L8 ortogonal array, does not give sufficient knowledge to analyse interaction effects. However, 16 yields utilized in a modified L16 array, showed that these interaction effects are at a negligible level. It is so important for the utilization of Taguchi method in industrial applications that experimental analysis carried out by L8 and L16 arrays gave similar results with the full factorial arrangement. Obtaining similar results by using 8 run instead of 24, will reduce number of experiments namely experiment cost to one third. Utilization of Taguchi method in industrial organizations especially in process parameter design, variation problems, process optimisation and new product development processes will make major advantages.

Key words: Taguchi Method, Experimental Design, Extrusion, Aluminum

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. BÖLÜM	1
GİRİŞ	1
2. BÖLÜM	4
ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON PROSESİ.....	4
2.1. Alüminyumun Özellikleri	4
2.2. Ekstrüzyon Prosesi	8
2.3. Alüminyumun Ekstrüzyonu	10
2.3.1. Proses Parametreleri.....	10
2.3.2. Karşılaşılan Problemler.....	12
3. BÖLÜM	15
DENEY TASARIMI ve TAGUCHİ METODU	15
3.1. Çok Etkenli (Faktöryel) Deneyler	20
3.2. Kesirli Deneyler	22
3.3. İstatistiksel Analiz Yöntemleri.....	24
3.4. Taguchi Metodu	27
3.4.1.Taguchi'nin Kalite Kontrol Sistemi.....	30
3.4.2. Ortogonal Dizimler	33
3.4.3. Kayıp Fonksiyonu	34
3.5. Taguchi Metodu Uygulama Adımları	35
3.5.1. Problemin Tespiti ve İfade Edilmesi.....	35
3.5.2. Kalite Karakteristiklerinin Tespiti.....	36
3.5.3. Kontrol ve Gürültü Faktörlerinin Tespiti	36
3.5.4. Faktör Düzeylerinin Tespiti	37
3.5.5. Ortogonal Dizimin Seçimi	37
3.5.6. Deneyin Yapılması.....	40

3.5.7. İstatistiksel Analiz ve Deney Sonuçlarının Yorumlanması	40
3.5.8. Doğrulama Deneyi	42
3.6. Taguchi Metoduna Yönelik Eleştiriler.....	42
4. BÖLÜM	43
TAGUCHİ METODUNUN EKSTRÜZYONDA UYGULANMASI.....	43
5. BÖLÜM	48
BULGULAR.....	48
6. BÖLÜM	62
SONUÇ VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	67
EK-1	67
Moe'nun çalışmasında yapılan deneylerin sonuçları	67
ÖZGEÇMİŞ	68

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri.....	7
Tablo 3.1. Faktörlerin Birer Birer Değiştirilmesi.....	19
Tablo 3.2. Faktörlerin Hepsinin Aynı Anda Değiştirilmesi.....	20
Tablo 3.3. 2 düzeyli 3 faktörlü çok etkenli deney planı.....	21
Tablo 3.4. L8 Dizayn Matrisi.....	22
Tablo 3.5. 2 düzeyli 7 faktörlü tam eşlendirmeli deney için veri kayıt tablosu.....	24
Tablo 3.6. 2 düzeyli 7 faktörlü 1/8 kesirli deney için veri kayıt tablosu.....	24
Tablo 3.7. Varyans analizi sonuç tablosu.....	27
Tablo 3.8. L8 Ortogonal Dizimi.....	34
Tablo 3.9. 2 düzeyli OD'lerin seçimi.....	38
Tablo 3.10. 3 düzeyli OD'lerin seçimi.....	38
Tablo 3.11. 2 düzeyli ortogonal dizimlerin sütunlarına faktör atanması.	39
Tablo 3.12. 3 düzeyli Ortogonal dizimlerin sütunlarına faktör atanması.	39
Tablo 4.1. AA6060 alaşımının ortalama bileşen oranları.	44
Tablo 4.2. Deney faktörleri ve düzeyleri.	45
Tablo 4.3. L8 OD'inin ilk 3 kolonunun birleştirilmesi.	46
Tablo 4.4. Yeniden düzenlenmiş L8 Ortogonal Dizimi.....	47
Tablo 4.5. 3 düzey için yeniden düzenlenmiş L8 Ortogonal Dizimi.	47
Tablo 5.1. Deney Sonuçları.....	48
Tablo 5.2. Faktörlerin profil çıkış sıcaklığı için etki sıralamaları.....	50
Tablo 5.3. Faktörlerin zımba kuvveti için etki sıralamaları.	51
Tablo 5.4. Faktörlerin kalıp yüzey basıncına göre etki sıralamaları.....	52
Tablo 5.5. En iyi proses için faktör koşulları.....	53
Tablo 5.6. Yeniden düzenlenmiş L16 OD'ine göre deney planı.....	54
Tablo 6.1. Faktörlerin ana etki derecelerinin sıralamaları.	63

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İleriye (a) ve geriye (b) ekstrüzyon prosesleri.	9
Şekil 2.2. Yük veya basıncın zımba ilerlemesine göre değişimi.....	10
Şekil 3.1. Taguchi'nin Kalite Sistemi.....	31
Şekil 4.1. 8 MN Laboratuvar tipi ekstrüzyon presi.....	45
Şekil 5.1. Profil sıcaklığı için ana etkiler grafiği.	49
Şekil 5.2. Zımba kuvveti için ana etkiler grafiği.....	50
Şekil 5.3. Basınç için ana etki grafiği.	52
Şekil 5.4. Profil sıcaklığı için etkileşim grafiği.....	55
Şekil 5.5. Zımba kuvveti için etkileşim grafiği.....	55
Şekil 5.6. Basınç için etkileşim grafiği.	56
Şekil 5.7. Basınç için ekstrüzyon oranı-ekstrüzyon hızı etkileşimi.	57
Şekil 5.8. Basınç için biyet sıcaklığı-ekstrüzyon hızı etkileşimi.	57
Şekil 5.9. Basınç için kılavuz mesafesi-ekstrüzyon hızı etkileşimi.	58
Şekil 5.10. Basıncın ekstrüzyon oranı ve ekstrüzyon hızı ile değişimi.....	58
Şekil 5.11. Profil sıcaklığının biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı ile değişimi.	59
Şekil 5.12. Basıncın biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı ile değişimi.....	59
Şekil 5.13. Profil sıcaklığının biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon oranı ile değişimi.....	59
Şekil 5.14. Çok etkenli deneyde profil sıcaklığı için ana etki dereceleri.....	60
Şekil 5.15. Çok etkenli deneyde zımba kuvveti için ana etki dereceleri.....	60
Şekil 5.16. Çok etkenli deneyde basınç için ana etki dereceleri.	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

A_C :	Kovan Kesit Alanı
A_E :	Profil Kesit Alanı
ER:	Ekstrüzyon Oranı
k:	Düzey sayısı
KO:	Kareler ortalaması
KT:	Kareler toplamı
n:	Faktör sayısı
N:	Toplam deneme sayısı
OD:	Ortogonal Dizim
r:	Tekrar sayısı
S:	Standart sapma
sd:	Serbestlik Derecesi
V_R :	Zımba hızı
V_E :	Ekstrüzyon hızı
y:	Kalite karakteristiği ölçüm değeri

1. BÖLÜM

GİRİŞ

İstatistiksel deney tasarımının temelleri 1920'li yıllarda Amerika'da Sir Ronald Fischer'in tarım alanındaki uygulamaları ile atılmıştır. Ziraî uygulamalardaki pek çok parametrenin ürün kalitesine ve verimliliğine etkilerinin incelenmesi çalışmaları bilimsel çalışmadaki deney sistematığının kurulmasını sağlamıştır. 1980'li yıllarda endüstriyel üretim hacimlerinin artması ve ürün izlenebilirliği, kalite gibi problemlerin ortaya çıkması ile deney tasarımı endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmış ve Japon bilim adamı ve mühendisi Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Genichi Taguchi'nin kendi adıyla anılan yöntem bugün pek çok ülkede ürün iyileştirilmesi ve yeni ürün geliştirilmesi çalışmalarında etkin olarak kullanılmaktadır [1]. Ülkemizde ise Taguchi Metodu ağırlıklı olarak bilim çevrelerince benimsenmiş ve kullanılmış, endüstriyel uygulamalar son derece kısıtlı kalmıştır.

Bu çalışmada, Taguchi deneysel tasarım metodunun endüstriyel uygulanabilirliği irdelenecek, bu yöntem kullanılarak, kullanım hacmi, sürekliliği ve kalite gereksinimleri nedeniyle gürbüz (sağlam) tasarım gerektiren alüminyum ekstrüzyon prosesi, proses parametrelerinin etki dereceleri ve birbirleri ile etkileşim etkileri irdelenmek suretiyle iyileştirilecektir.

Demir ve çelikten sonra dünya üzerinde en çok kullanılan metallerden olan alüminyumdan sabit kesitli ve sonsuz uzunlukta mamul ve yarı mamul üretimi için yüz yılı aşkın bir süredir endüstriyel olarak yaygın bir biçimde kullanılan ekstrüzyon prosesi, kütük halindeki alüminyumun yüksek basınç ve sıcaklık altında kendi kesitinden daha dar bir kesite sahip bir kalıptan geçirilerek kalıp geometrisini kazanması esasına dayanmaktadır. Ekstrüzyon prosesindeki sıcaklık, basınç, ekstrüzyon hızı gibi

parametreler ürün kalitesi, üretim verimliliği ve üretim hızı gibi pek çok proses performans kriterini yakından ilgilendirmektedir.

Çalışmada ekstrüzyon öncesi biyet sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, kalıp biçimi ve ekstrüzyon oranı parametrelerinin kalıp yüzey basıncı, zımba kuvveti ve profil sıcaklığı üzerindeki etkileri yeniden düzenlenmiş L8 ortogonal dizimi yardımıyla çözümlenmiştir. Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi bünyesinde, ekstrüzyon prosesinde sıcaklık ve basınç ölçümleri için sensörlerin kalıp içine yerleşimine imkan veren ekstrüzyon kalıbı tasarımı konusunda yapılmış bir çalışmadaki deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Ekstrüzyon ürünü alüminyum profillerin mukavemet, yüzey kalitesi gibi ürün nitelikleri kabul edilebilir sınırlar dahilinde olup, kalıp ömrü ve enerji sarfiyatını yakından ilgilendiren zımba kuvveti, kalıp yüzey basıncı ve profil sıcaklığı üzerinde durulmuştur.

2. Bölümde alüminyum malzemesinin temel ve kritik özelliklerine yer verilmiş, ekstrüzyon prosesi ve bu malzemenin ekstrüzyon davranışları irdelenmiştir. 3. Bölümde 1920’li yıllardan bu yana pek çok alanda kullanımı olan deney tasarımı yöntemi özetlenmiş ve 1980’li yıllarda Japon bilim adamı Taguchi’nin katkıları ile deney tasarımına kazandırılan ve kendi adı ile anılan Taguchi Metodu incelenmiştir. Bu bölümde ağırlıkla bilim çevrelerince kullanılan Taguchi Metodunun endüstriyel uygulanabilirliği ele alınmıştır. 4. Bölümde 1’i 3 düzeyli, 3’ü 2 düzeyli toplam 4 faktör için elde edilen 8 deney sonucunun 3 ayrı kalite karakteristiği için çözümlenmesine yönelik olarak kullanılacak yöntem belirlenmiştir. Sadece ana etkilerin irdelenmesine olanak tanıyan yeniden düzenlenmiş L8 dizimine göre deney düzeni belirlenmiştir. 5. Bölümde Taguchi Metodu ile elde edilen veriler MINITAB 13.0 paket programı kullanılarak irdelenmiş ve sonuçlarının yorumuna yer verilmiştir. Etkileşim etkilerinin irdelenmesine olanak tanıyacak L16 dizimi doğrultusundaki deney düzeni uygulaması ile kıyaslamalar yapılmıştır.

Taguchi metodunun sağladığı en önemli avantaj bir miktar bilgi kaybına rağmen çok etkenli deneylere göre deney sayılarının dolayısıyla deney maliyetleri ve süresinin azaltılmasıdır. Deneysel çalışmanın kaçınılmaz olduğu endüstriyel uygulamalarda faktör ve düzey sayılarının çok yüksek olması halinde çok etkenli deneylerin yapılması oldukça güçtür. Oysa Taguchi’nin savunduğu ortogonal dizim esasına göre uygulanacak

kesirli çok etkenli deneyler ile endüstriyel alanda kabul edilebilir düzeyde yaklaşık sonuçlar elde edilebilmektedir. Alüminyum ekstrüzyon prosesi iyileştirilmesi örneğinde Taguchi Metodu ile yapılan 8 deneme sonucunun klasik tam eşlendirmeli deney sistematiği ile yapılacak 24 deneme ile paralel sonuçlar verdiği böylece yüksek hacimde üretim yapılan ve prosesin durdurulmasının önemli maliyet kayıplarına sebep olacağı ekstrüzyon prosesinde 1/3 oranında deney sayısının azaltılabileceği gösterilmiştir.

Taguchi Metodu, faktörler arasındaki etkileşimlerin çoğu zaman ihmal edildiği tasarım biçimi, S/G oranlarının bazı uygulamalarda yetersiz kalması ve basitleştirilmiş varyans analizi uygulamaları nedeniyle eleştirilmektedir. Özellikle eniyileme problemlerinde tasarımcının bilgi ve deneyiminin ön planda olması gerekliliği de yöntemin sorgulanan yanlarından. Yüksek hacimli, düşük maliyetli üretim yapılan endüstriyel ortamlarda performansı yüksek iken, düşük hacimde ve yüksek maliyetli uygulamalarda metodolojik olarak daha verimsizdir [2]. Nitekim alüminyum ekstrüzyon örneğinde faktörler arasındaki etkileşim etkileri bilgilerine L8 esasına göre hazırlanan deney düzeninde ulaşılamadığı ancak kurgulanan L16 düzeninde elde edilen etkileşim etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu gösterilmiştir.

2. BÖLÜM

ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON PROSESİ

2.1. Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum günümüzde, kendine has özellikleri ile, çok eski çağlardan beri bilinen, ağaç, bakır, demir ve çelik gibi birçok malzemeden daha önem kazanmış bulunmaktadır. 19. yüzyılın ikinci yarısından beri endüstriyel çapta üretilen çok genç bir metal olmasına rağmen, bugün bakır ve alaşımları, kurşun, kalay ve çinko gibi tüm demir dışı metallerin toplam kullanımından daha fazla miktarda kullanılmaktadır [3].

Alüminyumu endüstriyel alanda tercih edilir kılan genel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1-Özkütle: $2,70 \text{ g/cm}^3$ özkütlesi ile aynı hacimdeki bir çelik malzemenin ağırlığının ancak üçte biri kadar ağırlıktadır. Bu durum alüminyumun inşaat, havacılık ve otomotiv alanlarında kullanımını artırmıştır.

2-Kimyasal Kararlılık: Alüminyum, hava şartlarına, yiyecek maddelerine ve günlük yaşamda kullanılan pek çok sıvı ve gazlara karşı dayanıklıdır. Bu nedenle gıda ve kişisel bakım ürünleri başta olmak üzere pek çok ürünün ambalajlanmasında yoğun biçimde kullanılmaktadır.

3-Estetik Özellikler: Alüminyumun yansıtma kabiliyeti yüksektir. Gümüşü beyaz renginin bu özelliğe olan katkısı ile beraber gerek iç gerekse dış mimarî için cazibeli bir görünüme sahiptir. Alüminyumun bu güzel görünümü, anodik oksidasyon (eloksal), lâke maddeleri vs. gibi uygulamalar ile uzun müddet korunabilir. Hatta, birçok uygulamada tabii oksit tabakası bile yeterli olur.

4- Mukavemet: 70 GPa elastisite sabitine sahip saf alüminyum, demir çelik gibi metallere göre çok daha az dayanım değerlerine sahiptir. Ancak çeşitli alüminyum alaşımlarının mukavemeti, normal yapı çeliğinin mukavemetine denk veya daha yüksek değerlere ulaşabilmektedir.

5-Esneklik: Alüminyum elastik bir malzemedir. Bu nedenle ani darbelere karşı dayanıklıdır. Ayrıca, çelikler gibi dayanıklılığı düşük sıcaklıklarda azalmaz.

6-İşlenebilirlik: Alüminyum, işlenmesi kolay bir metaldir. Şekil vermek için döküm, dövme, haddeleme, presleme, ekstrüzyon, çekme gibi tüm metotlar uygulanabilen alüminyum, kalınlığı 0,01 mm'den daha ince olan folyo veya tel haline getirilebilir.

7-İletkenlik: 26,5 nΩ.m ve 237 W/mK elektrik ve ısı iletkenlik katsayıları ile bakır kadar iyi bir iletken olması nedeniyle elektrik tesisatı uygulamalarında tercih edilmektedir [4].

Alüminyumun özellikleri zenginleştirmek için çeşitli metaller karıştırılarak alüminyum alaşımları elde edilir. İlave edilen metallere göre yapılan sınıflandırmada bir alaşım 4 rakamdan oluşan bir gösterim şekli ile tanımlanır. Birinci rakam, alüminyum ilâve edilen esas metali gösterir. A.B.D normlarına göre bu gösterim aşağıdaki gibi listelenebilir;

1XXX	:Alaşımsız alüminyum
2XXX	:Bakırlı alüminyum alaşımı
3XXX	:Manganezli alüminyum alaşımı
4XXX	:Silisyumlu alüminyum alaşımı
5XXX	:Magnezyumlu alüminyum alaşımı
6XXX	:Silisyum ve magnezyumlu alüminyum alaşımı
7XXX	:Çinkolu alüminyum alaşımı
8XXX	:Diğer elementler ile alaşımları
9XXX	:Kullanılmayan seriler [5].

Dünyadaki kullanımı, hem miktar hem de değer olarak demirden sonra gelen alüminyumun çekme dayanımı düşük olmakla birlikte, bakır, çinko, magnezyum, manganez, ve silisyum gibi pek çok elementle alaşımlandırılarak mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Yüksek dayanım/ağırlık oranlarından ötürü alüminyum alaşımları, uçak ve uzay araçlarının vazgeçilmez bileşenleridir.

Kullanım alanlarından bazıları:

- Ulaşım (otomobil, uçak, kamyon, tren vagonları, deniz araçları, vs.)
- Ambalaj (alüminyum kutular, folyolar, vs.)
- İnşaat (cam, kapı, duvar, bina, vs.)
- Dayanıklı tüketim aletleri (cihazlar, mutfak araç gereçleri, vs.)
- Makine imalatı, elektrik iletim hatları
- MKM çeliği ve Alnico manyetlerinin yapımı
- Elektronik sanayi, kompakt disklerin üretimi (Yüksek safiyette alüminyum, SPA, %99.98 - %99.999 Al)
- Boya imalatı
- Katı roket yakıtı olarak ve diğer piroteknik kompozisyonların üretimi
- Süper iletken olarak elektronik sanayisinde (Süper iletkenliğe geçiş kritik sıcaklığı 1,2 K dir.) [6].

Tüm dünyada, mimari amaç için üretilen profiller, genellikle 6XXX alaşımlarından, ekstrüzyon yöntemi ile üretilir ve görünümünün bozulmaması, yıllarca korunması için anodik oksidasyon (eloksal) ile renkli veya renksiz olarak kaplanırlar. Bu alaşımlar arasında da en yaygın kullanılanlar, birbirlerine son derece yakın kimyasal bileşime ve fiziksel özelliklere sahip olan 6063, 6060 veya AlMgSi0,5 alaşımlarıdır [3]. Bu çalışmada 6060 alaşımları kullanılmıştır.

6XXX serisi alüminyum alaşımlarının genel özellikleri

AA 6XXX serisi alaşımlar, magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si) ihtiva ederler. Bu elementlerin ve içindeki diğer empüritelerin (Fe, Cu, Mn, Zn, gibi) belirli sınırlar içinde farklı değerlerde olmaları, alaşımların kullanılma yerine göre farklı özelliklerde profil üretimini sağlarlar. Demir (Fe) miktarı % 0.20 veya daha düşük olan 6XXX serisi alaşımlarda, profil polisaj yapıldığında parlak yüzey elde edilir. Fe miktarının bu

değerden yüksek olması durumunda, profilin rengi grileşmeye başlar, parlaklık donuklaşır. Mat yüzey elde edilmesi için de Fe miktarı en az 0.18 % olmalıdır. Fe miktarı yükseldikçe o ölçüde rahat ve cazibeli mat yüzey elde edilir. Fe miktarının % 0.30'dan fazla olması ise eloksal sonrasında donuk bir görünüme neden olacağı gibi, ekstrüzyon prosesini de zorlaştırır.

Mg ve Si miktarlarının, profilin yapay yaşlandırma ısı işlemi (termik) sonrası sertliğinde büyük önemi vardır. Ancak, ısı işlem sonrası maksimum sertlik temini için bu elementlerin üst sınırlarda olması ise, üretimin düşük hız ile yapılmasını gerektirir. Çünkü kullanılan alüminyum kütük de aynı oranda serttir.

Sonuç olarak, profillerin kullanılma yerine göre, mümkün olduğu ölçüde amaca uygun alaşım ile üretim yapılması faydalıdır. Profilin bir özelliğinin iyi olması istenirken, diğer bir özelliğinden fedakârlık edilmesi gerekmektedir.

Aşağıda tipik 6XXX alaşımları olan EN-AW 6060 ve EN-AW 6063 alaşımlarının kimyasal bileşim limitleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri.

Element	EN AW 6060	EN AW 6063
Si	0,30 - 0,6	0,20 - 0,60
Mg	0,35 - 0,6	0,45 - 0,90
Fe	0,10 - 0,30	0,35 (en fazla)
Cr	0,05	0,10 (en fazla)
Cu	0,10	0,10 (en fazla)
Zn	0,15	0,10 (en fazla)
Mn	0,10	0,10 (en fazla)
Ti	0,10	0,10 /en fazla)
Diğer	0.05 % max. Herbiri toplam 0.15 % max.	0.05 % max. Herbiri toplam 0.15 % max.

6XXX serisi (AlMgSi) alaşımları içinde en çok kullanılanlar 6060, 6063 (EN ve yeni TS notasyonunda) ve AlMgSi0.5 (DIN ve eski TS notasyonunda) alaşımlarıdır. Bunların kimyasal bileşimleri genelde aynı olup, alt ve üst limitlerde nüans farklılıkları gösterirler [3].

2.2. Ekstrüzyon Prosesi

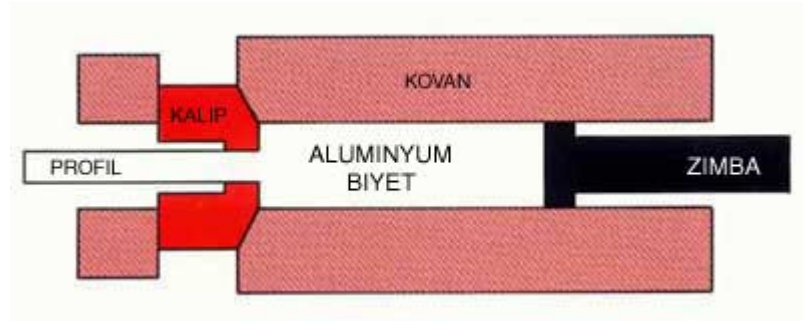
Ekstrüzyon, boru, profil veya tel gibi sabit kesitli, uzun mamullerin üretiminde kullanılan, metal bir bloğun (ingot veya biyet) kendi kesitinden daha dar kesit alanına sahip bir kalıp boşluğuna akmaya zorlanması biçimindeki plastik şekillendirme teknolojisidir. 100 yılı aşkın bir süredir yaygın endüstriyel kullanımı olan yöntem, ağır veya hafif metal endüstrisinde döküm ile elde edilmiş ingotlardan yarı mamul elde edilmesinde kullanılmaktadır[7].

Ekstrüzyon prosesinin anlaşılmasında dış macununun sıkılan tüpten çıkarken tüpün ağzının şeklini alması örneği sıkça kullanılır. Bu olay ile prensipte birebir örtüşen proseste metal bloklar diğer ucuna kalıbın yerleştirildiği bir hazneye konur ve açık uçtan hidrolik veya mekanik bir pres ile kalıbın içine akmaya zorlanır. Sıcak veya soğuk olarak gerçekleştirilebilecek işlem esnasında blok öncelikle haznenin içini doldurur ve haznenin cidarlarına ve kalıp yüzeyine yüksek basınç uygular. Kalıbın şeklini almak suretiyle sürekli olarak kalıptan dışarıya çıkar. Kütle ve hacimce bir kaybın söz konusu olmadığı proses, şekillendirilen iş parçası (blok) tükendikçe yenisi eklenerek sürekli devam eder. Proses Şekil 2.1. de şematik olarak özetlenmiştir.

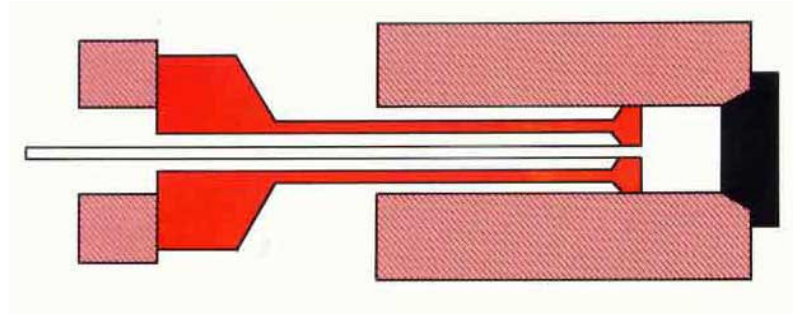
Ekstrüzyon prosesinin sınıflandırılması 4 şekilde yapılabilir;

- Baskı şekline göre: İleriye ve geriye ekstrüzyon
- Pres ekseninin pozisyonuna göre: Yatay veya düşey ekstrüzyon
- Pres çalışma prensibine göre: Hidrolik veya mekanik ekstrüzyon
- Yük uygulama şekline göre: Klasik veya hidrostatik ekstrüzyon

Bu çalışmada, ileriye, yatay, hidrolik ve klasik ekstrüzyon incelenmiştir. Yapılan sınıflandırmada ekstrüzyon prosesinin kalitesi açısından baskı şekli ve yük uygulama şekli önemli olduğundan bu uygulamalar üzerinde kısaca durulacaktır.



(a)



(b)

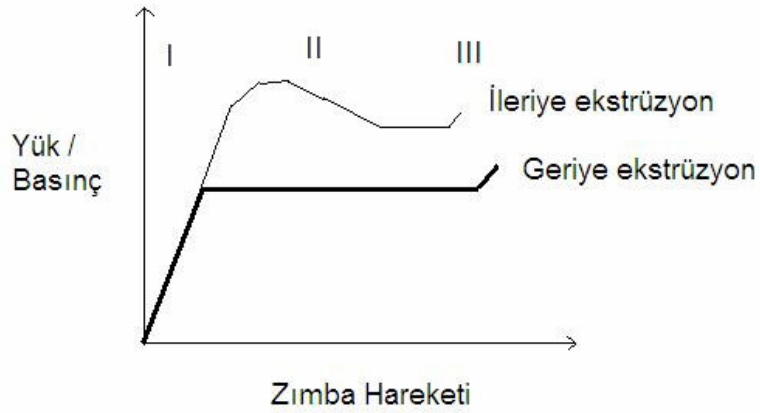
Şekil 2.1. İleriye (a) ve geriye (b) ekstrüzyon prosesleri.

En yaygın metot ileriye ekstrüzyon metodudur. Şekil 2.1.a'da örneklendirilen ileriye ekstrüzyonda kütük halindeki malzeme kovan içerisine yerleştirilir ve zımba ile kalıbın içine itilir. Direk ekstrüzyon, kalıbın geometrisine göre dolu çubukların, profil ve boruların imalatında kullanılmaktadır. Direk ekstrüzyonda zımba yönü ile metalin akış yönü aynıdır. Proses sırasında biyet kovan duvarlarına göre kayarak ilerler. Duvarlarla biyet arasındaki sürtünme kuvvetleri zımba basıncını önemli ölçüde artırır. Sistemdeki yük veya basıncın ilerlemeye göre değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir. Proses geleneksel olarak 3 farklı bölge için incelenebilir;

Bölge I: Biyet itilmekte ve basınç hızlı bir şekilde yükselmektedir.

Bölge II: Basınç düşmeye başlar ve düzgün halde ekstrüzyon gerçekleşir.

Bölge III: Basınç minimum değerine ulaşır ve ekstrüzyonu imkansız olan ölü parça sıkıştırıldığı için tekrar yükselişe geçer.



Şekil 2.2. Yük veya basıncın zımba ilerlemesine göre değişimi.

Geriye ekstrüzyon ise Şekil 2.1.-b’de şematik olarak verilmiştir. Zımba ilerleme yönü ile malzeme akış yönünün zıt olduğu bu tarz uygulamalarda, zımbanın ön kısmındaki kalıp hazneye göre hareket halinde ancak biyet ile hazne arasında bir bağıl hareket söz konusu olmamaktadır. Bu nedenle bu proseste hazne duvarları ile biyet arasında sürtünme yoktur. Bu durum nispeten daha düşük basınçlarda çalışmaya olanak tanımaktadır. Geriye ekstrüzyon için yük veya basıncın zımba ilerlemesi ile değişimi de Şekil 2.2’de verilmiştir.

Yük uygulama şekline göre klasik ve hidrostatik ekstrüzyon metotları mevcuttur. Oldukça önemli avantajlar sağlamasına rağmen yaygın bir şekilde kullanım alanı bulunmayan hidrostatik ekstrüzyonda biyetin direk olarak bir zımba tarafından değil de ortamda bulunan bir sıvı aracılığıyla itilmesi söz konusudur [7]. Bu çalışmada hidrostatik ekstrüzyon prosesinin detaylarına girilmeyecektir.

2.3. Alüminyumun Ekstrüzyonu

2.3.1. Proses Parametreleri

Ekstrüzyonun gerçekleşebilmesi için gerekli kuvveti ve kalıptan çıkan malzemenin kalitesini etkileyen ana faktörler ekstrüzyon oranı, çalışma sıcaklığı, ekstrüzyon hızı ve malzemenin akma gerilmesidir. Ekstrüzyon için gerekli yük değeri pres kapasitesinin üzerinde olduğunda ekstrüzyon işlemi olanaksız hale gelebilmekte veya ekstrüzyon sırasında ürünün sıcaklığı malzemenin ergime sıcaklığının üzerine çıktığında elde edilen

ürün istenilen özellikte olmayabilmektedir. Son derece pahalı olan ekstrüzyon düzeneklerinin doğru ve ekonomik şekilde kullanılması arzulanıyorsa bu parametreler hakkında bilgiye sahip olunması gerekir [7].

Ekstrüzyon Oranı:

Ekstrüzyon oranı biyet kesit alanının toplam ürün kesit alanına olan oranıdır. Çok çıkışlı bir kalıbın ekstrüzyon oranı;

$$ER = \frac{A_C}{n.A_E} \quad (2.1)$$

şeklinde verilir.

Burada, A_C kovan kesit alanı, n kalıp çıkış sayısı ve A_E kalıp ya da profil kesit alanıdır. Endüstriyel uygulamalarda sert alaşımlar için 10 ile 35 arasındaki oranlar, yumuşak alaşımlar için de 10 ile 100 arasındaki ekstrüzyon oranları kullanılmaktadır. Bu değerler ürün geometrisine göre değişiklik gösterebilmektedir.

Ekstrüzyon Sıcaklığı:

Sıcaklık yükseldikçe malzemelerin akma gerilmeleri düşeceğinden şekil değiştirmeleri daha kolaylaşmaktadır, buna karşın başlangıç sıcaklığı yükseldikçe işlem sırasındaki bölgesel sıcaklık artışları malzemede kısmi ergimelere sebep olacağından ulaşılabilecek maksimum ekstrüzyon hızı azalmaktadır. Ekstrüzyon sırasındaki değişiklikler biyet sıcaklığına, biyetten kovana ısı transferine buna ilaveten şekil değişikliği ve sürtünme nedeniyle ısı oluşumuna yakından bağlıdır. Bir alüminyum ekstrüzyon uygulamasında sıcak biyetin ön ısıtılmış kovana yüklenmesi ve ekstrüzyonun başlamasıyla birlikte çok karmaşık ısı değişimleri ortaya çıkmaya başlamaktadır.

Ekstrüzyon Hızı:

Bir metalin ekstrüzyon işlemine vereceği tepki deformasyon hızı tarafından etkilenebilmektedir. Zımba hızındaki artış ekstrüzyon basıncında artışa sebep olacaktır. Artan zımba hızıyla ekstrüzyonda oluşan sıcaklık artışı da yükselmektedir. Bu artışın sebebi, gerinim hızının zımba hızıyla doğru orantılı olması ve oluşan ısı miktarının gerinim hızıyla orantılı olmasıdır. Zımba hızı düştükçe oluşan ısıya dağılması daha

kolay olacaktır. Alüminyumun ısı iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle bu durum alüminyumda daha belirgin hale gelmektedir.

Zımba hızı ile ekstrüzyon hızı arasında, hacmin korunumu gereğince;

$$V_E = V_R \cdot \frac{A_C}{n \cdot A_E} \quad (2.2)$$

şeklinde bir bağlantı olacaktır. Bu bağıntı,

$$V_E = V_R \cdot ER \quad (2.3)$$

olarak da ifade edilebilir [7].

Malzemenin Akma Gerilmesi:

Plastik şekil değişikliği sırasında şekillendirme kuvveti ya da gerilmesi parçanın geometrisine, sürtünmeye ve malzemenin akma gerilmesine bağlı olduğundan, akma gerilmesi de ekstrüzyon prosesinde önemli bir kriterdir. Bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki faktörler tarafından belirlenmektedir;

- Malzemenin bileşimi ve metalürjik yapısı
- Şekillendirme sıcaklığı,
- Şekil değiştirme miktarı veya gerinim
- Gerinim veya deformasyon hızı

2.3.2. Karşılaşılan Problemler

100 yılı aşkın bir süredir yaygın olarak kullanılan ekstrüzyon prosesi donanım ve takım yönünden sürekli geliştirilmekte ve ekstrüze edilebilen malzeme ve mamul çeşidi sürekli artırılmaktadır. Bu gelişmelere paralel olarak üretilen mamullerin kalitesini iyileştirerek ıskarta oranının minimize edilmesine çalışılmaktadır. Ekstrüzyon yönteminde ürün kalitesini kötü yönde etkileyen faktörlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır;

- Döküm sonrasında elde edilen biyetlerin iç yapısının homojen olmaması
- Sürtünme
- Biyet yüzeyinin kalitesi

- Takım yüzeyinin kalitesi
- Takım tasarımı
- Yağlama
- Ekstrüzyon sıcaklığı
- Biyet-kovan sıcaklık dengesi
- Ekstrüzyon hızı
- Yardımcı donatım yüzeyleri

Bu faktörlerin bir kısmının veya tamamının ekstrüzyon işlemini etkilemesi sonucunda ürünlerin yüzeyinde ve iç kısımlarında çeşitli hatalar oluşmaktadır. Hatalar genellikle işlemin sonuna doğru ortaya çıkarsa da işlemin her kademesinde meydana gelmeleri mümkündür. Bu oluşumlar sonrasında ıskarta oranları artmakta, buna bağlı olarak malzeme, enerji, işgücü ve zaman kaybı ortaya çıkmaktadır.

Burada alüminyum ekstrüzyonunda sıklıkla karşılaşılan bazı problemler irdelenecektir;

Ekstrüzyon sonunda boşluk oluşumu

Ekstrüzyon işleminde zımba matrise yaklaşıncaya kadar işleme devam edilirse, biyetin sonunda konik bir boşluk oluşur. Bu hata kovan cidarındaki sürtünmeden dolayı meydana gelen akma düzensizliklerinden bağımsız olarak ortaya çıkmaktadır. Biyet sonunda ortaya çıkan boşluğun çapı ve derinliği gittikçe büyür ve ekstrüze edilen çubuk veya profilin içine doğru ilerler. Bu nedenle ekstrüzyon işleminde biyet tam olarak ekstrüze edilmez, biyetin bir kısmı ekstrüzyon artığı olarak bırakılır.

Boşluk oluşumunu azaltmak veya tamamen önlemek için ölü bölge yüksekliğinde bir ekstrüzyon artığı bırakılmalıdır. Ekstrüzyon artığının yüksekliği deneysel olarak belirlenebilmektedir. Kalın çubukların ekstrüzyonunda (küçük ekstrüzyon oranlarında) ekstrüzyon artığı, ince çubuklardakine (büyük ekstrüzyon oranı) nazaran daha uzun olmalıdır.

İkilenme

Ekstrüze çubuğun merkezi ile çevre bölgesi arasındaki bağlantının bozulması ile kesitinde ayrılma meydana gelmesine ikilenme denir. Kovan cidarında, matris ve matris tutucu yüzeyinde sürtünme olduğunda ve ekstrüzyon malzemesinin şekil değiştirme

direncinin biyet çevre bölgesinde biyet merkezine göre fazla olduğu durumlarda ikilenme oluşmaktadır. Biyet alın yüzeyinin yabancı maddelerle kaplı olması halinde de ikilenme oluşabilir.

Sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan plastik homojensizliklerin önlenmesi için kovan ve biyet sıcaklıklarının dengelenmesi gerekir. Ancak ürün kalitesinin vazgeçilmez olduğu durumlarda biyet boyunun %10-25'i kadar ekstrüzyon artığı bırakmak gerekebilir [8].

Ürünü doğrudan etkileyen bu hatalara ilave olarak proses performansını düşüren hatalar da önemlidir. Ürün kabul edilebilir sınırlar arasında elde edilse bile proses sırasında dikkat edilmesi gereken sıcaklık, basınç ve hız gibi parametreler kesit toleransları, ürün yüzey kalitesi, kalıp ömrü, enerji sarfiyatı gibi diğer ürün ve proses performanslarını etkileyecektir.

Bu çalışmada mukavemet, kesit ölçüleri ve yüzey kalitesi açılarından kabul edilebilir sınırlar dahilinde elde edilen farklı kesitlere sahip (farklı ekstrüzyon oranlarına sahip) ürünler için kalıp ömrü performansına yönelik uygun proses parametreleri olan biyet sıcaklığı, ekstrüzyon hızı ve kalıp şekli irdelenecektir.

3. BÖLÜM

DENEY TASARIMI ve TAGUCHİ METODU

Bu bölümde deney tasarımının temel ilkeleri verilecektir. Deney tasarımı 20. yüzyılda geliştirilen en güçlü istatistiksel araçlardan biri olup, mühendislik uygulamaları için vazgeçilmez nitelikteki deneysel çalışmanın bilimsel ve sistematik bir yaklaşımla kurgulanmasına olanak tanımaktadır. Objektif, güçlü ve verilerden anlam çıkarmaya dönük bir deneyin minimum maliyet ile gerçekleştirilebilmesi tasarım sürecinde izlenen sistematik stratejiye bağımlıdır.

Deney, hipotezleştirilmiş bir inancı desteklemek veya çürütmek ya da ürün, proses veya hizmet hakkında yeni bir bilgiyi açığa çıkarmak için yapılan planlı bir sorgulama metodu şeklinde tanımlanmaktadır [9]. Karmaşık bilimsel ve mühendislik uygulamalarında bu metodun planlama safhası istatistiksel bir yaklaşıma dayandırılmak durumundadır.

Tasarlanmış deney, bir prosesin çıktılarındaki değişimleri gözlemlemek ve tanımlamak üzere girdi faktörlerinin bilinçli olarak değiştirilmesi şeklinde yapılan test veya testler dizisidir. Proses, girdi malzemeyi çıktı ürüne dönüştüren makinelerin, metotların ya da insanların bir kombinasyonu olarak düşünülebilir. Çıktı ürün bir veya daha fazla gözlemlenebilir kalite özelliğine sahiptir. Bazı proses girdileri kontrol edilebilir iken bazıları gürültü diye de adlandırılan kontrol edilemeyen girdi faktörleridir. Deneylerin amacı şu şekilde sıralanabilir;

- Girdi faktörlerden hangilerinin çıktı üzerinde en çok etkili olduğunun tespit edilmesi,
- En uygun çıktının elde edilmesi için etkili girdi faktörlerinin alması gereken değerlerin tespit edilmesi

- Çıktı değerinin en az varyansa sahip olması için etkili girdi faktörlerinin alması gereken değerin tespit edilmesi
- Kontrol edilemeyen değişkenlerin etkilerini minimize etmek için etkili girdi faktörlerinin alması gereken değerin tespit edilmesi [10].

Deneylerin amacı kimi zaman da ileriye dönük yanıtları tahmin edebilmek için ortaya matematiksel bir model koymaktır. Bir deneyi düzenlerken araştırmacının karşılaşacağı sorunlardan biri de bu modelin en doğru sonuçlara ulaşabilirliğini temin etmek üzere mümkün olduğunca çok bilgiyi elde etmek için ihtiyaç duyulan en az gözlem sayısının belirlenmesidir. Gözlemler hem gözlemsel çalışmalardan ve hem de neden ve etki değişkenleri hakkında sonuçlar ortaya koyabilecek deneylerden elde edilebilir [9].

Deney tasarımında kullanılan bazı kavramların burada tanımlanması uygun olacaktır;

Kalite değişkeni (Yanıt Değişkeni):

Deneyde, ölçülmesi planlanan sonuç veya çıktıdır. Y veya y şeklinde gösterilir.

Faktör:

Deneye dahil edilen, yanıt değişkeni üzerinde etkili olabileceği düşünülen, araştırmacı tarafından belirlenen kontrol edilebilen değişkenlerin her biri olup, büyük harflerle gösterilir. (A,B gibi) Faktörler, sıcaklık, basınç, hız gibi nicel ve sürekli büyüklükler olabileceği gibi, bir malzemenin cinsi, bir cihazın türü veya bir sistemin açıklık-kapalılık durumu gibi nitel ve kesikli kavramlar da olabilir.

Düzey (seviye):

Faktörlerin deneyde alması planlanan değerlerinin her biridir. Deneyler 2, 3 veya 4 düzeyli olabilir. 2 düzeyli deneylerde genellikle nicel olarak küçük değer alt düzey, büyük değer ise üst düzey olarak kabul edilir. Düzeyler 1, 2, 3, 4 gibi rakamlarla gösterilebileceği gibi 2 düzeyli deneylerde (-) ve (+) veya (-1) ve (+1) şeklinde de gösterilebilir.

Her bir faktörün düzey sayısı ise o faktörü simgeleyen küçük harf ile gösterilir. (a, b gibi) Deneyler genellikle eşit düzeyli faktörlerden oluşmakla birlikte farklı düzey sayılarına sahip faktörleri olan karışık düzeyli deneylerde tasarlanabilir.

Deneme:

Bir faktör kombinasyonunun test edildiği tek bir deneydir.

Hata:

Aynı faktör kombinasyonlarının denenmesi halinde kalite değişkeninde görülen sapmadır. ε ile gösterilir [11].

Gürültü:

Bir deneyde kontrol edilemeyen ya da kontrol edilmesi oldukça güç olan fakat kalite değişkeni üzerinde etkisi olduğu düşünülen değişkenlere gürültü denir. Mühendislik uygulamalarında ortam sıcaklığı, ortam nemi, bir sistemdeki iletkenlerin direnci gibi faktörler sık karşılaşılan gürültü faktörleridir.

Tekrar:

Deneyin tamamının ya da bir kısmının birden fazla kez uygulanmasıdır. Hatayı ve gürültü faktörlerini tespit edebilmek için genellikle deneyler tekrarlı yapılır. Bir deneyin tekrar sayısı r ile gösterilir. Tekrar ile tekrarlı ölçüm birbirine karıştırılmamalıdır [11]. Örneğin bir seramik ürün kurutma prosesinin analizi için yapılan, bir ürünün proseste etkili olacağı düşünülen kurutma havası debisi, kurutma havası sıcaklığı ve kurutma havası hızı faktörlerinin aynı değerlerine belli bir süre maruz bırakılıp nem yüzdesinin ölçüldüğü deneyi ele alalım. Bu deneyde aynı ürünün nem yüzdesinin 3 kez ölçülmesi tekrarlı ölçüm iken, aynı türde aynı geometriye sahip fakat farklı ürünler için yapılan deneylerle elde edilen bağımsız gözlemler tekrardır.

Etki:

Bir faktörün kalite değişkeni üzerinde değişiklik yapabilme yeteneğinin büyüklüğüdür.

Etkileşim:

Bir faktörün kalite değişkenine olan etkisinin diğer faktör veya faktörlerin düzeylerine bağlı olması durumunda ortak faktör etkilerinin ortaya çıkışıdır.

Rastgeleleştirme:

Araştırmacı tarafından deneyde ortaya çıkarılacak olan kişsel yanlılığa ve sistematikliğe engel olmak için denemelerin deney birimlerine atanması ve uygulanacak olan denemelerin sırasının rasgele belirlenmesi işlemidir.

Bloklama:

Bir deneyin hassasiyetini artırmak için deney birimlerini gruplayarak parçalama veya bölmeye denir. Her bir bloktaki gözlemler benzer deney koşulları altında bir araya getirilir ve her bir bloktaki gözlemler farklı bloklardakilere göre daha homojendir. Bloklanmış iki ya da daha fazla denemenin karşılaştırılması, bloklanmamış bir düzendeki benzer karşılaştırmalardan daha hassas sonuçlar verir [11].

Mühendisler ve bilim adamları genellikle 2 tip ürün veya süreç geliştirme durumu ile karşılaşır. Bunlardan ilki kalite değişkenini daha iyi ve uygun bir değere ulaştıracak faktörün veya faktörlerin uygun değerlerini bulmak, ikincisi ise aynı performansı verecek yeni, daha ucuz, alternatif bir malzeme, tasarım veya yöntem bulmaktır [12]. Karşılaşılan her iki problem için de bir sistem üzerinde etkili olduğu düşünülen faktörlerin farklı düzeylerinin denenmesi gerekmektedir. Deneylerde yer verilen faktörler ve her bir faktörün değerlendirilecek düzey değerleri deneysel sınırları oluşturmaktadır. Bu deneysel sınırlar deneysel tasarım uzayını oluşturur [13].

Deneysel tasarım uzayındaki deneylerin gerçekleştirilebilmesi için aşağıda irdelenen çeşitli yöntemler geliştirilmiş olup her bir yöntemin avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Klasik Tasarım:

Deneme-yanılma olarak da tarif edilebilecek bu ilk test stratejisi, bir prosesin girdisi olan herhangi bir faktörün, o prosesin çıktısı üzerindeki etkisini belirlemek için diğer tüm faktörleri sabit tutarak, o faktörün değerini değiştirmek ve sonuç üzerindeki etkilerini gözlemlemektir. Ancak bu yöntem belli bir sistematik dahilinde olmayıp tamamen araştırmacının bilgi ve sezgilerine dayalıdır. İlk bilimsel çalışmalardan bu yana yaygın olarak kullanılan ve kolaylığı nedeniyle bundan sonra da kullanılacak olan bu yöntem faktör sayılarının fazla olduğu mühendislik uygulamalarında yetersiz, verimsiz, yavaş ve pahalıdır.

Faktörlerin Birer Birer Değiştirilmesi:

İncelenmesi gereken faktör sayısının fazla olduğu uygulamalar için geliştirilen diğer bir yöntem faktörlerin birer birer değiştirilmesidir. Bu yöntemde, diğer faktörler birinci düzeyde sabit tutularak 1. faktörün her iki düzeyi denenir. Hangi düzey daha olumlu ve

istenen sonucu verirse, faktör o düzeyde sabit tutularak diğer faktörlerin denenmesine geçilir ve işlem tüm faktörler tamamlanıncaya kadar sürdürülür. Bu metotta faktör sayısının 1 fazlası kadar deney yapılması yeterlidir, ancak etkileşimleri gözlemlemek mümkün olmamaktadır [12].

Faktörlerin birer birer değiştirilmesi yönteminin Tablo 3.1’de özetlenen uygulamasında 4 deney yapılmış ve her seferinde, her faktör için -1 düzeyinin daha iyi bir deney sonucu verdiği varsayılmıştır. 1. ve 2. deneylerde B ve C faktörlerinin düzeyleri sabit tutulmuş, A faktörünün değişik 2 düzeyi için elde edilen deney sonuçları y_1 ve y_2 kıyaslanmış ve y_1 ’in daha iyi olduğuna karar verilerek 3. denemeye geçilmiştir. 3. ve 2. denemelerin sonuçları kıyaslanmış ve B faktörünün de -1 düzeyinin kullanılmasının daha iyi sonuç vereceği anlaşılmıştır. Ancak A ve B faktörlerinin düzeylerinin aynı anda değiştirilememesinden dolayı faktörlerin birbirleri ile etkileşimleri gözlenememektedir.

Tablo 3.1. Faktörlerin Birer Birer Değiştirilmesi.

Deney sayısı	Faktör Düzeyleri			Deney sonucu
	A	B	C	
1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	-1	-1	+1	y_4

Deneyssel tasarımda faktör düzeylerinin gösteriminde değişik yöntemler kullanılmaktadır. Düşük düzey için -1, yüksek düzey için +1 gösterimi veya düşük düzey için 1, yüksek düzey için 2 gösterimi sıklıkla tercih edilmektedir.

Güneş ışığının bitki gelişimi üzerindeki etkisini araştıran bir bilim adamının sırasıyla deney ve kontrol grubu diye adlandırdığı eşit su ve gübre şartlarına sahip ancak güneş gören ve görmeyen iki ayrı bitkinin gelişimini nicel olarak izlemesi şeklinde örneklendirilebilir. Güneşin bitki gelişimi üzerinde olumlu etkisinin görülmesi üzerine güneşli bir ortamda az su ve çok su verilen bitkinin gelişimleri incelenebilir ve aynı prosedür gübre ve bitki türleri için tekrarlanabilir. Ancak bu deneyde bitki-su, bitki-gübre, bitki-güneş, güneş-su gibi etkileşimlerin olumlu ya da olumsuz etkileri gözlemlenemeyecektir.

Faktör Düzeylerinin Aynı Anda Değiştirilmesi:

Bir başka test stratejisi ise faktör düzeylerinin hepsinin aynı anda değiştirilerek sonuçların karşılaştırılmasının yapılmasıdır. Oldukça kolay olan bu yöntemde faktör etkileri tek tek belirlenememekte sadece nihai durum gözlemlenebilmektedir [12]. Tablo 3.2’de örneklendirilen yöntem genellikle uygun sonuç için faktörler üzerinde değil düzeyler üzerinde değişiklik yapılabilecek sistemlerin analizinde kullanılır.

Tablo 3.2. Faktörlerin Hepsinin Aynı Anda Değiştirilmesi.

Deney sayısı	Faktör Düzeyleri			Deney sonucu
	A	B	C	
1	-1	-1	-1	y ₁
2	+1	+1	+1	y ₂

3.1. Çok Etkenli (Faktöryel) Deneyler

Faktör düzeylerinin oluşturduğu deney tasarımı uzayındaki bütün kombinasyonları kapsayan deneylere çok etkenli deneyler ya da tam faktöryel deneyler denir. Bütün faktörlerin etkilerinin ve etkileşimlerinin tespit edilebileceği en uygun test metodu çok etkenli deney tasarımıdır. Ancak deney sayısı, düzey sayısı ve faktör sayısına bağlı olarak üstel biçimde arttığından bu yöntem mühendislik uygulamalarında pahalı ve kullanışsız olabilmektedir.

Çok etkenli deney tasarımında bütün faktörler ve bütün düzeyler için bütün kombinasyonların denenmesi söz konusudur. 2 düzeyli 3 faktörlü bir deneyin tam faktöryel şekilde tasarlanması örneklendirilirse Tablo 3.3 elde edilir.

Tablo 3.3. 2 düzeyli 3 faktörlü çok etkenli deney planı.

Deney sayısı	Faktör Düzeyleri			Deney sonucu
	A	B	C	
1	-1	-1	-1	y ₁
2	-1	-1	+1	y ₂
3	-1	+1	-1	y ₃
4	-1	+1	+1	y ₄
5	+1	-1	-1	y ₅
6	+1	-1	+1	y ₆
7	+1	+1	-1	y ₇
8	+1	+1	+1	y ₈

Çok etkenli deneylerde toplam deneme sayısı;

$$N=r.a.b.....k \quad (3.1)$$

şeklinde verilebilir. Burada r deneyin tekrar sayısı, a, a'ıncı faktörün düzey sayısı, b, b'nci faktörün düzey sayısı ve k, k'ıncı faktörün düzey sayısıdır. Mühendislik uygulamalarının bir çoğunda eşit düzeyli faktörler incelendiğinden faktör sayısı n olmak üzere eşitlik 3.1;

$$N= r.k^n \quad (3.2)$$

şeklinde özetlenebilir. Burada k bütün faktörler için eşit olan düzey sayısıdır.

Örneğin bir proseste 7 ayrı faktörün etkili olduğu düşünülüyorsa, bu faktörlerin etki derecelerini belirlemek için tekrarsız (r=1) olarak öngörülen, 2 düzeyli bir tasarımda 128 (2⁷) adet deney yapılmalı ve sonuçları gözlenmelidir.

Tablo 3.3'de verilen deney planına uygun şekilde deneylerin yapılması ve sonuçların Tablo 3.4'te verilen L8 dizayn matrisi yardımı ile analizi hem her bir faktörün söz konusu proses üzerindeki etkilerini hem de bu faktörlerin bütün kombinasyonlarının (2'li ve 3'lü) etkileşimlerini tespit etmemize olanak tanımaktadır. L8 dizayn matrisinin ilk 3 kolonu, 2 düzeyli 3 faktörlü bir deneyin düzey kombinasyonlarından oluşur. Diğer kolonlar ise ilgili faktörlerin düzeylerinin çarpımı ile elde edilmiştir [1].

Tablo 3.4. L8 Dizayn Matrisi.

Deney No	Etkiler						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
5	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Bu deneyde örneğin A faktörünün tek başına etkisini hesaplamak için A'nın -1 düzeyinin kullanılmasının sonucu olan y_1, y_2, y_3 ve y_4 çıktılarının ortalamasının, +1 düzeyinin kullanımı ile elde edilen y_5, y_6, y_7 ve y_8 çıktılarının ortalaması ile farkını gözlemek gerekir. Yani;

$$Etki_A = (y_5 + y_6 + y_7 + y_8)/4 - (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)/4 \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3 bütün faktörler için uygulanarak her bir faktörün tek başına etki dereceleri tespit edilebilir. İkili veya üçlü etkileşimlerin dereceleri ise Tablo 3.4'teki işaretler dikkate alınarak hesaplanır. Örneğin;

$$Etki_{AB} = (y_1 + y_2 + y_7 + y_8)/4 - (y_3 + y_4 + y_5 + y_6)/4 \quad (3.4)$$

şeklinde verilir [1].

3.2. Kesirli Deneyler

Bir deneyin büyüklüğünü ve o deneyden ne kadar sonuç elde edilebileceğini belirlemek üzere Serbestlik Derecesi kavramı kullanılmaktadır. Bir deneyin serbestlik derecesi deneme sayısının 1 eksiği kadardır, yani deneme sayısının 1 eksiği kadar kıyaslama yapılabilir ve veri elde edilebilir;

$$SD_{Deney} = \text{Deneme sayısı} - 1 \quad (3.5)$$

Bir faktörün etki derecesini belirlemek için gerekli serbestlik derecesi ise o faktörün denenen düzey sayısının 1 eksiği kadardır;

$$SD_{\text{Faktör}}=k-1 \quad (3.6)$$

Faktör etkileri için toplam serbestlik derecesi ise;

$$SD_{\text{Toplam}}=n \cdot SD_{\text{Faktör}} \quad (3.7)$$

Serbestlik derecesi kavramından anlaşıldığı üzere, bir deneydeki faktörlerin etkilerini belirlemek için SD_{Toplam} kadar mukayese yapmak yeterlidir. Örneğin 2 düzeyli 7 faktörlü bir deney çok etkenli şekilde yapılırsa $(2^7)=128$ deney gerçekleştirilecektir. Burada deneyin serbestlik derecesi $128-1=127$ iken faktör etkileri için toplam serbestlik derecesi;

$SD_{\text{Toplam}}=7 \cdot (2-1)=7$ 'dir. Yani faktör etkilerini belirlemek için 7 kıyaslama (8 deney) yeterli iken 128 deney yapılmaktadır. Geri kalan 120 deney 2'li ve diğer çoklu etkileşimlerin incelenmesi için yapılmaktadır. Oysa imalat uygulamalarının bir çoğunda 2'den fazla faktörün etkileşimlerinin gereksiz olduğu gözlenmektedir[1].

Bu çerçeveden bakıldığında çok etkenli deneylerin verimsiz ve kullanışsız oldukları görülecektir. Elde edilen sonuçlar mükemmel ama deney sayısı çok fazladır. İstatistikçiler tam faktöryel bir tasarımdaki kombinasyonların sadece $\frac{1}{2}$ 'si ya da $\frac{1}{4}$ 'ü gibi bir kısmını kullanarak daha verimli olan kesirli deneyleri geliştirmişlerdir. Ancak bu kombinasyonlar, çok etkenli tasarımın genel karakterini yansıtacak şekilde özenle seçilmelidir.

Kesirli deneyleri kullanmaktaki amaç ikili ve/veya daha yüksek derecedeki etkileşimlerin ihmal edilebileceği durumlarda deney sayısını azaltmak suretiyle deneylerin maliyetini düşürmek ve süresini kısaltmaktır. Kesirli deneyler çok etkenli deneyler için gereken gözlem sayısı n'nin belli bir kesrini içerir. Örneğin, 7 faktörlü, 128 gözlem gerektiren bir deney, kesirli deney olarak tasarlanırsa, $\frac{1}{2}$ kesir için $n=64$, $\frac{1}{4}$ kesir için $n=32$, $\frac{1}{8}$ için $n=16$ ve $\frac{1}{16}$ için $n=8$ gözlem gerektirir. Bu kesirli deneylerin her birinde n-1 kadar etki hesap edilebilir [1].

7 faktörlü 2 düzeyli bir deneyin verileri Tablo 3.5'e kaydedilebilir. Bu tabloda 128 farklı faktör kombinasyonundan elde edilecek 128 gözlem değeri için yer ayrılmıştır. Kesirli deney tasarımında ise mevcut 128 kombinasyonun sadece bir kısmı değerlendirmeye alınarak, bazı etkileşimler ihmal edilmek suretiyle deney yapılmaktadır. Örneğin 1/8 kesirli, yani sadece 16 farklı deneyin yapıldığı bir deney için Tablo 3.6'da verilen kayıt tablosunda belirtilen faktör kombinasyonları kullanılmıştır.

Tablo 3.5. 2 düzeyli 7 faktörlü tam eşlendirmeli deney için veri kayıt tablosu.

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																
E2	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																

Tablo 3.6. 2 düzeyli 7 faktörlü 1/8 kesirli deney için veri kayıt tablosu.

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																
E2	F1	G1																
		G2																
	F2	G1																
		G2																

3.3. İstatistiksel Analiz Yöntemleri

Deney tasarımı prosesinin son aşaması ürün ya da prosesin performans özelliklerini iyileştirmek üzere deney sonuçlarının çözümlenmesi ve yorumlanması aşamasıdır. Ürün ya da prosesin performansını hangi faktörlerin hangi derecelere etkilediği kararını vermek için deney sonuçları, gözlem metodu, sıralama metodu, sütun etkileri metodu,

grafiksel metot veya varyans analizi (Analysis of variance, ANOVA) metodu kullanılarak çözümlenebilir. Bu yöntemlerden bazıları doğası gereği öznel iken bazıları da nesnel karar üretme araçlarıdır. ANOVA, en nesnel yöntem olduğu için deneysel sonuçların yorumlanmasında ve gerekli kararların verilmesinde baskın olarak kullanılan istatistiksel yöntemdir [12]. Bu yöntemler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Gözlem Metodu

Gözlem metodu, prensip olarak basitçe deney sonuçlarını gözlemleyerek, arzu edilen deney sonuçlarını veren denemelerin tespit edilmesi ve bu denemelerde kullanılan faktör ve düzeylerin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Ancak faktör ve düzey sayılarının fazla olduğu deneylerde bu gözlemleri yapmak zorlaşacaktır. Ön hazırlık mahiyetinde bir yorum metodu olarak kullanılması önerilen yöntemin kullanımı En büyük en iyi, ve en küçük en iyi niteliğindeki sonuçlara daha kolay uygulanırken, hedef değer en iyi tarzı deneylerde de kullanılabilir.

Sıralama Metodu

Gözlem metodunun genişletilmiş bir şekli, tüm sonuçların en iyiden en kötüye doğru ilgili deneme kombinasyonları boyunca sıralanmasıdır. Bu yöntemde en iyiler tarafındaki düzeyler ile en kötüler tarafındaki düzeylerin tutarlılığı önemlidir. Eğer faktör ile ilgilenilen kalite değişkeni arasında güçlü bir ilişki var ise, o faktörün bütün birinci düzeyleri en iyiler tarafında kalırken bütün ikinci düzeyleri en kötüler tarafında, ya da tam tersi tarafta kalacaktır. Burada parametrik olmayan istatistiksel yöntemlerle belirlenen bir istatistiksel güven söz konusudur. Sıralama metodunun kısıtlarından biri etkileşimlerin değerlendirilememesidir [12].

Sütun Etkileri Metodu

Bu yöntem sonuçlar üzerinde büyük etkileri olan faktörlerin subjektif olarak belirlenmesi için basitleştirilmiş ANOVA olarak Taguchi tarafından kullanılmaktadır. Ortogonal dizimin her bir sütunu için, ikinci düzeylerin kullanılması ile elde edilen deney sonuçlarından birinci düzeylerin kullanılması ile elde edilen deney sonuçlarının çıkarılması şeklinde uygulanır. Bu şekilde yapılan analiz ile aşağıda verilen 3 değişik bilgi açığa çıkarılabilir;

- 1-Hangi faktörlerin etkili olduğu,
- 2-Bu faktörlerin bağıl olarak önem dereceleri,

3-Bu faktörlerin düzeyleri için hangi yönde iyileştirmelerin gerçekleştiği.

Bağıl olarak en büyük etkileri tespit etmek için farkların büyüklükleri birbirleri ile karşılaştırılır. Bağıl büyüklükler, (+ ve – işareti düzey numaralarıyla pozitif ya da negatif korelasyon anlamına gelir.) faktörlerin sonuçlara etkide göreceli önemini gösterir. En güçlü faktörler veya etkileşimler en büyük farka sahip olacaklardır. Kararlar bu farklara göre belirlenir [12].

Grafiksel Metot

Deney sonuçlarının faktörlerin düzeyleri ile ya da etkileşimleri değerlendirmeye imkan verecek şekilde faktör kombinasyonları ile değişimini gösteren grafikler, deney sonuçlarının analizinde kolaylaştırıcı bir diğer yöntemdir.

Varyans Analizi (ANOVA)

ANOVA test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiksel bir karar üretme aracıdır. Varyans analizi toplam varyasyonu bileşenlerine parçalayan ve serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler vb. gibi niceliklerin hesaplanması için kullanılan matematiksel bir tekniktir [12].

Bağımlı değişken sürekli ölçme düzeyine sahip iken, bağımsız değişken kategoriktir ya da gruplanmıştır. Amaç, bağımsız değişkendeki gruplar boyunca bağımlı değişkene ait ortalama değerlerin birbirinden farklılık gösterip göstermediğini tespit etmektir. Bir bağımsız değişken olduğu durum Tek-Yönlü Varyans Analizi (One-Way ANOVA), iki bağımsız değişken olduğu durum ise İki-Yönlü varyans analizi (Two-Way ANOVA) olarak adlandırılır. Eğer varyans analizi sonucunda grup ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilirse, analizin devamında çoklu karşılaştırma testleri yapılarak hangi gruplar arasında farklılık olduğu tespit edilmeye çalışılır. Toplam varyasyonun bileşenleri, kalite değişkenini etkileyen faktörlerden kaynaklanan varyasyon, etkileşimlerden kaynaklanan varyasyon ve hatalardan kaynaklanan varyasyondur.

Burada Tek Yönlü ANOVA ile ilgili olarak Varyans Analizi tablosu ve hesaplama formülleri verilecektir.

Tablo 3.7. Varyans analizi sonuç tablosu.

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F _{Hesaplanan}
Deneme	k-1	KT _{Deneme}	KO _{Deneme}	KO _{Deneme} /KO _{Hata}
Hata	N-k	KT _{Hata}	KO _{Hata}	
Genel	N-1	KT _{Genel}		

Varyans analizi sonuç tablosunda yer alan terimler şu şekilde tanımlanır;

$$KT_{Genel} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Y_{ij}^2 - \frac{T_{..}^2}{N} \quad (3.8)$$

$$KT_{Deneme} = \sum_{j=1}^k \frac{T_{.j}^2}{n} - \frac{T_{..}^2}{N} \quad (3.9)$$

$$KT_{Hata} = KT_{Genel} - KT_{Deneme} \quad (3.10)$$

$$KO_{Deneme} = \frac{KT_{Deneme}}{sd_{Deneme}} \quad (3.11)$$

$$KO_{Hata} = \frac{KT_{Hata}}{sd_{Hata}} \quad (3.12)$$

Hesaplanan F değerleri, standart tablolarda verilen F değerleri ile kıyaslanarak hipotezlerin doğruluğuna karar verilir.

3.4. Taguchi Metodu

Deneyisel Tasarım 1920'lerde İngiliz istatistikçi Ronald Fisher tarafından tarım alanında yapılan araştırmalar esnasında bulunmuş ve geliştirilmiştir. Yöntem, sonraki yıllarda Amerika'da, çeşitli gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama düzeylerinin çeşitli

ürünler üzerindeki etkilerini belirlemek üzere yoğun biçimde kullanılmış ancak uygulamalar tarım sektörü ile sınırlı kalmıştır [1].

1970’li yıllara kadar deneysel tasarımın temel prensipleri batıda pek fazla bilinmez iken Japonya’da oldukça yoğun kullanım alanına sahipti. Japon mühendisler bu kavramlara çok fazla ilgi göstermiş ve sonunda da deney tasarımı metotları Amerika’da olduğundan çok daha güçlü bir mühendislik enstrümanı haline gelmişti. 1980’lerin başında yönetime yeni bir yaklaşım getiren Japon bilim adamı Genichi Taguchi çevre koşullarından etkilenmeyecek, düşük varyasyona sahip, sağlam ürün ve proses tasarımı için kendi ismi ile anılacak metodu geliştirmiştir [10]. Kalite kontrol çalışmalarından yola çıkılarak geliştirilen Taguchi metodu sonraları yeni ürün tasarımı ve Ar-Ge çalışmalarında da yoğun biçimde kullanılmıştır.

Taguchi Felsefesi şu şekilde özetlenebilir;

1-Rekabetin olduğu bir ekonomide kaliteyi sürekli geliştirmek ve maliyetleri azaltmak işletmelerin kalıcılığı için zorunludur. Sürekli bir kalite geliştirme programı ürün hedef değerlerinden sapmaları sürekli azaltmayı içerir.

2-Bir ürünün kalitesine ait önemli bir boyut da o ürünün toplumun bütününde meydana getirdiği kayıptır. Bir ürünün performansındaki bir sapmadan dolayı tüketicide meydana getirdiği kayıp sapmanın karesi ile orantılıdır.

3-Bir ürünün kalitesi ve maliyeti, ürünün tasarımı ve üretim prosesi tarafından belirlenir. Ürünün imalat öncesini (pazar araştırma, tasarım ve proses geliştirme) ve imalatı esnasında yapılan faaliyetler ile sonrasını ayıran ve bu safhalara sırasıyla Off-line ve On-line Kalite Kontrol adlarını veren Taguchi, her iki aşamayı da kendi içlerinde sistem, parametre ve tolerans tasarımı safhalarına bölmüştür.

4-Bir ürünün performansındaki sapmayı azaltmak için ürünün performans karakteristikleri üzerinde etkili olan parametrelerin lineer olmayan etkilerini kontrol altına almak gerekir. İstatistiksel olarak tasarlanan deneyler ürün veya proseslere ait performans sapmalarını azaltmak için kullanılır [14].

Taguchi metodunun, belirgin esaslarından biri, kesirli deney tasarımının, Matematikçi Jacques Hadamard’ın icat ettiği Ortogonal Dizimler ile yapılmasına dayanmasıdır.

Uygun ortogonal dizimin öngördüğü şekilde yapılan deneyler, varyans analizi ya da Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi metotları ile değerlendirilip yorumlanır. Optimum parametreler belirlenir ve yapılacak doğrulama deneyleri ile uygunluğu ispatlanır [12].

Taguchi metodu ülkemizde 1990'lı yılların başında kullanılmaya başlanmış ve sanayideki uygulamalara dönük olarak yapılan çalışmalarda oldukça geniş bir yelpazede kullanım alanına ulaşmıştır. Aydın ve Bayrak [15,16] yaptıkları çalışmalarda metodu uygulamalı olarak irdelemişlerdir. Canıyılmaz [14], plastik şalter gövdelerinin mukavemetini artırıcı bir optimizasyon problemini kullanarak Taguchi metodunu özetlediği çalışmasında ayrıca kaymalı yataklarda bir uygulama yapmış ve yatak parametrelerinin etki derecelerini belirleyerek optimum tasarım elde etmiştir.

Erzurumlu ve Özçelik [17] enjeksiyon kalıbıyla üretilmiş termoplastik parçalardaki çekme ve çökmenin azaltılmasına ilişkin bir çalışma yürütmüşlerdir. Ferah [18], alüminyum profillerin elektrostatik toz boyama prosesine tabi tutulduğu bir tesiste, optimum boya kalınlığı ve maksimum darbe direnci için, 8 ayrı faktörün etki derecelerini L18 dizimi kullanarak irdelemiştir.

Şahin ve ark. [19] Taguchi metodunu kullanarak 8 ayrı parametrenin ısı transferi üzerindeki etki derecelerini incelemek üzere 3 düzeyli bir deney tasarlamış ve optimum bir ısı değiştiricisinin özelliklerini belirlemişlerdir. Baynal [20], Taguchi metodunu otomotiv endüstrisinde kullanılan plastik parçaların üretim prosesinde uygulamış ve optimum geometri ve özelliklere sahip ürünlerin üretimi için bir proses optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Çok yanıtli kalite karakteristiklerinin kullanıldığı çalışmada prosesteki 13 parametre 3 farklı kalite karakteristiği için irdelenmiştir.

Literatürde Taguchi Metodunun yeni ürün geliştirmeye yönelik uygulamaları da mevcuttur. Ülkemizde ise yöntem, Ar-Ge çalışmalarında oldukça sınırlı olarak kullanılmaktadır. Chan ve Ko [21] iki zamanlı bir motorun ateşleme ve yakıt sistemini tasarlamak üzere Taguchi metodunu kullanmıştır. Fowlkes ve Creveling [13] ise bir lazer yazıcının kağıt alma mekanizmasının tasarımında Taguchi yöntemini kullanmıştır. Yazıcının kağıdı birer birer almasında yaşanan problemleri çözmek amacıyla optimum parametreler belirlenmiştir. Hsiang ve Kuo [22] çalışmalarında magnezyum alaşım levhaların sıcak ekstrüzyon prosesini irdelemiştir.

Taguchi Metodu uygulamalarına hizmet sektöründe pek fazla rastlanmamaktadır. Bunun başlıca sebepleri şu şekilde sıralanabilir;

- Hizmet faaliyetlerinin göreceli olması nedeniyle hizmet performansının ölçümünün güç olması,
- Hizmet performansının çoğu zaman hizmeti sağlayan kişinin davranış ve yaklaşımına bağlı olması ve zamanla değişiklik göstermesi,
- Kontrol faktörleri ve bunların performans özelliği üzerindeki etkilerinin tespitinin ve ölçümünün güç olması

Ancak müşteri şikayetlerine cevap süresinin azaltılması, siparişlerdeki hataların azaltılması, bekleme sürelerinin azaltılması gibi uygulamalara rastlanmaktadır [23].

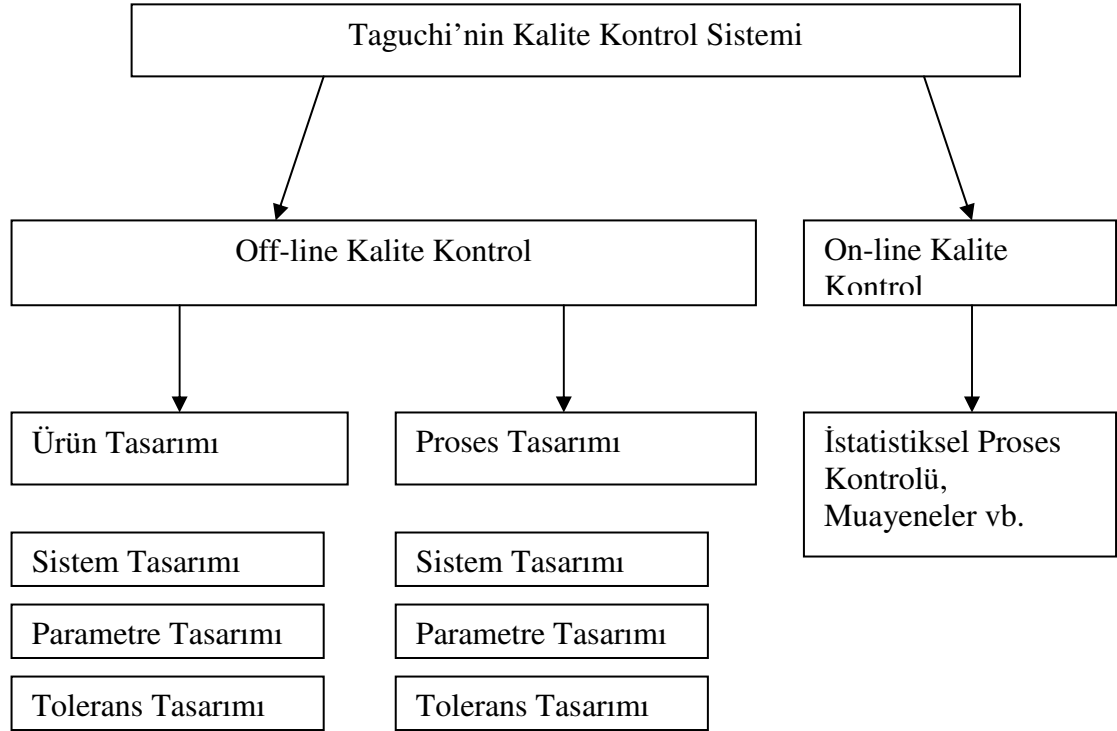
Kowalick [24] kendi ismi ile kurduğu reklam şirketince hazırlanan reklam filmleri ve afişlerini basına sunmadan önce Taguchi Metodu ile tasarladığı bir deney planı çerçevesinde belli sayıda insan ile paylaşmaya ve aldığı tepkilere göre reklam kampanyasının fayda analizini yaparak gerekli gördüğü revizyonları düzeltmeye yönelik bir çalışma yapmıştır.

3.4.1.Taguchi'nin Kalite Kontrol Sistemi

Toplam Kalite Yönetiminin (TKY) temelini oluşturan “sürekli geliştirme (kaizen)” yaklaşımında genel çalışma çerçevesi olarak Deming'in PUKÖ (Planla-Uygula-Kontrol Et-Önlem al) çemberi kullanılır. PUKÖ süreci temelde iyileştirme için deney yapılmasını önermektedir. Mevcut şartlar yerine farklılarını deneyerek üründe gelişme sağlanması hedeflenmektedir.

Taguchi PUKÖ sürecinde yer alan faaliyetleri iki bölüme ayırmaktadır. Pazar araştırması, ile ürün ve üretim prosesinin geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içeren Off-line Kalite Kontrol, üretim başlamadan önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarını kapsar. On-line Kalite Kontrol ise ürünün imalatı sırasındaki ve imalat sonrasındaki (servis, bakım vb.) kalite kontrol faaliyetleri olup istatistiksel proses kontrolü, test ve muayeneler bu kapsamdaki faaliyetlerdir.

Taguchi Metodu Off-line Kalite Kontrol içinde ürün ve proses tasarımı aşamalarında kullanılmaktadır. Her iki aşama için sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı alt safhaları geliştirilmiştir [1].



Şekil 3.1. Taguchi'nin Kalite Sistemi.

Metodun ilk aşaması olan sistem tasarımı aşamasında ürünün ya da prosesin fonksiyonunu yerine getirebilmesi için gerekli sistemler ve teknolojiler belirlenir. Ürünle ilgili pazarın boyut ve özellikleri, tasarımı ve üretimi için mevcut bilimsel ve mühendislik bilgileri, seçilecek malzeme ve prosesler bu aşamanın konularını oluşturur [14].

Taguchi'ye göre ürün kalitesinin en belirleyici aşaması parametre tasarımı aşamasıdır. Ürün parametre tasarımı, ürünün malzemesi, formülasyonu, fiziksel ve kimyasal özellikleri için optimum değerlerin belirlenmesi anlamına gelir. Proses parametre tasarımı ise herhangi bir imalat prosesindeki hız, sıcaklık, basınç vb. parametrelerin optimize edilmesidir. Bu çalışma da temelde bir proses parametre tasarımı çalışmasıdır.

Parametre tasarımında amaç, üründe veya proseste varyasyon yani hedef değerden sapma ya da kalitesizlik yaratan faktörlerin değerlerini, kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini de elimine edecek şekilde, optimal seçerek ürün ve prosesteki varyasyonu minimize etmektir. Taguchi bu amaca yönelik tasarım çalışmasını sağlam tasarım (robust design) olarak adlandırmaktadır [1].

Parametre tasarımının varyasyonu azaltmada yetersiz kaldığı hallerde tolerans tasarımı uygulanır. Bir ürün veya prosesin tasarlanmasında etkili faktörlerin uygun değerleri belirlense dahi bu parametreler çoğu zaman bir tolerans dahilinde kullanılacak, bu durum da kalite değişkeninde varyasyon oluşturacaktır. Bu toleranslardan kaynaklanan varyasyonların da minimize edilmesi gerekir. Taguchi kayıp fonksiyonu kavramı ile varyasyonun mali bir zarar olarak tüketici ve üreticiye yansıdığı görüşünü ileri sürmüş ve tolerans tasarımına yeni bir boyut getirmiştir.

Tolerans tasarımında genel olarak 3 tip yaklaşım benimsenmiştir;

1-En büyük - en iyi: Kalite değişkeninin değerinin büyümesinin istendiği problemler bu tip yaklaşımla ele alınır. Kalite değişkeni için bir üst sınır olmayıp değer büyüdükçe tasarım iyileşmektedir.

2-En küçük - en iyi: Kalite değişkeninin değerinin küçük olmasının istendiği problemler bu tip yaklaşımla ele alınır. Kalite değişkeni için bir alt sınır olmayıp değer küçüldükçe tasarım iyileşmektedir.

3-Hedef değer en iyi: Sapmaların iki yönlü olarak değişebildiği boyutsal özellikler gibi kalite değişkeni içeren problemlerde kullanılır. Kalite değişkeninin değerinin önceden belirlenmiş nominal değere yakın olması istenir.

Tanımlanan deneysel tasarım safhaları ürün tasarımı için taşıt krikosu tasarımı ile örneklendirilebilir. Taşıtın tamir ve bakımı için kullanıcısı tarafından belli bir mesafe yüksekliğe kaldırılması amacıyla tasarlanan bir krikonun, mekanik ya da hidrolik esaslara göre mi çalışacağı, yük kapasitesi, mekanizmasının ne şekilde olacağı gibi ilk karar verilmesi gereken konular sistem tasarımının konularını oluşturur. Hidrolik kriko için kullanılacak malzeme, hidrolik sıvısı, mekanizmadaki elemanların boyutları ve uygulanacak kuvvet ile ilişkileri gibi konular parametre tasarımını, söz konusu hidrolik

sıvının hacmi ve krikonun kullanılacağı muhtemel ortam sıcaklıkları gibi varyasyonu artırıcı konular da tolerans tasarımının unsurlarını oluşturacaktır.

3.4.2. Ortogonal Dizimler

Kesirli Deneylerin ne şekilde tasarlanacağı konusunda Taguchi'nin yaklaşımı ortogonal dizimlerin kullanılmasıdır. Ortogonal dizimler kullanılarak hangi denemede hangi faktörün hangi düzeyinin kullanılacağını belirlemek Taguchi metodunun özünü oluşturur. Taguchi uzun çalışmalar sonrasında standart deneme planları belirlemiş ve bunların Hadamard'ın ortogonal dizimleri ile özdeş olduğunu görmüştür [12]. Bu dizimler baz alınarak yapılacak denemeler ile tam faktöryel bir denemenin sonuçlarının aynı olacağı iddiasında bulunmuş ve haklılığını yaptığı pek çok uygulama ile göstermiştir [14].

Ortogonal dizimler L Harfi arkasına deney sayısı eklenerek gösterilir. En çok kullanılan Ortogonal Dizimler düzeylerine göre şöyledir;

- 2 düzeyli: L4, L8, L12, L16, L32, L64
- 3 düzeyli: L9, L18, L27
- 4 düzeyli: L16 ve L32 (Yeniden düzenlenmiş)

Standart ortogonal dizimlere pek çok kaynaktan ulaşmak mümkündür, burada sadece en yaygın olarak kullanılan L-8 dizimi verilecektir. (Tablo 3.8) L-8 dizimi 8 satır (deneme sayısı) ve 7 sütundan oluşmaktadır. Bu dizim aslında 7 faktörlü, 2 düzeyli 128 deneyden oluşan bir tam faktöryel tasarım içerisinde seçilmiş 8 ayrı kombinasyondan ibarettir ve 1/16 kesirli bir deney konfigürasyonudur. Ancak bu kombinasyon özel ve eşsiz bir kombinasyondur. Ortogonal dizimler her faktörde eşit sayıda düzey bulundurulur ve 1. deneme hariç tutulursa dizimin satır ve sütunları aynıdır [12].

Tablo 3.8. L8 Ortogonal Dizimi.

Deney No	Sütun No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
3	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
4	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
5	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1

3.4.3. Kayıp Fonksiyonu

Kalite uzun yıllar bir ürünün tasarlandığı gibi üretilmesi olarak tanımlanmıştır. Bir ürün tasarımcısının belirttiği ölçü ve normlara, belirlenmiş toleranslar dahilinde uyuyorsa kaliteli kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, tolerans limitleri arasında olan ürünü simgelemesi açısından Goalpost (Kale Direği) yaklaşımı adını almış ve uzun zaman kabul görmüştür. Oysa günümüzde kalite kavramı içerisinde müşteri beklentileri büyük bir yer tutmaktadır. Bir ürün, tasarımcısının öngördüğü kriterlere ne kadar uygun üretilse de müşteri tarafından kabul edilmedikçe kaliteli olarak nitelenemez ve pazar bulamaz. Bu yeni durum Taguchi'nin kalite mühendisliğine kazandırdığı bir başka kavram olan kayıp fonksiyonu ile izah edilebilir.

Taguchi, bir ürünün sahip olması gereken nominal ya da hedef ölçülerden sapma miktarını, bütün toplumun uğrayacağı maddi zarar ile ilişkilendirmiş ve bunu matematiksel olarak şöyle ifade etmiştir;

$$L(y) = k.(y - T)^2 \quad (3.13)$$

Burada, y ürünün ölçülen gerçek değeri, T nominal ya da hedef değer, k ise sapmayı parasal bir birime dönüştürecek uygun bir katsayıdır. Gerçek ölçü değeri ile hedef değer arasındaki fark yani varyasyon topluma karesel şekilde artan bir zarar olarak dönmektedir.

Ürün tasarımcısının öngördüğü toleranslar dışında üretilmişse, işletmeye ıskarta ya da yeniden işleme maliyetleri olarak dönecektir. Ancak ürün, toleranslar dahilinde üretilip piyasaya sunulduğunda da, ömrü boyunca iade talepleri, garanti masrafları, tamir masrafları vb. şekillerde kullanıcıya ya da bütün topluma bir mali külfet getirecektir.

Taguchi'nin kayıp fonksiyonunun en önemli özelliği kaybı azaltmak için varyasyonun azaltılması gerekliliğini yani, ürün ve prosesin sürekli iyileştirilmesi gerekliliğini ortaya koymasındır. Yaklaşım bu yönüyle Japonların “Kaizen” ilkesini desteklemektedir.

3.5. Taguchi Metodu Uygulama Adımları

3.5.1. Problemin Tespiti ve İfade Edilmesi

Sistemdeki problemin belirlenmesi ve net bir şekilde ifade edilmesi, deney tasarımındaki en önemli adımı oluşturmaktadır. Çünkü bütün deney bu basamağın çıktıları üzerine inşa edileceğinden yapılacak hata tekrar başa dönülmesine sebep olabilecektir.

Bu konuda yapılan en büyük hata, yönetim, mühendislik, ve pazarlama gibi, bir sistem içindeki farklı bölümler arasındaki yanlış anlamalar ya da ifade yetersizlikleridir. Sistem ya da ürünle ilgili olan her tarafın görüşü alınmalıdır. Özellikle imalat sistemlerindeki problemlerin tespitinde bizzat ürün ve imalat ile ilgili müşteri, tedarikçi ve operatör gibi grupların görüşlerine eksiksiz yer verilmelidir. Gerçek problem araştırılmalı, problemin belirtilerinin problemmiş gibi algılanmasından kaçınılmalıdır.

Sorunlar, çoğu zaman ideal durum ile gerçek durum arasındaki farktan ileri gelmektedir. Genellikle ürün uygunsuzlukları veya verimsizlik (makine arızaları, yüksek enerji sarfiyatları ya da ıskarta ürünler) şeklinde, piyasa, müşteri ya da operatör şikayeti olarak karşımıza çıkarlar. Örneğin bir prosesten her zaman tasarımdaki toleranslar dahilinde ürün çıksa bile ürünler arasındaki varyasyonun büyük olması bir sorundur ve azaltılması için bir deney tasarımı gerçekleştirilebilir.

Sorunların tespitinde Kalite Fonksiyon Göçerimi (QFD), Pareto analizi, beyin fırtınası öncelikli başvurulacak yöntemlerdir.

3.5.2. Kalite Karakteristiklerinin Tespiti

Ürün ya da prosesteki problemin tespitinin ardından, sistemde sorgulanacak çıktı niteliğindeki kalite karakteristiği tespit edilmelidir. Örneğin araç boyama prosesinin iyileştirilmesine yönelik bir problem için kalite karakteristiği boya kalınlığı ya da boyama süresi iken araç boyama prosesindeki varyasyon probleminin kalite karakteristiği boya kalınlığı varyasyonu olabilir.

Kalite karakteristiği seçilirken prosesin niteliği dikkate alınmalıdır. Ürünün taşınması, sağlaması beklenen kalite karakteristiği bir sistem için bir ya da daha fazla olabilir. Ancak birden fazla kalite karakteristiği seçilmesi halinde analiz ayrı ayrı yapılmalı, sonuçlar gerekirse daha sonra bir ağırlık çarpanı kullanarak birleştirilmelidir. Örneğin bir araç lastiği tasarımında kalite karakteristiği hem lastik sürtünme katsayısı hem de lastik ömrü olabilir. Her iki karakteristik farklı müşteri gruplarının taleplerine göre ağırlıklandırılabilir.

3.5.3. Kontrol ve Gürültü Faktörlerinin Tespiti

Kontrol faktörleri, ürün ya da proses üzerinde etkili olduğu varsayılan kontrol edilebilir girdilerdir. Talaşlı imalat örneğinde proses üzerinde etkili olması muhtemel kesici uç, dalma derinliği, ilerleme hızı, dönme hızı gibi kontrolü elimizde olan faktörler kontrol faktörleridir. Deneysel tasarımdan maksat bu faktörlerin farklı düzeylerini kullanarak, kalite karakteristiğini ne şekilde etkilediklerini tespit etmektir.

Sistem üzerinde etkili olması muhtemel, sıcaklık, nem gibi kontrol edilmesi güç ya da kontrol edilmesi düşünülmeyen faktörler ise gürültü faktörleri olarak adlandırılır. Gürültü faktörleri kısa bir süreliğine kontrol altında tutulabilir ancak sürekli kontrolleri oldukça pahalıdır. Taguchi Yaklaşımının önde gelen getirilerinden biri de gürültü faktörlerinin ürün ya da proses üzerindeki etkisini minimize ederek her koşulda sağlam bir tasarım elde etmektir.

Kontrol ve Gürültü faktörlerinin tespiti, oldukça önemli bir basamaktır. Beyin Fırtınası, Sebep-Sonuç diyagramları ve akış şemaları kullanılarak yapılacak tespitte bir faktörün

gözden kaçması ya da önemsenmemesi tamamen yanlış bir tasarım ile sonuçlanabilir [12].

Kontrol ve Gürültü faktörleri sıcaklık, basınç, zaman, hız, akım gibi sayısal büyüklükler şeklinde ifade edilebilen sürekli faktörler olabileceği gibi, malzemenin cinsi, bir durumun varlığı veya yokluğu gibi soyut faktörler de olabilirler.

3.5.4. Faktör Düzeylerinin Tespiti

Bir faktörün etkisini belirleyebilmek için en az iki düzeyinin kullanılması gerekmektedir. Düzey sayısının yüksek olması deneyin maliyetini artıracacağı için seçimi iyi yapılmalıdır. Kalite karakteristiği üzerinde güçlü etkisi olması beklenen bazı faktörleri, muhtemel pek çok faktör içinden ayıklamak için yapılan tarama deneylerinde, deneyin boyutunu küçük tutmak adına iki düzey kullanımı tavsiye edilmektedir. Ancak faktörler arasında soyut faktörler yer alıyorsa bu faktörlerin tarama deneylerinde 3 düzeyli olarak denenmesi uygun olacaktır [12].

3.5.5. Ortogonal Dizimin Seçimi

Tasarımda hangi Ortogonal Dizimin (OD) kullanılacağı; faktör ve incelenmek istenen etkileşim sayısına, faktörlerin düzey sayılarına ve deneysel kararlılık ve maliyet sınırlarına bağlıdır.

Kesirli deneylerin kullanımı halinde faktörler dizimlerin sütunlarına atanırken birbirlerinin yerlerini alabilirler. Örneğin Tablo 3.8’de verilen L8 Dizayn Matrisi 4 faktörlü bir deney için kesirli olarak kullanılabilir. 4 faktörlü 2 düzeyli bir deneyde 16 deneme yapılması gerekmekte ve tam eşlendirme için 15 sütunlu L16 Matrisi kullanılmalıdır. Ancak 1/2 kesirli tasarlanan deneyde L8 Matrisi kullanılabilir ve ilk 3 faktör aynı kalmak şartıyla 4. faktör 7. sütuna atanabilir. Bu durumda $ABC=D$ olacaktır. Eşitliğin her iki tarafının C ile çarpıldığı düşünülürse $AB=CD$ elde edilir. Bu şekilde çoğaltılabilecek eşitlikler ile oluşan çiftlere eşad adı verilir [1].

Deneyisel Kararlılık kavramı ise, bir deneyde oluşan eşadların durumuna göre kesirli deneylerin sınıflandırılmasında kullanılan yararlı bir yöntemdir. Kararlılık düzeyleri şu şekilde özetlenebilir.

- Kararlılık-1: Ana etkiler 2 faktörlü etkileşimler ile eşitlenebilirler.
- Kararlılık-2: Ana etkiler 3 faktörlü etkileşimler ile veya 2 faktörlü etkileşimler birbirleri ile eşitlenebilirler.
- Kararlılık-3 : Ana etkiler 4 faktörlü etkileşimler ile veya 2 faktörlü etkileşimler, 3 faktörlü etkileşimler ile eşitlenebilirler.
- Kararlılık-4: Bütün faktör ve etkileşimler ayrı kolonlarda yer alırlar [10].

Faktör sayılarına göre 2 ya da 3 düzeyli OD'nin kullanımına karar verilecektir. Eğer deneyde farklı düzeyler içeren faktörler yer alıyorsa baskın düzeye göre OD'lerin yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

Faktör sayıları ve kararlılık düzeylerinden hareketle kullanılacak OD'nin seçimi 2 düzeyli faktörler için Tablo 3.9'a, 3 düzeyli faktörler için ise Tablo 3.10'a göre yapılır [12]. Tablolarda “*” tekrarlı deneyleri, “X” tasarımın mümkün olmayacağı durumları göstermektedir.

Tablo 3.9. 2 düzeyli OD'lerin seçimi.

OD	Faktör Sayısı (2 düzeyli)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
L4	4	4	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
L8	4*	4*	4	2	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X
L16	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
L32	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
L64	4*	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2
L128	4*	4*	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2	2
L256	4*	4*	4*	4*	4*	4*	4*	4	3	2	2	2	2	2	2

Tablo 3.10. 3 düzeyli OD'lerin seçimi.

OD	Faktör Sayıları (3 düzeyli)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
L9	4*	4*	1	1	X	X	X	X
L18	1	1	1	1	1	1	1	1
L27	4	4	4	2	1	1	1	1

Faktör düzeyleri ve faktör sayıları üzerinde seçim yapmak çoğu zaman mümkün değil iken deney bütçesi için ayrılan mali imkanlar nispetinde deneyin Kararlılık düzeyi seçilebilir.

Uygun Ortogonal Dizim belirlendikten sonra Tablo 3.11 ve Tablo 3.12 yardımı ile OD'nin sütunlarına faktör atamaları gerçekleştirilir [12]. Bu tablolarda parantez içindeki sütunlar herhangi bir sıra ile kullanılabilir.

Tablo 3.11. 2 düzeyli ortogonal dizimlerin sütunlarına faktör atanması.

OD	Faktör Sayısı	Sütun numarası	Kararlılık
L4	1-2	1,2	4
	3	1-3	1
L8	1-3	1,2,4	4
	4	1,2,4,7	2
	5-7	1,2,4,7, (3,5,6)	1
L12	1-11	1-11	1
L16	1-4	1,2,4,8	4
	5	1,2,4,8,15	3
	6-8	1,2,4,7,8, (11,13,14,)	2
	9-15	1,2,4,7,8,11,13,14, (3,5,6,9,10,12,15)	1
L32	1-5	1,2,4,8,16	4
	6	1,2,4,8,16,31	3
	7-16	1,2,4,8,16,31,(7,11,13,14, 19,21,22,25,26,28)	2
	17-31	1,2,4,7,8,11,13,14,16,19,21,22, 25,26,28,31,(3,5,6,9,10,12,15, 17,18,20,23,24,27,29,30)	1

Tablo 3.12. 3 düzeyli Ortogonal dizimlerin sütunlarına faktör atanması.

OD	Faktör Sayısı	Sütun numarası	Kararlılık
L9	1-2	1,2	4
	3-4	(1,2,3,4)*	1
L18	1-8	1-8	1
L27	1-3	1,2,5	4
	4	1,2,5,(9,10,12,13)	2
	5-13	1,2,3,4,5, (6-13)	1

3.5.6. Deneyin Yapılması

Ortogonal Dizim seçildikten ve kolonlarına faktör ve etkileşimlerin ataması yapıldıktan sonra deneylerin fiilen gerçekleştirilmesine başlanabilir. OD'nin öngördüğü şekilde, faktörlerin düzeyleri kullanılarak deneyler yapılır, ancak burada karar verilmesi gereken iki nokta deneylerin tekrarlı yapılıp yapılmayacağı ve hangi sıra ile yapılacağıdır.

Deney sonucunda ölçülen kalite karakteristiği sürekli bir veri ise (sıcaklık, basınç, hız gibi) deneyleri tekrarlamak sadece güvenilirliğini artıracaktır. Ancak kalite karakteristiği açık-kapalı, var-yok, 1-0 gibi süresiz bir veri ise deneyler muhakkak tekrarlı şekilde yapılmalıdır. Çünkü en ufak bir hata sonuçları büyük ölçüde etkileyecektir. Eğer mümkünse kalite karakteristiğinin sınıf sayısı da artırılmalıdır. (açık-yarı açık-kapalı gibi) [12].

Deneyler makinelerin ve ölçüm cihazlarının hatalarını en aza indirmek, önceden saptanamayan hata kaynaklarının etkilerini azaltmak için OD'nin öngördüğü sıra ile değil de rasgele yapılmalıdır. Faktörleri değiştirmenin kolay olduğu durumlarda deney sırasının tamamen gelişigüzel belirlenmesi uygun olacaktır. Ancak faktörleri değiştirmenin zor olacağı durumlarda tekrarların ardı ardına yapılmasına müsaade edilebilir.

3.5.7. İstatistiksel Analiz ve Deney Sonuçlarının Yorumlanması

Deney sonuçlarının çözümlenmesinde gözlem metodu, sıralama metodu, sütun etkileri metodu, grafiksel metot ve varyans analizi (ANOVA) metodu kullanılabilir. Taguchi, bir anlamda basitleştirilmiş ANOVA olan sütun etkileri metodunu önermektedir [12].

Sütun etkileri metodu her bir sütun için, 1. düzeyin kullanılması ile ortaya çıkan deney sonuçlarının toplamının 2. düzeyin kullanılması ile ortaya çıkan deney sonuçları toplamından çıkarılması esasına dayanır. Böylece her bir sütun için, sayısal bir değer elde edilecek ve bu değer büyükliği ilgili sütunda incelenen faktör ya da etkileşimin etki derecesine karar verecektir.

Deney sonuçlarının yorumlanması noktasında Taguchi'nin önerilerinden bir diğeri ise Sinyal Gürültü Oranlarıdır. Performans kriteri olarak kullanılmak üzere önerilen Sinyal

Gürültü Oranları (S/G) kontrol edilemeyen gürültü faktörlerinin varlığı halinde varyasyonun bir ölçüsüdür. Taguchi, parametre tasarımının mühendislik uygulamalarında kullanılmak üzere 60'ın üzerinde sinyal gürültü oranı tanımlamıştır [23]. Bunların en yaygın bilinenleri; En büyük-en iyi, en küçük-en iyi ve hedef değer-en iyi şeklindeki sinyal gürültü oranlarıdır. Her üç durumda da maksimize edilmesi amaçlanan bu oranlar şu şekilde tanımlanmıştır;

En küçük-En iyi;

$$S/G = -10 \cdot \log \left(\sum \frac{y_i^2}{n} \right) \quad (3.14)$$

En büyük-En iyi;

$$S/G = -10 \cdot \log \left(\sum \frac{1/y_i^2}{n} \right) \quad (3.15)$$

Hedef değer- En iyi;

$$S/G = 10 \cdot \log \left(\sum \frac{\left(\frac{y_i}{r} \right)^2}{S^2} \right) \quad (3.16)$$

Ancak bazı istatistikçiler S/G oranlarının optimal sonuçlar vermeyeceğini savunmuş ve standart sapma analizini önermişlerdir. Yani her bir deneme için elde edilen standart sapma (S) analiz edilip varyasyonu etkileyen faktör veya etkileşimler de ortaya çıkarılabilir. Ancak varyasyona ilişkin yorumların sağlıklı yapılabilmesi için denemelerin en az 5 tekrarlı yapılması tavsiye edilmektedir [1].

3.5.8. Doğrulama Deneyi

Deney tasarımı neticesinde optimum kalite karakteristiği ve minimum varyasyonu oluşturan faktörlerin ve düzeylerinin kombinasyonu tespit edilir. Tespit edilen bu kombinasyonun en az bir kez denenmesi ve beklenen sonuçları vermesi gerekir. Elde edilen bu kombinasyonun deney planında denenmemiş olması kuvvetle muhtemeldir. Deney Tasarımının son adımı olan doğrulama deneyinin, beklenen sonuçları vermesi ile iyileştirme tamamlanmış olur.

3.6. Taguchi Metoduna Yönelik Eleştiriler

Taguchi Metodu, faktörler arasındaki etkileşimlerin çoğu zaman ihmal edildiği tasarım biçimi, S/G oranlarının bazı uygulamalarda yetersiz kalması ve bazı varyans analizi uygulamaları nedeniyle eleştirilmektedir. Deney sayısının azaltılması mutlak surette deneyler ile elde edilecek bir takım bilgilerden vazgeçilmesi anlamına gelmektedir. Ancak yüksek maliyetli denemelerde bu bilgi kaybı dengelenebilir bir unsurdur. Özellikle eniyileme problemlerinde tasarımcının bilgi ve deneyiminin ön planda olması gerekliliği de yöntemin sorgulanan yanlarından. Bu nedenle Taguchi Metodunu uygulayacak araştırmacı ve mühendislerin konularında yetkin olması veya yetkin kişilerin görüşlerini alarak tasarım yapmaları kaçınılmazdır.

Yüksek hacimli, düşük maliyetli üretim yapılan endüstriyel ortamlarda yöntemin performansı yüksek iken, düşük hacimde ve yüksek maliyetli uygulamalarda metodolojik olarak daha verimsizdir [2].

Taguchi felsefesinde, istatistiksel pek çok konu henüz yerleşmemişse de Deney Tasarımına bir “yemek kitabı” yaklaşımı kazandırılması dünya çapında deney tasarımı kullanımı üzerinde güçlü bir etki yapmıştır [25].

4. BÖLÜM

TAGUCHİ METODUNUN EKSTRÜZYONDA UYGULANMASI

Bu çalışmada alüminyum ekstrüzyon prosesinin en önemli performans kriterlerinden birisi olan kalıp dayanımının dolayısıyla kalıp ömrünün artırılması üzerinde durulacaktır. Alüminyum ekstrüzyon işlemi büyük hacimli imalatlarda kullanıldığı için kalıp ömrü gerek ürün kalitesi gerekse üretim maliyetleri açısından son derece önemlidir. Maksimum kalıp ömrü elde etmek için kalıp malzemeleri bazında çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Ancak bu çalışmada bilinen ve rutin olarak kullanılan kalıp malzemeleri için proses parametrelerini değiştirerek iyileştirme hedeflenmiştir.

Kalıp ömrü kalıp ön ve iç yüzeyine uygulanan basınç ve bu yüzeylerdeki sıcaklık değerleri ile yakından ilişkilidir. Çalışmada, Moe [26] tarafından alüminyum ekstrüzyon prosesinde gerinme ve basınç ölçüm teknikleri geliştirmek amacıyla yapılmış, ileri sensör teknolojileri uygulamaları içeren bir çalışmadaki deney sonuçları kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada pek çok deney yapılmış ancak, çalışmanın amacı sensörler ile yapılan gerinme ve basınç ölçümlerinin analitik uygulamalar ile karşılaştırılması ve böylece ölçüm performansının belirlenmesi olduğu için ekstrüzyon prosesinin iyileştirilmesine ve deney sistematığına ilişkin bir uygulamaya yer verilmemiştir.

Deneyisel ekstrüzyon çalışmasında kılavuzlu ve kılavuzsuz 2 ayrı ekstrüzyon kalıbı, 2 farklı sıcaklık, 2 farklı profil kesiti ve 3 farklı ekstrüzyon hızı için kullanılmıştır. Ekstrüzyon sonrasında elde edilen profiller, yüzey kalitesi, dayanım ve boyutsal gereklilikler açısından izin verilen kabul kriterleri aralığındadır. Dolayısıyla ürün kalitesinin iyileştirilmesine ilişkin bir çalışma da yapılmamıştır.

Bu çalışmada bu verilerin proses performansının iyileştirilmesine yönelik kullanımı amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan AA6060 alaşımının ortalama bileşen oranları şu şekildedir.

Tablo 4.1. AA6060 alaşımının ortalama bileşen oranları.

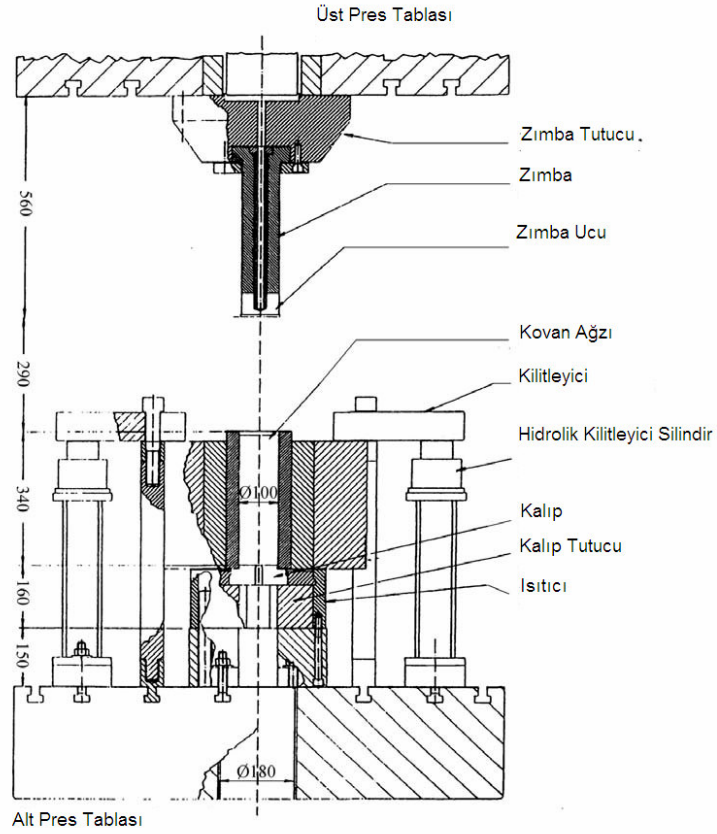
Mg	Si	Fe	Ti	Mn	Ga	V	Pb	Zn	Cu
0.472	0.413	0.215	0.015	0.013	0.012	0.008	0.005	0.003	0.003

Çalışmada, Şekil 4.1’de teknik resmi verilen 8 MN basma kapasitesine sahip laboratuvar tipi bir düşey ekstrüzyon presi kullanılmıştır. 4 hidrolik silindiri bulunan presin işlem sırasında ana silindiri kullanılmıştır. 830 mm strok uzunluğuna sahip presin zımba hızı el ile ya da otomatik olarak 0.2-31.0 mm/s aralığında değiştirilebilmektedir. PLC kontrollü hidrolik sistem 300 bar basınca kadar ulaşabilmektedir [26].

Ekstrüzyon presinin alt tablasında yer alan 200 mm çaplı delik ekstrüde ürünün zemin altında yer alan 6 m derinliğe doğru çekilmesine izin vermektedir. Elde edilen profiller üzerinde yer çekimi haricinde bir çekme kuvveti ve soğutma uygulanmamaktadır [26].

200 mm uzunlukta ve 96 mm çapa sahip biyetler 100 mm kovan çapına sahip pres ile ekstrüzyona tabi tutulmuştur. 19 mm olarak belirlenen ekstrüzyon artığı uzunluğu denemeler arasında çıkarılmaksızın işleme devam edilmiş ve zımba sıcaklığı ortalama olarak 130 °C olarak kaydedilmiştir [26].

Kalıp ömrünün artırılabilmesi için kalıp yüzeyindeki basınç, sıcaklık ve kalıp yüzeyine etkiyen kuvvet değerleri irdelenecektir. Biyet sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, kalıp kanal durumu ve ekstrüzyon oranı faktörlerinin basınç, sıcaklık ve kuvvet üzerindeki etki derecelerini incelemek üzere bir deney planı oluşturulmuştur.



Şekil 4.1. 8 MN Laboratuar tipi ekstrüzyon presi.

Tablo 4.2’de ekstrüzyon hızı, biyet sıcaklığı, kalıp kanal durumu ve ekstrüzyon oranı faktörlerinin düzeyleri görülmektedir. Ekstrüzyon hızı için 3 ayrı düzeyin, diğer faktörler için ise 2 düzeyin incelendiği deney, çoklu düzey değerlerine sahiptir. Kılavuz mesafesi kullanılan kalıplarda kılavuz mesafesi/biyet çapı oranı 0.76’dır [26].

Tablo 4.2. Deney faktörleri ve düzeyleri.

Kontrol Faktörleri	Düzyey 1	Düzyey 2	Düzyey 3
A-Ekstrüzyon hızı (Profil hızı)	0,2 m/s	0,4 m/s	0,8 m/s
B-Biyet sıcaklığı	450	500	--
C-Klavuz mesafesi durumu	Yok	Var	--
D-Ekstrüzyon oranı	40	80	--

Deneyde L8 ortogonal dizimi kullanılacaktır. Ancak biri 3 düzeyli, 3'ü 2 düzeyli olmak üzere 4 faktörlü ve 3 yanıtı deney düzeninde L8 ortogonal diziminin kullanılabilmesi için yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

2 düzeyli bir dizimin, 4 düzeyli bir dizime dönüştürülebilmesi temelde serbestlik derecesi esasına dayanır. 2 düzey, 1. düzeyin denenmesi ile elde edilen bilgilerin 2. düzeyin denenmesi ile elde edilen bilgiler ile kıyaslanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle 1 serbestlik derecesine sahip bu deney, 1 bilgi seti sağlamaktadır. Oysa 4 düzey, 1. düzey ile 2.'nin, 2. ile 3.'ünün ve 3. ile 4.'ünün kıyaslanmasına imkan verir ki bu da 3 serbestlik derecesi anlamına gelir [12]. Buradan hareketle L8 ortogonal diziminin ilk 3 sütunu, ortogonal yapıyı bozmayacak şekilde 4 düzeyli bir faktörün düzeyleri sırasıyla 2 düzeyli bir faktörün 1 1, 1 2, 2 1 ve 2 2 düzey kombinasyonlarına eşlenerek birleştirilebilir. Böylece L8 diziminin ilk 3 kolonu, Tablo 4.3'te verilen şekilde 4 düzeyde birleştirilebilir.

Tablo 4.3. L8 OD'inin ilk 3 kolonunun birleştirilmesi.

Deneme No	Sütun No			4 düzeyli faktör
	1	2	3	
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	2	2	2
4	1	2	2	2
5	2	1	2	3
6	2	1	2	3
7	2	2	1	4
8	2	2	1	4

Buna göre Tablo 4.3'te verilen L8 ortogonal dizimi 1'i 4 düzeyli olmak üzere 5 sütunlu Tablo 4.4'teki halini alır. Deneyde 3 düzeyli bir faktör söz konusu olduğu için modifikasyon ile elde edilen Tablo 4.4 dizimi yukarıda izah edilen yöntemle benzer bir yöntem ile 3 düzeyli hale getirilebilir. 4. düzeydeki 7 ve 8 numaralı denemeler tercihe bağlı olarak 1., 2. ya da 3. düzey ile değiştirilerek bu düzeylerin tekrarı sağlanabilir.

Tablo 4.4. Yeniden düzenlenmiş L8 Ortogonal Dizimi.

Deneme No	Sütun No				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1
7	4	1	2	2	1
8	4	2	1	1	2

Buna göre L8 ortogonal dizimi, taklit uygulaması (Dummy treatment) ile 1. düzeyin tekrarlanması tercih edilerek, 1'i 3 düzeyli diğerleri 2 düzeyli 4 faktörün denenmesine imkan verecek şekilde Tablo 4.5'teki halini alır [12].

Tablo 4.5'te verilen yeniden düzenlenmiş L8 ortogonal dizimi 4 faktörlü deneyde sadece faktörlerin ana etkilerinin incelenmesine olanak tanımaktadır. Alüminyum ekstrüzyon prosesinin temel parametreleri olan biyet sıcaklığı ile ekstrüzyon hızı ve ekstrüzyon oranı arasında karşılıklı etkileşimler olması muhtemeldir. Bu etkileşimlerin etkilerinin irdelenebilmesi için L16 ortogonal diziminin yeniden düzenlenerek kullanımı ya da tam eşlendirmeli deney düzeni gerekecektir.

Tablo 4.5. 3 düzey için yeniden düzenlenmiş L8 Ortogonal Dizimi.

Deneme No	Sütun No				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1
7	1	1	2	2	1
8	1	2	1	1	2

5. BÖLÜM

BULGULAR

Anılan çalışmada yapılan denemeler Tablo 4.5'te elde edilen deney planına göre değerlendirilir. 4 faktörün söz konusu olduğu deneyde 3 düzeyli ekstrüzyon hızı 1. sütuna, 2 düzeyli ekstrüzyon oranı, biyet sıcaklığı ve kılavuz mesafesi durumu sırasıyla 2, 3 ve 4. sütunlara atanacak, 5. sütuna ise faktör ataması yapılmayacaktır. Buna göre deney planı doğrultusunda elde edilen deney sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deney Sonuçları.

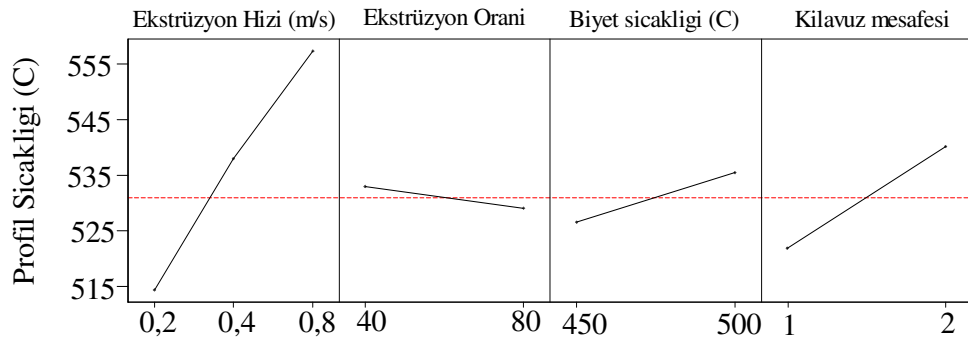
Deney no	Faktörler (Sütun)				Kalite Karakteristikleri		
	Profil hızı (m/s)	Ekstrüzyon oranı	Biyet sıcaklığı (°C)	Kılavuz mesafesi	Zımba Kuvveti (kN)	Profil Çıkış sıcaklığı (°C)	Basınç (MPa)
1	0,2	40	450	Yok	2114	503	204
2	0,2	80	500	Var	2590	523	262
3	0,4	40	450	Var	2575	543	249
4	0,4	80	500	Yok	2303	533	224
5	0,8	40	500	Yok	2140	553	198
6	0,8	80	450	Var	2940	562	285
7	0,2	40	500	Var	2325	533	223
8	0,2	80	450	Yok	2295	498	235

Tablo 5.1'de, belirlenen 8 ayrı deneme ve her bir denemede farklı faktör kombinasyonları için gerçekleştirilen zımba kuvveti, profil çıkış sıcaklığı ve basınç ölçümleri listelenmektedir.

3 kalite karakteristiği için 8 deney sonucunun MINITAB (Release 13) programı ile analizleri yapılmıştır.

Profil çıkış sıcaklığı için yapılan istatistiksel analizlerin sonuçları Şekil 5.1 ve Tablo 5.2’de görülmektedir. Profil sıcaklığı üzerindeki en etkili faktör ekstrüzyon hızı iken onu kılavuz mesafesinin varlığı, biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon oranı takip etmektedir.

Ekstrüzyon hızının artışı profil sıcaklığında yüksek bir artışa sebep olurken biyet sıcaklığındaki artış profil sıcaklığına aynı oranda yansımamaktadır. Ekstrüzyon oranının artması halinde profil sıcaklığı bir miktar azalmaktadır.



Şekil 5.1. Profil sıcaklığı için ana etkiler grafiği.

3 düzeyli ekstrüzyon hızına göre yapılan profil sıcaklığı ölçümlerinden, profil sıcaklığının ekstrüzyon hızı karşısında doğrusal bir artış gösterdiği söylenebilir. Profil çıkış hızı ölçümlerine göre belirlenen ekstrüzyon hızı, hacmin korunumu ilkesi gereğince aynı zamanda zımba hızı ile de ilişkilidir. Zımba hızının artırılması sürtünme kuvveti ve basıncı yükseltmekte bu da çıkan profilde ısınmaya yol açmaktadır.

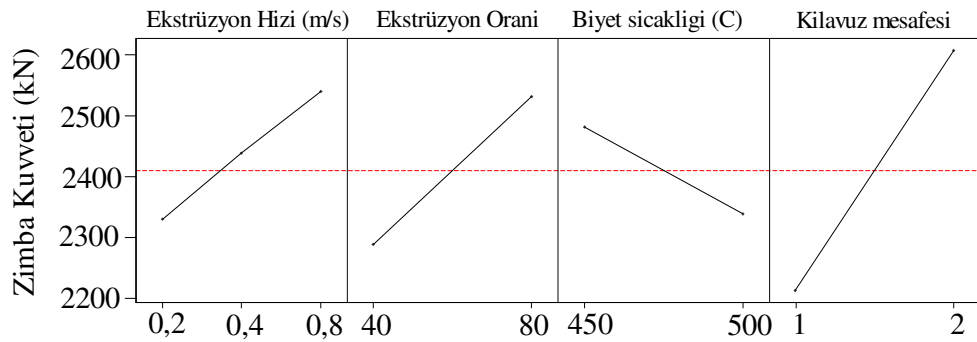
Kılavuz mesafesi olmaması durumu Şekil 5.1’de 1, olması hali ise 2 düzey numarası ile gösterilmiştir. Kılavuz mesafesi kullanılması kalıp çıkışında ilave bir sürtünme yaratacağından bu durum profil çıkış sıcaklığına artış olarak yansımaktadır.

Tablo 5.2. Faktörlerin profil çıkış sıcaklığı için etki sıralamaları.

Düzy	Ekstrüzyon Hızı	Ekstrüzyon Oranı	Biyet Sıcaklığı	Kılavuz Mesafesi
1	514,25	533	526,5	521,75
2	538,00	529	535,5	540,25
3	557,50			
Delta	43,25	4	9,0	18,50
Sıralama	1	4	3	2

Ekstrüzyon prosesinin eniyilenmesinde profil sıcaklığının minimize edilmesi gerek boyutsal kararlılık gerekse enerji sarfiyatı açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla minimum profil sıcaklığı için kılavuz mesafesi kullanılmaksızın, küçük ekstrüzyon hızlarında, büyük ekstrüzyon oranı ve küçük biyet sıcaklığı kullanılarak ekstrüzyon yapılmalıdır.

Zimba kuvveti için yapılan analiz sonuçları Şekil 5.2 ve Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Zimba kuvveti üzerindeki en etkili faktör kılavuz mesafesinin varlığı iken ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon hızı ve biyet sıcaklığı sırasıyla diğer etkili faktörlerdir. Kılavuz mesafesi olması halinde profil kalıptan çıkarken sürtünme kuvveti ile karşılaşmakta ve zimba kuvveti önemli derecede artmakta iken biyet sıcaklığının değişimi zimba kuvvetini negatif yönde etkilemekte, biyet ilk sıcaklığının artışı ekstrüzyonu kolaylaştırmaktadır.



Şekil 5.2. Zimba kuvveti için ana etkiler grafiği.

Zimba kuvvetinin de ekstrüzyon hızı karşısında doğrusal bir artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Biyetin maruz kaldığı kesit daralması arttıkça zimba kuvveti doğal olarak artmaktadır.

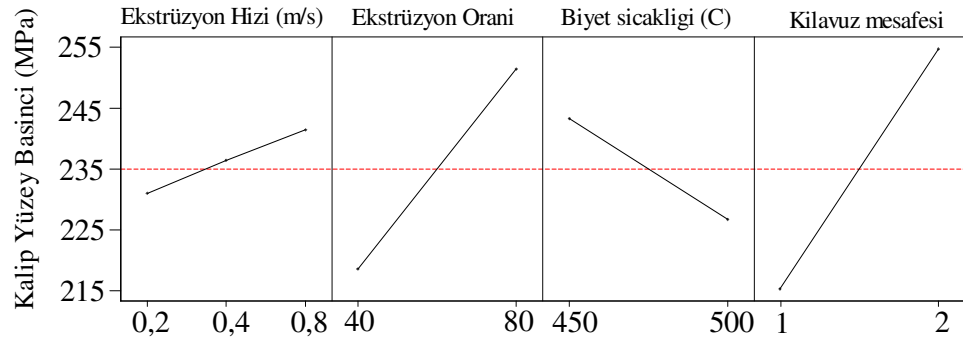
Zimba kuvveti üzerindeki artış kalıp yan ve iç yüzeyinde zedelenmelere sebep olabilmekte dolayısıyla kalıp ömrünü azaltmaktadır. Bu nedenle zimba kuvvetinin de minimize edilmesi maksimum kalıp ömrü için gereklidir. Bu durumda küçük ekstrüzyon hızı ve ekstrüzyon oranı değerleri kullanılmalı, büyük biyet sıcaklıkları tercih edilmelidir.

Tablo 5.3. Faktörlerin zimba kuvveti için etki sıralamaları.

Düzy	Ekstrüzyon Hızı	Ekstrüzyon Oranı	Biyet Sıcaklığı	Kılavuz Mesafesi
1	2331	2288,5	2481,0	2213,0
2	2439	2532,0	2339,5	2607,5
3	2540			
Delta	209	243,5	141,5	394,5
Sıralama	3	2	4	1

Kalıp yüzey basıncı ölçümleri için yapılan analizler Şekil 5.3 ve Tablo 5.4'te gösterilmiştir. Kalıp yüzey basıncı üzerinde en etkili faktör zimba kuvvetinde olduğu gibi kılavuz mesafesinin durumudur. Ancak zimba kuvvetine olan benzerlik diğer faktörler için geçerli değildir. Ekstrüzyon oranı, biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı sırasıyla kalıp yüzeyinde oluşan basınç üzerindeki etkili faktörlerdir.

Kalıp yüzeyi basıncı genel itibarla zimba kuvvetine benzer bir değişim göstermektedir. Biyet sıcaklığındaki artış kalıp yüzeyine etkiyen kuvveti azaltmaktadır. Ancak ekstrüzyon hızının değişimi yüzeydeki basıncı zimba kuvvetindeki artış nispetinde artırmamaktadır.



Şekil 5.3. Basınç için ana etki grafiği.

Tablo 5.4. Faktörlerin kalıp yüzey basıncına göre etki sıralamaları.

Düzyey	Ekstrüzyon Hızı	Ekstrüzyon Oranı	Biyet Sıcaklığı	Kılavuz Mesafesi
1	231,0	218,5	243,25	215,25
2	236,5	251,5	226,75	254,75
3	241,5			
Delta	10,5	33,0	16,50	39,50
Sıralama	4	2	3	1

Kalıp yüzey basıncı kalıp şeklinin ekstrüzyon prosesi boyunca korunması ve deformasyonlara uğramaması için mümkün olan en küçük değerinde tutulmalıdır. Kalıp yüzeyinde minimum basınç oluşumu için kılavuz kullanılmamalı, küçük ekstrüzyon hızı ve oranı tercih edilirken ilk biyet sıcaklığı artırılmalıdır.

Yapılan bütün deneylerde ekstrüzyon ile elde edilen ürünlerin geometrik ve fiziksel özellikleri belirlenen kabul toleransları içindedir. Tasarımı yapılan prosesin eniyilenmesi için gerekli faktör koşulları Tablo 5.5'te özetlenmiştir.

Tablo 5.5. En iyi proses için faktör koşulları.

	Ekstrüzyon hızı	Ekstrüzyon oranı	Biyet sıcaklığı	Kılavuz mesafesi
Minimum profil sıcaklığı	Düşük	Yüksek	Düşük	Yok
Minimum zımba kuvveti	Düşük	Düşük	Yüksek	Yok
Minimum kalıp yüzey basıncı	Düşük	Düşük	Yüksek	Yok

Kalite karakteristikleri arasında ağırlıklandırma yapılması karmaşık ekstrüzyon prosesi için oldukça güç olup, genel itibarla maksimum kalıp ömrü için zımba kuvveti ve yüzey basıncının profil sıcaklığına göre daha önemli olduğu söylenebilir. Bu durumda en uygun düzey kombinasyonunun ekstrüzyon hızı ve ekstrüzyon oranının küçük seviyeleri, kılavuz mesafesinin kullanılmaması ve biyet sıcaklığının yüksek değeri olarak belirlenebilir.

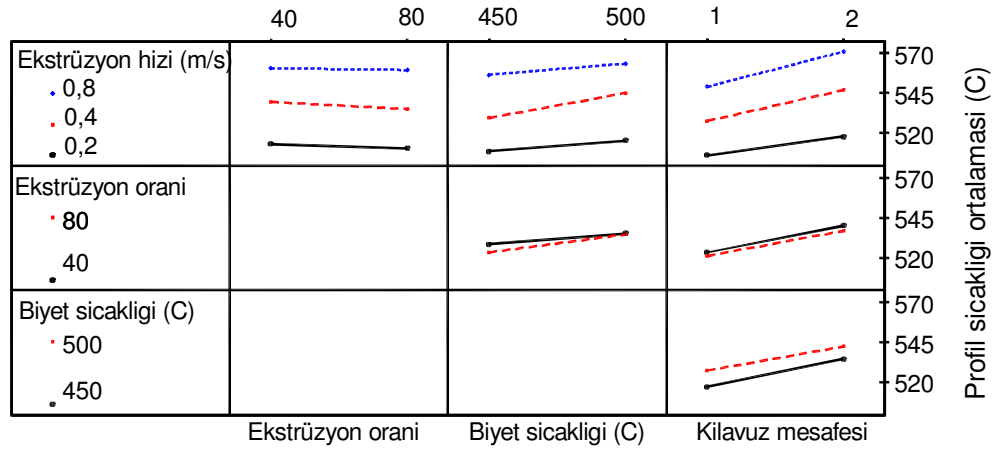
3. Bölümde belirtildiği gibi deney sistematığının kurulmasına ilişkin Taguchi Metodu deneme sayılarının azaltılması için ortogonal dizimlerin kullanılmasını önerirken bir deneyden elde edilebilecek bilgileri kısıtlamaktadır. Tam eşlendirmeli biçimde yapılması halinde toplamda $3 \times 2 \times 2 \times 2 = 24$ farklı faktör kombinasyonunun denenmesini ve 96 farklı ölçüm yapılması gerekli olacakken yeniden düzenlenmiş L8 diziminin kullanımı halinde 8 deneme ile faktörlerin ana etki dereceleri belirlenebilmiş ancak alüminyum ekstrüzyon prosesinde karşılaşılması muhtemel ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon hızı ve biyet sıcaklığı faktörleri arasındaki etkileşimler bu deney düzeninde belirlenememiştir.

Bu etkileşimlerin belirlenebilmesi için 4. Bölümde yapılan yeniden düzenleme işleminin L16 ortogonal dizimine uygulanması gerekmekte ve 16 farklı faktör kombinasyonu denenmelidir. Buna göre Tablo 5.6'da verilen deney planına göre elde edilen profil sıcaklığı, kalıp yüzey basıncı ve zımba kuvveti için etkileşim grafikleri sırasıyla Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Yeniden düzenlenmiş L16 OD'ine göre deney planı.

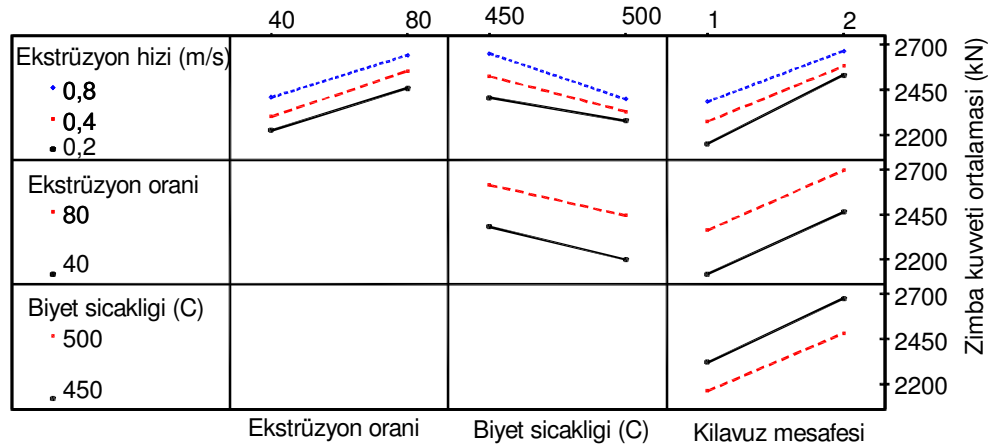
Deney No	Ekstrüzyon Hızı (m/s)	Ekstrüzyon Oranı	Biyet Sıcaklığı (°C)	Kılavuz Mesafesi
1	0,2	40	450	1
2	0,2	40	500	2
3	0,2	80	450	2
4	0,2	80	500	1
5	0,4	40	450	1
6	0,4	40	500	2
7	0,4	80	450	2
8	0,4	80	500	1
9	0,8	40	450	2
10	0,8	40	500	1
11	0,8	80	450	1
12	0,8	80	500	2
13	0,2	40	450	2
14	0,2	40	500	1
15	0,2	80	450	1
16	0,2	80	500	2

Bir faktörün kalite değişkenine olan etkisinin diğer faktör veya faktörlerin düzeylerine bağlı olması anlamına gelen etkileşimlerin, etki analizini kolaylaştırmak amacıyla çizilen etkileşim grafiklerindeki paralellikler, bir faktörün düzeyinin değişmesi halinde, diğer faktörün etki derecesinin değişmediğini, dolayısıyla etkileşimin söz konusu olmadığını göstermektedir. Grafiklerdeki kesişen doğrular ise etkileşimin varlığına işaret etmektedir. Profil sıcaklığı ve zımba kuvveti için Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'deki grafikler faktörler arasındaki etkileşimlerin yok denecek kadar az olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4. Profil sıcaklığı için etkileşim grafiği.

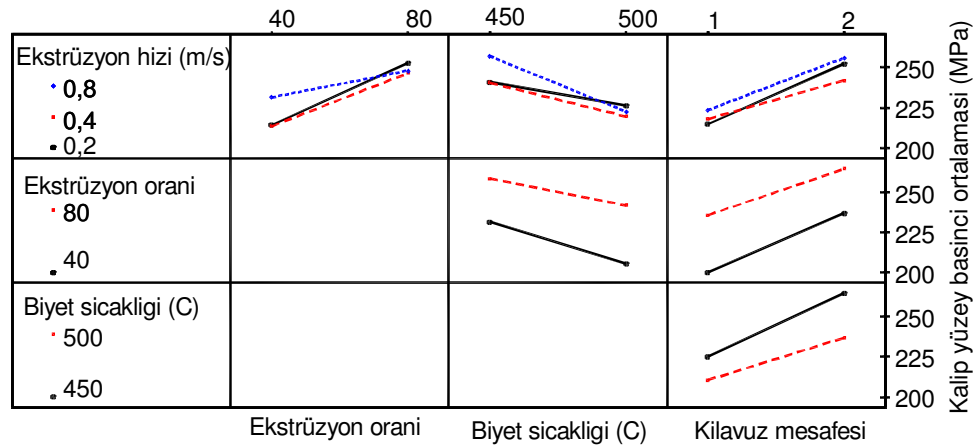
Ekstrüzyon oranı ile ekstrüzyon hızının değişimi bir arada incelendiğinde, ekstrüzyon oranındaki artışın profil sıcaklığında küçük bir düşmeye sebep olduğu, ekstrüzyon hızındaki artışın ise profil sıcaklığında önemli bir artışa sebep olduğu söylenebilir. Ancak ekstrüzyon oranındaki değişim, profil sıcaklığının ekstrüzyon hızı karşısındaki değişimini etkilememektedir. Benzer durum kılavuz mesafesi- biyet sıcaklığı, kılavuz mesafesi- ekstrüzyon oranı, kılavuz mesafesi-ekstrüzyon hızı ve biyet sıcaklığı- ekstrüzyon hızı etkileşimleri için de geçerlidir. Ancak ekstrüzyon oranı- biyet sıcaklığı ilişkisinde, artan biyet sıcaklığı karşısında profil sıcaklığındaki artışın yüksek ekstrüzyon oranlarında düşük oranlara göre daha belirgin olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 5.5. Zımba kuvveti için etkileşim grafiği.

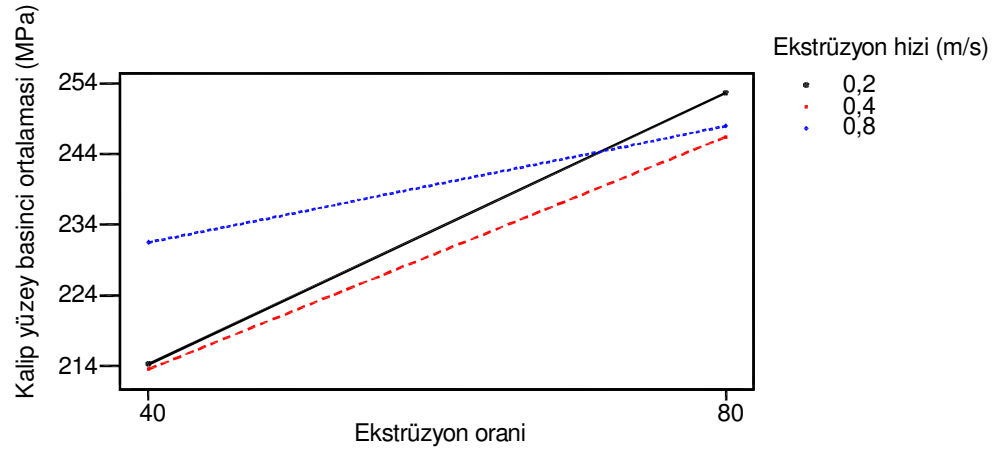
Şekil 5.5'te verilen zımba kuvveti için etkileşim grafiği incelendiğinde biyet sıcaklığı-ekstrüzyon oranı, kılavuz mesafesi- biyet sıcaklığı, ekstrüzyon oranı-ekstrüzyon hızı ve ekstrüzyon oranı- kılavuz mesafesi arasında etkileşim etkilerinin olmadığı, biyet sıcaklığı-ekstrüzyon hızı ve kılavuz mesafesi- ekstrüzyon hızı etkileşimlerinin de son derece küçük olduğu söylenebilir.

Kalıp yüzey basıncı için Şekil 5.6'da verilen etkileşim grafiğinde ise ekstrüzyon hızının diğer 3 faktör ile etkileşim içinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu etkileşim etkileri Şekil 5.7-Şekil 5.9'da irdelenmiştir.



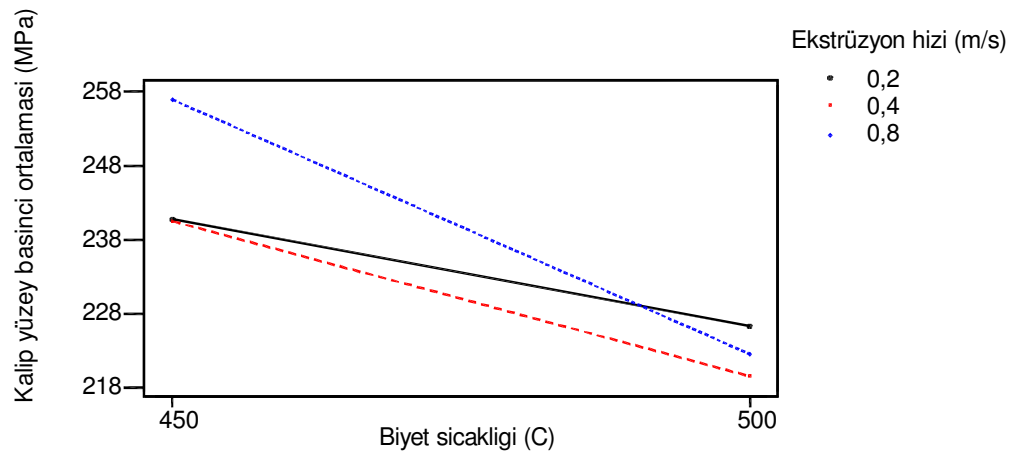
Şekil 5.6. Basınç için etkileşim grafiği.

Ekstrüzyon oranındaki artış, genel olarak kalıp yüzey basıncında bir artışa sebep olurken, bu artış, düşük ekstrüzyon hızlarında daha fazla, yüksek ekstrüzyon hızlarında ise daha az miktarda olmaktadır. (Şekil 5.7)



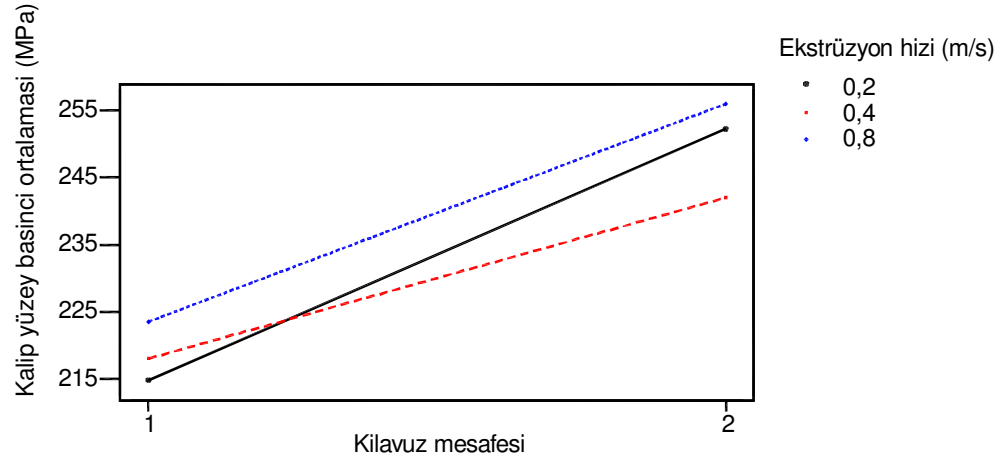
Şekil 5.7. Basınç için ekstrüzyon oranı-ekstrüzyon hızı etkileşimi.

Yakından incelenmesinde yarar görülen diğer bir etkileşim etkisi ise Şekil 5.8'de verilen profil sıcaklığı için biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı etkileşimidir. Biyet sıcaklığındaki artışlar genel itibarla basıncı azaltırken bu durum, yüksek ekstrüzyon hızlarında daha keskin bir biçimde gerçekleşmektedir. Düşük biyet sıcaklıklarında ekstrüzyon hızının artması halinde kalıp yüzey basıncı artarken, yüksek biyet sıcaklıklarında bu durum tam tersi olmakta, ekstrüzyon hızının artması halinde kalıp yüzey basıncı düşmektedir.



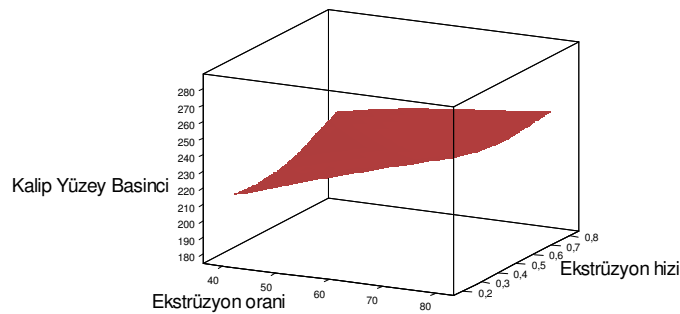
Şekil 5.8. Basınç için biyet sıcaklığı-ekstrüzyon hızı etkileşimi.

Kılavuz mesafesi bulunması halinde yüzey basıncı artmaktadır. Ancak 0,2 m/s ekstrüzyon hızında kılavuz mesafesi 0,4 m/s hıza kıyasla daha yüksek bir yüzey basıncı oluştururken, kılavuz mesafesinin olmaması halinde bu durum tam tersi yönde seyretmektedir. Ancak söz konusu ikili etkileşim düşük düzeyde olup ihmal edilebilecek boyuttadır.

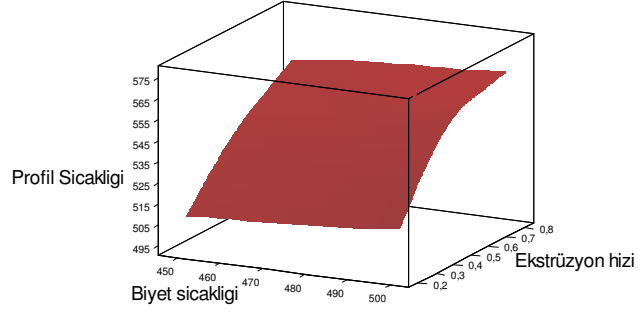


Şekil 5.9. Basıncın kılavuz mesafesi-ekstrüzyon hızı etkileşimi.

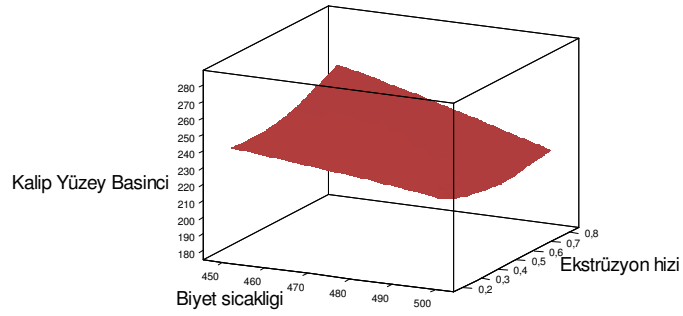
Kalıp yüzey basıncının ekstrüzyon oranı, biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı faktörleri karşısındaki değişimleri 3 boyutlu olarak Şekil 5.10 ve Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.13’te ise bu faktörlerin profil sıcaklığına olan etkileri 3 boyutlu yüzey grafikleri ile gösterilmektedir.



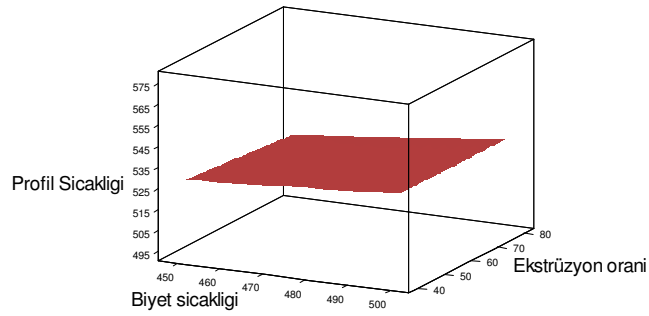
Şekil 5.10. Basıncın ekstrüzyon oranı ve ekstrüzyon hızı ile değişimi.



Şekil 5.11. Profil sıcaklığının biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı ile değişimi.

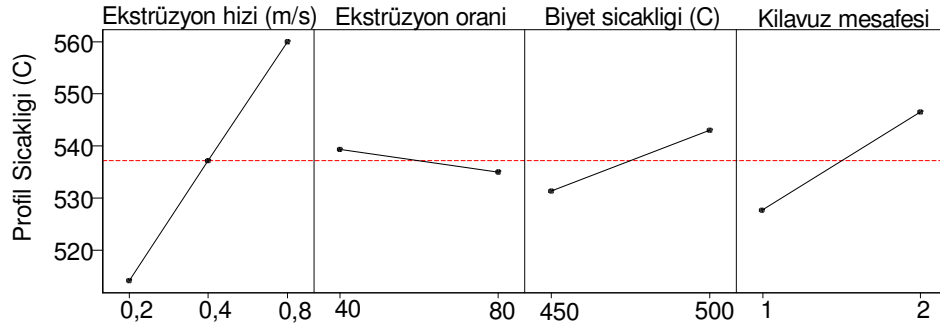


Şekil 5.12. Basıncın biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon hızı ile değişimi.

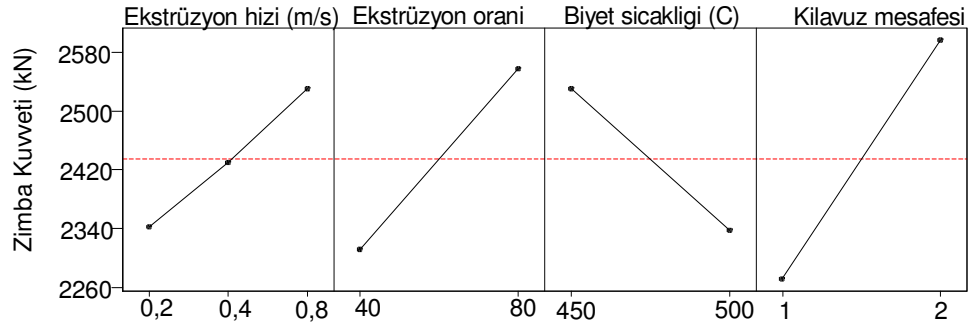


Şekil 5.13. Profil sıcaklığının biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon oranı ile değişimi.

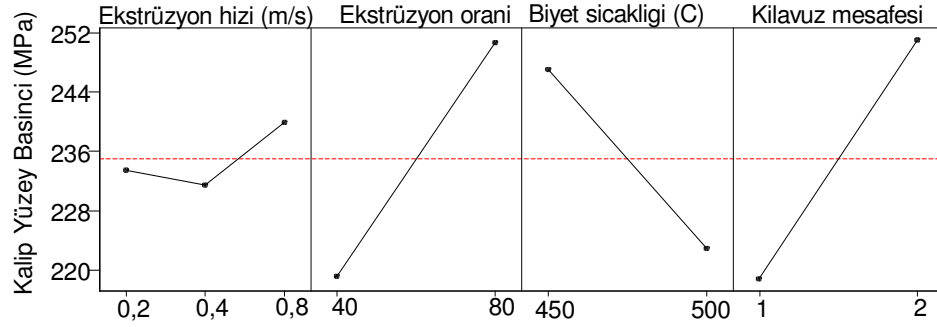
L8 ortogonal dizimi esasına dayandırılan çok düzeyli çok çıktılı deney sonucunda her bir faktörün ana etki dereceleri belirlenmiştir. Ana etki derecelerinin büyüklüklerinin, deneyin tam eşlendirmeli biçimde yapılması halinde elde edilen bulgular Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmiştir. Bu bulguların L8 esasına göre elde edilen bulgular ile paralellik göstermesi Taguchi Metodunun ana etkilerin analizinde ne denli kolaylık sağladığını göstermektedir. Deneyin tam eşlendirmeli olarak tasarlanması halinde deneme yapılması gereken 24 ($3 \times 2 \times 2 \times 2$) farklı faktör kombinasyonu ve 96 farklı ölçüm sonucu Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 5.14. Çok etkenli deneyde profil sıcaklığı için ana etki dereceleri.



Şekil 5.15. Çok etkenli deneyde zımba kuvveti için ana etki dereceleri.



Şekil 5.16. Çok etkenli deneyde basınç için ana etki dereceleri.

Şekil 5.16’da gözlemlenen kalıp yüzey basıncının ekstrüzyon hızı karşısındaki önce azalıp sonra artan değişimi, ekstrüzyon hızının diğer faktörler ile olan etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu durum Taguchi metodu ile yapılan deneyde gözlemlenememektedir. Bu da Taguchi metodunun etkileşim etkilerini gözlemekteki yetersizliğini ortaya koymaktadır.

6. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Taguchi deneysel tasarım metodunun endüstriyel uygulanabilirliği irdelenerek; metot, kullanım hacmi, sürekliliği ve kalite gereksinimleri nedeniyle gürbüz (sağlam) tasarım gerektiren alüminyum ekstrüzyon prosesinde kullanılmış ve proses parametrelerinin etki dereceleri ve birbirleri ile etkileşim etkileri irdelenmiştir. Çalışmada Moe [26] tarafından yapılmış, alüminyum ekstrüzyon prosesinde sıcaklık, basınç ve gerinme ölçümleri için sensör tasarımını irdeleyen bir çalışmadaki deney sonuçları kullanılmıştır.

Çalışmada elde edilen deney sonuçları yeniden düzenlenmiş L8 dizimi kullanılarak deney düzenine aktarılmıştır. 1'i 3 düzeyli, 3'ü 2 düzeyli olmak üzere toplam 4 faktörlü ve 3 çıktılı deney düzeninde kalıp ömrünü artırmaya ve enerji sarfiyatını azaltmaya yönelik en küçük – en iyi analizleri yapılmıştır. 3 düzey için incelenen ekstrüzyon hızı ve 2 düzey için incelenen biyet sıcaklığı, kalıp biçimi ve ekstrüzyon oranı faktörlerinin en küçük zımba kuvveti, kalıp yüzey basıncı ve profil sıcaklığı için en uygun değerleri belirlenmiştir. 8 deneme sonucunun kullanıldığı deney düzeninde 3 ayrı kalite karakteristiğinin önceliklendirilmesi yapılmıştır.

Buna göre yapılan bütün deneylerde ekstrüzyon ile elde edilen ürünlerin geometrik ve fiziksel özellikleri belirlenen kabul toleransları içindedir. Tasarımı yapılan prosesin eniyilenmesi için gerekli faktör koşulları Tablo 5.5'te özetlenmiştir. Profil sıcaklığı, zımba kuvveti ve kalıp yüzey basıncının minimize edilmesi için kılavuz kullanılmaması ve ekstrüzyon hızının düşük değerinin tercih edilmesi gerekmektedir. Minimum profil sıcaklığı için yüksek ekstrüzyon oranı, düşük biyet sıcaklığı seçilmeli, minimum zımba kuvveti ve yüzey basıncı için düşük ekstrüzyon oranı ve yüksek biyet sıcaklığı tercih edilmelidir.

Kalite karakteristikleri arasında ağırlıklandırma yapılması karmaşık ekstrüzyon prosesi için oldukça güç olup, genel itibarla maksimum kalıp ömrü için zımba kuvveti ve yüzey basıncının profil sıcaklığına göre daha önemli olduğu söylenebilir. Bu durumda en uygun düzey kombinasyonunun ekstrüzyon hızı ve ekstrüzyon oranının küçük seviyeleri, kılavuz mesafesinin kullanılmaması ve biyet sıcaklığının yüksek değeri olarak belirlenebilir.

Farklı kalite karakteristikleri için ekstrüzyon proses parametrelerinin etki derecelerinin sıralamaları Tablo 6.1’de verilmiştir. Buna göre en etkili proses parametresinin kılavuz mesafesi olduğu söylenebilir.

Tablo 6.1. Faktörlerin ana etki derecelerinin sıralamaları.

	Ekstrüzyon Hızı	Ekstrüzyon Oranı	Biyet Sıcaklığı	Kılavuz Mesafesi
Profil Sıcaklığı	1	4	3	2
Kalıp Yüzey Basıncı	4	2	3	1
Zımba Kuvveti	3	2	4	1

Taguchi Metodu, deneme sayılarının azaltılması için ortogonal dizimlerin kullanılmasını önerirken bir deneyden elde edilebilecek bilgileri kısıtlamaktadır. Tam eşlendirmeli biçimde yapılması halinde toplamda $3 \times 2 \times 2 \times 2 = 24$ farklı faktör kombinasyonunun denenmesi ve 96 farklı ölçüm yapılması gerekli olacakken yeniden düzenlenmiş L8 diziminin kullanımı halinde 8 deneme ile faktörlerin ana etki dereceleri belirlenebilmiş ancak alüminyum ekstrüzyon prosesinde karşılaşılmaması muhtemel ekstrüzyon oranı, ekstrüzyon hızı ve biyet sıcaklığı faktörleri arasındaki etkileşimler bu deney düzeninde belirlenememiştir.

Bu etkileşimlerin belirlenebilmesi için yeniden düzenleme işlemi L16 ortogonal dizimine uygulanmış ve 16 farklı faktör kombinasyonu bu esasa göre denenmiştir.

L8 ortogonal dizimi esasına dayandırılan çok düzeyli çok çıktılı deney sonucunda her bir faktörün ana etki dereceleri belirlenmiştir. Ana etki derecelerinin büyüklüklerinin,

deneyin tam eşlendirmeli biçimde yapılması halinde elde edilecek bulgular ile paralellik göstermesi Taguchi Metodunun ana etkilerin analizinde ne denli kolaylık sağladığını göstermektedir.

Taguchi Metodu ile 8 deney sonucunun kullanılması halinde elde edilen bilgiler 24 farklı deney sonucunun kullanılması halinde elde edilenlere göre daha azdır. Nitekim L8 düzeni etkileşim etkilerinin irdelenmesine izin vermemektedir. Deney sayılarının azaltılmasına imkan veren ancak buna karşılık bilgi kaybına sebep olduğu için eleştirilen Taguchi metodu, mühendislik uygulamalarında etkileşim etkilerinin pek çok zaman ihmal edilebilir düzeyde olmasından dolayı kullanılabilir. Alüminyum ekstrüzyon prosesindeki etkileşim etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kurgulanan L16 deney düzeni analizlerinden anlaşılmaktadır. Tam eşlendirmeli deney esasına göre yapılan 24 denemeli deney de 16 denemeli deneyde elde edilen etkileşim etkilerinin dereceleri ile paralellik göstermektedir. Bu durum Taguchi metodunun deney sayısını bir miktar artırsa da etkileşim etkilerinin analizleri için kullanılabileceğini göstermektedir.

Ekstrüzyon prosesi, alüminyumun yeni ürünlere yönelmesi ve mukavemet artırmaya yönelik yapılan Ar-Ge çalışmaları ile alışlagelmiş malzemelerin yerini almaya başlaması nedeniyle her geçen gün daha fazla kullanım alanına ulaşmaktadır. Prosesin girdi parametreleri, yüzey pürüzlülüğü, yüzey parlaklığı, ürün mukavemeti, üretim hızı, enerji sarfiyatı, kalıp ve diğer donanımların ömürleri gibi unsurları etkilemekte, bu durum prosesin karmaşıklık düzeyini artırmaktadır. Ürün ve prosese yönelik bütün bu kalite karakteristiklerinin eniyilenmesi prosesinde de Taguchi metodu etkili bir yöntem olarak kullanılabilir.

Ağırlıklı olarak bilim çevrelerince kullanılan Taguchi yönteminin yüksek araştırma geliştirme maliyetlerinde sağladığı azalma ve deney sürelerinde sağlanan süre kısalığı endüstriyel uygulamalar için iyi bir çözüm niteliğindedir. Metodun firmalarımızca bilinirliğinin artırılmasına yönelik endüstriye uygulamalar ve eğitimler artırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Şirvancı, M., Kalite için Deney Tasarımı “Taguçi Yaklaşımı” s.112, Literatür Yayıncılık, Milwaukee ABD, 1996
2. Montgomery, D. C., Design and Analysis of Experiments, John Wiley&Sons Inc. New York, 1997
3. Ulucak T, Alüminyum Ekstrüzyon Profil Özellikleri, <http://www.aluminyumsanayi.com/aluminyumprofilgenel.htm>, Mayıs 2007
4. Onaran, A.K. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1993
5. Budinski, K.G., Budinski, M.K., Engineering Materials: Properties and Selection, Pearson Prentice Hall, 2005
6. Alüminyum Vikipedi, <http://tr.wikipedia.com/aluminyum>, Nisan 2007
7. Pradip, S. K. , Aluminum Extrusion Technology, ASM International, Ohio, 1996
8. Atmaca, B., Alüminyum Ekstrüzyon Prosesi ve Devre Ekipmanlarının Boyutlandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, 1996
9. Mitra, A., Fundamentals of Quality Control and Improvement, Macmillan Publishing Company, Toronto 1993
10. Montgomery, D. C., Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley&Sons Inc. New York, 1991
11. Erbaş, S.O., Olmuş, H., Deney Düzenleri ve İstatistiksel Analizleri, Gazi Kitabevi, Ankara, 2006
12. Ross, P. J., Taguchi Techniques for Quality Engineering, McGraw-Hill Press, New York, 1996
13. Fowlkes, W.Y., Creweling, C.M., Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development, Addison-Wesley press, New York, 1998
14. Canıylmaz, E., Kalite Geliştirmede Taguchi Metodu ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2001
15. Aydın, M.E., Taguchi Metodu ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, 1994
16. Bayrak, Z., Taguchi Yönteminin Kalite Kontrolde Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 1996

17. Erzurumlu, T. Özçelik, B. Minimization of Warpage Sink Index in Injection-molded Thermoplastic Parts Using Taguchi Optimization Method, *Materials & Design*, 27 (10), 853-861, 2006
18. Ferah, M. , Çok Yanıtlı Taguchi Tasarım Metodu ve Alüminyum Sanayiinde Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2003
19. Şahin B., Yakut K., Kotcioğlu I., Çelik C., Optimum Design Parameters of a Heat Exchanger, *Applied Energy*, 82 (1), 90-106, 2004
20. Baynal, K., Çok Yanıtlı Kalite Karakteristiklerinin Eşzamanlı Eniyilenmesinde Taguchi Yöntemi ve Otomotiv Endüstrisinde bir Uygulama, *MMO Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 16 (2), 2005
21. Chan, L.Y.- Ko, K. K. ,Design of Ignition And Fuel Systems for Two-Stroke Engines: A Statistical Experimental Design Approach, *Journal of Manufacturing Systems*, 1997
22. Hsiang, S. H., Kuo, J. L., An investigation on the hot extrusion process of magnesium alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 6 (12), 2003
23. Anthony, J., Teaching the Taguchi Method to Industrial Engineers, *Work Study*, 50-4, 141-149, 2001
24. Kowalick J, <http://www.kowalick.com> , May, 2007
25. Rekab, K., Shaikh, M, *Statistical Design of Experiments with Engineering Applications*, 2005
26. Moe, P. T., *Pressure and Strain Measurement During Hot Extrusion of Aluminum*, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2005

EKLER

EK-1

Moe'nun çalışmasında yapılan deneylerin sonuçları

Deney No	Ekstrüzyon Hızı (m/s)	Ekstrüzyon oranı	Biyet sıcaklığı (°C)	Kılavuz Mesafesi	Zimba Kuvveti (kN)	Profil Sıcaklığı (°C)	Kalıp Yüzey Basıncı (Mpa)
1	0,2	40	450	1	2114	503	204
2	0,2	40	450	2	2490	520	244
3	0,2	40	500	1	1975	515	186
4	0,2	40	500	2	2325	533	223
5	0,2	80	450	1	2295	498	235
6	0,2	80	450	2	2727	513	280
7	0,2	80	500	1	2224	508	234
8	0,2	80	500	2	2590	523	262
9	0,4	40	450	1	2247	522	212
10	0,4	40	450	2	2575	543	249
11	0,4	40	500	1	2051	535	185
12	0,4	40	500	2	2358	557	215
13	0,4	80	450	1	2485	521	243
14	0,4	80	450	2	2805	537	269
15	0,4	80	500	1	2303	533	224
16	0,4	80	500	2	2620	549	255
17	0,8	40	450	1	2387	543	230
18	0,8	40	450	2	2677	568	265
19	0,8	40	500	1	2140	553	198
20	0,8	40	500	2	2402	580	219
21	0,8	80	450	1	2628	545	249
22	0,8	80	450	2	2940	562	285
23	0,8	80	500	1	2413	556	226
24	0,8	80	500	2	2657	574	247

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Elazığ'da doğan Mesut ÖZTOP, ilk ve orta öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2002 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl savunma sanayiinde faaliyet gösteren bir işletmede Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2003–2006 yılları arasında KOSGEB Erciyes Üniversitesi Teknoloji Geliştirme Merkezi'nde Uzman Yardımcısı olarak görev yaptı. Halen TÜBİTAK Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı Makine ve İmalat Teknolojileri Grubunda Bilimsel Programlar Uzman Yardımcısı olarak çalışmakta ve Erciyes Üniversitesi'nde lisansüstü çalışmalarına devam etmektedir.

İletişim Bilgileri:

TÜBİTAK-TEYDEB Atatürk Bulvarı No:221 06100 Kavaklıdere ANKARA

Telefon: +903124671801 - +905333765867

Faks: +903124274305

E-posta: mesut.oztop@tubitak.gov.tr