



**T. C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
EKONOMETRİ ANABİLİM DALI  
İSTATİSTİK BİLİM DALI**

**KALİTE KARAKTERİSTİĞİNİN MODELLENMESİNDE  
TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ: BİR UYGULAMA  
DENEMESİ**

**(DOKTORA TEZİ)**

**Dilek MURAT**

**BURSA - 2013**



**T. C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
EKONOMETRİ ANABİLİM DALI  
İSTATİSTİK BİLİM DALI**

**KALİTE KARAKTERİSTİĞİNİN MODELLENMESİNDE  
TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ: BİR UYGULAMA  
DENEMESİ**

**(DOKTORA TEZİ)**

**Dilek MURAT**

**Danışman:  
Prof. Dr. Necmi GÜRSAKAL**

**İkinci Danışman:  
Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR**

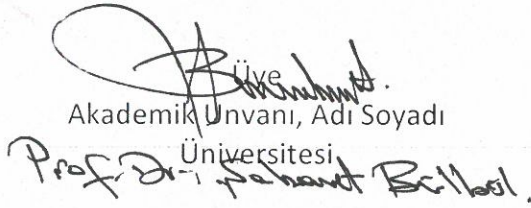
**BURSA – 2013**

T. C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Ekonometri.....Anabilim/Anasanat Dalı,.....İstatistik.....Bilim  
Dalı'nda.....710717001.....numaralı.....Dilek MURAT.....'nın hazırladığı  
"Kalite Karakteristiklerinin Modellenmesinde Tepeki Yöntemi Metaboleği: Bir Uygulama Denemesi."  
konulu Doktora Tezi ile ilgili tez savunma sınavı, 20/12/ 2013 günü 11:00 - 13:00 saatleri  
arasında yapılmış, sorulan sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin başarılı/başarısız  
olduğuna oybirliği/oy çokluğu ile karar verilmiştir.



Üye  
(Tez Danışmanı ve Sınav Komisyonu Başkanı)  
Akademik Unvanı, Adı Soyadı  
Üniversitesi  
Prof. Dr. Necmi GÖRSAKAL



Üye  
Akademik Unvanı, Adı Soyadı  
Üniversitesi  
Prof. Dr. Ayşe ÖZÜZLAR



Üye  
Akademik Unvanı, Adı Soyadı  
Üniversitesi  
Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Üye  
Akademik Unvanı, Adı Soyadı  
Üniversitesi  
Prof. Dr. Feriye ÖDMAN  
ÇELİKGAJA

20/12/ 2013

## ÖZET

Yazar Adı ve Soyadı : Dilek MURAT  
Üniversite : Uludağ Üniversitesi  
Enstitü : Sosyal Bilimler Enstitüsü  
Anabilim Dalı : Ekonometri  
Bilim Dalı : İstatistik  
Tezin Niteliği : Doktora Tezi  
Sayfa Sayısı : xv + 216  
Mezuniyet Tarihi : .... / .... / 20.....  
Tez Danışman(lar)ı : Prof. Dr. Necmi GÜRSAKAL  
Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

### **Kalite Karakteristiğinin Modellenmesinde Tepki Yüzeyi Metodolojisi: Bir Uygulama Denemesi**

Tepki Yüzeyi Metodolojisi, süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimize edilmesi için kullanılan istatistiksel ve matematiksel teknikler bütünüdür. Endüstriyel organizasyonlarda, bu tekniğin en yaygın uygulamaları, birkaç girdi değişkeninin bir ürün veya sürecin performans ölçüsünü veya kalite karakteristiğini potansiyel olarak etkilediğinin düşünüldüğü durumlarda görülmektedir. Söz konusu tekniğin uygulanması esnasında, optimal tasarımın seçilmesi önemli bir problematik olarak görülmektedir. Bu çalışmada, Tepki Yüzeyi tasarımlarının seçiminde grafiksel tekniklerden Varyans Yayılım Grafiği ve Kesirli Tasarım Uzayı Grafiğinin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, önemli Tepki Yüzeyi tasarımları bu tekniklerle karşılaştırılarak kullanılacak etkin tasarım seçilmeye çalışılmıştır. İkinci aşamada, söz konusu tasarımlar kullanılarak talaşlı imalat işlemlerinin iki önemli kalite karakteristiği olan, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile modellenmiş ve ulaşılan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylece bir anlamda, grafiksel tekniklerin bulgularının doğruluğu da araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Tepki Yüzeyi Metodolojisinin talaşlı imalat süreçlerinin modellenmesinde etkili bir biçimde kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, grafiksel tekniklerin tasarım optimalitesinin değerlendirilmesinde kullanışlı bir teknik olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Tepki Yüzeyi Metodolojisi, Tasarım Optimalitesi, Varyans Yayılım Grafiği, Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği, Talaşlı İmalat.

## ABSTRACT

Name and Surname : Dilek MURAT  
University : Uludag University  
Institution : Social Science Institution  
Field : Econometrics  
Branch : Statistics  
Degree Awarded : PhD  
Page Number : xv + 216  
Degree Date : .... / .... / 20.....  
Supervisor (s) : Prof. Dr. Necmi GÜRSAKAL  
Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

### **Response Surface Methodology for Modeling Quality Characteristic: An Application**

Response Surface Methodology is used as a collection of statistical and mathematical techniques to optimize and improve processes. In Industrial organization, the most common applications of this technique, a few input variable characteristics of a product or process potentially affect the performance or quality measure is considered cases. During the application of the technique in question, selecting the optimal design is seen as a major problematic. In this study, the selection of response surface designs, from graphical techniques applicability of Variance Dispersion Graph and Fraction of Design Space Plots were investigated. For this purpose, it is important to Response Surface Designs by comparing these techniques to be used effectively tried to design determination. In the second phase using the design, machining operations which are two important quality characteristics, surface roughness and tool wear modeled by Response Surface Methodology, and the results were compared. So in a way, the accuracy of the findings of the graphical techniques were investigated. The results have shown as that modeling of Response Surface Methodology machining process could be used in an effective manner. In addition, graphical techniques found to be a useful technique for the evaluation of design optimality.

**Keywords:** Response Surface Methodology, Design Optimality, Variance Dispersion Graphs, Fraction of Design Space Plot, Machining.

## ÖNSÖZ

Tepki Yüzeyi Metodolojisi bilim insanlarının, istatistikçilerin ve mühendislerin endüstriyel deneylere yaklaşımlarını etkili bir biçimde değiştirmiştir. Bu yöntem son 30 yıllık süreçte uzay, otomotiv, kimya endüstrisi, elektronik imalat sanayi, talaşlı imalat sanayi, metal kesme ve montaj süreçleri gibi çeşitli endüstriyel alanlarda; fizik, biyoloji mühendislik bilimleri, gıda bilimi ve sosyal bilimler gibi birçok alanda uygulama olanağı bulmaktadır. Bu metodolojide optimal tasarım seçimi önemli bir problematik olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda yapılan literatür incelemelerinde Türkçe literatürdeki çalışmaların son derece sınırlı olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle multidisipliner niteliğe sahip bu tez çalışmasının Türkçe literatüre katkı sağlayacağına inanılmaktadır.

Bu çalışmanın meydana gelmesinde akademik ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, yönlendirmeleri ve bilgilendirmeleriyle çalışmanın her aşamasında yanımda olan danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Necmi Gürsakal'a, çalışmanın özellikle teknik boyutu ile ilgili önemli katkı, destek ve yardımları için yine beni yalnız bırakmayan ikinci danışmanım değerli hocam Prof. Dr. M. Cemal Çakır'a ve yapıcı eleştirileri ile katkıda bulunan jüri üyelerine en içten teşekkürlerimi sunarım. Özellikle deneylerin gerçekleştirilmesi sürecini titizlik ve özveriyle yöneten hocam Doç. Dr. Ali Oral'a, çalışmadaki teknik desteği ve katkıları için Arş. Gör. Cihat Ensarioğlu'na teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalışmaya sağladıkları malzeme desteği için "*Alseko Metal Sanayi Tic. Ltd. Şti.*" ve Sayın Ahmet Koç'a, kesici uç konusundaki yardımları için "*Kennametal*" ve Sayın Onur Arpacı'ya çok teşekkür ederim. Bu süreçte her zaman yanımda olan ve destekleyen aileme ayrıca teşekkür ederim.

Dilek MURAT

Bursa, 2013

## İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar.....	x
ŞEKİLLER.....	xii
GİRİŞ.....	1

## BİRİNCİ BÖLÜM

### KALİTE İYİLEŞTİRİLMESİ VE DENEY TASARIMI

I. KALİTE’NİN TEMEL KAVRAMLARI .....	4
A. KALİTE’NİN TANIMI.....	5
B. KALİTE’NİN TARİHSEL GELİŞİMİ .....	7
II. KALİTE MALİYETLERİ.....	10
A. ÖNLEME veya KORUMA MALİYETLERİ .....	12
B. ÖLÇME ve DEĞERLENDİRME MALİYETLERİ .....	12
C. BAŞARISIZLIK MALİYETLERİ .....	13
III. KALİTE GELİŞTİRME TEKNİKLERİ.....	14
IV. ALTI SİGMA METODOLOJİSİ.....	15
A. ALTI SİGMA’NİN TARİHÇESİ.....	16
B. ALTI SİGMA’NİN TANIMI .....	16
C. ALTI SİGMA’NİN TEMEL ADIMLARI.....	18

## İKİNCİ BÖLÜM

### İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI ANALİZİ VE MODELLEMESİ

I. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI’NİN TARİHSEL GELİŞİMİ .....	21
II. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI KAVRAMI.....	26
A. DENEY TASARIMI TERMİNOLOJİSİ .....	29
B. DENEY TASARIMI STRATEJİLERİ .....	30

<b>C. DENEY TASARIMI TEMEL İLKELERİ</b> .....	31
<b>D. DENEY TASARIMI AŞAMALARI</b> .....	34
<b>III. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI YAKLAŞIMI</b> .....	37
<b>A. FAKTÖRİYEL TASARIMLAR</b> .....	37
<b>B. KESİRLİ FAKTÖRİYEL TASARIMLAR</b> .....	39
<b>C. TAGUCHİ DENEY TASARIMI</b> .....	40

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### TEPKİ YÜZEYİ TASARIMI VE MODELLEMESİ

<b>I. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ</b> .....	43
<b>A. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ'NİN KISA TARİHÇESİ ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	44
1. Grafıksel Metotlara İlişkin Literatür Araştırması .....	47
2. Talaşlı İmalat İşlemlerine İlişkin Literatür Araştırması .....	51
<b>B. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ ve KALİTE İYİLEŞTİRİLMESİ</b> .....	55
<b>C. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ'NDE MODELLEME YAKLAŞIMI</b> .....	56
<b>D. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ'NİN ARDIŞIK YAPISI</b> .....	59
<b>II. TEPKİ YÜZEYİ TASARIMLARI ve MODELLERİ</b> .....	61
<b>A. TEPKİ YÜZEYİ TASARIMLARININ ÖZELLİKLERİ</b> .....	62
<b>B. BİRİNCİ DERECE MODELLER ve TASARIMLARI</b> .....	65
1. İki Faktörlü Faktöriyel Deneyler .....	66
a. Sabit etkiler modelinin istatistiksel analizi .....	68
2. $2^k$ Faktöriyel ve Kesirli Faktöriyel Tasarımlar .....	71
a. $2^2$ faktöriyel tasarımlar .....	72
b. $2^3$ faktöriyel tasarımlar .....	73
c. $2^{3-1}$ kesirli faktöriyel tasarımlar .....	77
3. Simpleks Tasarımlar .....	80
4. Plackett-Burman Tasarımları .....	81
<b>C. İKİNCİ DERECE MODELLER ve TASARIMLARI</b> .....	82
1. $3^k$ Faktöriyel Tasarımlar .....	84
2. Merkezi Bileşik Tasarımlar .....	85
a. Merkezi bileşik tasarımlarda döndürülebilirlik özelliği .....	87



b. Döndürülebilir merkezi bileşik tasarımda merkez denemeler.....	90
c. Küresel bölge, kübik bölge ve yüzey-merkezli tasarım.....	90
3. Box-Behnken Tasarımları.....	92
4. Diğer İkinci Derece Tasarımlar .....	96
<b>III. TEPKİ YÜZEYİ TASARIMLARININ ETKİNLİĞİ .....</b>	<b>96</b>
<b>A. TASARIM OPTİMALİTESİ.....</b>	<b>97</b>
<b>B. TASARIM OPTİMALİTESİ KRİTERLERİ.....</b>	<b>98</b>
<b>C. TASARIMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI .....</b>	<b>101</b>
1. Sayısal Kriterler.....	103
2. Grafikselle Metotlar .....	104
a. Varyans yayılım grafiği .....	104
(1). Ortalama küresel tahmin varyansı .....	105
(2). Küresel tahmin varyansının özellikleri .....	107
(3). Üç-boyutlu varyans yayılım grafiği .....	109
b. Kantil yayılım grafiği .....	110
c. Kesirli tasarım uzayı grafiği .....	111
<b>IV. TEPKİ YÜZEYLERİNİN ANALİZİ .....</b>	<b>114</b>
<b>A. MODEL YETERLİLİĞİNİN KONTROLÜ.....</b>	<b>114</b>
1. Kalıntıların Analizi.....	115
2. Uyum Eksikliği Testi.....	115
3. Çekicilik Fonksiyonunun Analizi.....	116
<b>B. AMPİRİK MODELLERİN ANALİZİ .....</b>	<b>118</b>
1. Birinci Dereceden Tepki Yüzeylerinin Analizi.....	119
a. En dik artış (azalış) yolunun belirlenmesi .....	119
b. Etkileşim ve eğriselliğin değerlendirilmesi .....	121
2. İkinci Dereceden Tepki Yüzeylerinin Analizi.....	123
a. Durağan noktanın konumunun belirlenmesi.....	123
b. Durağan noktanın kanonik analizi.....	124

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ

<b>I. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ.....</b>	<b>127</b>
<b>A. SERT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ.....</b>	<b>128</b>

<b>B. TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ</b> .....	130
<b>C. TALAŞLI İMALATI ETKİLEYEN FAKTÖRLER</b> .....	132
1. Kesme Hızı .....	133
2. İlerleme .....	133
3. Talaş Derinliği .....	134
<b>D. TALAŞLI İMALAT ve YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ</b> .....	134
1. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi .....	136
2. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler .....	137
<b>E. TALAŞLI İMALAT ve KESİCİ TAKIMLARDA AŞINMA</b> .....	138
1. Kesici Takımlarda Aşınma Tipleri .....	140
2. Kesici Takım Aşınmasının Belirlenmesi .....	141
<b>F. TALAŞLI İMALAT ve CNC TAKIM TEZGAHLARI</b> .....	141
<b>G. TALAŞLI İMALAT ve EKONOMİ</b> .....	143
1. Ekonomiklik Faktörleri .....	144
2. Maliyetler .....	147
3. Optimizasyon.....	150

## **BEŞİNCİ BÖLÜM**

### **UYGULAMA**

<b>I. VARYANS YAYILIM GRAFİĞİ TEKNİĞİ İLE UYGUN TASARIMIN BELİRLENMESİ</b> .....	154
<b>II. KESİRLİ TASARIM UZAYI TEKNİĞİ İLE UYGUN TASARIMIN BELİRLENMESİ</b> .....	160
<b>III. MATERYAL ve METOT</b> .....	164
<b>IV. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ İLE MODELLENMESİ</b> .....	166
<b>V. TAKIM AŞINMASININ TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ İLE MODELLENMESİ</b> .....	181
<b>VI. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ve TAKIM AŞINMASININ OPTİMİZASYONU</b> .....	190
<b>SONUÇ</b> .....	<b>193</b>
<b>TERİMLER SÖZLÜĞÜ</b> .....	<b>201</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>202</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>216</b>

## TABLULAR

Tablo 1.1. Kalite'nin Boyutları.....	6
Tablo 1.2. Kalite Metotlarının Zaman Çizelgesi.....	8
Tablo 1.3. Altı Sigma'nın Adımları ve Yapılacak İşler.....	19
Tablo 2.1. Deneysel Tasarım Terminolojisi.....	29
Tablo 3.1. İki Faktörlü Faktöriyel Tasarım için Veri Düzenlemesi.....	67
Tablo 3.2. İki Faktörlü Faktöriyel Deney için Varyans Analizi Tablosu.....	70
Tablo 3.3. Üç Faktörlü Sabit Etkiler Modeli için Varyans Analizi Tablosu .....	71
Tablo 3.4. $2^3$ Tasarımında Hesaplanan Etkilerin Cebirsel İşaretleri.....	77
Tablo 3.5. N=12 Deneme için Plackett-Burman Tasarımı.....	82
Tablo 3.6. k=2 ve k=3 için Merkezi Bileşik Tasarım Düzenleri.....	87
Tablo 3.7. Döndürülebilir Merkezi Bileşik Tasarım için $\alpha$ Değerleri.....	89
Tablo 5.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Merkezi Bileşik Tasarım.....	156
Tablo 5.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Box-Behnken Tasarımı.....	157
Tablo 5.3. Box-Behnken Tasarımı ile Ra için Kesici Faktör Düzeyleri .....	169
Tablo 5.4. Ra için Box-Behnken Tasarımı.....	169
Tablo 5.5. Box-Behnken Tasarımı ile Ra için Model Tahmini Sonuçları.....	171
Tablo 5.6. Box-Behnken Tasarımı ile Ra için Varyans Analizi Sonuçları.....	171
Tablo 5.7. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra için Kesici Faktör Düzeyleri.....	175
Tablo 5.8. Ra ve VB için Merkezi Bileşik Tasarım.....	176
Tablo 5.9. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra için Model Tahmini Sonuçları.....	178
Tablo 5.10. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra için Varyans Analizi Sonuçları.....	179

Tablo 5.11. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Model Tahmini Sonuçları.....	187
Tablo 5.12. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Varyans Analizi Sonuçları.....	188
Tablo 5.13. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra ve VB için Optimizasyon Sonuçları.....	190

## ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Kalite İyileştirme Çalışmaları ile Kalite Maliyetleri İlişkisi.....	12
Şekil 2.1. Üç Temel Yöntemin Kalite Düzeyine Katkısı.....	24
Şekil 2.2. Sürecin Genel Modeli.....	28
Şekil 3.1. Bir Teorik Tepki Yüzeyi.....	57
Şekil 3.2. Bir Teorik Tepki Yüzeyinin Kontur Grafiği.....	57
Şekil 3.3. İşletilebilir Bölge ve Deney Bölgesi.....	60
Şekil 3.4. $2^2$ Faktöriyel Tasarım.....	73
Şekil 3.5. $2^3$ Faktöriyel Tasarım.....	73
Şekil 3.6. Faktöriyel Tasarımda Ana Etkiler ve Etkileşimlerin Geometrik Gösterimi.....	75
Şekil 3.7. $k=2$ ve $k=3$ için Simpleks Tasarımlar.....	80
Şekil 3.8. Bir $3^3$ Tasarımda Deneme Kombinasyonları.....	84
Şekil 3.9. $k=2$ ve $\alpha = \sqrt{2}$ için Merkezi Bileşik Tasarım.....	86
Şekil 3.10. $k=3$ ve $\alpha = \sqrt{3}$ için Merkezi Bileşik Tasarım.....	86
Şekil 3.11. $k=3$ ve $\alpha = 1$ için Yüzey-Merkezli Tasarım.....	91
Şekil 3.12. Küresel Bölge.....	92
Şekil 3.13. $k=3$ için Box-Behnken Tasarımının İki Gösterimi.....	94
Şekil 3.14. $k=3$ ve $n_c = 1$ için Box-Behnken Tasarımı.....	95
Şekil 3.15. $3^3$ Faktöriyel Tasarımı.....	95
Şekil 3.16. Bir Yüzey Merkezli Küp Tasarımı için Varyans Yayılım Grafiği .....	109
Şekil 3.17. Klasik Bir Varyans Yayılım Grafiği (solda) ve Üç Boyutlu Bir Varyans Yayılım Grafiği (sağda).....	110

Şekil 3.18. Bir Merkezi Bileşik Tasarım (solda) ve Box-Behnken Tasarımı (sağda) için Kantil Yayılım Grafiği.....	111
Şekil 3.19. Bir Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği ile Üç Tasarımın Karşılaştırılması.....	113
Şekil 3.20. Eşanlı Optimizasyon için Bireysel Çekicilik Fonksiyonları .....	117
Şekil 3.21. Bir En Dik Artış Yolu Örneği.....	120
Şekil 3.22. İkinci Dereceden Bir Modelin Kanonik Formu.....	126
Şekil 4.1. Talaş Kaldırma Yöntemleri.....	130
Şekil 4.2. Tornalama İşlemi.....	131
Şekil 4.3. Kesme ve İlerleme Hızları .....	134
Şekil 4.4. Yüzey Pürüzlülüğü ve Değerlendirilmesi .....	137
Şekil 4.5. Kesici Uç Üzerindeki Aşınma Bölgeleri .....	140
Şekil 4.6. Serbest Yüzey Aşınması .....	141
Şekil 4.7. Üretim Maliyetini Oluşturan Maliyetler .....	144
Şekil 4.8. Aşınmanın Gelişimi ve Ömür .....	145
Şekil 4.9. Ömür / Kesme Hızı Bağlantısı .....	146
Şekil 4.10. İlerlemenin Takım Ömrüne Etkisi .....	147
Şekil 4.11. Bir Parçanın İşlenme Maliyetini Etkileyen Faktörler .....	148
Şekil 4.12. Üretim Maliyetleri ve Verimlilik .....	149
Şekil 4.13. Talaşlı İmalat İşlemlerinde Kullanılan Modelleme ve Optimizasyon Teknikleri.....	152
Şekil 5.1. Merkezi Bileşik Tasarımdaki Merkez Denemelerin Ölçekli Tahmin Varyansı Üzerindeki Etkisi.....	158
Şekil 5.2. Merkezi Bileşik Tasarım ve Box-Behnken Tasarımı için Varyans Yayılım Grafiği.....	159
Şekil 5.3. Merkezi Bileşik Tasarım için Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği.....	162

Şekil 5.4. Box-Behnken Tasarımı için Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği.....	163
Şekil 5.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Parçası Malzemesinin Özellikleri.....	164
Şekil 5.6. Deneysel Çalışmada Kullanılan CNC Torna Tezgahı.....	165
Şekil 5.7. Deneysel Çalışmada Kullanılan Seramik Kesici Uçun Özellikleri.....	165
Şekil 5.8. Yüzey Pürüzlülüğü için Balık Kılçığı Diyagramı.....	167
Şekil 5.9. Yüzey Pürüzlülüğü ve Değerlendirilmesi.....	168
Şekil 5.10. Box-Behnken Tasarımı için Deneysel Tasarım Noktaları.....	168
Şekil 5.11. Box-Behnken Tasarımı için Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	170
Şekil 5.12. Box-Behnken Tasarımı ile Ra için Kalıntı Grafikleri.....	172
Şekil 5.13. Box-Behnken Tasarımı ile Ra için Kontur Grafiği.....	173
Şekil 5.14. Box-Behnken Tasarımı ile Ra için Yüzey Grafiği.....	173
Şekil 5.15. Box-Behnken Tasarımı ile Ra için Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerler.....	174
Şekil 5.16. Merkezi Bileşik Tasarım için Deneysel Tasarım Noktaları.....	175
Şekil 5.17. Merkezi Bileşik Tasarım için Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	177
Şekil 5.18. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra için Kalıntı Grafikleri.....	179
Şekil 5.19. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra için Kontur Grafiği.....	180
Şekil 5.20. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra için Yüzey Grafiği.....	180
Şekil 5.21. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra için Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerler.....	181
Şekil 5.22. Bir Tornalama Süreci için Ishikawa Neden-Sonuç Diyagramı.....	182
Şekil 5.23. Aşınmanın Gelişimi ve Ömür.....	183
Şekil 5.24. Ömür / Kesme Hızı Bağlantısı.....	183
Şekil 5.25. Serbest Yüzey Aşınması.....	184

Şekil 5.26. Box-Behnken Tasarımı için Kesme Parametrelerinin Takım Aşınmasına Etkisi.....	185
Şekil 5.27. Merkezi Bileşik Tasarım için Kesme Parametrelerinin Takım Aşınmasına Etkisi.....	186
Şekil 5.28. Takım Ömrü ve Kesme Parametreleri İlişkisi.....	187
Şekil 5.29. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Kalıntı Grafikleri.....	188
Şekil 5.30. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Kontur Grafiği.....	189
Şekil 5.31. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Yüzey Grafiği.....	189
Şekil 5.32. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerler.....	190
Şekil 5.33. Farklı İşleme Proseslerinde Elde Edilen Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri.....	191
Şekil 5.34. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra ve VB için Optimizasyon Grafiği.....	192



## GİRİŞ

Küreselleşme süreci ile birlikte uluslararası rekabetin giderek arttığı, müşteri istek, beklenti ve gereksinimlerinin daha önemli hale geldiği yeni bir global pazarın oluştuğu gözlenmektedir. Bu süreçte, ekonomilerde yaşanan büyük belirsizliklerin olumsuz etkileri firma yöneticilerini birtakım politikalar uygulamaya yöneltmektedir. Ayrıca üretilen ürün veya hizmetin niteliği ve talep düzeyi dolayısıyla da kalite kavramı önemli bir veri olarak karşımıza çıkmaktadır. İşletmelerin rekabet edebilme yetenekleri, temel olarak ürünleri kaliteli ve düşük maliyetle üretebilmelerine bağlıdır. Üretilen ürün kalitesinin artırılabilmesinin maliyeti yanında fire ve yeniden işleme maliyetleri gibi kalitesizlik maliyetleri, işletmeleri dezavantajlı duruma getirmektedir. Yıllık satış cirosu içinde oldukça yüksek bir orana sahip bu maliyetler, çoğunlukla işletmelerin toplam net karından fazla olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, 2000’li yıllardan itibaren kalite konusunda istatistiksel ve yönetimle ilgili tekniklere olan duyarlılığın son derece arttığı ve sonuç olarak, ileri istatistiksel metodolojileri kullanan Altı Sigma yaklaşımının endüstrilerde giderek yaygınlaştığı gözlenmektedir.

Bir süreç iyileştirme tekniği olan Altı Sigma metodolojisinin kullandığı en etkili tekniklerden biri olan ve uygulayan işletmelerin kalite gelişmesine önemli katkılarda bulunan deney tasarımı tekniği, bu metodolojinin bir anahtar bileşeni olarak kabul edilir. Çeşitli deney tasarımı teknikleri içinde, “*en iyi tahmin*” ve “*bir seferde bir faktör*” yaklaşımından çok daha etkin bir strateji olan “*faktöriyel deney*” yaklaşımına dayanan Tepki Yüzeyi Metodolojisi en ileri tekniktir. Daha az deney gerektirmesi, eğriselliğin değerlendirilebilmesi ve optimizasyona imkan vermesi gibi üstünlükleri bünyesinde barındıran ve kendine özel bir terminolojiye sahip olan bu tekniğin önemi son yıllarda giderek artmaktadır. Söz konusu tekniğin uygulanması aşamasında, optimal tasarım teorisi bağlamında uygun bir tasarımın seçilmesi problemi çok yönlü, çok önemli ve aşılması güç bir sorundur.

Bu tez çalışmasının temel amacı, istatistiksel deney tasarımı yaklaşımlarından biri olan Tepki Yüzeyi Metodolojisi'nin detaylı bir biçimde ele alınmasıdır. Bu bağlamda çalışmanın birinci hedefi, optimal tasarım teorisi doğrultusunda uygun tasarımın seçilmesi probleminin incelenmesidir. Kısıtlı kaynaklar, maliyetler ve deneysel çalışmanın güçlükleri göz önüne alındığında, uygun bir tasarımın belirlenmesinin son derece önemli bir konu olduğu daha iyi anlaşılacaktır. Söz konusu problemin giderilmesinde, sayısal kriterlerden çok daha etkili olan grafiksel yöntemler kullanılarak etkin tasarım belirlenmeye çalışılacaktır. Böylece alandaki Türkçe literatürdeki eksiklik göz önüne alındığında, literatüre de katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Bu amaçla Giovannitti-Jensen ve Myers (1989) tarafından geliştirilen Varyans Yayılım Grafikleri ve Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) tarafından geliştirilen Kesirli Tasarım Uzayı Grafikleri kullanılacaktır. Çalışmadaki ikinci amaç; talaşlı imalatta bir kalite karakteristiği olarak kabul edilen, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının kesme parametreleri ile ilişkisinin Tepki Yüzeyi Metodolojisi kullanılarak modellenmesidir. Üçüncü ve son olarak, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının optimizasyonu hedeflenmektedir.

Birinci bölümde, ele alınan sorunun bir kalite problemi olmasından dolayı kalite kavramı, kaliteyi oluşturan temel unsurlar, kalite maliyetleri ve kalite geliştirme teknikleri gibi temel konular üzerinde durulacaktır. Yine bu bölümde, son olarak Altı Sigma Metodolojisi'nin tarihçesi ve adımlarından bahsedilecektir.

İkinci bölümde istatistiksel deney tasarımı kavramına ilişkin temel ilkeler, konunun tarihsel gelişimi ve terminolojisinin tanıtılması amaçlanmıştır. Böylece, Tepki Yüzeyi Metodolojisi'nin daha iyi anlaşılabilmesi için bir alt yapı hazırlanarak genel bir bakış sağlanmaya çalışılacaktır. Ayrıca önemli diğer deney tasarımı yaklaşımları olan faktöriyel tasarımlar, kesirli faktöriyel tasarımlar ve Taguchi deney tasarımı tekniklerinden kısaca söz edilecektir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, Tepki Yüzeyi Metodolojisi'nin tarihsel gelişim süreci, kalite iyileştirmede kullanımı, birinci ve ikinci dereceden modeller ve tasarımların özellikleri açıklanacaktır. İkinci dereceden tasarımlar ailesinin en önemli iki üyesi olan Merkezi Bileşik Tasarım ve Box-Behnken Tasarımları ayrıca ele alınacaktır. Tasarım optimalitesi kavramı, tasarımların karşılaştırılmasında kullanılan sayısal ve grafiksel tekniklere yer verildikten sonra Tepki Yüzeyi analiz yöntemlerinden söz edilecektir.

Uygulamanın yapıldığı alan olması nedeniyle dördüncü bölümde, talaşlı imalat işlemine ilişkin temel dinamiklerin verilmesi uygun görülmüştür. Bu bağlamda talaşlı imalat sürecinin yapısı, sert malzemelerin talaşlı imalat işlemi, talaşlı imalatı etkileyen faktörler ve önemli bir talaşlı imalat tekniği olan tornalama işlemi hakkında bilgi verilecektir. Tornalama işleminde karşılaşılan en önemli problemlerden olan takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve bunları etkileyen parametreler ile bunların getirdikleri maliyetler üzerinde durulacaktır.

Son olarak uygulama bölümü olan beşinci bölümde, en çok kullanılan Tepki Yüzeyi tasarımlarından Merkezi Bileşik Tasarım ve Box-Behnken Tasarımları grafiksel yöntemlerden Varyans Yayılım Grafiği ve Kesirli Tasarım Uzayı teknikleri ile karşılaştırılarak etkin tasarımın belirlenmesine çalışılacaktır. Sonraki aşamada; talaşlı imalat sürecinde karşılaşılan önemli kalite problemlerinden olan takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü Tepki Yüzeyi Metodolojisi kullanılarak modelleme, analiz ve optimizasyon işlemine tabi tutulacaktır. Böylece söz konusu kalite karakteristiklerini etkileyen faktörler ve bu kalite karakteristiklerinin optimum düzeyleri araştırılacaktır.

## **BİRİNCİ BÖLÜM**

### **KALİTE İYİLEŞTİRİLMESİ ve DENEY TASARIMI**

Küreselleşme ile birlikte ekonomik, sosyal, siyasal ve kültürel anlamda değişimlerin yaşanması, ekonomik anlamda ülke pazarlarının yerini bölgesel ve küresel pazarlara bırakmasıyla birlikte uluslararası rekabetin artması, konjonktürel hareketlerin işletmeleri yakından etkilemesine yol açmıştır. Uluslararası rekabetin giderek artan bir trend izlediği günümüz ekonomilerinde; işletmelerin belirsizlik ortamında doğru kararlar alabilmeleri, küresel krizlerden görecekları zararları minimize edebilmeleri ve başarılı olabilmeleri daha güçlü, değişime açık bir örgütlenme ve iş yönetim modellerini bünyelerine adapte edebilmeleriyle ilişkilidir. İşletmelerin problemlerinin temel kaynağının israf, düşük verim, düşük kalite, müşteri memnuniyetsizliği ve fiyat rekabetine olan dayanıksızlıkları olduğu düşünüldüğünde; sürekli iyileştirme ile kalitenin iyileştirilmesi, maliyetlerin düşürülmesi ve müşterinin memnun edilmesi sağlanmalıdır. Son dönemlerde müşterinin daha fazla ön plana çıkması, müşteriye yüksek kaliteli mal veya hizmetin uygun fiyatla sunulması ilkesini gündeme getirmiştir.

Çalışmaya genel bir giriş niteliği taşıyan bu ilk bölümde; öncelikle kalitenin temel kavramları ve tarihsel gelişimi ele alınacaktır. Önleme ve koruma maliyetleri, ölçme ve değerlendirme maliyetleri ve başarısızlık maliyetleri gibi kalite maliyetleri açıklanacaktır. Kalite geliştirme teknikleri başlığı altında temel, orta ve ileri düzeydeki deney tasarımı yöntemlerinin de içerildiği istatistiksel tekniklerden söz edilecektir. Deney tasarımı yöntemlerinin Altı Sigma Metodolojisi'nde kullanılan ileri bir istatistiksel teknik olması nedeniyle, bu metodolojiye genel hatlarıyla değinilecektir.

#### **I. KALİTE'NİN TEMEL KAVRAMLARI**

Birçok bilim adamının ilgi alanına giren kalite konusunda ilk dönemlerde en çok üzerinde durulan hedef, üretim süreçlerini kontrol altına almak olmuştur. Bu dönemlerde

süreci düzeltmekten çok ne kadar hatalı çıktı ürettiğini denetlemek amacıyla 1920’li yıllarda ilk kez Dr. Walter A. Shewhart tarafından geliştirilen kontrol şemaları kullanılmıştır. Bu sayede, bir sürecin ne kalitede çıktı ürettiği ve kontrol altında olup olmadığı anlaşılabilmiştir. 1950’li yıllarda ise, çıktıların değil sürecin önemli olduğu, kalite uzmanı W. Edwards Deming tarafından ortaya atılmış ve bu düşünce sonraki yıllarda yaygınlaşarak benimsenmiştir. Aynı yıllarda, kalitenin önemini kaçınılabilen ve kaçınılamayan maliyetlerle açıklayan ve kendi adıyla kurulu bir enstitü sahibi olan Dr. Joseph M. Juran da kalite konusuna katkılarda bulunmuş önemli bir isimdir. 1956 yılında Armand V. Feigenbaum bir adım daha ilerleyerek Toplam Kalite kavramını öne sürmüştür (Yamak, 1998: 87-89).

### A. KALİTE’NİN TANIMI

Kalite kavramının çok geniş içerikli ve kişiye göre değişebilen bir kavram olması nedeniyle, tek bir tanımını vermek mümkün olamamaktadır. Fransızca kökenli bir kelime olan “*kalite*”, Türk Dil Kurumu’nun Büyük Türkçe Sözlüğü’nde, “Bir ürünün bilinen en iyi özellikleri bünyesinde taşıması” olarak tanımlanmaktadır (<http://tdkterim.gov.tr/bts/>). Kısa bir tanımla kalite, müşteri memnuniyeti ve kullanıma uygunluk olarak da nitelendirilebilir (Juran - Gryna, 1993: 3).

Kalite, kesinlikle genelde tanımlandığı gibi mutlak anlamda en iyi demek değildir. Bunun yerine, kalitenin mamulün hizmet ettiği amaca göre anlam kazanacağı düşüncesiyle genel olarak, amaca uygunluk derecesi olarak tanımlanması yerinde olacaktır (Kobu, 1981: 13). O halde bir mal veya hizmetin kalitesinden söz ederken, o mal veya hizmetin kullanılış amacı ve fiyatı olmak üzere iki temel faktörün göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Diğer taraftan kalitenin müşteri, süreç ve çalışan olmak üzere üç temel elemanı bulunmaktadır. Kalite yaptığımız işe bizim değil, bütün ilişkilerin odağında bulunan müşterinin perspektifinden bakmamızı gerektirir. Bir diğer ifadeyle süreçlere, “dışarıdan içeri doğru” bakmamızı gerekli kılar (Gürsakal, 2010: 31).

Kalite terimi, genellikle ürün veya hizmetlerin karşılanması veya beklentilerin üstünde karşılanması durumunda kullanılan bir ifadedir. Bir ürün veya hizmetin beklentileri aşması durumu, akla kalite kavramını getirmektedir. Bu yönüyle kalite, temelde algıya dayalı bir kavramdır. Kalite; Q kaliteyi, P performansı ve E beklentileri göstermek üzere  $Q=P/E$  oranı ile ifade edilebilir. Söz konusu oranın 1’den büyük olması

durumunda, müşterinin ürün veya hizmetten memnun olduğu söylenir. Burada P ve E'nin belirlenmesi büyük ölçüde algılamaya bağlı olacaktır. Organizasyon performansını, müşteri beklentileri belirler. Müşteri beklentileri ise, gittikçe daha fazla talepkar olma yönünde olacaktır (Besterfield, 2004: 2).

Dar anlamda kalite denilince ürün kalitesi akla gelirken geniş anlamda kalite; iş kalitesi, hizmet kalitesi, iletişim kalitesi, süreç kalitesi, işçiler, mühendisler, idareciler ve yöneticiler de dahil insanların kalitesi, sistem kalitesi, firma kalitesi, hedeflerin kalitesi vb. unsurları bünyesinde barındıran bir kavram olarak betimlenebilir (Ishikawa, 1997: 47).

1987 yılında David A. Garvin kaliteyi performans, nitelik, uygunluk, güvenilirlik, dayanıklılık, servis görülebilirlik, etkilenme, estetik ve saygınlık olmak üzere dokuz boyut altında değerlendirmiştir. Söz konusu boyutlar ve anlamları Tablo 1.1'de verilmiştir. Bu boyutlar, birbirinden oldukça farklı olduğu için bir ürün bir boyutta mükemmel olabilirken, başka bir boyutta ortalama veya yetersiz olabilir. Çok az ürün bu boyutların tümünde başarı gösterebilir. Bundan dolayı, bir ürünün kalitesi bu boyutların birkaçı göz önüne alınarak tanımlanabilir (Besterfield, 2004: 2).

**Tablo 1.1. Kalite'nin Boyutları**

Performans (Performance)	Birincil karakteristikler, bir resmin parlaklığı gibi.
Nitelik (Features)	İkincil karakteristikler, uzaktan kumanda gibi.
Uygunluk (Conformance)	Endüstri standartlarını veya spesifikasyonları karşılama, işçilik gibi.
Güvenilirlik (Reliability)	Zamanla performansın tutarlılığı, hatalı birim başına ortalama zaman gibi.
Dayanıklılık (Durability)	Kullanım ömrü, tamiri de içeren.
Servis görülebilirlik (Service)	Şikayetlerin ve problemlerin çözümü, kolay tamir.
Etkilenme (Response)	İnsan insana interfaz, satıcının nezaketi gibi.
Estetik (Aesthetics)	Duyusal karakteristikler, dış görünüş gibi.
Saygınlık (Reputation)	Geçmiş performans ve diğer manevi değerler, ilk sırada olmak gibi.

**(Kaynak: Besterfield, 2004, s. 3)**

Kalite kavramının tanımı kişiden kişiye değişmektedir. Bu bağlamda, kalite konusunda önemli katkıları olan bilim insanı ve uzmanlara göre kalite tanımlarının verilmesi yerinde olacaktır. W. Edwards Deming'e göre kalite, tüketicilerin potansiyel gereksinimlerini tatmin edebilme yeteneğidir. Joseph M. Juran kaliteyi, kullanıma uygunluk ve kusursuzluk arayışı olarak tanımlamıştır. Armand V. Feigenbaum için kalite, bir ürünün tasarımına veya özelliklerine uygunluk derecesidir. Kaoru Ishikawa'nın kalite tanımı; en ekonomik, en kullanışlı ve tüketiciyi her zaman tatmin eden kaliteli ürün

geliştirmek, tasarlamak, üretmek ve satış sonrası hizmet vermektir. Philip B. Crosby kalite için, “ürünün arzu edilen özelliklere uygunluk derecesi” tanımını yapmıştır. Genichi Taguchi de kaliteyi, “ürünün tesliminden sonra toplumda yol açtığı minimum zarar” olarak tanımlamıştır (Işığışok, 2004: 7-8).

Ürün bazında yapılan tanımların yanı sıra yapılan hizmetlerde de kalite, beklenen bir niteliktir. Bu amaçla, hizmeti de kapsayan ve uluslararası düzeyde kabul gören kalite tanımları yapılmıştır. Amerikan Kalite Kontrol Derneği’ ne (ASQC-American Society for Quality Control) göre kalite, bir mal veya hizmetin bir gereksinimi karşılayabilme yeteneklerini ortaya koyan karakteristiklerin tamamını ifade ederken; Avrupa Kalite Kontrol Organizasyonu (EOQC-European Organization for Quality Control) kaliteyi, belirli bir mal ya da hizmetin tüketicinin isteklerine uygunluk derecesi olarak tanımlamıştır.

## **B. KALİTE’NİN TARİHSEL GELİŞİMİ**

Kalite kavramının tarihsel evrimine göz atıldığında, Milattan önceki yıllarda dahi Babilliler, Fenikeliler ve Mısırlılar tarafından muayenenin, memnuniyetsizliklerin giderilmesi ve ticari ahlakın oluşturulması amacıyla önemle üzerinde durulan bir konu olduğu gözlenmektedir. Kalite, her zaman ürünler ve süreçler için oldukça önemli olan ve zaman içinde kullandığı teknikler bağlamında evrimsel süreç geçiren bir kavramdır. Kalite için söz konusu bu sürecin önemli gelişmeleri, Tablo 1.2’de kronolojik bir düzende verilmiştir.

Modern endüstriyel sistemin doğuşuyla beraber 1800’lü yılların sonlarına doğru gelindiğinde ise, ABD’de Frederick W. Taylor, kompleks ürün ve süreçler için işin daha küçük birimlere ayrılmasını hedefleyen “*Bilimsel Yönetim*” ilkelerini tanıtmıştır (Montgomery, 2001a: 11). 1900’lerin başlarında Henry Ford, şirketinde imalatta hareketli montaj hattını kurarak hatalı ürünleri ayırma işlemini sağlamıştır. 1920’lerde Bell laboratuvarları kalite, kontrol (inspection), test ve ürün güvenilirliğini vurgulayan bir kalite departmanı formunu almıştır. 1924 yılında kalite konusunda Taylor’dan sonra önemli katkılarda bulunan Walter A. Shewhart, İstatistiksel Süreç Kontrol (SPC-Statistical Process Control) kavramını ve günümüzde de kendi adıyla anılan kontrol kartlarını tanıtmıştır.

**Tablo 1.2. Kalite Metotlarının Zaman Çizelgesi**

1875	Taylor "Bilimsel Yönetim" ilkelerini tanıttı.
1901	İlk standart laboratuvar Büyük Britanya'da kuruldu.
1922-1923	R. A. Fisher deney tasarımı ve tarımsal alandaki uygulamaları üzerine temel makalelerini yayınladı.
1924	Shewhart kontrol kartları kavramını Bell Laboratuvarlarında tanıttı.
1932-1933	İngiliz tekstil ve ahşap endüstrisi ile Alman kimya endüstrisi ürün ve proses gelişimi için deney tasarımı kullanmaya başladı.
1946	Çeşitli kalite topluluklarının birleşmesiyle Amerikan Kalite Kontrol Derneği kuruldu.
1948	Prof. G. Taguchi deney tasarımı uygulamalarına başladı.
1950	Deming, Japon endüstrisindeki yöneticilerini eğitmeye başladı; istatistiksel kalite kontrol yöntemleri Japonya'da yaygın olarak öğrenilmeye başlandı.
1951	Feigenbaum Toplam Kalite Kontrol kitabını yayınladı. JUSE kalite kontrol yöntemlerinin önemli başarılı uygulamaları için "Deming Ödülü"nü tanıttı. G.E.P. Box ve K.B. Wilson özellikle kimya endüstrisine odaklanan deney tasarımı ve proses optimizasyonu için tepki yüzeyi metodolojisi hakkındaki temel çalışmalarını yayınladı. Daha sonra kimya endüstrisinde uygulanan deney tasarımı uygulamaları adım adım gelişti.
1954	Dr. Joseph Juran kalite yönetimi ve geliştirilmesi üzerine dersler vermek için Japonlar tarafından davet edildi.
1959	Technometrics (Fiziksel, Kimyasal ve Mühendislik Bilimleri hakkındaki istatistik dergisi) kurdu.
1960	G.E.P. Box ve J.S. Hunter faktöriyel tasarımlar hakkındaki temel makalelerini yazdı.
1980'ler	Deneyel tasarım yöntemleri tanıtıldı ve elektronik, uzay, yarı iletken ve otomotiv endüstrisini de içeren geniş bir grup organizasyon tarafından kabul gördü. Prof. G. Taguchi'nin deney tasarımı hakkındaki çalışmaları Amerika'da ilk kez ortaya çıktı.
1988	Malcolm Balridge Ulusal Kalite Ödülü Amerikalılar tarafından tanıtıldı.
1989	Motorola'nın Altı Sigma konusundaki girişimleri başladı.
1997	Motorola'nın Altı Sigma yaklaşımı diğer endüstrilere de yayıldı.

**(Kaynak: Montgomery, 2001a,s. 9-11)**

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki dönemde, teknolojinin gelişmesiyle birlikte ürün kalitesinin iyileştirilmesi ihtiyacı, kalite kontrol çalışmalarına ivme kazandırmıştır. 1946'da çeşitli kalite topluluklarının birleşmesiyle Amerikan Kalite Kontrol Derneği oluşturulmuştur. 1950 yılında Shewhart ile birlikte Bell laboratuvarlarında çalışan W. Edwards Deming, Japon Bilim Adamları ve Mühendisleri Birliği (JUSE–Japanese Union of Scientists and Engineers) tarafından önde gelen işadamları ve mühendislere kalite hakkında konferans vermek üzere Japonya'ya davet edilmiştir (Bozkurt, 2010: 24). Deming'in "*Planla, Uygula, Kontrol et, Harekete geç*" (PDCA–Plan, Do, Control, Act) döngüsünün ve on dört maddeden oluşan ilkelerinin inançla ve etkili bir biçimde uygulanması sonucu, Japon endüstrisinde kalite ve verimlilikte önemli iyileşmeler ve gelişmeler sağlanmıştır.



General Electric firmasında yönetici olarak çalışan Armand V. Feigenbaum, 1951 yılında “*Toplam Kalite Kontrol*” kitabını yayımlayarak “*Toplam Kalite Kontrolü*” (TQC-Total Quality Control) kavramını kullanmıştır. Toplam Kalite Kontrol, müşteri memnuniyetini en ekonomik düzeyde karşılamak amacıyla bir organizasyondaki çeşitli grupların kalite geliştirme, sürdürme ve iyileştirme çabalarını birleştiren etkili bir sistemdir (Feigenbaum, 1991: 6).

Bu gelişmelerin ardından, W. Edwards Deming ve Joseph Juran’ın çalışmaları sonucu “*Toplam Kalite Yönetimi*” (TQM–Total Quality Management) kavramı ortaya çıkmıştır. Toplam Kalite Yönetimi uzun vadede müşteri tatminini, başarmayı, kendi personeli ve toplum için avantajlar elde etmeyi amaçlayan kalite üzerine yoğunlaşmış ve tüm personelin katılımına dayanan bir kuruluş yönetim biçimi olarak tanımlanmaktadır (Efil, 2010: 68). Liderlik, sürekli gelişme, katılımcılık, müşteri odaklılık, ve sürekli eğitim öğelerine sahip olan Toplam Kalite Yönetimi; tüketicinin tüketici beklentilerini ekonomik bir biçimde karşılamak amacıyla, tüm çalışanların katılımı ile tüm işçilerin sürekli geliştirilmesini öngören çevreye saygılı bir yönetim anlayışıdır (Demir – Gümüşoğlu, 1998: 31).

1960’lı yıllarda bu gelişmelerin çatısı altında problem çözme, müşteri memnuniyeti gibi amaçlara hizmet eden teknikler geliştirilmiştir. Kouru Ishikawa tarafından geliştirilen “*Kalite Çemberleri*”, “*Neden-Sonuç Diyagramı*”, Genichi Taguchi tarafından çalışılan “*Deney Tasarım Metodolojisi*”, G.E.P. Box ve K.B. Wilson tarafından çalışılan süreç optimizasyonunu hedefleyen ve özellikle kimya endüstrisine odaklanan “*Tepki Yüzeyi Metodolojisi*” bu tekniklerin en önemlileri arasında yer almaktadır. Ayrıca Taaichi Ohna’nın “*Tam Zamanında Üretim*” (JIT–Just in Time) modeli, yönetim de dahil işletmedeki tüm çalışanlar ve süreçlerin sürekli iyileştirilmesi ve geliştirilmesini hedefleyen “*Kaizen*” stratejisi, hataların oluşumunu ve uygun olmayan ürünlerin kullanımını önlemeyi ifade eden “*Poka-Yoke*” kavramı diğer önemli araçlardır (Işığışok, 2004: 18). Toplam Kalite Yönetimi’nde çok önemli bir kavram olan “*Sıfır Hata*” kavramı da Philip Crosby tarafından tanıtılmıştır.

1970’li yıllara gelindiğinde, özellikle otomotiv ve elektronik endüstrisindeki kaliteli Japon ürünleri ile Japonya’nın, Amerika aleyhine rekabet gücünü ve pazar payını sürekli genişlettiği görülmektedir. Ayrıca yönetim uygulamalarında köklü değişimlere gidilmediği

takdirde, Japonya ve Asya ülkelerinin imalat ve ticarete egemen olan Amerika'yı dünya ekonomisinde ikinci sıraya düşüreceği öngörülmüştür (Öztürk, 2009: 18). Tüm bu gelişmeler sonucunda 1979 yılından itibaren garanti, hurda, yeniden işleme gibi nedenlerden dolayı oluşan kötü kalitenin maliyetini incelemekte olan Motorola Şirketi, 1987 yılında bir iş iyileştirme stratejisi ve yönetim felsefesi olan “*Altı Sigma*” (Six Sigma) yöntemini tanıtmıştır.

1990'lı yıllarda Amerikan endüstrisinde, ISO 9000 sertifika aktivitelerinin arttığı görülmüştür. Japonlar tarafından, kalite metodolojisinde önemli başarılar elde eden şirketlere verilen “*Deming Ödülü*”ne karşılık, Amerikalıların da 1988'de “*Malcolm Balridge Ulusal Kalite Ödülü*”nü (MBNQA-Malcolm Balridge National Quality Award) vermeye başladıkları görülmektedir. Söz konusu ödül ilk olarak, 1988'de başarılı Altı Sigma uygulamaları nedeniyle Motorola Şirketi almaya hak kazanmıştır. Deming ve Balridge ödüllerinin yanı sıra, Avrupa Birliği de 1990'ların başından itibaren başarılı şirketleri “*Avrupa Kalite Ödülü*” (EQA-European Quality Award) ile ödüllendirmektedir.

Bu gelişmeler paralelinde, ülkemizde de Toplam Kalite Yönetimi'nin yaygınlaştırılması amacıyla 1991'de “*Kalite Derneği*” kurulmuştur. Dernek, Türk Sanayici ve İş Adamları Derneği (TÜSİAD) ile birlikte 1992'de ilkinin düzenledikleri “*Ulusal Kalite Kongresi*”ni her yıl yinelemektedirler. Kongrenin yanı sıra dernek tarafından 1993'den beri, her yıl başarılı olan şirketlere ulusal bir ödül olan “*TÜSİAD-Kalder Kalite Ödülü*” verilmektedir. Bu ödül, ilk kez 1993 yılında BRİSA Şirketine verilmiştir (Öztürk, 2009: 21). 2000'li yıllarda da dünyada ve ülkemizde birçok şirketin rekabet edebilme, pazar payını koruma, müşteri beklentilerini karşılayabilme vb. nedenlerden dolayı, kalite konusunda yönetimle ilgili istatistiksel tekniklere son derece duyarlı olduğu ve Altı Sigma yaklaşımının diğer endüstrilerde de yaygınlaştığı gözlenmektedir.

## II. KALİTE MALİYETLERİ

İşletmelerin pazarda rekabet edebilme kabiliyetleri, ürünlerini kaliteli ve düşük maliyetle üretebilmelerine bağlıdır. Üretilen ürün kalitesinin artırılabilmesi belirli harcamaları gerektirdiği gibi, ürünlerin hedeflenen kalitede üretilmemesi de fire ve yeniden işleme maliyetleri gibi birtakım harcamaların yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Kalite maliyetleri, bir ürün veya hizmetin belirlenmiş bir fiyatı değildir (www.asq.org). Bu

durumda ortaya çıkan maliyet işletmeye kalitesizlik maliyeti olarak geri dönmektedir (Çelikçapa, 2007: 216).

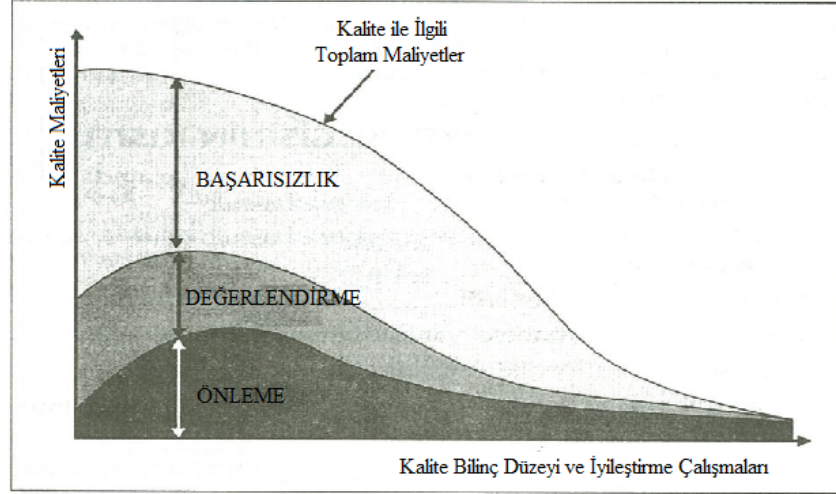
Araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre; kalite maliyetlerinin bir endüstrinin, işletmenin, hizmetin türüne göre yıllık satış cirosunun %5 - %25 arasında değişen oranını oluşturduğu tahmin edilmektedir. Oldukça yüksek bir orana sahip bu maliyetler, çoğunlukla işletmelerin toplam net karından fazla olabilmektedir. Bu nedenle kalitenin en önemli ölçütlerinden biri olan kalite maliyetleri, işletmeler için önemle üzerinde durulması gereken bir konudur. Sadece bu oranlar dahi, işletmelerin bir kalite maliyet sistemi kurmaları gerekliliğini açıkça göstermektedir. Yapılan araştırmalara göre kalite ile ilgili maliyetler, organizasyonda sürekli kalite iyileştirme süreci uygulamaları ile üç yıllık bir dönemde, başlangıç düzeylerinin 1/3'üne indirilebilmektedir (Bozkurt, 2003: 12).

İşletmelerin kalite performanslarının bir kriteri olarak nitelendirilen toplam kalite maliyetleri, bir İngiliz standardı olan "*British Standards Organization-BS 6143*"e göre, kaliteye ulaşılmadığında oluşan kayıplar ile kaliteyi sağlamanın ve güvenceyi vermenin maliyeti olarak tanımlanmıştır. ISO 9004 ise; toplam kalite maliyetlerini uygun kalitenin gerçekleştirilebilmesi için yapılan faaliyetlerin maliyeti ve yetersiz kontrolden kaynaklanan maliyetler olarak tanımlamıştır. Toplam kalite maliyetleri, hatalı faaliyetlerin önlenmesi ve bu hataların ortaya çıkarılmasından sonra onların giderilmesi ile ilgili olarak yapılan harcamaları kapsamaktadır (Ertuğrul, 2006: 129).

Kalite maliyetleri, yatırım maliyetleri ve faaliyet maliyetleri olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Yatırım maliyetleri; fabrika binası, makine, teçhizat, laboratuvar, amortisman ve faiz giderleri gibi maliyetlerden meydana gelir. Faaliyet maliyetleri ise, üretimin gerçekleştirilmesi için sürdürülen faaliyetlerle ilgili olan maliyetleri içerir. Bu maliyetler önleme veya koruma, ölçme ve değerlendirme ve başarısızlık maliyetleridir. Önleme veya koruma maliyetleri ile ölçme ve değerlendirme maliyetleri, belirlenen kalite hedefine ulaşmak için yatırımlar olarak görülürken, zayıf kalite maliyeti başarısızlık maliyetlerini içerir (Gryna *et al.*, 2007: 29).

Kalite maliyeti her işletmenin özelliklerine göre farklılaşacaktır. İşletmede kalite bilinç düzeyi ve iyileştirme çalışmaları ile kalite maliyetleri arasındaki ilişki, Şekil 1.1'de gösterildiği gibidir. İşletmede kalite iyileştirme çalışmalarının başlamasıyla, ilk etapta önleme ve değerlendirme maliyetlerinde bir miktar artış ve başarısızlık maliyetlerinde

gerçekleşecek önemli ölçüde azalma, toplam kalite maliyetlerinde azalmaya neden olacaktır. İyileştirme çalışmalarının sürekli geliştirilerek devam etmesi halinde ise, toplam kalite maliyetleri en alt düzeye doğru gidecektir (Bozkurt, 2003: 24).



**Şekil 1.1. Kalite İyileştirme Çalışmaları ile Kalite Maliyetleri İlişkisi (Kaynak: Bozkurt, 2003, s. 25)**

### **A. ÖNLEME veya KORUMA MALİYETLERİ**

Önleme veya koruma maliyetleri, işletmenin ürettiği ürün veya hizmetin müşterinin istek ve gereksinimlerinden diğer bir ifadeyle, hedeflenen kalite özelliklerinden sapmasını önlemek amacıyla yaptığı faaliyetlerin maliyetinden oluşur. İşletmede “*ilk seferinde doğru yap*” (*make it right the first time*) ilkesinin benimsenmesi bu maliyetin önemli ölçüde azalmasına neden olacaktır. Önleme maliyetleri ürün tasarımı, süreç tasarımı ve müşteri servisi gibi temel aktiviteleri içermez (Gryna, 2001: 23). Önleme veya koruma maliyetini oluşturan maliyetler; kalite planlaması, ürün veya süreç tasarımı, süreç kontrolü, eğitim, ar-ge çalışmaları ile veri derleme analiz aşamalarında katlanılan maliyetleri kapsamaktadır.

### **B. ÖLÇME ve DEĞERLENDİRME MALİYETLERİ**

Ölçme ve değerlendirme maliyetlerinin kaynağını, ürün kalitesinin ve hedef kaliteden sapmaların belirlenmesi için yapılan faaliyetlerin maliyetleri oluşturmaktadır. Temel olarak söz konusu maliyetler, tedarikçiler ve muayene olmak üzere iki ana gruptan kaynaklanır. Bu maliyetler; gelen malzemenin muayenesi, ölçü aletlerinin test ve kontrolü, ürün muayenesi, muayene edilen malzeme kaybının yanı sıra işçilik kontrolü, test ve muayene hazırlıkları, analizler ve işletme dışı ölçme ve testler gibi maliyetlerden oluşur.

### C. BAŞARISIZLIK MALİYETLERİ

Başarısızlık maliyetleri, üretilen ürünün hedeflenen kaliteyi sağlayamamasından dolayı, müşteriye ulaşmadan önce veya müşteriye ulaştıktan sonra meydana gelen maliyetleri kapsar. Bu maliyetler, üretim esnasında hatalı ürün üretilmediği zaman ortaya çıkan maliyet ile ürün maliyeti arasındaki fark olarak tanımlanabilir.

Toplam kalite maliyeti içinde oldukça yüksek bir orana sahip olan başarısızlık maliyeti, bazı işletmelerde %70 ile %85 arasında gerçekleşebilmektedir (Çelikçapa, 1993: 22). Bu nedenle, bu maliyetin düşürülmesi son derece önemlidir. Meydana geliş kaynağına göre başarısızlık maliyetleri, içsel başarısızlık maliyeti ve dışsal başarısızlık maliyeti olarak iki grup altında toplanabilir. Başarısızlık maliyetleri; ıskarta, yeniden işleme ve tamir, düşük dereceleme gibi maliyet kalemlerinden oluşan içsel başarısızlık maliyeti ve müşteri şikayetleri, ürün iadesi, sözleşme yükümlülüğü ve servis hizmeti gibi kalemlerden oluşan dışsal başarısızlık maliyetinden meydana gelir.

Yapılan çeşitli araştırmalara göre, toplam kalite maliyetlerinin %50'si ölçme ve değerlendirme maliyetlerinden, %30'u dışsal başarısızlık, %15'i içsel başarısızlık ve %5'i önleme veya koruma maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca ülkemizde yapılan araştırmalara göre, toplam kalite maliyetlerinin satışların bir yüzdesi olarak %25 - %30 arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu oran, Avrupa ülkelerinde %5'e ve Japonya'da ise %1'e düşmektedir. Japonya'daki işletmeler bu konudaki hedeflerini %0.017 - %0.018 arasında belirlemişlerdir (Ertuğrul, 2006: 132).

İşletmelerde yönetimlerin hedefi, imkanları ölçüsünde karları maksimize ederken maliyetleri minimize etmektir. Genellikle işletme çalışanlarının kontrol edebileceği kalite hatalarının %20'yi geçmediği, kalan kısmın ise yönetim hatalarından kaynaklandığı görülmektedir. Toplam kalite maliyetlerinin azaltılabilmesi için, öncelikle bu maliyetlerin nedenleri tam ve doğru olarak belirlenmeli ve bu nedenleri ortadan kaldıracak yeni yöntemler araştırılmalıdır. Bu maliyet azaltma çalışmaları sürecinde, sorun çözme tekniğine temel oluşturan çeşitli kalite geliştirme araçlarından yararlanılabilir (Ertuğrul, 2006: 136). Temelde tüm üretim süreçlerinin hedefi, ekonomik ürün ile arzulanan ürün kalitesi kombinasyonuna ulaşmaktır. Bu optimum ürün veya süreç planına ulaşmak için kullanılan çeşitli optimizasyon tekniklerinden bazıları, arzulanan ürün kalitesini

sürdürmenin yanı sıra maliyetlerin minimizasyonuna odaklanır (Dingstad ve diğerleri, 2004: 527).

### III. KALİTE GELİŞTİRME TEKNİKLERİ

Bir kalite yönetim karakteristiği olan kalite geliştirme, ürünlerin ve hizmetlerin sürekli iyileştirilmesi ilkesine dayanır. Günümüzde pek çok kalite geliştirme tekniği, nitelikli ürün ve hizmet talebini karşılamak amacıyla kullanılmaktadır (www.sixsigmaonline.org). Günümüz işletmelerinde işleyen süreçlerin sağlıklı bir biçimde işlemeye devam edebilmeleri ve geliştirilebilmeleri, süreç hakkında araştırma yapılarak veri toplanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu amaçla, gerekli verilerin derlenip uygun istatistiksel tekniklerle doğru ve etkili bir biçimde analiz edilerek yorumlanması gerekmektedir. Verilerin doğru ve etkili bir biçimde analiz edilerek yorumlanması, işletme yöneticilerine süreç ve kalite geliştirmeleri bağlamında alacakları kararlar konusunda rehberlik edecektir. Oldukça etkin sonuçlar veren söz konusu teknikler, bir anlamda problem belirleme ve analiz teknikleri olarak da görülebilir (Burnak, 1997: 43).

Süreç akış çizelgesi, beyin fırtınası, 5N 1K tekniği, takım amaçlı analiz, fayda-maliyet analizi, matris analizi, fikir birliğine varma, güç alan analizi, kalite çemberleri, öncelikler grafiği ve zaman-maliyet analizi gibi yöntemler kalite geliştirme açısından uygulanması son derece yararlı sonuçlar veren sürekli kalite geliştirme araç ve tekniklerinden birkaçıdır (Öztürk, 2009: 366). Bu istatistiksel teknikler uygulama zorluğu derecelerine göre temel düzeydeki istatistiksel teknikler, orta düzeydeki istatistiksel teknikler ve ileri düzeydeki istatistiksel teknikler olmak üzere üç kategori altında incelenebilir (Ishikawa, 1997: 196).

*Temel düzeydeki istatistiksel teknikler:* Muhteşem yedili (the magnificent seven) olarak da adlandırılan temel düzeydeki istatistiksel teknikler:

1. Histogram veya Dal-Yaprak Diyagramı (Stem-and-Leaf Diagram)
2. Kontrol Listesi
3. Neden-Sonuç Diyagramı (Balık Kılıcı Diyagramı)
4. Pareto Diyagramı
5. Serpilme Diyagramı
6. Kusur Konsantrasyon Diyagramı (Defect Concentration Diagram)
7. Kontrol Grafiği

olarak sıralanabilir (Montgomery, 2001a: 154). İşletmelerde yaygın bir biçimde kullanılan bu yöntemler, üretim işçilerinden yöneticilere kadar personelin çoğunluğu tarafından uygulanabilmektedir. En gerekli teknikler olarak da adlandırılan bu teknikler sadece üretimde değil planlama, tasarım, satın alma, pazarlama ve teknoloji gibi bölümlerde de kullanılmaktadır.

*Orta düzeydeki istatistiksel teknikler:* Daha ayrıntılı istatistiksel bilgi gerektiren bu teknikler, işletmedeki mühendisler ve kalite kontrol bölümündeki teknik personel tarafından etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Orta düzeydeki istatistiksel teknikler:

1. Örneklem Teorisi
2. İstatistiksel Örneklem Muayenesi
3. Deneysel Tasarım Teknikleri

şeklinde ifade edilebilir.

*İleri düzeydeki istatistiksel teknikler:* İleri düzeydeki istatistiksel teknikler ise, ileri seviyede istatistik bilgisi gerektirdiği için sadece sınırlı sayıda kalifiye mühendis ve teknisyen tarafından kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre çok daha karmaşık olan bu yöntemlerle, süreç ve kalite analizleri yapılmaktadır. Bu kategorideki analizler:

1. İleri Seviyedeki Deneysel Tasarım Teknikleri
2. Çok Değişkenli Analiz Teknikleri
3. Çeşitli Yöneylem Araştırması Teknikleri

şeklinde. İleri düzey bir kalite geliştirme tekniği olan deneysel tasarım metodolojisi, etkili bir kalite kontrol için temel bir araç olarak görülür. Sistemik ve yapısal tarzdaki kalite problemlerinin çözümünde kullanılan bu stratejik tekniğin, verimli bir biçimde kullanılabilmesi için formel eğitim alan uzmanlar tarafından uygulanması gerekir (Kaye – Frangou, 1998:169).

#### **IV. ALTI SİGMA METODOLOJİSİ**

Sürekli artan rekabet koşulları, müşteri ihtiyaç ve beklentileri, işletmeleri daha düşük maliyetli ve daha kaliteli ürünler üretmeye sevk etmiştir. Bu doğrultuda süreçlerin doğru bir biçimde ölçülerek iyileştirilip geliştirilmesi, kaynakların etkin kullanımı, müşteri taleplerinin karşılanması ve süreçteki olası problemlerin kaynaklarının tespit edilerek

giderilmesi son derece önemlidir. Bu durum, söz konusu amaçlara hizmet eden bir süreç iyileştirme tekniği olan Altı Sigma Metodolojisi'ni gündeme getirmiştir.

## **A. ALTI SİGMA'NIN TARİHÇESİ**

1980'lerin başlarında düşük fiyatlı ve yüksek kaliteli Japon ürünlerinin küresel piyasada daha fazla talep görmesi, Amerikalı üreticilerin ancak ürün kalitesini iyileştirerek rekabet koşullarını sağlayabilecekleri gerçeğini görmelerine neden olmuştur. Motorola başkanı ve Altı Sigma'nın babası olarak da bilinen Bob Galvin, 1987'de minimum hata ile ürün tasarlamayı hedefleyen bir şirket için, geleneksel üç sigma tasarımlarının yetersiz olduğunu ifade etmiştir. Galvin'in mühendislerinden artı-eksi Altı Sigma tolerans limitleri ile ürün tasarımlarını istemesiyle, ilk kez Motorola şirketinde Altı Sigma süreci başlamıştır.

Motorola'da uygulanan Altı Sigma projeleri ile 1987-1992 döneminde imalatta hatalar 150 kez azaltılarak 2.2 milyar dolar, 1987-1996 döneminde ise 11 milyar dolar toplam tasarruf sağlanmıştır (Gürsakal, 2005: 23). Elde edilen etkili sonuçlar, 1988 yılında Motorola'ya Malcolm Balridge Ulusal Kalite Ödülü'nü almaya hak kazandırmıştır. Motorola'nın Altı Sigma'yı uygulayarak maliyetlerini düşürüp karlarını ve pazar payını artırdığını gören General Electric ve Honeywell şirketleri de, bu yöntemi bünyelerine adapte ederek Motorola'nın öncülüğü sayesinde uygulayan şirketler olmuşlardır.

## **B. ALTI SİGMA'NIN TANIMI**

İstatistikte Yunan alfabesine ait bir harf olan sigma ( $\sigma$ ) ile sembolize edilen değişkenlik kavramı, normal olasılık dağılımının denklemini keşfeden Carl Friedrich Gauss'a (1777-1855) kadar dayanmaktadır. İstatistikte bir değişkenlik ölçüsü olan standart sapmayı sembolize eden sigma, işletme bağlamında süreç çıktılarındaki hataları ve sürecin mükemmellikten ne kadar saptığını ölçmek için kullanılan bir terimdir (Brue – Launsby, 2003: 2). İstatistiksel süreç kontrolünün en önemli araçlarından olan ve 1922 yılında Walter A. Shewhart tarafından bulunan Shewhart kontrol grafiklerinde, kontrol limitleri olarak alınan üç sigma, %99.73'lük bir süreç getirisine ilişkindir ve milyonda (ppm-parts per million) 2700 hata oranını ifade etmektedir. Kalite mühendisleri ve istatistikçiler tarafından da üzerinde uzlaşılan artı-eksi üç sigma düzeyinde kontrol edilen bir sürecin, çok küçük bir yüzde ile hatalı ürünler ürettiği düşünülerek, önceden bu durum kabul



edilemez bir durum olarak nitelendirilmiyordu (Pyzdek, 2001: xi). 1980'lerin başına kadar birçok imalat şirketi tarafından yeterli kabul edilen bu performans oranı, her saat 20.000 postanın kaybolması, her gün büyük havaalanlarında 2 hatalı inişin yapılması ve her yıl 200.000 hatalı reçetenin yazılması örnekleriyle betimlenebilir (Adams *et al.*, 2003: 1). Daha sonra, küresel piyasalardaki rekabet koşullarından dolayı bu performansın yetersiz görülmesi, Altı Sigma kavramının gündeme gelmesine zemin hazırlamıştır.

Altı Sigma kavramı, teknik olarak süreç performansının milyonda 3,4 hata oranı olarak anlaşılma ile birlikte, öncelikle bir yönetim kavramıdır. Süreçleri ölçerek iyileştirmeyi gerektiren Altı Sigma yaklaşımı, farklı bakış açıları ve uygulamaları nedeniyle farklı tanımlara sahiptir. Bu tanımlardan birine göre Altı Sigma; anahtar çıktı değişkenlerini iyileştirmek ve/veya müşteri tanımlı hata oranlarını çarpıcı bir biçimde azaltmak için stratejik sistem iyileştirmesi, yeni ürün veya servis gelişimini sağlayan istatistiksel ve bilimsel metotlara dayanan, düzenli ve sistematik problem çözme yöntemidir (Allen, 2006: 8). Bir diğer tanıma göre Altı Sigma; iş karlılığını artırmak, kalitesizliği azaltmak, israfı yok etmek ve müşteri ihtiyaç ve beklentilerini karşılamak amacıyla tüm işlemlerin etkinliğini iyileştirmek için kullanılan bir iş iyileştirme stratejisidir (Öztürk, 2009: 451). Bir başka tanımda ise, Altı Sigma bitmek tükenmek bilmeyen sıfır-hata peşinde, sürecin sürekli iyileştirilmesini ve değişkenliğinin azaltılmasını hedefleyen felsefedir (Wilson, 1999: 184). Harry ve Schroeder'e göre Altı Sigma, hata kaynaklarını belirleme ve eleme amacıyla son derece disiplinli bir biçimde veri toplama ve istatistiksel analiz yapma yöntemidir (Gürsakar, 2005: 46).

İstatistiksel bir kavram olarak ise Altı Sigma, milyon başına olası hata sayısı (dpmo-defects per million opportunity) sadece 3,4 olan ve sürecin neredeyse mükemmel bir biçimde çalıştığını ifade eden bir kavramdır. Gerçek dünya sürecinin istatistiksel analizine ve dünya standartlarında süreç performansına dayanan Altı Sigma kalite seviyesi, daha çok müşteri beklentilerine bağlıdır. Beş sigma müşteri gereksinimlerini karşılamayacak ve yedi sigma anlamlı bir değer katmayacaktır. Altı Sigmanın milyonda 3,4 hatası, daha erişilebilir ve gerçekçi bir hedefe ulaşmada mükemmelliğe yakındır (Adams *et al.*, 2003: 8).

İstatistiğin yönetimde ağırlıklı olarak kullanılmasıyla kaliteli ürünler üretilmesi fikrini ortaya atan Toplam Kalite Yönetimi, bu fikrin gerçekleşmesini sağlamakta yetersiz

kalmıştır. Sözü edilen bu yetersizliği tamamlamayı hedefleyen Altı Sigma, temelde Deming'in ilkelerine dayanan Toplam Kalite Yönetimi'nin ilkeleri üzerine inşa edilmiştir. Bu bağlamda Altı Sigma yaklaşımı, Toplam Kalite Yönetimi'nin tekniklerini ve istatistiği yoğun bir biçimde kullanarak ürün geliştirmede, çevrim süresi ile hataları azaltmayı; üretimde ise verimliliği, karlılığı ve etkinliği artırmayı amaçlamaktadır (Gürsakar, 2005: 39).

### C. ALTI SİGMA'NIN TEMEL ADIMLARI

Süreçlerin iyileştirilmesi, tasarımı ve yönetimini hedefleyen Altı Sigma Metodolojisi "*Tanımla, Ölç, Analiz et, İyileştir ve Kontrol et*" (DMAIC – Define, Measure, Analyze, Improve, Control) aşamalarından oluşan DMAIC döngüsünü kullanır. Temelde Deming tarafından geliştirilen PDCA döngüsüne dayanan DMAIC döngüsü, süreçlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Bir sürecin iyileştirilmesi için kullanılan Altı Sigma metodu, aynı zamanda bir sürecin veya ürünün tasarımında kullanıldığında DMAIC döngüsü "*Tanımla, Ölç, Analiz et, Tasarla ve Doğrula*" (DMADV – Define, Measure, Analyze, Design, Verify) döngüsüne dönüşür. Bunun yanı sıra bazı yazarlar, yeni bir sistemin tasarımı için Altı Sigma uygulamalarının, sistem iyileştirme faaliyetlerinden farklılığını vurgulamak için "*Altı Sigma için Tasarım*" (DFSS – Design for Six Sigma) terimini kullanmaktadırlar (Allen, 2006: 8). Altı Sigma Metodolojisi'nde, bir süreç iyileştirme döngüsü olarak kullanılan ve yol haritası olarak da adlandırılan DMAIC döngüsü, beş temel adımdan oluşmaktadır. Bu temel adımlar özetle Tablo 1.3'de verildiği gibidir.

**Tablo 1.3. Altı Sigma'nın Adımları ve Yapılacak İşler**

TANIMLA: Problemi tanımla	Projenin kritik özelliklerini belirle. Proje bildirgesini geliştir. Süreç haritasını çiz.
ÖLÇ: Değişkenleri ölç.	Kritik kalite özellikleri seç. Performans standartlarını tanımla. Veri toplama planı oluştur. Ölçme sisteminin geçerliliğini ve güvenilirliğini test et ve verileri topla.
ANALİZ ET: Hipotezleri oluştur, test ve analiz et.	Süreç yeterliliğini oluştur. Performans amaçlarını tanımla. Değişkenliğin kaynaklarını belirle.
İYİLEŞTİR: Süreci iyileştir.	Potansiyel nedenleri gözden geçir. Değişkenler arasındaki ilişkileri belirle. Pilot çözümü oluştur.
KONTROL ET: Süreci kontrol et.	Ölçme sisteminin geçerliliğini incele. Süreç yeterliliğini belirle. Süreç kontrol sistemini uygula ve projeyi tamamla.

**(Kaynak: Gürsakal, 2005, s. 110)**

*Tanımlama (Define):* Bu aşamada, Altı Sigma projesi tanımlanarak müşterilerin ihtiyaç ve istekleri doğrultusunda sürecin haritası oluşturulur. Projenin kritik kalite değişkenlerinin belirlenmesinin yanı sıra, proje ve ekip bildirgesinin geliştirilmesi yapılır. Pareto analizi, süreç haritası, SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) diyagramı, beyin fırtınası, nominal grup tekniği, balık kılıcı diyagramı ve matris diyagramı gibi istatistiksel araçların bu aşamada kullanılması önerilmektedir.

*Ölçme (Measure):* Bu ikinci aşamada, sürecin akış diyagramı çizilirken sürecin girdi ve çıktı değişkenleri belirlenir. Sebep-sonuç diyagramı, sebep-sonuç matrisi, hata türü ve etkileri analizi (FMEA) gibi araçlarla sürecin girdileri ile çıktıları arasında sebep-sonuç ilişkisi araştırılır.

*Analiz (Analyze):* Toplanan veriler ve süreç haritaları yardımıyla gerekli iyileştirme ve geliştirme fırsatları analiz edilmiş olur. Bu aşamada, bir taraftan İstatistiksel Süreç Kontrol teknikleri kullanılarak değişim kaynakları analiz edilirken, diğer taraftan regresyon analizi ve istatistiksel deney tasarımı yöntemiyle sürecin kritik kalite öğelerini değiştiren değişkenler hesaplanır. İstatistiksel Süreç Kontrolü sürecin geçmişteki performansını gösterirken, çoğu başarılı iyileştirme projelerinin kritik bir parçası olan deney tasarımı metodu süreç potansiyelinin bir görüntüsünü sağlar (Öztürk, 2009: 460). Süreç

parametrelerine ilişkin betimsel istatistikler ve güven aralıklarının hesaplanması, hipotez testleri, regresyon ve korelasyon analizleri, çok değişkenli istatistiksel analiz teknikleri gibi yöntemler bu aşamada kullanılabilir.

*İyileştirme (Improve)*: Hedefe ulaşmak için, iyileştirilmesi gereken ürün ve proses özelliklerinin belirlenerek hataların ve değişkenliğin ortadan kaldırılması ve çıktıların optimum seviyeye getirilmesi amacıyla iyileştirmeler tanımlanır. Girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki fonksiyonel ilişkinin belirlenmesinde regresyon analizi, deney tasarımı ve ANCOVA gibi istatistiksel teknikler kullanılır. Proses haritaları, kontrol grafikleri, proses yeterlilik analizi, FMEA ve düzeltici önlemler kullanılan diğer istatistiksel araçlardır (Işığıçok, 2011: 119-121).

*Kontrol (Control)*: Uygulanan planın doğrulanması, zaman içinde iyileştirilmesi ve prosesin eski haline dönmesine izin verilmeden geliştirilmesinin kontrol edildiği son aşamadır. Değişimin özel nedenleri kontrol altına alınarak, sürecin istatistiksel süreç kontrolü altına alınması sağlanır. Başlangıç aşamasında öngörülen hedeflere ulaşamaması durumunda DMAIC döngüsü yeniden başlatılır.

## İKİNCİ BÖLÜM

### İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI ANALİZİ ve MODELLEMESİ

Bir deney, temel olarak bir sürecin veya sistemin girdi değişkenlerinde amaçlı değişimler gerçekleştirilerek, sürecin çıktı değişkenindeki değişimlerin nedenlerini gözlemek ve belirlemek için yapılan testler dizisi olarak tanımlanabilir. İstatistiksel deney tasarımı tekniği, araştırmacının görece olarak kontrol edebildiği değişken değerlerini belirli değerlere ayarlayarak deney yapmasına imkan verir. Bu yöntemde araştırmacı değişken değerlerini pasif bir biçimde gözlemek yerine, bunların bazılarını ayarlayan konumuna geçerek aktif bir rol üstlenir. Geçerli ve nesnel sonuçlara ulaşabilmek için etkin bir gen-yöntem olan bu metodoloji, bilimsel amaçlarla ve üretim süreçlerini iyileştirmek amacıyla uygulanmaktadır (Gürsakal, 2010: 6-7).

Çalışmanın bu bölümünde, öncelikle istatistiksel deney tasarımı yönteminin tarihsel gelişiminden başlanarak zaman içinde geçirdiği evreler açıklanacaktır. Ardından söz konusu metodolojinin temel kavramları, terminolojisi, stratejileri, temel ilkeleri ve aşamaları sırasıyla ele alınacaktır. İstatistiksel deney tasarımı yaklaşımı olarak adlandırılan ikinci başlık altında, uygulamada sıklıkla kullanılan deney tasarımı yöntemlerinden faktöriyel tasarımlar, kesirli faktöriyel tasarımlar ve Taguchi deney tasarım yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

#### I. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI'NIN TARİHSEL GELİŞİMİ

İstatistiksel deneysel tasarımın modern gelişimini dört dönem içinde incelemek mümkündür. Sir Ronald A. Fisher'in çalışmaları, 1920'li yıllar ile 1930'lu yılların başına denk gelen tarım dönemine öncülük etmiştir. Bu dönemde Londra yakınlarındaki Rothamsted Tarımsal Deneyler Merkezi'nde istatistik ve veri analizinden sorumlu olan Fisher, varyans analizi ve faktöriyel tasarım kavramlarını içeren deneysel tasarım hakkındaki ilke ve araştırmalarını sistematik bir biçimde tanıtmıştır. Fisher'in özellikle

tarım ve yaşam bilimleriyle ilgili iki kitabı (Fisher 1958, 1966) istatistiklerin kullanımı üzerinde derin bir etki meydana getirmiştir.

Söz konusu yöntem, Amerika'da tarım sektöründe çeşitli gübreler ve dozları, iklim koşulları, sulama düzeyleri vb. etmenlerin çeşitli ürünlere olan etkilerini belirlemek üzere uygulanmış ve kısa sürede sektörün gelişmesine ve ülkenin bu sektörde lider konuma gelmesine büyük katkıda bulunmuştur. Daha sonra kimya ve ilaç sektörlerinde uygulanan deney tasarımının, endüstri alanında uygulamaları 1930'lu yıllarda başlamıştır. 1932-1933 yıllarında İngiliz tekstil ve ahşap endüstrisi ile Alman kimya endüstrisi ürün ve süreç gelişimi için deney tasarımını kullanmaya başlamışlardır.

1930'larda deney tasarımıyla ilgili, Fisher tarafından geliştirilen faktöriyel ve kesirli faktöriyel tasarımları içeren klasik yöntem, Dr. Genechi Taguchi'nin önerdiği ortogonal dizinler ile klasik yöntemi basitleştiren Taguchi yöntemi ve son olarak Dorian Shainin tarafından önerilen anlaşılması ve uygulanması kolay, maliyet etkin ve istatistiksel olarak güçlü deney tasarımı teknikleri olmak üzere üç yaklaşım bulunduğu görülmektedir (Bhote, 2002: 176).

Box ve Wilson (1951) tarafından geliştirilen "*Tepki Yüzeyi Metodolojisi*" (RSM – Response Surface Methodology), ikinci dönem olarak kabul edilen bir dönemin başlamasını harekete geçirmiştir. Tasarlanmış deneyler, Amerikan kimya endüstrisinin dünyadaki en önemli rekabetçi endüstrilerden biri olması ve işlerini önemli ölçüde yabancı şirketler lehine kaybetmiş olmaları nedeniyle, ilk kez Amerika'da 1950'lerde ürün ve süreç gelişimi için kimya endüstrisinde uygulanmıştır (Montgomery, 2001a: 11).

Sonraki 30 yılda söz konusu teknik ve diğer tasarım teknikleri kimya ve süreç endüstrilerinde yaygınlaşarak daha fazla araştırılır ve çalışılır olmuştur. Söz konusu tekniklerin kimya endüstrisi dışında yaygınlaşması, 1970'lerin sonu ve 1980'lerin başında batılı şirketlerin Japon rakiplerinin 1960'lardan beri sorun çözme, yeni süreç geliştirme, yeni ürün tasarımı değerlendirilmesi, ürün performansı ve güvenilirliğinin iyileştirilmesi ve birçok ürün tasarımı açısından deney tasarımını sistematik bir biçimde kullandıklarını keşfettikleri zamana denk gelir. Ayrıca Amerikan imalat sektörünün de deney tasarımını Japon kalitesinin nedenlerini araştırırken yeniden keşfetmesi, 1980'lerin başındaki döneme denk gelmektedir. Batı endüstrisinin kalite iyileştirmeye ilgisini arttığı 1970'lerin sonunda başlayan bu dönem, deney tasarımının üçüncü dönemi olarak kategorize edilmektedir.

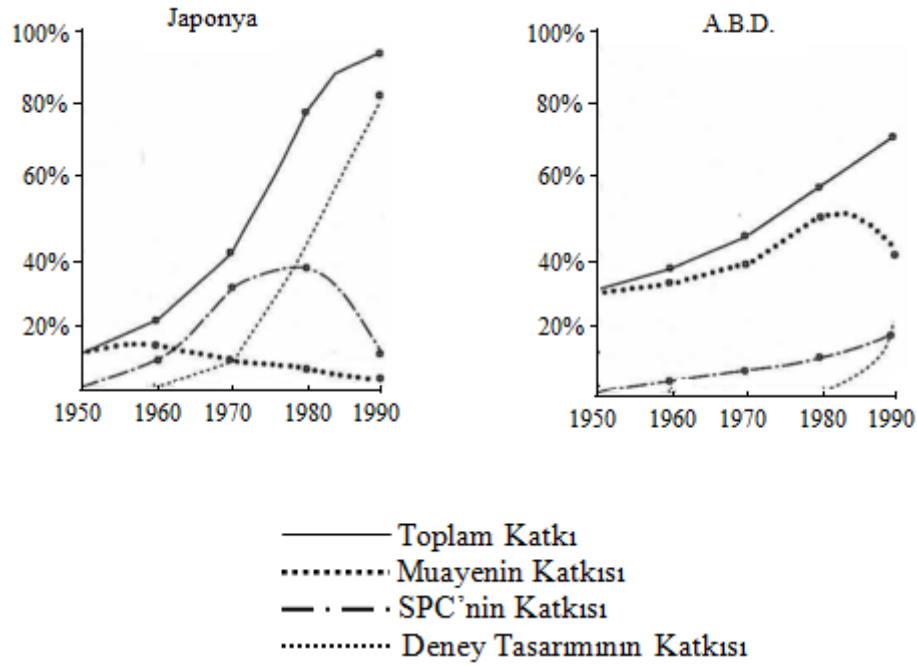
Genechi Taguchi'nin çalışmaları deneysel tasarımların kullanımında ve bu konuya ilginin artmasında önemli bir etkiye sahip olmuştur. Taguchi "*dayanıklı parametre tasarımı*" kavramını ortaya atmıştır. Ayrıca:

1. Çevresel faktörler veya kontrolü zor olan diğer faktörlere karşı duyarlı bir süreç oluşturmayı
2. Parçalardan iletilen değişime duyarlı ürünler yapmayı
3. Ortalamayı istenilen bir değere çeken ve aynı zamanda, bu değer etrafındaki değişkenliği azaltan süreç değişkenlerinin düzeylerini bulmayı

kullandığı deneysel tasarımlarla desteklemiştir (Montgomery, 2001b: 18). Bu problemleri çözebilmek için Taguchi, kesirli faktöriyel tasarımları ve diğer ortogonal dizinleri önermiştir.

Taguchi'nin çalışmalarının üç önemli sonucu vardır. İlk sonuç, deneysel tasarımların otomotiv, elektronik, uzay imalat endüstrisi vb. diğer endüstrileri de içeren pek çok farklı endüstri alanında yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmasıdır. İkinci olarak, istatistiksel tasarımın dördüncü dönemi başlamıştır. Bu dönem, araştırmacıların ve uygulayıcıların tasarımlar hakkındaki genel ilgilerini yeniledikleri, endüstriyel dünyadaki deneysel problemlere Taguchi'nin etkili teknik metotlarına alternatif metotları içeren kullanışlı yaklaşımlar geliştirdikleri bir dönem olmuştur. Üçüncü ve son olarak, istatistiksel deney tasarımı dersleri üniversitelerdeki pek çok mühendislik programında verilmeye başlanmıştır. Mühendislikte uygulanan etkili bir deneysel tasarım ile bilimin başarılı birleşmesi, gelecekteki rekabet yeteneğinin bir anahtar faktörü olacaktır.

Bir süreç iyileştirme tekniği olan Altı Sigma Metodolojisi'nin kullandığı en önemli ve etkili tekniklerden biri olan deney tasarımı metodolojisi, uygulayan ülkelerin işletmelerinin kalite gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur. Bu metodoloji, birçok büyük şirket tarafından kullanılan Altı Sigma kalite programının bir anahtar bileşeni olarak kabul edilir (Islam – Lye, 2009: 239). Motorola firmasının kalite grubunun kıdemli kurum danışmanı olan ve dünya çapında Altı Sigma modelinin babası olarak bilinen Keki R. Bhote "*World Class Quality*" adlı kitabında, kronolojik sıralama takip edildiğinde amaçları kalite sağlamak olan "*geleneksel muayene*", "*istatistiksel süreç kontrol*" ve "*deney tasarımı*" yöntemlerinin Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 1950-1990 dönemi için kalite gelişimine olan katkısını Japonya ve Amerika için karşılaştırmıştır (Şirvancı, 1997: 12).



**Şekil 2.1. Üç Temel Yöntemin Kalite Düzeyine Katkısı (Kaynak: Şirvancı, 1997,s. 13)**

Şekil 2.1 incelendiğinde, Japonya'da kalite gelişimine en fazla katkıyı 1970'lerden sonra deney tasarımı yönteminin yaptığı görülmektedir. Amerika'da ise, 1980'lerin başında Dr. Taguchi'nin verdiği eğitim ve seminerlerden sonra kalite düzeyindeki iyileşmelerin arttığı gözlenmektedir.

Milenyum olarak da nitelendirilen 2000'li yıllara gelindiğinde ise, üretim süreçlerini iyileştirmede kullanılan bu güçlü istatistiksel tekniğin, sosyal medya ve siyaset bilimi gibi alanlarda dahi uygulanma olanağı bulunduğu göze çarpmaktadır. Günümüzde büyük miktarda verinin toplanıp analiz edilebilmesi, işletmelere daha farklı bir perspektifte deney yapabilme olanağı sunmaktadır. Bugün işletmeler, bir montaj hattında veya bir pazarlama kampanyasında istedikleri bir değişkeni değiştirerek sonuçları gözlemleyebilme şansına ve daha fazla gerçek zamanlı kontrollü deney yapabilme olanağına sahiptir. Laboratuvar deneylerinin artık yeterli olmadığını ve gerçek dünyada fiili, rassallaştırılmış kontrollü deneylerin yapılması gerekliliğini savunan uzmanların sayısı gün geçtikçe artmaktadır (Gürsakal, 2013: 107).

Bu bağlamda, Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan başkanlık seçimleri öncesinde çok sayıda kişi ile alanda yapılan kontrollü deneyler, başkan Barack Obama'ya



oy kazandıran çok önemli bir faktör olması açısından çarpıcı bir örnektir. New Haven Connecticut'ta alanda yapılan deneysel çalışmaya yaklaşık olarak 100.000 kişi katılmıştır. Çalışma için, Eylül 1998'de kayıtlı seçmenlerin tam bir listesi alınmış ve bunlardan bir veya iki kayıtlı seçmeni olan bütün hane halklarının bir veri seti oluşturulmuştur. Örneklemeden öğrencilerin elenmesi sonucunda geriye 29.380 kişi kalmıştır. Söz konusu çalışmada oy getirisi üzerinde kişisel propaganda, telefon ve e-postanın etkisini ölçmek amacıyla  $2 \times 2 \times 4$  tasarımı kullanılmıştır (Gerber – Green, 2000: 655).

Bu paragrafa kadar söz edilen deney tasarımı yöntemleri, klasik deney tasarımı yöntemleri olarak nitelendirilmektedir. Bu yöntemler, ilk uygulandığı tarımsal alandaki deneyler veya laboratuvarında gerçekleştirilen deneyler gibi fiziksel deneyleri içermektedir. Fiziksel deneyler, araştırmacı tarafından belirlenen bir girdi değişkenleri kümesine karşı gelen stokastik bir tepki değişkenini ölçer. Ancak girdi değişkenleri kümesinin çok geniş olması, bazı fiziksel deneylerin gerçekleştirilmesine engel olan etik gerekçelerin varlığı veya deneylerin maliyetinin fahiş düzeylerde olması gibi nedenlerin söz konusu olması durumunda bilgisayar deneylerine başvurulur. Klasik deneylerin aksine bu deneylerin sonucunda deterministik bir tepki ölçülür (Santner – Williams – Notz, 2003: 2-3). Bilgisayar tabanlı simülasyonlara dayanan bu deneyler, özellikle sistem performansını değerlendirmek amacıyla, karmaşık bilgisayar kodlarının kullanıldığı sonlu elemanlar analizi gibi hesaba dayalı (computational) mühendislik tasarım analizlerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Raja *et al.*, 2011: 229).

Modern deney tasarımı olarak da adlandırılan bu yöntemin, klasik deney tasarımı yöntemlerinden farklı olarak rassal hatanın bulunmaması, tasarım parametrelerinin düzgün (uniform) ve düzgün olmayan (Gaussian, Weibull vb.) olasılık dağılımlarına sahip olması, tekrarlı örneklemeler kullanmaması gibi özellikleri vardır (Giunta – Wojtkiewicz – Eldred, 2003: 1-4). Modern deney tasarımında oluşturulan simülasyon deneylerinin amacı, tepki ve girdi faktörleri arasındaki ilişkiyi açıklayan bir metamodel tahmin etmektir (Tunalı – Batmaz, 2003: 444). Bir metamodel, simülasyon modeli tarafından tanımlanan bir girdi-çıkı fonksiyonu yaklaşımı olarak nitelendirilebilir. Bir başka deyişle, metamodeller gerçekte simülasyon modelinin cebirsel bir modeli olan yaklaşım formülleridir (Law – Kelton, 2000: 646). Bir metamodelin, problemin özünü anlamak, tepki değişkenini tahmin etmek, optimizasyon yapmak ve modeli doğrulamaya (validation) yardımcı olmak üzere dört temel amacı vardır (Kleijnen – Sargent, 2000: 15). Tepki yüzeyleri (response surface),

vekiller (surrogates), benzeticiler (emulators), yardımcı (auxiliary) modeller ve kopya modeller (repromodels) olarak da adlandırılabilen metamodellerin farklı tipleri vardır. Bunların en popüler olanları, birinci veya ikinci dereceden modeller ve mekansal (spatial) korelasyon olarak da bilinen Kriging modelleridir (Kleijnen, 2008: 8).

## II. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI KAVRAMI

Bilim tarihini incelediğimizde, ampirisizmin (deneyciliğin) rasyonalizmden (akılcılık) daha sonra geldiğini görürüz. Her ne kadar modern bilim akılcılık ve deneyciliği birlikte kullansa da, bilim tarihinin geçmişinde akılcılığın veya deneyciliğin ön planda olduğu dönemler olmuştur. Gerçeğe deney yolu ile varma olan deneycilik yaklaşımı bir anlamda deney tasarımının da temelini oluşturmaktadır. Deney, belirli bir amaca ulaşmak için deney özneleri üzerinde bir etki oluşturarak bu etkinin sonuçlarını ölçmeyi hedefler. Hem doğal bilimler hem de sosyal bilimler için çok önemli bir referans noktası olan ve nedensel ilişkilerin belirlenmesinde sağlam bir çerçeve işlevi gören klasik kontrollü deney kavramı çok önemlidir.

Klasik kontrollü deney özellikle fizik, kimya ve biyoloji gibi doğal bilimlerde kullanılan, gerektirdiği koşulların sosyal bilimlerde sağlanmasının çok zor olduğu gerçek bir deneysel tasarımdır. Klasik kontrollü deneyde, deneklerin deney ve kontrol grubuna rassal olarak atanmasının ardından, etki öncesi ve sonrası olmak üzere iki kez bağımlı değişkenin değerleri gözlenerek ya da ölçülerek bu değerlerin ortalamaları alınır. Her grupta etki öncesi ve sonrasındaki sözü edilen ortalama değerlerin farkları alındıktan sonra, bu farklar karşılaştırılır. Yalnızca deney grubunun bağımsız değişkenin etkisini aldığı göz önüne alındığında, deney grubundaki farkın kontrol grubundakinden anlamlı olarak büyük olması durumunda bağımsız değişkenin bağımlı değişken ile nedensel bir ilişki içinde olduğuna karar verilir. Sosyal bilimlerin değişkenleri manipüle etme veya planlanmış değişimler meydana getirme olanağına ahlaki veya pratik nedenlerle sahip olamaması nedeniyle büyük ölçüde ön deneysel, korelasyonel veya yarı deneysel tasarımlar kullanılabilir (Gürsakal, 2001: 108-112).

Aslında bir test olan deney, bir sürecin veya sistemin girdi değişkenlerinde amaçlı değişimler gerçekleştirilerek, sürecin çıktısı olan tepki değişkenindeki değişimlerin nedenlerini gözlemek ve belirlemek için yapılan testler dizisi olarak tanımlanabilir (Gürsakal, 2010: 6). Deneyin amacı, bir sistem hakkında bilgi üretmek veya yeni

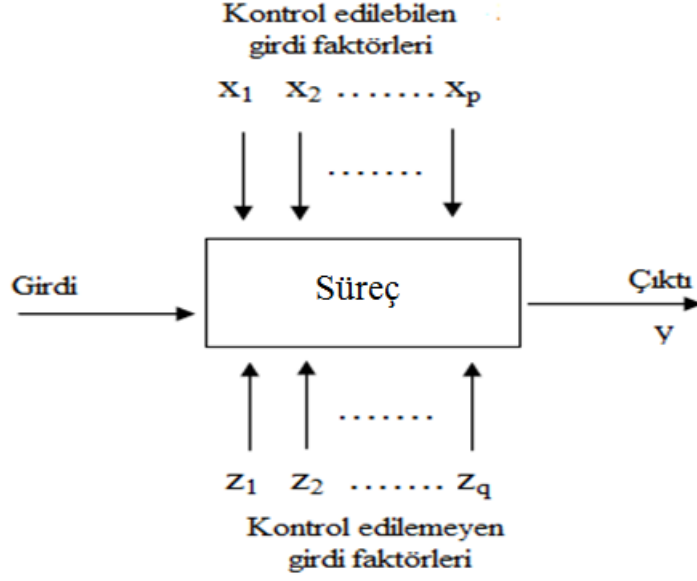
koşulların sistem üzerindeki etkisini ortaya çıkarmaktır. Objektif, güçlü ve iyi düzenlenmiş bir deney yapabilmek için deneyin planlanması aşamasında istatistiksel bir düzenin sağlayacağı bilimsel bir yaklaşım gereklidir. Veriden anlamlı sonuçlar elde etmek için, mutlaka uygulanması gereken istatistiksel yaklaşımın aşağıda verilen önemli üstünlükleri vardır (Erbaş – Olmuş, 2006: 1):

1. İstatistiksel deney düzenleri ekonomiktir.
2. Açıklanan tepki değişkeni üzerinde bir veya birden fazla faktörün etkisini ölçmek mümkündür.
3. Araştırmadaki deney hatasını ölçmek mümkündür.
4. İstatistiksel yaklaşımların dikkate alınmadığı deneylerde, istenen deney amaçlarının bir veya daha fazlasının gerçekleşmemesi söz konusudur.

Tasarlanmış gözlemler, anlamlı veri elde etmek için “deney” olarak adlandırılan özellikle düzenlenen bir süreç sonunda elde edilen gözlemlerdir. Bu gözlemler İstatistik biliminde “deneyisel veri” olarak adlandırılır. İstatistik bilimi çerçevesinde deney, yeni gerçekler elde etmek, önceki sonuçları doğrulamak veya reddetmek için planlanmış bir “iş” olarak tanımlanabilir. Deney tasarımı ise, değişik koşullarda bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni nasıl etkilediğini araştırmak amacıyla gerekli tasarımları düzenleyen ve analiz eden istatistiksel bir teknik olarak tanımlanabilir (Çömlekçi, 2003: 7-9).

Bir deneyde, bir veya daha fazla süreç değişkeni değiştirilerek, bu değişimin bir veya daha fazla tepki değişkeni üzerindeki etkisi gözlenir. İstatistiksel deney tasarımı, analiz edilen verilerden geçerli ve objektif sonuçlar elde etmek için deneyleri planlayan etkili bir prosedürdür. Deney tasarımı, deneyin amaçları ve süreç faktörlerinin seçilmesi ile başlar. Deney tasarımının altındaki teori, genellikle süreç modeli kavramıyla başlar ([www.itl.nist.gov/handbook.htm](http://www.itl.nist.gov/handbook.htm)).

Bir süreç Şekil 2.2’de şematize edildiği gibi, bir girdi materyalini bir ürün çıktısına dönüştüren makine, yöntem ve insanların bir kombinasyonunu ifade eder. Bu çıktı değişkeni, bir veya daha fazla gözlenebilen kalite karakteristiğine sahiptir. Süreç değişkenlerinden bazıları ( $x_1, x_2 \dots \dots x_p$ ) kontrol edilebilir değişkenler, bazıları ise ( $z_1, z_2 \dots \dots z_p$ ) gürültü faktörleri olarak da adlandırılabilen kontrol edilemez değişkenlerden oluşur.



**Şekil 2.2. Sürecin Genel Modeli (Kaynak: Montgomery, 2001a, s. 572)**

Kara kutu süreç modeli olarak da adlandırılan süreç modeli yaklaşımında, genellikle çıktıların sürekli olduğu varsayılarak, deneysel veriler girdi ve çıktılar arasında birinci veya ikinci dereceden ampirik bir model oluşturulmasında kullanılır. Deney, farklı makineler ve operatörler gibi kesikli ve/veya ortam sıcaklığı ve nemi gibi sürekli faktörleri açıklamalıdır.

Deneysel tasarım yöntemleri, süreç geliştirme veya süreç performansının iyileştirilmesi için süreç sorun giderme ya da dış kaynaklı değişimlere dirençli veya duyarsız bir süreç elde etme amacıyla da kullanılabilir. İstatistiksel süreç kontrol ve deney tasarımı metotları, süreç geliştirilmesi ve optimizasyonu için kullanılan birbiriyle yakından ilgili iki güçlü araçtır. Ancak, deney tasarımı istatistiksel süreç kontrolünden daha etkili bir yöntemdir. Pasif bir istatistiksel yöntem olan istatistiksel süreç kontrolünde, sürecin kontrol altında olup olmadığı izlenir. Eğer süreç kontrol altındaysa, pasif gözlem daha kullanışlı bir bilgi üretmez. Diğer taraftan aktif bir istatistiksel yöntem olan deney tasarımında ise, oluşturduğumuz bir dizi deney ile girdilerdeki değişime karşılık çıktılardaki değişimi gözleyerek, sürecin iyileştirilmesine yardım edebilecek bilgiler üretmesi sağlanır (Montgomery, 2001a: 573).

## A. DENEY TASARIMI TERMİNOLOJİSİ

İstatistiksel deney tasarımı kavramının açıklanmasının ardından, deney tasarımının temel kavramlarının verilmesi yerinde olacaktır. Deney tasarımına ilişkin olarak en temel kavramlar Tablo 2.1’de verildiği gibidir.

**Tablo 2.1. Deneysel Tasarım Terminolojisi**

<b>Blok</b>	Homojen deneysel birimler grubu.
<b>Etki karışımı</b>	Tek bir faktöre veya etkileşime açık bir biçimde dayandırılmayacak bir veya daha fazla etki.
<b>Ortak değişken</b>	Herhangi bir deneysel faktörden etkilenmeyen fakat, tepkiyi etkileyen kontrol edilemeyen değişken. Bloklama, rassallaştırma, tekrarlar ve deneysel birimlerin faktör-düzye kombinasyonlarının atanmasını içeren deneysel testlerin tanımlaması.
<b>Tasarım</b>	
<b>Etki</b>	Ortalama tepkinin iki deneysel koşul veya iki faktör-düzye kombinasyonu arasındaki değişimi.
<b>Deneysel bölge</b>	Denenmesi olası olan tüm faktör-seviye kombinasyonları.
<b>Faktör</b>	Tepkiyi etkilediği düşünülen kontrol edilebilen deneysel değişken.
<b>Homojen deneysel birimler</b>	Tepkiyi etkileyebilecek olası tüm karakteristiklerin birimleri. Her bir faktörün etkisi diğer faktörlerin düzeylerine bağlı olduğunda ortak faktör etkilerinin ortaya çıkmasıdır.
<b>Etkileşim</b>	
<b>Düzye</b>	Bir faktörün belirli bir değeri
<b>Tekrar testleri</b>	Tüm faktörlerin aynı düzeylerine sahip iki veya daha fazla gözlem.
<b>Tekrarlar</b>	Bir deneyin tamamının veya bir parçasının iki veya daha fazla koşul altında tekrar edilmesidir.
<b>Tepki</b>	Bir deneyin sonucu.
<b>Deneme</b>	Tepki olarak gözlemlenen faktör düzeylerinin tekil kombinasyonu.
<b>Birim</b>	Var olan bir ölçüm veya gözlem; bazen de gerçek bir gözlem veya ölçüme işaret eder.

(Kaynak: Mason – Gunst – Hess, 2003, s. 110)

Deney düzeninde değişkenler, tepki değişkenleri ve faktörler olmak üzere iki kategori altında incelenebilir. Bir deneyin sonucunu, ölçtüğümüz sistemin çıktısını bildiren tepki değişkeni, nicel olabileceği gibi nitel de olabilir. Bağımlı değişken olarak da adlandırılabilen tepki değişkenleri, aynı zamanda araştırmacı tarafından kontrol edilemeyen değişkenlerdir. Kontrol edilebilen deneysel bir değişken olan faktör ise, tepki üzerindeki etkisinin olabileceği düşünülen ve bağımsız değişken olarak da adlandırılabilen değişkendir. Bu değişkenlerin değerleri ve düzeyleri, araştırmacı tarafından deney programında önceden belirlenebilir ve deney tasarımında bir şart olarak konulabilir. Bir deneysel bölge veya faktör uzayı, tasarımda bulunan tüm aday faktör seviyelerini içerir.

Bir deneyde, tepkiyi etkileyebilecek olan fakat kontrol edilemeyen değişkenler ortak değişkenler (covariates) olarak adlandırılır. Ortak değişkenler ve faktörler tepkiyi

birlikte etkilerler. Homojen deneysel birimlerin sayısı yeterli düzeyde olmadığı zaman, istatistiksel olarak tasarlanmış deneyde benzer deneysel birimleri bir arada toplamak için bloklama yapılır. Tasarım terimi ise, deneysel tasarım terimine alternatif olarak kullanılır. Bir deneyin tasarımı; incelenecek faktör-düzye kombinasyonlarını, tekrar testlerini veya tekrarları, bloklamayı, faktör-düzye kombinasyonlarının deneysel birimlere atanmasını ve denemelerin sıralanmasını içerir. Tepki üzerindeki bir tasarım faktörünün etkisi, iki veya daha fazla faktör-seviye kombinasyonuna göre ortalama tepkinin ölçülmesi olarak tanımlanır (Mason *et al.*, 2003: 112).

Bir deneyin tekrar testleri ile kastedilen, faktörlerin düzeylerini yenilemeden başka bir örneklemden gözlemler olarak deneyin uygulanmasıdır. Diğer bir deyişle, tüm faktörlerin aynı düzeylerine sahip iki veya daha fazla gözlem elde etmektir. Tekrarlama ise, tüm deneyin deney düzeninin yeniden kurularak testlerin yeniden yapılmasıdır (Gürsaka, 2010: 8).

## **B. DENEY TASARIMI STRATEJİLERİ**

Deneylerin planlanması ve yürütülmesi işleminde izlenebilecek yollara, genel olarak deney stratejisi adı verilmektedir. Deneyi yapan araştırmacının uygulayabileceği birkaç strateji vardır. Bunlardan birincisi “*en iyi tahmin*” yaklaşımıdır. Çalıştıkları alanda üstün teknik ve teorik bilgiye sahip olan tecrübeli mühendisler ve bilim insanları genellikle iyi sonuçlara ulaşmışlardır. Ancak, bu yaklaşımın iki sakıncası vardır. Bunlardan birincisi, ilk iyi tahminin arzulanan sonucu üretmemesi durumunda deneyi yapan araştırmacının faktör seviyeleri kombinasyonunu düzeltmek için başka bir iyi tahminde bulunmak zorunda olmasıdır. Fakat, bu işlemler başarıyı garanti etmeksizin uzun bir süre devam edebilir. İkinci sakınca ise, ilk iyi tahminin kabul edilebilir bir sonuç ürettiği varsayıldığında, deneyi yapan araştırmacının en iyi sonucun bulunduğu garantisiz olmadan deneyi durdurmaya teşebbüs etmesidir.

Yaygın bir biçimde kullanılan bir diğer strateji ise, “*bir seferde bir faktör*” (OFAT – one factor at a time) yaklaşımıdır. Bu yöntem her bir faktör için bir başlangıç noktası veya temel düzeyler kümesinin seçilmesinin ardından, diğer bütün faktörler temel seviyesinde sabit tutularak, her faktörün kendi aralığında değiştirilmesinden oluşur. Bütün testler gerçekleştirildikten sonra, diğer bütün faktörler sabit tutulup her bir faktörün değişimine tepki değişkeninin verdiği yanıtları gösteren bir seri grafik çizilir. Bu

grafiklerden faktörlerin optimum kombinasyonu seçilebilir. Bu yaklaşımın en önemli sakıncası ise, faktörler arasındaki muhtemel etkileşimleri göz önüne almamasıdır (Montgomery, 2001b: 4).

Birçok faktörün bulunması durumunda izlenecek doğru yaklaşım, “*faktöriyel deney*” yaklaşımıdır. Bu deneysel strateji, bir seferde bir faktör yerine faktörlerin birlikte değiştirildiği ve faktörler arası etkileşimi de göz önüne alan yaklaşımdır. Deneysel verinin en etkin kullanımını sağlayan faktöriyel deneylerde, faktör sayısının 4, 5 veya daha fazla olması halinde zaman ve kaynak bakımından deneyin gerçekleştirilmesi zorlaşacağından faktör seviyelerinin bütün kombinasyonlarını çalıştırmak gereksizdir. Bu durumda, temel faktöriyel tasarımın bir çeşidi olan ve deneylerin bir alt kümesi olan “*kesirli faktöriyel tasarımlar*” kullanılır. Bu tasarımlar, geniş ölçüde endüstri araştırmalarında süreç geliştirilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla kullanılır.

### **C. DENEY TASARIMI TEMEL İLKELERİ**

Deneylerin istatistiksel tasarımı, toplanan uygun verilerin istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek geçerli ve tarafsız sonuçlar elde etmek için deney sürecinin planlanması işlemidir. Verilerden anlamlı sonuçlar elde etmek için, deneysel tasarımda istatistiksel yaklaşım uygulanması zorunludur. Problem deneysel hatalara eğilimli veri içerdiğinde, istatistiksel metodoloji tek nesnel yaklaşım biçimidir. Bu nedenle, deneyin tasarımı ve verilerin istatistiksel analizi olmak üzere birbiriyle yakından ilişkili olan iki deneysel problem vardır. Birbiriyle ilgili olmalarının nedeni ise, analiz yönteminin doğrudan kullanılan tasarıma bağlı olmasıdır. Uygulanan deneysel tasarım sürecinin rassallaştırma (randomization), tekrarlama (replication), bloklama (blocking) ve deneysel hatanın denetlenmesi olmak üzere dört temel ilkesi bulunmaktadır.

*1. Rassallaştırma:* Fisher tarafından geliştirilen bu ilke ile kastedilen hem deneysel materyallerin atanması, hem de denemelerin atanma ve gerçekleştirilme sırasının rassallaştırılmasıdır. Rassallaştırma araştırmacıya aynı zamanda ölçüm hataları bağımsızmış gibi düşünme olanağı sağlar ki; bu da birçok istatistiksel analizde yapılan genel bir varsayımdır (Hicks, 1994: 3).

İstatistiksel yöntemler, gözlemlerin (veya hataların) bağımsız dağılan rassal değişkenler olmasını gerektirir. Rassallaştırma bu varsayımı geçerli kılar. Böylelikle istatistiksel anlamlılık sınamalarının geçerliliği gerçekleştirilmiş olur. Aynı zamanda bu

ilkenin uygulanması ile tepki değişkenini etkileyen ancak, araştırmada göz önünde tutulamayan değişkenlerin etkilerinin giderilmesine yardımcı olunur. Rassallaştırma tepki değişkeni terimlerinin bağımsızlığını sağladığı gibi, hata terimlerinin de bağımsızlığını sağlayarak hata varyansının sapmasız bir kestiriminin elde edilmesini sağlamaktadır. Bunların yanı sıra rassallaştırma, hata terimlerinin rassal ve bağımsız olmasını sağlayarak, örnekleme hatasının ortalama ölçüsü olan standart hatanın belirlenmesine olanak verir (Çömlekçi, 2003: 23).

2. *Tekrarlama*: Deney tasarımı terminolojisi bağlamında tekrarlama, deneylerin aynı faktör düzeyleri ile birden fazla yapılması anlamına gelmektedir. Bu ilkenin iki önemli özelliği vardır. Bunlardan ilki, deneyi yapan araştırmacıya deneysel hatayı tahmin etme imkanı vermesidir. Bu hatanın tahmini, verideki gözlenmiş farklılıkların istatistiksel olarak farklı olup olmadığının belirlenmesini sağlayan bir ölçüdür. İkincisi ise, eğer örnekleme ortalaması deneydeki bir faktörün etkisini tahmin etmek için kullanılırsa, tekrarlama araştırmacının bu etkinin daha kesin bir tahminini elde etmesini sağlar. Tekrarlama denemeler arası ve denemeler içi değişkenlik kaynağını yansıtır. Bunların yanı sıra kontrol edilemeyen faktörlerden kaynaklanan sapmanın azaltılmasına olanak tanır (Pyzdek, 2001: 504).

Bu ilkenin benimsenmesinin birtakım nedenleri vardır. Bunlardan ilki, hata varyansının kestiricisi olan hata kareler ortalamasının en az iki tekrar olması halinde hesaplanabilmesidir. İkinci olarak, tekrar sayısının artırılması ile anlamlılık sınamaları ve güven aralığının belirlenmesinde gerekli bir değişkenlik ölçüsü olan hata varyansının kestirim değerinin küçültülebileceği ve hata varyansının denetiminin sağlanmış olduğu ifade edilir. Yine tekrar sayısının artırılmasıyla, anakütle parametrelerinin güven aralığı daraltılarak aralık tahmininin kesinliği artırılmış olur. Tekrar sayısının artırılmasının bir diğer nedeni de, anlamlılık sınamalarının gücünün artırılmasına neden olmasıdır (Çömlekçi, 2003: 24).

İstatistiksel anlamlılık sınamalarının kesinliğinin artırılmak istenmesi durumunda tekrarlama sayısı artırılmalıdır. Ancak, düzey ortalamaları arasındaki belirli bir farkın istatistiksel olarak anlamlı olmasını sağlayan tekrar sayısından fazlasını gerçekleştirmek, maliyeti artıracığı için gereksiz olacaktır. Diğer taraftan, istatistiksel olarak anlamlı olan düzey etkilerini elde etmek için yetersiz tekrara sahip bir deney yapmak ise anlamsız



olacaktır. Bu nedenlerden, optimum tekrar sayısının belirlenmesi son derece önemli bir konudur.

3. *Bloklama*: Birbirine benzeyen deneysel birimleri homojen gruplar olan bloklarda toplama işlemi olarak tanımlanabilecek olan bloklama ile, birimler arasında arka planda ilişkisiz olan değişkenliğin indirgenerek incelenen değişkenlik kaynağının tahmininin daha kesin bir biçimde yapılması sağlanmış olur (Gürsakal, 2010: 8). Bloklama ile aralarında sistematik farklar bulunan deney birimleri kendi içinde homojen, kendi aralarında heterojen olacak biçimde gruplara bölünerek deneysel hatanın azaltılması amaçlanır. Bloklama, genellikle araştırmacının doğrudan ilgilenmediği fakat, deneysel tepkiyi etkileyebilecek “*gürültü (nuisance)*” faktörlerinden iletilen değişkenliğin azaltılması veya elenmesi için kullanılır.

Bloklama ilkesi, aslında rassallaştırma ilkesi ile yakından ilgilidir. Tepki değişkenine olası etkileri olan bir tasarım faktörü olarak da tanımlanabilen gürültü faktörü, bazen bilinmez ve kontrol edilemez. Böyle durumlarda bu faktörün varlığı, düzeylerde meydana getirdiği değişim bilinemez. Rasallaştırma bu tip gürültü faktörünün etkilerine karşı kullanılan bir tasarım ilkesidir. Değişkenliğin gürültü kaynağı biliniyor ve kontrol edilebiliyorsa, bloklama ilkesi işlemler arasındaki istatistiksel karşılaştırmalara etki eden bu gürültü faktörünün sistematik olarak arındırılması amacı ile kullanılır. Kısaca ifade etmek gerekirse, bloklama ile deney sırasında insanlardaki, hammaddedeki veya ekipmandaki bilinen değişkenlik kaynakları bloklara ayrılır. Bloklama ile, bu değişkenliğin etkileri izole edilebilir ve nicelleştirilebilir (Gürsakal, 2005: 205).

4. *Deneysel hatanın denetlenmesi*: Deneysel çalışmalarda hata kontrol altına alınamaz ise, varsayımların doğru sınanması yapılamadığı gibi, yapılacak parametre tahminlerinde ve alınacak kararlarda tutarlılık azalacaktır. Gerçek parametre ile tahmin edilen parametrenin farklılaşmasına yol açan hata, deneysel hata olarak adlandırılır. Deneysel hata kaynakları, sistematik ve rassal hata kaynakları olmak üzere iki çeşittir. Sistematik hatalar, araştırma sonuçlarını tek yönde etkileyen bilerek veya deney düzenleme esnasında bilgisizlik, yetersizlik, vb. nedenlerden dolayı yapılan hatalardır. Sistematik hatanın büyük olduğu deneysel çalışmalardan elde edilecek veriler güvenilir değildir. İki yönlü ve denklemleri olanaklı olan rassal hatalar, kasıt olmaksızın ortaya çıkmaktadır.

Deney birimleri arasındaki homojenlik, deneysel hatanın küçültülerek deneyin duyarlılığının artmasını sağlar (Şenoğlu – Acıtaş, 2011: 5).

Anlamlılık sınamalarının gücünün artırılması ve hesaplanacak güven aralıklarının kesinliğinin artırılması amacıyla, deneysel hatanın değerinin küçültülmesine çalışılmalıdır. Bu amaçla, deney düzenlenirken birtakım önlemlerin alınması gerekir. Bunlardan ilki, tüm deneme için koşulların tüm birimler için sabit tutulmasıdır. Örneğin ısı, ışık, test süresi gibi deneyi etkileyebilecek koşulların eşitlenmesidir. İkinci olarak, faktör perdelenmesi olarak adlandırılan ve deney ortamında olağandışı uygulamaların olması halinde bu durumun rutin bir uygulama şekline dönüştürülmesi işleminin uygulanması gerekebilir. Böyle durumlarda, değişkenliğe neden olabilecek uygulama durağan hale getirilerek kontrol altına alınmış olur. Üçüncü durumda, araştırmada ortak değişkenlerin (covariate) olması durumuyla karşılaşılabılır. Ortak değişkenler kendileri bir faktör olmamakla birlikte, tepki değişkeni ile ortak değişim içinde olan değişkenlerdir. Ortak değişkenlerin de modele dahil edilmesi gerektiği durumlarda, bu değişkenler de ölçülerek analiz edilmelidir. Son olarak, koşullardan bazılarının eşitlenememesi veya kontrol edilememesi durumlarında denemeler farklı koşullar altında tekrarlanmalıdır. Söz edilen bu uygulamalar ve önlemler sayesinde deneysel hata sistematik kaynaklarından arındırılarak değeri minimum seviyeye indirgenmiş olur (Özdamar, 2005: 60-61).

#### **D. DENEY TASARIMI AŞAMALARI**

Bir deneyin tasarım ve analizinde istatistiksel yaklaşımı kullanabilmek için, deneye katılan araştırmacıların çalışacakları konu ve verilerin nasıl toplanarak analiz edileceği hakkında bilgi sahibi olmaları gerekmektedir. Bu doğrultuda tavsiye edilen prosedür yedi temel başlık altında inceleyebilir.

*1. Problemin tanımlanması:* Bir deneyin gerçekleştirilmesinin amacı, bir sistemle ilgili bilginin doğrulanması veya yeni koşulların sistem üzerindeki etkilerinin araştırılması olabilir. Problemin tanımlanması ve anlaşılması aşaması, deney tasarımının en önemli adımlarından biridir. Deneyin amaçları hakkındaki tüm fikirlerin geliştirilmesi gerekir. Yönetim, müşteriler, kalite, pazarlama, mühendislik gibi ilgili bölümlerin tamamından girdi talep etmek önemli olduğundan bu aşamada takım yaklaşımı tavsiye edilir.

Bu aşamada, spesifik problemlerin veya soruların listesini hazırlamak çok yararlı olacaktır. İlk bakışta konuyla ilgili birçok problem olabilir, fakat bunların içinden neden-

sonuç diyagramı, beyin fırtınası, vb. kalite araçlarından da yararlanarak en temel sorunu belirlemek gerekir. Problemin açıkça tanımlanması, genellikle konunun daha iyi anlaşılmasına ve problemin nihai çözümüne önemli ölçüde katkıda bulunur. Ayrıca, bu adımda genellikle çoğu mühendis ve bilim insanı kapsamlı tek bir deneyle anahtar soruların cevaplandırılmayacağını, daha küçük denemelerin kullandığı “*adımsal yaklaşım*”ın (sequential approach) daha iyi bir strateji olduğunu fark etmişlerdir.

2. *Faktörlerin, seviyelerin ve aralığın seçilmesi*: Bir süreç veya sistemin performansını etkileyen faktörler düşünüldüğünde, deneyi yapan araştırmacı bunları “*potansiyel tasarım faktörleri*” veya “*gürültü faktörleri*” olarak sınıflandırabilir. Potansiyel tasarım faktörleri, araştırmacının bir deneyde değiştirmek isteyebileceği faktörlerdir. Bu faktörler “*tasarım faktörleri*”, “*sabit tutulan faktörler*” ve “*değişimine izin verilen faktörler*” olarak gruplandırılabilir. Tasarım faktörleri, deney için seçilmiş asıl faktörleri içerir. Sabit tutulan faktörler, tepki üzerinde bazı etkiler uygulayan fakat mevcut deneyin amacıyla ilgili olmadığından belirli bir seviyede tutulan değişkenlerden oluşur. Değişimine izin verilen faktörler ise, tasarım faktörleri olan deneysel birimler veya materyallerde homojen olmayan şartlarda uygulanan faktörleri içerir. Genelde sabit tutulan ve değişimine izin verilen faktörlerin etkilerinin, oldukça küçük olduğu varsayılır.

Buna karşılık gürültü faktörleri önemli etkilere sahiptir. Bunlar “*kontrol edilebilen*” ve “*kontrol edilemeyen gürültü*” faktörleri olarak sınıflandırılır. Kontrol edilebilen gürültü faktörlerinin seviyeleri, deneyi yapan araştırmacı tarafından ayarlanabilir. Bu bağlamda, kullanılan bloklama yöntemi oldukça yararlıdır. Süreç içinde doğal ve kontrol edilemez bir biçimde değişen ve deneyin amaçları için kontrol edilebilen bir faktör, gürültü faktörü olarak adlandırılır. Böyle durumlarda amaç, genellikle gürültü faktörlerinden iletilen değişkenliği minimize eden, kontrol edilebilen tasarım faktörlerini ayarlamaktır. Bu durum “*süreç dirençliliği çalışması*” (process robustness) veya “*dirençli tasarım problemi*” (robust design problem) olarak tanımlanır.

Deneyi yapan araştırmacı tasarım faktörlerini seçerken, bunların seviyelerinin değişebileceği aralığı ve denemelerde kullanacağı spesifik seviyeleri de süreç bilgisine (process knowledge) dayanarak seçmelidir. Süreç bilgisi, teorik bilgi ve pratik tecrübelerin bir kombinasyonunu ifade eder. Deneyin amacı faktör izleme veya süreç karakterizasyonu olduğunda, genellikle faktörlerin düzeyleri iki düzey olacak şekilde düşük tutulur. Ayrıca,

ilgilenilen bölgenin seçimi de çok önemlidir. Faktör izlemede, ilgilenilen bölge oldukça geniş tutulmalıdır. Önemli olan değişkenler ve en iyi sonuçları üreten seviyeler, ilgilenilen bölgeyi genellikle daraltacaktır.

3. *Tepki değişkeninin seçilmesi:* Tepki değişkeninin seçiminde, araştırmacı değişkenin çalışılan süreç hakkında gerçekten yararlı bilgi sağladığından emin olmalıdır. Genellikle, ölçülen karakteristiğin ortalama veya standart sapması ya da her ikisi birden tepki değişkeni olacaktır. Önemli bir faktör olan ölçme aletinin kapasitesi (veya ölçüm hatası) yetersiz ise, deneyle belirlenecek büyük faktör etkileri bulunacak veya ek tekrarlara ihtiyaç duyulacaktır. Ölçme aletinin yetersiz olduğu bazı durumlarda, her bir deneysel birim birkaç kez ölçülebilir ve bunlar gözlenmiş tepki gibi tekrarlı ölçümlerin ortalaması olarak kullanılabilir. Deneyler gerçekleştirilmeden önce, tepki değişkeninin tanımlanması ve nasıl ölçüleceği konusunun belirlenmesi son derece önemlidir.

4. *Deneysel tasarımın seçilmesi:* Tasarımın seçilmesi işlemi örneklem hacminin göz önünde bulundurulması, denemelerin uygun gerçekleşme sırasının seçimi, bloklama ve diğer rassallaştırma kısıtlarının uygulanıp uygulanmayacağına karar vermeyi içerir. Tasarımın seçiminde, deneyin amaçlarının göz önünde tutulması son derece önemlidir.

5. *Deneyin gerçekleştirilmesi:* Deneyin yürütülmesi esnasında, her şeyin plana göre yapılmasını sağlamak için süreci dikkatlice izlemek çok önemlidir. Bu aşamada deneysel süreçteki hatalar deneyin geçerliliğini tahrip eder. Bu nedenle, deneyi gerçekleştirilmeden önce pilot çalışma veya birkaç denemenin yapılmasının yararlı olacağı önerilmektedir. Bu denemeler, deneysel materyalin uygunluğu, ölçüm sisteminin kontrolü ve deneysel hata hakkında kaba bir fikir sağlayarak pratikte deneysel tekniğin tamamen değiştirilmesi şansını da doğurabilir. Temelde gerçek veri derleme süreci olarak da tanımlanabilen bu adımda, özellikle rassallaştırma, ölçüm doğruluğu ve olabildiği ölçüde değişmez deneyleme koşullarının sağlanmasına özen gösterilmelidir (Çömlekçi, 2003:20).

6. *Verilerin istatistiksel analizi:* İstatistiksel yöntemler sonuçların ve kararların daha objektif bir biçimde analiz edilmesinde kullanılmalıdır. Deney doğru bir biçimde tasarlanmış ve tasarıma uygun olarak gerçekleştirilmişse istatistiksel teknikler çok karmaşık olmayacaktır. Verilerin analiz ve yorumunda basit grafiksel yöntemler, hipotez testleri ve güven aralıkları önemli rol oynar. Önemli faktörler ve tepki değişkeni arasındaki ilişkiyi ifade eden veriden, “*ampirik model*” olarak adlandırılan denklemin oluşturulması,

sonuçların sunulması açısından son derece faydalıdır. Bunun yanı sıra, kalıntı analizi ve model yeterlilik kontrolü de önemli analiz teknikleridir. İstatistiksel teknikler faktörün ya da faktörlerin özel bir etkiye sahip olduğunu ispat etmez, yalnızca sonuçların geçerliliği ve güvenilirliğini konusunda kılavuzluk eder (Montgomery, 2001b: 17). Bu teknikler, iyi bir mühendislik, süreç bilgisi ve sağduyu ile birleştğinde anlamlı sonuçlar verecektir.

*7. Sonuç ve öneriler:* Veriler analiz edildiğinde, araştırmacı bu analizden pratik sonuçlar elde etmelidir. Sonuçların sunulması aşamasında grafiksel yöntemler oldukça kullanışlıdır. Yapılan deney sonuçlarının doğrulanması için izleme denemeleri (follow-up runs) ve doğrulama testleri (confirmation testing) yapılmalıdır. Bütün bu süreç boyunca, sistem hakkında geçici olarak formüle edilen hipotezleri araştırmak üzere deneyler gerçekleştirilerek, ulaşılan sonuçlara dayanan yeni hipotezler formüle edilir. Bu işlem, iteratif bir şekilde sürdürülmelidir. Çünkü, deney yapma öğrenme sürecinin önemli bir parçasıdır. Deneyi yapan araştırmacı bu aşamada, verinin istatistiksel analizi sonucu ulaşılan bulgulara ilişkin önerilerde de bulunmalıdır.

### **III. İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMI YAKLAŞIMI**

Deneysel, tepki üzerindeki bir veya daha fazla faktörün etkisini araştırmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bir deney, iki veya daha fazla faktör içerdiğinde faktörler tepkiyi tek başlarına etkileyebileceği gibi birlikte de etkileyebilir. Bir seferde bir faktör denemesi olarak adlandırılan yaklaşımda, deneysel tasarım faktörlerin birlikte etkisinin değerlendirilmesine tam anlamıyla izin vermez. Söz konusu klasik yaklaşımla elde edilemeyen sonuçlar, faktöriyel tasarımlarla sağlanabilmektedir. Deneysel tasarımdaki olası bütün faktör-düzye kombinasyonlarını içeren faktöriyel tasarımlar, faktörlerin etkileşim etkisinin değerlendirilebilmesine imkan vermektedir. Uygulamada sıklıkla kullanılmaları nedeniyle, alt başlıklarda faktöriyel tasarımlar ve Taguchi yaklaşımı tasarımları diğer tasarımlara göre daha detaylı açıklanacaktır.

#### **A. FAKTÖRİYEL TASARIMLAR**

Birçok deneysel çalışmada iki veya daha fazla faktörün etkisinin araştırılması hedeflenir. Bu tip deneyler için önerilen en uygun tasarım şekli faktöriyel tasarımlardır. Faktöriyel tasarım kavramı, her bir deneme veya deney tekrarında faktörlerin düzeylerinin tüm olası kombinasyonlarının araştırılmasını ifade eder. Örneğin A faktörünün a düzeyi, B

faktörünün de b düzeyi olması halinde her tekrar, ab deneme kombinasyonunu içerir. Faktörler, bir faktöriyel tasarım olarak düzenlendiklerinde genellikle çaprazlanmış olarak adlandırılırlar (Montgomery, 2001b: 170).

Bir faktörün düzeylerindeki değişimin üretilen tepkide değişime neden olması durumunda, söz konusu faktörün etkisine ana etki (main effect) adı verilir. Bazı deneylerde, bir faktörün düzeylerinin tepki üzerindeki etkisinin diğer faktörlerin tüm düzeylerinde aynı olmadığı görülür. Bu durum, faktörler arasında etkileşim (interaction) olması halidir. Faktöriyel tasarımlar, iki veya daha fazla faktörün ana etkilerini ve etkileşim etkilerini araştırmak amacıyla sıklıkla kullanılan yararlı tasarımlardır.

Bir faktöriyel düzende ilk faktörün düzey sayısı a, ikinci faktörün düzey sayısı b ve sonuncu faktörün düzey sayısı k ise, bu durumda  $a \times b \times \dots \times k$  faktöriyel düzeninde  $a \times b \times \dots \times k$  sayıda deneme kombinasyonu vardır. Bu tasarımda, deneme kombinasyonları deney birimlerine rassal olarak atandığında tamamen rassal bir tasarım elde edilir.

Bir seferde bir faktör yaklaşımından daha etkin olan bu tasarımların, uygulamada yaygın bir biçimde kullanılan özel durumları mevcuttur. Bunlardan en sıklıkla kullanılanları  $2^k$  ve  $3^k$  faktöriyel tasarımlardır. Bu tasarımlarda tabandaki 2 ve 3 sayıları düzey sayılarını, k ise faktör sayısını göstermektedir. Bir  $2^k$  tasarımda faktörlerin düzeyleri, genellikle  $(a_0, a_1)$ , (0, 1), (düşük, yüksek), (-1, 1) gibi sembollerle gösterilir. Bu düzeyler sıcaklık, basınç, zaman gibi nicel olabileceği gibi iki makine, iki operatör, bir faktörün düşük ve yüksek düzeyleri gibi nitel de olabilir. Söz konusu  $2^k$  tasarımlarında, her bir faktörün yalnızca iki düzeyi olmasından dolayı tepkinin seçilen faktör düzeyleri aralığında yaklaşık olarak doğrusal olacağı varsayılır.

$2^k$  tasarımların kullanımı, birçok faktörün etkisinin araştırılmak istendiği deneysel çalışmaların başlangıç aşamalarında çok faydalıdır. Bu tasarımlar, faktör izleme deneylerinde (factor screening experiment) yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.  $2^k$  tasarımları, özellikle süreç geliştirme problemlerinde bir sonraki araştırmanın yönünün belirlenmesi için bir ön çalışma niteliğinde kullanılır (Şenoğlu – Acıtaş, 2011: 148).

## B. KESİRLİ FAKTÖRİYEL TASARIMLAR

Tam faktöriyel tasarımlar, faktörlerin ana etkilerini ve etkileşim etkilerini ölçebilen tasarımlar olmalarına karşılık, deneyde olası tüm kombinasyonları hesaba katmaları nedeniyle zaman ve maliyet kaybına yol açabilen bir yöntemdir. Ayrıca tam faktöriyel tasarımlar, faktör sayısının beş veya daha fazla olması durumunda, çok fazla deney gerektirmelerinden dolayı etkin olamayacakları için önerilmeyen tasarımlardır. Böyle durumlarda, kesirli faktöriyel tasarımlar veya Plackett-Burman tasarımları önerilmektedir (Gürsakal, 2010: 87). Söz konusu nedenlerden dolayı sadece deneyin bir kısmının gerçekleştirildiği kesirli faktöriyel tasarımlar, oldukça ekonomik ve zaman kaybını azaltan tasarımlardır.

$2^k$  tasarımlarda faktör sayısının artmasıyla birlikte artan deney sayısı, bir noktadan sonra deneyi yapan araştırmacıların deneye ayırdığı kaynakları aşmaktadır. Örneğin  $2^6$  tasarımlarında 64 deney yapılması gerekirken, bu tasarımdaki serbestlik derecesi olan 63'den sadece 6'sı ana etkilere, 15'i ikili faktör etkileşimlerine ve geri kalan 42 serbestlik derecesi de, üçlü ve daha fazla faktör etkileşimlerine karşılık gelmektedir. Özellikle endüstride uygulanan deneylerde, ikili etkileşimden daha yüksek derecedeki önemli etkileşimlerle oldukça nadir karşılaşmaktadır. Bu durumda deneyi yapan araştırmacı, yüksek derecedeki etkileşimleri ihmal ederek, sadece ana etkiler ve düşük dereceli etkileşimleri göz önüne alabilir. Böylece, deneyin boyutunun küçültülmesiyle hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlanmış olur. Bu üstünlüğüne karşılık, bu tasarımların sakıncası ise, her bir ana etki ve etkileşim etkisinin, bir veya daha fazla sayıdaki diğer etki ve etkileşim etkileri ile karışacağından ayrı olarak tahmin edilememesidir (Erbaş – Olmuş, 2006: 372).

Bu tasarımlar, özellikle imalat sektöründe ürün ve süreç geliştirme amacıyla yaygın bir biçimde kullanılır. Söz konusu tasarımların başlıca kullanım alanı, projenin başlangıç aşamasında tepki üzerindeki büyük etkiye sahip olabilecek faktörleri tanımlamak amacıyla gerçekleştirilen izleme deneyleridir. Faktörlerin düzey kombinasyonlarının tamamının uygulanmadığı bu tasarımlarda, gerekli deney sayısını  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$  ve en ekstrem durumlarda  $1/16$  oranında azaltmak mümkündür. Örneğin  $2^7$  tasarımlarda 128 gözlem gerektiren deney, kesirli faktöriyel olarak tasarlanırsa,  $1/2$  için 64,  $1/4$  için 32,  $1/8$  için 16 ve  $1/16$  için 8 gözlem gerektirir (Şirvancı, 1997: 57).

### C. TAGUCHİ DENEY TASARIMI

Bir kalite mühendisliği metodu olarak nitelendirilen ve Dr. Genechi Taguchi tarafından tanıtılan Taguchi metodu, deney tasarımı yönteminin standardize ve modifiye edilmiş bir formudur. Diğer bir ifadeyle, Taguchi yaklaşımı deney tasarımı yönteminin özel uygulama ilkeli bir formudur (Roy, 2001: 10).

Üretimde kalite iyileştirme üzerinde araştırmalar yapan Japon bilim adamı Dr. Taguchi, II. Dünya Savaşı'ndan sonra tahrip edilmiş haldeki Japon telefon sisteminin düzeltilmesi için çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarının çoğunda, deney tasarımı tekniklerini içeren kapsamlı kalite iyileştirme metodlarını geliştirmiştir. Taguchi'nin yöntemleri 1960-1970'li yıllar boyunca Toyota, Nippon Denso, Fuji Film ve diğer Japon firmalarında başarıyla uygulanmıştır. Bu tekniğın, Amerika Birleşik Devletleri'nde tanıtılması 1980'lerin başında gerçekleşmiştir.

Faktöriyel tasarımlarda genellikle faktör ve seviye sayısının fazla olması durumunda, artan deney sayısı zaman ve maliyet kaybına yol açmaktadır. Temelde bir tür kesirli faktöriyel tasarım olan Taguchi yönteminde, faktörlerin tün kombinasyonlarının denenmesi yerine bu kombinasyonların küçük bir kesri alınarak, tasarım "*ortogonal diziler*" (orthogonal array) adı verilen özel tablolar kullanılarak hazırlanır. Endüstriyel projelerin çoğunda faktör sayısı 6 ile 15 arasında değışmektedir. Örneğın, iki düzeyli ve on beş faktörlü bir durum  $2^{15}=32.768$  deneme gerektirirken, L-16 ortogonal dizisi sayesinde 32.768 yerine sadece 16 deney yapılır. Böylece, ortogonal diziler kullanılarak deney sayısı oldukça ekonomik bir düzeye indirgenmiş olur (Gürsakal, 2010: 142).

Taguchi, kalite kontrol girişimlerini off-line kalite kontrol ve on-line kalite kontrol olarak iki kategori altında incelemektedir. Off-line kalite kontrol, müşteriye yansıyan hataların takip edilerek ürünün yapısı ve denetlenmesi, problemlerin öngörülerek sürecin teşhis edilmesi ve düzeltilmesi işlemlerini içerir. Bu işlemler, ürün veya sürecin geliştirilmesi esnasında gerçekleşen faaliyetlerdir. On-line kalite kontrol ise, ürün geliştirme döngüsünün ürün ve süreç tasarım aşamasında yürütülen kalite ve maliyet kontrol faaliyetleridir. Bu kontrol, ürünün imalatı ve imalat sonrası aşamalarında gerçekleştirilir. İstatistiksel kalite kontrol ve çeşitli muayeneler, söz konusu kalite kontrol yöntemlerindedir. Deney tasarımının da içinde yer aldığı off-line kalite kontrolün sistem



tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olmak üzere başlıca üç boyutu vardır (Pyzdek, 2001: 541).

1. *Sistem tasarımı*: Temel fonksiyonel prototip tasarımın üretilmesi için, bilimsel bilgi ve mühendislik tecrübesinin uygulandığı bir süreçtir. Bu prototip, model ürün veya proses tasarım karakteristiklerinin başlangıç ayarlarını tanımlar.

2. *Parametre tasarımı*: Performans varyasyonunu minimize edecek ayarların tanımlanmasının araştırıldığı aşamadır. Bu aşama, Taguchi'ye göre hem ürün hem de proses tasarımı için kaliteyi iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapılabileceği safhadır. Ürün parametre tasarımı; malzeme, boyut, yüzey özellikleri gibi ürün parametrelerinin optimal değerlerinin belirlenmesi anlamına gelir. Böylelikle üründe ortaya çıkabilecek varyasyon asgariye indirilerek, ürünün imalat ve hayat boyu maliyeti azaltılmış olacaktır. Diğer taraftan sıcaklık, basınç gibi kontrol edilebilen imalat süreç parametrelerinin optimal düzeylerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilen süreç parametre tasarımı ile de amaç, ürün ve süreçteki varyasyonu minimize etmektir (Şirvancı, 1997: 15). Bu amaçla, kontrol edilemeyen faktörlerdeki değişime duyarsız, kontrol edilebilir faktörlerin ayarlarının optimize edilmesiyle oluşturulan ürün veya süreç tasarımları, “*dirençli tasarımlar*” (robust design) olarak adlandırılır (Brue, 2003: 158).

3. *Tolerans tasarımı*: Ürünün, imalat ve hayat boyu maliyetleri toplamını minimize eden toleransı belirleyen bir metottur. Ürün veya proses tasarımının bu son adımında, toleranslar parametre tasarımı ile tanımlanan nominal ayarlar etrafında belirlenir. Toleransların çok dar olması imalat maliyetlerini, çok geniş olması ise, performans varyasyonunu ve ürünün hayat boyu maliyetini artırır (Pyzdek, 2001: 542).

Taguchi, geleneksel kalite kontrolde kullanılan ve hedef değerden sapmaları göz önüne almayan spesifikasyon limitleri yöntemini gerçekçi bulmamıştır. Bu yöntemin yerine, kalitesizlikten kaynaklanan parasal kaybı tahmin etmek için “*kayıp fonksiyonu*” olarak adlandırılan matematiksel bir formül önermiştir. Bu fonksiyon, ürün spesifikasyon limitleri içinde dahi olsa kayıpları tahmin edebilmektedir.  $L = k(y - y_0)^2$  şeklinde formüle edilen söz konusu fonksiyonda L kayıp/birim ürünü, k bir sabiti, y ölçülen performansı ve  $y_0$  hedef değeri ifade etmektedir (Roy, 2001: 438). Formülden de anlaşıldığı üzere, ölçülen performansın hedef değerden sapması arttıkça kayıp, sapmanın karesi oranında artmaktadır.

Performans karakteristikleri üzerindeki gürültü faktörlerinin etkisi, performans istatistikleri ile tahmin edilir. Performans istatistikleri, beklenen parasal kaybı minimize edecek performans ölçüsünü maksimize etmesi için seçilir. Birçok performans istatistiği, Taguchi'nin "*sinyal gürültü oranı*"nı (signal to noise ratio) kullanır (Pyzdek, 2001: 545). En basit ifade ile sinyal gürültü oranı, ortalamanın standart sapmaya oranı olarak tanımlanabilir. Varyasyonu azaltmak amacıyla, performans kriteri olarak kullanılan bu oranın maksimize edilmesi amaçlanır.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### TEPKİ YÜZEYİ TASARIMI ve MODELLEMESİ

Tepki Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Methodology), süreçlerin geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve optimize edilmesi için kullanılan istatistiksel ve matematiksel teknikler bütünü olarak tanımlanabilir. Endüstriyel dünyada söz konusu tekniğin en yaygın uygulamaları, birkaç girdi değişkeninin bir ürün veya sürecin performans ölçüsünü veya kalite karakteristiğini potansiyel olarak etkilediğinin düşünüldüğü durumlarda görülmektedir. Bu performans ölçüsü veya kalite karakteristiği tepki değişkeni (response variable) olarak adlandırılırken, mühendisler veya araştırmacılar tarafından kontrol altında tutulabilen ve tepki değişkenini etkilediği düşünülen bağımsız değişkenler ise girdi değişkenleri (input variables) olarak adlandırılır.

Tepki yüzeyi tasarımı ve modellemesi olarak adlandırılan bu bölümde, metodolojinin terminolojik yapısı ve temel özelliklerinin verilmesinin ardından, birinci ve ikinci mertebeden tepki yüzeyi tasarımları ve bunların özellikleri ele alınacaktır. Bu bağlamda, söz konusu tasarımlara temel oluşturması bakımından faktöriyel ve kesirli faktöriyel tasarımlara ayrıntılı bir biçimde yer verilecektir. Ayrıca, tasarım etkinliği konusunda son derece önemli bir kavram olan tasarım optimalitesi kavramı açıklanacak ve tasarımların karşılaştırılmasında kullanılan önemli sayısal ve grafiksel teknikler üzerinde durulacaktır.

#### I. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ

Tepki yüzeyi metodolojisi, çeşitli endüstriyel problemlerin çözümünde oldukça etkili bir araç görevi üstlenir. Söz konusu problemler genellikle üç kategori altında incelenebilir (Myers – Montgomery, 2002: 12):

*1. İlgilenilen Özel Bir Bölge Üzerinde Bir Tepki Yüzeyinin Haritalanması:* Normal şartlarda belirli seviyelerde işleyen bir sürecin, bazı zorunlu durumlarda seviyelerinin

değişmesi söz konusu olabilir. Bu durumda, mevcut şartlar altında bilinmeyen doğru tepki fonksiyonunun, ilgilenilen bölgeye uygun bir tahmininin yapılmasıyla, mühendis veya araştırmacı söz konusu seviye değişikliğinin tepki üzerindeki etkisini kestirerek, girdi değişkenlerinin düzeylerini yeniden ayarlayabilecektir.

2. *Tepkinin Optimizasyonu:* Endüstriyel dünyada, bir sürecin optimizasyon koşullarının belirlenmesi önemli bir problemdir. Belirlenen amaca göre, tepkinin minimize veya maksimize edilmesini sağlayan girdi düzeylerinin tespit edilmesi gerekebilir.

3. *Spesifikasyonları veya Müşteri Gereksinimlerini Karşılacak Koşulların Seçilmesi:* Birçok tepki yüzeyi probleminde, eş zamanlı olarak düşünülmesi gereken birden fazla tepki bulunabilir. Bu gibi durumlarda, sürecin tüm gereksinimlerinin eş zamanlı olarak tatmin edileceği koşulların bulunması istenebilir.

## **A. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ'NİN KISA TARİHÇESİ ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

Tepki Yüzeyi Metodolojisi ilk olarak, Box ve Wilson'un (1951) çalışması ile geliştirilerek açıklanmıştır. Kimyagerler ve istatistikçiler tarafından yapılan uzun çalışmaların sonucunu açıklamak için yazılan bu makalede, kimyasal araştırmalarda optimum koşulların belirlenmesi probleminin cevap olan bu gelişmenin, adımsal deney yapılan diğer alanlarda da kullanılabileceği açıklanmıştır (Box – Wilson, 1951: 1). Çalışma mühendislerin, bilim insanlarının ve istatistikçilerin endüstriyel deneylere yaklaşımlarının çarpıcı bir biçimde değişmesini vurgulamıştır. Bu çalışma, deney yapmanın adımsal felsefesini ve birinci dereceden tepki yüzeyi analiz metodu olan en dik artış (steepest ascent) yönteminin uygulanmasını ele alması; süreç veya ürün optimizasyonu gibi temel dinamiklere yer vermesi nedeniyle önemli bir çalışmadır.

Tasarlanmış deneyler, ilk kez Amerika'da 1950'lerde ürün ve süreç gelişimi için kimya endüstrisinde uygulanmıştır. Bunun nedeni, Amerikan kimya endüstrisinin dünyadaki en rekabetçi endüstrilerden biri olması ve işlerini önemli ölçüde yabancı şirketler lehine kaybetmiş olmasıdır (Montgomery, 2001a: 11). Box ve Wilson, endüstriyel deneylerin tarımsal deneylerden iki açıdan farklı olduğunu anlatır. Bu farklılıklardan biri, tepki değişkeninin genellikle hemen gözlemlenebilir olması, diğeri ise deneyi yapan kişinin bir sonraki deneyin planlanmasında kullanabilmesi için küçük bir grup denemeden önemli bilgileri hızlı bir biçimde öğrenebilmesidir. Box, endüstriyel deneylerin bu iki

özelliğini “*anında gözlenebilirlik*” (immediacy) ve “*ardışıklık*” (sequential) olarak adlandırmaktadır (Montgomery, 2001b: 18).

Bu temel makalenin ardından, söz konusu tekniğin felsefesinin tartışıldığı çok sayıda makale ve ders kitabı yayınlanmıştır. Bir grup kimyager, mühendis ve istatistikçi tarafından yazılan ve Davies (1954) tarafından editörlüğü yapılan kitapta, metodoloji oldukça geniş kapsamlı bir biçimde ele alınmıştır. Box (1954), Bradley (1958), Hunter (1958, 1959), Box (1960, 1964) ve Box ve Hunter’ın (1958) çalışmaları tekniğin temel noktalarını açıklayan ve farklı kimyasal örneklerle açıklamalarını destekleyen eğitici makalelerdendir. Box ve Wilson (1951), Tepki Yüzeyi Tasarımlarından Merkezi Bileşik Tasarımların (Central Composite Design), Box ve Hunter (1957) “*döndürülebilirlik*” (rotatability) kavramının ve Box ve Draper (1959) ise, “*sapma*” kriterinin tanıtıldığı temel çalışmalardır. Bu çalışmaların yanı sıra, Plackett ve Burman (1946) ve Box ve Hunter (1961) iki düzeyli faktöriyel ve kesirli faktöriyel tasarımlar gibi birtakım özel tasarımların açıklandığı; Bose ve Draper (1959), Box ve Behnken (1960), Box ve Draper (1959, 1963), Dykstra (1959, 1960) ikinci derece tasarımların Hartley (1959) ise, küçük bileşik tasarımların tanıtıldığı önemli makalelerdir (Hill – Hunter, 1966: 571-574).

Hoke (1974) tarafından geliştirilen, düzensiz kesirli 3<sup>o</sup> faktöriyel plana dayanan ekonomik bir ikinci derece tasarım sınıfı; Roquemore (1976) tarafından geliştirilen, merkezi bileşik tasarıma benzeyen ve hibrit tasarımlar olarak adlandırılan ikinci derece tasarımlar, diğer önemli ikinci derece tasarımlardandır. İkinci dereceden tepki yüzeylerinin analizinde oldukça yararlı bir prosedür olan “*sırt analizi*” (ridge analysis), Hoerl (1959) tarafından geliştirilmiş ve Draper (1963) tarafından biçimlendirilmiştir (Myers – Khuri – Carter, 1989: 140-144).

Tepki yüzeyi metodolojisi fizik, mühendislik bilimleri, gıda bilimi, sosyal bilimler, biyolojik ve klinik bilimler gibi çok çeşitli alanlarda uygulama şansı bulması nedeniyle, bu alanlarda yazılmış çok sayıda önemli makale bulunmaktadır. Sosyal bilimler alanında, özellikle sistem ve bilgisayar simülasyonları konularında Shechter ve Heady (1970), Montgomery ve Evans (1975), Smith (1975) ve Montgomery ve Bettencourt (1977) çalışmaları önemlidir. 1980’li yıllara gelindiğinde, endüstride kalite kavramının önemi ve gereksiniminin artmasıyla birlikte, Amerika Birleşik Devletleri’nde kalite kontrol teknikleri ve etkili istatistiksel metotlara olan ilgi de artmıştır. Japon endüstri mühendisi

Genichi Taguchi (Taguchi 1986; Taguchi ve Wu 1980), ürün iyileştirmek için bir metodoloji önermiştir. Sistem eğriselliği ve etkileşimleri göz önüne almaması yönüyle, tepki yüzeyi metodolojisinden farklı olan bu yaklaşım, optimizasyonu değil geliştirmeyi odak noktası olarak alarak ortogonal dizinleri kullanmaktadır. Bu dönemde, deneysel tasarımlar özellikle de tepki yüzeyi metodolojisi, büyük ölçüde dikkat çekmiş ve çok farklı alanlarda faaliyet gösteren endüstriyel firmalarda uygulanmıştır. Genel yazılım araçlarının yokluğu nedeniyle, tepki yüzeyi metodolojisi analizlerinde, uluslararası matematik ve istatistik kütüphanesi alt programları ve kurum içi yazılım versiyonlarına başvurulmuştur (Myers – Khuri – Carter, 1989: 144-150).

1980’li yılların sonlarında, tepki yüzeyi metodolojisinde önemli gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmeler: Standart tasarımların geliştirilmesi ve tasarım parametrelerinin seçimi, tasarım kriteri ve özelliklerinin geliştirilmesi, pratik tasarım optimalitesi veya bilgisayar tarafından üretilen tasarımlar ve tasarım dirençliliği (robustness) biçiminde kategorize edilebilir (Myers *et al.*, 2004: 57). Bu çerçevede Notz (1982), genelleştirilmiş varyans bakımından çok etkili olan, tasarımların yapılandırılmasında kullanılan ve *D*-etkinlik olarak adlandırılan bir metod önermiştir. Box ve Draper (1974), doymuş ve genelleştirilmiş varyans açısından etkili pratik tasarımlar üretmiştir. 1970’li yıllar ve 1980’li yıllarda yapılan çalışmaların çoğu, *D*-optimalite ve *D*-etkinlik kavramları hakkındadır. Deneysel tasarımın gelişimi üzerinde önemli bir bileşen olarak nitelendirilen optimal tasarım teorisinin temel karakteristiği, uydurulan modele ilişkin olan varyansın azaltılmasıdır. Kiefer ve Wolfowitz (1960), John ve Draper (1975) ve Atkinson (1982) bu teoriyle ilgili önemli çalışmalar arasında yer alır. En önemli tasarım kriterlerinden biri olan *D*-optimalite, model katsayılarının genelleştirilmiş varyansının minimizasyonunu amaçlar. *D*-optimalite dışında *G*-optimalite, *A*-optimalite ve *E*-optimalite varyansla ilgili diğer tasarım kriterleri olarak makalelerde yer almıştır. Lucas (1974, 1976, 1977) *D*-etkinlik ve *G*-etkinlik kriterlerini, ikinci derece modeller için kullanılan bazı geleneksel tasarımların performanslarının değerlendirilmesinde kullanmıştır (Myers – Khuri – Carter, 1989: 140-141).

## 1. Grafiksel Metotlara İlişkin Literatür Araştırması

Tasarımların karşılaştırılması ve performanslarının değerlendirilmesinde, sayısal kriterlerden daha etkili olan grafiksel metotlar da kullanılmaktadır. Bu grafiksel metotların çoğu, söz konusu değerlendirmede Ölçekli Tahmin Varyansı (Scale Prediction Variance) kriterini kullanır. Bazı yazılım paketleri, ölçekli tahmin varyansının ve tahmin edilen tahmin varyansının kontur grafiklerini vermektedir. Ancak, çok az sayıda faktör kullanılması durumunda dahi, kontur grafiklerinin kullanılması ve yorumlanması güç olmuştur. Bu nedenle, Giovannitti-Jensen ve Myers (1989) ve Myers ve diğerleri (1992) tarafından Varyans Yayılım Grafikleri (Variance Dispersion Graphs) önerilmiştir. Vining (1993), Boror (1998), Trinca ve Gilmour (1998), Borkowski (1995) ve Myers ve Montgomery (2002) çalışmalarında varyans yayılım grafiklerinin yazılımla nasıl üretileceğini açıklamıştır.

Khuri, Kim ve Um (1996) tarafından verilen bir küre üzerinde, tahmin varyansının kantillere göre dağılımını tarif eden Kantil Yayılım Grafikleri (Quantile Dispersion Graphs), varyans yayılım grafiklerinden daha etkili bir grafiksel yöntemdir. Khuri, Harrison ve Cornell (1999), bu yöntemi karışım deneylerinde uygulamıştır.

Bu konudaki diğer bir önemli gelişme, Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) tarafından tanıtılan Kesirli Tasarım Uzayı (Fraction of Design Space) grafiğidir. Bu grafik, ölçekli tahmin varyansının, kesirler olarak ifade edilen tasarım bölgelerine göre çizilmesiyle elde edilir. Bu sayede, varyans yayılım grafiklerinden kolaylıkla belirlenemeyen ölçekli tahmin varyansının, tasarım uzayındaki dağılımı hakkında bilgi edinilir. Böylece, tasarımın tahmin kabiliyetine ilişkin ek bilgi sağlanmış olur (Myers *et al.*, 2004: 61-62). Çalışmanın uygulama aşamasında kullanılmalarından dolayı, grafiksel tekniklere ilişkin literatürdeki önemli çalışmalara yer verilmesi anlamlı olacaktır.

Giovannitti-Jensen ve Myers (1989) çalışmalarında, belli başlı tepki yüzeyi tasarımlarının tahmin kabiliyetini araştırmak ve karşılaştırmak amacıyla, bir grafiksel teknik olan varyans yayılım grafiklerini kullanmışlardır. İki farklı hibrit tasarım (hybrid design) ile ikinci derece tepki yüzeyi tasarımlarının ailesinin ekonomik ve kullanışlı bir üyesi olan, küçük bileşik tasarım (small composite design) için çizilen varyans yayılım grafiklerinden, hibrit tasarımların küçük bileşik tasarımdan daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, iki farklı aksenal nokta değerine ve dört merkez noktaya sahip

merkezi bileşik tasarım ile dört merkez noktaya sahip Box-Behnken tasarımına ilişkin varyans yayılım grafikleri çizilerek değerlendirilmiştir. Sonuçta, küresel ve kübik bölgede döndürülebilir Merkezi bileşik tasarımın Box-Behnken tasarımından daha iyi performansa sahip olduğu gözlenmiştir.

Myers ve diğerleri (1992), üç değişken için üç merkez noktalı merkezi bileşik tasarım ve Box-Behnken tasarımını varyans yayılım grafiği yöntemi ile karşılaştırmıştır. Değerlendirme sonucunda, Box-Behnken tasarımının tasarım merkezinde, merkezi bileşik tasarımın ise, çevre bölgede daha iyi performans gösterdiğini ve merkezi bileşik tasarımın Box-Behnken tasarımına tercih edilmesi gerektiğini belirlemişlerdir. Sonraki aşamada, bu merkezi bileşik tasarım, daha ekonomik bir merkezi bileşik tasarım türü olan ve üç merkez noktaya sahip olan küçük bileşik tasarım ile kıyaslanmıştır. Sonuçta, merkezi bileşik tasarımın, tasarım bölgesi genelinde daha üstün bir performansa sahip olduğu gözlenmiştir. Küresel bölgede merkezi bileşik tasarımın, Box-Behnken tasarımından üstünlüğü bulgusu, söz konusu iki tasarımın kübik bölge için çizilen varyans yayılım grafiğinden de gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, varyans yayılım grafiğinin ilgilenilen bölgede, tahmin edilen modelin tahmin kabiliyetini gösteren etkili bir teknik olduğu anlaşılmıştır. Standart tepki yüzeyi tasarımlarından merkezi bileşik tasarımın, küresel ve kübik bölgede en iyi performansı gösteren tasarım olduğu, çalışmanın bir diğer önemli bulgusudur.

Borkowski (1995) çalışmasında, varyans yayılım grafiklerini merkezi bileşik tasarım ve Box-Behnken tasarımlarının küresel tahmin varyansı özelliklerini belirlemek için kullanmıştır. Söz konusu çalışmada, üç tasarım değişkeni ve üç merkez noktası ile beş tasarım değişkeni ve beş merkez noktalı Box-Behnken tasarımı ile üç farklı aksenal noktaya sahip merkezi bileşik tasarımların, varyans yayılım grafikleri küresel ve kübik tasarım bölgeleri için çizdirilerek karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, çeşitli merkez noktalara sahip tasarımların da karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuç olarak, ortalama küresel tahmin varyansları değerlendirildiğinde, küresel ve kübik bölgede en iyi performansı gösteren tasarımın 2 - 5 merkez noktaya sahip merkezi bileşik tasarım olduğu görülmüştür.

Trinca ve Gilmour (1999), gıda teknolojisi alanından seçtikleri iki örneği tarif etmişlerdir. İlk örnek, şekerden enzimatik olarak sentezlenmiş ürünün üç faktörün hangi düzeylerinde optimize edileceğini bulmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. İkincisi ise, üç faktörün hamur işi pastalar için karışım sürecini ve hamur işinin bazı özelliklerini nasıl



etkilediğini keşfetmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Her iki örnek için de, varyans yayılım grafiği kullanılarak uygun tasarımlar seçilmeye çalışılmıştır. İlk örnek için, merkezi bileşik tasarım, Box-Behnken tasarımı ve *D*-optimal tasarım varyans yayılım grafiği yardımıyla karşılaştırılmış ve sonuç olarak, tasarım genelinde merkezi bileşik tasarımın diğerlerinden daha iyi bir seçim olduğuna karar verilmiştir. İkinci örnek için merkezi bileşik tasarım, Box-Behnken tasarımı,  $3^3$  faktöriyel tasarım ve *D*-optimal tasarım ele alınmış ve yine merkezi bileşik tasarımın tepkinin daha iyi tahminini verecek olan tasarım olduğu görülmüştür.

Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) çalışmalarında önerdikleri kesirli tasarım uzayı grafiğinin araştırmacıya, bir tasarımın tahmin kabiliyeti hakkında varyans yayılım grafiğinden daha detaylı bilgi vermesinden dolayı, söz konusu tekniğin varyans yayılım grafiğini tamamlayıcı bir teknik olarak kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Yapılan altı farklı örnek uygulamada, farklı sayıda faktörlere ve çeşitli merkez denemelere sahip merkezi bileşik tasarım, Box-Behnken tasarımı, Küçük bileşik tasarım ve hibrit tasarımlar varyans yayılım grafiği ve kesirli tasarım uzayı grafiği teknikleri ile karşılaştırılmıştır. Örnek uygulamalarda, genel olarak merkezi bileşik tasarımın performansının diğer tasarımlardan daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada varyans yayılım grafiğinin, farklı tasarımlar için ölçekli tahmin varyansının değerler aralığının görselleştirilmesinde kullanılan, yararlı bir araç olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kesirli tasarım uzayı grafiğinin, tasarım uzayının belirli kısımlarında tahmin performansının ne kadar iyi olduğu konusuna odaklandığından bahsedilmiştir.

Goldfarb ve diğerleri (2004b) çalışmalarında, karışım deneylerinde kullanılan çeşitli tasarımların güçlü ve zayıf yönlerinin karşılaştırılmasında, varyans yayılım grafiği ve kesirli tasarım uzayı tekniklerinin kullanımını birlikte ele almışlardır. Üç farklı karışım deneyi uygulaması örneği yardımıyla, kesirli tasarım uzayı grafiklerinin, tasarım uzayındaki tahmin varyansı özelliklerinin değerlendirilmesinde, alternatif tasarımlar arasından en uygun olanın seçilmesi ve ek denemelerin tasarım genelinde nasıl dağıtılması gerektiği gibi konularda araştırmacıya yol gösteren bir yöntem olduğundan söz edilmiştir.

Park ve diğerleri (2005), tepki yüzeyi tasarımlarının tahmin varyansı özelliklerinin, daha çok küresel bölge için incelendiğini ve kübik bölge için yapılan çalışmaların yetersiz olduğunu düşünerek, kübik bölgede söz konusu tasarımların yapılandırılması ve

değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Bu bağlamda Hoke tasarımı, genetik algoritma tekniğiyle üretilen *G*-etkin tasarım, yüzey merkezli tasarım (face-centered design) ve *I*-etkin tasarım varyans yayılım grafiği ve kesirli tasarım uzayı grafiği yardımıyla tahmin edilen tepkinin varyansı açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçta, kübik bölgede Hoke tasarımı ve *G*-etkin tasarım tasarımın iyi bir seçenek olarak değerlendirilebileceği görüşüne ulaşmışlardır. Hoke tasarımının, yüzey merkezli tasarıma iyi bir alternatif olacağı görülmüştür.

Anderson-Cook ve Ozol-Godfrey (2006) çalışmalarında, kesirli tasarım uzayı tekniğinin, nadiren karşılaşılan tuhaf şekilli bölgelere nasıl adapte edilebileceği, karışım deneylerinde söz konusu tekniğin uygulanması ve kesirli tasarım uzayı ile model dirençliliğinin incelenmesi gibi başlıklar altında ele alınan orijinal örneklerle detaylı bilgiler aktarmışlardır. Sonuçta, farklı tasarım durumları için kesirli tasarım uzayı grafikleri sunulmuş, tasarımın tahmin karakteristiklerinin grafiksel bir özeti elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sayede, ele alınan tasarımların avantaj ve dezavantajlarının tespit edilerek tasarım hakkındaki mevcut bilginin güçlendirilmesiyle araştırmacının daha fazla bilgi edinmesi amaçlanmıştır.

Anderson-Cook, Borror ve Montgomery (2009) çalışmalarında, tepki yüzeyi tasarımlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında, grafiksel yöntemlerden varyans yayılım grafiği ve kesirli tasarım uzayı grafiğinin bu tasarımların seçiminde nasıl kullanılacağını göstermişlerdir. Çalışmada, üç ve bir merkez denemeye sahip merkezi bileşik tasarımlar ve bir merkez denemeye sahip altıgen (hexagon) tasarım örneği, söz konusu grafiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, her iki yöntemde de üç merkez denemeli merkezi bileşik tasarımın diğer tasarımlardan daha iyi performans göstereceği anlaşılmıştır. Söz konusu çalışmanın ana temasını, seçilen tasarımın karakteristiklerini anlamak oluşturmuştur.

Li ve diğerleri (2009) ele aldıkları merkezi bileşik tasarım, küçük bileşik tasarım ve tasarımlar ailesinin yeni bir üyesi olan en küçük çözünürlük (minimum resolution) tasarımına ilişkin tahmin varyanslarını, kesirli tasarım uzayı ve kutu bıyık diyagramları ile incelemişlerdir. Sonuç olarak elde edilen önemli bir bulgu, maliyet kısıtlarının merkezi bileşik tasarımın seçilmesine imkan vermediği durumlarda, en küçük çözünürlük tasarımının iyi bir alternatif olarak düşünülebileceğidir. Eğer tasarımın maliyeti, tasarım hacminin bir fonksiyonu

ise, küçük örneklem hacmi, faktör sayısı arttıkça tahmin performansına zarar verecektir. Bu nedenle, örneklem hacmini mümkün olduğunca yeterli tutmanın önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

## 2. Talaşlı İmalat İşlemlerine İlişkin Literatür Araştırması

Çalışmanın uygulama alanı göz önüne alındığında, söz konusu metodolojinin talaşlı imalat alanındaki uygulamalarına yer verilmesi daha anlamlı olacaktır. Wu (1964a, 1964b) makalelerinde 60 yıl boyunca araştırmacılar tarafından yapılan takım ömrü deneylerinde, takım ömrü verilerinin nasıl toplanacağı ve sonrasında takım ömrü parametrelerinin tahmin edilmesi konusunu ele almıştır. Çalışmalarda  $T = K V^a f^b d^c$  takım ömrü denkleminde V kesme hızını, f ilerleme, d talaş derinliği ve T takım ömrü olmak üzere a, b, c ve K parametrelerinin tahmini yapılmaya çalışılmıştır. Tipik takım ömrü testi araştırmalarında, çok sayıda tasarlanmayan denemeler yapılarak elde edilen veriler etkili olmayan metotlarla analiz edilmeye çalışılmıştır. Tepki Yüzeyi Metodolojisi ilkelerinin düzgün bir biçimde kullanılmasıyla birlikte, ele alınan problemin hem veri üretme, hem de veri analiz yönü daha etkili bir biçimde yapılmıştır. Ayrıca takım ömrü ve talaş debisi tepkilerinin tek bir kontur grafiği üzerinde çizilmesiyle bunlar karşılaştırılmıştır. Özetle, bu metot sayesinde sadece on iki deneme ile takım ömrü testi problemi açıklanmıştır (Hill – Hunter, 1966: 576-577).

Wu (1964a); kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin takım ömrü üzerindeki etkisini araştırmıştır. Takım ömrü deneyleri, önemli ölçüde zaman ve materyal gerektirdiğinden oldukça pahalı bir süreçtir. Söz konusu maliyeti azaltmak amacıyla, radyo izotop ölçümü gibi yeni teknikler geliştirilse de, bu deneyler için temel yaklaşım son 60 yılda pek fazla değişmemiştir. F. W. Taylor, yeni bir yüzyılın başlangıcında takım ömrü deneyleri için bir seferde bir değişken metodunu önermiştir. Taylor, önerdiği bu metodun o dönemdeki çalışmalarının başarısının başlıca nedeni olduğunu iddia etmiştir. Ancak, birçok araştırmacı tarafından o dönemlerde çok çeşitli alanlarda kullanılan bu metot, zaman alıcı ve doğası gereği eksiklikleri olan bir metottur. Wu (1964a), çalışmasında çok çeşitli mühendislik problemleri için, bu yönleme daha etkili bir alternatif olan Tepki Yüzeyi Metodolojisi'ni metal kesme (metal-cutting) çalışmalarında uygulamıştır. Sonuç olarak, takım ömrünü birinci dereceden bir modelle modellemiş ve bu modelin uydurulabilmesi için üç değişken için altı test yaparak takım ömrü deneylerinin Tepki

Yüzeyi Metodolojisi ile geleneksel bir seferde bir değişken metoduna göre daha ekonomik olduğunu göstermiştir (Wu, 1964: 105-109).

Wu (1964b) bir önceki paragrafta bahsi geçen çalışmasının devamı niteliğindeki çalışmasında, Tepki Yüzeyi Yöntemi ile ikinci dereceden bir takım ömrü denklemi geliştirmeye çalışmıştır. Ancak, söz konusu proje için kullanılan aralıklarda kuadratik etki ve etkileşim etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür. Diğer bir deyişle, verilen kesme koşulları altında birinci dereceden bir modelin takım ömrü tahmin modeli için yeterli olduğu görülmüştür.

Wu ve Meyer (1964a), kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ampirik kesme sıcaklığı denkleminde, kesme sıcaklığının yalnızca kesme hızı değişkenine bağlı olduğu ifade edilirken; aslında gerçekte durumun böyle olmadığı kesme hızının yanı sıra iş parçası, takım materyali, soğutma sıvısı (coolant), ilerleme, talaş derinliği ve takım geometrisi gibi diğer kesme koşullarına da bağlı olduğuna değinilmektedir. Çeşitli koşullar için genel bir kesici takım sıcaklığı tahmin denklemi oluşturulmasının gerekliliği düşüncesiyle bu çalışmada, kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği değişkenleri ile böyle bir model araştırılmıştır. Bu amaçla Tepki Yüzeyi Metodu uygulanarak, birinci ve ikinci dereceden iki model tahmin edilerek karşılaştırılmıştır. Sonuçta, birinci dereceden modelin mühendislik uygulamaları için istatistiksel olarak anlamlı ve kabul edilebilir olduğu, ikinci dereceden modelin ise, yüksek sıcaklık aralığında ve ağır kesme koşullarında daha kesin tepki değerlerinin elde edilebilmesi için zorunlu ve anlamlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, ilerleme ve talaş derinliğinin de tepki üzerinde etkili olduğu görüldüğünden, kesme sıcaklığının yalnızca kesme hızı değişkenine bağlı olduğunu ifade eden basit kesme sıcaklığı denkleminin yetersiz olduğu da elde edilen sonuçlarla kanıtlanmıştır.

Wu ve Meyer (1964b) bir diğer çalışmalarında ise, yan kesici ağız açısı (side-cutting-edge angle) ve köşe radyüsünün kesici takım sıcaklığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmalarında, bir önceki paragrafta bahsi geçen çalışmalarındaki kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği değişkenlerine ek olarak, yan kesici ağız açısı ve köşe radyüsü değişkenlerinin de eklenmesiyle beş değişkenli birinci dereceden bir takım sıcaklığı modeli geliştirmişlerdir.  $2^{5-1}$  kesirli faktöriyel tasarım kullanılarak tahmin edilen modelde dört değişken içerilmektedir. Bu değişkenler, “*talaş eşdeğeri*” (chip equivalent)

olarak adlandırılmıştır. Bu sayede sıcaklık modeli ve “talaş eşdeğeri”nin karşılaştırılmasına imkan verilmiştir. Ayrıca, Claycomb ve Sullivan (1976) karı maksimize etmek amacıyla üç faktörlü merkezi bileşik tasarım ve sırt analizi uygulayarak kesici takım seçimi problemini ele almışlardır.

Ekinovic, Dolinsek ve Begovic (2005), 63-65 HRC sertliğindeki 90MnCrV8 çeliğinin, CVD kaplamalı karbür kesici takım ile yüksek hızlarda işlenebilirliğini araştırmışlardır. Sonuç olarak kesme hızı, takım çapı ve işlenen malzeme sertliğinin yüzey pürüzlülüğünü etkilediğini gözlemlemişlerdir. Literatüre uygun olarak, kesme hızı arttıkça ve takım uç yarıçapı küçüldükçe yüzey kalitesinin iyileştiği sonucuna ulaşmışlardır.

Singh ve Kumar (2007), titanyum karbür kaplamalı tungsten uçlar ile En-24 çeliğinin tornalanması süreci için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Çalışmada tornalama sürecinde kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği ile ilişkili olan takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü gibi bağımlı değişkenleri modelleyen Tepki Yüzeyi Yöntemi ve merkezi bileşik tasarım kullanılmıştır. Takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünün analizi için ise, doğrusal modeller uydurulmuştur.

Davim ve Figueira (2007), 62 HRC sertliğine sahip AISI D2 çeliğinin seramik takımlarla tornalanması sürecinde gerçekleştirilen deneyler için, ortogonal dizinlere dayanan bir plan yapılmışlardır. Çalışmada takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme basıncı üzerinde etkili olan faktörler belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta, takım aşınması üzerinde en büyük etkiye sahip faktörün kesme hızı, en küçük etkiye sahip faktörün ise kesme zamanı olduğu görülmüştür. Kesme zamanının, yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen faktör olduğu, ilerlemenin ise, daha küçük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şahin ve Motorcu (2008), 484 HV'ye sertleştirilmiş orta karbonlu çeliğin karışık alumina seramik (KY1615) ve kaplanmış alumina seramik takımlarla (KY4400) tornalanması sürecinde kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki için, Tepki Yüzeyi Yöntemi ile bir model geliştirilmesini amaçlamışlardır. Geliştirilen modelden, ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili faktör olduğu, KY4400 kesici takımların kullanıldığı durumda, kesme hızı ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde küçük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri KY1615 kullanılması durumunda 0,926  $\mu\text{m}$  ve KY4400 kullanılması durumunda ise 1,089  $\mu\text{m}$  olarak bulunmuştur.

Çakır, Ensarioğlu ve Demirayak (2009), kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği) ve iki farklı kesici takım kaplama tabakasının, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini gerçekleştirdikleri tornalama deneylerinden elde ettikleri verilere bir regresyon modeli uydurarak incelemişlerdir. Söz konusu deneylerde, AISI P20 soğuk iş takım çeliği, TiCN ve TiAlN kaplama tabakalarına sahip CNMG 120408 karbür uçlarla aynı kesme koşullarında işlenmiştir. Sonuçta ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu, kesme hızının da bu parametreyi izlediği görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerlemenin pozitif, kesme hızının negatif etkiye sahip olduğu ve talaş derinliğinin ise anlamlı bir etkisi olmadığı gözlenmiştir.

Gaitonde ve diğerleri (2009), kesme koşulları ile (kesme hızı, ilerleme ve işleme zamanı) işlenebilirlik (işleme kuvveti, güç, özgül kesme kuvveti), yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. AISI D2 soğuk iş çeliğinin CC650WG silici seramik uçlar ile tornalanması sürecinde, süreç parametrelerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri, Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğünün minimize edilebilmesi için düşük ilerleme, daha az işleme zamanı ve yüksek kesme hızı kombinasyonunun gerekli olduğu ve takım ömrünün, ilerlemenin tüm değerleri için 150 m/min değerinde maksimum olacağı görülmüştür.

Kahraman (2009), çalışmasında AISI 4140 çeliğinin tornalanması sürecinde, merkezi bileşik tasarım ile Tepki Yüzeyi Yöntemini kullanmıştır. Kesme koşulları (kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği) ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkinin tahmini ve analizinde kuadratik model geliştirilmiştir. İstatistiksel analizler, kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en önemli etkiler olduğunu göstermiştir.

Seeman ve diğerleri (2010), %20 homojenize edilmiş alüminyum-metal matris kompozit malzemelerin işlenebilirliğini değerlendirmişlerdir. Kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği ve işleme zamanını içeren dört işleme parametresinin, iki temel performans karakteristiği olan, serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki kombine etkisi Tepki Yüzeyi Yöntemi ile araştırılmış ve süreç parametreleri çekicilik fonksiyonu yardımıyla optimize edilmiştir. Model bulgularından, kesme hızı ve ilerlemenin her iki performans karakteristiği üzerinde anlamlı etkileri olduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına göre, kesme hızının 50 m/dak, ilerlemenin 0,05 mm/dev, talaş derinliğinin 0,84 mm ve işleme zamanının 2,4 dak olduğu durumda, minimum aşınma 0,283 mm ve minimum yüzey pürüzlülüğü değeri 1,8075 µm olarak elde edilmiştir.

Aouici ve diğeri (2010), AISI H11 sıcak iş çeliğinin CBN takımlarla tornalanması işleminde, kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği) kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini Tepki Yüzeyi Yöntemi ve çeşitli grafiksel tekniklerle araştırmışlardır. Tornalama işlemi, kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, yüzey pürüzlülüğünün ilerlemedeki değişimler karşısında çok hassas olduğu görülmüştür. Tepki Yüzeyi Yönteminin, her bir işleme değişkeninin teknolojik parametrelerin değerleri üzerinde etkisini araştırmada, üstünlüğe sahip bir metodoloji olduğu anlaşılmıştır. Takım aşınması modelinde, kesme hızının en önemli ve ilerlemenin de ikincil derecede önemli faktör olduğu sonucu elde edilmiştir.

Neşeli, Yıldız ve Türkeş (2011), AISI 1040 çeliğinin tornalanması sürecinde, takım geometrisinin (köşe radyüsü, yanaşma açısı, talaş açısı) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini Tepki Yüzeyi Yöntemi ile modellemeye çalışmışlardır. Kuru kesme koşullarında uygulanan deneylerin analiz edilmesi sonucunda, takım köşe radyüsünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en anlamlı faktör olduğu görülmüştür. Ayrıca, söz konusu modelinin ölçülen ve tahmin edilen değerleri arasındaki uyumun iyi olduğu gözlenmiştir.

Abhang ve Hameedullah (2011), En-31 çeliğinin tornalanması sürecinde, Tepki Yüzeyi Yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği, köşe radyüsü ve kesme sıvısı konsantrasyonu ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkinin analizini yapmış ve deneysel verileri kullanarak, yüzey pürüzlülüğü tahmin modelleri geliştirmişlerdir. Analizler sonucunda, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en anlamlı faktörün ilerleme olduğu ve bu faktörü kesme hızı ve talaş derinliğinin izlediği belirlenmiştir.

George E. P. Box'un entelektüel liderliğini yaptığı ve ilk olarak kimya endüstrisinde uygulanan bu metodoloji, son 30 yıl içinde yarı iletkenler ve elektronik imalat sanayi, talaşlı imalat sanayi, metal kesme ve montaj süreçleri gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kapsamlı bir biçimde uygulama olanağı bulmaktadır. Özellikle son dönemlerde geliştirilen deneysel tasarım ve optimizasyon tekniklerini bünyesinde barındıran birçok istatistiksel yazılım da, söz konusu tekniğin uygulanmasına önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

## **B. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ ve KALİTE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Temelde kalite iyileştirme, Tepki Yüzeyi Metodolojisi'nin kullanılması vasıtasıyla değişkenliğin azaltılması, ürün ve süreç performansının geliştirilmesi amaçlarına hizmet

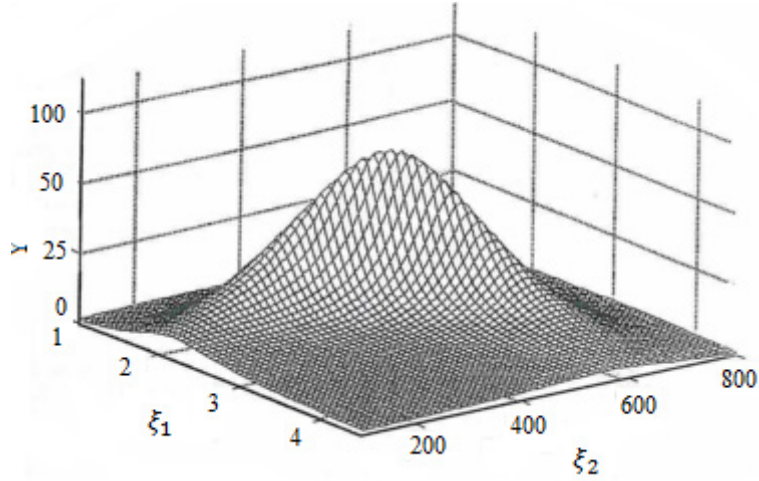
etmektedir. Endüstriyel organizasyonlar için son yıllarda kalite iyileştirme konusu, üzerinde durulan son derece önemli bir konu haline gelmiştir. Ürün ve süreç geliştirme döngüsü içinde oldukça etkili olan kalite iyileştirme sürecinde, istatistiksel süreç kontrolü ve deney tasarımı tekniklerini de içeren istatistiksel yöntemler anahtar rol oynamaktadır. Yarı iletkenler ve elektronik, uzay, otomotiv, biyoteknoloji ve farmasötikal, tıbbi cihazlar, kimya endüstrisi gibi birçok alanda deneysel tasarım metodolojisinin uygulanması yoluyla, üretimde güvenilirlik ve performansın artırılarak müşteri gereksinimlerinin daha etkin bir biçimde karşılanması sağlanabilmektedir.

Bu bağlamda deneysel tasarımın önemli bir branşı olarak nitelendirilen Tepki Yüzeyi Metodolojisi, yeni bir ürün veya sürecin tasarımı ve geliştirilmesinde, performansın optimize edilmesinde kullanılmak üzere birçok personelin takım halinde çalışabildiği önemli bir katılımcı mühendislik aracı (concurrent engineering tool) olarak kullanılır (Myers – Montgomery, 2002: 14).

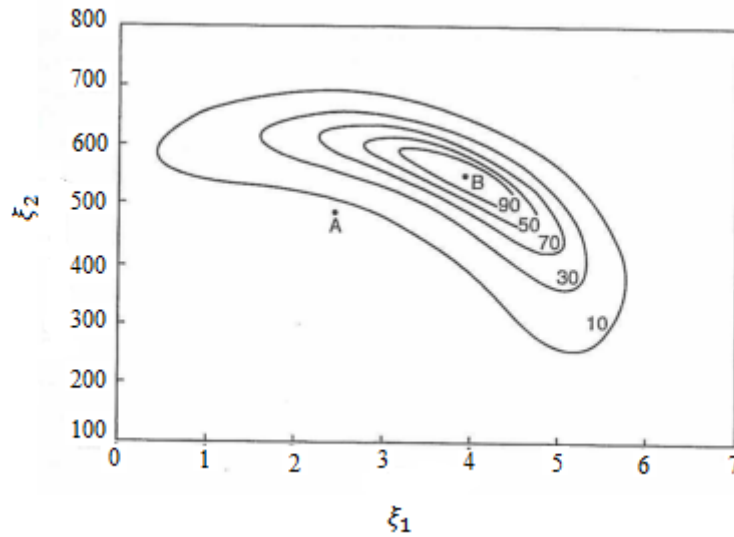
### **C. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ'NDE MODELLEME YAKLAŞIMI**

Bir tepki değişkeni ile girdi değişkenleri arasındaki ilişki grafiksel olarak Şekil 3.1'deki gibi gösterilebilir. Şekil incelendiğinde  $\xi_1$  ve  $\xi_2$  girdi değişkenlerinin her bir değerine karşılık gelen y tepki değişkeninin değerlerini görmek mümkündür. Bu grafiksel perspektif, Tepki Yüzeyi Metodolojisi kavramının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu gösterimin yanında kontur grafiği (contour plot) olarak adlandırılan ve Şekil 3.2'de verilen iki boyutlu uzayda, eş yükselti eğrilerinden meydana gelen bir gösterim şekli de literatürde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.





**Şekil 3.1. Bir Teorik Tepki Yüzeyi (Kaynak: Myers – Montgomery, 2002, s. 2)**



**Şekil 3.2. Bir Teorik Tepki Yüzeyinin Kontur Grafiği (Kaynak: Myers – Montgomery, 2002, s. 2)**

Bir ürün, süreç veya sistemin tepkisi  $y$ 'nin, kontrol edilebilen  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  girdi değişkenlerine bağlı olması durumunda bunlar arasındaki mevcut ilişki

$$y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Söz konusu denklemden, bilinmeyen gerçek tepki fonksiyonu karmaşık olabilir ve  $\varepsilon$  söz konusu fonksiyondaki diğer değişkenlik kaynaklarını temsil eder. Tepkinin ölçüm hatasını, süreç veya sistemin doğasında var olan diğer hata kaynaklarını da

içeren istatistiksel hata terimi  $\varepsilon$ 'nin sıfır ortalama ve  $\sigma^2$  varyans ile bir normal dağılıma sahip olduğu varsayılır. Bu durumda

$$\begin{aligned} E(y) &\equiv \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) \\ &= f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \end{aligned} \quad (3.2)$$

ifadesi geçerlidir.

Tepki yüzeyi metodolojisinde, denklem (3.1)'deki doğal değişkenler  $x_1, x_2, \dots, x_k$  gibi kodlanmış değişkenlere dönüştürülerek kullanıldığında denklem (3.2) tepki fonksiyonu

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3.3)$$

şekline dönüşür. Tepki yüzeyi metodolojisinde tepki fonksiyonunun formu bilinmediğinden, tepki ile girdi değişkenleri arasındaki ilişki için bir yaklaşım geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, genellikle girdi değişkeni uzayının ilgili küçük bir bölgesinde düşük dereceli bir polinomial yaklaşımı ifade eder. Tepki, girdi değişkenlerinin doğrusal bir fonksiyonu yardımıyla iyi bir biçimde modellenebiliyorsa, söz konusu yaklaşım fonksiyonu

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (3.4)$$

şeklinde birinci dereceden bir modeldir. Sistemde bir eğrisellik bulunması durumunda ise

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \sum \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.5)$$

denklem (3.5)'de verilen ikinci dereceden bir model gibi daha yüksek dereceli bir polinomialin kullanılması gerekmektedir.

Bir tepki fonksiyonu  $f$  için genel bir yaklaşım polinomiali,  $x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}$  noktası etrafındaki bir Taylor serisi açılımına dayanmaktadır. Örneğin birinci dereceden bir model

$$f \cong f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{x=x_0} (x_1 - x_{10}) + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Big|_{x=x_0} (x_2 - x_{20}) + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_k} \Big|_{x=x_0} (x_k - x_{k0}) \quad (3.6)$$

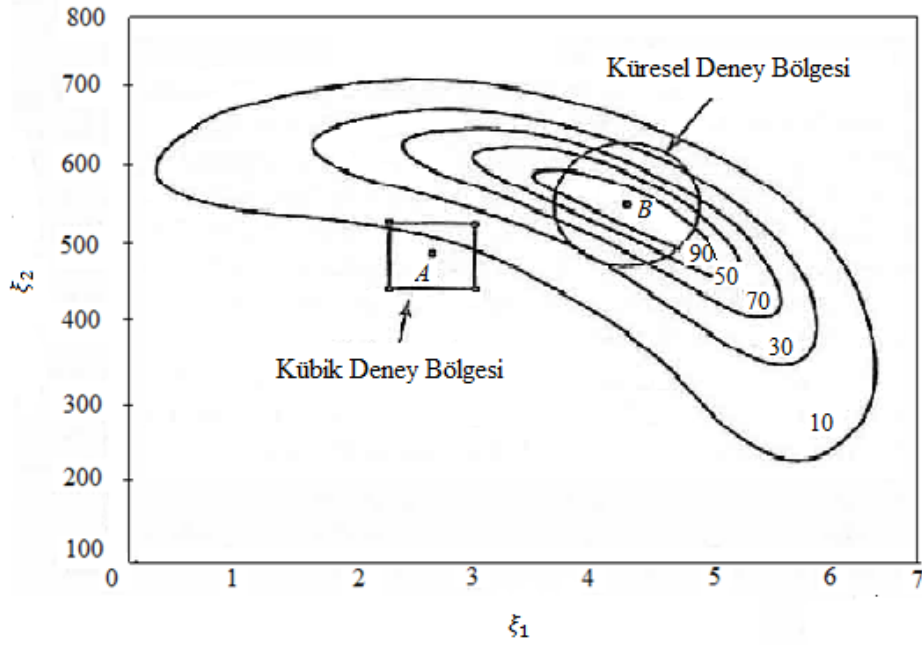
denklem (3.6)'da verilen  $x$ 'in bağımsız değişkenler vektörünü sembolize ettiği birinci dereceden bir Taylor serisi açılımından geliştirilir.

#### D. TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ'NİN ARDIŞIK YAPISI

Birçok tepki yüzeyi metodolojisi uygulamasının ardışık bir doğası vardır. İlk olarak, tepki yüzeyi çalışmalarında önemli olabilecek faktör veya değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu işlem, genellikle bu faktörlerin araştırılarak önemsiz olanların elenmesi için bir deney tasarlanması yoluyla yapılır. İzleme deneyleri (screening experiment) olarak adlandırılan bu deneyler aracılığı ile, tepkiyi açıklamada önemli olduğu düşünülen uzun faktör listesi kısaltılarak, sonraki aşamalarda yapılacak deneylerin daha az test ve deneme ile daha etkin olması sağlanır. Söz konusu deneylerin bu aşaması, tepki yüzeyi çalışmalarının “*sıfırinci aşaması*” olarak adlandırılır (Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009: 7).

Önemli faktörlerin belirlenmesinin ardından tepki yüzeyi çalışmalarının “*birinci aşamasına*” geçilir. Bu aşamada deneyi yapan araştırmacının amacı, bağımsız değişkenlerin mevcut düzeylerinin, tepkinin optimum değerinin yakınlarında veya sürecin optimumdan uzak bir bölgede olup olmadığına karar vermektir. Bağımsız değişkenlerin mevcut düzeyleri optimum performansı sağlamaktan uzak ise, araştırmacı süreci optimuma taşımak amacıyla süreç değişkenlerini ayarlamalıdır. Bu aşama, birinci derece bir modelin ve en dik artış yöntemi olarak adlandırılan optimizasyon tekniğinin kullanıldığı aşamadır.

Süreç optimuma yaklaştığında ise, tepki yüzeyi çalışmasının “*ikinci aşaması*” başlar. Bu noktada araştırmacı, genellikle optimum civarında küçük bir bölgede gerçek tepki fonksiyonuna doğru bir biçimde yaklaşacak olan bir model kurmak isteyecektir. Gerçek tepki yüzeyi, genellikle optimum civarında bir eğrisellik sergileyeceğinden bir ikinci dereceden veya belki de daha yüksek dereceden bir polinomial kullanılacaktır. Uygun bir yaklaşım modeli elde edildiğinde bu model, süreç için optimum koşulların belirlenmesi amacıyla çeşitli analiz teknikleri yardımıyla analiz edilebilir.



**Şekil 3.3. İşletilebilir Bölge ve Deney Bölgesi (Kaynak: Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009, s. 7)**

Söz konusu ardışık deneysel süreç, işletilebilir bölge (operability region) olarak adlandırılan bağımsız değişkenler uzayındaki bir bölgede uygulanmaktadır. Bu işletilebilir bölgenin tamamının, tek bir deneyden elde edilen sonuçlar ile keşfedilmesi beklenemez. Bunun yerine, Şekil 3.3’de görüldüğü gibi işletilebilir bölge içinde A noktası civarında daha küçük bir ilgi bölgesi veya deney bölgesi belirlenir. Bu bölge, şekilden de görüleceği gibi A noktası etrafındaki gibi kübik bir bölge olabileceği gibi, B noktası civarındaki gibi küresel bir bölge de olabilir. Sözü edilen şekilden de görülebileceği gibi tepki yüzeyi metodolojisi, tepenin en yüksek seviyesinin maksimum tepki noktasını temsil etmesi durumunda “*bir tepeye tırmanma*”, gerçek optimumun bir minimum tepki noktasını temsil etmesi durumunda ise “*bir vadiye inme*” olarak düşünülebilir (Montgomery, 2001a: 642).

Tepki yüzeyi metodolojisinin ardışık doğası, araştırmacının süreç veya sistem hakkında araştırma yapmasını sağlar. Bu sayede araştırmacı ne kadar tekrar gerekli olduğu, optimum bölgenin konumu, gereken yaklaşım fonksiyonunun tipi, uygun deneysel tasarımın seçimi, tepki veya süreç değişkenleri üzerinde transformasyonun gerekli olup olmadığı gibi soruların yanıtlarını bulabilir (Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009: 8). Söz konusu metodolojinin nihai amacı, sistem için optimum işletim koşullarını veya işletim spesifikasyonlarını tatmin eden faktör uzayı bölgesini belirlemektir. Bu

yöntemde optimum kelimesi özel bir anlamda kullanılmakta olup tepeye tırmanma prosedürü sadece lokal bir optimuma kavuşma güvencesi verir.

## II. TEPKİ YÜZEYİ TASARIMLARI ve MODELLERİ

Tepki yüzeyi metodolojisinde modelleme yaklaşımı başlığı altında tepki ve girdi değişkenleri arasındaki ilişkinin denklem (3.5) ile verildiği gibi,

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j$$

şeklinde tanımlanabileceğinden söz edilmişti. Bu denklem matris notasyonu ile,

$$\eta(x) = x_s' \beta \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilir.  $x = [x_1, x_2, \dots, x_k]'$  ifadesi  $k \times 1$  boyutlu bir vektör olmak üzere

$$x_s = [1, x_1, x_2, \dots, x_k, x_1^2, x_2^2, \dots, x_k^2, \dots, x_1 x_2, x_1 x_3, \dots, x_{k-1} x_k]'$$

$m \times 1$  boyutlu bir vektör ve  $m = (k+1)(k+2)/2$  olmak üzere,  $\beta$  regresyon katsayılarına denk gelen  $m \times 1$  boyutlu bir sütun vektörüdür. Polinomialin katsayıları,

$$y_u = \eta(x_u) + \varepsilon_u \quad u = 1, 2, \dots, N \quad (3.9)$$

gözlemler,  $x$  değişkenlerinin  $N$  adet seçilmiş kombinasyonundan elde edilerek ve tepki değişkeninin gözlem değerleri kullanılarak, en küçük kareler metodu ile tahmin edilebilir.  $\varepsilon_u$ 'ların sıfır ortalama ve  $\sigma^2$  sabit varyansa sahip ve korelasyonsuz rassal hatalar olduğu varsayılmaktadır. Bu durumda,  $\beta$ 'lar en küçük kareler metoduyla tahmin edilebilir.  $X$  matrisi tasarım noktalarından alınan  $x_s$  değerlerini içeren  $N \times m$  boyutlu bir matris

$$b = (X'X)^{-1} X'y \quad (3.10)$$

ve  $y$  ise,  $y$  gözlem değerlerinin  $N \times 1$  boyutlu bir vektörünü ifade etmektedir. Uydurulan denklem

$$\hat{y}(x) = x_s' b \quad (3.11)$$

biçiminde gösterildiğinde, tahmin edilen tepkinin varyansı

$$Var[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x_s' (X'X)^{-1} x_s \quad (3.12)$$

şeklindedir.

### A. TEPKİ YÜZEYİ TASARIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Tepki yüzeyi deneysel tasarımlarının, sahip olması istenen bir takım özellikleri vardır. Bunlar arasında döndürülebilirlik (rotatability) ve ortogonalite (orthogonality) özellikleri oldukça ilginç ve önemli özellikler arasındadır. Bir ortogonal tasarım,  $X'X$  matrisinin bir köşegen matris olması durumunda söz konusudur.  $X = [1, x_1, x_2, \dots, x_k]$  vektöründe  $x_j$ ,  $X$  vektörünün  $j$ . sütun değerini göstermek üzere birinci dereceden ortogonal bir tasarım tüm  $i \neq j$  için  $x_i' x_j = 0$ 'dır ve  $j = 1, 2, \dots, k$  için  $1' x_j = 0$ 'dır. Bu ifadeden iki sütunun ortogonal olması durumunda, bu iki sütuna karşı gelen değişkenlerin doğrusal olarak bağımsız oldukları anlaşılmaktadır. Bu da, iki değişkenin birbirlerinden bağımsız olarak değerlendirilmesi anlamına gelir.

Döndürülebilirlik kavramı ilk olarak, Box ve Hunter (1957) tarafından tanıtılmış ve Myers (1976) tarafından detaylı bir biçimde açıklanmıştır (Park, 2006: 411). Denklem (3.12) ile verilen tahmin varyansı  $Var[\hat{y}(x)]$ 'nin, sadece tasarım merkezinden  $x$  noktasına  $\rho = (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_k^2)^{1/2}$  uzaklığının bir fonksiyonu olması durumunda, söz konusu tasarımın döndürülebilir bir tasarım olduğu söylenir. Böylece döndürülebilir bir tasarımda tahmin varyansı  $Var[\hat{y}(x)]$ , tasarım merkezinden eşit uzaklıkta bulunan tüm  $x$  noktalarında aynı olur.

Tasarım momentlerinin değerlerinin seçimi yoluyla, deneysel tasarımların birçok özelliği sayılabilir. Söz konusu kavram, olasılık teorisinin dağılımlarının momentlerine çok benzerdir. Tasarım matrisi,

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{k1} \\ x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{1N} & x_{2N} & \cdots & x_{kN} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

olmak üzere ilgili momentler,

$$\begin{aligned} [i] &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} & [ii] &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 & [ij] &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \\ [iii] &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^3 & [ijj] &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 x_{ju}^2 & [iii] &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^4 \end{aligned} \quad \text{vs.} \quad (3.14)$$

şeklindedir. Bu momentler, k boyutlu tasarım uzayında dağılan tasarım noktalarının biçimini karakterize eder. Bir bakıma tasarım momentleri, oldukça önemli bir nokta olan tasarım geometrisini betimlemeye yardımcı olur. Söz konusu tasarım momentleri tasarımın “*moment matrisi*”

$$N^{-1}(X'X) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & [11] & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & [22] & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & & & [kk] \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

olarak adlandırılan  $N^{-1}(X'X)$  matrisinden gelmektedir. Tasarım momentleri, birinci derece tasarımlar için önemli bir özellik olan ortogonalite özelliğinin de anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.  $(X'X)$  matrisinin köşegen bir matris olması durumunda birinci derece bir tasarımın ortogonal olduğu söylenir. Bu tasarım matrisinden elde edilen tüm  $i \neq j$  için,  $[ij] = 0$  ve  $[i] = 0$  koşulu sağlandığında tasarımın ortogonal olduğu bilinir.

Birinci derece bir model için döndürülebilir bir tasarım, sadece ikinci dereceye kadar olan tek (odd) momentlerin sıfır ve saf (pure) ikinci momentlerin hepsinin eşit olması durumunda söz konusudur. Bir diğer ifadeyle;

$$\begin{aligned}
[i] &= 0 & (i = 1, 2, \dots, k) \\
[ij] &= 0 & (i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, k) \\
[ii] &= \lambda_2 & (i = 1, 2, \dots, k)
\end{aligned} \tag{3. 16}$$

şeklindeki eşitliklerin geçerli olmasıdır.  $\lambda_2$  'nin sayısal değeri tasarımın ölçeklendirilmesi ile belirlenir. İkinci derece bir model söz konusu olduğunda ise, denklem (3. 14)'de  $[ii]$  saf ikinci derece momentleri,  $[iiii]$  saf dördüncü derece momentleri ve  $[ijj]$  karma dördüncü derece momentleri ifade etmek üzere, döndürülebilir bir tasarım için gerekli ve yeterli şartlar:

- i) Dördüncü dereceden momente kadar bütün tek dereceli momentlerin sıfır olması
- ii)  $[iiii] = 3[ijj]$  tüm  $i \neq j$  için

şeklindedir.

Tepki yüzeyi tasarımlarının, ortogonallik ve döndürülebilirlik özellikleri dışında, sahip olması istenen diğer bir takım nitelikleri de bulunmaktadır. Bu özellikler Box ve Draper (2007), Myers – Montgomery – Anderson-Cook (2009) ve Montgomery (2001b)'de aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

1. İlgilenilen bölgede veri noktalarının kabul edilebilir bir dağılımını sağlamalıdır.
2. Modeldeki uyum yetersizliğini araştırmaya olanak vermelidir.
3. Deneilerin bloklarda uygulanmasına imkan vermelidir.
4. Daha yüksek dereceli tasarımların ardışık bir biçimde kurulmasına imkan vermelidir.
5. Hatanın içsel bir tahminini sağlamalıdır.
6. Model katsayılarının kesin bir tahminini sağlamalıdır.
7. Homojen varyans varsayımının kontrolüne imkan vermelidir.
8. Aykırı ve kayıp değerlerin varlığına karşı duyarsız olmalıdır.
9. Maliyet etkin olmalıdır, diğer bir ifadeyle çok sayıda deneme gerektirmemelidir.



10. Bağımsız değişkenlerin düzey sayılarının çok fazla olmasını gerektirmemelidir.
11. Yapılacak hesaplamaların basitleştirilmesine imkan sağlamalıdır.
12. Tasarım seviyelerinin kontrolündeki hatalara karşı duyarsız olmalıdır.
13. Deneysel bölgede tahmin varyansı  $Var[\hat{y}(x)] / \sigma^2$  'nin dağılımının iyi olmasına imkan vermelidir.
14. Transformasyonların tahminlerine imkan vermelidir.

## B. BİRİNCİ DERECE MODELLER ve TASARIMLARI

Bir sistem veya süreçle ilgili bir bilimsel veya teknik araştırmada girdi değişkenleri veya süreç değişkenleri olarak da adlandırılabilen girdi faktörlerinin  $X_1, X_2, \dots, X_k$  ve bunlara bağlı olan tepki değişkeninin  $y$  olduğu varsayılan ilişki

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (3. 17)$$

şeklinde modellenebilir. Burada gerçek tepki fonksiyonu  $f$  'in şekli bilinmemekte ve  $\varepsilon$ ,  $f$  tarafından açıklanamayan değişkenlik kaynağını temsil eden 0 ortalama ve  $\sigma^2$  varyansa sahip olan hata terimini ifade etmektedir.  $X_i$  'ler girdi değişkenlerinin dakika, derece veya miligram gibi orijinal ölçeklerinde ifade edilmiştir. Regresyon analizinde olduğu gibi  $X$  'leri hesaplamalara daha elverişli ölçü biriminden arınmış, 0 ortalama ve aynı varyansa sahip olan  $x_1, x_2, \dots, x_k$  kodlanmış değişkenlerine dönüştürmek mümkündür. Bu dönüşüm yapıldığında, kodlanmış değişkenlerle denklem (3. 17) yeniden (3. 18) olarak ifade edilebilir.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (3. 18)$$

Söz konusu denklemde tepki değişkeni  $y$  ve  $x_i$  'ler arasındaki ilişki, bir bölge üzerinde uzanan bir yüzey şeklinde grafiksel olarak betimlenebileceğinden, bu ilişkinin araştırılması tepki yüzeyi araştırması adını almaktadır.

Genellikle bir araştırmanın amacı, istenen bir değere ulaşmak için tepkiyi maksimize veya minimize etmektir.  $f$  fonksiyonu bilinmediğinden ve  $y$  değişkeni rassal hata ile gözlendiğinden,  $f$  hakkındaki verileri elde etmek için deneylerin gerçekleştirilmesi

gerekmektedir. Tepki yüzeyi metodolojisi bu amaçlara ulaşmak için deney, modelleme, veri analizi ve optimizasyonu içeren bir stratejidir.

Bir tepki yüzeyi araştırmasının başlangıcında, birçok faktörün önemi göz ardı edilemiyorsa, önemsiz olan faktörleri elemek için bir izleme deneyi yapılmalıdır. Böyle bir deneyde  $2^{k-p}$ ,  $3^{k-p}$  gibi yüksek dereceli kesirli tasarımlar, Plackett-Burman tasarımları ve düzensiz ortogonal dizinler gibi tasarımlar kullanılmaktadır. Şayet, çalışmanın başlangıcında faktör sayısı az ise, bir izleme deneyinin yapılması zorunlu değildir (Wu – Hamada, 2009: 462).

Az sayıda önemli faktör tanımlandığında, sonraki deneyler daha az deneme gerektirecek ve daha etkili bir biçimde gerçekleştirilebilecektir. Bundan sonra, araştırma iki aşamaya ayrılabilir. İlk aşamada temel amaç, mevcut koşullar ve girdi faktörlerinin düzeylerinin tepki yüzeyinin optimumuna (maksimum veya minimum) yakın veya uzak olduğunu belirlemektir. Deneysel bölge tepki yüzeyinin optimum bölgesinden uzak olduğunda, yüzeye bir birinci dereceden yaklaşım yeterlidir ve aşağıda verilen  $\beta_i$  katsayılarının kodlanmış  $x_i$  değişkenlerinin eğim veya doğrusal etkisini temsil ettiği birinci dereceden model kullanılabilir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (3. 19)$$

Bir tasarım veya deney, denklem (3. 19)'daki katsayıların tahmin edilmesine olanak veriyorsa, sırasıyla birinci dereceden bir tasarım veya birinci dereceden bir deney olarak adlandırılır. Birinci derece ortogonal tasarımlar sınıfındaki tasarımlar,  $2^k$  Faktöriyel tasarımlar ve bazı  $2^k$  Kesirli faktöriyel tasarımlar ( $2^{k-1}$  ve  $2^{k-2}$ ), Simpleks tasarımlar ve Plackett-Burman tasarımlarıdır (Cornell, 1990: 42).

### 1. İki Faktörlü Faktöriyel Deneyler

Faktöriyel deneyler, faktörlerin düzeylerinin tüm olası kombinasyonlarının gerçekleştirildiği deneylerdir. A ve B faktörlerinin sırasıyla a ve b düzey sayılarına sahip olduğu varsayıldığında, her bir tekrar  $ab$  deneme kombinasyonlarının tümünü içerecektir. Böyle bir tasarım Tablo 3. 1'de gösterilmektedir. Sözü edilen deneyde  $n$  tekrar yapıldığında ise, her bir tekrar tüm  $ab$  deneme kombinasyonlarını içerecektir.

**Tablo 3.1. İki Faktörlü Faktöriyel Tasarım için Veri Düzenlemesi**

		Faktör B				Toplam	Ortalamalar
		1	2	...	b		
Faktör A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$		$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots, y_{1bn}$	$y_{1...}$	$\bar{y}_{1...}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$		$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots, y_{2bn}$	$y_{2...}$	$\bar{y}_{2...}$
	⋮						
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots, y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots, y_{a2n}$		$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots, y_{abn}$	$y_{a...}$	$\bar{y}_{a...}$
Toplam		$y_{.1}$	$y_{.2}$		$y_{.b}$	$y_{...}$	
Ortalamalar		$\bar{y}_{.1}$	$\bar{y}_{.2}$		$\bar{y}_{.b}$		$\bar{y}_{...}$

(Kaynak: Montgomery — Runger, 2003, s. 510)

Tablo 3.1’de  $k$ . tekrar için  $ij$ . hücredeki gözlem,  $y_{ijk}$  ile gösterilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken  $abn$  inceleme rassal sıra ile çalıştırılacaktır. Böylece, iki faktörlü faktöriyel tamamen rassallaştırılmış bir tasarım oluşturulmuş olacaktır. Deneyden elde edilen gözlemler denklem (3. 20) ile gösterildiği gibi doğrusal istatistiksel bir model olarak ifade edilebilir.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3. 20)$$

Söz konusu denklemde  $\mu$  genel ortalama etkiyi,  $\tau_i$  A faktörünün  $i$ . düzeyinin etkisini,  $\beta_j$  B faktörünün  $j$ . düzeyinin etkisini,  $(\tau\beta)_{ij}$  A ve B arasındaki etkileşim etkisini ve  $\epsilon_{ijk}$  0 ortalama ve  $\sigma^2$  varyansla normal dağılan rassal hata terimini göstermektedir. Söz konusu deneylerde, faktörlerin ana etkilerinin veya etkileşim etkisinin anlamlılığının sınıandığı hipotez testleri oldukça önemlidir. Bu hipotezlerin sınanmasında tek faktörlü deneylerde olduğu gibi varyans analizi (ANOVA) kullanılmakta olup iki faktör olması durumunda, bu test prosedürü iki yönlü varyans analizi olarak adlandırılmaktadır.

### a. Sabit etkiler modelinin istatistiksel analizi

A ve B faktörlerinin sabit olduğu yani, özellikle A faktörünün  $a$  tane düzeyi ve B faktörünün  $b$  tane düzeyinin deneyi yapan araştırmacı tarafından seçildiği varsayılmaktadır. Modelde genel olarak, aşağıdaki denklemlerde de ifade edildiği gibi bütün etkiler ortalamadan sapmalar olarak tanımlanır.

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0, \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0, \quad \sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = 0, \quad \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0 \quad (3.21)$$

Tablo 3.1 incelendiğinde  $y_{i..}$  A faktörünün  $i$ . düzeyindeki gözlemler toplamını,  $y_{.j}$  B faktörünün  $j$ . düzeyindeki gözlemler toplamını,  $y_{ij}$   $ij$ . hücredeki gözlemler toplamını,  $y_{...}$  tüm gözlemlerin genel toplamını göstermektedir. Bu ifadelerin matematiksel olarak açılımı denklem (3.22)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} y_{i..} &= \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{i..} &= \frac{y_{i..}}{bn} & i &= 1, 2, \dots, a \\ y_{.j} &= \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{.j} &= \frac{y_{.j}}{an} & j &= 1, 2, \dots, b \\ y_{ij} &= \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{ij} &= \frac{y_{ij}}{n} & i &= 1, 2, \dots, a \\ & & & & j &= 1, 2, \dots, b \\ y_{...} &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} & \bar{y}_{...} &= \frac{y_{...}}{abn} & & \end{aligned} \quad (3.22)$$

Test edilecek söz konusu hipotezler denklem (3.23)'deki gibidir.

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (\text{A faktörünün düzeyleri arasında anlamlı bir fark yoktur})$$

$$H_1 : \text{En az bir } \tau_i \neq 0 \quad (\text{A faktörünün düzeyleri arasında anlamlı bir fark vardır})$$

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \quad (\text{B faktörünün düzeyleri arasında anlamlı bir fark yoktur})$$

$$H_1 : \text{En az bir } \beta_i \neq 0 \quad (\text{B faktörünün düzeyleri arasında anlamlı bir fark vardır})$$

$$H_0 : (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ab} = 0 \quad (\text{AB etkileşiminin düzeyleri arasında anlamlı bir fark yoktur})$$

$$H_1 : \text{En az bir } (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \quad (\text{AB etkileşiminin düzeyleri arasında anlamlı bir fark vardır})$$

(3.23)

Varyans analizi, toplam değişkenliği bileşenlerine ayırarak denklem (3.23)'de verilen hipotezleri test eder. Toplam değişkenlik, gözlemlerin genel kareler toplamı ile ölçülür ve toplam kareler denklem (3.24)'deki gibi ayrıştırılır.

$$\begin{aligned}
 SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 &= bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 \\
 &+ an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \\
 &+ n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \\
 &+ \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Denklem (3.24)'de, ilk terim A faktörü için kareler toplamını, ikinci terim B faktörü için kareler toplamını, üçüncü terim AB etkileşimi için kareler toplamını ve son terim de hata kareler toplamını göstermektedir. Bu ifadeler, sembolik olarak denklem (3.25) ile ifade edilebilir.

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \tag{3.25}$$

A, B ve AB etkilerinin serbestlik dereceleri sırasıyla (a-1), (b-1) ve (a-1)(b-1)'dir. Her ab hücresinde n tekrar arasında n-1 serbestlik derecesi vardır. Bu değerlerden yola çıkılarak, hata için serbestlik derecesi ab(n-1) ve toplam serbestlik derecesi abn-1 olarak hesaplanır.

Denklem (3.25)'deki her bir kareler toplamı kendi serbestlik derecelerine oranlandığında, her bir bileşen için ortalama kareler toplamı elde edilmiş olur. Daha önce de ifade edildiği gibi, A ve B faktörleri sabit varsayıldığında, söz konusu ortalama karelerin beklenen değerleri izleyen Tablo 3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2. İki Faktörlü Faktöriyel Deney için Varyans Analizi Tablosu**

Değişkenlik Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	F o
A etkisi	$SS_A$	$(a-1)$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B etkisi	$SS_B$	$(b-1)$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
Etkileşim	$SS_{AB}$	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
Hata	$SS_E$	$ab(n-1)$		
Toplam	$SS_T$	$abn-1$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$	

(Kaynak: Montgomery – Runger, 2003, s. 514)

Tablo 3.2’de iki faktörlü faktöriyel deney durumunda, sabit etkiler modeli için varyans analizi tablosu verilmiştir. Fakat, uygulamada birçok model ikiden fazla faktör içermektedir. *A* faktörünün *a* tane düzeye, *B* faktörünün *b* tane düzeye, *C* faktörünün *c* tane düzeye sahip olduğu ve bu düzende devam edilen faktörlerin belirli düzeylere sahip olduğu bilinen faktöriyel deneylerde, *n* tekrar yapılması durumunda toplam *abc...n* gözlem elde edilecektir.

Örneğin üç faktörlü faktöriyel bir deney göz önüne alındığında, istatistiksel model aşağıdaki gibi ifade edilecektir.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, c \\ l = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)’dan görüldüğü üzere model üç ana etki, üç ikili faktör etkileşimi, bir üç faktörlü etkileşim ve bir sabit terimden meydana gelmektedir. *A*, *B* ve *C* faktörleri sabit faktörler olarak kabul edildiğinde, varyans analizi Tablo 3.3’deki gibi oluşturulabilir. Ana etkiler ve etkileşimler üzerindeki F testi, beklenen ortalama karelerden gidilerek hesaplanmaktadır. Bu oranlar, ilgili sıfır hipotezi altında F dağılımı izlemektedir.

**Tablo 3.3. Üç Faktörlü Sabit Etkiler Modeli için Varyans Analizi Tablosu**

Değişkenlik Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama Kare	Beklenen Ortalama Kareler	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>A</sub>	(a-1)	MS <sub>A</sub>	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS <sub>B</sub>	(b-1)	MS <sub>B</sub>	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_i^2}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS <sub>C</sub>	(c-1)	MS <sub>C</sub>	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c-1}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS <sub>AB</sub>	(a-1)(b-1)	MS <sub>AB</sub>	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ik}^2}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS <sub>AC</sub>	(a-1)(c-1)	MS <sub>AC</sub>	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS <sub>BC</sub>	(b-1)(c-1)	MS <sub>BC</sub>	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{ik}^2}{(b-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS <sub>ABC</sub>	(a-1)(b-1)(c-1)	MS <sub>ABC</sub>	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Hata Toplamı	SS <sub>E</sub> SS <sub>T</sub>	abc(n-1) abcn-1	MS <sub>E</sub>	$\sigma^2$	

(Kaynak: Montgomery – Runger, 2003, s. 521)

## 2. 2<sup>k</sup> Faktöriyel ve Kesirli Faktöriyel Tasarımlar

Faktöriyel tasarımlar birçok faktörün söz konusu olduğu deneylerde, tepki değişkeni üzerinde faktörlerin ortak etkisinin araştırılması durumunda kullanılan tasarımlardır. Ortak faktör etkisi, ana etkiler ve etkileşim etkisini içermektedir.

Bir faktörün düzeylerindeki değişim ile tepki üzerinde meydana getirdiği değişim etkisi “*ana etki*” olarak adlandırılmaktadır. Ana etki, araştırmanın esas faktörlerinin etkisine atıfta bulunmaktadır. Bazı deneylerde, bir faktörün düzeylerinin tepki üzerindeki farklılığının, diğer faktörlerin tüm düzeylerinde aynı olmadığı deneylerde etkileşimin varlığı söz konusudur. Bu durumda, gözlenen etki “*etkileşim etkisi*” olarak adlandırılır.

Genel faktöriyel tasarımların, araştırma çalışmalarında pratik olarak kullanılan önemli ve özel türleri mevcuttur. Bunların en önemlilerinden biri, her bir k adet faktörün iki düzeye sahip olduğu tasarımlardır. Söz konusu düzeyler, faktörün nitel veya nicel olmasına göre değişmekle beraber (0, 1), (1, 2), (-, +) veya (düşük, yüksek) şeklinde tanımlanabilir.

Bir faktöriyel deneyde, k faktörün mevcut olduğu ve faktör 1'in  $n_1$  düzeye, faktör 2'nin  $n_2$  düzeye ve faktör k'nın  $n_k$  düzeye sahip olduğu varsayıldığında, seçilen düzeylerin tüm kombinasyonları dikkate alınarak,  $n = n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$  adet deneme yapılması gerekmektedir. Aynı mantıkla,  $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$  gözlemin elde edilmesini gerekli kılan söz konusu tasarımlar " $2^k$  faktöriyel tasarımlar" olarak adlandırılır.

Bu tasarımlar hakkındaki varsayımlar: Faktörler sabittir, tasarımlar tamamen rassaldır ve normalite varsayımı sağlanmıştır şeklindedir. Bu tasarımlar, özellikle sistem hakkında çok fazla bilginin mevcut olmadığı araştırmanın deneme ve keşif aşamasında kullanılan faydalı tasarımlardır (Box – Draper, 1987: 107).

Tepki yüzeyi çalışmalarında oldukça önemli bir yeri olan  $2^k$  faktöriyel tasarımların, özellikle uygulandığı üç alan bulunmaktadır (Myers – Montgomery, 2002: 85).

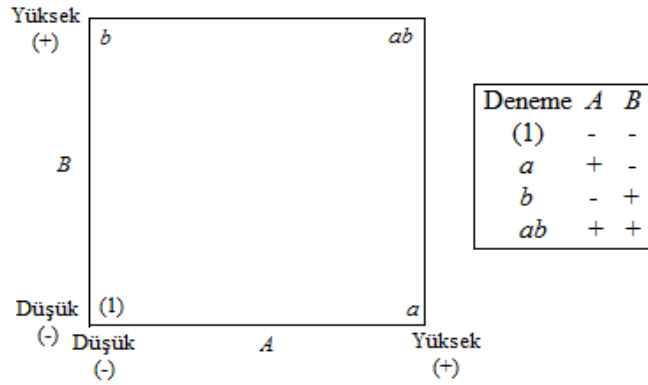
1. Bir  $2^k$  faktöriyel tasarım veya kesirli faktöriyel tasarım, tepki yüzeyi çalışmalarının başlangıcında önemli süreç veya sistem değişkenlerinin belirlenmesi amacıyla uygulanan, izleme deneylerinin gerçekleştirilmesi aşamasında oldukça yararlıdır.
2. Bir  $2^k$  faktöriyel tasarım, birinci dereceden bir tepki yüzeyi modelinin uydurulmasında ve en dik artış metodunun gerçekleştirilebilmesi için, gerekli faktör etkilerinin tahmininde sıklıkla kullanılmaktadır.
3. Bir  $2^k$  faktöriyel tasarım, diğer tepki yüzeyi tasarımlarının oluşturulmasında bir temel yapı işlevi görür.

#### a. $2^2$ faktöriyel tasarımlar

$2^k$  faktöriyel tasarımlar serisinin en basit türü olan  $2^2$  faktöriyel tasarımda, her biri iki düzeye sahip iki faktör göz önünde bulundurulur. İki düzeyli deneysel tasarımlarda, uzaysal olarak her bir uzaysal boyut bir faktörle ilişkili olmak üzere, faktör sayısının iki olması durumunda denemeler bir karenin köşeleri ile gösterilir. Denemeler faktör sayısının üç olması halinde, bir küpün köşeleri ile, faktör sayısının üçten büyük olduğu durumlarda ise, bir hiper küpün köşeleri ile betimlenir (Morris, 2011: 188).



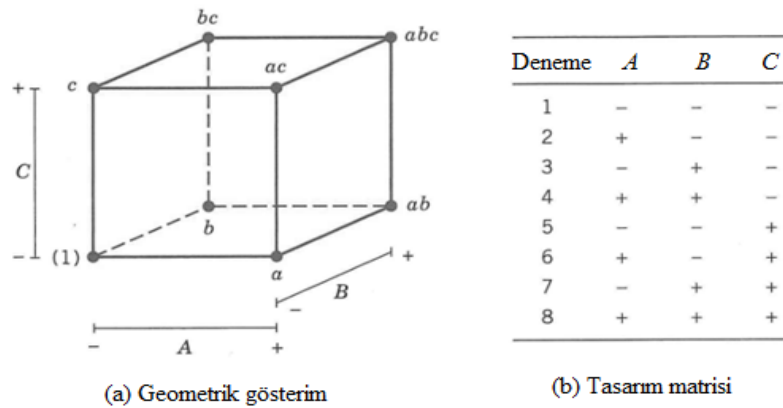
Bir  $2^2$  faktöriyel tasarımın ( $2^2 = 4$ ) çalıştırılması veya deneme kombinasyonu Şekil 3.4'deki gibi, geometrik olarak bir karenin köşeleri ile temsil edilebilir. Geometrik notasyon olarak adlandırılan ve Şekil 3.4'de verilen bu tasarımda, geleneksel tarza uygun olarak A ve B faktörlerinin düşük ve yüksek düzeyleri sırasıyla - ve + işaretleri ile gösterilir.



Şekil 3.4.  $2^2$  Faktöriyel Tasarım (Kaynak: Montgomery — Runger, 2003, s. 524)

### b. $2^3$ faktöriyel tasarımlar

$2^2$  faktöriyel tasarımları, her biri iki düzeye sahip üç faktörün bulunduğu  $2^3$  faktöriyel tasarımlara genişletmek mümkündür. Söz konusu tasarımda, her biri iki düzeyli faktörlerin A, B, ve C olduğu varsayıldığında, toplam sekiz deneme kombinasyonu geometrik olarak bir küp üzerinde Şekil 3.5'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.5.  $2^3$  Faktöriyel Tasarım (Kaynak: Montgomery — Runger, 2003, s. 530)

Ayrıca, söz konusu şekilde tasarım matrisi olarak adlandırılan tablonun her bir satırında, bir denemeye ait üç faktörün düşük ve yüksek düzeylerinin sırasıyla – ve + ile temsil edildiği sekiz deneme listelenmiştir. Bu tasarım üç adet ana etki (A, B ve C), üç adet ikili faktör etkileşimi (AB, AC ve BC) ve bir adet üçlü faktör etkileşiminin (ABC) tahmin edilmesine imkan vermektedir.

Ana etkiler kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Söz konusu tasarımda, n tekrarlı sekiz denemenin her biri, küçük harf notasyonu ile (1), a, b, ab, c, ac, bc, ve abc şeklinde temsil edilir. Şekil 3.5’den de görülebileceği gibi, A faktörüne ait ana etki, A faktörünün yüksek düzeyinin ( $\bar{y}_{A^+}$ ) bulunduğu küpün sağ tarafındaki dört deneme kombinasyonunun ortalamasından, A’nın düşük düzeyinin ( $\bar{y}_{A^-}$ ) bulunduğu küpün sol tarafındaki dört deneme kombinasyonunun ortalamasının farkı olarak tahmin edilebilir.

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-}$$

$$= \frac{a + ab + ac + abc}{4n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4n}$$
(3.20)

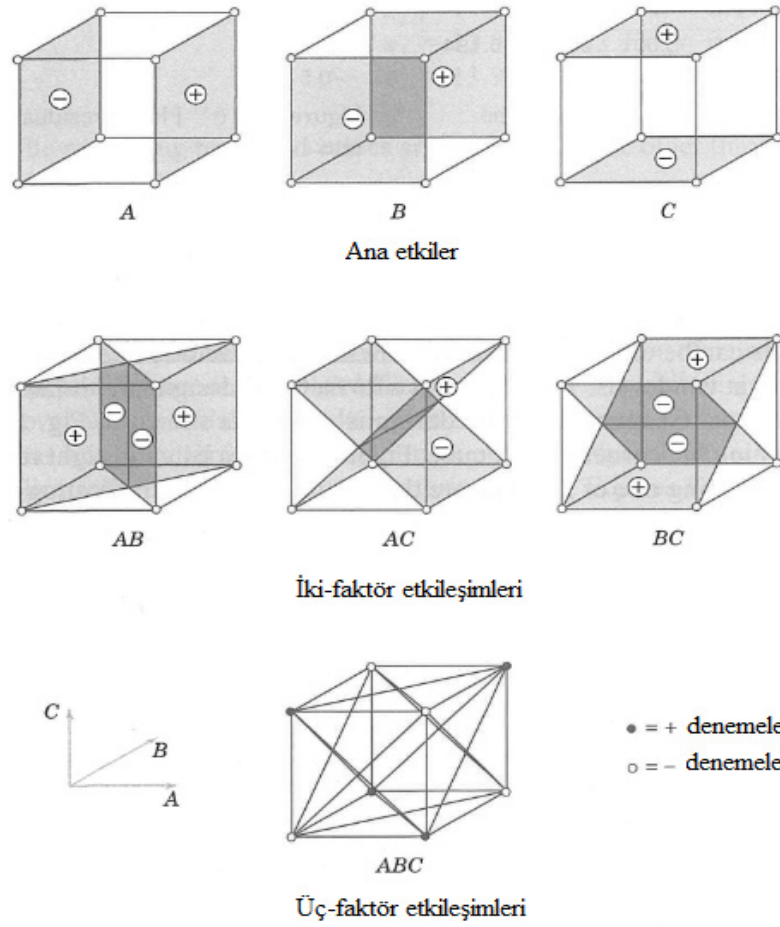
A faktörünün ana etkisini gösteren üstteki denklem (3.20), yeniden düzenlendiğinde denklem (3. 21) elde edilmiş olur.

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc]$$
(3. 21)

Benzer bir mantıkla B faktörünün de etkisi, Şekil 3. 5’deki küpün arka yüzündeki dört deneme kombinasyonunun ortalamasının, ön yüzündeki dört deneme kombinasyonunun ortalamasından farkı olarak denklem (3. 22)’deki gibi formüle edilir.

$$B = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-}$$

$$= \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac]$$
(3. 22)



**Şekil 3.6. Faktöriyel Tasarımda Ana Etkiler ve Etkileşimlerin Geometrik Gösterimi (Kaynak: Montgomery — Runger, 2003, s. 530)**

C faktörünün etkisi ise, söz konusu küpün üst yüzündeki dört deneme kombinasyonunun ortalamasının, alt yüzündeki dört deneme kombinasyonunun ortalamasından farkı alınarak denklem (3. 23)'deki gibi elde edilir.

$$C = \bar{y}_{c^+} - \bar{y}_{c^-}$$

$$= \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (3. 23)$$

İki faktörlü etkileşim etkilerinin de kolaylıkla hesaplanması mümkündür. AB etkileşim etkisi, B faktörünün iki düzeyinde A faktörünün ortalama etkileri arasındaki farkın bir ölçüsüdür.

B	Ortalama A Etkisi
Yüksek (+)	$\frac{[abc - bc] + (ab - b)}{2n}$
Düşük (-)	$\frac{\{[ac - c] + [a - (1)]\}}{2n}$
Fark	$\frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{2n}$

AB etkileşim etkisi, yukarıdaki tabloda sembolize edilen farkın yarısı olarak denklem (3. 24)'deki gibi ifade edilir.

$$AB = \frac{1}{4n} [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \quad (3. 24)$$

Denklemden AB etkileşiminin, Şekil 3.6'daki küpün iki köşegen düzlemindeki denemeler arasındaki ortalama fark olduğu anlaşılmaktadır. Benzer biçimde, AC ve BC etkileşimleri de denklem (3. 25) ve (3. 26) ile ifade edilebilir.

$$AC = \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (3. 25)$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (3. 26)$$

C faktörünün iki farklı düzeyi için AB etkileşim etkisinin ortalama farkı, ABC etkileşimi etkisi olarak tanımlanır ve denklem (3.27)'deki gibi gösterilebilir.

$$\begin{aligned} ABC &= \frac{1}{4n} \{[abc - bc] - [ac - c] - [ab - b] + [a - (1)]\} \\ &= \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] \end{aligned} \quad (3. 27)$$

Ana etkiler ve etkileşim etkilerinin formüle edildiği denklemlerde, köşeli parantezler içindeki ifadeler, deneme kombinasyonlarının kontrastları olarak adlandırılır. Bu kontrastlardan hareketle Tablo 3.4 oluşturulabilir.

**Tablo 3.4.  $2^3$  Tasarımında Hesaplanan Etkilerin Cebirsel İşaretleri**

Deneme Kombinasyonu	Faktöriyel Etki							
	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>	<i>C</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
(I)	+	-	-	+	-	+	+	-
<i>a</i>	+	+	-	-	-	-	+	+
<i>b</i>	+	-	+	-	-	+	-	+
<i>ab</i>	+	+	+	+	-	-	-	-
<i>c</i>	+	-	-	+	+	-	-	+
<i>ac</i>	+	+	-	-	+	+	-	-
<i>bc</i>	+	-	+	-	+	-	+	-
<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+	+

(Kaynak: Montgomery — Runger, 2003, s. 533)

Tablo 3.4’de ana etkilerin işaretleri, Şekil 3.5’deki tasarım matrisinden elde edilmiştir. Etkileşim etkilerinin işaretleri ise, satırlardaki karşılık gelen ana etkilerin çarpımlarıyla elde edilir. Söz konusu tablo, birkaç ilginç özelliğe sahiptir (Montgomery — Runger, 2003: 533).

1. *I* sütunu dışındaki her bir sütun eşit sayıda + ve – işaretine sahiptir.
2. Herhangi iki sütundaki işaretler çarpımları toplamı 0’dır, bu da tablodaki sütunların ortogonal olduğunu gösterir.
3. *I* sütunu herhangi bir sütunla çarpıldığında çarpılan sütunun değeri değişmeyecektir, bundan dolayı *I* birim eleman olarak nitelendirilir.
4. Tabloda herhangi iki sütunun çarpımı bir sütunu verir, örneğin  $A \times B = AB$  ve  $AB \times ABC = A^2B^2C = C$ ’dir.

### c. $2^{3-1}$ kesirli faktöriyel tasarımlar

Her biri iki düzeyli üç faktör ile ilgilenildiğinde, toplam deneme sayısının  $2^3 = 8$  olacağından önceki paragraflarda bahsedilmiş idi. Ana etkiler ve etkileşim etkileri için, 8 deneyden daha az deney ile de bilgi sağlanabilir.  $2^3$  tasarımının 1/2’si için mevcut tasarım,  $2^{3-1} = 4$  deneme kombinasyonu içerir ve “ $2^{3-1}$  kesirli faktöriyel tasarım” olarak adlandırılır.

Tablo 3.4’de  $ABC$  etkileşiminin + ve – değerler aldığı etkiler göz önüne alınarak, tasarım iki eşit parçaya ayrılabilir.  $ABC$  etkisinin + olduğu durumlar için  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ve  $ABC$  etkileri seçilerek elde edilen tasarımda tüm denemelerin yarısı bulunur. Geri kalan diğer etkilerden oluşturulabilecek tasarım ise, diğer bir alternatif tasarımdır. Oluşturulan  $2^{3-1}$  tasarımında,  $ABC$  etkisi dikkate alındığından bu etki, “*üretici*” (generator) olarak adlandırılır ve tasarımın “*tanımlayıcı ilişkisi*” (defining relation)  $I=ABC$  biçiminde gösterilir.

$2^{3-1}$  kesirli faktöriyel tasarımda, üç serbestlik derecesi ile elde edilebilecek ana etkiler ve etkileşim etkilerini tahmin etmede kullanılacak deneme kombinasyonları:

$$I_A = \frac{1}{2}(a - b - c + abc)$$

$$I_B = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc)$$

$$I_C = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc)$$

$$I_{BC} = \frac{1}{2}(a - b - c + abc)$$

$$I_{AC} = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc)$$

$$I_{AB} = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc)$$

şeklinde olur. Böylece  $I_A = I_{BC}$ ,  $I_B = I_{AC}$  ve  $I_C = I_{AB}$  olduğu, dolayısıyla A ve BC, B ve AC ve C ve AB etkilerinin karıştığı (confounding) ve bunları birbirinden ayırmanın imkansız olduğu görülmektedir. Gerçekte A, B ve C’yi tahmin ettiğimizde aslında A+BC, B+AC ve C+AB’yi tahmin etmiş oluruz. Bu özelliğe sahip iki veya daha fazla etki “*eşdeşler*” (aliases) olarak adlandırılır. Söz konusu durumda A ve BC, B ve AC ve C ve AB eşdeştir. Bu tasarımın eşdeşlik yapısı  $I=ABC$  kullanılarak,

$$A \square I = A \square ABC = A^2 BC$$

$$A = BC$$

$$B \square I = B \square ABC$$

$$B = AB^2 C = AC$$

$$C \square I = C \square ABC$$

$$C = ABC^2 = AB$$

biçiminde belirlenebilir. Bu tasarıma alternatif veya tamamlayıcı bir diğer kesirli tasarım ise,  $I=-ABC$  tanımlayıcı ilişkisi kullanılarak üretilebilir.

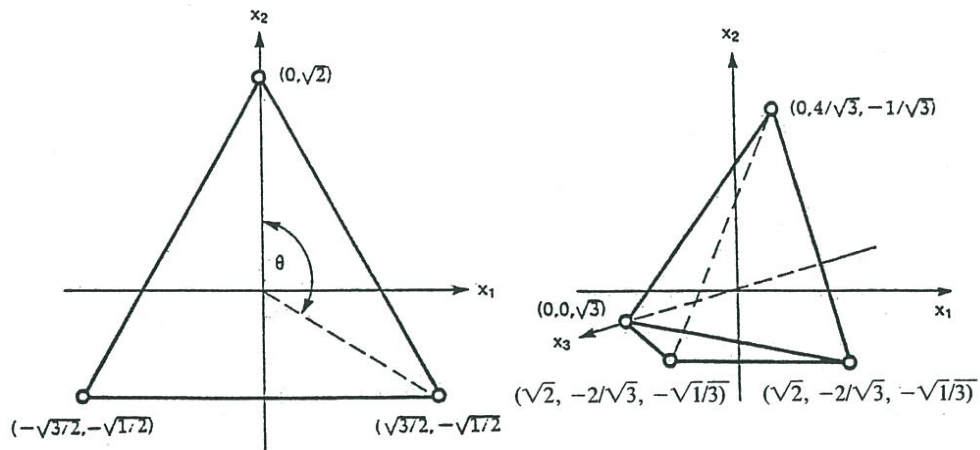
Aynı zamanda eşdeşlik yapısı yukarıda verilen söz konusu  $2^{3-1}$  kesirli faktöriyel tasarımda, ana etkiler arasında karışma yoktur. Ancak, ana etkiler iki faktör etkileşimleriyle karışmıştır. Böyle bir tasarım “çözünürlük III tasarımı” (resolution III design) olarak adlandırılır.  $2^3$  kesirli faktöriyel tasarımı,  $I=ABC$  (veya  $I=-ABC$ ) tanımlayıcı ilişkisi ile III tasarımın çözünürlüğünü göstermek üzere,  $2_{III}^{3-1}$  şeklinde sembolize edilir. Genellikle tasarım çözünürlüğü (design resolution), tanımlayıcı ilişkisi tasarımda karışma probleminin ne kadar kötü olduğunun bir ölçüsüdür (Gürsakal, 2010: 115). Tasarım çözünürlüğü III, IV ve V özellikle önemlidir.

1. *Çözünürlük III Tasarımları:* Bu tasarımlarda, hiçbir ana etki diğer ana etkilerle karışmaz. Fakat ana etkiler iki faktör etkileşimleriyle karışır veya iki faktör etkileşimleri diğer iki faktör etkileşimleriyle karışabilir. ( $2_{III}^{3-1}$ )
2. *Çözünürlük IV Tasarımları:* Bu tasarımlarda, hiçbir ana etki diğer ana etkilerle veya iki faktör etkileşimleriyle karışmaz. Fakat iki faktör etkileşimleri diğer iki faktör etkileşimleriyle karışır.  $2^{4-1}$  tasarımı,  $I=ABCD$  ilişkisi ile çözünürlük IV tasarımıdır. ( $2_{IV}^{3-1}$ )
3. *Çözünürlük V Tasarımları:* Bu tasarımlarda, hiçbir ana etki veya iki faktör etkileşimleri diğer ana etkiler veya iki faktör etkileşimleriyle karışmaz. Ancak iki faktör etkileşimleri üç faktör etkileşimleriyle karışır.  $2^{5-1}$  tasarımı,  $I=ABCDE$  ilişkisi ile çözünürlük V tasarımıdır. ( $2_V^{3-1}$ )

Genellikle iki faktörlü kesirli faktöriyel tasarımın çözünürlüğü, tanımlayıcı ilişkideki harf sayısına eşittir. Çözünürlük yükseldikçe, verilerin biricik yorumunu elde etmek için ihmal edilmesi gerekli etkileşim ile ilgili kısıtlayıcı varsayımlar azalır (Myers - Montgomery, 2002: 159).

### 3. Simpleks Tasarımlar

Box (1952) tarafından tanıtılan ve ortogonal bir tasarım olan simpleks tasarım, birinci dereceden bir modelde  $k$  değişken sayısını göstermek üzere  $N=k+1$  adet tasarım noktasından oluşan bir tasarım türüdür. Tasarım noktaları  $k$ -boyutlu düzgün yüzlü bir şeklin (veya simpleks) köşelerine yerleştirilmiş olup, iki nokta arasındaki  $\theta$  açısı  $\cos \theta = -1/k$  eşitliği ile karakterize edilmektedir (Cornell, 1990: 47). Geometrik olarak Şekil 3.7'de gösterildiği gibi,  $k=2$  için tasarım noktaları bir eşkenar üçgenin ve  $k=3$  için bir üçgen piramidin köşeleridir.



Şekil 3.7.  $k=2$  ve  $k=3$  için Simpleks Tasarımlar (Kaynak: Cornell, 1990, s. 48)

Bu tasarıma ait tasarım noktaları, aşağıda verilen tasarım matrisi ile temsil edilebilir.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{k1} \\ x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{1,N} & x_{2,N} & \cdots & x_{k,N} \end{bmatrix}$$



$\cos \theta = -\frac{1}{N-1} = -\frac{1}{k}$  eşitliği geçerli iken,  $k=2$  ve  $N=3$  için  $\cos \theta = -1/2$  ve  $\theta = 120^\circ$

olması durumunda tasarım noktaları, bir eşkenar üçgenin koordinatlarıdır.  $k=3$  ve  $N=4$  için tasarım noktaları, bir üçgen piramidin köşeleridir.

$k=2$  için tasarım matrisi (3.27)'de verilmiştir.

$$D = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & -1/\sqrt{2} \\ -\sqrt{3}/2 & -1/\sqrt{2} \\ 0 & 2/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

#### 4. Plackett-Burman Tasarımları

Kesirli faktöriyel tasarımlar, deneme sayısı  $N$ 'in 4, 8, 16, 32, 64,..., gibi 2'nin katları olması durumunda izleme deneylerinde kullanılabilirdi. Ancak, bu sayılar arasında  $N$  arttıkça artan bir açıklık bulunduğu fark edilmiş ve deneysel düzenlemelerin bu açıklığı doldurması gereksinimi doğmuştur. İki bilim adamı Robin Plackett ve Peter Burman, söz konusu durumlarda kullanılmak üzere iki düzeyli ortogonal tasarımların yeni bir sınıfını üretmişlerdir. Bu tasarımlar  $N$ 'in 4'ün çarpanları, özellikle  $N=12, 20, 24, 28, 36, \dots$  olması halinde elde edilir. Hadamard matrisleri olarak da bilinen bu tarz bir düzenleme, ortogonal dizin (orthogonal array) olarak adlandırılır ve  $L_N$  ile gösterilir (Box – Hunter – Hunter, 2005: 281).

Bu tasarımlar, Plackett ve Burman (1946)'a dayanan  $k=N-1$  değişken ve deneme sayısı  $N$ 'in 4'ün katları olduğu iki düzeyli kesirli faktöriyel tasarımlardır.  $N=12, 20, 24, 28$  ve 36 olması durumunda, söz konusu tasarımlar ilginç özelliklere sahip olabilirler. Çünkü, bu tasarımlar küplerle temsil edilemez ve bazen geometrik olmayan tasarımlar olarak adlandırılırlar (Montgomery, 2001b: 343).

Bir örnek olarak, 12 denemeli bir Plackett-Burman tasarımı işaretlerin birinci sırasının  $+ - + - - - + + + - +$  olduğu biliniyorken, Tablo 3.5'deki gibi yazılabilir.

**Tablo 3.5. N=12 Deneme için Plackett-Burman Tasarımı**

Deneme numarası	Faktörler										
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
1	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
2	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
3	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
4	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
5	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
6	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
7	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
8	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-
9	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+
10	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
11	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(Kaynak: Box – Hunter – Hunter, 2005, s. 282)

Tablo 3.5’de ilk satırdan sonraki on satırı elde etmek için, tüm işaretler bir adım sağa (veya sola) taşınır ve taşınan son işaret, yeni satırın başlangıç işareti olur. On ikinci satır ise, sadece eksi işaretlerinden oluşur. Böylelikle  $L_{12}$  ortogonal tasarımı olarak da adlandırılan bir Plackett-Burman tasarımı, Tablo 3. 5’de görüldüğü gibi oluşturulmuş olur. Söz konusu kesirli faktöriyel tasarımın tüm sütunlarının karşılıklı ortogonal olduğu görülmektedir.

### C. İKİNCİ DERECE MODELLER ve TASARIMLARI

Mühendislik bağlamındaki süreçlerde ikinci dereceden modeller, süreç karakteristiklerini temsil eden ayarlanabilen değişkenlerin kontrolünde kullanılmaktadır. Bu modeller, özellikle deneysel bölgede optimizasyonu öngörülen tepki değişkeninin, ürün kalitesi veya niceliğinin bir ölçüsü olduğu durumlarda sıklıkla kullanılır. Söz konusu modeller, diğer alanlarda ve optimizasyonun birincil amaç olmadığı durumlarda da, tepki faktör ilişkisini birinci derece modellere göre daha komplike bir biçimde ifade ettiklerinden rahatlıkla kullanılabilir.

Bazı durumlarda, daha yüksek dereceden polinomiellerin kullanılması da söz konusu olabilir. Fakat, bu durumda çok az faktör bulunmadıkça, üç veya daha yüksek dereceden polinomial modeldeki parametre sayısı epeyce artacak ve gerekli deney sayısı da elverişsiz bir biçimde çoğalacaktır. İkinci dereceden polinomieller, ilgilenilen fiziksel

olguyu yeterince ifade edebilmek için, yeterli esnekliğe sahip bir modelin kullanılması gereksinimi ile deneysel tasarım boyutunun sınırlanması için operasyonel gereksinim arasında pragmatik bir uzlaşma olarak kullanılır (Morris, 2011: 281).

Birinci dereceden modeller başlığı altında, az sayıda önemli faktör tanımlandığında sonraki deneylerin daha az deneme gerektireceği, daha etkili bir biçimde gerçekleştirilebileceği ve bundan sonra araştırmanın iki aşamaya ayrılacağından söz edilmişti. İlk aşamada temel amacın, mevcut koşullar ve girdi faktörlerinin düzeylerinin tepki yüzeyinin optimumuna (maksimum veya minimum) yakın veya uzak olduğunu belirlemek olduğu ifade edilmiş ve deneysel bölge tepki yüzeyinin optimum bölgesinden uzak olduğunda, yüzeye bir birinci dereceden yaklaşımın yeterli olacağı ve söz konusu durumu temsilen bir birinci dereceden model kullanılabileceği açıklanmıştı.

Deneysel tasarımın optimum bölgeye yakın veya bölge dahilinde olduğu durumda, tepki yüzeyi çalışmalarının ikinci aşaması başlar. Bu aşamada başlıca amaç, tepki yüzeyi için optimum etrafında küçük bir bölgede doğru bir yaklaşım elde etmek ve optimum süreç koşullarını tanımlamaktır. Tepki yüzeyinin optimumunun yakınlarında eğrisellik etkisi baskın terim olup tepki yüzeyine

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (3.30)$$

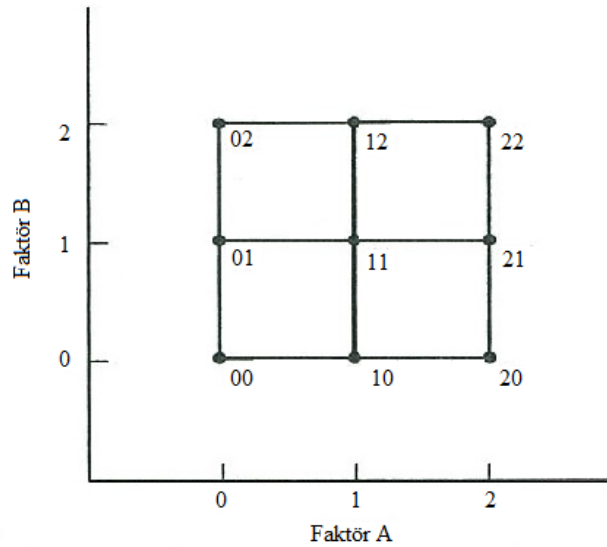
denklem (3.30) ile verilen ve  $\beta_i$ 'nin doğrusal etkiyi,  $\beta_{ij}$ 'nin doğrusal etkileşim etkisini ve  $\beta_{ii}$ 'nin kuadratik etkiyi temsil ettiği ikinci dereceden bir model ile yaklaşılmalıdır. Söz konusu modelde,  $1+2k+k(k-1)/2$  parametre içerilmektedir. Denklem (3.30)'da verilen katsayıların tahminine imkan veren tasarım "*ikinci dereceden tasarım*" ve deney de "*ikinci dereceden deney*" olarak adlandırılır (Wu – Hamada, 2009: 463).

Tepki yüzeyi optimizasyon stratejileri; iterasyonların ilk aşamasında yeni deneysel bölge için, en dik artış patikasının oluşturulması amacıyla, birinci dereceden regresyon üzerinde odaklanır. Bu stratejiler, son aşamada tasarım bölgesindeki süreç koşulları optimize edileceği zaman ikinci derece modellere odaklanan bir dizi deneye dayanmaktadır.

## 1. $3^k$ Faktöriyel Tasarımlar

$3^k$  faktöriyel tasarımlar, denklem (3.30)'da verilen ikinci dereceden modellerin tahmini için gözlemlerin elde edilmesini mümkün kılan ikinci dereceden tasarımlardır. Söz konusu denklemden de anlaşılacağı üzere, tasarımda her biri üç düzeyli k adet faktör bulunmakta olup toplam faktör düzey kombinasyonu veya tasarım noktası sayısı  $n = 3^k$  formülü ile bulunur. Bir  $3^k$  sistem tasarımında, faktörlerin nicel olması durumunda faktörlerin söz konusu üç düzeyi düşük, orta ve yüksek olarak belirlenip, bu seviyeler sırasıyla -1, 0, +1 şeklinde kodlanabilir.

Tasarımdaki faktör düzeylerini temsil eden birkaç farklı notasyon vardır. Bunlardan biri düzeylerin düşük (0), orta (1) ve yüksek (2) gibi rakamlarla gösterilmesidir. Bir  $3^k$  tasarımda her bir deneme kombinasyonu k rakam ile gösterilecek olursa, birinci rakam A faktörünün, ikinci rakam B faktörünün ve k. rakam K faktörünün düzeylerini ifade eder. Örneğin, Şekil 3.8'de bir  $3^3$  tasarımın geometrisi sözü edilen notasyon kullanılarak verilmiştir.



**Şekil 3.8. Bir  $3^3$  Tasarımda Deneme Kombinasyonları (Kaynak: Montgomery, 2001b, s. 364)**

Bu tasarımdaki her biri iki serbestlik dereceli k adet ana etki, her biri dört serbestlik dereceli  $\binom{k}{2}$  sayıda iki faktör etkileşimi;...; ve bir adet  $2^k$  serbestlik dereceli k-faktör

etkileşimini belirlemek için,  $3^k - 1$  serbestlik dereceli  $3^k$  deneme kombinasyonu vardır.  $3^k$  faktöriyel tasarımlar,  $k$  arttıkça deneme sayısı modeldeki terim sayısından daha hızlı bir biçimde arttığı ve çok fazla deneme gerektirdiği için pek kullanılmaz. Bunların yerine daha etkili olan diğer tasarımlar tercih edilir (Mathews, 2005: 443).

## 2. Merkezi Bileşik Tasarımlar

Box ve Wilson (1951) tarafından tanıtılan merkezi bileşik tasarımlar, ikinci derece tasarımlar sınıfında en bilinen tasarım olarak kabul edilir. Merkezi bileşik tasarımların unutulmaması gereken önemli bir özelliği tek adımlı (one-shot) yaklaşım değil, sıralı deneme (sequential experimentation) stratejisini kullanarak endüstriyel süreç gelişimi için esneklik sağlamasıdır (Anderson–Whitcomb; 2005: 77). Kuadratik polinomial bir model beklentisi olduğu durumlarda yaygın bir biçimde kullanılan bu tasarım, üç alt tasarımdan meydana gelir ve toplam  $n = 2^k + 2k + n_c$  sayıda farklı tasarım noktası içerir (Cornell, 1990: 52; Morris, 2011: 286). Bir merkezi bileşik tasarım aşağıda verilen adımlar izlenerek oluşturulur (Mason – Gunst – Hess, 2003: 582):

- i.  $k$  adet kontrol edilebilen değişkenin bulunduğu  $2^k$  tam faktöriyel ortogonal tasarım veya kesirli faktöriyel bir tasarım oluşturulur. Bu faktöriyel kısımda faktörler ( $\pm 1$ ) değeri ile kodlanır.
- ii.  $2k$  denemenin bir alt tasarımı olarak, aksenal (axial) veya yıldız (star) nokta eklenir. Aksenal noktaların her bir çifti kodlanmış düzeyleri ile aşağıdaki gibi gösterilir:

$$(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0),$$

$$(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0),$$

.....

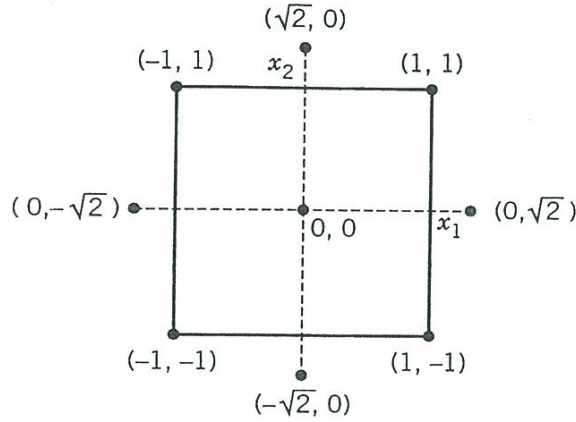
$$(0, \pm\alpha, 0, \dots, \pm\alpha)$$

bir sabit olan  $\alpha$ , tasarımın döndürülebilirlik veya diğer istenen özelliklerini tatmin edecek şekilde seçilebilir.

- iii.  $n_c$  adet merkez nokta eklenir ( $n_c \geq 1$ ):

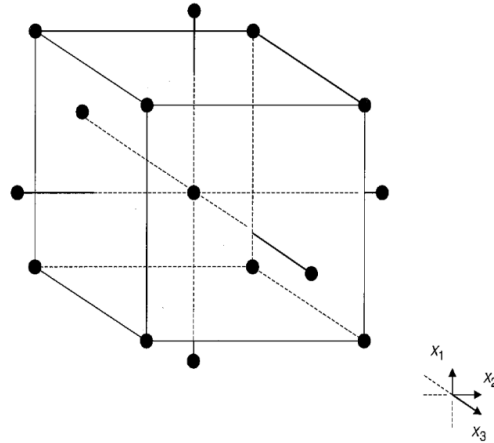
$$(0, 0, 0, \dots, 0)$$

- iv. Faktör düzey kombinasyonları hangisi uygun ise, deney birimine veya ardışık denemeye rassal bir biçimde atanır.



**Şekil 3.9.  $k=2$  ve  $\alpha = \sqrt{2}$  için Merkezi Bileşik Tasarım (Kaynak: Myers - Montgomery, 2002, s. 323)**

Şekil 3.9'da iki faktörün söz konusu olduğu durum için, bir merkezi bileşik tasarım sunulmuştur. Eksenel noktaların belirlenmesinde kullanılan eksenel uzaklık için,  $\sqrt{2}$  değeri kullanılmıştır. Söz konusu şekilden, tüm tasarım noktalarının merkezden eşit uzaklıkta oldukları gözlenmektedir.



**Şekil 3.10.  $k=3$  ve  $\alpha = \sqrt{3}$  için Merkezi Bileşik Tasarım (Kaynak: Mason – Gunst – Hess, 2003, s. 583)**

Şekil 3.10'dan da görülebileceği gibi, merkezi bileşik tasarımda faktör sayısının üç olduğu durum söz konusu olup, eksenel noktalar merkezden  $\sqrt{3}$  kadar uzaklıktan ve altı

yüzeyden geçmektedir. Söz konusu tasarım, kabaca bir küre üzerinde 8 köşe noktası ve 6 aksenal nokta olmak üzere 14 nokta ve merkez noktalardan meydana gelmektedir.  $k=3$  için döndürülebilir bir merkezi bileşik tasarım, tam veya çok yaklaşık küresel bir tasarımdır ve merkez noktalar dışındaki tüm noktalar tasarım merkezinden  $\sqrt{3}$  kadar uzaklıktadır. Tablo 3.6'da  $k=2$  ve  $k=3$  için  $n_c=1$  olmak üzere, kodlanmış değişkenlerin koordinat değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.6.  $k=2$  ve  $k=3$  için Merkezi Bileşik Tasarım Düzenleri**

$k = 2$		$k = 3$		
$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	-1
-1	1	-1	1	-1
1	1	1	1	-1
$-\sqrt{2}$	0	-1	-1	1
$\sqrt{2}$	0	1	-1	1
0	$-\sqrt{2}$	-1	1	1
0	$\sqrt{2}$	1	1	1
0	0	-1.682	0	0
		1.682	0	0
		0	-1.682	0
		0	1.682	0
		0	0	-1.682
		0	0	1.682
		0	0	0

(Kaynak: Cornell, 1990, s. 53)

#### a. Merkezi bileşik tasarımlarda döndürülebilirlik özelliği

Merkezi bileşik tasarımda esneklik alanı, aksenal uzaklık  $\alpha$  'nın ve merkez deneme sayısı  $n_c$  'nin seçimine bağlıdır. Seçimi son derece önemli olan bu parametrelerden  $\alpha$  'nın seçimi, ilgilenilen ve işletilebilen bölgeye bağlı iken,  $n_c$  'nin seçimi ilgilenilen bölgede ölçekli tahmin varyansı  $\nu(x) = NVar(\hat{y}) / \sigma^2$  'nin dağılımı üzerinde bir etkiye sahiptir.

Merkezi bileşik tasarım,  $k$  adet değişkenin ana etkilerinin bağımsız bir biçimde değerlendirildiği durumda ortogonal bir tasarım, sabit bir  $Var(\hat{y})$  değerine sahip

olduğunda ise döndürülebilir bir tasarım olarak nitelendirilir (Cornell, 1990: 52). Birinci derece tasarımlarda ortogonallik dominant bir özellik olurken, ikinci derece tasarımlarda bu özellik ikincil sırada yer alır ve döndürülebilirlik oldukça önemli bir özellik haline gelir. İkinci derece tasarımlar için tam (exact) döndürülebilirlik mutlak bir gereksinim değildir; yaklaşık döndürülebilirlik yeterli kabul edilebilir (Batmaz – Tunalı, 2002: 702).

Deneysel tasarım bölgesi genelinde ölçekli tahmin varyansı  $NVar(\hat{y})/\sigma^2$ 'nin kararlı bir dağılıma sahip olması açısından, ikinci derece tasarımlarda döndürülebilirlik özelliği önemlidir. Deneyi yapan araştırmacı, başlangıçta tahmin için tasarım uzayının nerede olduğunu veya tasarım uzayında optimumun nerede sağlanabileceğini bilememektedir. Bu durumda, kararlı bir ölçekli tahmin varyansı ilgilenilen bölge üzerinde tepki değerlerinin tahminleri olarak  $\hat{y}(x)$ 'nin kalitesini garanti eder. Bu amaçla, Box ve Hunter (1957) “*tasarım döndürülebilirliği*” (design rotatability) kavramını geliştirmişlerdir. Döndürülebilir bir tasarım, tasarım merkezinden eşit uzaklıktaki herhangi iki bölgede  $NVar(\hat{y})/\sigma^2$ 'nin aynı değere sahip olmasıdır. Bir diğer ifadeyle, küre üzerinde  $NVar(\hat{y})/\sigma^2$ 'nin bir sabit olmasıdır (Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009: 305).

Döndürülebilirlik veya yaklaşık döndürülebilir (near – rotatability), tasarım bölgesinde kendi kendine kararlılığı sağlayamamaktadır. Örneğin, bu özellikler merkezi bileşik tasarımda  $\alpha$  ve  $n_c$ 'nin seçimi gibi bazı durumlarda, tasarım parametrelerinin seçiminde rehberlik etmektedir. Bir tasarım özelliği olarak döndürülebilirlik, ilgilenilen ve işletilebilen bölgenin doğasına bağlıdır. Döndürülebilirlik veya yaklaşık döndürülebilirlik, diğer önemli tasarım özellikleri gözden çıkarılmaksızın kolaylıkla ulaşılabilen özelliklerdir.

Tepki yüzeyi tasarımlarının özellikleri başlığı altında da ayrıntılı bir biçimde söz edildiği gibi ikinci derece bir model söz konusu olduğunda ise denklem (3. 14)'de  $[ii]$  saf ikinci derece momentleri,  $[iii]$  saf dördüncü derece momentleri ve  $[ijj]$  karma dördüncü derece momentleri ifade etmek üzere döndürülebilir bir tasarım için gerekli ve yeterli şartlar:



i) Dördüncü ve daha düşük dereceye sahip, tüm tek dereceli momentlerin sıfır olması

ii)  $[ii]$  ve  $[iii]$ 'nin tüm  $i$ 'ler için eşit olması

iii)  $[iii] = 3[ii]$  tüm  $i \neq j$  için

şeklindedir. Üçüncü koşuldan gidilerek;

$$\frac{[iii]}{[ijj]} = \frac{F + 2\alpha^4}{F} = 3$$

F faktöriyel nokta sayısını göstermek üzere (tam faktöriyel tasarım söz konusu ise  $F = 2^k$ ) sonuç olarak;

$$\alpha = \sqrt[k]{F} \quad (3.31)$$

yazılabilir. Eşitlik (3.31)'den aksel uzaklık  $\alpha$ 'nın uygun bir biçimde seçilmesiyle döndürülebilirlik özelliğine ulaşılabileceği anlaşılmaktadır.  $k=2, 3, 4$  durumunda döndürülebilir bir merkezi bileşik tasarım, hem tam veya çok yaklaşık küresel bir tasarımdır, hem de merkez noktalar dışındaki tüm noktalar tam olarak tasarım merkezinden  $\sqrt{k}$  kadar uzaklıktadır. Tablo 3.7'de döndürülebilir bir tasarım için, farklı tasarım değişkenleri durumunda  $\alpha$  değerleri verilmiştir.

**Tablo 3.7. Döndürülebilir Merkezi Bileşik Tasarım için  $\alpha$  Değerleri**

$k$	$F$	$N$	$\alpha$
2	4	$8 + n_c$	1.414
3	8	$14 + n_c$	1.682
4	16	$24 + n_c$	2.000
5	32	$42 + n_c$	2.378
5 ( $\frac{1}{2}$ rep)	16	$26 + n_c$	2.000
6	64	$76 + n_c$	2.828
6 ( $\frac{1}{2}$ rep)	32	$44 + n_c$	2.378
7	128	$142 + n_c$	3.364
7 ( $\frac{1}{2}$ rep)	64	$78 + n_c$	2.828

(Kaynak: Myers - Montgomery, 2002, s. 332)

### **b. Döndürülebilir merkezi bileşik tasarımda merkez denemeler**

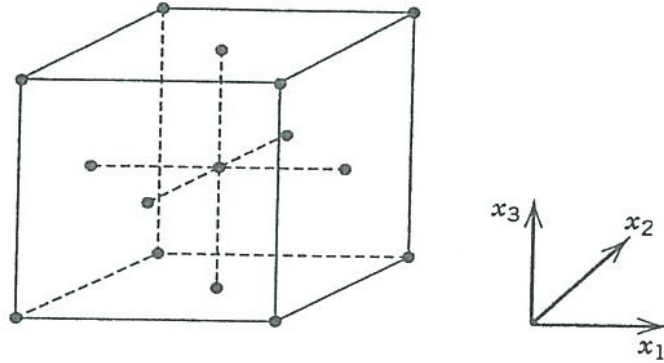
Döndürülebilirlik özelliği, seçilen küresel tasarım bölgesinde kararlı bir tasarım oluşturmak amacıyla  $NVar(\hat{y})/\sigma^2$ 'nin sabit hale gelmesini sağlamaya çalışmaktadır. Merkez denemelerin uygulanması da, tasarım bölgesinde  $NVar(\hat{y})/\sigma^2$ 'nin kararlı olmasını sağladığından, döndürülebilir bir merkezi bileşik tasarım için bu denemeler oldukça yararlıdır. Ancak, döndürülebilir veya yaklaşık döndürülebilir merkezi bileşik tasarımda az sayıda merkez deneme yapılması iyi bir uygulama olmayacaktır. Küresel veya yaklaşık küresel tasarımlar, tasarım bölgesindeki  $NVar(\hat{y})/\sigma^2$ 'nin dengesiz yayılımını önlemek için 3 – 5 merkez deneme gerektirmektedir (Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009: 308). Önceki satırlarda da belirtildiği gibi küresel bölgeler söz konusu olduğunda,  $\alpha = \sqrt{k}$  için ikinci dereceden modelde parametrelerin tahminleri için en azından bir merkez nokta gereklidir. Aksi halde,  $\hat{y}(x)$ 'nin varyansı sonsuz olacaktır. Söz konusu tahmin varyansını kararlı hale getirmek için  $\alpha$ 'nın  $\sqrt{k}$ 'ya yakın olduğu küresel bölgelerde 3 – 5 merkez nokta,  $\alpha$ 'nın 1'e yakın olduğu kübik bölgelerde ise 1 – 2 merkez nokta yeterli olmaktadır (Wu – Hamada, 2009: 488).

### **c. Küresel bölge, kübik bölge ve yüzey-merkezli tasarım**

Genellikle aksenal uzaklık  $\alpha$ , 1 ile  $\sqrt{k}$  arasında, nadiren de bu aralığın dışında değerler alır. Bazı uygulama alanlarında biyolojik, çevresel ve benzeri nedenlerden dolayı mühendisler veya bilim insanları, ilgilendikleri tasarım değişkenleri için bu değişkenlerin doğası gereği, belirli değişmeyen özel aralıklarda değerler almasını sağlamak zorunda kalırlar. Böyle durumlarda ilgilenilen bölge ile işletilebilir bölge aynı olup, tasarımda kullanılacak bölge bir küptür. Örneğin  $k=3$  durumu ele alınacak olursa,  $\alpha = 1$  seçilerek altı aksenal nokta  $2^3$  küpünün altı yüzeyinin merkezine yerleştirilir ve sekiz köşenin de mevcut olduğu bir merkezi bileşik tasarım elde edilir. Şekil 3.11'de verilen bu tasarım “yüzey-merkezli küp” veya “yüzey-merkezli tasarım” (face-centered cube or face-centered design) olarak adlandırılır.

Bu tasarımlar iki önemli üstünlüğe sahiptir. Bunlardan ilki, sadece üç düzey gerektiren merkezi bileşik tasarımlar olmalarıdır. Bir veya daha fazla faktörün nitel olması durumunda, sadece üç düzey kullanılabileceğinden beş düzeyli merkezi bileşik tasarımlar

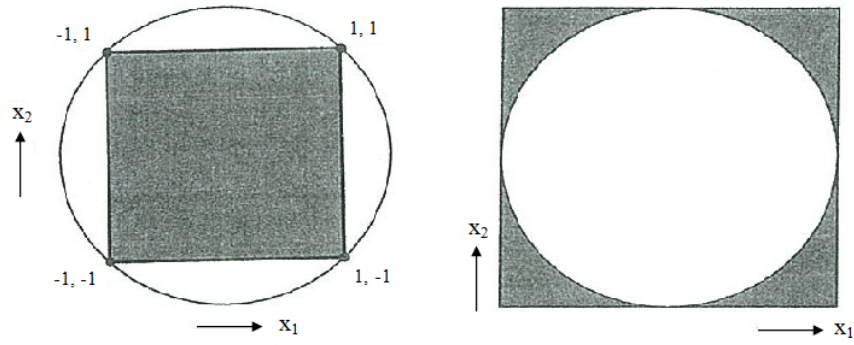
çalışmayacaktır. Bir diğer üstünlük ise, tasarım bölgesinin bir küp olması durumunda söz konusu tasarımların oldukça etkili tasarımlar olmasıdır. Faktör düzeylerinin seçimi birbirinden bağımsız olarak yapılabilirse, bölge doğal olarak kübiktir. Kübik bir bölge için aksenal noktaların küpün yüzeylerine bastırılması parametre tahminlerinin etkinliğini artıracaktır (Wu – Hamada, 2009: 487).



**Şekil 3.11.  $k=3$  ve  $\alpha = 1$  için Yüzey-Merkezli Tasarım (Kaynak: Myers – Montgomery –Anderson-Cook, 2009, s. 313)**

Yüzey-merkezli tasarımlar, merkez deneme sayısına karşı duyarsızdır. Tahmin varyansını kararlı hale getirmek için, çok fazla merkez denemeye gereksinim olmayıp kısmen iki deneme tercih edilmesine rağmen aslında bir deneme de yeterli olmaktadır.

İlgilenilen bölgenin bir küp olması durumunda, uygun tasarım kübik merkezi bileşik tasarımdır. Bazı durumlarda ise, bu bölge problemde faktöriyel noktaların bağlı olduğu köşeleri tanımlayan faktörlerin aralıklarını belirtebilir. Bu durumda tasarım bölgesine ilişkin soru, aksenal noktaların bilimsel olarak izin verilen aralıkların dışında ve ilgilenilen bölgenin içinde olup olmayacağıdır. Örneğin, Şekil 3.12.a’da gölgeli alan bir küp şeklindedir. Araştırmacı tepkiyi tahmin etmek için, gölgeli alanın yanı sıra işletilebilir bölge içindeki gölgeli olmayan alanla da ilgilenmektedir. Böylelikle ilgilenilen bölge, bir küpün etrafına çizilen bir küre olup, kullanılması uygun tasarım “küresel tasarım” (spherical design) olarak adlandırılır. Söz konusu tasarımda, aksenal noktaların  $\alpha = \sqrt{k}$  şeklindeki seçimiyle, aksenal ve kübik noktalar aynı küre üzerinde uzanmış olur.



a. Dışa çizilen küre

b. İçe çizilen küre

**Şekil 3.12. Küresel Bölge (Kaynak: Myers – Montgomery, 2002, s. 341)**

Şekil 3.12.b'de, gerçekleşmesi olası bir diğer durum verilmiştir. Deney planlanırken, işletilebilir bölge ve ilgilenilen bölge dışında yer alan ve bilimsel olarak izin verilmeyen aralıklar, küpün köşeleri olarak belirlenmiş olabilir ki; bu aralıklar kabul edilemez çıktıların elde edildiği aralıklardır. Bu köşeler, Şekil 3.12.b'de gölgeli alanlar olarak gösterilmekte olup, tasarım bölgesi gölgeli olmayan alandan oluşmaktadır. Söz konusu şekilde küre, seçilen aralıklardan oluşturulan kübik bölgenin içine çizilmiştir. Faktörlerin ilgilenilen veya izin verilen aralıkları hakkında, mühendislerden veya bilim insanlarından yeterli bir yorum elde etmek çoğu zaman zordur. Dolayısıyla çoğu kez önce yapılan hatalar, sonraki deneylerde ayarlamalar yapılarak düzeltilir.

### 3. Box-Behnken Tasarımları

Kuadratik regresyon için dengeli tamamlanmamış blok tasarımlarına (balanced incomplete block designs) dayanan bir yapıya sahip deneysel tasarımlar, Box ve Behnken (1960) tarafından tanıtılmıştır. Box-Behnken tasarımları (Box-Behnken designs) olarak adlandırılan simetrik üç düzeyli bu tasarımlar, her biri kontrollü değişkenlerin yalnızca bir alt seti kullanılarak yapılandırılan iki düzeyli faktöriyel tasarımların bir kombinasyonundan oluşur (Morris, 2011: 287).

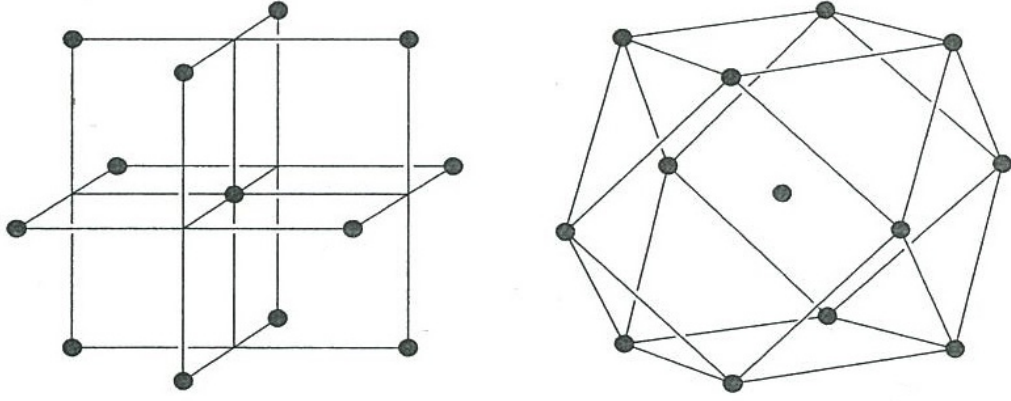
İkinci dereceden tepki yüzeylerinin uydurulması için geliştirilen ve üç düzeyli tasarımların etkili bir türü olarak nitelendirilen Box-Behnken tasarımları, faktörlerin sadece üç düzeye sahip olmasının zorunlu olduğu veya arzulandığı durumlarda kullanılmaktadır. Dengeli tamamlanmamış blok tasarımlarına dayanan bu tasarımlar, üç faktörün bulunduğu

küçük bir tasarımla açıklanabilir. Üç etki (treatment) ve üç blok için yapılandırılan bir dengeli tamamlanmamış blok tasarımı aşağıdaki gibi verilmiştir.

Bloklar	Etkiler		
	1	2	3
Blok 1	X	X	
Blok 2	X		X
Blok 3		X	X

Tepki yüzeyi çalışmalarında, üç girdi faktörü  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  üç etki olarak tanımlanmıştır.  $x_3$  merkezde sabit kalırken ( $x_3=0$ ) etki 1 ve 2 tarafından sembolize edilen  $x_1$  ve  $x_2$ ,  $2^2$  faktöriyel ( $\pm 1$  ile ölçeklendirilen) tasarımda eşlendirilir. Üçüncü faktör sabit kalırken, her çift etkinin bir  $2^2$  faktöriyelle temsil edilmesiyle aynı uygulama, blok 2 ve blok 3 için de tekrarlanarak sonuçta,  $k=3$  için elde edilen bir Box-Behnken tasarımına ulaşılır. Böylelikle, aşağıda tasarım matrisi verilen söz konusu tasarımda  $12+n_c$  sayıda deneme bulunur. Üç faktörün söz konusu olduğu durumda, 13 denemeye sahip olan üç düzeyli bir Box-Behnken tasarımının iki farklı gösterimi Şekil 3.13'de verilmiştir.

$$D = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$



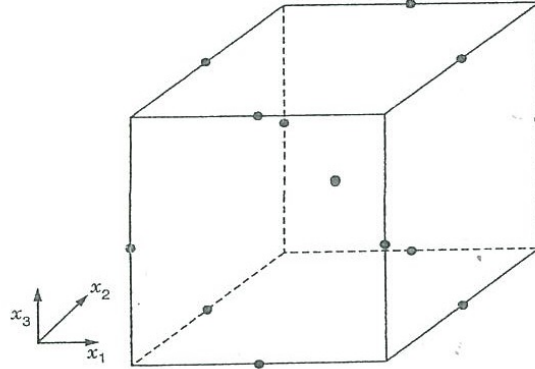
**Şekil 3.13. k=3 için Box-Behnken Tasarımının İki Gösterimi (Kaynak: Box – Hunter – Hunter, 2005, s. 475)**

Bu tasarımın bir üstünlüğü  $\alpha = 1$  alındığında, merkezi bileşik tasarımın beş düzey gerektirmesine karşılık, her bir faktör için sadece üç düzey gerektirmesidir. Bu durumda sadece daha az deneme gerektirmesiyle değil, döndürülebilir olmasından dolayı da Box-Behnken tasarımı tercih edilir. Ancak, üç düzeye ihtiyaç duyulan ve küpün kapsanmasının zorunlu olduğu durumlarda, Box-Behnken tasarımından çok yüzey-merkezli tasarım kullanılmalıdır.

Şekil 3.14’de gösterilen Box-Behnken tasarımı, kübik bölgede iki düzeyli faktöriyel tarafından üretilen ekstrem herhangi bir nokta içermez. Tasarım noktalarının tamamı, bir kürenin üzerinde veya merkezindedir. Küresel bir tasarım olması, Box-Behnken tasarımın önemli bir özelliğidir. Örneğin k=3 durumunda kenar noktalar (edge points) olarak adlandırılan tüm tasarım noktaları, tasarım merkezinden  $\sqrt{2}$  kadar uzaklıkta olup faktöriyel nokta, köşe noktası veya yüzey nokta bulunmamaktadır. Söz konusu tasarım, Şekil 3.14’den de izlenebilir. Tüm kenar noktalarını içeren Box-Behnken tasarımı, küpün tamamını kapsamaz. Bu tasarımın kullanımı, tepkinin küpün köşeleri gibi ekstrem noktadaki tahminiyle ilgilenilmediği durumlarla sınırlandırılmalıdır (Myers – Montgomery, 2002: 346).

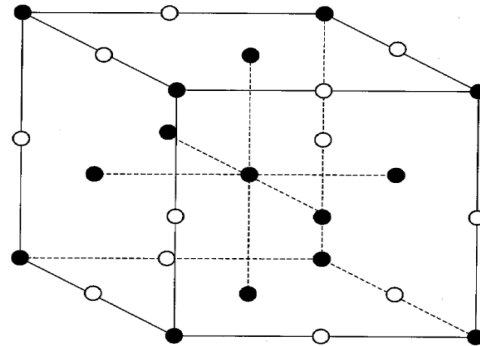
Özellikle küresel bölgeler için uygun olan bu tasarımlar, küresel özellik nedeniyle 3-5 merkez deneme noktası içermelidir. k=4 ve k=7 için tasarım matrisindeki tüm tek momentler sıfır olduğundan döndürülebilir olan bu tasarım, diğer durumlar için yaklaşık döndürülebilirdir (Wu – Hamada, 2009: 489).

Bu tasarım, fiziksel kısıtlar nedeniyle gerçekleştirilmesi imkansız veya pahalılık nedeniyle gerçekleştirilmesine izin verilmeyen deneylerde noktalar, faktör-düzye kombinasyonlarını temsil eden küpün bir veya daha fazla köşesinde yer aldığı zaman üstünlüğe sahiptir.



**Şekil 3.14.  $k=3$  ve  $n_c=1$  için Box-Behnken Tasarımı (Kaynak: Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009, s. 320)**

Şekil 3.11’de sunulan üç düzeyli yüzey merkezli merkezi bileşik tasarım ve Şekil 3.14’de verilen üç düzeyli Box-Behnken tasarımı ilginç bir geometrik desen ortaya çıkarmaktadır. Şekil 3.15’de görüldüğü gibi, iki tasarımın bir araya gelmesiyle bir  $3^3$  tam faktöriyel tasarım elde edilmiştir. Dolayısıyla bu alternatif tasarımların, üç düzeyli faktöriyel tasarımın basit kesirli parçaları olduğu anlaşılmaktadır (Mason – Gunst – Hess, 2003: 586).



**Şekil 3.15.  $3^3$  Faktöriyel Tasarımı (Kaynak: Mason – Gunst – Hess, 2003, s. 587)**

#### 4. Diğer İkinci Derece Tasarımlar

Tepki yüzeyi metodolojisinde en popüler olarak kullanılan tasarımlar, Merkezi bileşik tasarımlar ve Box-Behnken tasarımlarıdır. Bu tasarımların önemli özelliklerinden biri de, deneme hacmi (run size) ile ilgilidir. Deneme hacmi, uyum eksikliği (lack of fit) için tatminkar bir pay sağlayacak kadar büyük olmalı, fakat gereksiz deneysel harcama veya serbestlik derecesi israfına neden olacak kadar büyük olmamalıdır. Bazı durumlarda, bu tasarımların gerektirdikleri deneme hacmi için araştırmacıların kaynakları yeterli olmayabilir. Böyle durumlarda, doyurulmuş (saturated) veya yarı doyurulmuş (near-saturated) olarak tanımlanan bir tasarım sınıfına ihtiyaç vardır. Söz konusu tasarımlar,  $p = 1 + 2k + \frac{k(k-1)}{2}$  adet tasarım noktası içerir. (Myers – Montgomery, 2002: 377).

Merkezi bileşik tasarım ve Box-Behnken tasarımının maliyet kısıtları nedeniyle kullanılamaması durumunda, pratikte nadiren uygulanan bazı tasarımlar da bulunmaktadır. Bunlar; Küçük bileşik tasarımlar (small composite designs), birinci derece, ikinci derece ve daha yüksek dereceli modeller için de uygulanabilen ve doyurulmuş tasarımlar olan Koshal tasarımları, Tekdüze kabuk tasarımları (uniform shell designs) ve Roquemore (1976) tarafından geliştirilen doyurulmuş veya yarı doyurulmuş ikinci dereceden tasarımlar olan hibrit tasarımlardır. Bu tasarımlar, maliyet kısıtları olmadıkça uygulanmamalıdır.

### III. TEPKİ YÜZEYİ TASARIMLARININ ETKİNLİĞİ

Tasarımların yapılandırılmasında bilgisayarların kullanımı 1980'li yıllarda başlamıştır. Bu zaman periyodu, uygun tasarımın bulunmasına yönelik olarak getirdiği kolaylıklardan dolayı, deneysel tasarım alanına birçok kullanıcının katılmasına neden olmuştur. Bu kullanıcılar tasarımın inşasını, paket programların tasarımın yapılandırılmasında kullandığı kriterleri anlamaksızın bir kara kutu çalışması olarak görmüşlerdir.



## A. TASARIM OPTİMALİTESİ

Tepki yüzeyi tasarımlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında kullanılan tasarım ölçülerinin dayandığı optimal tasarım teorisi (optimal design theory), Kiefer (1959, 1961) ve Kiefer ve Wolfowitz (1959) çalışmalarının öncülüğünde başlamıştır (Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009: 363). Tasarım optimalitesi (design optimality) kavramı, pratik uygulama alanına 1970 ve 1980’li yıllarda Kiefer ve meslektaşları tarafından getirilmiştir. Böylelikle, pratisyenlerin belirlediği örneklem hacmi, model, değişken aralığı vb. diğer kısıtlamalara dayanan bilgisayar algoritmaları, en iyi tasarımların geliştirilmesini sağlamıştır. Optimal tasarım kavramı, deneylerin istatistiksel olarak en muhtemel ve hassas çıkarımları elde etmek için tasarlanması gerekliliğine işaret eder (Montgomery, 1992: 10). Optimal tasarımlar, ilgilenilen belirli bir R bölgesinde kestirilen tepki  $\hat{y}(x)$ ’nin, ortalama tepki  $\mu(x)$ ’e olan yakınlığına ilişkin belirli bir optimalite kriterleri temelinde yapılandırılırlar (Khuri – Mukhopadhyay, 2010: 130). Bilgisayarlar tarafından üretilen ve optimal tasarımlar olarak da bilinen bu tasarımların, uygun olabileceği üç durumdan söz etmek mümkündür.

1. *Standart olmayan deney bölgesi (Nonstandart experimental region)*: İlgilenilen bölgenin bir küre veya küp olmaması durumunda, standart tasarımlar en iyi seçim olmayacaktır. Pratik ayarlar, deneysel bölgede sıklıkla kısıtlamalar içerir. Örneğin  $x_1$  ve  $x_2$ ’nin sırasıyla sıcaklık ve basıncı temsil ettiği bir kimyasal reaksiyonda, operasyon kısıtları  $x_1 + 2x_2 \leq 2$  denklemini ve dolayısıyla  $R = \{x : -1 \leq x_i \leq +1, x_1 + 2x_2 \leq 2\}$  durumunu gerektirebilir. Deneysel bölgenin kısıtlamalar sonucu düzensiz hale geldiği böyle durumlarda, bölgeye tam olarak adapte edilecek standart tepki yüzeyi tasarımları bulunmamaktadır. Optimal tasarımlar, önerilen herhangi bir deneysel bölge için yapılandırılabilen bölgeye özgü (region-specific) tasarımlardır.

2. *Standart olmayan modeller (Nonstandart models)*: Dengeli tamamlanmamış blok tasarımları, düzgün kesirli faktöriyeler ve merkezi bileşik tasarımlar gibi standart tasarımlar, standart modellerin uygun olduğu geniş koşullar altında iyi performans gösteren tasarımlardır. Fakat, bazı durumlarda önceki deneyler, teorik alt yapı veya deneyi uygulayan pratisyenin süreç hakkında sahip olduğu özel bir bilgi, standart olmayan farklı model formlarını önerebilir. Böyle durumlar için uygulanacak standart tepki yüzeyi

tasarımları mevcut değildir. Optimal tasarımlar sadece standart formlar için değil, önerilen herhangi bir doğrusal model için yapılandırılabilen modele özgü (model-specific) tasarımlardır.

3. *Standart olmayan deney hacmi (Nonstandart experiment size)*: Bazı durumlarda pratisyenler, özellikle deneyin ekstrem derecede pahalı veya zaman harcayıcı olması gibi nedenlerden dolayı, standart tepki yüzeyi tasarımları ile örneklem hacmini ve deneme sayısını azaltmak isteyebilirler. Bu durumda, optimal tasarımlar örneklem hacmini istenen değerde tutabilmek amacıyla, optimizasyon problemleri için bir çözüm niteliğindedir.

Söz konusu durumlar dışında bazen optimal tasarımlar, standart tasarımları kıyaslama amacıyla da kullanılabilir. Bu tasarımların başlıca sakıncası; yapılandırılan tasarımın genellikle yüksek boyutlu olan ve sadece sayısal olarak yaklaşılabilen bir matematiksel optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmesi ve doğru optimal çözümlerin bazen pratik olarak doğrulanamadığı durumları içermesidir. Buna rağmen, birçok önemli uygulama için optimal tasarımlar, standart deneysel tasarımlara karşı önemli ve kullanışlı bir alternatif olarak yapılandırılmaktadır (Morris, 2011: 301).

## B. TASARIM OPTİMALİTESİ KRİTERLERİ

Tasarım optimalitesi kriterleri, alfabenin harfleri ile karakterize edilmesinden dolayı “*alfabetik optimalite kriterleri*” olarak da adlandırılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanlar, *D*-, *A*-, *G*-, *V*- ve *Q*-optimalite kriterleridir.

***D-Optimalite ve D-Etkinlik (D-Optimality and D-Efficiency)***: *D*-optimalite kriteri deneysel tasarımın, moment matrisindeki

$$M = \frac{X' X}{N} \quad (3.44)$$

bazı özelliklere ulaşmak amacıyla seçilmesi nosyonuna dayanır. Ölçeklenmiş yayılım matrisi (scaled dispersion matrix) olarak da adlandırılan bu matrisin tersi,

$$M^{-1} = N(X' X)^{-1} \quad (3.45)$$

regresyon katsayılarının  $N/\sigma^2$  ile ölçeklendirilmiş varyans ve kovaryanslarını içerir. Dolayısıyla tasarım yoluyla moment matrislerinin kontrolü, varyans ve kovaryansların kontrolünü de ima eder.

Bu açıklamalardan açığa çıkan önemli bir norm, p modeldeki parametre sayısını göstermek üzere moment matrisinin

$$|M| = \frac{|X'X|}{N^p} \quad (3.46)$$

determinantıdır. Bu doğrultuda D-optimal bir tasarım, söz konusu determinantın

$$\text{Max}_{\zeta} |M(\zeta)| \quad (3.47)$$

maksimize edilmesini işaret etmektedir. Maksimizasyon işleminden kasıt tüm  $\zeta$  tasarımlardan maksimum olanın alınmasıdır. Sonuçta, doğal olarak bir  $\zeta^*$  tasarımın D-etkinliği

$$D_{eff} = \left( |M(\zeta^*)| / \text{Max}_{\zeta} |M(\zeta)| \right)^{1/p} \quad (3.48)$$

olarak tanımlanabilir. Bu D-etkinlik tanımı, farklı örneklem hacimlerine sahip D-etkin tasarımların karşılaştırılmasına imkan verir. D-etkinlik kavramı, tasarımların yapılandırılması ve karşılaştırılması için basit ve enteresan bir tek sayı kriteri (single number criterion) önerir ve açıkça regresyon katsayıları tahmini nosyonunu barındırır. D-etkin tasarımlar, katsayıların genelleştirilmiş varyanslarının nispeten küçük değerler alması ile sonuçlanır (Giovannitti-Jensen – Myers, 1989: 159).

**A-Optimalite:** A-optimalite kavramı, regresyon katsayılarının tekil varyansları ile ilişkilidir. D-optimalite kriterinin aksine, katsayılar arasındaki kovaryanslar dikkate alınmamaktadır. Regresyon katsayılarının varyanslarının,  $(X'X)^{-1}$  matrisinin diyagonal elemanlarından oluştuğu açıktır. A-optimalite kriteri, tr ifadesi izi temsil etmek üzere

$$\text{Min}_{\zeta} \text{tr}[M(\zeta)]^{-1} \quad (3.49)$$

biçiminde tanımlanabilir. Bu ifade, katsayıların varyansları toplamını (N ile ağırlıklandırılmış) göstermekte olup, bir tasarımın  $(X'X)^{-1}$  matrisinin diyagonal elemanları  $((X'X)^{-1}$  matrisinin izi olarak adlandırılmaktadır) toplamının minimize edilmesi koşuluyla, A-optimal bir tasarım olabileceğini anlatmaktadır. Sonuç olarak, bir A-optimal tasarım, regresyon katsayılarının varyansları toplamını minimize etmektedir.

**G-Optimalite:** G-optimalite kriteri, önceki başlıklar altında bahsi geçen ölçekli tahmin varyansı  $v(x) = NVar(\hat{y}) / \sigma^2$  kavramı üzerine odaklanmaktadır. G-optimalite ve buna karşı gelen G-etkinlik kavramı, tasarım bölgesindeki maksimum  $v(x)$ 'in

$$\text{Min}_{\zeta} \left[ \text{Max}_{x \in R} v(x) \right] \quad (3.50)$$

minimizasyonunu vurgulamaktadır.  $[M(\zeta)]^{-1}$ 'de  $v(x) = NVar(\hat{y}) / \sigma^2$  kuadratik bir formda olduğundan dolayı bu ifade

$$\text{Min}_{\zeta} \left[ \text{Max}_{x \in R} \left\{ x^{(m)'} [M(\zeta)]^{-1} x^{(m)} \right\} \right] \quad (3.51)$$

ifadesine eşittir. Dolayısıyla bir tasarım, tasarım bölgesindeki maksimum ölçekli tahmin varyansını minimize ediyor ise, G-optimal tasarım olarak nitelendirilebilir. p adet parametreye sahip bir model için G-etkinlik

$$G_{eff} = \frac{p}{\text{Max}_{x \in R} v(x)} \quad (3.52)$$

şeklinde tanımlanabilir.

**V-Optimalite:** Bu kriter de, G-optimalite kriteri gibi tahmine yönelik bir kriterdir. V-optimalite, tasarım bölgesindeki  $x_1, x_2, \dots, x_m$  ilgili noktalar kümesindeki tahmin varyansını dikkate alır. Söz konusu noktalar kümesi, seçilen tasarımdaki aday bir küme olabileceği gibi, deneyi yapan uygulamacı için özel bir öneme sahip birtakım noktalar topluluğu da olabilir. Söz konusu m nokta seti üzerindeki ortalama tahmin varyansını minimize eden tasarım V-optimal tasarımdır.

***Q-Optimalite:*** Bir diğer önemli tasarım optimalitesi kriteri de, *Q*-optimalite kriteridir. *V*-kriteri ile ilişkili olan *Q*-optimal tasarım kriteri,  $K = \int_R dx$  olmak üzere

$$\text{Min}_{\zeta} \frac{1}{K} \int_R v(x) dx = \text{Min}_{\zeta} Q(\zeta) \quad (3.53)$$

ifadesi ile verilebilir. Buradan bir  $\zeta$  tasarımı için kriter

$$\text{Min}_{\zeta} \left\{ \frac{1}{K} \int_R x^{(m)'} [M(\zeta)]^{-1} x^{(m)} dx \right\} = \text{Min}_{\zeta} Q(\zeta) \quad (3.54)$$

biçiminde ifade edilebilir. Böylelikle *Q*-optimal bir tasarım, ortalama ölçekli tahmin varyansını minimize eder. *Q*-kriterinden hareketle bir  $\zeta^*$  tasarımı için *Q*-etkinlik

$$Q_{eff} = \text{Min}_{\zeta} [Q(\zeta)] / Q(\zeta^*) \quad (3.55)$$

biçiminde ifade edilebilir.

### C. TASARIMLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Tepki yüzeyi tasarımları için bilinen klasik kriterler; ortogonalite, döndürülebilirlik, etkinlik ve dirençlilik (robustness) olarak sıralanabilir. Ortogonal tasarımlar, tasarım matrisinin sütun vektörlerinin ortogonal olduğu ve bu durumun girdi değişkenlerinin korelasyonsuz olmasını işaret ettiği tasarımlardır. Söz konusu tasarım, döndürüldüğünde aynı yapının devam ettiği, tahmin edilen tepkinin varyansının tasarım uzayı genelinde değişmediği tasarımlar döndürülebilir tasarımlardır. Dirençlilik kriteri, tasarım üzerinde varsayımların ihlali durumunda tasarımın performansını ölçen bir kriterdir. Etkinlik kriteri ise, en temel anlamda küçük bir tahmin varyansına sahip olmak olarak tanımlanabilmektedir. Söz konusu kriterlerden ortogonalite ve döndürülebilirlik, modelin formunu vurgulayan bir varsayımda bulunmadıklarından dolayı modelden bağımsız olarak nitelendirilirken, dirençlilik ve etkinlik kriterleri ise, modele bağımlı olarak tanımlanmalarının yanı sıra, rassal hata teriminin yapısı hakkında da varsayımda bulunurlar (Chen, 2006: 280).

Uygun bir tasarımın seçilmesi problemi, çok yönlü ve aşılması güç bir sorundur. Tepki yüzeyi tasarımlarının aşağıda verilen bir takım özellikleri, içinde bulunan deneysel koşullara göre önemli olmaktadır. Uygun tasarımlara ilişkin söz konusu özellikler, şu şekilde sıralanabilir (Box – Draper, 2007: 461).

1. İlgilen bölge  $R$ 'de yeterli bir bilgi dağılımı meydana getirmelidir.
2. Uydurulan  $x$  ve  $\hat{y}$  değerlerinin gerçek değerlere mümkün olduğunca yakın olmasını sağlamalıdır.
3. Uyum eksikliğini iyi bir biçimde tespit etmelidir.
4. Tüm dönüşümlerin tahminine olanak sağlamalıdır.
5. Deneilerin bloklarda gerçekleştirilmesine olanak sağlamalıdır.
6. Tasarımların adımsal bir strateji takip edilerek kurulmasına imkan vermelidir.
7. Hatanın içsel bir tahminini sağlamalıdır.
8. Klasik normal teori varsayımlarının ihlali ve yabancı gözlemlere karşı duyarsız olmalıdır.
9. Minimum deneme sayısı gerektirmelidir.
10. Görsel bir değerlendirmenin hazırlanmasına imkan vermek için basit bir veri deseni sağlamalıdır.
11. Hesaplamalarda basitlik sağlamalıdır.
12. Kestirici değişkenler ( $x$ 'ler) kümesinde hatalar olması durumunda iyi davranmalıdır.
13. Kestirici değişkenler için pratik olmayan çok sayıda düzey gerektirmemelidir.
14. “*Sabit varyans*” varsayımının kontrolüne olanak sağlamalıdır.

Burada verilen gereksinimler, bazı özel durumlarda çelişebilmekte veya çakışabilmektedir. Böyle bir durumda, tasarım seçimi için verilecek karar, en iyi uzlaşmayı sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Tepki yüzeyi tasarımlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında sayısal kriterler veya özellikle son yıllarda sıklıkla uygulanan grafiksel yöntemler kullanılmaktadır.

## 1. Sayısal Kriterler

Yıllar boyunca, tasarımların değerlendirilmesi ve karşılaştırılması için çeşitli metotlar önerilmiştir. 1974 yılının başlangıcında bu amaçla, tasarım optimalitesi kriterlerine dayanan çeşitli etkinlik ölçüleri kullanılmıştır. Snee (1985) doğrusal bağıntı (collinearity) teşhisi, varyans büyütme faktörü (variance inflation factors) ve öz analizlerini (eigen analysis), Montgomery ve Voth (1994) doğrusal bağıntı ve kaldıraç ölçülerini (leverage measures) kullanarak, kısıtlanmış tasarımların karşılaştırılmasını ele almışlardır (Piepel, 2006: 293).

Önerilen deneysel tasarımlar kullanılmaya başlanmadan önce araştırmacı, tasarım seçiminde  $\text{var}(\hat{y}(x))$  'a ilişkin olan kriterlerden biri olarak, tasarım optimalitesi kriterlerini düşünebilir. Tasarım optimalitesi kriterlerinin çoğu,  $X'X$  matrisinin “*optimal özellikleri*” ne dayanan tek-değerli ölçüler (single-value measures) olarak nitelendirilir. Birkaç tasarımın önerilmesi durumunda, tasarımların optimalite özellikleri tasarım seçimine yardımcı olmak amacıyla karşılaştırılabilir.  $X'X$  matrisinin özellikleri ile tasarımlar değerlendirilirken, ampirik modelin yeterli ve asıl model olduğu varsayıldığından, optimalite kriteri son derece model bağımlı bir kriterdir (Borkowski, 2006: 353).

Tepki yüzeyi tasarımlarının inşa edilmesinde ve değerlendirilmesinde, tek-değerli kriterler olarak adlandırılan  $D$ -,  $G$ - ve  $I$ - optimalite kriterleri, pratikte en çok kullanılan kriterlerdendir. Birinci derece modeller için,  $2^k$  faktöriyel ve  $2^{k-p}$  kesirli faktöriyel (çözünürlük III veya daha yüksek olarak) tasarımların  $D$ -,  $G$ - ve  $I$ - optimal oldukları gösterilmiştir. İkinci derece modeller için de, Merkezi Bileşik tasarımlar ve Box-Behnken tasarımlarının  $D$ - ve  $G$ - optimal olmayıp, yüksek derecede  $D$ - ve  $G$ - etkin oldukları gösterilmiştir (Anderson-Cook – Borror – Montgomery, 2009: 631).

Tek-değerli optimalite kriterleri (single value optimality criterion), genel olarak modelin tahmin kabiliyeti bakımından, söz konusu tasarımın desteklenmesi ve değerlendirilmesi hakkında mantıklı bir dayanak olarak kabul edilebilmektedir. Ancak bu kriterler çoğu zaman modeli desteklemesi açısından, tasarımın kompleksliğini doğru bir biçimde yansıtamamaktadır. Dolayısıyla, tek-değerli kriterlerin modeli destekleyecek

tasarımın yeterliliğini yakalayabileceği ve yanıltıcı olabileceği durumların belirlenmesi oldukça önemlidir (Myers *et al.*, 1992: 10).

## 2. Grafiksel Metotlar

Bazı tepki yüzeyi tasarımları için, tasarım bölgesinde tepkilerin iyi ve nispeten zayıf tahmin edildiği bölgeler bulunmaktadır. Tasarım konsepti bağlamında, varyans fonksiyonunun tasarım uzayının tüm bölgelerinde sabit olması düşüncesi, ütöpik bir durumu temsil eder. Konuyla ilgili pratisyen, tasarımın tahmin kabiliyetini ve istikrarını toplam olarak değerlendirmelidir. Bu toplam değerlendirmenin görüntüsü ise, çoğu zaman sabit sayısal kriterler (scalar numerical criterion) ile sağlanamamaktadır. Deney tasarımı çatısı altında, özellikle tepki yüzeyi tasarımlarının performansını değerlendirmek çok boyutlu bir problem olarak kabul edilir. Bu bağlamda, çok daha etkili bir yaklaşım olarak, tasarımın tahmin varyansı karakteristiklerini yansıtan grafiksel tekniklerin, bu tasarımların karşılaştırılmasında ve değerlendirilmesinde kullanılması benimsenmiştir (Giovannitti-Jensen – Myers, 1989: 160).

Grafiksel yöntemler, tasarım uzayında tasarım performansı hakkında tek-değerli kriterlerden daha fazla bilgi vermektedir. Temelde tahmin varyansına dayanan varyans iz grafiği (variance trace plot), varyans yayılım grafiği (variance dispersion graph), varyans kantil grafiği (variance quantile graph), kesirli tasarım uzayı grafiği (fraction of design space graph) bu yöntemlerden birkaçını oluşturmaktadır (Piepel, 2006: 293).

### a. Varyans yayılım grafiği

Grafiksel yöntemler, tasarımların değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında kullanılan en temel yöntemlerden biridir. Başlangıçta, tasarım seçimi konusunda tek-değerli kriterlere alternatif olarak Giovannitti-Jensen ve Myers (1989) tarafından geliştirilen ve Myers, Vining, Giovannitti-Jensen ve Myers (1992) tarafından da ele alınan varyans yayılım grafikleri, deneysel bölgede tahmin varyansı özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bir grafiksel değerlendirme tekniğidir (Borkowski, 1995: 399). Pratisyenlerin, ilgilenilen deneysel bölge üzerinde tepki tahminlerinin kalitesi ile ilgilenmeleri halinde, varyans yayılım grafiklerinin; tasarımların karşılaştırılmasında *D*-, *V*- ve *G*-etkinlik gibi tek-değerli kriterlerden ekstrem bir biçimde daha bilgilendirici ve



kullanışlı olduğu kanıtlanmıştır (Liang *et al.*, 2006: 761). Özellikle standart dışı durumlarda tek-değerli kriterler, bir ikinci derece modeli destekleyecek tasarımın kompleksliğini, genellikle doğru bir biçimde yansıtamamaktadır (Myers *et al.*, 1992: 10). Ayrıca bahsedilen bu grafiksel metodoloji, ilgilenilen tasarımdaki merkez denemelerin tekrarının etkisinin değerlendirilmesinde de etkili bir araç görevi üstlenir (Borkowski, 2012: 9).

Giovannitti-Jensen ve Myers klasik tepki yüzeyi tasarımları üzerine odaklanmış olup, tahmin varyansı özelliklerinin tasarım uzayının genel merkezinden başlayarak eşmerkezli kürelere taşınmasını düşünmüşlerdir (Goldfarb – Montgomery, 2006: 331). İki den fazla faktör olması durumunda, tasarım için tahmin edilen bir değer varyansının homojenliğini görselleştirmenin tek yolu, varyans yayılım grafiğinin kullanılmasıdır (Lawson, 2012: 41). Söz konusu grafik, çok boyutlu bölge genelinde ölçekli tahmin varyansını iki boyutlu bir grafik şeklinde sunar (Anderson-Cook – Ozol-Godfrey, 2006: 382).

Varyans yayılım grafiği, tahmin varyansı özelliklerinin az ama öz bir değerlendirmesine imkan sağlayan bir “*ayak izi*” temin eder. İki boyutlu bir grafik olan varyans yayılım grafiği, ilgilenilen bölgede çeşitli küreler üzerindeki minimum ve maksimum tahmin varyanslarını gösterir. Bunların yanı sıra söz konusu grafik, verilen küre yüzeyindeki ortalama tahmin varyansı olan “*küresel varyans*” ı görüntüler ve bazı bakımlardan “*tipik*” performansı tarif eder. Sonuçta grafik, analistin tasarımın iyi veya yetersiz tahmin yaptığı alanlara göz gezdirmesine olanak sağlar (Myers *et al.*, 1992: 1). Bu bağlamda, öncelikle küresel varyansın açıklanması ve ardından varyans yayılım grafiklerinin tanıtılması yerinde olacaktır.

### **(1). Ortalama küresel tahmin varyansı**

Genellikle tepki yüzeyi metodolojisinde, verilen bir bölgede tepkinin tahmin edilen varyansı, bölgenin tasarım merkezinden uzaklığından çok, bir fonksiyon olarak nitelendirilir (Giovannitti-Jensen – Myers, 1989: 160). Tepki yüzeyi metodolojisinde özel deneysel bir durum için uygun modelin,

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (3. 56)$$

biçiminde olacağı varsayımı altında;  $Y$   $n \times 1$  boyutlu tepkiler vektörünü,  $X$   $n \times p$  boyutlu tasarım değişkenleri matrisini,  $\beta$   $p \times 1$  boyutlu bilinmeyen katsayılar vektörünü ve  $\varepsilon$   $n \times 1$  boyutlu rassal hatalar vektörünü temsil etmektedir. Rassal terimler hakkındaki 0 ortalama ve  $\sigma^2$  varyansla bağımsız ve özdeş dağıldıkları varsayımı,  $E(\varepsilon) = 0$  ve  $\text{var}(\varepsilon) = \sigma^2 I$  ifadeleri ile belirtilebilir.  $\beta$ 'nin olağan en küçük kareler tahmini

$$\hat{\beta} = (X' X)^{-1} X' Y \quad (3. 57)$$

şeklinde ifade edilebilir.  $x$ , tasarım bölgesine yerleştirilen keyfi bir nokta ve  $f(x)$  varsayılan modele uyum sağlayacak  $x$ 'lerin uygun bir genişlemesi olsun. Bu durumda keyfi  $x$  noktasında uydurulan tepki

$$\hat{Y}(x) = f(x)' \beta \quad (3. 58)$$

ifadesi ile elde edilebilir. Uydurulan modelin ikinci dereceden tepki yüzeyi modeli olması durumunda model (3. 58)

$$\hat{Y}(x) = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (3. 59)$$

biçimine dönüşür. Söz konusu  $x$  noktasında tahmin edilen tepkinin varyansı

$$\text{Var}[\hat{Y}(x)] = \sigma^2 f(x)' (X' X)^{-1} f(x) \quad (3. 60)$$

şeklindedir. Denklem (3.60)'dan sabit  $\sigma^2$  dışında tahmin varyansının, sadece spesifik  $x$  bölgesinde varsayılan modelin formuna ve tasarıma bağlı olduğu görülmektedir. Denklem (3. 60)'da  $\sigma^2$  genellikle bilinmediğinden, söz konusu denklem

$$\frac{\text{Var}[\hat{Y}(x)]}{\sigma^2} = f(x)' (X' X)^{-1} f(x) \quad (3. 61)$$

biçiminde yazılabilir.

Varyans yayılım grafiği, ilgilenilen bölge genelinde küreler üzerindeki minimum, maksimum ve “küresel” ortalama tahmin varyansı değerlerini verir. Yarıçapı  $r$  olan küre üzerindeki ortalama tahmin varyansı,

$$V_r = \frac{1}{\psi \sigma^2} \int_{U_r} Var[\hat{Y}(x)] dx \quad (3. 62)$$

ifadesi ile belirtilebilir. Söz konusu eşitlikte  $U_r = \left\{ x : \sum_i^k x_i^2 = r^2 \right\}$  ve  $\psi = \int_{U_r} dx$  şeklinde tanımlanmaktadır.

## (2). Küresel tahmin varyansının özellikleri

Ortalama küresel tahmin varyansının, önceki satırlarda denklem (3. 62) ile ifade edilebileceğinden söz edilmiş idi. Ayrıca Hussey, Myers ve Houck (1987), söz konusu küresel varyansın,

$$V_r = tr S(X'X)^{-1} \quad (3. 63)$$

şeklinde ifade edilebileceğini belirtmişlerdir. Denklemde  $S$ ,  $U_r$  tarafından tanımlanan hiper küre alanındaki bölge momentleri matrisini

$$S = \psi \int_{U_r} f(x) f'(x) dx \quad (3. 64)$$

denklemleri ile temsil etmektedir (Giovannitti-Jensen – Myers, 1989: 161).

Denklem (3. 63)'deki genel form dikkate alınarak, bölge momenti  $\sigma_2 = r^2/k$  kullanıldığında,  $\lambda_i$ 'nin  $(X'X)^{-1}$ 'in öz değerlerini temsil ettiği

$$V_r = 1 + \frac{Nr^2}{k} \sum_{i=1}^k \lambda_i \quad (3. 65)$$

ifadesine ulaşılır. Sonuç olarak, bu ifade  $r$  yarıçaplı bir küre üzerindeki ortalama tahmin varyansının,  $r^2$  ve  $(X'X)^{-1}$ 'in öz değerlerinin ortalamasının basit bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Birinci dereceden modellerin söz konusu olduğu durumlarda,

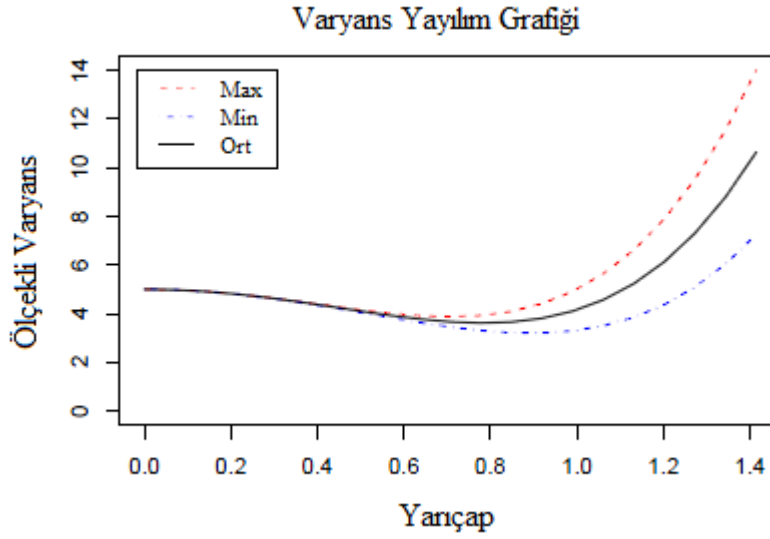
$$VMAX_r = \max_{x \in U_r} \frac{N \text{Var}[\hat{Y}(x)]}{\sigma^2} = 1 + N(\lambda_{\max})r^2 \quad (3.66)$$

ve

$$VMIN_r = \min_{x \in U_r} \frac{N \text{Var}[\hat{Y}(x)]}{\sigma^2} = 1 + N(\lambda_{\min})r^2 \quad (3.67)$$

denklemleri geçerli olup, denklemlerde  $\lambda_{\min}$  ve  $\lambda_{\max}$ 'in sırasıyla en küçük ve en büyük öz değerleri temsil ettiği açıktır. İkinci derece tepki yüzeyi tasarımları için, benzer fonksiyonlar bulunmamaktadır (Borkowski, 1995: 402).

$V_r$ ,  $VMIN_r$  ve  $VMAX_r$  varyans yayılım grafiğinin üç grafiksel bileşenini oluştururlar.  $VMIN_r$  ve  $VMAX_r$  grafikleri, ölçekli tahmin varyansı  $v(x) = N\text{Var}(\hat{y}) / \sigma^2$ 'nin, bir küresel tasarım uzayı genelindeki nispi dengesine ilişkin bilgi sağlar. Ayrıca varyans yayılım grafiği, sırasıyla %100 ve %50 G-etkinliğe karşı geldiği gösterilen ve p modeldeki parametre sayısını göstermek üzere,  $v(x) = p$  ve  $v(x) = 2p$  ifadeleriyle temsil edilen iki yatay çizgi içermektedir (Anderson-Cook – Ozol-Godfrey, 2006: 382). Özellikle tasarım uzayında p,  $VMAX_r$ 'nin optimal değeri olduğundan,  $v(x) = p$ 'de yatay bir çizgi yer almalıdır (Borkowski, 2012: 8). Şekil 3.16'da verilen varyans yayılım grafiği, bir yüzey merkezli küp tasarımı için çizilmiştir. Grafikten maksimum, minimum ve ortalama ölçekli tahmin varyansı değerlerini gözlemlemek mümkündür.



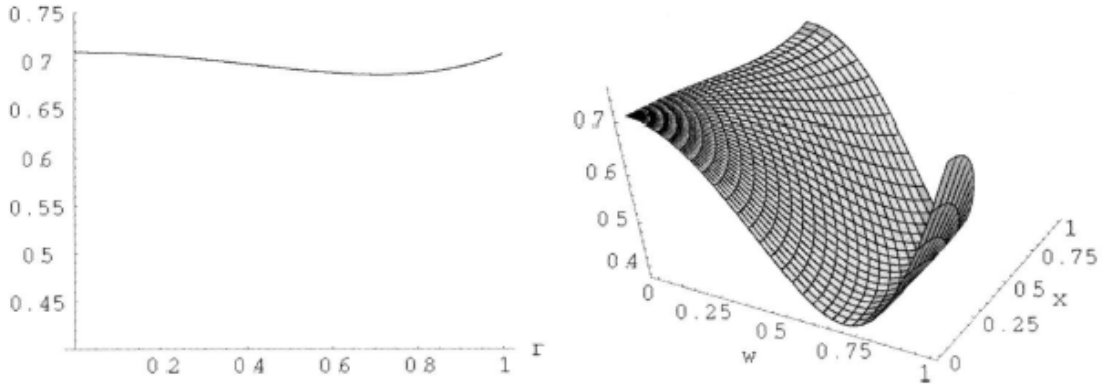
**Şekil 3.16. Bir Yüzey Merkezli Küp Tasarımı için Varyans Yayılım Grafiği**  
(Kaynak: Lawson, 2012, s. 42)

Tasarımların yapılandırılmasında döndürülebilirlik, üzerinde düşünülmesi gereken önemli bir özelliktir. Özellikle polinomiyal modeller gibi bazı grup modellerde, bu özellik son derece önemlidir. Bu bağlamda Giovannitti-Jensen ve Myers (1989), varyans yayılım grafiği ile döndürülebilirliğin eksikliği veya yokluğu (lack of) ile derecesinin değerlendirilebileceğini öne sürmüşlerdir. Döndürülebilir bir tasarım, varyans yayılım grafiğinde tek bir eğri ile temsil edilir. İlgilenilen tüm bölge üzerinde sabit varyanslı bir tasarım, x eksenine paralel bir doğru ile temsil edilebilir (Ekman, 1994: 11).

### (3). Üç-boyutlu varyans yayılım grafiği

Karışım süreç deneyleri (mixture-process experiments) söz konusu olduğunda, tahmin varyansını incelemek amacıyla kullanılan ve standart varyans yayılım grafiklerinin üç boyuta genişletilmesi ile elde edilen üç-boyutlu varyans yayılım grafikleri kullanılır. Standart iki boyutlu varyans yayılım grafiğinde, x eksenine karşı gelen büzüşme faktörü (shrinkage factor) hem süreç hem karışım tasarım uzayları için geçerli idi. Goldfarb, Borrer, Montgomery ve Anderson-Cook (2004) tarafından geliştirilen bu grafiklerde, karışım uzayı büzüşme faktörü x ekseninde, süreç uzayı büzüşme faktörü y ekseninde ve yüzey tahmin varyansı, z ekseninde yer alır. Böylelikle tahmin varyansı, her iki uzayda da gözlemlenebilir. Büzüşme değerleri, orijinal tasarım uzayının çarpanları (multipliers) olarak düşünülebilir (Goldfarb *et al*, 2004a: 110). Küresel tasarım uzayları için büzüşme faktörü, büzüşen kürenin yarıçapıdır (Liang *et al*,

2006: 762). Şekil 3.17’de maksimum tahmin varyansı için, klasik ve üç boyutlu varyans yayılım grafikleri görülmektedir.



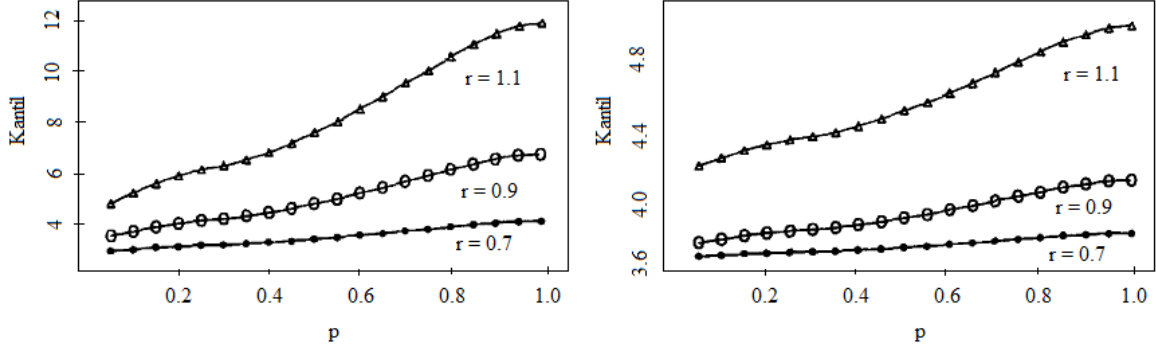
**Şekil 3.17. Klasik Bir Varyans Yayılım Grafiği (solda) ve Üç Boyutlu Bir Varyans Yayılım Grafiği (sağda) (Kaynak: Liang *et al.*, 2006, s. 763)**

Üç-boyutlu varyans yayılım grafikleri, kombine edilmiş karışım-süreç uzayında, bir tasarımın tahmin varyansı özelliklerinin değerlendirilmesine imkan verir. Bu grafikler yüzey veya kontur grafikleri olarak çizilebilir. Grafikler, karışım süreç deneylerinde deneme sayılarının kontrol edilemeyecek düzeylere ulaştığında, deney yapmak için uygun kesirlerin seçilmesinde yardımcı olan harika bir araç olarak tanımlanır (Goldfarb *et al.*, 2004a: 121).

### **b. Kantil yayılım grafiği**

Kantil yayılım grafikleri Khuri, Kim ve Um (1996) tarafından, verilen bir küre üzerinde tahmin varyansının kantillere göre dağılımını açıklamak için önerilmiştir. Bu yöntem, ilgilenilen bölgenin orijininde merkezlenen  $r$  yarıçaplı bir küre üzerinde, rassal seçilen çok sayıda noktada, ölçekli tahmin varyansının değerlendirilmesi ve sonuçta ulaşılan kantillerin grafiksel olarak gösterilmesi ilkesine dayanır. İlgilenilen bölge içinde farklı yarıçaplara karşı gelen bu kantil grafikleri, tasarımın tahmin varyansı üzerindeki etkisini açıkça betimler. Tepki yüzeyi tasarımlarının, tahmin yeteneği bazında karşılaştırılmasında etkili bir araç olan bu grafikler, ayrıca tasarımların döndürülebilirlik derecelerini de betimler. Bu grafikler, tahmin varyansının dağılımı hakkında varyans yayılım grafiğinden elde edilenden daha kapsamlı ve doğru bilgi sağlamaktadır (Khuri – Kim – Um, 1996: 405). Fakat, bu grafiksel yöntemin çok fazla grafik çizimi gerektirmesi ve bazı pratik güçlüklerinden dolayı yapılandırılması ve

yorumlanması zordur (Liang, 2005: 22). Şekil 3.18’de, en yaygın kullanılan iki tasarım için çizilen kantil yayılım grafiği örnekleri verilmiştir.



**Şekil 3.18. Bir Merkezi Bileşik Tasarım (solda) ve Box-Behnken Tasarımı (sağda) için Kantil Yayılım Grafiği (Kaynak: Khuri – Kim – Um, 1996, s. 401)**

Khuri, Harrison ve Cornell (1999), karışım deneylerinde ilgilenilen bölgenin kısıtlandırılmış olması durumunda, kantil yayılım grafiğinin kullanılmasını önermişlerdir. Daha sonra, Robinson ve Khuri (2003) lojistik regresyon söz konusu olduğunda, bu grafiksel teknik yardımıyla tasarımların karşılaştırılmasında hata kareler ortalaması tahmininin bir kriter olarak kullanılabilirliğini düşünmüşlerdir. Ayrıca bu grafikler, tasarımın model parametrelerine olan bağımlılığını açık bir biçimde resmeder (Robinson – Khuri, 2003: 48). Khuri ve Mukhopadhyay (2006), Poisson dağılımlı verilerin temsil ettiği log-linear modeller durumunda, tasarımların karşılaştırılmasında kantil yayılım grafiklerini kullanmışlardır (Khuri – Mukhopadhyay, 2010:140).

### **c. Kesirli tasarım uzayı grafiği**

Kesirli tasarım uzayı tekniği, Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) tarafından geliştirilmiştir. Bu teknik, bir tasarımın tahmin yeteneğinin daha iyi kavranması amacıyla, varyans yayılım grafiğini tamamlayıcı bir tekniktir. Bu teknikle, ölçekli tahmin varyansının önceden belirlenmiş herhangi bir değere eşit veya ondan daha küçük olduğu yerlerde, kesirli tasarım uzayının belirlenmesi yoluyla araştırmacıya daha detaylı bilgi sağlanır. Kesirli tasarım uzayı grafiği, ölçekli tahmin varyansı değerlerinin olası oranları ve aralıklarına dayanan bir bölgede, ölçekli tahmin varyansının dağılımı hakkında bilgi verir. Verilen bir değere eşit veya bu değer altında bir kesirli tasarım uzayı değeri, daha iyi bir tasarım anlamına gelir (Zahran – Anderson-Cook – Myers, 2003: 377-380).

Tasarımların karşılaştırılmasında, tahmin performansını ölçen birkaç ölçü bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan ölçekli tahmin varyansı;  $\text{var}(\hat{y}_0)$ , tasarım uzayındaki özel bir bölge için tahmin edilen ortalama varyansı ve  $x_0$  ilgilenilen bölgedeki bir noktayı temsil etmek üzere,

$$v(x_0) = \frac{(N \text{var}(\hat{y}_0))}{\sigma^2} = N x_0' (X' X)^{-1} x_0 \quad (3. 68)$$

şeklinde tanımlanır. Tahmin varyansı (PV), N tasarımdaki deneme sayısını ifade etmek üzere,

$$PV = \frac{v(x_0)}{N} = \frac{\text{var}(\hat{y}_0)}{\sigma^2} = x_0' (X' X)^{-1} x_0 \quad (3. 69)$$

biçiminde tanımlanır.  $v$ , ölçekli tahmin varyansının önceden belirlenmiş herhangi bir değerini  $k$ , faktör sayısını ve  $\Psi$  toplam tasarım hacmini göstermek üzere kesirli tasarım uzayı kriteri (FDS)  $A = \{(x_1, \dots, x_k) : v(x) < v\}$  olmak üzere,

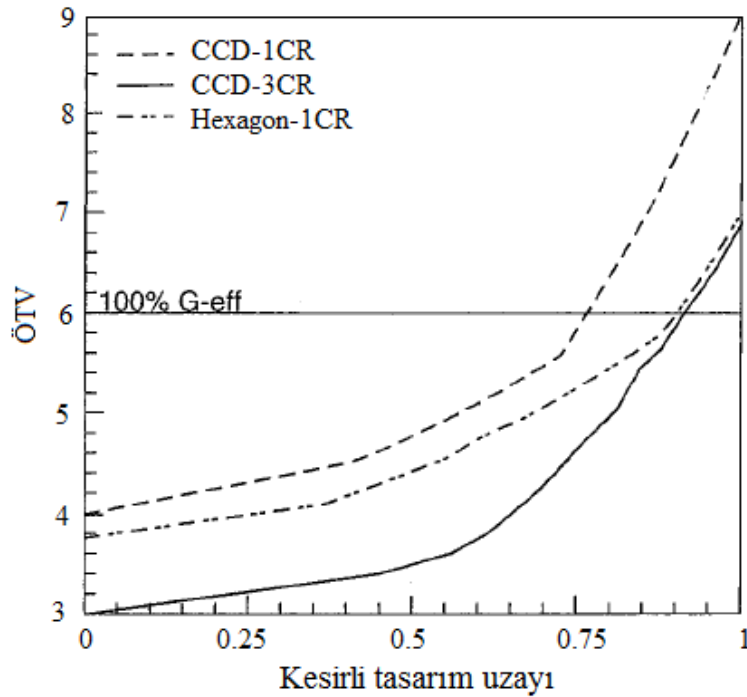
$$FDS = \frac{1}{\Psi} \int_A \dots \int dx_k \dots dx_1 \quad (3. 70)$$

olarak tanımlanır. Kesirli tasarım uzayı grafiğinde, ölçekli tahmin varyansının minimum değeri 0 ile ve maksimum değeri 1 ile gösterilir. İyi bir tasarım, küçük değerlerle başlar ve yayvan bir biçimde kalır. Tasarımları karşılaştırırken, ölçekli tahmin varyansı bakış açısıyla düşük değerli ve yayvan eğriler tercih edilir (Goldfarb – Montgomery, 2006: 333).

Kesirli tasarım uzayı grafikleri de, varyans yayılım grafikleri gibi tasarım uzayı genelindeki ölçekli tahmin varyansını iki boyutta özetleyen yöntemlerdir. Varyans yayılım grafikleri, üç ayrı eğri ile minimum, maksimum ve ortalama ölçekli tahmin varyansının tasarım uzayı merkezinden farklı uzaklıklardaki değerlerini göstermekte idi. Kesirli tasarım uzayı grafikleri ise, Şekil 3.19'dan da görüldüğü üzere, tasarım uzayındaki ölçekli tahmin varyansı değerleri aralığını tek bir çizgi ile özetleyerek, rakip tasarımlar arasında doğrudan karşılaştırmaların daha iyi bir biçimde yapılmasını sağlar. Varyans yayılım grafiği, tahminlerin iyi ve kötü olduğu bölgeleri gösterebilirken, kesirli tasarım uzayı grafikleri farklı tasarımlar arasındaki doğrudan karşılaştırmalara olanak sağlar (Anderson-Cook, 2007: 124).



Varyans yayılım grafiği ile kesirli tasarım uzayı grafiği arasındaki bir fark; varyans yayılım grafiğinin temsil edilen tasarım uzayının oranına bakılmaksızın, büzüşme değeri veya her bir yarıçap için, grafikte eşit ağırlık vermesidir. Kesirli tasarım uzayı grafiği ise, tasarım uzayının kesirleri ile orantılı ağırlıklar verir (Goldfarb *et al.*, 2004b: 170). Kümülatif kesirlerin grafiği olan bu grafik, araştırmacıya uygun tasarım bölgesinde tahmin varyansının bir taslağını verir. Kesirli tasarım uzayı grafiği, eğer bir tasarım, tasarım uzayının tüm parçaları için daha küçük ölçekli veya ölçeksiz tahmin varyansına sahip ise, o tasarımın tahmin performansı açısından diğer tasarımlara baskın olduğunu gösterir (Li *et al.*, 2009: 438).



**Şekil 3.19. Bir Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği ile Üç Tasarımın Karşılaştırılması**

(Kaynak: Anderson-Cook, 2007, s. 124)

Bu grafikler, iki veya daha fazla tasarımın karşılaştırılması durumunda, araştırmacıya söz konusu tasarımların G-etkinlik ve V-ortalama değeri gibi ölçekli tahmin varyansı dağılımlarını tek bir eğri ile karşılaştırma imkanı verir. Söz konusu grafikler çizilirken, öncelikle tasarım uzayından örneklenen bölgeye karşı gelen, çok sayıda ( $n$ ) ölçekli tahmin varyansı değeri elde edilir. Daha sonra, bu değerlerin sıralanarak kantillere ( $1/n$ ,  $2/n$ , ...) karşı çizilmesiyle grafik tamamlanmış olur. Varyans yayılım grafiğine benzer biçimde, kesirli tasarım uzayı grafiklerine de bakılarak bir tasarımın %100

veya %50 G-etkinlikleri anlaşılabilir. Minimum ölçekli tahmin varyansı değerine daha yakın bir kesirli tasarım uzayı değeri, daha iyi bir tasarımı işaret eder. Ayrıca, daha yassı bir doğru, tasarımın kesirli tasarım uzayı dağılımının daha istikrarlı (stable) olduğunu gösterir (Anderson-Cook – Ozol-Godfrey, 2006: 383).

Bir tasarımın kestirim performansına ilişkin tüm resmi anlayabilmek için, hacmi göz önüne almak gerekir. Burada anlatılan yöntem, herhangi bir önceden belirlenen ölçekli tahmin varyansı değerine eşit veya daha küçük bir tasarım hacmi değeri olan,  $v(x)$ 'in hesaplanmasına ilişkindir. Kesirli tasarım uzayı grafiği, her bir tasarımın hacmine karşı,  $v(x)$ 'in değişim aralığının tek bir çizimde gösterilmesi ile elde edilir. Bu nedenle, kesirli tasarım uzayı tekniği, farklı değerlerde ölçekli tahmin varyansının dağılım miktarını nicelleştirir (Zahran – Anderson-Cook – Myers, 2003: 378).

#### **IV. TEPKİ YÜZEYLERİNİN ANALİZİ**

Tepki yüzeyi metodolojisinin ardışık yapısı başlığı altında, bu tekniğin birkaç aşamadan oluşan ardışık bir prosedür olduğundan detaylı bir biçimde bahsedilmiştir. Gerçek tepki fonksiyonuna doğru bir biçimde yaklaşacak olan uygun model elde edildiğinde, bu model süreç için optimum koşulların belirlenmesi amacıyla, çeşitli analiz teknikleri ile analiz edilebilir. Metodolojinin ardışık doğası, araştırmacının süreç veya sistem hakkında araştırma yapmasını sağlar. Bu metodolojinin nihai hedefi, sistem için optimum işletim koşullarını veya işletim spesifikasyonlarını tatmin eden faktör uzayı bölgesini belirlemektir. Dolayısıyla bu amaca hızlı, doğru ve etkili bir biçimde ulaşabilmenin yolu, yeterli bir yaklaşım modelinin tahminlenmesinden geçmektedir.

##### **A. MODEL YETERLİLİĞİNİN KONTROLÜ**

Bir yaklaşım modelinin yeterliliğinin sağlanması için, daima uydurulan modelin gerçek sisteme yeterli bir yaklaşım sağladığının incelenmesi ve en küçük kareler regresyon varsayımlarının ihlal edilmediğinin doğrulanması gerekmektedir. Model yeterli uyumu sağlamadıkça, uydurulan tepki yüzeyinin analizi ve optimizasyonu zayıf veya yanıltıcı sonuçlar verecektir.

## 1. Kalıntıların Analizi

En küçük kareler uyumundan elde edilen ve  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) şeklinde tanımlanan kalıntıların analizi, model yeterliliğinin kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Kalıntıların normal dağılımı varsayımının kontrolünde, histogram ve normal olasılık grafiği uygulanan kullanışlı prosedürlerdir. Çizilen normal olasılık grafiğinde, kalıntıların yaklaşık düz bir doğru şeklinde ve ekstrem değerlerden çok merkezi değerler civarında dağılımları  $NID(0, \sigma^2)$  varsayımının sağlandığının göstergesidir. Bu varsayımın ihlali durumunda, tepki değişkeninin transformasyonu bir çözüm yolu olarak uygulanabilir.

Kalıntıların tahmin edilmiş tepkilere ( $\hat{y}_i$ ) karşı çizilen grafiğinde gözlenen rassal yapı,  $y$  değerlerine karşı gelen orijinal gözlemlerin varyanslarının sabit olduğunu işaret eder. Tepkinin varyansının,  $y$ 'nin ortalama düzeyine bağlı olması durumunda, grafikte huni biçimli bir yapı sergilenir. Bu durum, genellikle tepki değişkeninin transformasyonuna gereksinim olduğu anlamına gelir. Ayrıca kalıntıların zamana, deneyin uygulanma sırasına veya her bir girdi değişkenine karşı çizilen diyagramlarında görülen rassal olmayan desen model yetersizliğinin bir göstergesidir (Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009: 37-38).

## 2. Uyum Eksikliği Testi

Tepki yüzeyi metodolojisinde, tasarılan deneyden elde edilen verilere bir regresyon modeli uydurulur. Bu test, objektifliğinden dolayı kalıntıların subjektif olarak incelenmesinden daha güçlüdür. Ancak test prosedürü, girdi değişkenlerinin değerleri için çoklu gözlem olması halinde kullanılabilir (Freund – Wilson, 1998: 236). Başka bir deyişle, aynı girdi değişkenleri setinden iki veya daha fazla gözlem alınması, tekrar durumunda regresyon modelinin uyum yetersizliği için bir formel test yapılabilir. Bu testin yapılabilmesi için, girdi değişkenleri  $x_1, x_2, \dots, x_k$ 'nin en azından bir düzey kombinasyonundan tekrarlı gözlemler alınmalıdır. Bu tekrarlı noktalar, hata varyansı  $\sigma^2$ 'nin modelden bağımsız tahmininin elde edilmesinde kullanılır. Girdi değişkenlerinin  $i$ . düzeyinde  $n_i$  adet gözleme sahip olduğu varsayıldığında ve  $y_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  ve  $j=1, 2, \dots, n_i$  olmak üzere, tepki üzerindeki  $j$ . gözlemi gösterdiğinde toplam gözlem sayısı  $n = \sum_{i=1}^m n_i$  olur. Test prosedürü kalıntı kareler toplamının,

$$SS_E = SS_{PE} + SS_{LOF} \quad (3.71)$$

saf (pure) kalıntı kareler toplamı ( $SS_{PE}$ ) ve uyum eksikliği kalıntı kareler toplamı ( $SS_{LOF}$ ) olmak üzere iki bileşene ayrılmasını içerir.

Denklemdaki saf (pure) kalıntı kareler toplamı  $SS_{PE}$ ,  $n-m$  serbestlik derecesine sahip olup

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (3.72)$$

şeklinde hesaplanırken, uyum yetersizliği kalıntı kareler toplamı  $SS_{LOF}$ ,  $m-p$  serbestlik derecesi ile

$$SS_{LOF} = \sum_{i=1}^m n_i (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.73)$$

biçiminde hesaplanır. Bunların birbirine oranlanmasıyla elde edilen uyum eksikliği test istatistiği

$$F_0 = \frac{SS_{LOF} / (m-p)}{SS_{PE} / (n-m)} = \frac{MS_{LOF}}{MS_{PE}} \quad (3.74)$$

şeklinindedir. Denklemden  $MS_{PE}$  saf (pure) hata varyansı  $\sigma^2$ 'nin beklenen değeridir. Test sonucu  $F_0 > F_{\alpha, (m-p), (n-m)}$  olması durumunda uyum eksikliği olduğuna karar verilir.

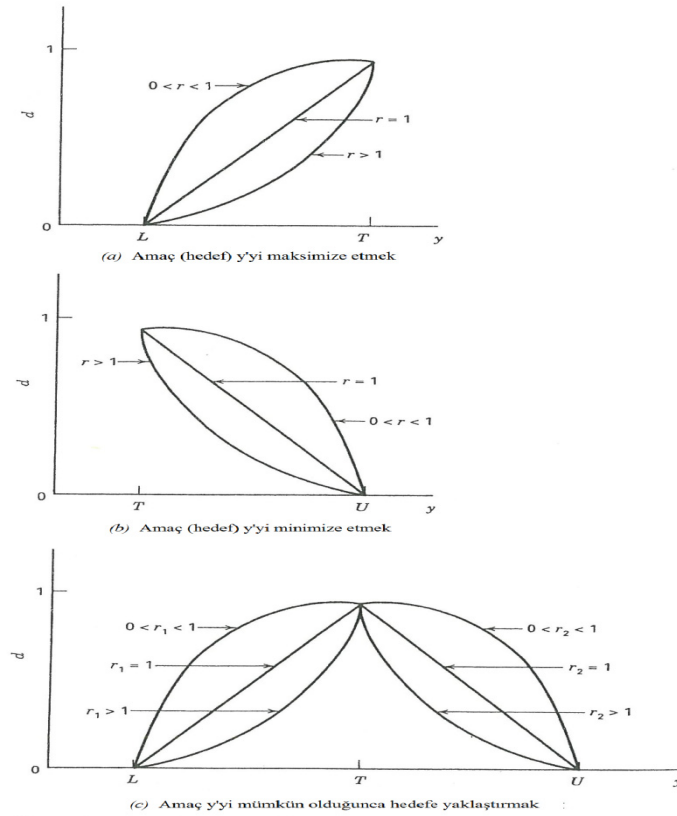
### 3. Çekicilik Fonksiyonunun Analizi

Bazı durumlarda, bir yaklaşım modelinin yeterliliğinin sağlanmasının ardından proses optimizasyonu yapılarak, tepki değişkeni veya değişkenlerinin optimum değerlerinin elde edilmesine ihtiyaç duyulabilir. Özellikle, çoklu tepkinin söz konusu olduğu durumlar, kısıtlı optimizasyon problemleri olarak ele alınır. Bu problemlerin çözümüne ilişkin, çok sayıda doğrusal olmayan programlama metodlarına dayanan formel optimizasyon teknikleri bulunmaktadır. Del Castillo ve Montgomery (1993) tarafından geliştirilen genelleştirilmiş indirgenmiş gradyan (generalized reduced gradient) metodu, Myers ve Carter (1973) tarafından tanıtılan ikili (dual) tepki yaklaşımı, Khuri ve Conlon (1981) tarafından geliştirilen uzaklık (distance) fonksiyonuna dayalı prosedür bunlardan birkaçıdır (Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009: 260-264).

Çoklu tepki durumunda kullanılan bir diğer kullanışlı yaklaşım, Derringer ve Suich (1980) tarafından geliştirilen ve çekicilik fonksiyonunu (desirability function) kullanan, eşanlı (simultaneous) optimizasyon tekniğidir. Bu yaklaşıma göre, öncelikle her bir tepki değişkeni  $y_i$ ,  $0 \leq d_i \leq 1$  aralığında değerler alabilen ve  $y_i$  hedefte ise  $d_i = 1$ , kabul edilebilir bölgenin dışında ise  $d_i = 0$  değerlerini alan bireysel (individual) çekicilik fonksiyonu  $d_i$ 'ye dönüştürülür. Ardından m adet tepki olması durumunda, tasarım değişkenleri, genel (overall) çekicilik fonksiyonuna

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_m)^{1/m} \quad (3.75)$$

dönüştürülür. Bireysel çekicilik fonksiyonları, Şekil 3.20'deki gibi yapılandırılır.



**Şekil 3.20. Eşanlı Optimizasyon için Bireysel Çekicilik Fonksiyonları (Kaynak: Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009, s. 262)**

Tepki değişkeni  $y$  için, amaç veya hedef  $T$  maksimum değer ise,

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (3.76)$$

ağırlık (weight)  $r=1$  ve çekicilik fonksiyonu doğrusaldır.  $r>1$  seçilmesi hedef değere yakınlığa vurgu yaparken,  $0<r<1$  arasında seçilmesi, bu durumu daha az önemser. Tepki değişkeni  $y$  için, hedef minimum bir değer ise çekicilik fonksiyonu,

$$d = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (3.77)$$

şeklindedir. Şekil 3. 20(c)'de görüldüğü gibi, iki taraflı çekicilik fonksiyonunda hedef alt (L) ve üst (U) limitler arasındadır ve fonksiyon

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r_1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r_2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (3.78)$$

biçiminde tanımlanır.

## B. AMPİRİK MODELLERİN ANALİZİ

İşletilebilir bölgenin tamamı üzerinde polinomial ampirik bir fonksiyon uydurulmak istendiğinde, genellikle çok kompleks fonksiyonlara gereksinim duyulur. Böyle bir fonksiyonun uydurulması, çok sayıda deneyin uygulanmasını gerektirir. Fakat, işletilebilir bölgenin tamamının incelenmesi, neredeyse hiçbir zaman mümkün veya makul değildir. Bu bölgenin kapsamı neredeyse hiçbir zaman bilinmez. Deneyi yapan araştırmacı söz konusu bölgede, teorik olarak deneyin uygulanabileceği fakat, kazanç getirmeyeceği bilinen alanları bırakabilir. Dolayısıyla araştırmacı, işletilebilir bölge yerine daha küçük bir alt ilgi bölgesini incelemek ister. Bu durumda, daha küçük bir alt bölgenin daha basit dereceli bir denklemle temsil edilmesi yeterli olacaktır.

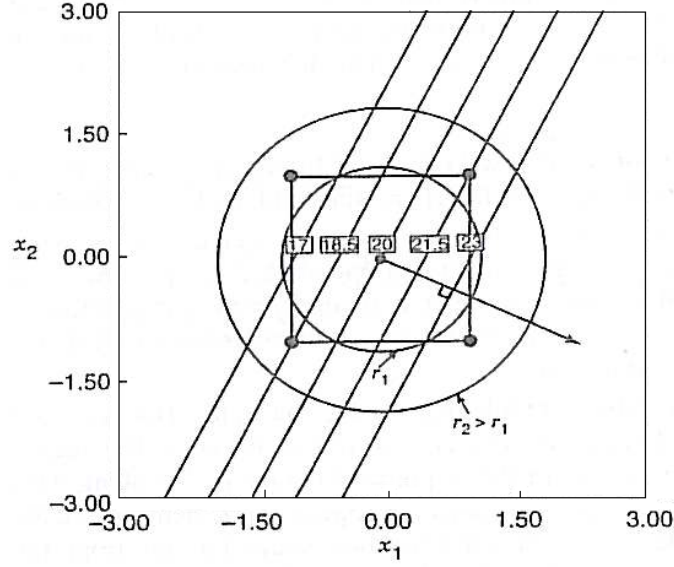
## 1. Birinci Dereceden Tepki Yüzeylerinin Analizi

Bir model uydurulurken izlenen matematiksel prosedür, en küçük kareler yöntemi ile uyumun yapıldığı derecedeki tüm muhtemel yüzeylerden deney noktalarındaki tepki değerlerine en yakın olanı seçmektir. Uydurulan yüzeyin, deneysel tasarım bölgesinden uzak noktalardaki değerlerine gereksinim duyulmaz. Bu nedenle, ampirik modelin sadece mevcut deney bölgesi civarında kullanışlı olması beklenir. Örneğin bir maksimum noktaya yakın durumda bulunuluyorsa, ikinci dereceden bir model uydurularak deney bölgesi yerel olarak temsil edilebilir. Bununla birlikte sistem ilk kez inceleniyorsa, başlangıç koşulları böyle bir maksimuma çok yakın olmayabilir. Bu durumda, araştırmacının ikinci derece denklemin kullanışlı bir biçimde uygulanabileceği, uygun bir bölgeye götüren bir ön prosedüre ihtiyacı vardır. Böyle bir ön prosedür, bir seferde bir faktör metodudur. Buna alternatif olan diğer bir prosedür ise, genellikle daha etkili ve ekonomik bir metod olan en dik artış metodudur (Box – Draper, 2007: 187).

### a. En dik artış (azalış) yolunun belirlenmesi

Genellikle bir sistem için optimum işleme koşullarının başlangıç tahmini, gerçek optimumdan uzak olacaktır. Bu tarz durumlarda deneyi yapan araştırmacının amacı, hızlı bir biçimde genel optimum civarına doğru hareket etmektir. Genel olarak, basit ve ekonomik olarak etkin bir deneysel prosedür kullanılması istenir. Optimumdan uzak olunması durumunda, genellikle küçük bir bölgede doğru bir tepki için, birinci dereceden bir modelin yeterli bir yaklaşım fonksiyonu olduğu varsayılır.

En dik artış metodu; Şekil 3.21'den de görülebileceği gibi, en dik artış yolu üzerinde, tepkideki maksimum artış doğrultusunda adımsal olarak hareket etmek için kullanılan bir prosedürdür. Tepkinin minimizasyonunun istenmesi durumunda, söz konusu teknik en dik azalış (steepest descent) yöntemi adını alır.



**Şekil 3.21. Bir En Dik Artış Yolu Örneği (Kaynak: Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009, s. 185).**

Bu prosedürü matematiksel olarak tanımlamak için, öncelikle gerçek tepki yüzeyine bir hiper düzlem eşitliği  $\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i$  ile yerel olarak yaklaşılabileceği varsayılmaktadır (Özler, 1997: 102). Birinci derece tasarım noktalarından elde edilen verilere uydurulan, birinci dereceden bir model

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (3.79)$$

şeklindedir. Sonraki adımda, tasarımın merkezinden r birim uzaklıkta tepkideki maksimum artış yönünde hareket edilir. En dik artış metodu ile  $\sum_{i=1}^k x_i^2 = r^2$  kısıtı altında tahmin edilen tepki için, bir maksimum değer üretilmiş olur. Diğer bir ifadeyle, bu kısıtla tasarım merkezinden r birim uzaklıktaki tüm  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$  noktalarında,  $\hat{y}$ 'yi maksimize edecek değer aranmaktadır. Söz konusu optimizasyon problemini, Lagrange çarpanları metodu ile çözmek mümkündür. Maksimizasyon işlemi,  $x_j$ 'ye ( $j = 1, 2, \dots, k$ ) göre kısmi türev alınmasını gerektirmektedir.

$$L = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k - \lambda \left( \sum_{i=1}^k x_i^2 - r^2 \right) \quad (3.80)$$



Denklem (3. 80)'de  $x_j$ 'ye göre kısmi türev alındığında

$$\frac{\partial L}{\partial x_j} = b_j - 2\lambda x_j \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (3. 81)$$

ve  $\partial L / \partial x_j = 0$  en dik artış yolunun  $x_j$  koordinatları

$$x_j = \frac{\beta_j}{2\lambda} \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (3. 82)$$

biçiminde bulunmuş olur.  $1/2\lambda = \rho$  miktarı sabit bir oran olarak görüldüğünde, en dik artış metodu için,  $\rho$  pozitif ve en dik azalış metodu için,  $\rho$  negatif olmak üzere koordinatlar,

$$x_1 = \rho\beta_1, x_2 = \rho\beta_2, \dots, x_k = \rho\beta_k \quad (3. 83)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklem  $\rho$ 'nun seçiminin  $\lambda$ 'ya bağlı olduğunu ve yalnızca tasarım merkezinden uzaklığı belirlediğini ifade eder. Sonuç olarak, sabit  $\rho$  değeri araştırmacı tarafından belirlenir.

### **b. Etkileşim ve eğriselliğin değerlendirilmesi**

İki düzeyli faktöriyel tasarımların kullanımında potansiyel bir problem, faktör etkilerinin doğrusallığı varsayımıdır. Elbette mükemmel bir doğrusallık zorunlu değildir, doğrusallık yaklaşık olarak da gözlenebilir. Etkileşim etkilerinin ana etkilere eklenmesi durumunda, tepki fonksiyonunda etkileşim terimi tarafından açıklanan bir miktar eğriselliğin temsil edildiği bir model elde edilmiş olur. Ancak, böyle bir temsilin yeterli olmadığı durumlarda, birinci derece tasarıma merkez noktalar eklenerek eğriselliğin kontrol edilmesi ve gerekiyorsa ikinci dereceden bir tepki yüzeyi modelinin kullanılması daha uygundur.

$\bar{y}_f$ , faktöriyel kısımda uygulanan  $n_f$  denemenin örneklem ortalamasını,  $\bar{y}_c$  merkezde uygulanan  $n_c$  denemenin örneklem ortalamasını gösterdiği; düşük, yüksek ve merkez düzeylerin sırasıyla -, + ve 0 ile kodlandığı varsayıldığında,

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (3. 84)$$

şeklindeki ikinci dereceden bir modelde, merkez noktada  $x_i = 0$  olacağından

$$E(\bar{y}_c) = \beta_0 \quad (3. 85)$$

ve

$$E(\bar{y}_f) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \quad (3. 86)$$

ifadesi geçerli olur. Denklem (3. 85) ve (3. 86)'dan yola çıkılarak,

$$E(\bar{y}_f - \bar{y}_c) = \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \quad (3. 87)$$

yazılabilir ve toplam eğrisellik sıfır ise,

$$\beta_{11} + \dots + \beta_{kk}$$

$\bar{y}_f - \bar{y}_c$  farkı eğriselliğin testi için kullanılabilir.  $\bar{y}_f - \bar{y}_c$  farkının varyansı  $\sigma^2(1/n_f + 1/n_c)$  olduğundan ve  $s^2$ ,  $n_c$  merkez denemelerine dayanan örneklem varyansını ifade etmek üzere aşağıdaki  $t$  testi,

$$\frac{|\bar{y}_f - \bar{y}_c|}{s (1/n_f + 1/n_c)} > t_{n_c-1, \alpha/2} \quad (3. 88)$$

toplam eğriselliğin anlamlılığının,  $\alpha$  düzeyinde sınanmasında kullanılabilir. Burada sınanan hipotezler

$$H_0 : \sum_{i=1}^k \beta_{ii} = 0$$

$$H_1 : \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \neq 0$$

biçimindedir. Eğriselliğin anlamlı bulunmaması durumunda, araştırmaya bir başka birinci dereceden deney ve en dik artış yolu ile devam edilebilir. Diğer durumda ise, mevcut durum ikinci dereceden deneyle değiştirilmelidir (Wu – Hamada, 2009: 465).

## 2. İkinci Dereceden Tepki Yüzeylerinin Analizi

Araştırmacının optimum noktaya yakın olması ve sistemde eğriselliğin varlığı durumunda, genellikle tepkiye yaklaşımda denklem (3. 80)'deki gibi bir ikinci dereceden model yeterli olmaktadır. Söz konusu model,  $1+2k+k(k-1)/2$  parametre içermekte ve sonuç olarak tasarımda en az  $1+2k+k(k-1)/2$  farklı tasarım noktası kullanılmaktadır. Ayrıca tasarımın saf kuadratik terimleri tahmin edebilmesi için, her bir tasarım değişkeni en az üç düzeye sahip olmalıdır. İlgili tepki yüzeyinin uygun bir modelle modellenmesinin ardından, sistemin merkezi veya durağan nokta (stationary point) olarak adlandırılan noktası belirlenmelidir. Durağan nokta, bir maksimum, bir minimum veya bir eyer noktası (saddle point) olarak bulunabilir (Christensen, 2001: 345). Durağan nokta, sistemin eşmerkezli (concentric) elipslerle resmedildiği ve tepkinin maksimum veya minimum olduğu bir nokta olabilir. Ayrıca, sistemin hiperbolik olarak resmedildiği ve tepkinin maksimum veya minimum olmayıp, durağan noktanın eyer noktası olarak adlandırıldığı durumlar da vardır (Myers – Montgomery, 2002: 237).

### a. Durağan noktanın konumunun belirlenmesi

Tahmin edilen ikinci dereceden bir tepki yüzeyi modeli,

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i<j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \epsilon \quad (3. 89)$$

matris notasyonuyla,

$$\hat{y} = b_0 + x'b + x'\hat{B}x \quad (3. 90)$$

şeklinde gösterilebilir.  $b_0, b$  ve  $\hat{B}$  sırasıyla kesme terimi, doğrusal ve ikinci dereceden katsayıların tahminlerini göstermek üzere,  $x' = [x_1, \dots, x_k]$ ,  $b' = [b_1, b_2, \dots, b_k]$

$$\hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & \dots & b_{1k}/2 \\ & b_{22} & \dots & b_{2k}/2 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & b_{kk} \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

$\hat{\mathbf{B}}$ ,  $k \times k$  boyutunda simetrik matris olmak üzere, eşitlik (3.90)'da  $\hat{y}$ ,  $x$ 'e göre diferansiyellenerek 0'a eşitlendiğinde,

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x} = b + 2\hat{\mathbf{B}}x \quad (3.92)$$

çözüm

$$x_s = -\frac{1}{2}\hat{\mathbf{B}}^{-1}b \quad (3.93)$$

kuadratik yüzeyin veya sistemin “*durağan noktası*” olarak adlandırılır. Ayrıca durağan noktada tahmin edilen tepki değeri,

$$\begin{aligned} \hat{y}_s &= b_0 + x_s'b + x_s'\hat{\mathbf{B}}x_s \\ &= b_0 + \frac{1}{2}x_s'b \end{aligned} \quad (3.94)$$

biçimindedir.

### **b. Durağan noktanın kanonik analizi**

Kanonik analiz, uydurulan ikinci dereceden bir modelin rahatlıkla anlaşılabilir bir formda yeniden yazılması metodudur. Bu işlem, tüm çarpaz çarpım terimlerinin çıkarılarak eksenlerin döndürülmesi yoluyla yapılır (Box – Draper, 2007: 329). İkinci dereceden modelin yeterli olduğu bulunduktan sonra, bu modelin durağan noktasının yapısının ve yerleşiminin belirlenmesi için kanonik analiz uygulanmalıdır (Neddermeijer *et al.*, 2000: 134). Bu bağlamda, kuadratik yüzeylerin yapısı durağan nokta etrafında ve yeni bir koordinat sisteminde daha iyi anlaşılır. P, sütunları  $\hat{\mathbf{B}}$ 'nin standardize edilmiş öz vektörlerinden oluşan  $k \times k$  boyutlu matris olmak üzere,

$$P'\hat{\mathbf{B}}P = \Lambda \quad (3.95)$$

ifadesinde  $\Lambda$ ,  $\hat{\mathbf{B}}$ 'nin ana köşegen elemanlarını içeren bir köşegen matristir. Denklem (3.90)'da verilen ikinci dereceden model, yeni bir merkez olan durağan noktada dönüştürüldüğünde, yeni eksenlere dönüştürülen öz vektörler,

$$\begin{aligned} z &= x - x_s \\ w &= P'z \end{aligned} \quad (3.96)$$

biçiminde olur. Aşağıda verilen eşitlikte

$$\begin{aligned} \hat{y} &= b_0 + (z + x_s)'b + (z + x_s)'\hat{\mathbf{B}}(z + x_s) \\ &= [b_0 + x_s'b + x_s'\hat{\mathbf{B}}x_s] + z'b + z'\hat{\mathbf{B}}z + 2x_s'\hat{\mathbf{B}}z \\ &= \hat{y}_s + z'\hat{\mathbf{B}}z \end{aligned} \quad (3.97)$$

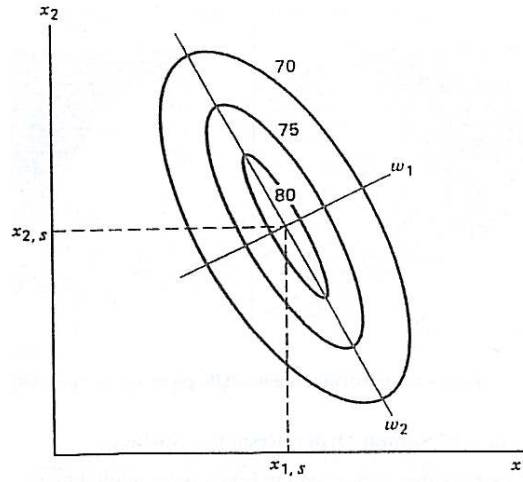
$\hat{y}_s$ ,  $x_s$ 'de uydurulan tepkidir. Çünkü, denklem (3.93)'den  $2x_s'\hat{\mathbf{B}}z = -z'b$  dir. Döndürme sonucu,

$$\begin{aligned} \hat{y} &= \hat{y}_s + w'P'\hat{\mathbf{B}}Pw \\ &= \hat{y}_s + w'\Lambda w \end{aligned} \quad (3.98)$$

yazılabilir.  $w$  eksenini, kontur sisteminin temel eksenidir.  $\hat{y}_s$ , durağan noktada tahmin edilen tepkiyi ve  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$   $\hat{\mathbf{B}}$ 'nin öz değerlerini göstermek üzere denklem (3.98)

$$\hat{y} = \hat{y}_s + \sum_{i=1}^k \lambda_i w_i^2 \quad (3.99)$$

biçiminde yazılabilir.  $w_1, w_2, \dots, w_k$  kanonik değişkenler olarak adlandırılır. Bu süreç, Şekil 3. 22'de grafiksel olarak sunulmaktadır.



**Şekil 3.22. İkinci Dereceden Bir Modelin Kanonik Formu (Kaynak: Myers – Montgomery – Anderson-Cook, 2009, s. 225)**

Kanonik analiz sonucunda,  $\hat{y}$ 'nin durağan nokta etrafındaki davranışı, iyi bir biçimde  $\hat{B}$ 'nin öz değerleri veya karakteristik kökleri olan  $\lambda_i$ 'ler ve kanonik değişkenler  $w_i$ 'ler açısından tanımlanabilir. Burada  $\lambda_i$ 'lerin işareti ve ilgili öz değerlerin önemi, sistemin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur (Wu – Hamada, 2009: 475).

- i.  $\lambda_i$ 'ler aynı işaretli olduğunda, durağan nokta etrafındaki konturlar elips şeklindedir ve sistem eliptik olarak adlandırılır. İşaretler negatif olduğunda, durağan nokta bir maksimum tepki noktası olurken, işaretler pozitif olduğunda durağan nokta bir minimum tepki noktası olur.
- ii.  $\lambda_i$ 'ler karışık işaretli olduğunda, durağan nokta etrafındaki konturlar hiperboliktir ve sistem hiperbolik olarak adlandırılır. Durağan nokta, bir eyer noktasıdır.

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ**

Bir talaş oluşturma işlemi olarak tanımlanabilen talaşlı imalat, 18. ve 19. Yüzyıllardaki endüstri devrimi ile gelişmeye başlayıp, 20. Yüzyılda büyük bir hızla gelişmeye devam etmiştir. Buhar makinesinin icadı ve sonrasında elektrik enerjisiyle sağlanan gücün kullanılması sayesinde, ilk takım tezgahlarından olan torna, planya ve freze tezgahları önemli ölçüde geliştirilme imkanı elde etmiştir. Talaş kaldırma işlemi, onlarca yıldır üzerinde en fazla çalışma yapılan bilimsel araştırma alanlarından biridir. Bu işlem, güçlü sayısal denetimli tezgahlarda yapılan, takımın iş parçası yüzeyindeki kusursuz hareketi sonucu talaşların oluştuğu ve bir iki dakika içinde hammaddenin hassas, pürüzsüz ve parlak yüzeyli bir ürüne dönüşümünün gerçekleştiği dinamik bir süreçtir. Metal, yüksek hız, sıcaklık ve basıncın bir arada bulunduğu talaş kaldırma işlemleriyle ilgili kesin tespitlerin yapılması oldukça zordur. Bu nedenle, işlemlerle ilgili teorik ve ampirik tanımlamalar yapılmış ve modeller geliştirilmiştir (Çakır, 2006: 25).

Bu bölümde, çalışmanın uygulama alanı olan talaşlı imalat işlemine ilişkin temel teorik bilgilerin verilmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda öncelikle, çeşitli talaşlı imalat yöntemleri ve talaşlı imalatı etkileyen faktörler detaylı bir biçimde incelenecektir. Talaşlı imalat işlemlerinde karşılaşılan en önemli problemlerden yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması sorunları irdelenecektir. Talaşlı imalatın ekonomik boyutu da, ayrıca ele alınacaktır.

#### **I. TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ**

Amacı, genellikle zor işlenen metali belirli bir şekil ve boyuta getirmenin yanı sıra işlemi uygun talaş oluşumunu sağlayacak şekilde yapmak olan talaşlı imalat, bir talaş oluşturma ve gerekli ise talaş kırma işlemidir (Çakır, 2006: 25). Bu esnada, yüksek sıcaklık ve basıncın da etkisiyle metallerin difüzyonu ve kimyasal reaksiyonlar, takımın aşınmasına ve bunun neticesinde titreşim, kötü yüzey kalitesi, tolerans dışı imalat, takımın veya iş

parçasının zarar görmesi gibi problemlere yol açabilir (Demirayak – Çakır, 2007: 1). Talaş kırma işlemiyle, yalnızca işlem sırasında oluşacak talaş için taşınma ve depolanma kolaylığı sağlamak değil, ayrıca kesme bölgesinden uzaklaşan talaşın kontrol edilmesi ve işlem sırasında oluşan ısının büyük bir kısmının bu talaşlarla ortamdan uzaklaştırılması amaçlanır.

Talaş kaldırma işlemi, bir parçanın belirli boyut, şekil ve yüzey kalitesine sahip olması için keskin uçlu bir takım ile ve güç kullanarak iş parçası üzerinden tabaka şeklinde malzeme kaldırma işlemidir. Bu işlem sonucu ayrılan malzeme tabakası, talaş olarak adlandırılmaktadır. Fiziksel olarak talaş kaldırma işlemi, elastik ve plastik şekil değiştirmeye dayanan sürtünme, ısı oluşumu, talaşın kırılması ve büzülmesi, işlenen parçanın yüzeyinin sertleşmesi ve takım ucunun aşınması gibi olaylarla sonuçlanan karmaşık bir fiziksel olaydır (Akkurt, 1991: 23).

#### **A. SERT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALAT İŞLEMİ**

Sert malzemelerin sertlikleri, genellikle 42-65 HRC (Hardness Rockwell Sertliği) arasında değişen değerler almaktadır. Çoğunlukla süreç 58-68 HRC sertliğindeki malzemelerle ilgili bir süreç olmasına rağmen, en geniş anlamda sert malzemelerin talaşlı imalatı, sertliği 45 HRC'nin üzerinde olan iş parçalarının işlenmesi olarak tanımlanabilir (Davim, 2011: 1). Geçmişte bu malzemelerin şekillendirilmeleri, sadece taşlama veya çok yavaş talaş kaldırma işlemi ile gerçekleştirilirken, günümüzde yeni takım malzemelerinin geliştirilmesi sayesinde tornalama işlemiyle mümkün olmaktadır. Böylelikle, söz konusu alanlarda verimlilik ve güvenilirlik önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Son yıllarda pek çok endüstride uygulanan sert tornalama işlemlerinde alaşımli çelikler, rulman çelikleri, sıcak ve soğuk iş takım çelikleri, yüksek hız çelikleri, kalıp çelikleri, yüzeyi sertleştirilmiş çelikler, Waspoloy, Stellite ve diğer süper alaşımlar iş parçası malzemesi olarak kullanılmaktadır. Günümüzde, bu işlemin oldukça yaygın bir biçimde kullanılmasının en önemli nedenlerinden biri de, kesici takımlar ve takım tezgahlarındaki gelişmelerdir. Sert tornalama ve frezeleme işlemlerinde, sert iş parçası malzemelerinin özelliklerinden dolayı, en çok kullanılan ve yüksek çentik dayanımı, yüksek sertlik, yüksek termal iletkenlik, yüksek aşınma direnci, fiziksel ve kimyasal kararlılık gibi gereksinimleri karşılaması gereken malzemeler seramik ve kübik bor nitrür (CBN) takım malzemeleridir (Boy ve diğerleri, 2012: 364).



Sert malzemelerin işlenmesinde kullanılacak kesici takımların seçimi, büyük ölçüde iş parçası özelliklerine bağlıdır. Çok hızlı takım aşınması, çatlaklar, kesici kenarlardan dökülmeler ve bunların meydana getirdiği kötü sonuçlar, en sık karşılaşılan problemler arasında yer alır. Bazı işlemlerde ve bazı malzemelerin işlenmesinde, sinterlenmiş karbürler kullanılsa dahi, gerçek anlamda nitelikli bir işin yapılabilmesi için, daha özel takımlara ihtiyaç duyulur. Sert malzemelerin işlenmesi esnasında;

- kesme bölgesinde yüksek sıcaklıklar
- yüksek ve değişken kesme kuvvetleri
- kesici kenar yakınında, küçük bir talaş kesiti üzerinde yüksek basınç
- hızlı kesici kenar aşınması veya kırılma
- işleme sırasında iş parçası içerisinde oluşan gerilmeler
- iş parçası malzemesinin düşük homojenliği
- yetersiz kararlılık

gibi problemler gözlenir (Çakır, 2006: 229).

Bu malzemelere uygulanacak ince işlemler sonucunda, yüksek hassasiyet ve iyi bir yüzey kalitesine ulaşılır. Söz konusu işlemler torna tezgahlarında, sertliğin ve homojenliğin yüksek ve birbirine göre dengeli olduğu koşullar ile yüksek üretim hızlarında gerçekleştirilmektedir. Sert malzemeler işlendiğinde, iş parçası yüzeyinde herhangi bir çatlak oluşumuna izin vermeyecek ve iş parçası için daha iyi bir aşınma ömrü sağlayacak son derece parlak bir yüzey elde edilir.

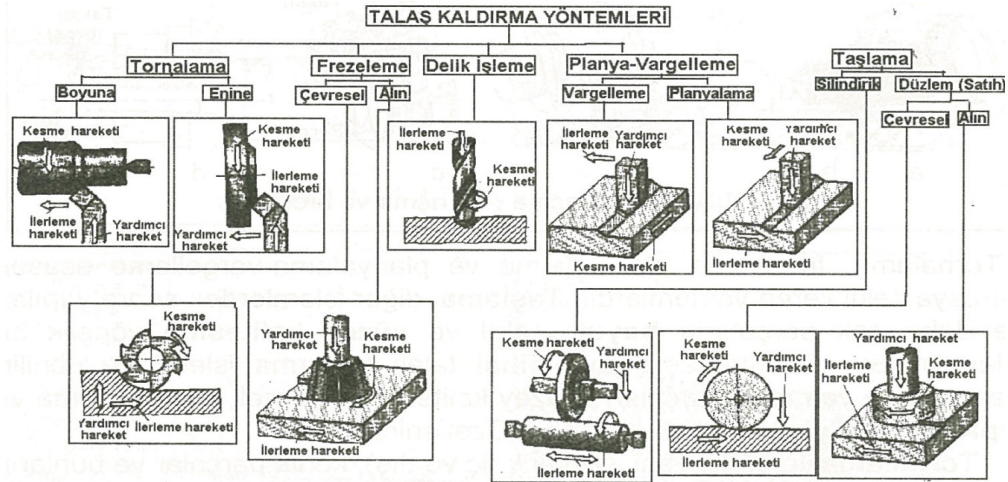
Elde edilen yüzey kalitesi ve hassasiyet bakımından tornalama işlemi, taşlama işlemine göre daha iyi ve verimli bir işlemdir. Teknik, ekonomik ve çevresel olarak sert tornalama işlemi, taşlama işlemine rakip bir işlem olarak nitelendirilir. Bu teknik, düşük kapital yatırımı, daha kısa ayar süresi, daha yüksek talaş debisi, daha iyi yüzey yapısı (surface integrity) ve kesme sıvısının eliminasyonu gibi birçok avantajı nedeniyle taşlama işlemine ikame olarak kullanılabilir. cazip bir tekniktir (Gaitonde *et al.*, 2009: 1373).

Sert malzeme tornalama işleminin taşlama işlemine göre, parça üzerinden daha hızlı talaş kaldırma ve daha kısa işleme süresi gibi belirgin avantajları vardır. Günümüzde bu teknoloji, taşlama işleminin yüksek maliyetinden dolayı endüstride rulmanların, hareket ileten millerin, kalıp malzemelerinin ve çeşitli motor ekipmanlarının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır (Murat ve diğerleri, 2012: 2).

Sert tornalama sürecinde, nihai ürün elde edilene kadar birçok işlem yapılması gerekeceğinden, bazı işlemlerin birleştirilebilmesi, elimine edilebilmesi veya yeni bir süreçle ikame edilebilmesi durumunda, ürün çevrim zamanı azaltılabilecek ve üretkenlik geliştirilebilecektir. Sertleştirilmiş malzemelerin geleneksel işleme metotları kaba tornalama, ısıl işlem ve sonrasında taşlama sürecini içerir. Sert tornalama işlemi ise, bir parçanın üretimi için gerekli bu bir seri işlemi elimine ederek, çevrim zamanını azaltır ve üretkenliği artırır (Aouici *et al.*, 2010: 71).

## B. TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ

Keskin uçlu bir takım kullanarak takım tezgahı olarak adlandırılan makinelerde yapılan talaş kaldırma işlemi, takım ile parçaya Şekil 4.1'de görüldüğü gibi çeşitli hareketler verilerek gerçekleştirilir. Bu hareketler; kesme, ilerleme ve yardımcı olmak üzere üç şekilde meydana gelir. Kesme hareketi, esas talaş kaldırma hareketidir. İlerleme hareketi, parçanın uzunluğu veya genişliği boyunca işlenmesini sağlarken yardımcı hareket, takımın parçaya göre ayarlanmasını sağlar. Kesme hareketi genellikle dönel veya doğrusal, ilerleme hareketi ve yardımcı hareketler ise, doğrusaldır. Bu noktada söz konusu hareketlerin takım veya parça tarafından gerçekleştirilmesi, çeşitli talaş kaldırma yöntemlerini meydana getirmektedir (Akkurt, 2007: 155).

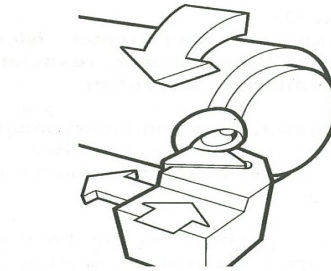


Şekil 4.1. Talaş Kaldırma Yöntemleri (Kaynak: Akkurt, 2007, s. 155)

İmalat yöntemleri mekanik ve fiziksel-kimyasal olmak üzere iki grupta incelenebilir. Fiziksel-kimyasal işleme grubunda elektroerozyon, tel-erozyon (EDM), kimyasal, elektro-kimyasal, elektron, lazer ve plazma ile işleme gibi yöntemler yer almaktadır. Bu gruplardan en önemlisi olan mekanik imalat yöntemleri ise, talaşlı ve

talaşsız imalat olarak iki grupta ele alınabilir. Talaşsız imalat yöntemleri talaş kaldırmadan, talaşlı imalat yöntemleri ise talaş kaldırarak şekil veren yöntemlerdir. Döküm, dövme, presleme, haddeleme, çekme, derin çekme, sıvama, bükme, kaynak, lehim, yapıştırma ve perçinleme gibi işlemleri içeren talaşsız imalat yöntemleri, çok kısa bir sürede gerçekleştirmelerine rağmen parçada yüzey, boyut ve şekil kalitesi bakımından istenen kaliteyi sağlayamamaktadırlar. Bu nedenle, bu şekilde imal edilen parçaların yüzeylerinin bir bölümü veya tamamı talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmektedir. Bundan dolayı talaşsız imalat işlemleri primer, talaşlı imalat yöntemleri ise sekonder imalat yöntemleri olarak adlandırılır. Talaşlı imalat yöntemleri tornalama, delme, frezeleme, planyalama-vargelleme, taşlama, broşlama, honlama, lepleme gibi işlemlerden meydana gelir (Akkurt, 1991: 2). Bu başlık altında uygulama kısmında kullanılması nedeniyle, esas talaş kaldırma yöntemlerinden olan tornalama tekniği kısaca açıklanacaktır.

Tornalama, talaş kaldırma işlemini en iyi şekilde temsil eden yöntemdir. Tornalama işlemi, tek uçlu bir takım ile gerçekleştirilen, silindirik parçalar üreten birçok durumda, dönen bir iş parçası ve sabit bir takımın kullanıldığı bir işlemdir. Bu işlem, aynı zamanda en yaygın kullanım alanına sahip, gelişmeye açık, uygulamalarda çeşitli faktörlerin büyük bir hassasiyetle belirlenmesini gerektiren optimize edilmiş bir tekniktir. Bu işlem, iş parçasının dönme hareketi ve takımın ilerleme hareketi olmak üzere iki hareketin kombinasyonu sonucu meydana gelir. Tornalama işlemi Şekil 4.2’de verildiği gibi çeşitli malzemelerden imal edilmiş, çeşitli boyutlardaki dönel simetriye sahip bir iş parçasının, dış çapından tek uçlu bir takım ile malzeme kaldırma işlemi olarak tanımlanabilir (Çakır, 2010: 3).



**Şekil 4.2. Tornalama İşlemi (Kaynak: Çakır, 2010, s. 1)**

### C. TALAŞLI İMALATI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Talaş kaldırma işleminde kesici takım, iş parçası üzerine belirli bir kuvvetle bastırıldığında ve kuvvet yönüne doğru hareket ettirildiğinde takım ucunun temas ettiği malzeme katmanında, önce elastik sonra plastik şekil değişiklikleri oluşur. Böylece malzemenin üst katmanında akmalar başlar. Bu süreçte medyana gelen gerilmeler, malzemenin kopma sınırını geçtiği anda, talaş adı verilen belirli bir yüzey tabakası iş parçasından ayrılır. Tornalama işlemi, sürekli talaş kaldırma işlemi açısından talaş kaldırmayı en iyi karakterize eden işlem olarak bilinir. Bu bağlamda, talaş kaldırma işlemini etkileyen faktörlerin ve bunların birbirlerine olan etkilerinin göz önüne alınması gerekir. Söz konusu süreci etkileyen başlıca faktörler aşağıdaki gibidir:

- kesici takım ömrü,  $T$  (dak)
- kesme hızı,  $V_c$  (m/dak)
- talaş derinliği,  $a_p$  (mm)
- ilerleme miktarı,  $f$  (mm/dev)
- kesme açıları,  $(\kappa)$
- titreşim durumu,  $V_i$
- soğutma sıvısı,  $S_s$
- takım/iş parçası malzeme çifti,  $TM_\zeta$
- köşe radyüsü,  $r$  (mm)

Bu faktörler fonksiyonel olarak;

$$f(T, V, f, t, \kappa, V_i, S_s, TM_\zeta, r) = 0 \quad (4.1)$$

biçiminde ifade edilebilir. Son derece karmaşık bir süreçte gerçekleşen talaş kaldırma işleminde, bu faktörlerden birçoğu sabit tutularak bir kısım etkenlerin belirlenmesi gerekir. Bu etkenler arasında en önemli olanlar, kesici takım performansı ve takım ömrüdür (Şahin, 2003: 309). Söz konusu faktörler, uygulanan talaş kaldırma yöntemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında talaş kaldırma yöntemi olarak tornalama işlemi uygulandığından, izleyen başlıklarda yapılacak açıklamalar bu çerçevede ele alınacaktır. Tornalama işleminin etkin bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için, uygun kesme koşullarının belirlenmesi son derece önemlidir. Bu bağlamda bu koşullar hakkında temel bilgilerin verilmesi yerinde olacaktır.

## 1. Kesme Hızı

Kesme hızı talaş kaldırma işlemi sırasında takımın, dönen iş parçası üzerinde metre cinsinden dakikada aldığı yol miktarı olarak tanımlanabilir. Bir torna tezgahındaki bir iş parçası, devir/dakika cinsinden dönme hızı olarak da adlandırılabilen, belirli bir ana mil hızıyla ( $n$ ) döner. Bu dönme hızı, Şekil 4.3’de de görülen iş parçasının işlendiği noktada işlenen çapa bağlı bir biçimde, bir kesme hızı veya çevresel hızın ( $V_c$  - m/dak) meydana gelmesine neden olur. Bu hız, kesici kenarın iş parçası yüzeyini işlediği hız veya talaş kaldırılan çaptaki kesici kenardan geçen iş parçası çevresinin hızı olarak bilinir. Tornalama ile talaş kaldırma işleminde kesme hızı;

$$V_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000} \quad (\text{m/dak}) \quad (4.2)$$

şeklinde formüle edilebilir. Eşitlik (4.2)’de  $D$  :işlenecek iş parçası çapı (mm),  $\pi = 3,14$  ve  $n$  :iş parçasını işlemek için kullanılan tezgaha verilmesi gereken devir sayısını (dev/dak) göstermektedir. Çapın milimetre cinsinden verilmesi durumunda, kesme hızının metre/dakika cinsinden ifade edilebilmesi için işlem sonucu 1000’e bölünür.

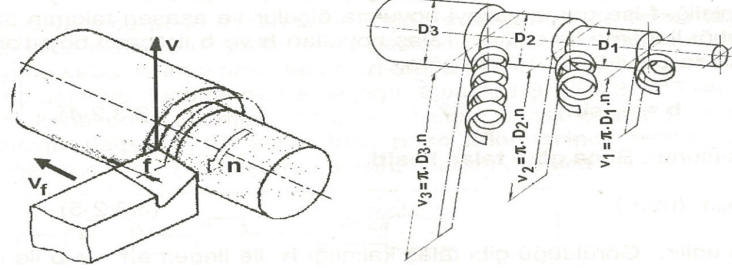
Tornalama işlemindeki önemli kesme koşullarından biri olan kesme hızının, doğru bir biçimde tespit edilmesi çok önemli bir konudur. Kesme hızının çok düşük belirlenmesi durumunda, az parça üretilir ve takım ucunda talaş sıvanması oluşabilir. Sonuç olarak, takım değişikliğine gereksinim duyulabilir. Kesme hızının çok yüksek olması halinde ise, takım hızlı bir şekilde aşınacak ve sık sık takım değişikliği gerekecektir. Bu nedenle, herhangi bir talaş kaldırma işlemi için optimum kesme hızı, kesici takım ömrü ve talaş kaldırma miktarını dengeleyecek biçimde seçilmelidir (Şahin, 2003: 314).

## 2. İlerleme

İlerleme hızı, ( $V_f$  - m/dak) takımın bir yüzeyi işlemesi için o yüzey boyunca yaptığı hareketin hızı olarak tanımlanır. Kısaca ilerleme ( $f$  - mm/dev) olarak adlandırılan devir başına takım ilerlemesi ise, Şekil 4.3’de verildiği gibi, takımın iş parçasının bir devrinde yaptığı ilerleme miktarıdır. İlerleme hızı ( $V_f$ ) ve ilerleme ( $f$ ) arasında,

$$V_f = f \times n \quad (4.3)$$

ilişkisi vardır. İlerleme, sadece işlenen yüzeyin kalitesinin belirlenmesinde ve uygun talaş oluşumunun sağlanmasında değil, aynı zamanda talaş kırma işleminin kalitesi üzerinde de etkili olan temel bir etken olarak kabul edilir (Çakır, 2010: 5).



**Şekil 4.3. Kesme ve İlerleme Hızları (Kaynak: Akkurt, 2007, s. 177)**

### 3. Talaş Derinliği

Paso kalınlığı olarak da adlandırılabilen talaş derinliği, ( $a_p$  - mm) işlenmiş çap ile işlenmemiş çap arasındaki farkın yarısıdır. Talaş derinliği her zaman kesici kenara değil, takımın ilerleme yönüne dik açı yapacak biçimde ölçülür.  $D$  : parçanın işlenmeden önceki çapı,  $d$  : parçanın işlendikten sonraki çapını göstermek üzere talaş derinliği:

$$a_p = \frac{(D - d)}{2} \quad (\text{mm}) \quad (4.4)$$

biçiminde ifade edilir. Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği arasında sıkı bir ilişki olduğundan bu faktörlerin seçimi birbirlerine bağlı olarak ve söz konusu değerler deney ve deneylere göre hazırlanmış takım üreticilerinin kataloglarından, literatürde verilen tablolardan veya teknik ve ekonomik koşullara bağlı analitik ya da optimizasyona bağlı ilkelere göre seçilebilir (Akkurt, 2007: 180; Akkurt, 1991: 97).

### D. TALAŞLI İMALAT ve YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

İş materyallerinin talaşlı imalatla ilgili özellikleri ve karakteristikleri, bir materyalin uygun takım ve parametreler kullanılarak işlenebileceğini açıklayan işlenebilirlik terimi ile değerlendirilir. İşlenebilirliğin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli kriterler; kesme kuvveti, işleme kuvveti, güç, spesifik kesme kuvveti, takım aşınması, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilir. Yüzey kalitesi, makine parçalarının olduğu kadar işleme takımlarının da verimliliğinin değerlendirilmesinde bir gösterge olarak kabul edilir. Yüzey pürüzlülüğü, kesme koşulları ve takım geometrisi gibi süreç parametreleri ile belirlenir ve işlenen yüzeyler için temel bir kalite göstergesi olarak kullanılır. Günümüzde üretim

endüstrisi, yüzey kalitesi (surface finish) kadar boyutsal hassasiyete de özel bir önem vermektedir. Bu nedenle, yüzey iyiliğinin karakterize edilmesi ve ölçülmesi, bir işleme performans göstergesi olarak düşünülebilir (Gaitonde *et al.*, 2009: 1373). Bu doğrultuda son otuz yıldır araştırmacıların, katkılı seramik takımların kullanıldığı uygulamalarda yüzey pürüzlülüğü, yüzey yapısı, takım aşınması, işleme kaynaklı iş parçası özelliklerinde ortaya çıkan değişimler ve boyutsal hassasiyet ile ilgili çok çeşitli çalışmalar yapmaları dikkat çekicidir (Sieben – Wagner – Biermann, 2010: 115).

Yüzey pürüzlülüğü; yorulma davranışı, korozyon direnci ve sürünme ömrü gibi birtakım mekanik nitelikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca sürtünme, aşınma, ışık yansımaları, ısı iletimi, yağlama, elektriksel iletkenlik gibi işlenmiş parçaların diğer fonksiyonel özelliklerini de etkilemektedir (Sahoo – Barman – Routara, 2011a: 19). Bazen yıkıcı olabildiğinden yüksek maliyetlere neden olan çeşitli hatalar, yüzey kalitesi bileşenlerinin sorgulanmasına yol açmış ve iyi bir yüzey elde edebilmek için kesme koşullarının optimizasyonunun amaçlanması gerekliliğini gündeme getirmiştir (Davim, 2001: 305). Bu nedenle, yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi ve istenilen düzeydeki bir yüzey kalitesi elde edebilmek için kontrol edilebilen parametrelerin optimizasyonunu amaçlayan pek çok araştırma bulunmaktadır. İşleme parametrelerinin optimizasyonu sadece talaşlı imalat ekonomisinin yararlılığını değil, aynı zamanda ürün kalitesini de büyük ölçüde artıracaktır (Suresh – Venkateswara – Deshmukh, 2002: 675). Bu bağlamda bir parçanın yüzey pürüzlülüğünün azalması, genellikle üretim maliyetlerini üstel olarak artıracaktır. Bu durum, söz konusu parçanın üretim maliyeti ile uygulamadaki performansı arasında bir tercihte bulunulması ile sonuçlanır (Kadirgama, 2009: 251).

Üretim mühendisliğinde önemli bir parametre olan yüzey kalitesi, talaş kaldırma işlemlerinde üretim maliyetinin yanı sıra, mekanik parçaların performansını da etkileyen önemli bir kalite karakteristiğidir. Çok kısa zamanda ve yüksek kalitede ürünler elde etmek için günümüz modern endüstrisinde CNC takım tezgahları kullanılsa da; kesme parametreleri, takım ve iş parçası değişkenleri gibi ilgili birçok faktör bulunmasından dolayı, yüzey pürüzlülüğünü kontrol etmek oldukça zordur. Kesme parametreleri kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğini; takım değişkenleri takım malzemeleri, köşe radyüsü, talaş açısı, kesici kenar gibi değişkenleri; iş parçası değişkenleri ise malzeme sertliği ve diğer mekanik özellikleri içerir. Bir üretim sürecinde, bu parametrelerin tamamını göz önüne almak oldukça güçtür. Tornalama işleminde, yüksek bir kalite performansına

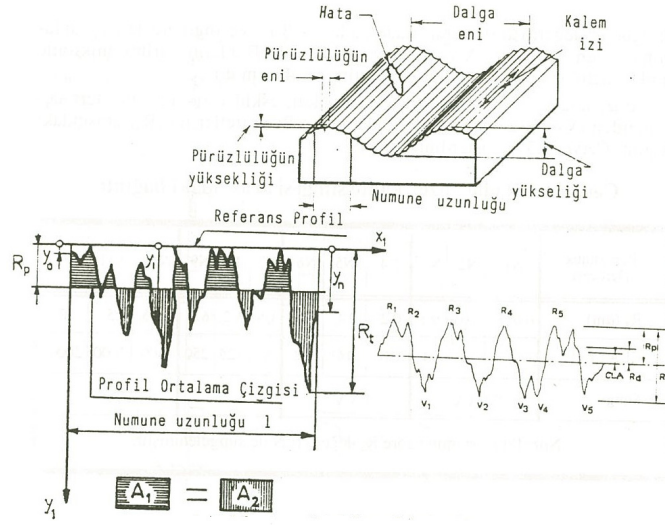
ulaştıracak kesme parametrelerinin seçimi hayati bir iş olarak nitelendirilir. Genellikle, arzulanan kesme parametreleri tecrübelerine veya ilgili el kitabına dayanarak seçilir (Sahoo *et al.*, 2011b: 117-118).

Talaş kaldırma işlemi sonucunda işlenen paręada geometrik, boyutsal ve yüzeysel bakımdan belirli bir doğruluk derecesinden sapmalar gözlenebilir. Paręanın geometrik, boyutsal ve yüzeysel doğruluğunu kapsayan ve işleme kalitesi olarak adlandırılan kriter, son derece önemli bir özelliktir. Bir ürünün yüzey kalitesi, genellikle yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesine dayanarak belirlenir (Neşeli – Yıldız – Türkeş, 2011: 580). Bu noktada yüzey kalitesinin bir göstergesi niteliğinde kabul edilen yüzey pürüzlülüğü, üzerinde durulması gereken önemli bir konudur.

### **1. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi**

Talaş kaldırma işlemi uygulanan yüzeylerde, dalga ve pürüzlülük olmak üzere iki tür yüzey sapması gözlemlenir. Dalga, geometrik sapmalar grubuna dahil olduğundan dolayı yüzey kalitesinin esas belirleyicisi, yüzey pürüzlülüğüdür. Standartlara göre yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi, belirli kriterlere göre yapılır. Bu kriterlere göre Şekil 4.4'den de görülebileceği gibi, pürüzler yüzeye dik olarak alınan bir kesitte belirli bir numune uzunluğu boyunca, belirli bir referans profiline ve profil ortalama çizgisine göre tespit edilir. Yüzey pürüzlülüğü; yüzey pürüzlülüğünün derinliği ( $R_t$ ), yüzey pürüzlülüğünün düzeltilmiş derinliği ( $R_p$ ) ve yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalama değeri ( $R_a$ ) gibi kriterlere göre tespit edilir.  $R_t$  referans profile göre en derin pürüzün değeri,  $R_p$  referans profil ile profil ortalama çizgisi arasındaki mesafe,  $R_a$  ise ortalama çizgiye göre pürüz yüksekliklerinin veya derinliklerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade eder. Bu kriterlerden yüzey kalitesini değerlendirmek amacıyla, eskiden daha çok  $R_p$  kullanılmasına karşı, günümüzde daha çok uluslararası bir kriter olarak kabul edilen ve değerleri standartlaştırılarak ISO sistemine göre N ile simgelenen  $R_a$  kullanılmaktadır (Akkurt, 1991: 9).





**Şekil 4.4. Yüzey Pürüzlülüğü ve Değerlendirilmesi (Kaynak: Akkurt, 1991, s.**

**9)**

İşleme kalitesini etkileyen faktörler; takım tezgahına ait sapmalardan kaynaklanan, tutturma sistemine ait hatalardan kaynaklanan, takım sistemine ait hatalardan kaynaklanan faktörler ve ortamın etkisi altında meydana gelen hatalardan kaynaklanan faktörler olarak gruplandırılabilir. Benzer şekilde, yüzey pürüzlülüğünü de etkileyen etkenlerden söz etmek mümkündür.

## 2. Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Faktörler

Bir talaş kaldırma işleminde yüzey pürüzlülüğü; talaş derinliği, ilerleme miktarı, köşe radyüsü, kesici veya malzeme cinsi, kesme hızı ve soğutma sıvısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler genel olarak;

- Geometrik faktörler
- İş malzemesi faktörleri
- Takım tezgahı ve titreşim faktörleri

şeklinde gruplandırılabilir (Şahin, 2003: 326).

Geometrik faktörler, işlenmiş bir parça üzerindeki yüzeyin geometrisini belirler. Bu faktörler; işleme tekniği türü, kesici takım geometrisi, köşe radyüsü ve ilerleme miktarını kapsar. Özellikle yüzey pürüzlülüğünü etkileyen takım geometrisi ve kesme parametrelerinin doğru bir biçimde seçimi özellikle toleransların sağlanmasında önemli bir faktördür (Neşeli – Yıldız – Türkeş, 2011: 580). Bu faktörlerle elde edilen yüzey

geometrisi, ideal veya teorik yüzey pürüzlülüğü olarak adlandırılır. Fakat bu ideal pürüzlülüğü elde etmek, iş malzemesi ve takım arasındaki etkileşim nedeniyle pek çok işlemde olanaksızdır.

Teorik olarak yüzey pürüzlülüğü, ilerleme ve köşe radyüsünün bir fonksiyonudur. Ancak pratikte kesme hızı, talaş derinliği ve takım aşınması da yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Çakır – Ensarioğlu – Demirayak, 2009: 107). Teorik yüzey pürüzlülüğü değeri, ilerleme ( $f$ ) ve köşe radyüsüne ( $r_e$ ) bağlı olarak

$$R_t = \frac{f^2}{8 \times r_e} \quad (4.5)$$

biçiminde formüle edilir. Büyük bir köşe radyüsü; tornalama işlemlerinde birim kenar uzunluğu başına düşük basınç, düşük ısı oluşumu ve belirli bir ilerleme değeri için daha iyi yüzey kalitesi gibi avantajlara sahiptir. Büyük köşe radyüsü, küçük köşe radyüsüne göre daha iyi bir talaş kırma görevi görmekte ve küçük köşe radyüsü ise radyüsün başladığı noktadan kesme işleminin bitiş noktasına kadar sabit kalınlıkta bir talaş meydana gelmesine neden olmaktadır (Çakır, 2010: 14).

Yüzey pürüzlülüğü, iş malzemesi faktörlerinden de etkilenmektedir. BUE'in (Built-Up Edge – Yığılma Kenar) periyodik olarak kırılmasıyla meydana gelen parçacıkların yüzeye yapışarak yüzeyi bozması, kıvrılan talaşın yüzeye hasar verebilmesi, gevrek malzemelerde kesikli talaş oluşacağından yüzeyde çatlaklar oluşması ve yeni oluşan yüzeyle takım kesme kenarı arasında sürtünmenin oluşması gibi faktörlerden söz edilmektedir (Şahin, 2003: 328).

Talaş kaldırmayı etkileyen faktörlerden biri olan titreşim; aynı zamanda kesici takım ömrünü ve işlenen yüzeyin kalitesini negatif bir biçimde etkilemektedir. Bir kesme işleminde titreşim iş parçası yüzeyinde kuvvetli dalgalanmalarla sonuçlanır. Talaş kaldırma esnasında oluşan bu olumsuz durumu önlemek amacıyla kesme şartları; kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği vb. optimize edilmelidir (Şahin, 2003: 323).

## **E. TALAŞLI İMALAT ve KESİCİ TAKIMLARDA AŞINMA**

Talaş kaldırma işlemi esnasında meydana gelen sürtünme ve sıcaklık takım aşınmasına yol açmaktadır. Takım aşınmasının esas nedeni sürtünme olup sıcaklık, takımın aşınmaya karşı mukavemetini azalttığından dolayı olayı hızlandıran bir etken olarak

görülmektedir. Takım, genellikle serbest yüzeyde aşınma bölgesinin belirli bir boyuta ulaşması, talaş yüzeyinde krater veya başka aşınma çeşitlerinin oluşması, kesme ağzından küçük parçacıkların kopması, yüzey kalitesinin bozulması, kesme kuvveti ve gücün aniden artması durumlarında aşınmış sayılır. Bu olayların biri veya birkaçı meydana geldiğinde, takım eski özelliğini kazanması için bilenir veya sert metal uçların kullanıldığı durumlarda değiştirilir. Pratikte önemli olan, bilemenin veya değiştirmenin aşınmanın hangi aşamasında yapılacağıının belirlenmesidir (Akkurt, 1991: 41).

Talaşlı imalat işlemlerinde takım aşınması kaçınılmaz bir olaydır. Ancak aşınmanın ne zaman, ne miktarda oluştuğu ve ne tip bir aşınma olduğunun bilinmesi durumunda fazla olumsuz bir etkisi görülmemektedir. Takım aşınması kesici kenar üzerine etkide bulunan mekanik, ısıl, kimyasal ve abraziv yükler gibi temel yük faktörlerinin bir sonucudur. İşleme sırasında kesici kenar üzerine etkileyen bu yük faktörleri nedeniyle, birtakım temel aşınma mekanizmaları talaş kaldırma işlemine etki eder. Bu aşınma mekanizmaları abraziv aşınma, difüzyon aşınması, oksidasyon aşınması, yorulma aşınması, adeziv aşınma olarak sıralanabilir (Çakır, 2006: 70).

Talaş kaldırma işlemi sürecinde kesici takımlar ve iş parçası malzemesi arasında meydana gelen sürtünme, kesici takım malzemesinin gittikçe artan bir biçimde hasar görmesine yol açar. Takım aşınması, takım malzemesinde aşamalı bir biçimde oluşan kayıplar sonucu takımın orijinal şeklinde meydana gelen değişimdir. Takım aşınmasının sonucunda; kötü yüzey kalitesi, kesme kuvvetinde artış, takım tezgahının titreşiminde artma, işleme süresince takım-iş parçası sıcaklığında artış, boyutsal hassasiyette azalış, maliyetlerde artış, üretim etkinliği ve kalite bileşenlerinde düşüş meydana gelir. Bu nedenle takım aşınması, talaşlı imalat süreçlerinde oldukça önemli bir parametre olarak kabul edilir. Dolayısıyla takım aşınmasının etkili bir biçimde modellenerek tahmin edilmesi, takımın maksimum kullanımının artırılması ve işleme maliyetlerinin minimize edilmesini sağlayacaktır (Sivasakthivel – Vel Murugan – Sudhakaran, 2010: 1780).

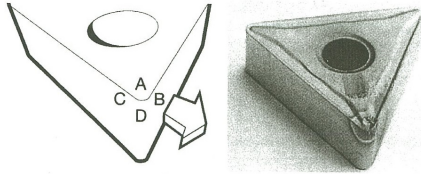
Talaşlı imalat süreçlerinin iki önemli parametresi olan, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü arasında bir neden sonuç ilişkisi kurmak mümkündür. Temel olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri, takım aşınmasının bir sonucu olarak kabul edilir. Takım aşınmasının artması durumunda, yüzey pürüzlülüğü de artar. Bu nedenle yeterli kesme parametrelerinin

belirlenmesi süreci, minimum yüzey pürüzlülüğü ve uzun takım ömrünün sağlanması bakımından çok önemlidir (Ozcelik – Bayramoglu, 2006: 1395).

Sert tornalama işleminde kesici takımlar, en kritik elementlerden biri olup kesici takım malzemelerinin henüz yeni olan gelişimi, aşınma rezistantındaki artışla karakterize edilmektedir. Bundan dolayı sert tornalama işlemlerinde takım aşınması, işlenmiş parçaların yüzey kalitesini etkileyen ilave bir faktör haline gelmiştir (Gaitonde *et al.*, 2009: 1373). Ayrıca çeşitli çalışmalarda yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme kuvvetlerinin kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı) ve takım geometrisine bağımlı olduğu gösterilmiştir (Davim – Figueira, 2007:1186).

### 1. Kesici Takımlarda Aşınma Tipleri

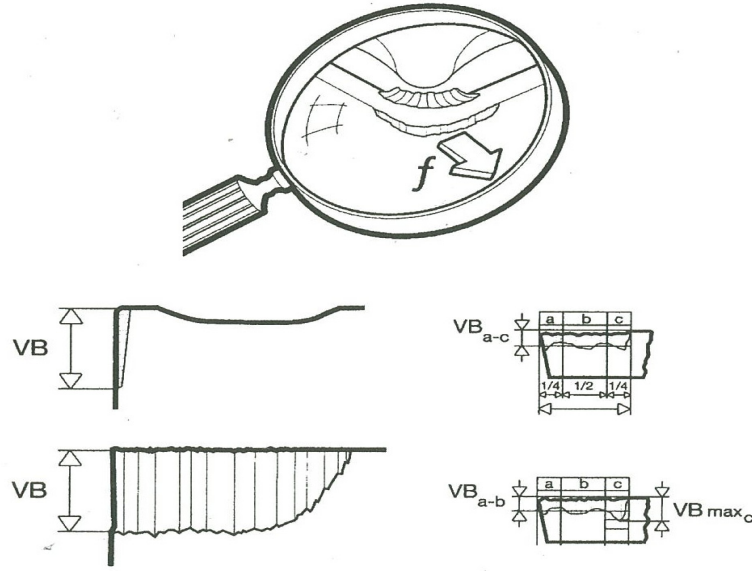
Bir kesici kenar üzerinde, takım aşınmasının meydana geldiği belirli bölgeler bulunmaktadır. Takım aşınmasının gözlemlendiği bu bölgeler, (*A* talaş yüzeyi, *B* serbest yüzey, *C* yardımcı kesici kenara ait serbest yüzey, *D* köşe radyüsü) Şekil 4.5’de görülmektedir. Takım aşınma tiplerinin sınıflandırılması, gerçekleştirilecek talaş kaldırma işleminin belirlenmesi ve optimize edilmesi bakımından bir temel teşkil etmektedir. Belli başlı aşınma tipleri arasında; serbest yüzey aşınması, krater aşınması, plastik deformasyon, çentik oluşumu, ısıl çatlaklar, mekanik yorulma çatlakları, kesici kenardan parçacık kopmaları, kesici ucun kırılması ve yığılma kenar oluşumu yer alır (Çakır, 2006: 75).



**Şekil 4.5. Kesici Uç Üzerindeki Aşınma Bölgeleri (Kaynak: Çakır, 2006, s. 75)**

Serbest yüzey aşınması Şekil 4.6’da da gösterildiği gibi, kesici kenarın serbest yüzeyinde meydana gelen ve en yaygın bir biçimde karşılaşılan aşınma türüdür. Bu durum, genellikle iş parçası malzemesine ait sert parçacıkların iş parçası yüzeyi ile takım arasına girmesi nedeniyle oluşan, abraziv tipi bir aşınma mekanizmasından kaynaklanır. Serbest yüzey aşınmasının gelişimi, başlangıç aşınması, düzenli aşınma ve son aşınma olmak üzere üç aşamada gerçekleşir. Serbest yüzey aşınması kritik değere ulaştığında, aşınma hızı, kesme kuvveti, sıcaklık hızlı bir biçimde artar ve işlenen yüzeyin pürüzlülüğü artar (Sivasakthivel – Vel Murugan – Sudhakaran, 2010: 1780). Dolayısıyla bu gelişimin

kontrol edilebilir bir düzeyde tutulması amaçlanmalıdır. Söz konusu aşınmanın belirli bir değerin üstüne çıkması durumunda yüzey kalitesi kötüleşir, hassasiyet azalır ve sürtünme artar.



**Şekil 4.6. Serbest Yüzey Aşınması (Kaynak: Çakır, 2006, s. 80)**

## 2. Kesici Takım Aşınmasının Belirlenmesi

Takım aşınması, aşınma gelişimini devam ettirirken aşınma bölgesi bir büyüteç altında incelenerek belirlenir. Bu inceleme aşınma kriterinin belirli bir değeri aşmasına kadar sürdürülür. Serbest yüzey aşınması Şekil 4.6'da da verildiği, gibi kesici kenar üzerinden ölçülür. Aşınmanın üç bölge üzerinde üniform bir biçimde yayılması durumunda serbest yüzey aşınması, ortalama bir değer ( $VB_{a-c}$ ) olarak alınır. Herhangi bir bölgede aşırı bir aşınma gözlenmesi durumunda ise  $VB_{max_c}$  aşınma değeri olarak alınır (Çakır, 2006: 79).

## F. TALAŞLI İMALAT ve CNC TAKIM TEZGAHLARI

1750'lerde insan gücü yerine buhar enerjisine dayanan makine gücünün kullanıldığı sanayi devrimi ile başlayan süreçte, metallere duyulan ihtiyacı artmış ve bunların işlenebilmesi için talaş kaldırma ile çalışan daha güçlü takım tezgahlarına gereksinim duyulmuştur. Bu nedenle torna, freze, matkap, planya-vargel ve taşlama olarak bilinen takım tezgahları geliştirilerek modern hale getirilmiş ve büyük üretim üniteleri kurulmuştur. Değiştirilebilirlik ilkesiyle tolerans kavramının ortaya atılmasıyla ve bu

süreçte üretimin artırılmasıyla birlikte kalite de iyileştirilmiştir. 1900'lere gelindiğinde Taylor, talaş kaldırma işleminin teorik temellerini oluşturarak bu işlemi ustalık düzeyinden bilimsel bir düzeye ulaştırmıştır. Üretim alanındaki merkezi sistemden bireysel sisteme geçiş sayesinde büyük parçaları işleyebilen büyük, güçlü ve rijit takım tezgahları ve hassas parçaları işleyebilen hassas takım tezgahları üretilmesiyle seri üretim dönemi başlamıştır (Akkurt, 2007: 22-26).

Otomasyon, bilimsel olarak insan müdahalesi olmadan herhangi bir hareketin oluşmasını sağlayan ve hareketin gerçekleşmesini kontrol eden bir olgudur. Bir başka deyişle otomasyon, bilginin program tarafından verildiği durumlarda sistemin çalışma şeklidir. Üretim faaliyetlerinde bilgisayarlar 1950'lerde ilk olarak Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT – Massachusetts Institute of Technology) laboratuvarlarında takım tezgahlarına uygulanarak Nümerik Kontrollü (NC – Numerical Control) olarak anılan ve yazılı programlara göre çalışan tezgahlar geliştirilmiştir. Bu tezgahlar gelişme bakımından NC, CNC ve HSM-CNC olmak üzere üç önemli aşamadan geçmişlerdir. Teknolojik açıdan bir devrim olarak nitelendirilen NC tezgahların geliştirilmesinin ardından 1980'lere doğru NC tezgahların kontrol ünitesine bir bilgisayarın yerleştirilmesiyle bu tezgahlar Bilgisayarlı Sayısal Kontrollü (CNC - Computer Numerical Control) tezgahlara dönüştürülmüştür. CNC tezgahlar, tezgahın tüm hareketlerinin insan tarafından kontrol edildiği konvansiyonel adı verilen önceki tezgahlara göre insan müdahalesi olmaksızın yazılı bir programa göre çalışan, parçaları yüksek bir doğruluk ve hassasiyetle çok kısa sürede işleyebilen, işlemi sonsuza değin tekrarlayabilen ve en karmaşık parçaları dahi işleyebilen tezgahlardır. 1900'den sonraki üçüncü aşamada CNC tezgahlar HSM (High Speed Machining) denilen Yüksek Hızlı tezgah sistemlerine dönüştürülmüştür. Konvansiyonel tezgahlarda iş milinin dönme hızı maksimum 10000...12000 dev/dak ve ilerleme hızları 7000...8000 mm/dak iken HSM-CNC iş milinin dönme hızı maksimum 40000...50000 dev/dak ve ilerleme hızları 70000...1400000 mm/dak olabilmektedir. Sert veya sertleştirilmiş metalleri de işleyebilen bu tezgahların en önemli avantajları şu şekilde sıralanabilir (Akkurt, 2010: 7):

- İşleme zamanı ve dolayısıyla işleme maliyetini önemli ölçüde azaltmaları
- Aynı takım ve tezgahta bir parçanın hem kaba hem ince işlemlerinin yapılması
- Çok iyi yüzey kalitesi elde edilmesi ve
- Çok ince cidarlı parçaların işlenebilmesi.

Bilgisayar ve Nümerik Kontrol gibi sistemlerin ortaya çıkması ile bu sistemler mühendisliğin tasarım - üretim alanlarında kullanılmaya başlanmış ve Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD - Computer Aided Design) ve Bilgisayar Destekli İmalat (CAM - Computer Aided Manufacturing) yöntemlerini geliştirmiştir. Günümüzde CAD, CAM ve CNC sistemleri arasında önemli bir organik bağ oluşmuş olup bu sistemler CAD-CAM-CNC şeklinde entegre bir biçimde çalışmaktadır. Bu sayede üretim ve ürün yenilik çevrimleri çok kısa zamanda gerçekleştirilerek çok geniş bir yelpazede kaliteli ve ucuz ürünler üretilir.

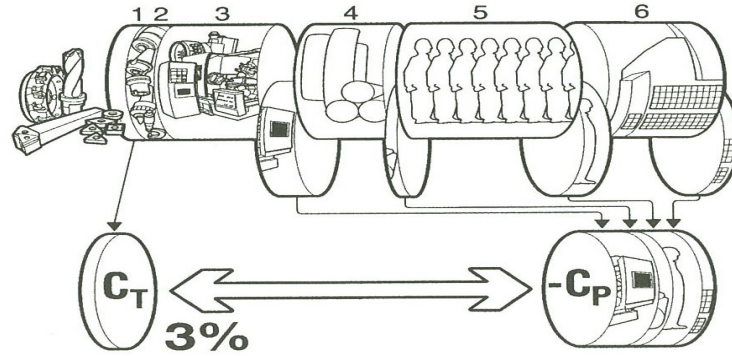
## **G. TALAŞLI İMALAT ve EKONOMİ**

Günümüzde pazar, kalite ve produktivite başarıya ulaşmak için gerekli temel etkenler olarak kabul edilmektedir. Endüstriyel üretimin yapıldığı birçok alanda ekonomi ve kalite açısından, istenilen üretimin gerçekleştirilmesinde kesme takımları önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle düzgün bir biçimde tasarlanmış bir işleme süreci, üretim maliyetleri ve kalite düzeyleri üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olacaktır (Jeang *et al.*, 2010: 325). İş parçasının işleme maliyetinin minimize edilmesi için kesme parametreleri, kesme zamanı ve maliyetlerinin azaltılması sağlanmalıdır. Bu bağlamda literatür incelendiğinde, kesme işlemlerine ilişkin kesme parametrelerinin ele alındığı Taguchi metodu, tepki yüzeyi metodolojisi, matematiksel programlama, dinamik programlama (LP, NLP, DP), genel optimizasyon teknikleri ve genetik algoritma gibi birtakım optimizasyon çalışmalarının olduğu görülmektedir (Jeang, 2011: 1354).

Talaş kaldırma işleminin amacı, parçalara şekil vermenin yanı sıra bunları geometrik, boyutsal ve yüzeysel bakımdan belirli bir doğruluk derecesine göre imal etmektir. Bu kriter, günümüzde talaş kaldırma işleminin en önemli özelliği olarak kabul edilen işleme kalitesi olarak adlandırılır. Bir parça işlendikten sonra, bazı nedenlerden dolayı nominal (ideal) şekline göre geometrik, boyutsal ve yüzeysel bakımdan birtakım sapmalar göstermektedir. Bu hatalar, parçanın kullanma yerine göre parçanın geometrik, boyutsal ve yüzeysel kalitesini oluşturan toleranslarla ifade edilen, izin verilen bir değerde tutulduğu takdirde, parçanın çalışmasına engel olmamaktadır. Sözü edilen hatalar ile kalite arasında ters yönlü bir ilişki mevcuttur. Hatalar ne kadar küçük ise (toleranslar sıkı) kalite o kadar yüksek, hatalar ne kadar büyük ise (toleranslar kaba) kalite o kadar düşük olacaktır. Mühendislik açısından önemli olan nokta, parçanın kullanma yerine göre

kalitesini, teknik ve ekonomik bakımdan uygun olacak şekilde belirlemek ve parçayı bu kaliteyi sağlayacak tekniklerle işlemektir (Akkurt, 1991: 4).

Talaşlı imalat işleminin ekonomisi üzerinde etkili olan birçok etken bulunmaktadır. Takım tezgahı, iş parçası malzemesi, iş parçası boyutları, parti büyüklüğü, otomasyon oranı ve kontrol tipi bu etkenlerden birkaçı olarak gösterilebilir. Talaş kaldırma işlemlerinde ekonomiklik, önemli ölçüde üretim kaynaklarının optimum kullanımı ile maksimum prodüktivitenin sağlanmasına bağlıdır. Bu konuda kesici takım, maliyet üzerinde son derece önemli bir faktördür. Üretim maliyetleri Şekil 4.7’de verildiği gibi, genellikle kesici takım maliyeti (1), sıkma tertibatları ve ölçme cihazlarının maliyetleri (2), tezgah maliyeti (3), iş parçası malzemesi maliyeti (4), işçilik maliyeti (5) ve genel giderlerden (6) meydana gelir. Kesici takım maliyeti ( $C_T$ ), üretim maliyetinin yalnızca %3’lük kısmını oluşturmasına rağmen, diğer maliyetleri etkilemesi açısından çok önemlidir. Doğru takımın doğru uygulamada kullanılmasıyla, toplam üretim maliyeti ( $-C_P$ ) önemli miktarda azaltılmış olur (Çakır, 2006: 84).



**Şekil 4.7. Üretim Maliyetini Oluşturan Maliyetler (Kaynak: Çakır, 2006, s. 84)**

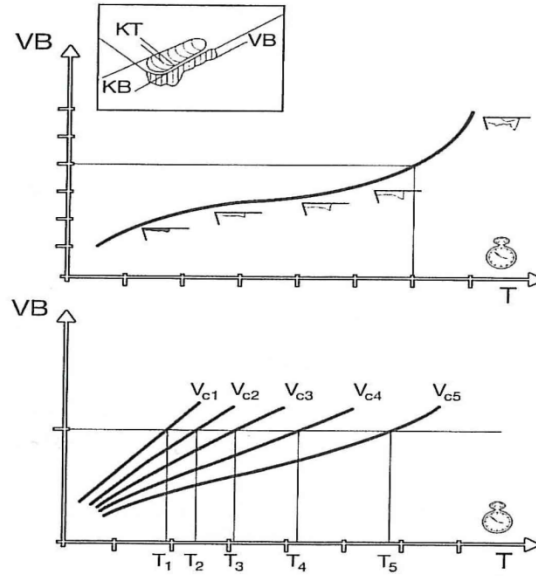
### **1. Ekonomiklik Faktörleri**

Kesici takımın ekonomik açıdan performansı; takım ömrü, kesme verileri, talaş kontrolü, güvenilirlik, takım değiştirme ve envanter gibi faktörlere bağlıdır. Takımın bu faktörler açısından iyi bir performans sergileyememesi, üretim maliyetlerinde büyük artışlara yol açacaktır. Bu faktörlerden takım ömrü, takımın izin verilen aşınma değerine erişene kadar geçen talaş kaldırma zamanı olarak ifade edilir. Bu süreçte, izin verilen aşınma miktarı başlangıçta belirlenmektedir. Bu zamandan sonra, takımın artık talaş



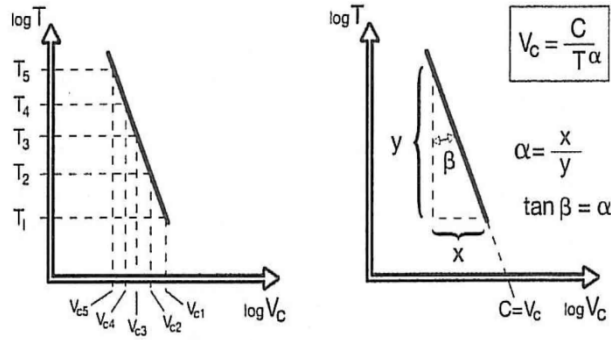
kaldırma olayını memnun edici bir biçimde gerçekleştiremeyecek kadar aşınmasından dolayı, bilenmesi veya değiştirilmesi gerekir (Akkurt, 1991: 42).

Takım ömrü, genellikle ucun veya kenarın kırılmasıyla son bulur. Ancak talaşlı imalatta, herhangi bir hatalı parça üretiminden veya takımın kırılma noktasının hemen öncesinde kesici kenar değiştirilir. Farklı işlemlerde ve takımlarda aşınma değerleri farklı olmasına rağmen bir kesici kenarın; istenen yüzey kalitesini sağlayamaması veya belirli bir tolerans aralığında yer alamaması durumunda, işlemlerde kullanılması mümkün değildir. Bundan dolayı, aşınmanın belirlenmesi ve aşınma yönünün kontrolü son derece önemli bir konudur. Bu amaçla takım aşınması / zaman ilişkisinin belirlenmesinde, aşınma değerleri için en yaygın karşılaşılan aşınma tipi olması nedeniyle serbest yüzey aşınması bir norm olarak kullanılabilir (Çakır, 2006: 86).



**Şekil 4.8. Aşınmanın Gelişimi ve Ömür (Kaynak: Çakır, 2006, s. 87)**

Şekil 4.8'de verilen aşınma (VB) / zaman (T) diyagramı takip edildiğinde, aşınmanın her zaman doğrusal olmadığı, eğrinin şeklinin kesme hızına bağlı olduğu ve her bir hız için farklı aşınma eğrileri çizildiği görülmektedir. Aşınma eğrisi başlangıçta orta hızlı yol alırken, sonrasında hızda ani bir artış gözlenmektedir.

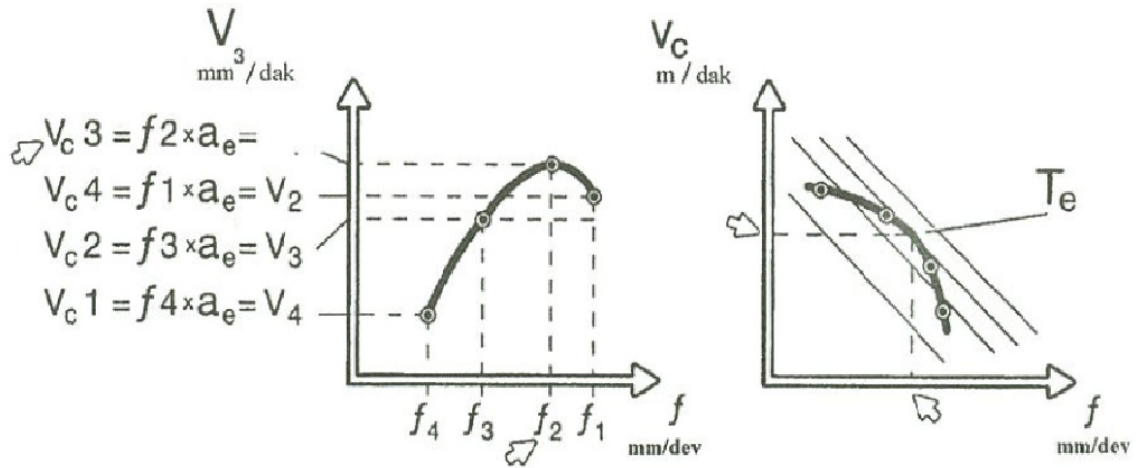


**Şekil 4.9. Ömür / Kesme Hızı Bağıntısı (Kaynak: Çakır, 2006, s. 87)**

İşleme zamanı ( $T$ ), belirli bir aşınma miktarı için kesici kenarın ömrü olarak kabul edilir. Bu sebeple bir sonraki aşamada, işleme zamanı ( $T$ ) ile kesme hızı ( $V_c$ ) ilişkisinin belirlenmesi gündeme gelmektedir. Şekil 4.9'da verilen logaritmik bir cetvel üzerinde çizilen bu diyagram, Taylor bağıntısı olarak bilinen bağıntıyı temsil etmektedir. Bu bağıntıda,  $\alpha$  ve  $C$  olmak üzere iki sabit bulunmaktadır. Doğrunun eğimi  $\alpha = x / y$  bağıntısından bulunurken,  $C$  logaritmik doğrunun uzatılarak  $\log V_c$  eksenini kestiği noktanın belirlenmesi ile bulunur.

$T - V_c$  diyagramında, verilen doğrunun konumu ve eğimi iş parçası - takım malzemesi ve ilerleme hızından etkilenir. İlerleme değerinin değişmesi, eğrinin pozisyonunu değiştirir. Belirli bir takım ömrü için, daha yüksek bir ilerleme, daha düşük bir takım ömrü anlamına gelir. Farklı ilerleme değerleri için, farklı kesme hızı / takım ömrü eğrileri bulunmaktadır. Bu diyagramların çizilmesinde, ihmal edilebilen etkilerinden dolayı talaş derinliği, köşe radyüsü ve yanaşma açısı ikinci dereceden önemli kesme verileri olarak nitelendirilirler.

Kaba talaş kaldırma işleminde, ekonomik parametrelerin belirlenmesi amacıyla, işlemin en yüksek verimlilikte yapılabilmesi için ilerleme hızı, iş parçası için söz konusu olan sınıra ulaşana, talaş kontrolü kaybolana, takım kırılma noktasına erişene veya tezgah durana kadar arttırılabilir. Bu süreçte, çeşitli kesme hızlarında takım ömrü diyagramları çizilir ve takım ömrü boyunca işlenen iş parçası sayısı kaydedilir. Sonuçta, yapılan karşılaştırmalarla en uygun kesme verileri tespit edilir. Burada amaç, tezgahın en yüksek oranda kullanılması ve en iyi talaş kontrolünün sağlanmasıdır (Çakır, 2006: 89).



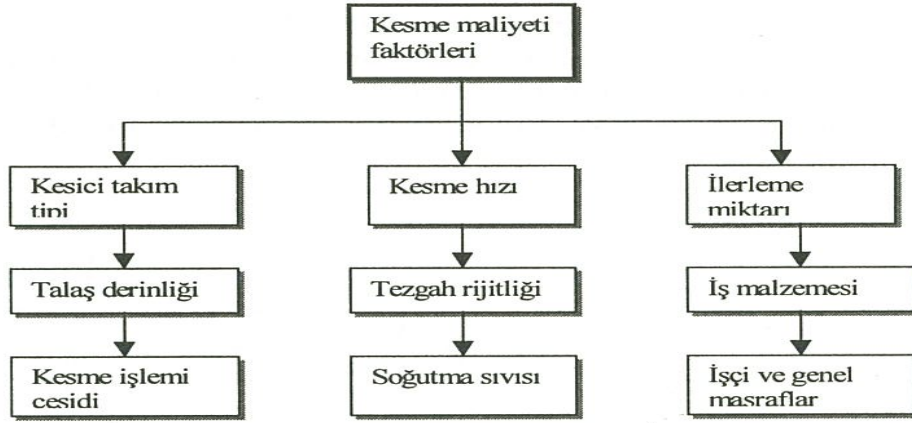
**Şekil 4.10. İlerlemenin Takım Ömrüne Etkisi (Kaynak: Çakır, 2006, s. 89)**

Kesme hızı / ilerleme eğrisinden hareketle, ekonomik takım ömrü eğrisini ( $T_e$ ) çizmek mümkündür. Şekil 4.10 incelendiğinde,  $45^\circ$ 'lik açıyla çizilen doğrunun bu eğriye teğet olduğu noktada, ekonomik kesme hızı ve ilerleme değerinin belirlenebileceği görülmektedir.

## 2. Maliyetler

Bir kesme işleminde, minimum maliyete ulaşmak için, takım mühendisleri ve ilgili personel, kullanılan metotlar ve toplam işleme zamanına bakmalı ve maliyeti etkileyen faktörleri dikkate almalıdır. Kesme işlemini etkileyen birçok değişken, Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Bunlardan kesici takım maliyeti, aşağıda verilen birçok faktörden etkilenmesinden dolayı son derece önemli olup, söz konusu faktörler kısaca şu şekilde açıklanabilir (Şahin, 2003: 324):

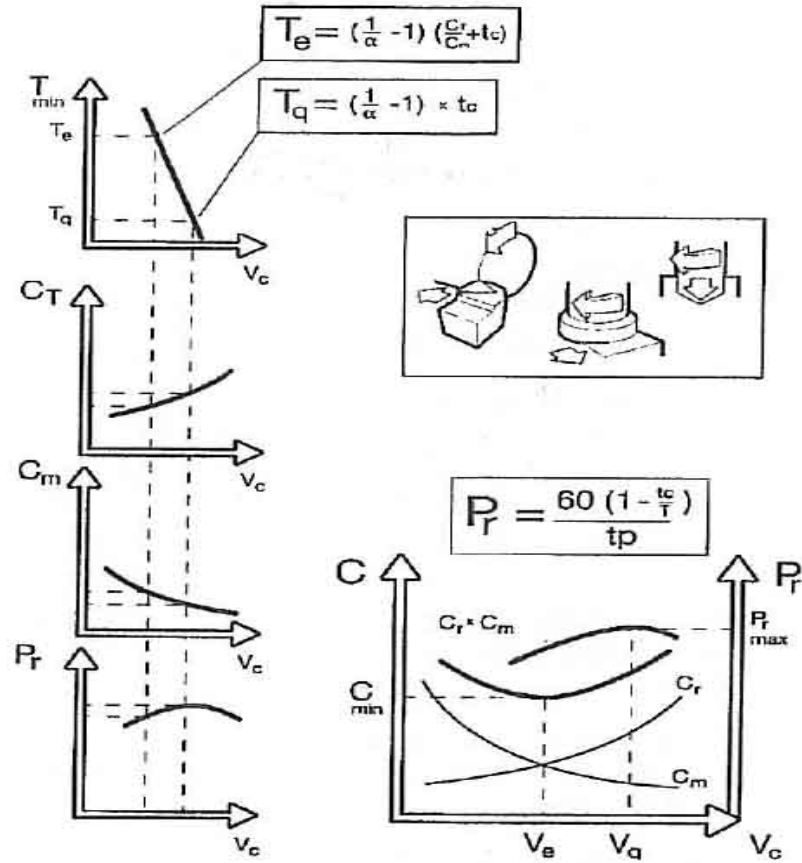
- Talaş kaldıracak bir takımın özelliği, üretim miktarını ve üretim yapabilmek için gerekli yatırım ve işçi sayısını belirler.
- Talaş kaldıracak bir takımın özelliği, hassas iş parçası ve iyi yüzey elde etmek için takımın birkaç kez ayarlanması veya yeni takımın belirlenmesi ile ilgilidir.
- Kesici takımın aşınma miktarı, tezgahtan çıkarılacak aşınmış takım sayısı ve yerine takılarak kullanılacak takım sayısını belirler.



**Şekil 4.11. Bir Parçanın İşlenme Maliyetini Etkileyen Faktörler (Kaynak: Şahin, 2003, s. 325)**

Kesici takımın ekonomik açıdan performansı; takım ömrü, kesme verileri, talaş kontrolü, güvenilirlik, takım değiştirme ve envanter gibi faktörlere bağlı olduğu ve takımın bu faktörler açısından iyi bir performans sergileyememesinin, üretim maliyetlerinde büyük artışlara yol açacağı daha önceki paragraflarda belirtilmişti. Buradan yola çıkılarak ekonomik takım ömrü ( $T_e$ ), Şekil 4.12’de verilen formüller yardımıyla hesaplanabilir. Kesme verilerinin çeşitli kombinasyonları, aynı ekonomik takım ömrünü verebilir. Ancak burada amaçlanan, ekonomik takım ömrü bakımından minimum işleme maliyeti veya maksimum üretim hızını veren kesme verilerinin tespit edilmesidir (Çakır, 2006: 88).

Formülasyonda kullanılan değişkenler şu şekildedir;  $T_e$ : dakika cinsinden ekonomik takım ömrü,  $\alpha$ : takım ömrü / kesme hızı eğrisinin eğimi,  $C_t$ : kesici kenar başına takım maliyeti,  $C_m$ : dakikadaki tezgah, işçilik giderleri ve genel giderler,  $t_c$ : takım değiştirme zamanı,  $t_p$ : toplam zaman / parça,  $P_r$ : üretim hızı,  $V_e$ : minimum işleme maliyeti açısından kesme hızı ve  $V_q$ : minimum işleme zamanı açısından kesme hızıdır. Maksimum üretim hızı için takım ömrü ( $T_q$ ) ise, ekonomik takım ömrünün farklı bir varyasyonudur. Burada değişkenler aynı kalırken, kesme hızı daha yüksek ve takım ömrü daha kısa olmaktadır.



**Şekil 4.12. Üretim Maliyetleri ve Verimlilik (Kaynak: Çakır, 2006, s. 93)**

Bir iş parçası için minimum işleme maliyeti, ekonomik kesme hızı kullanılarak hesaplanırken; daha yüksek bir kesme hızı ile talaş kaldırmanın gerekli olduğu durumlarda bazı ek maliyetler getirir. Daha yüksek bir üretim hızı isteniyorsa, bu maliyetlerin göz önünde bulundurulması gerekecektir. Şekil 4.12’de verilen  $V_q$  kesme hızı,  $V_e$  kesme hızından büyüktür ve bu iki kesme hızı arasındaki değerler, yüksek verimliliğin sağlandığı değerlerdir.

Bu bağlamda takım ömrünün uzatılması, tezgahın daha az durarak daha uzun süre talaş kaldırmasını sağlayacaktır. Diğer taraftan, ilerleme hızı veya kesme hızının artırılması, parça başına işleme zamanını önemli miktarda azaltacağından, saat başına maliyetleri yüksek olan üretim kaynakları daha az kullanılacak ve üretim hızı artacaktır. İş parçası malzemesinin türü, parçanın işlenebilirliğini belirlediğinden dikkate alınması gereken bir faktördür.

### 3. Optimizasyon

Talaş kaldırma işleminin teknik ve ekonomik olmak üzere, iki boyutundan söz edilebilir. Teknik açıdan kastedilen, boyutlar ve yüzey kalitesi olurken ekonomik boyuttan kasıt, minimum maliyetin sağlanmasıdır. Ekonomik yönün aslını, parçanın imalat zamanı oluşturmaktadır. Dolayısıyla talaş kaldırma işleminin performansının, minimum işleme maliyeti ve maksimum üretim hızı verileri arasında kalacak biçimde optimize edilmesiyle, üretim zamanından tasarruf sağlanacaktır. Üretimde zaman, para anlamına gelmektedir. Bu sayede, üretim kaynakları daha iyi kullanılacak ve yatırımın getirisi iyileştirilmiş olacaktır (Çakır, 2006: 92).

Söz konusu teknik ve ekonomik faktörler, talaş kaldırma koşullarını belirleyen kesme faktörlerine bağlıdır. Bu faktörler; kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği (paso kalınlığı) ve takım ömrüdür. Bunlar, parçanın imalat zamanını da belirleyerek, talaş kaldırma olayının ekonomik yönünü de etkilemektedir. Talaş kaldırma işleminin ekonomisini etkileyen takım tezgahı kapasitesi, gerekli iş parçası geometrisi, kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği gibi birçok faktör bulunmaktadır (Çakır – Gürarda, 2000: 3538).

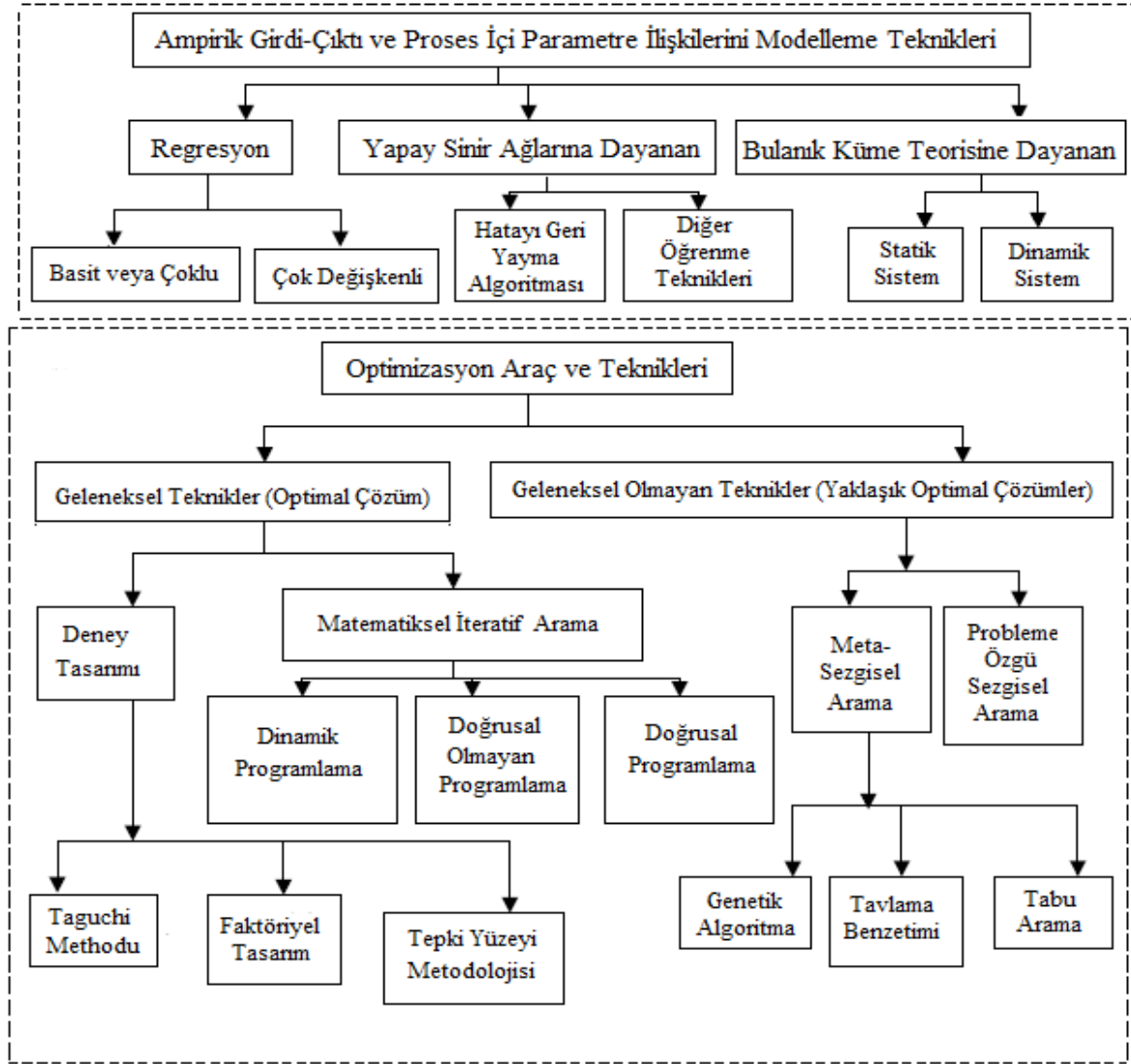
Talaş kaldırma işlemine başlamadan önce hangi takımın kullanılacağı, hangi kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin seçileceği tespit edilmelidir. Bu parametrelerin seçimi, üç şekilde gerçekleştirilmektedir. İlk olarak, her işleme tekniği için gereken değerler, deney ve tecrübelerle göre hazırlanan cetvellerden seçilebilir. İkinci olarak, bu değerlerin teknik koşullara bağlı, analitik olarak hesaplandığı analitik yöntem kullanılır. Üçüncü olarak, söz konusu değerlerin teknik ve ekonomik koşullara bağlı optimizasyon ilkelerine göre tespit edildiği optimizasyon yöntemi kullanılır. Analitik yöntemde kesme koşulları takım ömrü, kesme gücü ve yüzey kalitesi gibi esaslara dayanılarak belirlenir. (Akkurt, 1991: 47). Bu başlık altında analitik yöntemden fazla söz edilmeyip, optimizasyon yöntemi üzerinde durulacaktır.

Optimizasyon yönteminin baz aldığı teknik koşullar, parçaya şekil vermek için uygulanan işleme yöntemleri ve bu yöntemlere ilişkin faktörlerden oluşur. Ekonomik koşullar ise, parçanın imalat maliyetini ve buna bağlı olarak işleme maliyetini belirleyen işleme zamanı ve buna bağlı faktörleri içerir. Bu teknik ve ekonomik koşullar gözetilerek yapılan işlemler, bilimsel talaş kaldırma işlemleri olarak adlandırılır. Bilimsel talaş

kaldırma işlemlerine göre, kesme faktörlerinin tespiti iki şekilde yapılır. İlk seçenekte, işleme zamanını oluşturan faktörlere dayanarak, zaman bakımından optimum bir ömür belirleyerek yapılan, produktivite esasına dayalı bir yöntem kullanılır. İkincide ise, işleme maliyetini oluşturan faktörlere göre, maliyet bakımından optimum bir ömür belirleyerek yapılan, ekonomik esasa dayalı bir yöntem kullanılır. Zaman bakımından optimum bir ömrün belirlendiği ilk seçenekte, toplam işleme zamanı, kesme hızına bağlı olarak minimum bir değer alır. Optimum işleme zamanını temsil eden bu değer, işleme zamanı bakımından optimum kesme hızını verir. Buna karşı gelen ömür ise, optimum ömür olarak adlandırılır. Diğer taraftan ikinci durumda parçanın toplam maliyeti, maliyet esasına göre optimum kesme hızı olarak adlandırılan belirli bir hızda, minimum bir değere sahip olacaktır. Bu değere karşı gelen ömür ise, optimum ömür olarak nitelendirilir (Akkurt, 1991: 49-56). Maliyetler başlığı altında bu konular detaylı bir biçimde işlendiğinden, burada sadece temel noktaların verilmesiyle yetinilmiştir.

Talaş kaldırma işlemlerinin her birinin optimizasyonu, zaman ve kaynakların kullanım oranlarının artırılması, her işletme için son derece gerekli, önemli ve sürekli aktivitelerdir. Bu amaçla kullanılan metotlar ve maliyet analizleri, en iyi takım ve en iyi işleme yönteminin bulunmasına yardımcı olurlar. Talaş kaldırma işlemlerinin optimizasyonunda, basit ölçüler dahi çok büyük anlam ifade eder. Optimizasyon işlemi sayesinde, standart bir program belirlenerek üretim için nasıl bir envantere ihtiyaç olduğu tespit edilir (Çakır, 2006: 95).

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan optimizasyon metotları, üretimde ve süreçlerde çıktı kalitesinin sürekli geliştirilmesi için, çok önemli bir araç olarak görülür. Söz konusu metotlar, optimal kesme koşullarının belirlenmesi, girdi-çıkıtı ve süreç içi parametre (in-process parameters) ilişkilerinin modellenmesini içerir. Talaşlı imalat süreçlerinin dinamiklerindeki karmaşıklık, kesme koşullarının optimal veya yaklaşık optimal (near optimal) çözümlerinin belirlenmesinde, çok çeşitli modeller ve amaç fonksiyonlarının kullanılması gereksinimini doğurmuştur. Araştırmacı ve pratisyenler için, optimal veya kabul edilebilir yaklaşık optimal çözümlerin elde edilmesi, kritik ve zor bir görevdir. Şekil 4.13'den görülebileceği gibi, modelleme teknikleri olarak istatistiksel regresyon, yapay sinir ağları ve bulanık küme teorisine dayanan birkaç yöntem önerilmiştir. Optimizasyon için önerilen teknikler, geleneksel ve geleneksel olmayan teknikler olmak üzere iki ana grup altında toplanmıştır (Mukherjee – Ray, 2006: 15-18).



**Şekil 4.13. Talaşlı İmalat İşlemlerinde Kullanılan Modelleme ve Optimizasyon Teknikleri (Kaynak: Mukherjee – Ray, 2006, s. 19)**

Geleneksel teknikler lokal optimal çözümler sunarken, geliştirilen dışsal (extrinsic) model veya amaç fonksiyonuna dayanan geleneksel olmayan teknikler, sadece yaklaşık optimal kesme koşullarının sağlanması için bir yaklaşım olarak nitelendirilir. Geleneksel teknikler, deney tasarımı ve iteratif matematiksel araştırma teknikleri olmak üzere iki kategori altında toplanabilir. Deney tasarımı olarak adlandırılan ilk kategori, Taguchi metodu ve tepki yüzeyi metodolojisi gibi istatistiksel deney tasarımı tekniklerini içerirken, iteratif matematiksel araştırma teknikleri olarak tanımlanan ikinci kategori, doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama ve dinamik programlama algoritmalarını kapsar. Geleneksel olmayan meta-sezgisel (meta-heuristic) arama tabanlı teknikler, genetik



algoritma, tabu arama (tabu search) ve benzetilmiş tavlama (simulated annealing) gibi metotları içerir.

Talaş kaldırma koşullarının optimizasyonu problemlerinin çözümünde performans zarflama (performance envelope), doğrusal programlama, Lanrangian çarpanları (Lanrangian multipliers), geometric programlama (geometric programming), dinamik programlama, grafiksel metotlar ve yapay zeka metotları literatürde yer alan bazı diğer yöntemlerdendir (Çakır – Gürarda, 1998: 265).

## BEŞİNCİ BÖLÜM

### UYGULAMA

Bu bölümde, talaşlı imalat işlemlerinde çok önemli bir kalite karakteristiği olarak kabul edilen yüzey pürüzlülüğü ve kesme parametreleri ilişkisi, ileri bir deney tasarımı yöntemi olarak nitelendirilen tepki yüzeyi metodolojisi ile modellenmeye çalışılacaktır. Gerçekleştirilecek uygulamalar, çalışmanın hedefleri doğrultusunda üç aşamadan meydana gelmektedir. Söz konusu metodolojide, deneylerin gerçekleştirilmesi aşamasında uygun ve etkin bir tasarımın seçilmesi konusu, maliyet ve zaman gibi kriterler göz önüne alındığında son derece önemlidir. Bu amaçla, öncelikle bu metodolojide sıklıkla kullanılan iki tasarım, önemli grafiksel tekniklerden varyans yayılım grafiği ve kesirli tasarım uzayı grafiği teknikleriyle değerlendirilecektir. Böylelikle çalışmanın birincil hedefi olan deney parametrelerine ilişkin kullanılabilir iki tasarımın karşılaştırılması sağlanmış olacaktır. Çalışmanın ikincil hedefi, uygun tasarım seçimi ve deneylerin gerçekleştirilmesinin ardından gelen ikinci aşamada, kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması ilişkisinin tepki yüzeyi metodolojisiyle modellenerek analiz edilmesidir. Üçüncü ve son aşamada ise, tahmin edilen modellerin optimizasyonu bağlamında, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması için optimum koşulların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Yapılan uygulamalarda, Design Expert ve Minitab programları ve bu programlar altında çalıştırılabilen makrolardan yararlanılmıştır

#### **I. VARYANS YAYILIM GRAFİĞİ TEKNİĞİ ile UYGUN TASARIMIN BELİRLENMESİ**

Çeşitli endüstrilerde, süreçlerin modellenmesi ve optimize edilmesinde etkin bir kullanım alanına sahip olan, tepki yüzeyi metodolojisinin adımsal yaklaşım süreci, dikkatle belirlenmesi gereken bir süreçtir. Söz konusu süreçte, deneylerin planlanması aşamasında uygun ve etkin bir tasarımın seçilmesi, çok yönlü ve oldukça önemli bir problematik olarak görülmektedir. Bu problemin aşılması amacıyla, tepki yüzeyi metodolojisinde tasarımların

değerlendirilmesi veya karşılaştırılmasında sayısal kriterler ve özellikle son yıllarda yaygın bir biçimde uygulanan, grafiksel yöntemler kullanılmaktadır.

Grafiksel yöntemler tasarım uzayında tasarım performansı hakkında tek-değerli kriterlerden daha fazla bilgi vermektedir. Giovannitti-Jensen ve Myers (1989) tarafından geliştirilen varyans yayılım grafiği, spesifik bir tasarım için ilgilenilen bölge genelinde minimum, maksimum ve ortalama tahmin varyansını gösterir. Grafik, tasarım uzayının merkezinden hareket eden eş merkezli küreler üzerindeki tahmin varyansının incelenmesine odaklanmıştır. Varyans yayılım grafiği, tasarım uzayı genelinde tasarımın tepkiyi ne kadar iyi tahmin edebileceğini betimlemektedir. Bu çalışmada, Tepki yüzeyi metodolojisinin önemli tasarımlarından olan, Merkezi bileşik tasarım ile Box-Behnken tasarımı varyans yayılım grafiği kullanılarak karşılaştırılacaktır. Bu amaçla, dikkate alınan üç faktör ile söz konusu tasarımların oluşturulmasının ardından, çizilen varyans yayılım grafikleri çeşitli kriterler göz önünde bulundurularak değerlendirilecektir.

Tepki yüzeyi metodolojisinde yaygın bir biçimde kullanılan merkezi bileşik tasarım, üç alt tasarımdan meydana gelir ve toplam  $n = 2^k + 2k + n_c$  sayıda farklı tasarım noktası içerir. Bu tasarım,  $k$  adet kontrol edilebilen değişkenin bulunduğu  $2^k$  tam faktöriyel ortogonal tasarım veya kesirli faktöriyel bir tasarıma,  $2k$  adet aksel nokta ve  $n_c$  adet merkez nokta eklenmesiyle oluşturulur. Çalışmamızdaki beş düzeyli üç faktör için oluşturulan merkezi bileşik tasarım, temel olarak 8 adet tam faktöriyel tasarım noktası, 6 adet aksel nokta ve 6 adet merkez noktadan oluşmaktadır. Aksel noktalar, döndürülebilirlik özelliğinin sağlanması amacıyla  $\alpha = \mp 1,682$  değeri kullanılarak oluşturulmuştur. Kodlanmış değerler kullanılarak üretilen söz konusu tasarım Tablo 5.1'de verilmiştir.

**Tablo 5.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Merkezi Bileşik Tasarım**

Deneme no	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	0	0	0
2	0	0	-1,68179
3	0	0	1,68179
4	0	0	0
5	0	0	0
6	-1	1	1
7	0	1,68179	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	-1,68179	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	-1	1	1
14	-1	-1	1
15	0	0	0
16	-1	-1	-1
17	0	0	1,68179
18	0	0	0
19	-1	1	-1
20	0	1,68179	0
21	-1	-1	-1
22	-1,68179	0	0
23	1	-1	1
24	0	0	-1,68179
25	1	-1	-1
26	-1	1	-1
27	0	0	0
28	1	1	1
29	-1,68179	0	0
30	1,68179	0	0
31	0	0	0
32	0	0	0
33	-1	-1	1
34	1	1	1
35	0	-1,68179	0
36	1	1	-1
37	1	1	-1
38	1	-1	1
39	1,68179	0	0
40	1	-1	-1

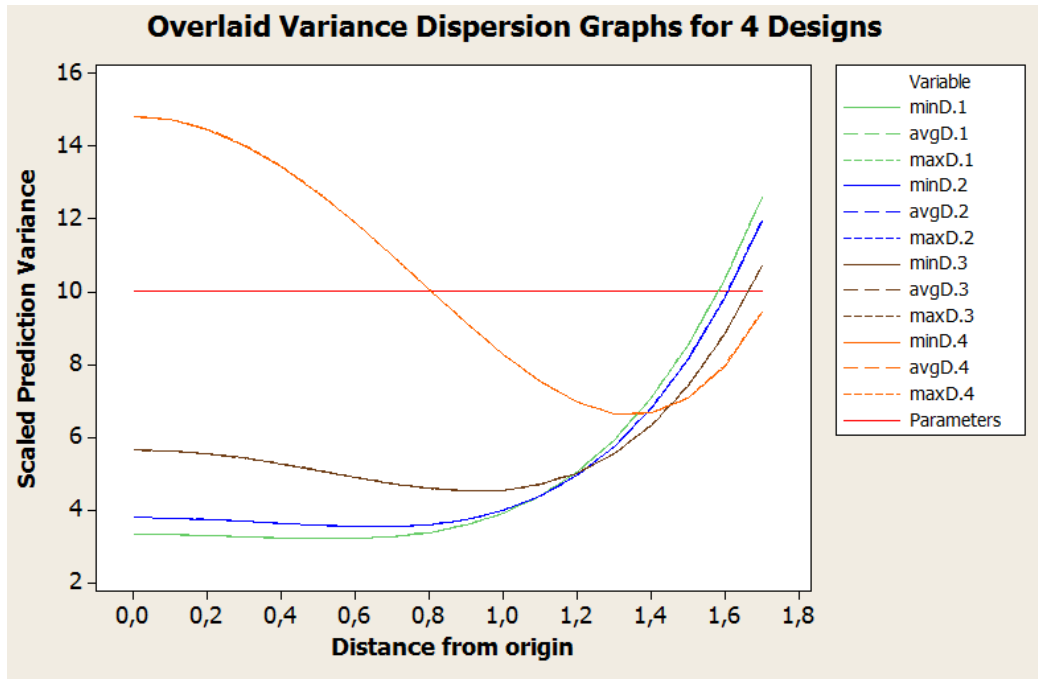
Simetrik üç düzeyli tasarımlardan olan Box-Behnken tasarımları, her biri kontrollü değişkenlerin yalnızca bir alt kümesi kullanılarak yapılandırılır. Dengeli tamamlanmamış blok tasarımlarına dayanan ve üç düzeyli tasarımların etkili bir türü olan Box-Behnken tasarımları, faktörlerin sadece üç düzeye sahip olmasının zorunlu olduğu veya arzulandığı durumlarda kullanılan bir tasarım türüdür. Çalışmamızda, üç faktör için üretilen ve her bir faktörün üç düzeye sahip olduğu Box-Behnken tasarımı, temelde 12 adet faktöriyel tasarım noktası ve 3 adet merkez noktadan oluşmaktadır. Kodlanmış değerlerden yararlanılarak üretilen söz konusu tasarım Tablo 5.2'deki gibidir.

**Tablo 5.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Box-Behnken Tasarımı**

Deneme no	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	1	0	1
2	0	-1	1
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	1	0	-1
6	0	-1	-1
7	-1	1	0
8	-1	-1	0
9	0	1	-1
10	0	0	0
11	-1	0	1
12	0	0	0
13	-1	0	-1
14	0	1	1
15	0	0	0

Merkezi bileşik tasarımda, esneklik alanı aksenal uzaklık  $\alpha$  'nın ve merkez deneme sayısı  $n_c$  'nin seçimiyle ilişkilidir. Seçimi son derece önemli olan bu parametrelerden,  $\alpha$  'nın seçimi ilgilenilen ve işletilebilen bölgeye bağlı iken,  $n_c$  'nin seçimi ilgilenilen bölgede ölçekli tahmin varyansı  $v(x) = NVar(\hat{y}) / \sigma^2$  'nin dağılımı üzerinde bir etkiye sahiptir. Varyans yayılım grafiği tekniği, son derece önemli bir konu olan  $n_c$  'nin seçiminde de, yararlı bir enstrüman olarak kullanılır.

Tasarımların oluşturulmasının ardından, öncelikle Merkezi Bileşik Tasarımda merkez deneme sayısının belirlenmesi amacıyla, merkez denemelerin tahmin varyansı üzerindeki etkileri varyans yayılım grafiği ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla Şekil 5.1’de verilen grafikte D.1 ile sembolize edilen tasarımda merkez deneme sayısı  $n_c=6$ , D.2 ile sembolize edilen tasarımda  $n_c=5$ , D.3 ile sembolize edilen tasarımda  $n_c=3$  ve D.4 ile sembolize edilen tasarımda  $n_c=1$  olarak alınmıştır. Söz konusu alternatif merkez deneme sayılarının seçiminde, literatürdeki çalışmalar, tasarımın kendine özgü nitelikleri ve kısıtlı kaynaklar göz önünde bulundurulmuştur.

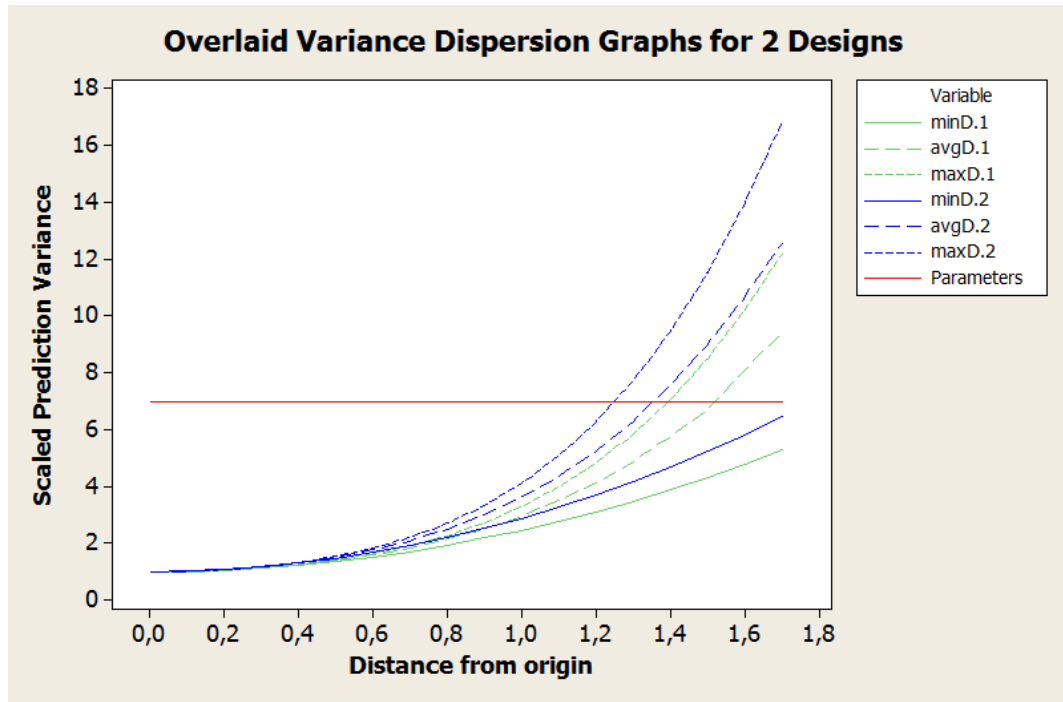


**Şekil 5.1. Merkezi Bileşik Tasarımdaki Merkez Denemelerin Ölçekli Tahmin Varyansı Üzerindeki Etkisi**

Grafik incelendiğinde, merkez nokta sayısı arttıkça tahmin varyansının gittikçe azaldığı açık bir biçimde gözlenmektedir. Diğer bir deyişle, tasarıma merkez denemelerin eklenmesi, tasarımın modeli çevrenin aksine, merkez civarında daha iyi bir biçimde desteklediği anlamına gelmektedir. Merkez deneme sayısı en az olan D.4 tasarımının, en yüksek ölçekli tahmin varyansı değerine sahip olduğu açıktır. Söz konusu şekle göre, merkezi bileşik tasarımda 3, 5 ve 6 merkez noktanın ölçekli tahmin varyansı değerleri birbirine son derece yakın olduğundan, 3-6 merkez noktanın kullanılmasının uygun olduğu

gözlenmektedir. Çalışmamızda grafiğe göre, en düşük ölçekli tahmin varyansı değerine ve 6 adet merkez denemeye sahip olan D.1 tasarımının tercih edilmesi uygun görülmüştür. Sonuç olarak, merkezi bileşik tasarımda, 6 merkez noktanın kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Elde edilen bu bulgu, özellikle Borkowski (1995) çalışması ile oldukça benzer olup, Giovannitti-Jensen ve Myers (1989), Myers ve diğerleri (1992) ve Anderson-Cook, Borror ve Montgomery (2009) çalışmaları ile paralellik göstermektedir.

Bir sonraki aşamada, beş düzeyli üç faktör için yapılandırılan merkezi bileşik tasarım ve her bir faktörün üç düzeye sahip olduğu üç faktör için üretilen Box-Behnken tasarımı için varyans yayılım grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 5.2’de verilen bu grafiklerden, söz konusu tasarımlara ilişkin ölçeklenmiş tahmin varyansları gözlenmektedir.



**Şekil 5.2. Merkezi Bileşik Tasarım ve Box-Behnken Tasarımı için Varyans Yayılım Grafiği**

Şekil 5.2'deki grafikte, seçilen deneysel bölgedeki eş merkezli küreler üzerindeki minimum, maksimum ve ortalama tahmin varyanslarının söz konusu kürelerin yarıçapları karşısındaki değişimi verilmektedir. Bu grafikler aracılığıyla bir anlamda, çok boyutlu uzayda ölçeklenmiş tahmin varyanslarının tekdüzeliğinin görselleştirilmiş halleri verilmektedir. Şekil 5.2'de D.1 ile sembolize edilen grafik, merkezi bileşik tasarıma ilişkin ve D.2 ile sembolize edilen grafik ise Box-Behnken tasarımına ilişkin olarak çizilen grafiklerdir. Merkezi bileşik tasarıma ait olan minimum tahmin varyansının 1,7 yarıçapında, yaklaşık olarak 5 değerine karşı geldiği, aynı yarıçap değerinde ortalama tahmin varyansının 9 değerine ve maksimum tahmin varyansının ise, yaklaşık olarak 13 değerine ulaştığı görülmektedir. Box-Behnken tasarımına ait olan minimum tahmin varyansının 1,7 yarıçapında, yaklaşık olarak 6 değerine karşı geldiği, aynı yarıçap değerinde ortalama tahmin varyansının 12 değerine ve maksimum tahmin varyansının ise, yaklaşık olarak 17 değerine ulaştığı görülmektedir. Yine sözkonusu şekilden, her iki tasarımın da çevreye göre, merkezde daha iyi performans gösterdiğini söylemek mümkündür.

Genel olarak, merkezi bileşik tasarımın merkezde ve çevrede Box-Behnken tasarımından daha düşük ölçekli tahmin varyansına ve daha iyi performansa sahip olduğu gözlenmektedir. Dolayısıyla, merkezi bileşik tasarımın Box-Behnken tasarımına tercih edilebilir bir tasarım olduğu görülmektedir. Çalışmamızda elde edilen bu bulgular; Giovannitti-Jensen ve Myers (1989), Myers ve diğerleri (1992), Borkowski (1995), Trinca ve Gilmour (1999) ve Anderson-Cook, Borrer ve Montgomery'nin (2009) çalışmalarını destekler niteliktedir.

## **II. KESİRLİ TASARIM UZAYI TEKNİĞİ ile UYGUN TASARIMIN BELİRLENMESİ**

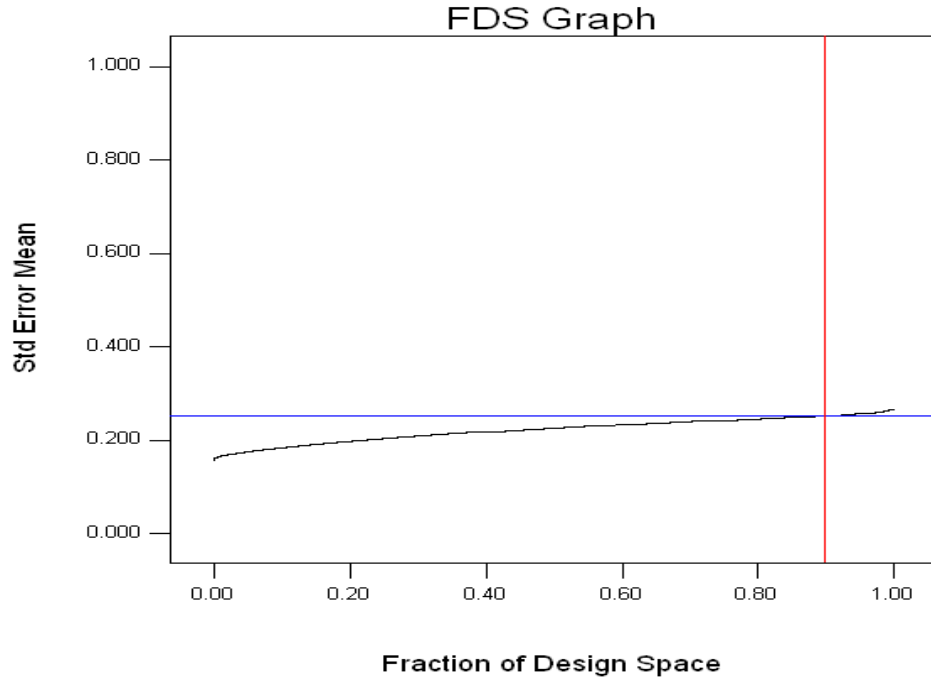
Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) tarafından geliştirilen kesirli tasarım uzayı tekniği; bir tasarımın tahmin kabiliyetinin daha iyi kavranması amacıyla, varyans yayılım grafiği tekniğini tamamlayıcı bir tekniktir. Bu teknik, ölçekli tahmin varyansının, önceden belirlenmiş herhangi bir değere eşit veya ondan daha küçük olduğu yerlerde kesirli tasarım uzayının belirlenmesi yoluyla araştırmacıya daha detaylı bilgi sağlar. Verilen bir değere eşit veya bu değer altında bir kesirli tasarım uzayı değeri, daha iyi bir tasarım anlamına gelmektedir.



Kesirli tasarım uzayı grafikleri de, varyans yayılım grafikleri gibi tasarım uzayı genelindeki ölçekli tahmin varyansını iki boyutta özetleyen yöntemlerdir. Varyans yayılım grafikleri üç ayrı eğri ile minimum, maksimum ve ortalama ölçekli tahmin varyansının tasarım uzayı merkezinden farklı uzaklıklardaki değerlerini gösterir. Ancak, kesirli tasarım uzayı grafikleri tasarım uzayındaki ölçekli tahmin varyansı değerleri aralığını tek bir çizgi ile özetleyerek, rakip tasarımlar arasında doğrudan karşılaştırmaların daha iyi bir biçimde yapılmasına imkan sağlar.

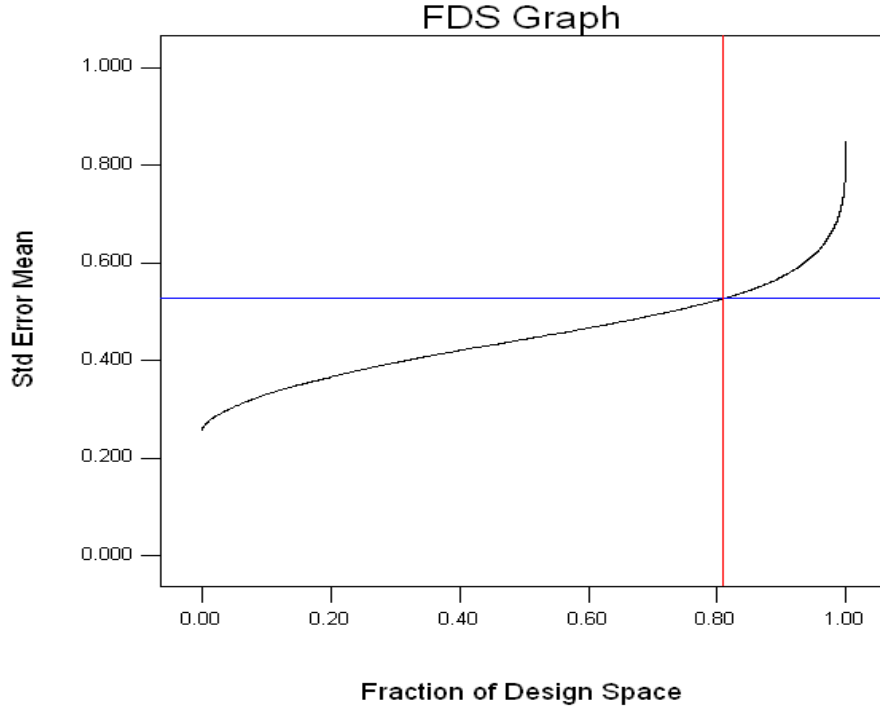
Kesirli tasarım uzayı grafiği, x-eksenindeki tasarım uzayının kümülatif kesirlerinin (0'dan 1'e kadar) değerlerine karşılık y-ekseninde standart hatanın yer aldığı tekil bir grafikdir. Bizim çalışmamızda bir önceki başlıktan da hatırlanacağı gibi, ele alınan merkezi bileşik tasarım ve Box-Behnken tasarımı, tahmin kabiliyetlerinin daha iyi kavranması ve karşılaştırılması amacıyla, varyans yayılım grafiğini tamamlayıcı bir teknik olan kesirli tasarım uzayı grafikleri ile değerlendirilecektir.

Öncelikle Şekil 5.3'de, merkezi bileşik tasarıma ilişkin olarak çizilen kesirli tasarım uzayı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, tasarım uzayı genelinde ortalama standart hatanın yaklaşık olarak 0,25 civarında olduğu görülmektedir. Ortalama hatanın minimum değeri 0,158 ve maksimum değeri 0,268 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, grafikteki eğrinin yassı bir biçimde olup, dikey ekseninde düşük standart hata değerlerine karşı geldiği gözlenmektedir. Bu yayvan görünüm, tahmini hata değerlerinin kararlı olacağı anlamına gelirken, eğrinin yatay eksen boyunca artış oranındaki düşüşler, hata tahmininin giderek küçüleceğini işaret etmektedir.



**Şekil 5.3. Merkezi Bileşik Tasarım için Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği**

Şekil 5.3'deki grafiğe ilişkin olarak, kesirli tasarım uzayı değeri 0,90 olarak hesaplanmıştır. Kesirli tasarım uzayı eğrisi, belirli bir standart hata değeri veya bundan daha düşük değeri içeren tasarım alanı hacminin oranı olarak da tanımlanabilir (Design Expert Stat-Ease, Inc.). Bu bağlamda, söz konusu şekildeki dikey kırmızı çizginin apsisi kestiği noktaya karşılık gelen bu değer, bir standart sapma içinde kesirli tasarım uzayının doğru tahmin yeteneği oranının ortalama olarak %90 olduğu anlamına gelmektedir. Tepkinin iyi ve anlamlı bir tahmini ve optimizasyonunun elde edilebilmesi için, söz konusu değer 0,80'in üzerinde olması gerekmektedir. Bu kriter göz önüne alındığında, merkezi bileşik tasarımın gerekli koşulları sağlayan iyi bir tasarım olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



**Şekil 5.4. Box-Behnken Tasarımı için Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği**

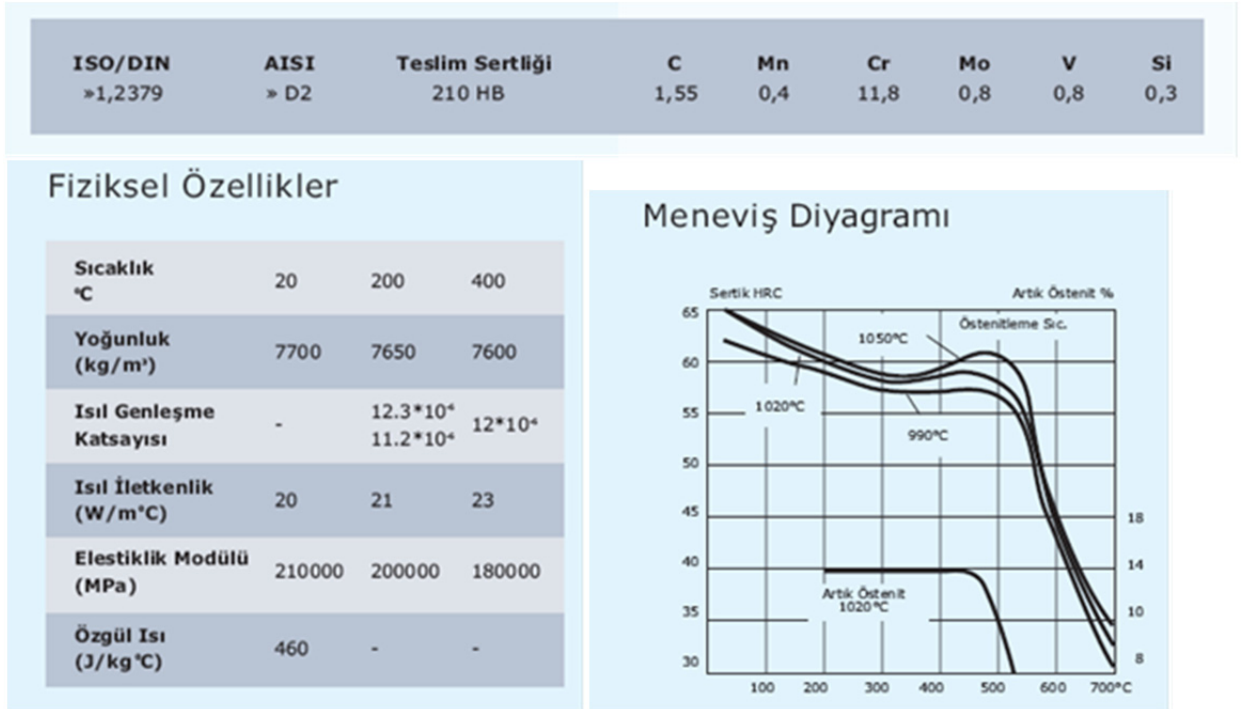
Şekil 5.4’de, merkezi bileşik tasarım ile karşılaştırılan Box-Behnken tasarımı için çizilen kesirli tasarım uzayı grafiği verilmiştir. Verilen grafikten, tasarım uzayı genelinde ortalama standart hatanın yaklaşık olarak 0,53 düzeyinde olduğu gözlenmektedir. Minimum ortalama hata değeri 0,258 ve maksimum ortalama hata değeri 0,850 olarak bulunmuştur. Söz konusu grafiğin, Şekil 5.3’de merkezi bileşik tasarıma ilişkin olarak verilen grafiğe göre, daha yüksek bir standart hataya sahip olduğu dolayısıyla, daha az etkin bir tasarım olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra eğrinin şekli incelendiğinde, x-ekseni boyunca bir artış trendi içinde olduğu diğer bir ifadeyle, dikey ekseninde karşı gelen standart hata değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, standart hata değerlerinin giderek artacağına ve tasarım genelinde kararlı bir seyir izlemeyeceğine işaret etmektedir.

Grafiğe ilişkin olarak hesaplanan kesirli tasarım uzayı değeri 0,81’dir. Bu değer, bir standart sapma içinde kesirli tasarım uzayının doğru tahmin yeteneği oranının ortalama olarak %81 olduğunu ifade etmektedir. Söz konusu değer, her ne kadar 0,80’in üzerinde bulunmuş olsa da, merkezi bileşik tasarıma ilişkin olarak hesaplanan değere göre, daha düşüktür. Genel olarak değerlendirildiğinde; kesirli tasarım uzayı değeri daha yüksek, standart hata değeri daha düşük olan ve kesirli tasarım uzayı eğrisinin şekli itibarıyla de,

daha yayvan bir görünüme sahip olan merkezi bileşik tasarımın Box-Behnken tasarımına tercih edilebilir bir tasarım olduğu görülmüştür. Bu teknikle elde edilen bulgu, varyans yayılım grafiği ile ulaşılan sonuçla da uyumlu olarak, daha net bir biçimde gözlenmiştir. Ulaşılan bu sonuç, literatürde önemli bir yeri olan Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) çalışmasıyla uyumludur.

### III. MATERYAL ve METOT

İstatistiksel analizlere geçmeden önce, deneylerde kullanılan tezgah, iş parçası ve kesici uçların özellikleri ve şekli hakkında bilgi verilmesi uygun olacaktır. Bu çalışmada 62 HRC sertliğine, çekirdeğe dek sertleştirilmiş soğuk iş çeliği malzemeden numunelerin seramik kesici takımlarla tornalanması işlemi gerçekleştirilmiştir. İş parçası malzemesi olarak, çekirdeğine kadar sertleştirilmiş 62 HRC sertliğinde 1,2379 (AISI D2) çeliği kullanılmıştır. Söz konusu iş parçası malzeme özellikleri, Şekil 5.5’de verilmiştir. Kullanılan iş parçalarının ebatları  $\Phi$  90 x 400 mm’dir. Tornalama işlemlerinde parçalar, ayna-punta arasına bağlanmıştır.



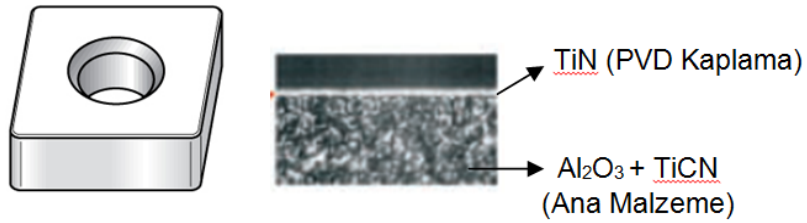
Şekil 5.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Parçası Malzemesinin Özellikleri  
(Kaynak: Murat ve diğerleri, 2012, s. 5)

Deneyselerde kullanılan ve Şekil 5.6'da verilen, Goodway GS200 CNC torna tezgahında güç 45 KW, devir sayısı aralığı: 0-4000 d/dak 'dır. Deneyselerde kesme sıvısı kullanılmamış, deneyseler kuru kesme koşullarında yapılmıştır. İşlemler esnasında deneyseler sabit kesme hızıyla yapılmıştır.



**Şekil 5.6. Deneysel Çalışmada Kullanılan CNC Torna Tezgahı**

Deneyselerde, Şekil 5.7'de görülen Kennametal'in ISO CNGA 120404 KY4400 seramik uçları kullanılmıştır. Bu uçlar, ince taneli ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )  $\text{Al}_2\text{O}_3$  matris içerisinde sert parçacık olarak TiCN bulunan kompozit bir seramik ana malzemeye ve bunun üzerinde yaklaşık  $1 \mu\text{m}$ 'luk TiN PVD kaplama tabakasına sahiptir.



**Şekil 5.7. Deneysel Çalışmada Kullanılan Seramik Kesici Ucun Özellikleri**  
(Kaynak: Murat ve diğerleri, 2012, s. 5)

#### IV. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ ile MODELLENMESİ

Yüzey pürüzlülüğü, kesme koşulları ve takım geometrisi gibi proses parametreleri ile belirlenen ve işlenen yüzeyler için temel bir kalite göstergesi olarak kabul edilen önemli bir kavramdır. Üretim mühendisliğinde önemli bir parametre olan yüzey kalitesi, talaşlı imalat işlemlerinde üretim maliyetinin yanı sıra mekanik parçaların performansını da etkileyen önemli bir kalite karakteristiğidir.

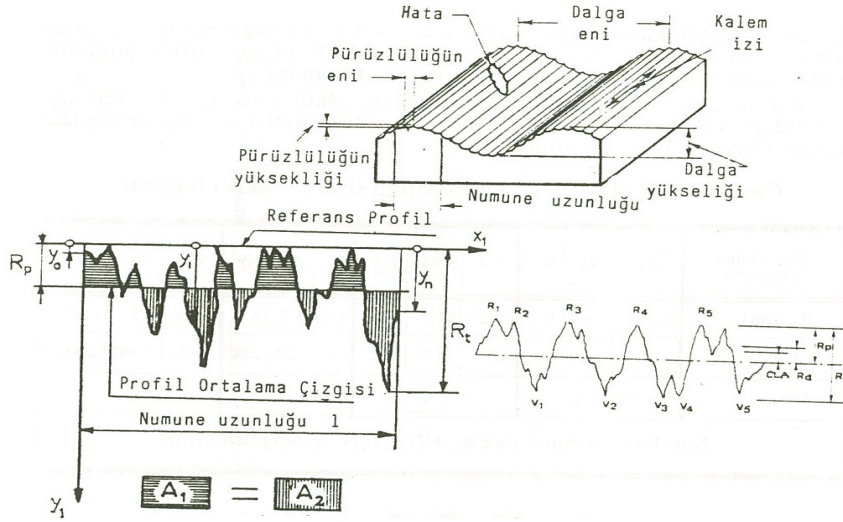
Günümüz modern endüstrisinde, CNC takım tezgahlarının kullanılmasına rağmen kesme parametreleri, takım ve iş parçası değişkenleri gibi ilgili birçok faktör nedeniyle, yüzey pürüzlülüğünü kontrol etmek oldukça zordur. Tornalama işleminde, yüksek bir kalite performansına ulaştıracak kesme parametrelerinin seçimi hayati bir işittir. Bu nedenle, özellikle son yıllarda literatürde, katkılı seramik takımların kullanıldığı uygulamalarda yüzey pürüzlülüğü, yüzey yapısı, takım aşınması ve boyutsal hassasiyet ile ilgili çok çeşitli çalışmalar gözlenmektedir.

Önceki başlıklardan hatırlanabileceği gibi, merkezi bileşik tasarım ve Box-Behnken tasarımının grafiksel tekniklerle yapılan karşılaştırılması sonucunda, merkezi bileşik tasarımın daha iyi bir tasarım olduğuna karar verilmişti. Bu kısımda, söz konusu iş parçası ve kesici takım malzemesi ile yapılan deneylerde, merkezi bileşik tasarım ve Box-Behnken tasarımı kullanılarak, önemli bir kalite karakteristiği olan yüzey pürüzlülüğü modellenmeye çalışılacaktır. Böylece, yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan faktörler değerlendirilebilecektir. Ayrıca, modelin analiz edilmesiyle önceki başlıklarda ulaşılan merkezi bileşik tasarımın daha etkin bir tasarım olduğu bulgusu, yeniden değerlendirilerek grafiksel tekniklerden elde edilen sonuçların, bir nevi sağlamasının yapılmasına çalışılacaktır.

Talaş kaldırma işlemlerinde, bir kalite karakteristiği olarak nitelendirilen yüzey pürüzlülüğü birçok faktöre bağlıdır. Şekil 5.8'de yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörlere ilişkin olarak çizilen ve neden-sonuç veya Ishikawa diyagramı olarak da adlandırılan balık kılıcı diyagramı verilmiştir. Özellikle Altı Sigma projelerinde, kalite geliştirme tekniği olarak etkin bir biçimde kullanılan bu diyagramda, süreç sonucu elde edilen ve bir kalite karakteristiği olarak kabul edilen yüzey pürüzlülüğünün nedenleri görülmektedir. Diyagrama göre yüzey pürüzlülüğüne neden olan faktörler; işleme parametreleri, kesme

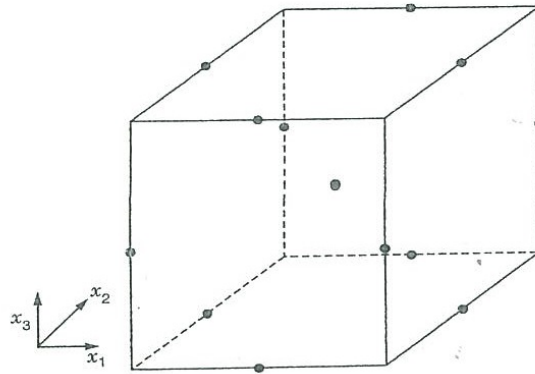


Çalışmamızda, yüzey kalitesini değerlendirmek amacıyla, yüzey pürüzlülüğü tespit kriterlerinden  $R_a$  kullanılmıştır. Günümüzde daha çok uluslararası bir kriter olarak kabul edilen ve değerleri standartlaştırılarak ISO sistemine göre N ile simgelenen  $R_a$ , ortalama çizgiye göre pürüz yüksekliklerinin veya derinliklerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir (Şekil 5.9).



**Şekil 5.9. Yüzey Pürüzlülüğü ve Değerlendirilmesi (Kaynak: Akkurt, 1991, s. 9)**

Çalışmada yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu düşünülen işleme parametreleri; kesme hızı ( $V_c$  - m/dak), talaş derinliği ( $a_p$  - mm) ve ilerleme ( $f$  - mm/dev) olarak belirlenmiştir. Üç faktör için Box-Behnken tasarımında kullanılan tasarım noktaları Şekil 5.10'daki gibidir.



**Şekil 5.10. Box-Behnken Tasarımı için Deneysel Tasarım Noktaları**



Deneylerde kesici takım malzemesi - iş parçası malzemesi ilişkisine bağlı olarak, üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı talaş derinliği kullanılmıştır. Kullanılan kesme faktörlerinin düzeyleri Tablo 5.3'deki gibidir.

**Tablo 5.3. Box-Behnken Tasarımı ile  $R_a$  için Kesici Faktör Düzeyleri**

Faktör	Sembol	Birim	Düzy		
			1	2	3
Kesme hızı	Vc	m/dak	70	105	140
İlerleme	f	mm/dev	0,063	0,1065	0,15
Talaş derinliği	ap	mm	0,5	0,75	1

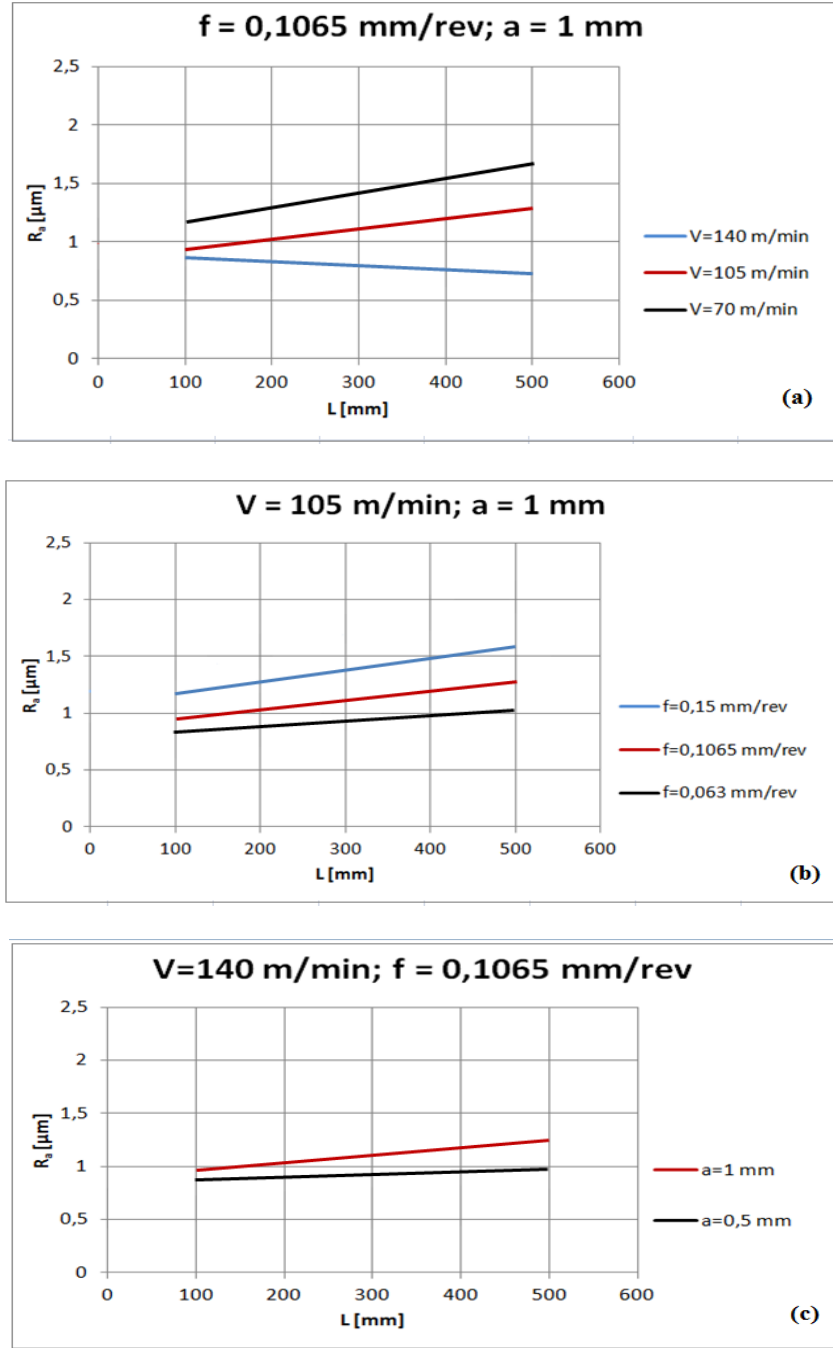
Çalışmada üç faktör için üretilen ve her bir faktörün üç düzeye sahip olduğu Box-Behnken tasarımı, temelde 12 adet faktöriyel tasarım noktası ve 3 adet merkez noktadan oluşmaktadır. İlk deneysel çalışma için, kullanılan Box-Behnken tasarımı ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 5.4'de verilmiştir.

**Tablo 5.4.  $R_a$  için Box-Behnken Tasarımı**

Deneme no	Faktörler			Tepki
	Vc (m/dak)	ap (mm)	f (mm/dev)	$R_a$ ( $\mu$ m)
1	140	0,75	0,15	1,764
2	105	0,5	0,15	1,776
3	140	0,5	0,1065	0,769
4	140	1	0,1065	0,833
5	140	0,75	0,063	0,541
6	105	0,5	0,063	0,567
7	70	1	0,1065	1,715
8	70	0,5	0,1065	1,843
9	105	1	0,063	1,014
10	105	0,75	0,1065	1,449
11	70	0,75	0,15	2,656
12	105	0,75	0,1065	0,898
13	70	0,75	0,063	0,549
14	105	1	0,15	2,004
15	105	0,75	0,1065	1,064

Tepki yüzeyi metodolojisi analizlerine geçilmeden önce, kesme parametrelerinin farklı düzeyleri ile yüzey pürüzlülüğü değerlerine ilişkin olarak çizilen grafiklerin değerlendirilmesi yararlı olacaktır. Sırası ile kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği

düzeyleri ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkinin görselleştirildiği grafikler Şekil 5.11’de görülmektedir. Kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü ilişkisinin verildiği ilk grafik incelendiğinde, kesme hızının düşük düzeyi için daha yüksek, yüksek düzeyi için ise daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür.



**Şekil 5.11. Box-Behnken Tasarımı için Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi**

Şekil 5.11(b) ve Şekil 5.11(c)'den, ilerleme ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğünü pozitif bir biçimde etkilediği görülmektedir. Dolayısıyla, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etki etme yönlerinin kesme hızı için negatif, ilerleme ve talaş derinliği için pozitif olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.11(c)'den talaş derinliği küçük bir etkiye sahip gibi görünmesine rağmen, bu etkinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir. Orta ilerleme değerinde ( $f = 0,1065$  mm/dev), ilerleyen aşamalarda yüzey pürüzlülüğünün düşmesi, talaşın kırılmaya başlaması ile açıklanabilir (Murat ve diğerleri, 2012: 7).

Deneilerin tepki yüzeyi metodolojisi ile analizi sonucunda, tahmin edilen model sonuçları Tablo 5.5'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre,  $V_c$  ve  $f$  değişkenlerinin parametreleri %1 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı,  $a_p$  değişkeninin parametresi ise istatistiksel olarak anlamsızdır.

**Tablo 5.5. Box-Behnken Tasarımı ile  $R_a$  için Model Tahmini Sonuçları**

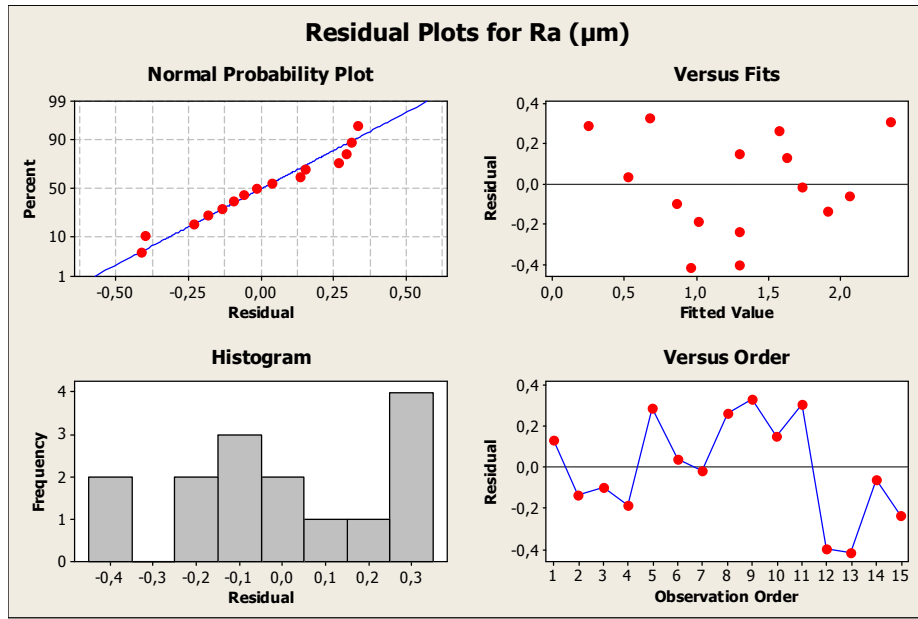
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,33432	0,08720	15,301	0,000
$V_c$	-0,35700	0,09853	-3,623	0,004
$a_p$	0,03819	0,04926	0,775	0,455
$f$	0,69113	0,09853	7,014	0,000
S=0,278683		PRESS = 1,59530		
R-Sq = 85,12%		R-Sq(adj) = 81,06%		

$f$  değişkeninin artması, tepki değişkeni yüzey pürüzlülüğünün sayısal değerini artırmakta,  $V_c$  değişkeninin artması ise bu değeri azaltmaktadır. Tahmin edilen modelin açıklama gücü yüksektir. Model bulgularının grafiksel sonuçları desteklediği görülmektedir.

**Tablo 5.6. Box-Behnken Tasarımı ile  $R_a$  için Varyans Analizi Sonuçları**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	4,88749	4,88749	1,62916	20,98	0,000
Linear	3	4,88749	4,88749	1,62916	20,98	0,000
$V_c$	1	1,01959	1,01959	1,01959	13,13	0,004
$a_p$	1	0,04667	0,04667	0,04667	0,60	0,455
$f$	1	3,82123	3,82123	3,82123	49,20	0,000
Residual Error	11	0,85430	0,85430	0,07766		
Lack-of-Fit	9	0,69451	0,69451	0,07717	0,97	0,606
Pure Error	2	0,15979	0,15979	0,07990		
Total	14	5,74179				

Yüzey pürüzlülüğü modeline ilişkin varyans analizi sonuçlarının verildiği Tablo 5.6 incelendiğinde, tahmin edilen modelin genel olarak anlamlı olduğu, tepki değişkeni ve faktörler arasındaki ilişkinin doğrusal bir fonksiyonla temsil edilebileceği anlaşılmaktadır. Söz konusu tablodaki bulgulara dayanılarak yapılan uyum yetersizliği testinde, modelde uyum eksikliğinin olmadığını ifade eden sıfır hipotezi reddedilememiştir. Dolayısıyla, uydurulan doğrusal modelin yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

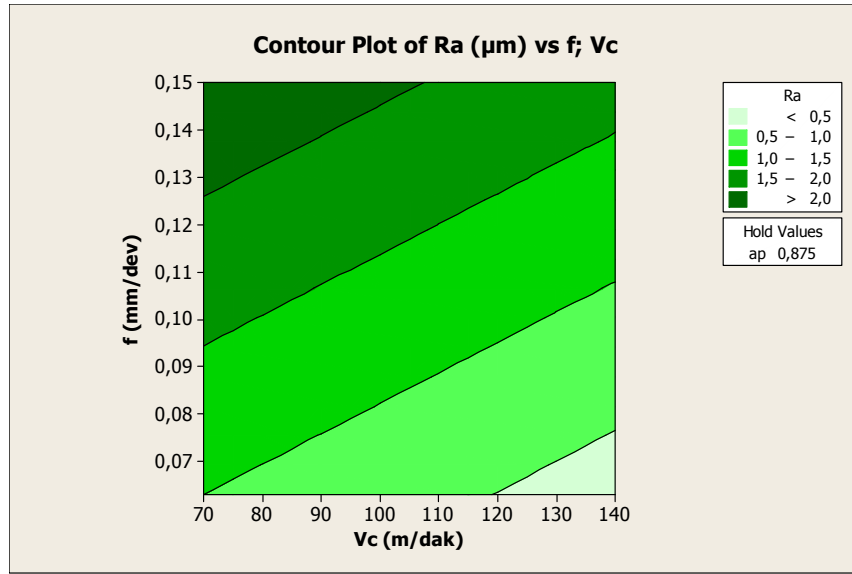


**Şekil 5.12. Box-Behnken Tasarımı ile  $R_a$  için Kalıntı Grafikleri**

Tahmin edilen modelin artıklarının, çeşitli kriterlere göre çizilen grafikleri Şekil 5.12'de verilmiştir. Sol üst köşede verilen kalıntıların normal olasılık grafiğinden kalıntıların normallik varsayımının kontrolü yapılabilir. Grafikten noktaların doğruya yakın bir biçimde saçılmalarından, hata dağılımının normal olduğu görülmektedir. Histogramın görünüşü kullanılan veri grubunun sayısı ile ilgili olduğundan kalıntıların normalliğinin değerlendirilmesinde histogramın yorumlanması yerine, normal olasılık grafiği kullanılmış ve Andersen – Darling (A-D) testi yapılmıştır. A-D testi sonucu ( $AD=0,263$ ;  $p=0,649$ ) verilerin normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir.

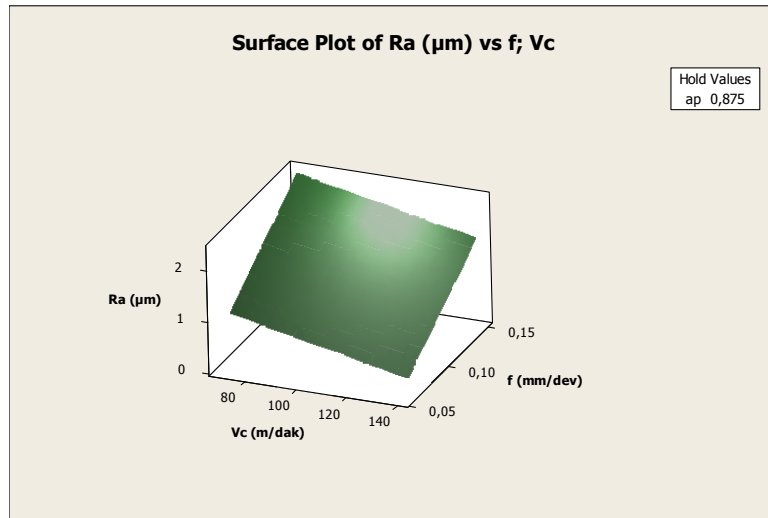
Şekil 5.12'de sağ üst köşede görülen şekil, kalıntıların modelin uydurulan değerlerine karşı çizilen grafiğini göstermektedir. Grafikte kalıntıların rassal bir desen görünümüne sahip olması, hatanın rassal olduğunu göstermektedir. Sağ alt köşedeki

grafikte ise, kalıntılarının verilerin toplanma sırasına göre değişimi görülmektedir. Grafikten, kalıntılar arasında pozitif veya negatif bir korelasyon olmadığı gözlenmektedir.



şekil 5.13. Box-Behnken Tasarımı ile  $R_a$  için Kontur Grafiği

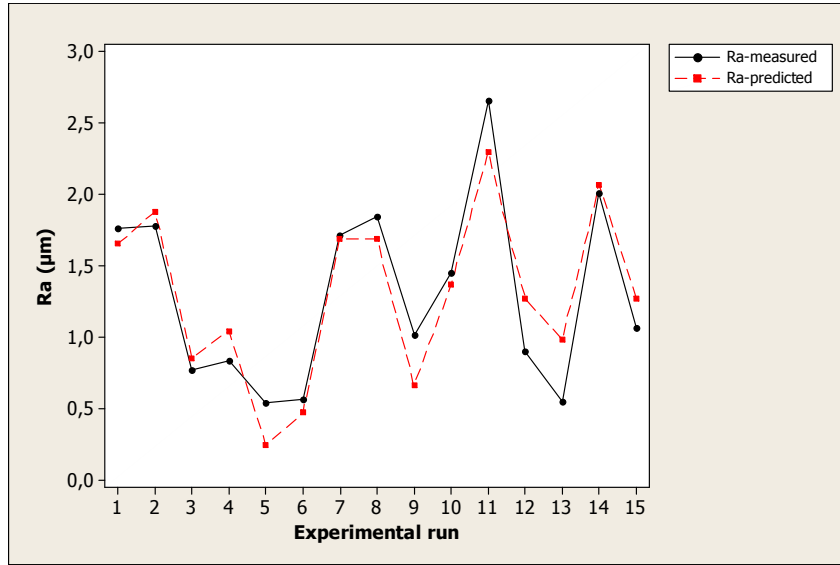
Vc ve f değişkenlerinin, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisine ilişkin olarak çizilen kontur grafikleri şekil 5.13'deki gibidir. Söz konusu grafikte, yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak minimum olduğu bölge, Vc'nin en yüksek ve f'in en düşük değerler aldığı sağ alt köşedeki alana karşı gelmektedir.



şekil 5.14. Box-Behnken Tasarımı ile  $R_a$  için Yüzey Grafiği

Vc ve f değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisine ilişkin olarak çizilen yüzey grafikleri, şekil 5.14'de verilmiştir. Bu grafikte yüzey pürüzlülüğü eksenini takip edildiğinde de görülebileceği gibi, Vc'nin en yüksek ve f'in en düşük değerler aldığı bölgede yüzey pürüzlülüğü sayısal olarak minimum değerdedir. şekil 5.14, Vc'nin 140

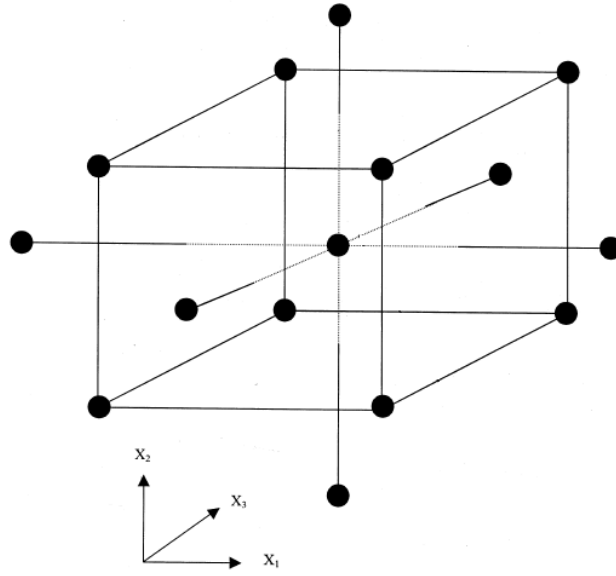
değerinde iken,  $f$  değerinin 0,05'in altına düşürülmesi ile çok daha düşük bir  $R_a$  değerinin elde edileceğini gösteriyor gibi görünse de, takımın güvenli çalışma aralığının sınırları,  $f$  için 0,063'ün altında olamamaktadır. Bu nedenle elde edilen bu sınır değerleri optimum sonuç olarak kabul edilmiş ve tasarım bu parametrelerin dışında bir bölge için tekrarlanmamıştır. Bu durumun nedeni, kullanılan kesici takım için 0,063mm/dev.'den daha düşük ilerleme değerlerinde talaşın kırılmamasıdır ve talaşlı imalat işlemlerinin kontrolü için talaşın kırılması şarttır.



**Şekil 5.15. Box-Behnken Tasarımı ile  $R_a$  için Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerler**

Şekil 5.15'de ölçülen ve tahmin edilen tepki değerleri arasındaki karşılaştırma verilmiştir. Grafikten %95 güven aralığında yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilen değerlerinin, deneyden gözlenen değerlere yakın olduğu gözlenmektedir. Bu bulgu, tahmin edilen modelin uygunluğunun da bir kanıtıdır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ikinci deneylerde, ilk deneylerde kullanılan işleme parametreleri ve merkezi bileşik tasarım kullanılmıştır. İkinci deney seti için, merkezi bileşik tasarımda kullanılan tasarım noktaları Şekil 5.16'daki gibidir.



**Şekil 5.16. Merkezi Bileşik Tasarım için Deneysel Tasarım Noktaları**

Bu bağlamda, söz konusu işleme parametreleri için beş farklı kesme hızı, beş farklı ilerleme ve beş farklı talaş derinliği değeri kullanılmıştır. Kullanılan kesme faktörlerinin düzeyleri Tablo 5.7'deki gibidir.

**Tablo 5.7. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  için Kesici Faktör Düzeyleri**

Faktör	Sembol	Birim	Düzy				
			1	2	3	4	5
Kesme hızı	Vc	m/dak	64,66	80	102,5	125	140
İlerleme	f	mm/dev	0,086	0,10	0,12	0,14	0,1536
Talaş derinliği	ap	mm	0,46	0,6	0,8	1,0	1,136

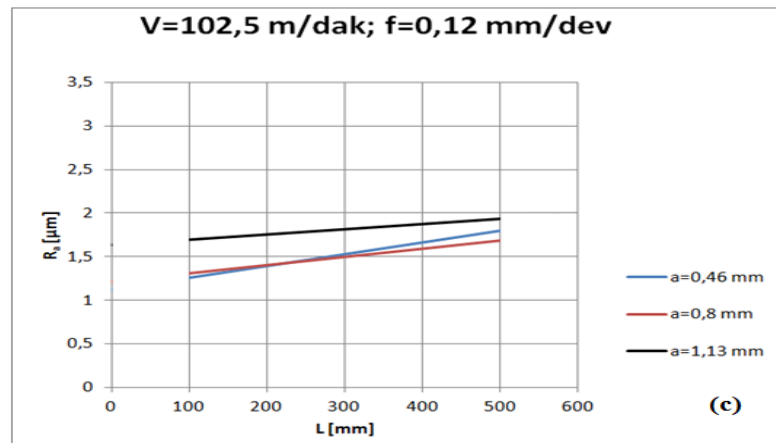
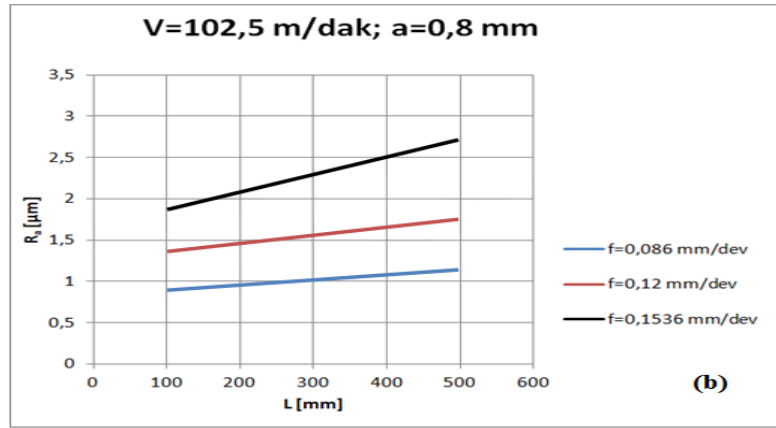
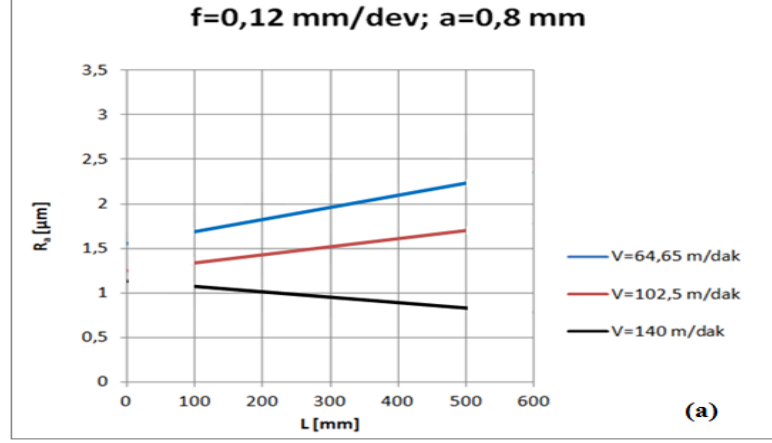
Çalışmamızda kullandığımız ikinci tasarım; beş düzeyli, üç faktörlü, 8 tam faktöriyel tasarım noktası, 6 eksenel nokta ( $\alpha = \mp 1,682$ ) ve 6 merkez noktaya sahip olan bir merkezi bileşik tasarımdır. Söz konusu merkezi bileşik tasarım ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 5.8'deki gibidir.

**Tablo 5.8. R<sub>a</sub> ve VB için Merkezi Bileşik Tasarım**

Deneme no	Faktörler			Tepkiler	
	Vc (m/dak)	ap (mm)	f (mm/dev)	Ra (µm)	VB (mm)
1	102,500	0,800	0,120	1,66	0,089
2	102,500	0,800	0,086	1,26	0,086
3	102,500	0,800	0,154	2,01	0,089
4	102,500	0,800	0,120	2,01	0,088
5	102,500	0,800	0,120	1,91	0,085
6	80,000	1,000	0,140	2,58	0,079
7	102,500	1,136	0,120	1,91	0,085
8	102,500	0,800	0,120	1,76	0,090
9	102,500	0,800	0,120	1,46	0,090
10	102,500	0,464	0,120	1,50	0,091
11	102,500	0,800	0,120	1,54	0,087
12	102,500	0,800	0,120	1,98	0,087
13	80,000	1,000	0,140	3,00	0,077
14	80,000	0,600	0,140	2,27	0,078
15	102,500	0,800	0,120	1,85	0,086
16	80,000	0,600	0,100	2,04	0,069
17	102,500	0,800	0,154	2,22	0,087
18	102,500	0,800	0,120	1,76	0,09
19	80,000	1,000	0,100	2,01	0,075
20	102,500	1,136	0,120	1,86	0,086
21	80,000	0,600	0,100	2,11	0,074
22	64,660	0,800	0,120	2,56	0,064
23	125,000	0,600	0,140	1,47	0,098
24	102,500	0,800	0,086	1,23	0,084
25	125,000	0,600	0,100	0,70	0,101
26	80,000	1,000	0,100	2,20	0,070
27	102,500	0,800	0,120	2,01	0,087
28	125,000	1,000	0,140	1,61	0,103
29	64,660	0,800	0,120	2,47	0,066
30	140,340	0,800	0,120	0,97	0,113
31	102,500	0,800	0,120	1,81	0,084
32	102,500	0,800	0,120	1,99	0,088
33	80,000	0,600	0,140	2,85	0,078
34	125,000	1,000	0,140	1,61	0,095
35	102,500	0,464	0,120	1,84	0,084
36	125,000	1,000	0,100	0,76	0,097
37	125,000	1,000	0,100	0,85	0,097
38	125,000	0,600	0,140	1,64	0,098
39	140,340	0,800	0,120	0,90	0,109
40	125,000	0,600	0,100	0,72	0,101



İstatistiksel analizler öncesinde, kesme parametrelerinin farklı düzeyleri ile yüzey pürüzlülüğü değerleri arasında çizilen grafikler Şekil 5.17’de verilmiştir. Şekil 5.17 (b)’de görüldüğü üzere, ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi pozitifdir.



**Şekil 5.17. Merkezi Bileşik Tasarım için Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi**

Grafiklerden, kesme parametrelerinden kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etki etme yönü negatif iken, ilerleme ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etki etme yönünün pozitif olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.17(a) incelendiğinde, kesme hızının belirli bir değerinden sonra yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu etkide bulunmaya başladığı görülmektedir. Yüksek kesme hızı yüksek sıcaklığa neden olmakta, bu ise, malzemenin yumuşamasına, daha kolay işlenebilmesine ve yüzeyin daha az pürüzlü olmasına neden olmaktadır. Modelimizde de kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne negatif etkisi olduğu tespit edilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi bu negatif etki, yüksek kesme hızlarında ortaya çıkmaktadır. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde pozitif etkili olduğu bulgusu, dördüncü bölümde ele alınan teorik yüzey pürüzlülüğü ve ilerleme arasındaki fonksiyonel ilişkiye uygundur. Bu değerlendirmeler literatürle de uyumludur.

Şekil 5.17(c)'de, talaş derinliğinin düşük ve orta düzeylerinde grafiğin neredeyse aynı karakteristiğe sahip olması, talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok fazla etkili olmadığı anlamına gelmektedir. Bu etki, literatürle de uyumlu olarak ihmal edilebilir bir etkidir.

Verilerin analizi sonucunda elde edilen model bulguları Tablo 5.9'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre,  $V_c$  değişkeninin ve  $f$  değişkenlerinin parametreleri %1 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı,  $ap$  değişkeninin parametresi ise istatistiksel olarak anlamsızdır.

**Tablo 5.9. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  için Model Tahmini Sonuçları**

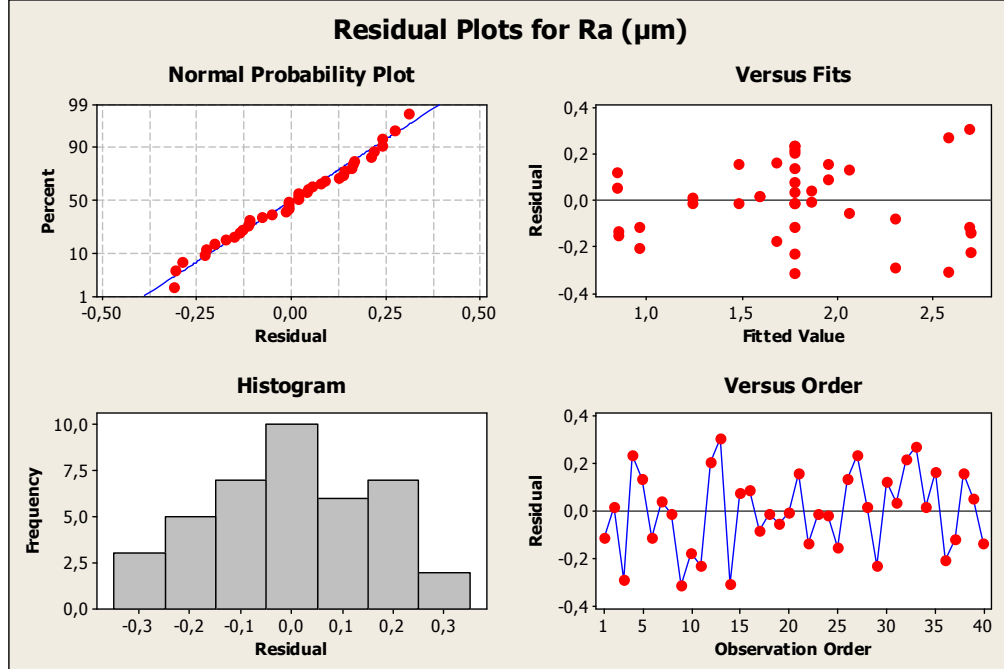
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,77242	0,02746	64,555	0,000
$V_c$	-0,92455	0,05588	-16,545	0,000
$ap$	0,09508	0,05588	1,702	0,097
$f$	0,52739	0,05588	9,438	0,000
S = 0,173648			PRESS = 1,33372	
R-Sq = 91,04%			R-Sq(adj) = 90,29%	

Tablodan,  $f$  değişkenindeki artışların yüzey pürüzlülüğünün sayısal değerini artıracacağı,  $V_c$  değişkenindeki artışların ise, bu değeri azaltacağı görülmektedir. Tepki değişkenindeki değişimlerin %90,29'u  $V_c$  ve  $f$  değişkeni tarafından açıklanmaktadır. Bir başka deyişle, tahmin edilen modelin açıklama gücü oldukça yüksektir.

**Tablo 5.10. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  için Varyans Analizi Sonuçları**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	11,0279	11,0279	3,67597	121,91	0,000
Linear	3	11,0279	11,0279	3,67597	121,91	0,000
Vc	1	8,2546	8,25462	8,25462	273,75	0,000
ap	1	0,0873	0,0873	0,08730	2,90	0,097
f	1	2,6860	2,6860	2,6860	89,08	0,000
Residual Error	36	1,0855	1,0855	0,03015		
Lack-of-Fit	11	0,3269	0,3269	0,02972	0,98	0,489
Pure Error	25	0,7586	0,7586	0,03034		
Total	39	12,1134				

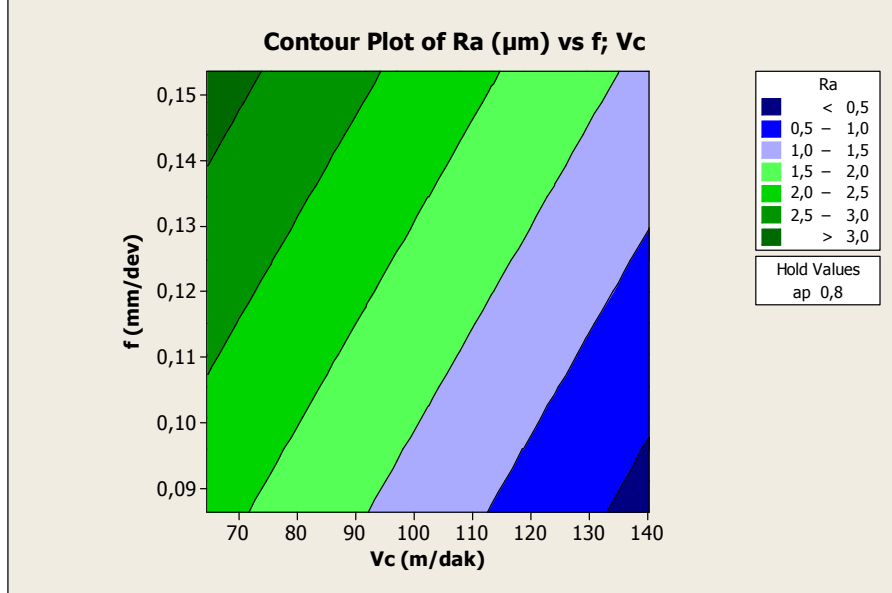
Tablo 5.10'dan, tahmin edilen modelin genel olarak anlamlı olduğu ve tepki değişkeni ve faktörler arasındaki ilişkinin doğrusal bir fonksiyonla temsil edilebileceği anlaşılmaktadır. Tabloda sunulan uyum yetersizliği testine ilişkin olarak verilen bulgulardan, uydurulan doğrusal modelin yeterli olduğu, diğer bir deyişle modelde uyum eksikliği olmadığı anlaşılmaktadır.



**Şekil 5.18. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  için Kalıntı Grafikleri**

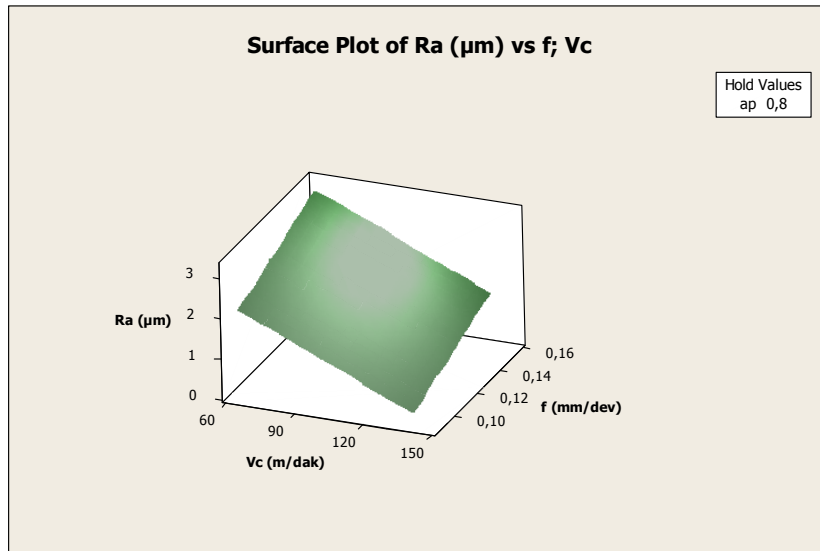
Şekil 5.18'de verilen söz konusu tahmin modelinin artıklarının grafiklerinden, normal olasılık grafiği incelendiğinde kalıntıların normallik varsayımının sağlandığı görülmektedir. Ayrıca, kalıntılar için yapılan A-D normalite testi de ( $AD=0,250$ ;  $p=0,728$ )

bu bulguyu doğrulamaktadır. Sağ üst köşede görülen grafikten kalıntıların rassal olduğu ve sağ alt köşede verilen grafikten de kalıntılar arasında pozitif veya negatif bir korelasyon olmadığı gözlenmektedir.



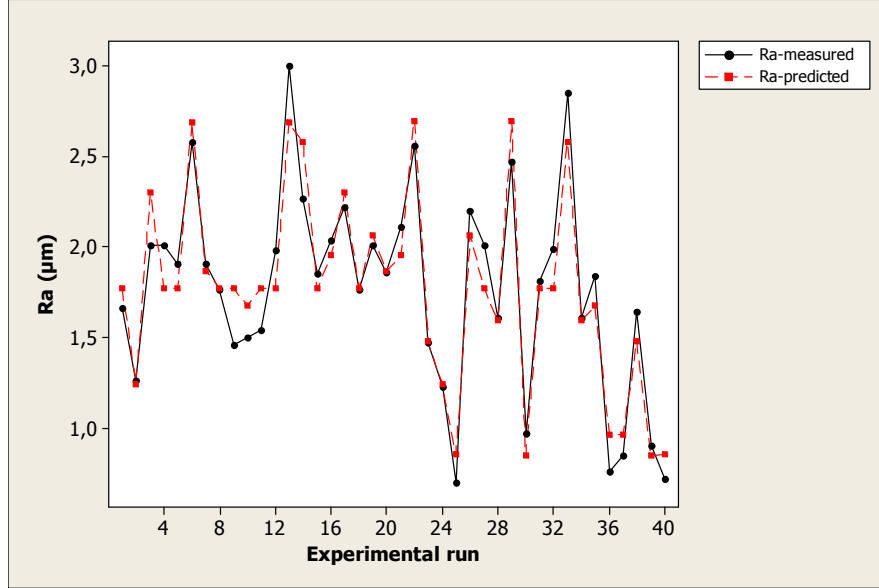
Şekil 5.19. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  için Kontur Grafiği

$V_c$  ve  $f$  değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisine ilişkin olarak çizilen kontur grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir. Grafikte yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak en düşük değerler aldığı sağ alt köşedeki alan,  $V_c$ 'nin en yüksek ve  $f$ 'in en düşük değerler aldığı bölgeye karşı gelmektedir.



Şekil 5.20. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  için Yüzey Grafiği

Şekil 5.20’de verilen  $V_c$  ve  $f$  değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisine ilişkin olarak çizilen yüzey grafiğinden,  $V_c$ ’nin en yüksek ve  $f$ ’in en düşük değerler aldığı bölgede yüzey pürüzlülüğünün minimum değerde olduğu görülmektedir.



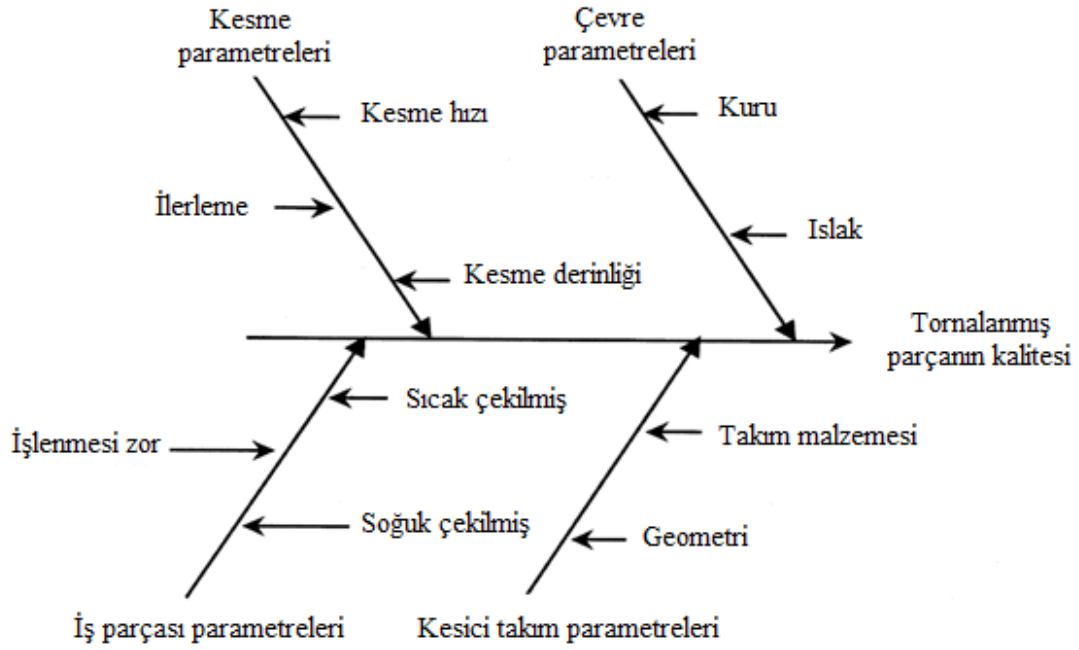
**Şekil 5.21. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  için Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerler**

Şekil 5.21’de, ölçülen ve tahmin edilen tepki değerleri arasındaki karşılaştırma görülmektedir. Grafikten, %95 güven aralığında yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilen değerlerinin, deneyden gözlenen değerlere oldukça yakın olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlar, modelin tahmin performansının oldukça iyi olduğuna işaret etmektedir. Bu bulgu, aynı zamanda tahmin edilen modelin uygunluğunun da bir göstergesidir.

## **V. TAKIM AŞINMASININ TEPKİ YÜZEYİ METODOLOJİSİ İLE MODELLENMESİ**

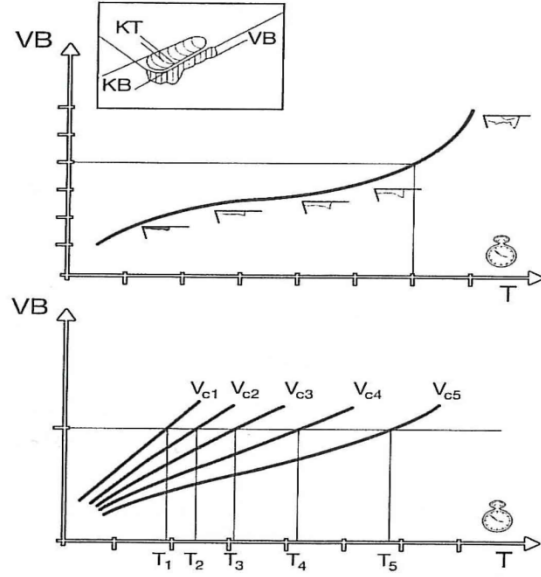
Talaş kaldırma işlemi sürecinde, kesici takımlar ve iş parçası malzemesi arasında meydana gelen sürtünme ve sıcaklık, kesici takım malzemesinin gittikçe artan bir biçimde hasar görmesine yol açar. Takım aşınması, takım malzemesinde aşamalı bir biçimde oluşan kayıplar sonucu takımın orijinal şeklinde meydana gelen değişimdir. Takım aşınmasının sonucunda; kötü yüzey kalitesi, kesme kuvvetinde artış, takım tezgahının titreşiminde artma, işleme süresince takım-iş parçası sıcaklığında artış, boyutsal hassasiyette azalış, maliyetlerde artış, üretim etkinliği ve kalite bileşenlerinde düşüş meydana gelir. Bu nedenle, takım aşınması talaşlı imalat proseslerinde oldukça önemli bir parametre olarak

kabul edilir. Dolayısıyla, takım aşınmasının etkili bir biçimde modellenerek tahmin edilmesi, takımın maksimum kullanılmasını ve işleme maliyetlerinin minimize edilmesini sağlayacaktır. Takım aşınmasına neden olan etkenler, Şekil 5.22'deki neden-sonuç diyagramından da görülebileceği gibi dört temel grupta toplanabilir. Bu çalışmada, söz konusu faktörlerden kesme parametrelerinin etkisi incelenmeye çalışılacaktır.



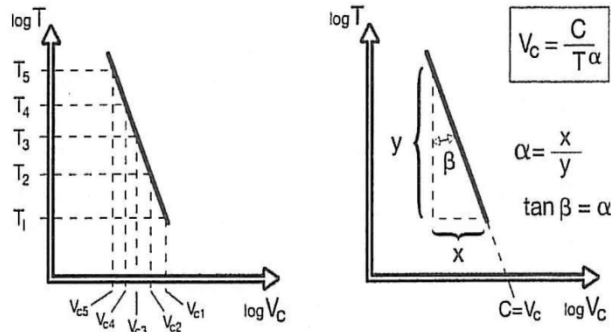
**Şekil 5.22. Bir Tornalama Süreci için Ishikawa Neden-Sonuç Diyagramı**  
(Kaynak: Singh – Kumar, 2007, s. 222)

Çalışmamızda dikkate alınan takım aşınması türü, en yaygın karşılaşılan aşınma türü olan serbest yüzey aşınmasıdır. Bu aşınma tipi, adından da anlaşılacağı gibi kesici kenarın serbest yüzeyinde meydana gelir. Serbest yüzey aşınması, Şekil 5.23'den de görülebileceği gibi başlangıç aşınması, düzenli aşınma ve son aşınma olmak üzere üç aşamada gerçekleşir. Serbest yüzey aşınması kritik değere ulaştığında, aşınma hızı, kesme kuvveti, sıcaklık hızlı bir biçimde artar ve işlenen yüzeyin pürüzlülüğü artar. Bu nedenle, bu gelişimin kontrol edilebilir bir düzeyde tutulması amaçlanmalıdır. Söz konusu aşınmanın, belirli bir değerin üstüne çıkması durumunda yüzey kalitesi kötüleşir.



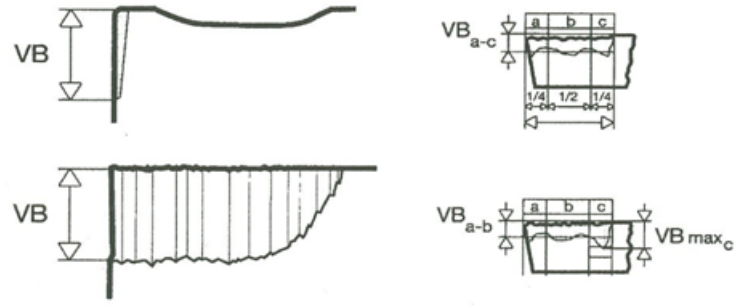
**Şekil 5.23. Aşınmanın Gelişimi ve Ömür (Kaynak: Çakır, 2006, s. 87)**

Yüzey kalitesi, takım aşınması ve kesme kuvvetlerinin kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı) ve takım geometrisine bağlı olduğu bilinmektedir. Şekil 5.23’de verilen aşınma / zaman diyagramı incelendiğinde, aşınmanın her zaman doğrusal olmadığı, eğrinin şeklinin kesme hızına bağlı olduğu ve her bir hız için farklı aşınma eğrileri çizildiği görülebilir. Aşınma eğrisi başlangıçta orta hızlı yol alırken, sonrasında hızda ani bir artış gözlenmektedir.



**Şekil 5.24. Ömür / Kesme Hızı Bağantısı (Kaynak: Çakır, 2006, s. 87)**

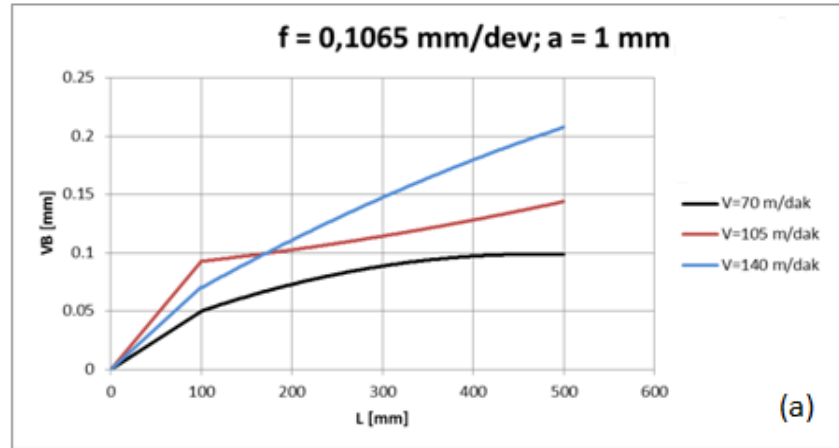
Şekil 5.24’de verilen takım ömrü / kesme hızı diyagramında verilen doğrunun konumu ve eğimi iş parçası, takım malzemesinin yanı sıra ilerlemeden etkilenir. Belirli bir takım ömrü için, daha yüksek bir ilerleme daha düşük bir takım ömrü dolayısıyla, daha fazla aşınmış bir takım anlamına gelir.



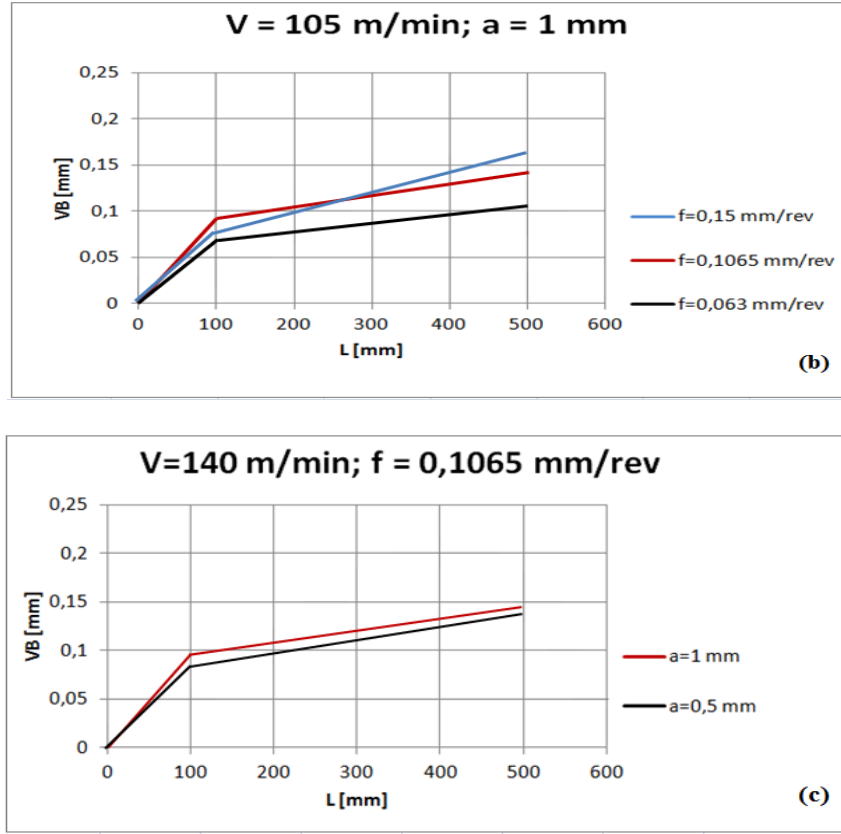
**Şekil 5.25. Serbest Yüzey Aşınması (Kaynak: Çakır, 2006, s. 80)**

Takım aşınması, aşınma gelişimini devam ettirirken aşınma bölgesinin bir büyüteç altında incelenmesiyle belirlenir. Bu inceleme, aşınma kriterinin belirli bir değeri aşmasına kadar sürdürülür. Kesici kenar üzerinden ölçülen serbest yüzey aşınmasının, üç bölge üzerinde uniform bir biçimde yayılması durumunda serbest yüzey aşınması, Şekil 5.25’de görüldüğü gibi ortalama bir değer ( $VB_{a-c}$ ) olarak alınır. Çalışmada, takım serbest yüzey aşınması  $VB_{a-c}$  olarak ölçülmüş ve VB ile sembolize edilmiştir.

Öncelikle, kesme parametrelerinin farklı düzeyleri ile takım aşınması değerlerine ilişkin olarak çizilen grafikler değerlendirilecektir. Sıra ile kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği düzeyleri ve takım aşınması ilişkisinin sergilendiği grafikler Şekil 5.26’da verilmiştir.



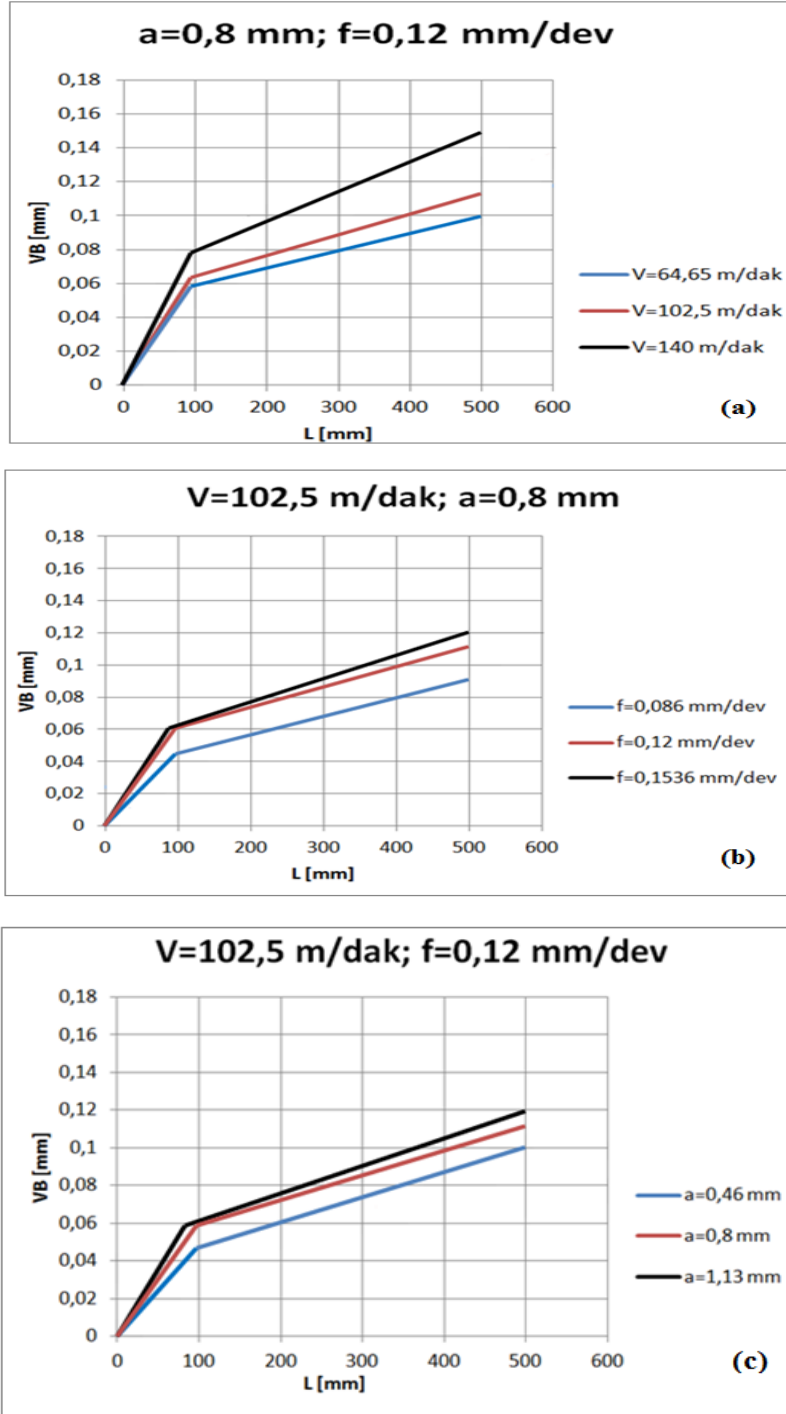




**Şekil 5.26. Box-Behnken Tasarımı için Kesme Parametrelerinin Takım Aşınmasına Etkisi**

Grafikler incelendiğinde, takım aşınmasına en büyük etkiyi  $V_c$ 'nin, en küçük etkiyi ise  $a_p$ 'nin yaptığı görülmektedir. Şekil 5.26 (b)'den görülebileceği gibi, düşük ilerlemede ( $f = 0,063$  mm/dev) aşınmanın daha yüksek değerlere çıkması, işleme süresinin artmasıyla açıklanabilir. Yüksek ilerlemede ise ( $f = 0,15$  mm /dev),  $VB \cong 0,19$  mm'de takım kırılmıştır. Tüm kesme parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğüne etki etme yönleri pozitiftir. Box-Behnken tasarımının kullanıldığı ilk deneylerde, takım aşınması için anlamlı bir model elde edilemediğinden, burada sadece aşınma grafiklerinin yorumlanması ile yetinilmiştir.

Merkezi bileşik tasarımın kullanıldığı deney sonuçlarının, tepki yüzeyi metodolojisi ile analiz edilmesi öncesinde kesme parametreleri ile takım aşınması değerlerine ilişkin olarak çizilen grafikler Şekil 5.27'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, her üç kesme parametresinin de takım aşınması üzerinde pozitif etkiye sahip olduğu görülmektedir. Takım aşınmasına en büyük etkiyi  $V_c$ 'nin yaptığı gözlenirken, en düşük etkiye sahip  $a_p$ 'nin etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir.



**Şekil 5.27. Merkezi Bileşik Tasarım için Kesme Parametrelerinin Takım Aşınmasına Etkisi**

Merkezi bileşik tasarım kullanılarak gerçekleştirilen deney sonuçlarının, analiz edilmesi ile ulaşılan takım aşınması modeline ilişkin bulgular Tablo 5.11’de verilmiştir. Bu bulgulara göre,  $V_c$  değişkeninin parametresi %1 ve  $f$  değişkeninin parametresi %5

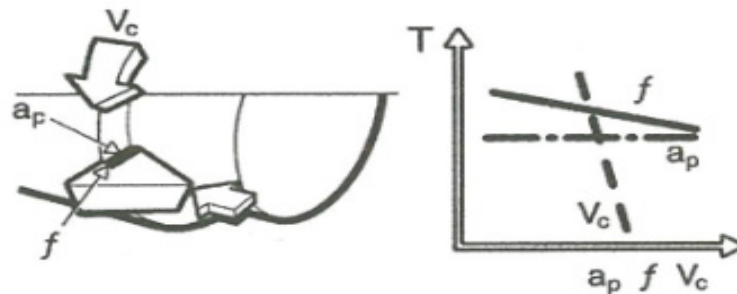
anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı,  $a_p$  değişkeninin parametresi ise, istatistiksel olarak anlamsızdır.

**Tablo 5.11. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Model Tahmini Sonuçları**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,087125	0,000403	216,268	0,000
Vc	0,021226	0,000820	25,888	0,000
$a_p$	-0,000661	0,000820	-0,806	0,426
f	0,001976	0,000820	2,410	0,021
S=0,00254789			PRESS = 0,000298182	
R-Sq = 94,95%			R-Sq(adj) = 94,53%	

Aşınmanın en temel nedeni, yüksek sıcaklıktır. Özellikle bu çalışmada yapılan deneylerde olduğu gibi sert malzemelerin işlenmesi esnasında, kesme hızı ve ilerlemedeki artışlar yüksek sıcaklığa neden olmakta ve bu da, takımın serbest yüzeyinde meydana gelen aşınmanın artışına yol açmaktadır. Şekil 5.28'den de görüldüğü gibi, takım ömrü ve kesme parametreleri arasında,  $T = C_0 / (V_c^k f^l a_p^m)$ ;  $k > l > m$  ilişkisi mevcuttur. Diğer bir ifadeyle, takım aşınması üzerinde en önemli faktör Vc iken, bunu f izlemektedir.  $a_p$ 'nin etkisinin ise, literatürde ihmal edilebilir düzeyde olduğu bilinmektedir.

Tablo 5.11'deki bulgulardan, istatistiksel olarak anlamlı bulunan Vc ve f değişkenlerinin artmasının takım aşınması değerini artırmakta olduğu,  $a_p$ 'nin ise bu değere herhangi bir etkide bulunmadığı yorumu yapılabilir. Takım aşınması üzerinde en etkili ve önemli faktörün Vc olduğu görülmektedir. Şekil 5.28'den de anlaşılacağı gibi, elde edilen bulguların literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Tahmin edilen modelin açıklama gücü oldukça yüksektir. Elde edilen bu bulgular, modelin doğruluğunun da bir göstergesidir.

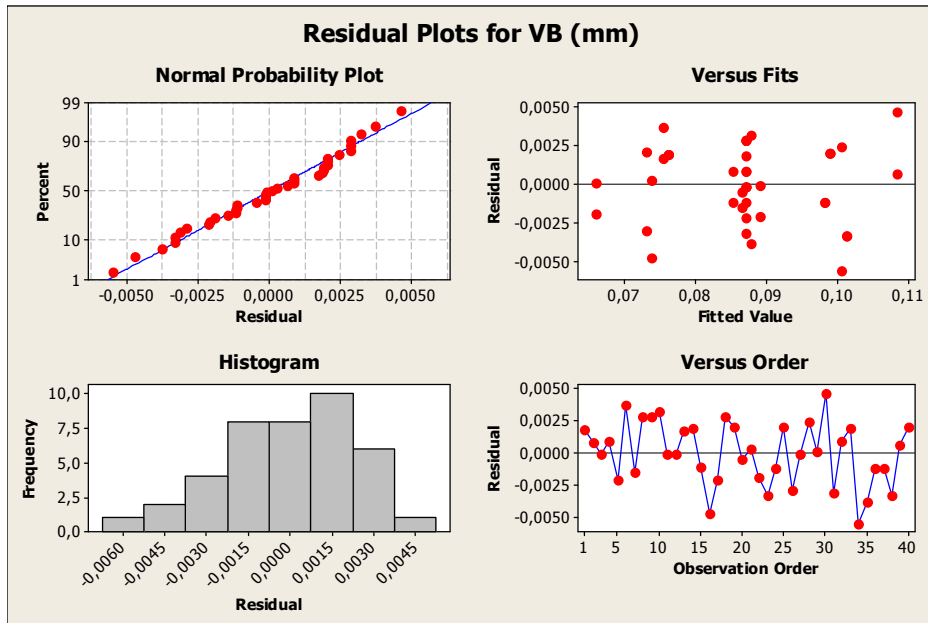


**Şekil 5.28. Takım Ömrü ve Kesme Parametreleri İlişkisi (Kaynak: Çakır, 2006, s. 41)**

**Tablo 5.12. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Varyans Analizi Sonuçları**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	0,004393	0,004393	0,001464	225,55	0,000
Linear	3	0,004393	0,004393	0,001464	225,55	0,000
Vc	1	0,004351	0,004351	0,004351	670,20	0,000
ap	1	0,000004	0,000004	0,000004	0,65	0,426
f	1	0,000038	0,000038	0,000038	5,81	0,021
Residual						
Error	36	0,000234	0,000234	0,000006		
Lack-of-Fit	11	0,000093	0,000093	0,000008	1,5	0,195
Pure Error	25	0,000141	0,000141	0,000006		
Total	39	0,004626				

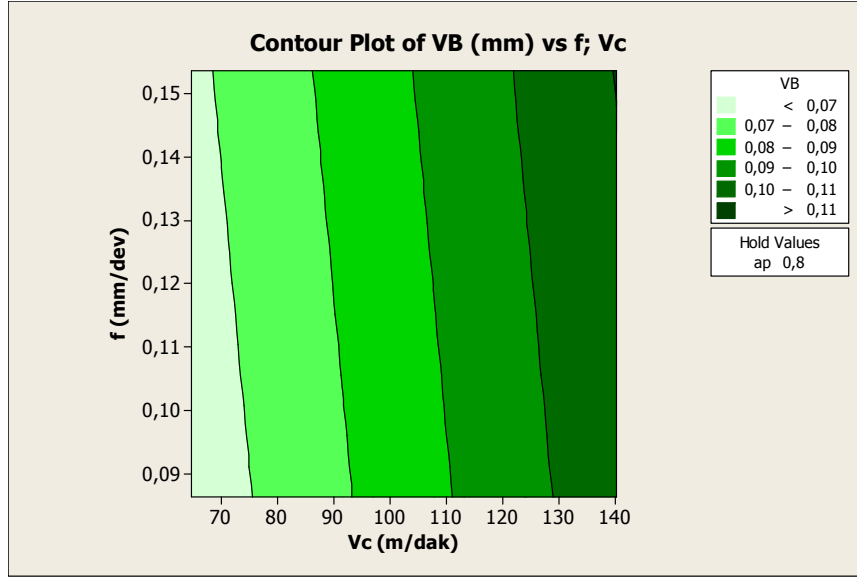
Tablo 5.12'deki bulgulara göre, tahmin edilen model genel olarak anlamlıdır ve takım aşınması ve faktörler arasındaki ilişki, doğrusal bir fonksiyonla temsil edilebilir. Söz konusu tablodaki bulgulara dayanılarak yapılan uyum yetersizliği testinde, modelde uyum eksikliğinin olmadığı anlaşılmıştır.



**Şekil 5.29. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Kalıntı Grafikleri**

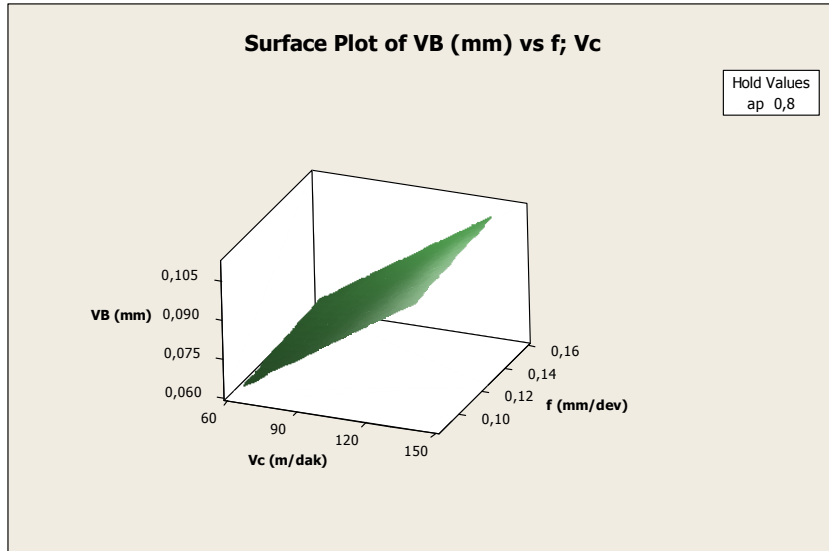
Tahmin edilen modelin artıklarının grafiklerinden normal olasılık grafiği incelendiğinde, hata dağılımının normal olduğu görülmektedir. Ayrıca yapılan A-D testi sonucu (AD=0,333; p=0,502) verilerin normal dağılıma uyduğu gözlenmiştir. Şekil

5.29'dan hatanın rassal olduğu ve kalıntılar arasında pozitif veya negatif bir korelasyon olmadığı gözlenmektedir.



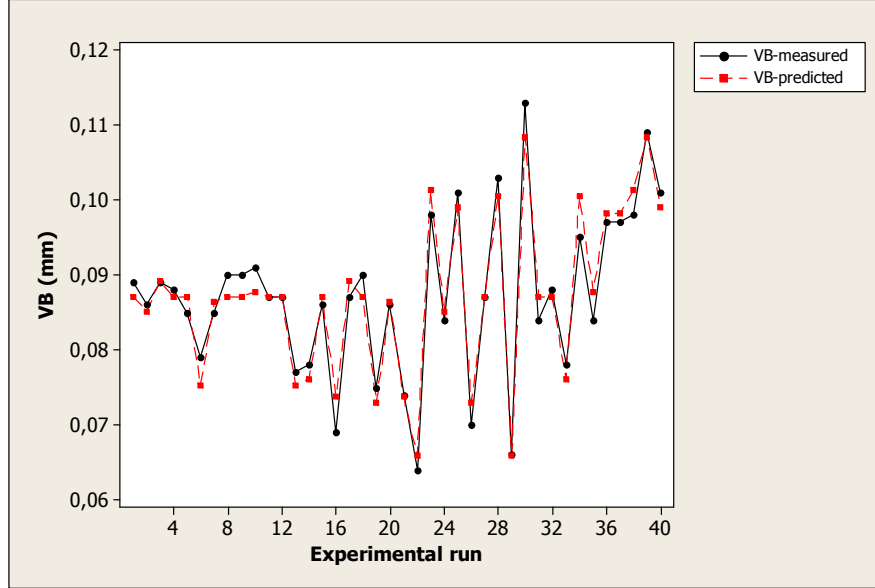
Şekil 5.30. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Kontur Grafiği

Vc ve f değişkenlerinin takım aşınması üzerindeki etkisine ilişkin olarak çizilen kontur grafiğinden, takım aşınmasının minimum olduğu bölgenin Vc'nin ve f'in düşük değerler aldığı bölge olduğu görülmektedir.



Şekil 5.31. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Yüzey Grafiği

Şekil 5.31’de verilen Vc ve f değişkenlerinin takım aşınması üzerindeki etkisine ilişkin olarak çizilen yüzey grafiğinden, Vc’nin ve f’in düşük değerler aldığı bölgede, takım aşınmasının minimum değerde olduğu görülmektedir.



Şekil 5.32. Merkezi Bileşik Tasarım ile VB için Ölçülen ve Tahmin Edilen Değerler

Ölçülen ve tahmin edilen tepki değerleri arasındaki karşılaştırma, Şekil 5.32’de verilmiştir. Grafikten %95 güven aralığında takım aşınmasının tahmin edilen değerlerinin deneyden gözlenen değerlere oldukça yakın olduğu gözlenmektedir. Bu bulgu, tahmin modelinin uygunluğunu göstermektedir.

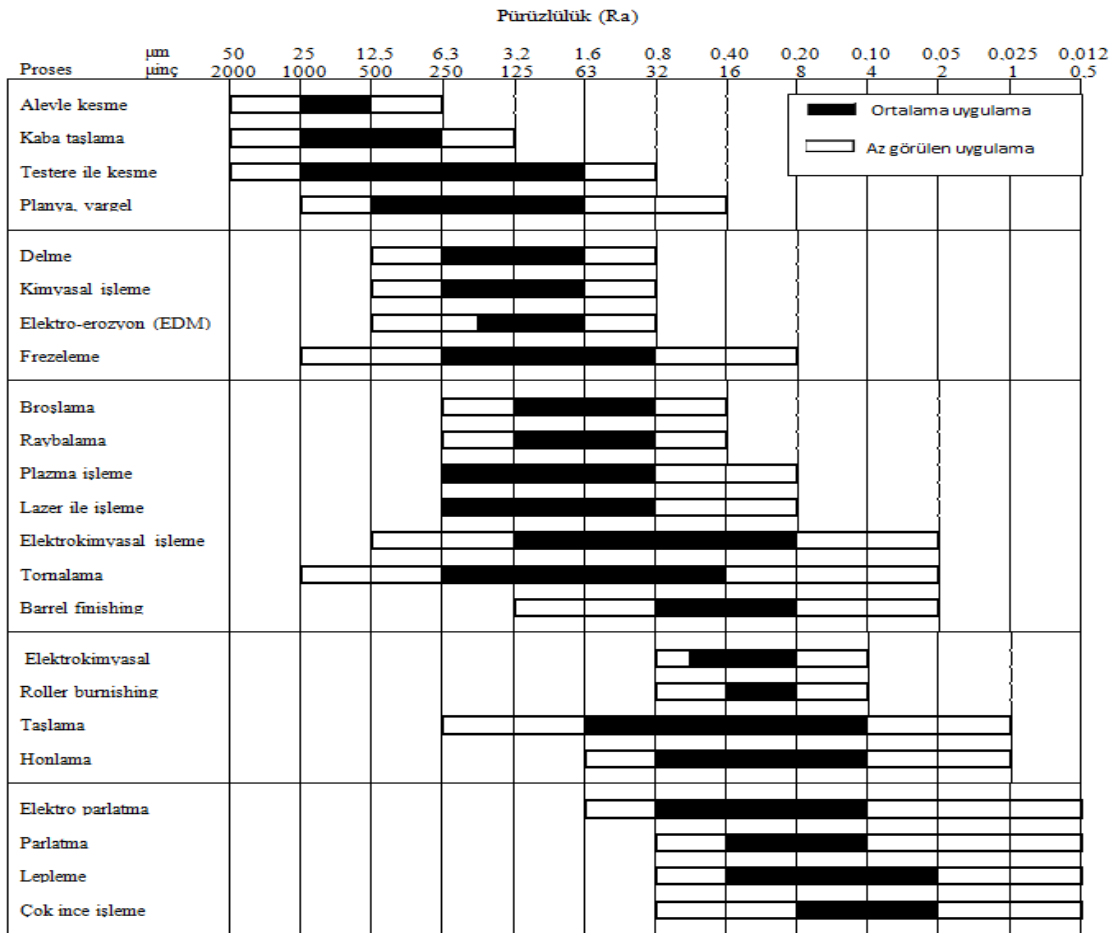
## VI. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ve TAKIM AŞINMASININ OPTİMİZASYONU

Çalışmada bir sonraki adım olarak, minimum yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması değerlerinin elde edilmesi amacıyla, analizler sonucu elde edilen bulgularla uygunluğu kanıtlanan modellerin optimizasyonu yapılmıştır.

Tablo 5.13. Merkezi Bileşik Tasarım ile Ra ve VB için Optimizasyon Sonuçları

Parameters	Goal	Opt. comb.			Target	Upper	Pre. resp.	Des.
		Vc (m/dak)	ap (mm)	f (mm/dev)				
Ra (µm)	Minimize	91,4155	1,0956	0,0864	1,6	3,2	1,5994	1,0000
VB (mm)	Minimize	91,4155	1,0956	0,0864	0,07	0,14	0,0784	0,98738

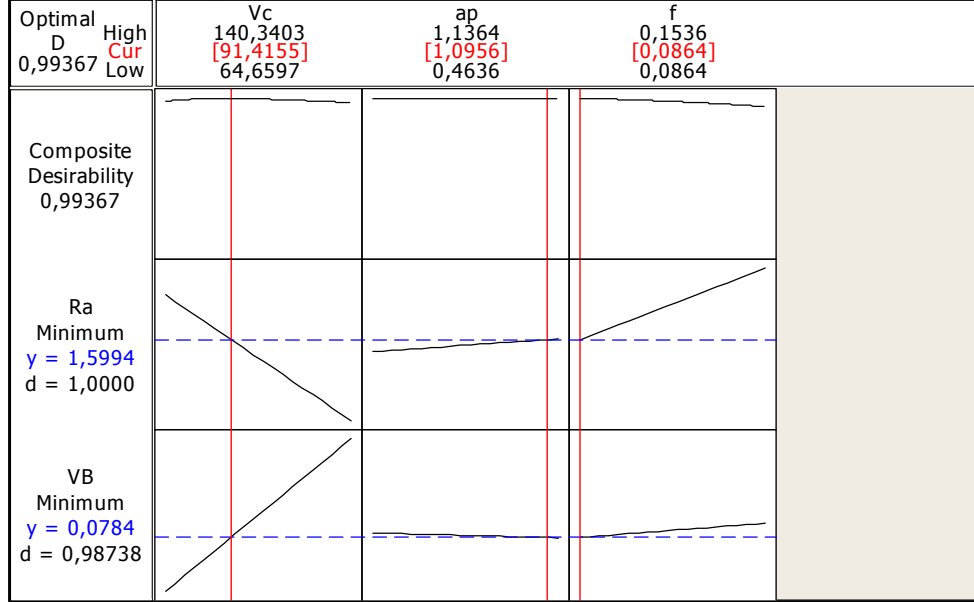
Tablo 5.13'den görülebileceği gibi, yüzey pürüzlülüğü için hedef değer 1,6 ve üst değer 3,2; takım aşınması için ise hedef değer 0,07 ve üst değer 0,14 olarak belirlenmiştir. Şekil 5.34'de verilen optimizasyon grafiğinden görüldüğü gibi, minimum yüzey pürüzlülüğü değeri 1,5994 olarak tespit edilmiştir. Şekil 5. 33 incelendiğinde, elde edilen bu bulgunun, ortalama uygulama toleransları ve literatürle uyumlu olduğu görülebilir. Optimizasyon işlemi sonucu, ulaşılan minimum takım aşınması değeri 0,0784'dir. Bu değerlere ulaşmak için, faktör seviyelerinin  $V_c=91,4155$  m/dak,  $a_p=1,0956$  mm ve  $f=0,0864$  mm/dev. olarak ayarlanması gerektiği görülmektedir.



**Şekil 5.33. Farklı İşleme Proseslerinden Elde Edilen Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri (Kaynak: Singh, 1996, s. 158)**

Tahmin edilen tepki değişkenlerine ilişkin olarak bulunan çekicilik (desirability) değeri,  $0 \leq d_i \leq 1$  aralığında değerler almakta olup, söz konusu tepkinin çekiciliği arttığında bir başka deyişle, tepki arzu edilen değerine yaklaştığında, karşılık geldiği çekicilik değeri

de artmaktadır. Uygulamada, tahmin edilen yüzey pürüzlülüğüne ilişkin olarak bulunan çekicilik değerinin 1 ve takım aşınmasına ilişkin olarak bulunan çekicilik değerinin 0,98738 ve bileşik çekicilik (composite desirability) değerinin 0,99367 olması, optimizasyon sonucu tahmin edilen yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması değerlerinin, arzu edilen değerlerine yaklaştığının göstergesidir.



Şekil 5.34. Merkezi Bileşik Tasarım ile  $R_a$  ve VB için Optimizasyon Grafiği



## SONUÇ

Milattan önceki yıllarda dahi, önemle üzerinde durulan kalite kavramının tarihsel gelişim süreci incelendiğinde, modern endüstriyel sistemin doğuşuyla beraber 1800'lü yılların sonlarında Taylor'un "*Bilimsel Yönetim*" ilkelerini açıklamasıyla tanımlanmaya başlandığı görülür. 1924 yılına gelindiğinde Shewhart, "*İstatistiksel Süreç Kontrol*" kavramını tanıtarak kalite konusuna önemli katkılarda bulunmuştur. Feigenbaum, 1951 yılında "*Toplam Kalite Kontrolü*" kavramını kullanmıştır. Daha sonra, Deming ve Juran'ın çalışmaları ile tüm çalışanların katılımına dayanan "*Toplam Kalite Yönetimi*" kavramı ortaya çıkmıştır. Bu gelişmelerin ardından garanti, hurda, yeniden işleme gibi nedenlerden dolayı oluşan kötü kalitenin maliyetini inceleyen Bob Galvin, minimum hata ile ürün tasarlamayı hedefleyen bir şirket için, geleneksel üç sigma tasarımlarının yetersiz olduğunu ifade ederek, mühendislerinden artı-eksi Altı Sigma tolerans limitleri ile ürün tasarlamalarını istemiştir. Böylelikle ilk kez 1987'de, Motorola şirketinde bir iş iyileştirme stratejisi ve yönetim felsefesi olan "*Altı Sigma*" yöntemi uygulanmıştır.

Altı Sigma yaklaşımının kullandığı problem çözme ve süreç iyileştirme yöntemlerinden biri, ileri düzey bir yöntem olan istatistiksel deney tasarımı tekniğidir. Fisher'in tarım alanındaki çalışmaları ile 1920'li yıllarda başlayan istatistiksel deneysel tasarımının modern gelişimini, dört dönem içinde incelemek mümkündür. Box ve Wilson (1951) tarafından geliştirilen Tepki Yüzeyi Metodolojisi, ikinci dönem olarak kabul edilen bir dönemin başlamasını harekete geçirmiştir. Bu yöntem, ilk kez Amerika'da 1950'lerde ürün ve süreç gelişimi için kimya endüstrisinde uygulanmıştır. Bu gelişmenin ardından, Batı endüstrisinin kalite iyileştirmeye ilgisini arttığı 1980'lere denk gelen üçüncü dönemde, diğer imalat endüstrilerinde de uygulanması yaygınlaşmıştır.

Mühendislerin, bilim insanlarının ve istatistikçilerin endüstriyel deneylere yaklaşımlarını etkili bir biçimde değiştiren Tepki Yüzeyi Metodolojisi, son 30 yıl içinde

uzay, otomotiv, biyoteknoloji ve farmasötikal, tıbbi cihazlar, kimya endüstrisi, yarı iletkenler ve elektronik imalat sanayi, talaşlı imalat sanayi, metal kesme ve montaj süreçleri gibi çeşitli endüstriyel alanlar ile fizik, mühendislik bilimleri, gıda bilimi, biyolojik ve klinik bilimler ve sosyal bilimler gibi çok çeşitli alanda kapsamlı bir biçimde uygulama olanağı bulmaktadır. 1980’li yılların sonlarında tepki yüzeyi metodolojisinde meydana gelen önemli gelişmelerden biri, deneysel tasarımın gelişimi üzerinde önemli bir bileşen olan ve tepki yüzeyi tasarımlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılmasında kullanılan optimal tasarım teorisidir.

Optimal tasarım kavramı, deneylerin istatistiksel olarak en muhtemel ve hassas çıkarımları elde etmek için tasarlanması gerektiğine işaret etmektedir. Kiefer ve meslektaşları tarafından uygulama alanına getirilen bu teorinin temel karakteristiği, uydurulan modele ilişkin olan varyansın azaltılmasıdır. Uygun bir tasarımın seçilmesi problemi, çok yönlü ve aşılması güç bir sorundur. Bu bağlamda tepki yüzeyi metodolojisi tasarımları için bilinen klasik kriterler; ortogonallik, döndürülebilirlik, etkinlik ve dirençlilik olarak sıralanabilir. Bunlardan etkinlik kriteri, en temel anlamda küçük bir tahmin varyansına sahip olmak olarak tanımlanabilmektedir. Bu amaçla, tasarımların karşılaştırılması ve performanslarının değerlendirilmesinde önerilen metotlardan biri, tasarım optimalitesi kriterlerine dayanan ve alfabenin harfleri ile karakterize edilmesinden dolayı “*alfabetik optimalite kriterleri*” olarak adlandırılan çeşitli etkinlik ölçüleridir.

Sayısal kriterler olarak da adlandırılan bu kriterler, çoğu zaman modeli desteklemesi açısından tasarımın kompleksliğini, tahmin kabiliyetini, istikrarını ve yeterliliğini doğru bir biçimde yansıtamamaktadır. Bu nedenle sayısal kriterlerden çok daha etkili olan, daha fazla bilgi sağlayan ve tasarımın tahmin varyansı karakteristiklerini yansıtan grafiksel yöntemler önerilmiştir. Temelde ölçekli tahmin varyansı kriterini kullanan Varyans Yayılım Grafiği, Kantil Yayılım Grafiği ve Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği bu yöntemlerden birkaçıdır.

Giovannitti-Jensen ve Myers (1989) tarafından geliştirilen Varyans Yayılım Grafikleri, çok boyutlu bölge genelinde ölçekli tahmin varyansını iki boyutlu bir grafik şeklinde sunar. Myers ve meslektaşları (1992) tarafından da ele alınan Varyans Yayılım Grafiğinin; deneyi gerçekleştiren araştırmacıların ilgilenilen deneysel bölge üzerinde tepki tahminlerinin kalitesi ile ilgilenmeleri durumunda, tasarımların karşılaştırılmasında sayısal

kriterlerden ekstrem bir biçimde daha bilgilendirici ve kullanışlı olduğu kanıtlanmıştır. Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) tarafından geliştirilen ve tasarımın tahmin kabiliyetinin daha iyi kavranması amacıyla, Varyans Yayılım Grafiği tekniğini tamamlayıcı bir teknik olan Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği, tez çalışmasında kullanılan bir diğer grafiksel yöntemdir.

Uygulama bölümünün bulgularının değerlendirilmesine geçmeden özetlenecek olursa; istatistiksel deney tasarımı uygulamalarında istatistiksel olarak en muhtemel ve hassas çıkarımların elde edilebilmesi için, optimal tasarımların seçilmesi gerekliliği kritik bir konudur. Yapılan literatür taramalarında, bu grafiksel tekniklerin ele alındığı çalışmaların son derece sınırlı olduğu, özellikle Türkçe literatürde bu alandaki çalışmaların çok eksik olduğu gözlenmiştir. Bir amacı da Türkçe literatürdeki bu eksikliği gidermek olan tez çalışmasında, söz konusu grafiksel tekniklerden Varyans Yayılım Grafiği ve Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği kullanılarak optimal tasarımın seçilmesi sağlanmıştır.

Bu bağlamda çalışmanın ilk aşamasında; önemli Tepki Yüzeyi Tasarımlarından Merkezi Bileşik Tasarım ve Box-Behnken Tasarımı, ölçekli tahmin varyansı kriterini kullanan, Varyans Yayılım Grafiği ve Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, üç faktör için üretilen ve her bir faktörün üç düzeye sahip olduğu Box-Behnken tasarımı, 12 adet faktöriyel tasarım noktası ve 3 adet merkez noktadan oluşmaktadır. Merkezi Bileşik Tasarım ise, beş düzeyli üç faktör için yapılandırılmıştır. Söz konusu tasarım, 8 adet tam faktöriyel tasarım noktası, 6 adet aksel nokta ve 6 adet merkez noktaya sahiptir. Aksel noktalar için,  $\alpha = \mp 1,682$  değeri kullanılmıştır. Tasarımlar karşılaştırılmadan önce, Merkezi Bileşik Tasarımdaki merkez nokta sayısının belirlenmesi amacıyla, çeşitli merkez nokta sayısına sahip alternatif Merkezi Bileşik Tasarımlar için çizilen Varyans Yayılım Grafiğinde, en düşük ölçekli tahmin varyansı değerine sahip olan, 6 merkez noktalı tasarım tercih edilmiştir. Ulaşılan bu sonuç, özellikle Borkowski (1995) ile oldukça benzer olup, Giovannitti-Jensen ve Myers (1989), Myers ve diğerleri (1992) ve Anderson-Cook, Borrer ve Montgomery (2009) çalışmaları ile paralellik göstermektedir.

Uygun Merkezi Bileşik Tasarımın seçiminin ardından, bu tasarımın Box-Behnken Tasarımı ile karşılaştırılması amacıyla, Varyans Yayılım Grafikleri çizdirilmiştir. Ölçekli tahmin varyanslarının gözleendiği bu grafiklerden, Merkezi Bileşik Tasarımın merkezde ve

çevrede Box-Behnken Tasarımından daha düşük ölçekli tahmin varyansına ve daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen bu bulgu; Giovannitti-Jensen ve Myers (1989), Myers ve diğerleri (1992), Borkowski (1995), Trinca ve Gilmour (1999) ve Anderson-Cook, Borrer ve Montgomery'nin (2009) çalışmalarını destekler niteliktedir. Böylelikle, literatürle de uyumlu olan bu bulgularla, alternatif tasarımların kıyaslanması yapılmış ve kullanılacak tasarımın tesadüfi bir biçimde belirlenmesinin yerine, bilimsel bir metodoloji ışığında seçimi gerçekleştirilmiştir.

Grafiksel tekniklerden Varyans Yayılım Grafiğinin kullanılmasının ardından, araştırmacıya daha ayrıntılı bilgi sağlayan ve ölçekli tahmin varyansının dağılımı hakkında bilgi veren, Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği uygulanmıştır. Tasarım uzayındaki ölçekli tahmin varyansı değerleri aralığını tek bir çizgi ile özetleyerek, tasarımlar arasında doğrudan karşılaştırmaların daha iyi bir biçimde yapılmasına imkan vermesi nedeniyle de, bu grafiğin kullanılması uygun görülmüştür. Merkezi Bileşik Tasarım için çizdirilen Kesirli Tasarım Uzayı Grafiğinden, tasarım uzayı genelinde ortalama standart hatanın yaklaşık olarak 0,25 civarında olduğu görülmüştür. 0,90 olarak hesaplanan kesirli tasarım uzayı değeri, bir standart sapma içinde kesirli tasarım uzayının doğru tahmin yeteneği oranının ortalama olarak %90 olduğunu ifade etmektedir. Tepkinin anlamlı bir tahmini ve optimizasyonunun elde edilebilmesi için, söz konusu değer 0,80'in üzerinde olması gerekliliği göz önüne alındığında, bu tasarımın gerekli koşulları sağlayan iyi bir tasarım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Box-Behnken Tasarımı için çizdirilen grafiğe göre, standart hatanın yaklaşık olarak 0,53 düzeyinde olduğu ve kesirli tasarım uzayı değerinin 0,81 olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, kesirli tasarım uzayı değeri daha yüksek, standart hata değeri daha düşük olan ve kesirli tasarım uzayı eğrisinin şekli itibarıyla de, daha yayvan bir görünüme sahip olan Merkezi Bileşik Tasarımın, Box-Behnken Tasarımından daha etkin bir tasarım olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuç Zahran, Anderson-Cook ve Myers (2003) çalışmasıyla uyumludur.

Günümüzde pazar, kalite ve verimlilik başarıya ulaşmak için gerekli temel etkenler olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda, işletmelerin kalite performanslarının bir kriteri olarak nitelendirilen toplam kalite maliyetleri oldukça önemlidir. Endüstriyel üretimin yapıldığı birçok alanda ekonomi ve kalite açısından, istenilen üretimin gerçekleştirilmesinde kesici takımların önemi büyüktür. Bu bağlamda takım ömrünün

uzatılması, tezgahın daha az durarak daha uzun süre talaş kaldırmasını sağlayacaktır. Takımın iyi bir performans gösterememesi, üretim maliyetlerinde büyük artışlara yol açacağından, aşınmanın belirlenmesi ve kontrolü son derece önemli bir konudur.

Bu bağlamda, literatürde önemli bir yere sahip olan ve bu çalışmanın da teknik uygulama alanı olan, talaşlı imalat işlemleriyle ilgili kesin tespitlerin yapılması oldukça zordur. Talaşlı imalat alanındaki literatür incelendiğinde, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün modellenmesinde diğer modelleme ve deney tasarımı tekniklerinin yaygın olarak kullanılmasına rağmen, Tepki Yüzeyi Metodolojisinin sınırlı bir biçimde kullanıldığı gözlenmiştir. Ayrıca, bu tekniğin sert malzemelerin tornalanması sürecinde ender bir biçimde uygulandığı görüldüğünden, çalışmanın teknik açıdan özellikle Türkçe literatüre katkı yapacağı düşünülmektedir.

Metal, yüksek hız, sıcaklık ve basıncın bir arada bulunduğu talaş kaldırma işlemi sürecinde, metallerin difüzyonu ve kimyasal reaksiyonlar; takımın aşınması, yüzey pürüzlülüğü, tolerans dışı imalat, takımın veya iş parçasının zarar görmesi gibi problemlere ve sonuç olarak da, katlanılması gereken maliyetlere yol açmaktadır. Kesici takım maliyeti, üretim maliyeti içindeki payı çok küçük olmasına rağmen, diğer maliyetleri etkilemesi açısından çok önemlidir. Dolayısıyla, takım aşınması ve bunun doğal bir sonucu olan yüzey pürüzlülüğü, talaşlı imalat süreçlerinin en önemli iki kalite karakteristiği olarak kabul edilir.

Talaş kaldırma sürecinin etkin bir biçimde gerçekleştirilebilmesi için, uygun kesme koşullarının belirlenmesi çok önemlidir. Bu koşulların tespiti, teknik ve ekonomik açıdan yapılır. Teknik açıdan kastedilen, boyutlar ve yüzey kalitesi olurken, ekonomik boyuttan kasıt minimum maliyetin sağlanmasıdır. Bu teknik ve ekonomik faktörler, talaş kaldırma koşullarını belirleyen kesme faktörlerine bağlıdır. Çalışmamızda da incelenen bu faktörler; kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği ve takım ömrüdür.

Söz konusu kalite karakteristiklerini etkileyen kesme parametrelerinin belirlenmesi, minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimum takım ömrünü sağlayacak biçimde yapılmalıdır. Talaş kaldırma işlemlerinde, basit ölçüler dahi çok büyük anlam ifade eder. Bu nedenle, kesme parametrelerinin optimizasyonu da oldukça önemlidir. Bu amaçla kullanılan, üretimde ve proseslerde çıktı kalitesinin sürekli geliştirilmesi için, çok önemli bir araç olan optimizasyon yöntemleri, geleneksel ve geleneksel olmayan teknikler olarak

iki ana grupta toplanirlar. Deney tasarımı, geleneksel teknikler grubunda yer alan, optimal çözümler üretebilen ileri ve etkili bir istatistiksel tekniktir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, ilk aşamada grafiksel yöntemlerle elde edilen bulguların bir anlamda sağlamlasının yapılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Merkezi Bileşik Tasarım ve Box-Behnken Tasarımı kullanılarak Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile elde edilen modeller analiz edilerek karşılaştırılmıştır. Bu aşamada hedeflenen bir diğer önemli nokta, talaşlı imalat işlemlerinde karşılaşılan iki önemli kalite problemi olan, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile modellenerek analiz edilmesidir. Bu kalite karakteristiklerini etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Son derece komplike dinamiklere sahip olan talaşlı imalat sürecinde, bu faktörlerin tamamının göz önünde bulundurulması makul ve mümkün olmamaktadır. Çalışmamızda işlenmesi oldukça zor ve pahalı olan sert malzeme kullanımı, sert tornalama işleminin uygulanması, maliyet vb. kısıtlar göz önüne alınarak, sadece en önemli kesme parametreleri olan; kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği parametreleri incelenmiştir.

Bu süreçte çok sayıda model tahmin edilmiş, uygulama bölümünde istatistiksel kriterler açısından en uygun görülen modellere yer verilmiştir. İlk olarak, Box-Behnken Tasarımı kullanılarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü modelinde, %1 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı bulunan f değişkeninin artması, yüzey pürüzlülüğünün sayısal değerini artırmakta, Vc değişkeninin artması ise, bu değeri azaltmaktadır. ap değişkeninin parametresi ise, istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. Yüksek kesme hızı yüksek sıcaklığa neden olmakta, bu ise, malzemenin yumuşamasına, daha kolay işlenebilmesine ve yüzey pürüzlülüğünün sayısal değerinin düşmesine, diğer bir ifadeyle yüzeyin daha az pürüzlü olmasına neden olmaktadır. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde pozitif etkili olduğu bulgusu, teorik yüzey pürüzlülüğü ve ilerleme arasındaki fonksiyonel ilişkiye uygundur. Dolayısıyla, model bulgularının teorik beklentilerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu bulgular Ekinovic, Dolinsek ve Begovic (2005), Şahin ve Motorcu (2008), Çakır, Ensarioğlu ve Demirayak (2009), Kahraman (2009), Aouici ve diğerleri (2010), Seeman ve diğerleri (2010), Abhang ve Hameedullah (2011) çalışmalarıyla tutarlıdır. Ayrıca, tahmin edilen modelin genel olarak anlamlı olduğu ve yapılan uyum eksikliği testi ile, uydurulan doğrusal modelin yeterli olduğu görülmüştür. Bir başka ifadeyle, ilişkinin

doğrusal bir modelle yeterli bir biçimde temsil edilebileceği belirlenmiştir. Bu bulgu, Singh ve Kumar (2007) çalışmasıyla uyumludur. Modele ilişkin düzeltilmiş determinasyon katsayısı %81,06 ve modelin standart hatası 0,279 olarak hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü için çizdirilen kontur ve yüzey grafiklerinden, yüzey pürüzlülüğünün sayısal olarak minimum olduğu bölgenin  $V_c$ 'nin en yüksek ve  $f$ 'in en düşük değerler aldığı bölge olduğu görülmüştür. Bu sonucun, Gaitonde ve diğerleri (2009) çalışmasıyla karşılaştırıldığında tutarlı olduğu görülmüştür.

İkinci olarak, Merkezi Bileşik Tasarım kullanılarak ulaşılan yüzey pürüzlülüğü modelinde de ilk modeldeki bulgulara benzer şekilde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunan  $f$  değişkeninin pozitif ve  $V_c$  değişkeninin negatif etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla, önceki paragrafta söz edilen literatürle uyumlu bulgular bu model için de aynen geçerlidir. Genel olarak anlamlı bulunan tahmin modeli için yapılan uyum eksikliği testinde, uydurulan doğrusal modelin yeterli olduğu görülmüştür. Tahmin modeli için düzeltilmiş determinasyon katsayısı %90,29 ve modelin standart hatası 0,174 olarak hesaplanmıştır. Ancak, Merkezi Bileşik Tasarımın kullanıldığı ikinci modelin sonuçlarından, daha yüksek determinasyon katsayısı ve daha düşük standart hataya sahip olması nedeniyle, bu modelin daha iyi bir model olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla, ilk aşamada grafiksel tekniklerle tespit edilen Merkezi Bileşik Tasarımın daha iyi sonuçlar veren etkin bir tasarım olduğu bulgusu doğrulanmıştır.

Diğer önemli kalite karakteristiği olan takım aşınması için de, her iki tasarım kullanılarak elde edilen sonuçlarla modelleme denemeleri yapılmış ve istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar üreten model bulguları uygulama kısmında verilmiştir. Box-Behnken Tasarımı kullanılarak anlamlı bir model tahmin edilemediğinden, sadece Merkezi Bileşik Tasarım kullanılarak tahmin edilen model sonuçları paylaşılmıştır. Söz konusu model bulgularına göre,  $V_c$  değişkeninin parametresi %1 ve  $f$  değişkeninin parametresi %5 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak anlamlı,  $ap$  değişkeninin parametresi ise, anlamsız bulunmuştur.  $V_c$  ve  $f$  değişkenlerinin artmasının, takım aşınması değerini artırmakta olduğu  $ap$ 'nin ise, takım aşınması üzerinde anlamlı bir etkide bulunmadığı görülmüştür. Deneylerimizde kullanılan sert malzemelerin işlenmesi esnasında, kesme hızı ve ilerlemedeki artışlar yüksek sıcaklığa neden olmakta ve bu da, takımın serbest yüzeyinde meydana gelen aşınmanın artışına yol açmaktadır. Ayrıca modelden elde edilen bulgulardan, takım ömrü ve kesme parametreleri arasındaki fonksiyonel bağıntıyla da

uyumlu olarak, takım aşınması üzerinde en önemli faktörün  $V_c$  olduğu ve bunu  $f$ 'in izlemekte olduğu görülmüştür.  $a_p$ 'nin etkisinin ise literatüre uygun bir biçimde ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar Davim ve Figueira (2007), Aouici ve diğerleri (2010), Seeman ve diğerleri (2010) çalışmalarının bulguları ile uyumludur. Genel olarak anlamlı bulunan modelde, takım aşınması ile faktörler arasındaki ilişkinin doğrusal bir fonksiyonla temsil edilebileceği ve yapılan uyum yetersizliği testinde modelin verileri başarılı bir biçimde temsil ettiği gözlenmiştir. Bu bulgunun, Singh ve Kumar (2007) ile de uyumlu olduğu görülmüştür. Takım aşınması için çizdirilen kontur ve yüzey grafiklerinden,  $V_c$ 'nin ve  $f$ 'in en düşük değerler aldığı bölgede, takım aşınmasının minimum değerinde olduğu görülmüştür. Tüm tahmin modelleri dikkate alındığında, belirlenen koşullar altında etkileşim etkisi ve kuadratik etkinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmüştür. Bu durum, Wu (1964a) ve Wu (1964b) çalışmalarının sonuçlarını desteklemektedir.

Merkezi Bileşik Tasarımın kullanıldığı söz konusu modellerin uygunluğunun anlaşılmasının ardından, yapılan optimizasyon işlemi sonucunda minimum yüzey pürüzlülüğü değeri uygulamalarda ölçülen ortalama değerlerle uyumlu bir biçimde 1,5994 ve minimum takım aşınması değeri ise, 0,0784 olarak belirlenmiştir. Bu değerlere ulaşmak için faktör seviyelerinin  $V_c=91,4155$  m/dak,  $a_p=1,0956$  mm ve  $f=0,0864$  mm/dev. olarak ayarlanması gerektiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; Tepki yüzeyi tasarımlarından Merkezi Bileşik Tasarımın, Box-Behnken Tasarımından çevrede ve merkezde daha küçük ölçekli tahmin varyansına sahip olduğu ve daha etkin bir tasarım olduğu grafiksel tekniklerle ortaya konulmuştur. Bu bulgu, Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile analiz edilen modellerin karşılaştırılması ile de doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra; talaşlı imalat alanında işlenen yüzeyler için temel bir kalite göstergesi olarak kabul edilen, yüzey pürüzlülüğü ve üretim mühendisliğinde önemli bir parametre olan takım aşınması, Tepki Yüzeyi Metodolojisi ile modellenerek bunları etkileyen faktörler tespit edilmiş ve söz konusu parametrelerin optimum değerleri hesaplanmıştır. Böylelikle, grafiksel yöntemlerin tasarımları karşılaştırmada ve Tepki Yüzeyi Metodolojisinin talaşlı imalat alanındaki kalite karakteristiklerini modelleme, analiz ve optimize etmede oldukça etkin bir teknik olduğu görülmüştür. Şüphesiz uygulamada gerçek değerler kullanıldığı için elde edilen bulgular, bu değerler ve materyaller kapsamında yorumlanmalıdır.



## TERİMLER SÖZLÜĞÜ

*Axial Point:* Eksenel Nokta

*Average Spherical Prediction Variance:* Ortalama Küresel Tahmin Varyansı

*Box-Behnken Design:* Box-Behnken Tasarımı

*Central Composite Design:* Merkezi Bileşik Tasarım

*Desirability Function:* Çekicilik Fonksiyonu

*Fraction of Design Space Plot:* Kesirli Tasarım Uzayı Grafiği

*Response:* Tepki

*Scale Prediction Variance:* Ölçekli Tahmin Varyansı

*Quantile Dispersion Graph:* Kantil Yayılım Grafiği

*Variance Dispersion Graph:* Varyans Yayılım Grafiği

## KAYNAKLAR

- ABHANG L. B. – HAMEEDULLAH M. (2011), “Modeling and Analysis for Surface Roughness in Machining EN-31 Steel Using Response Surface Methodology”, **International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering**, Vol. 1, Issue 1, pp 33-38.
- ADAMS Cary W. – GUPTA Praveen – WILSON Charles E., Jr. (2003), **Six Sigma Deployment**, Butterworth-Heinemann, USA.
- AKKURT Mustafa (1991), **Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları**, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- AKKURT Mustafa (2007), **Makine Bilgisi**, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- AKKURT Mustafa (2010), **CNC Takım Tezgahlarının Programlanması ve CAD-CAM Sistemleri**, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- AOUICI H. – YALLESE M. A. – FNIDES B. – MABROUKİ T. (2010), “Machinability Investigation in Hard Turning of AISI H11 Hot Work Steel with CBN Tool”, **Mechanika**, Vol. 86, Issue 6, pp. 71- 77.
- ALLEN T. Theodore (2006), **Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma**, Springer-Verlag, Germany.
- ANDERSON Mark J. – WHITCOMB Patrick J. (2005), **RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments**, Productivity Press, New York.
- ANDERSON-COOK Christine M. – GODFREY-OZOL Ayca, “Using Fraction of Design Space Plots for Informative Comparisons between Designs”, KHURI André. I.

- (2006), **Response Surface Methodology and Related Topics**, World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., Singapore.
- ANDERSON-COOK Christine M. (2007), “Assessment of Experimental Designs”, **Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability**, John-Wiley, Chichester England.
- ANDERSON-COOK Christine M. – BORROR Connie M. – MONTGOMERY Douglas C. (2009), “Response Surface Design Evaluation and Comparison”, **Journal of Statistical Planning and Inference**, Vol. 139, pp. 629-641.
- BATMAZ İnci – TUNALI Semra (2002), “Second Order Experimental Designs for Simulation Metamodeling”, **Simulation**, Vol. 78, Issue. 12, pp. 699-715.
- BENARDOS P. G. – VOSNIAKOS G. C. (2003), “Predicting Surface Roughness in Machining: A Review”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 43, pp. 833-844.
- OZCELIK Babur – BAYRAMOGLU Mahmut (2006), “The Statistical Modeling of Surface Roughness in High-Speed Flat End Milling”, **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Vol. 46, pp. 1395-1402.
- BESTERFIELD Dale H. (2004), **Quality Control**, 7th Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey.
- BHOTE Keki R. (2002), **The Ultimate Six Sigma**, Amacom American Management Association, New York.
- BORKOWSKI John J. (1995), “Spherical Prediction - Variance Properties of Central Composite and Box-Behnken Designs”, **Technometrics**, Vol. 37, No. 4, pp. 399-410.
- BORKOWSKI John J., “Graphical Methods for Assessing the Prediction Capability of Response Surface Designs”, KHURI André. I. (2006), **Response Surface Methodology and Related Topics**, World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., Singapore.
- BORKOWSKI John, “New Variance Dispersion Graphs for Mixture Experiments” Montana State University.

<http://www.math.montana.edu/~jobo/chaam/chaam.pdf>, (25. 03. 2012).

- BOX George E. P. – DRAPER Norman R. (1987), **Empirical Model-Building and Response Surfaces**, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- BOX George E. P. – HUNTER J. Stuart – HUNTER William G. (2005), **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- BOX George E. P. – DRAPER Norman R. (2007), **Response Surfaces, Mixtures, and Ridge Analyses**, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- BOX George E. P. – WILSON K. B. (1951), “On the Experimental Attainment of Optimum Conditions”, **Journal of Royal Statistical Society**, Vol. 13, No. 1, pp. 1-45.
- BOY Mehmet – ÇİFTÇİ İbrahim – DEMİR Halil – GÜNAY Mustafa – ÖZHAN Feridun (2012), “Sertleştirilmiş Çeliklerin Sert Tornalama Yöntemi ile İşlenmesi”, **3. Ulusal Talahlı İmalat Sempozyumu**, 4-5 Ekim 2012, Ankara Türkiye.
- BOZKURT Rıdvan (2003), **Kalite Maliyetleri**, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları No: 641, Ankara.
- BOZKURT Rıdvan (2010), **Kalite İyileştirme Araç ve Yöntemleri**, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları No: 630, Ankara.
- BRUE Greg – LAUNSBY Robert G. (2003), **Design for Six Sigma**, McGraw-Hill, USA.
- BURNAK Nimetullah (1997), **Toplam Kalite Yönetimi-İstatistiksel Süreç Kontrolü**, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- CHEN Victoria C. P. – TSUI Kwok Leung – BARTON Russell R. – MECKESHEIMER Martin (2006), “A Review on Design, Modeling and Applications of Computer Experiments”, **IEE Transactions**, Vol. 38, pp. 273-291.
- CHRISTENSEN Ronald (2001), **Advanced Linear Modeling**, 2nd Edition, Springer-Verlag, New York.
- CORNELL John A. (1990), **How to Apply Response Surface Methodology**, 2nd Edition, American Society for Quality Control Statistics Division, United States of America.

- ÇAKIR M. Cemal – GÜRARDA Adem (1998) “Graphical Representation of Optimization in Multi-Pass Turning Operations”, **8<sup>th</sup> International Machine Design and Production Conference**, September 9-11, 1998 Ankara, Turkey.
- ÇAKIR M. Cemal – GÜRARDA Adem (2000) “Optimization of Machining Conditions for Multi-Tool Milling Operations”, **International Journal of Production Research**, Vol. 38 No. 15, pp. 3537-3552.
- ÇAKIR M. Cemal (2006), (çev: M. Cemal ÇAKIR), **Modern Talaşlı İmalatın Esasları** (Modern Metal Cutting), 2. Baskı, Nobel Yayın-Dağıtım, Ankara.
- ÇAKIR M. Cemal – ENSARIOGLU Cihat – DEMİRAYAK İlker (2009) “Mathematical Modeling of Surface Roughness for Evaluating the Effects of Cutting Parameters and Coating Material”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 209 Iss. 1, pp. 102-109.
- ÇAKIR M. Cemal (2010), (çev: M. Cemal ÇAKIR), **Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri**, 2. Basım, Dora Basım-Yayın-Dağıtım, Bursa.
- ÇELİKÇAPA ODMAN Feray (1993), **Toplam Kalite Kontrolü**, Busiad Yayınları No: 11, Bursa.
- ÇELİKÇAPA ODMAN Feray (2007), **Üretim Yönetimi ve Teknikleri**, Alfa Aktüel, 4. Baskı, Bursa.
- ÇÖMLEKÇİ Necla (2003), **Deney Tasarımı İlke ve Teknikleri**, Alfa Kitabevi, İstanbul.
- DAVIM Paulo J. (2001), “A Note on the Determination of Optimal Cutting Conditions for Surface Finish Obtained in Turning Using Design of Experiments”, **Journals of Materials Processing Technology**, Vol. 116, Issue 2-3, pp. 305-308.
- DAVIM Paulo J. (2007), “Machinability Evaluation in Hard Turning of Cold Work Tool Steel (D2) with Ceramic Tools Using Statistical Techniques”, **Materials and Design**, Vol. 28, pp. 1186-1191.
- DAVIM Paulo J. (2011), **Machining of Hard Materials**, Springer-Verlag, London.
- DEMİR Hulusi – GÜMÜŞOĞLU Şevkinaz (1998), **Üretim Yönetimi**, Beta Basım Yayım Dağıtım, 5. Baskı, İstanbul.

- DEMİRAYAK İlker – ÇAKIR M. Cemal (2007), “Kesme Parametreleri ve Kaplama Tabakasının İş Parçası Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, **IV. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi**, Konya.
- DESIGN EXPERT (2013). Version 8.0.7.1. Stat-Ease, Inc.
- DINGSTAD Gunvor Irene – EGELANDSDAL Bjorn – MEVIK Bjorn-Helge – FAERGESTAD Ellen Mosleth (2004), “Modelling and Optimization of Quality and Costs on Empirical Data of Hearth Bread”, **LWT Food Science and Technology**, Vol. 37, Iss. 5, pp. 527-538.
- EFİL İsmail (2010), **Toplam Kalite Yönetimi**, Dora Yayınları, Bursa.
- EKINOVIC S. – DOLINSEK S. – BEGOVIC E. (2005), “Machinability of 90MnCrV8 Steel During High-Speed Machining”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 162-163, pp. 603-608.
- EKMAN Claes (1994), A Note on Rotatability, Göteborg University Research Report 1994: 10 ISSN 0349-8034.
- ERBAŞ Semra Oral – OLMUŞ Hülya (2006), **Deney Düzenleri**, Gazi Kitabevi, Ankara.
- ERTUĞRUL İrfan (2006), **Toplam Kalite Kontrol**, 2. Baskı, Ekin Kitabevi, Bursa.
- FEIGENBAUM Armand V. (1991), **Total Quality Control**, McGraw-Hill, 3th Edition, Singapore.
- FREUND Rudolf J. – WILSON William J. (1998), **Regression Analysis, Statistical Modeling of a Response Variable**, Academic Press, San Diego.
- GAITONDE V. N. – KARNIK S. R. – FIGUEIRA Luis – DAVIM J. Paulo (2009), “Analysis of Machinability During Hard Turning of Cold Work Tool Steel (Type: AISI D2)” **Materials and Manufacturing Processes**, Vol. 24, pp. 1373-1382.
- GERBER S. Alan – GREEN P. Donald (2000), “The Effects of Canvassing, Telephone Calls, and Direct mail on Voter Turnout: A Field Experiment”, **American Political Science Review**, Vol. 94, No. 3, pp. 653-663.

- GIOVANNITTI-JENSEN A. – MYERS Raymond H. (1989), “Graphical Assessment of the Prediction Capability of Response Surface Design”, **Technometrics**, Vol. 31, No. 2, pp. 159-171.
- GIUNTA Anthony A. – WOJTKIEWICZ Steven F. – ELDRED Michael S. (2003), “Overview of Modern Design of Experiments Methods for Computational Simulations”, **41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit**, Reno, Nevada, Jan 6-9, 2003, AIAA 2003-0649.
- GOLDFARB Heidi B. – BORROR Connie M. – MONTGOMERY Douglas C. – ANDERSON-COOK Christine M. (2004a). “Three-Dimensional Variance Dispersion Graphs for Mixture-Process Experiments”, **Journal of Quality Technology**, Vol. 36, No. 1, pp. 109-124.
- GOLDFARB Heidi B. – ANDERSON-COOK Christine M. – BORROR Connie M. – MONTGOMERY Douglas C. (2004b). “Fraction of Design Space Plots for Assessing Mixture and Mixture-Process Designs”, **Journal of Quality Technology**, Vol. 36, No. 2, pp. 169-179.
- GOLDFARB Heidi B. – MONTGOMERY Douglas C., “Graphical Methods for Comparing Response Surface Designs for Experiments with Mixture Components”, KHURI André. I. (2006), **Response Surface Methodology and Related Topics**, World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., Singapore.
- GOOS Peter – JONES Bradley (2011), **Optimal Design of Experiments: A Case Study Approach**, John Wiley & Sons, Inc, Great Britain.
- GRYNA Frank M. (2001), **Quality Planning and Analysis**, McGraw-Hill, 4th Edition, New York.
- GRYNA Frank M. – CHUA Richard C. H. – DEFEO Joseph A. (2007), **Juran’s Quality Planning and Analysis**, McGraw-Hill, 5th Edition, Singapore.
- GÜRSAKAL Necmi (2001), **Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri**, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa.
- GÜRSAKAL Necmi (2005), **Altı Sigma Müşteri Odaklı Yönetim**, Nobel Yayın Dağıtım, Bursa.

- GÜRSAKAL Necmi (2010), **Betimsel İstatistik**, Dora Yayın Dağıtım, Bursa.
- GÜRSAKAL Necmi (2010), **Deney Tasarımı**, Yayınlanmamış Ders Notları, Bursa.
- GÜRSAKAL Necmi (2013), **Büyük Veri**, Dora Basım-Yayın-Dağıtım, Bursa.
- HICKS Charles R., çev: Z. Muluk, Ö. Toktamış, . Karaağaoğlu, S. Kurt (1994), **Deney Düzenlemede İstatistiksel Yöntemler**, Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir.
- HILL William J. – HUNTER William G. (1966), “A Review of Response Surface Methodology: A Literature Survey”, **Technometrics**, Vol. 8, No. 4, pp. 571-590.
- ISHIKAWA Kaoru (1997), **Toplam Kalite Kontrol**, Yayına Hazırlayanlar: Semih Ordaş ve Nedret Yayla, KalDer Yayınları No: 7.
- İŞİĞİÇOK Erkan (2004), **Toplam Kalite Yönetimi Bakış Açısıyla İstatistiksel Kalite Kontrol**, Ezgi Kitabevi Yayınları, Bursa.
- İŞİĞİÇOK Erkan (2011), **Altı Sigma Kara Kuşaklar İçin Hipotez Testleri Yol Haritası**, Marmara Kitabevi Yayınları, Bursa.
- JEANG A. – LI Huan-Chung – WANG Yi-Chi (2010), “A Computational Simulation Approach for Optimising Process Parameters in Cutting Operations” **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, Vol. 23, No. 4, pp. 325-340.
- JEANG A. (2011), “Robust Cutting Parameters Optimization for Production Time via Computer Experiment” **Applied Mathematical Modelling**, Vol. 35, Issue 3, pp. 1354-1362.
- JURAN J. M. – SEDER Leonard A. – GRZYNA Frank M. (1962), **Quality Control Handbook**, McGraw-Hill, United States of America.
- JURAN J. M. – GRZYNA Frank M. (1993), **Quality Planning and Analysis**, 3th Edition, McGraw-Hill, Inc., New York.
- KADIRGAMA K. – NOOR M. M. – RAHMAN M. M. – REJAB M. R. M. – HARON C. H. C. – ABOU-EL-HOSSEIN K. A. (2009), “Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminium Alloy Machining Using Statistical Method”, **European Journal of Scientific Research**, Vol. 25, No. 2, pp. 250-256.



- KAHRAMAN F. (2009), “The Use of Response Surface Methodology for Prediction and Analysis of Surface Roughness of AISI 4140 Steel”, **Materials and Technology**, Vol. 43, No. 5, pp. 267–270.
- KAYE Jiju Antony Mike – FRANGOUE Andreas (1998), “A Strategic Methodology to The Use of Advanced Statistical Quality Improvement Techniques”, **The TQM Magazine**, Vol. 10, Iss. 3, pp. 169–176.
- KHURI André. I. (2006), **Response Surface Methodology and Related Topics**, World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., Singapore.
- KHURI André I. — KIM Hyuk Joo — UM Yonghwan (1996), “Quantile Plots of the Prediction Variance for Response Surface Design”, **Computational Statistics & Data Analysis**, Vol. 22, Issue 4, pp. 395-407.
- KHURI André I. — HARRISON Jay M. — CORNELL John A. (1999), “Using Quantile Plots of the Prediction Variance for Comparing Designs for a Constrained Mixture Region: An Application Involving a Fertilizer Experiment”, **Applied Statistics**, Vol. 48, Issue 4, pp. 521-532.
- KHURI André I. — MUKHOPADHYAY Siuli (2010), “Response Surface Methodology”, **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, Vol. 2, No. 2, pp. 128-149.
- KLEIJNEN Jack P. J. – SARGENT Robert G. (2000). “A Methodology for Fitting Metamodels in Simulation”, **European Journal of Operational Research**, Vol. 120, pp. 14-29.
- KLEIJNEN Jack P. J. (2008). “Design and Analysis of Simulation Experiments”, Springer Springer Science + Business Media.
- KOBU Bülent (1981), **Endüstriyel Kalite Kontrolü**, İstanbul Üniversitesi Yayınları No: 2763.
- LAW Averill M. – KELTON David W. (2000), **Simulation Modeling and Analysis**, 3th Edition, McGraw-Hill, New York.
- LAWSON John (2012), “Vdgraph: A Package for Creating Variance Dispersion Graphs”, **The R Journal**, Vol. 4, No. 1, pp. 41-44.

- LIANG Li (2005), Graphical Tools Incorporating Cost and Optimizing Central Composite Designs for Split-Plot Response Surface Methodology Experiment, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University (PhD Thesis), Blacksburg Virginia.
- LIANG Li – ANDERSON-COOK Christine M. – ROBINSON Timothy J. – MYERS Raymond H. (2006). “Three-Dimensional Variance Dispersion Graphs For Split-Plot Designs”. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, Vol. 15, No. 4, pp. 757-778.
- LI Jiahong – LIANG Li – BORROR Connie M. – COOK Christine Anderson – MONTGOMERY Douglas C. (2009), “Graphical Summaries to Compare Prediction Variance Performance for Variations of the Central Composite Design for 6 to 10 Factors”, **Quality Technology Quantitative Management**, Vol. 6, No. 4, pp. 433-449.
- MASON Robert L. – GUNST Richard F. – HESS James L. (2003), **Statistical Design and Analysis of Experiment**, 2th Edition, John Wiley & Sons Publication, New York.
- MATHEWS Paul (2005), **Design of Experiments with Minitab**, ASQ Press, USA.
- MONTGOMERY Douglas C. (1992), “The Use of Process Control and Design of Experiments in Product and Process Improvement”, **IEE Transactions**, Vol. 24, No. 5, pp. 4-17.
- MONTGOMERY Douglas C. (2001a), **Introduction to Statistical Quality Control**, 4th Edition John Wiley & Sons, Inc., New York.
- MONTGOMERY Douglas C. (2001b), **Design and Analysis of Experiment**, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- MONTGOMERY Douglas C. – RUNGER George C. (2003), **Applied Statistics and Probability for Engineers**, 3th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- MORRIS Max (2011), **Design of Experiments: An Introduction Based on Linear Models**, Chapman & Hall/CRC, Unites States of America.

- MUKHERJEE Indrajit – RAY Pradip Kumar (2006), “A Review of Optimization Techniques in Metal Cutting Processes”, **Computers & Industrial Engineering**, Vol. 50, pp. 15-34.
- MURAT Dilek, GÖNEN Demet, KARAOĞLAN A. Deniz, ORAL Ali, GÜRSAKAL Necmi ve ÇAKIR M. Cemal, (2012), “Sert Malzeme Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğü – Takım Ömrü - İşleme Parametreleri İlişkisinin Tepki Yüzeyi Metoduyla Modellenmesi”, **The 15 th International Conference on Machine Design and Production**, June 19-22 2012, METU-MATIMAREN, Pamukkale, Denizli, Turkey.
- MYERS Raymond H. – KHURI Andre I. – CARTER Walter H. (1989), “Response Surface Methodology: 1966-1988”, **Technometrics**, Vol. 31, No. 2, pp. 137-157.
- MYERS Raymond H. – VINING Geoffrey G. – JENSEN Ann Giovannitti – MYERS Sharon L. (1992), “Variance Dispersion Properties of Second Order Response Surface Designs”, **Journal of Quality Technology**, Vol. 24, No. 1, pp. 1-11.
- MYERS Raymond H. – MONTGOMERY Douglas C. (2002), **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- MYERS Raymond H. – MONTGOMERY Douglas C. –VINING G. Geoffrey – BORROR Connie M. – KOWALSKI Scott M. (2004), “Response Surface Methodology: A Retrospective and Literature Survey”, **Journal of Quality Technology**, Vol. 36, No. 1, pp. 53-77.
- MYERS Raymond H. – MONTGOMERY Douglas C. – ANDERSON-COOK Christine M. (2009), **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**, 3th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- NEDDERMEIJER H: Gonda – OORTMARSSSEN Gerrit J. – PIERSMA Nanda – DEKKER Romert (2000), “A Framework for Response Surface Methodology for Simulation Optimization”, **Proceeding of the 2000 Winter Simulation Conference**, Vol. 1, pp. 129-136.

- NEŞELİ Süleyman – YALDIZ Süleyman – TÜRKEŞ Erol (2011), “Optimization of Tool Geometry Parameters for Turning Operations Based on Response Surface Methodology”, **Measurement**, Vol. 44, pp. 580-587.
- OZCELIK Babur – BAYRAMOGLU Mahmut (2006), “The Statistical Modeling of Surface Roughness in High-Speed Flat End Milling”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 46, pp. 1395-1402.
- ÖZDAMAR Kazım (2005), *Deneyler*, Anadolu Üniversitesi Yayınları.  
<https://www.anadolu.edu.tr/aos/kitap/IOLTP/2294/unite04.pdf>, (13.08.2012).
- ÖZLER Cenk (1997), *Cevap Yüzeyi Yöntemlerinin Süreç İyileştirme Amacı ile Kullanılması Üzerine Bir Araştırma*, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü (Yayımlanmamış Doktora Tezi), İzmir.
- ÖZTÜRK Ahmet (2009), **Kalite Yönetimi ve Planlaması**, Ekin Basım Yayın Dağıtım, Bursa.
- PARK You-Jin – RICHARDSON Diane E. – MONTGOMERY Douglas C. – OZOL-GODFREY Ayca – BORROR Connie M. – ANDERSON-COOK Christine M. (2005), “Prediction Variance Properties of Second-Order Response Surface Designs for Cuboidal Regions”, **Journal of Quality Technology**, Vol. 37, No. 4, pp. 253-266.
- PIEPEL Greg F. “50 Years of Mixture Experiment Research: 1955-2004”, KHURI André I. (2006), **Response Surface Methodology and Related Topics**, World Scientific Publishing Co, Pte. Ltd., Singapore.
- PYZDEK Thomas (2001), **The Six Sigma Handbook**, McGraw-Hill, Inc., New York.
- RAJA V. Prabhu – RAMU M. – THYLA P. R. – GUNASEELAN M. (2011). “Application of Metamodel Based on Classical and Space Filling Experimental Design in Design Optimization”, **International Journal of Engineering**, Vol. 9, Issue 2, pp. 229-232.
- ROBINSON Kevin S. – KHURI André I. (2003). “Quantile Dispersion Graphs for Evaluating and Comparing Designs for Logistics Regression Models”, **Computational Statistics & Data Analysis**, Vol. 43, Issue 1, pp. 47-62.

- ROY Ranjit K. (2001), **Design of Experiments Using the Taguchi Approach**, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- SAHOO P. – BARMAN T. K. – ROUTARA B. C. “Taguchi Based Fractal Dimension Modeling of Surface Profile and Optimization in Cylindrical Grinding”, DAVIM Paulo J. – JACKSON Mark J. (2011a), **Manufacturing Technology Research**, Nova Science Publishers Inc., New York.
- SAHOO P. – ROUTARA B. C. – BARMAN T. K. – BANDYOPADHYAY A. “Grey-Based Taguchi Analysis for Optimization in CNC Turning of Different Materials with Multiple Roughness Characteristics”, DAVIM Paulo J. – JACKSON Mark J. (2011b), **Manufacturing Technology Research**, Nova Science Publishers Inc., New York.
- SANTNER Thomas J. – WILLIAMS Brian J. – NOTZ William I. (2003), **The Design and Analysis of Computer Experiments**, Springer-Verlag, New York.
- SEEMAN M. – GANESAN G. – KARTHIKEYAN R. – VELAYUDHAM A. (2010) “Study on Tool Wear and Surface Roughness in Machining of Particulate Aluminum Metal Matrix Composite-Response Surface Methodology Approach”, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 48, pp. 613–624.
- SIEBEN Benedikt – WAGNER Tobias – BIERMANN Dirk (2010), “Empirical Modeling of Hard Turning of AISI 6150 Steel Using Design and Analysis of Computer Experiments” **Production Engineering Research and Development**, Vol. 4, pp. 115-125.
- SINGH Nanua (1996), **System Approach to Computer-Integrated Design and Manufacturing**, John and Wiley, USA.
- SINGH H. – KUMAR P. (2007), “Mathematical Models of Tool Life Surface Roughness for Turning Operation Through Response Surface Methodology”, **Journal of Scientific & Industrial Research**, Vol. 66, pp 220-226.
- SIVASAKTHIVEL P. S. – VEL MURUGAN V. – SUDHAKARAN R. (2010), “Prediction of Tool Wear from Machining Parameters by Response Surface

Methodology in End Milling” **International Journal of Engineering Science and Technology**, Vol. 2, pp. 1780-1789.

SURESH P. V. S. – VENKATESWARA P. Rao – DESHMUKH S. G. (2002), “A Genetic Algorithmic Approach for Optimization of Surface Roughness Prediction Models”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Vol. 42, Iss. 6, pp. 675-680.

ŞAHİN Yusuf (2003), **Talaş Kaldırma Prensipleri**, Gazi Kitapevi, Ankara.

ŞAHİN Yusuf – MOTORCU Ali Rıza (2008), “The Development of Surface Roughness Model When Turning Hardened Steel with Ceramic Cutting Tool Using Response Methodology”, **Multidiscipline Modeling in Materials and Structures**, Vol. 4, Iss. 3, pp. 291–304.

ŞENOĞLU Birdal – ACITAŞ Şükrü (2011), **İstatistiksel Deney Tasarımı**, 2. Basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.

ŞİRVANCI Mete (1997), **Kalite İçin Deney Tasarımı**, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

TRINCA Luzia A. – GILMOUR Steven G. (1998), “Variance Dispersion Graphs for Comparing Blocked Response Surface Designs”, **Journal of Quality Technology**, Vol. 30, No. 4, pp. 314-327.

TRINCA Luzia A. – GILMOUR Steven G. (1999), “Difference Variance Dispersion Graphs for Comparing Response Surface Designs with Applications in Food Technology”, **Journal of the Royal Statistical Society; Series C (Applied Statistics)**, Vol. 48, No. 4, pp. 441-455.

TUNALI Semra – BATMAZ İnci (2003), “A Metamodeling Methodology Involving Both Qualitative and Quantitative Input Factors”, **European Journal of Operational Research**, Vol. 150, pp. 437-450.

WHITCOMB Pat (2008), “FDS–A Power Tool for Designers of Optimization Experiments”, [www.statease.com](http://www.statease.com), 18.03.2013.

WILSON Perez Mario (1999), **Six Sigma**-Understanding The Concepts, Implications and Challenges, Advanced System Consultants, U.S.A.

- WU S. M. (1964a), “Tool-Life Testing by Response Surface Methodology” – Part 1, **Journal of Engineering for Industry**, A. S. M. E. Transactions, Ser. B, pp. 105-110.
- WU S. M. (1964b), “Tool-Life Testing by Response Surface Methodology” – Part 2, **Journal of Engineering for Industry**, A. S. M. E. Transactions, Ser. B, pp. 111-116.
- WU S. M. – MEYER R. N. (1964a), “Cutting-Tool Temperature-Predicting Equation by Response Surface Methodology”, **Journal of Engineering for Industry**, A. S. M. E. Transactions, Ser. B, pp. 150-156.
- WU S. M. – MEYER R. N. (1964b), “A First-Order Five-Variable Cutting-Tool Temperature Equation and Chip Equivalent”, **Journal of Engineering for Industry**, A. S. M. E. Transactions, Ser. B, pp. 395-400.
- WU C. F. Jeff – HAMADA Michael S. (2009), **Experiments: Planning, Analysis, and Optimization**, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.
- YAMAK Oygur (1998), **Kalite Odaklı Yönetim**, Panel Matbaacılık, İstanbul.
- ZAHRAN Alyaa – ANDERSON-COOK Christine M. – MYERS Raymond H. (2003), “Fraction of Design Space to Assess Prediction Capability of Response Surface Designs”. **Journal of Quality Technology**, Vol. 35, No. 4, pp. 377-386.
- [www.itl.nist.gov](http://www.itl.nist.gov), 08.08.2012.
- [www.sixsigmaonline.org](http://www.sixsigmaonline.org), 29.10.2013.
- [www.asq.org](http://www.asq.org), 29.10.2013.

## ÖZGEÇMİŞ

<b>Adı, Soyadı</b>	Dilek		MURAT
<b>Doğum Yeri ve Yılı</b>	Yozgat		09.07.1980
<b>Bildiği Yabancı Diller</b>	İngilizce		
<b>ve Düzeyi</b>	İyi		
<b>Eğitim Durumu</b>	<b>Başlama - Bitirme Yılı</b>		<b>Kurum Adı</b>
<b>Lise</b>	1994	1997	İstiklal Lisesi
<b>Lisans</b>	1999	2003	Uludağ Üniversitesi İ.İ.B.F. Ekonometri Bölümü
<b>Yüksek Lisans</b>	2003	2006	Uludağ Üniversitesi S.B.E. Ekonometri A.B.D.
<b>Doktora</b>	2007	2013	Uludağ Üniversitesi S.B.E. Ekonometri A.B.D.
<b>Çalıştığı Kurum (lar)</b>	<b>Başlama - Ayrılma Yılı</b>		<b>Çalışılan Kurumun Adı</b>
<b>1.</b>	2006	—	Uludağ Üniversitesi İ.İ.B.F. Ekonometri Bölümü
<b>2.</b>			
<b>3.</b>			
<b>Üye Olduğu Bilimsel ve Mesleki Kuruluşlar</b>			
<b>Katıldığı Proje ve Toplantılar</b>	- MURAT Dilek, GONEN Demet, KARAOĞLAN A. Deniz, ORAL Ali, GURSAKAL Necmi ve ÇAKIR M. Cemal, Sert Malzeme Tornalama İşlemlerinde Yüzey Pürüzlülüğü – Takım Ömrü - İşleme Parametreleri İlişkisinin Tepki Yüzeyi Metoduyla Modellenmesi, The 15th International Conference on Machine Design and Production, June 19-22 2012, METU-MATIMAREN, Pamukkale, Denizli, Turkey.		
<b>Yayımlar:</b>			
<b>Diğer:</b>			
<b>İletişim (e-posta):</b>	dilekm@uludag.edu.tr		
	<b>Tarih</b>	<b>İmza</b>	
		<b>Adı Soyadı</b>	Dilek MURAT