

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

MÜHENDİSLER İÇİN İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMINDA HAZIRLIK  
AŞAMASI

ESRA KUMAŞ

HAZİRAN 2011

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı** ESRA KUMAŞ tarafından hazırlanan MÜHENDİSLER İÇİN İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMINDA HAZIRLIK AŞAMASI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. BURAK BİRGÖREN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. BURAK BİRGÖREN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr.Burak BİRGÖREN .....

Üye (Danışman) : Yrd.Doç.Dr.Süleyman ERSÖZ .....

Üye : Yrd.Doç.Dr.Mustafa YÜZÜKIRMIZI .....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

30/06/2011

Prof. Dr. İHSAN ULUER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### MÜHENDİSLER İÇİN İSTATİSTİKSEL DENEY TASARIMINDA HAZIRLIK AŞAMASI

KUMAŞ, Esra

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

Haziran 2011, 107 sayfa

Bu çalışmada endüstri uygulamalarında herhangi bir ürün veya sürecin geliştirilmesi amacıyla uygulanan deney tasarımı tekniklerinin mühendislik çalışmaları açısından önemine, uygulamadaki faydalarına değinilmiş ve deney tasarımında nasıl bir yol haritası izleneceği belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada, ürün üzerinde etkisi olduğu düşünülen faktörlerin etkilerinin ve birbirleriyle olan etkileşimlerinin tahmin edilmesine olanak sağlayan oldukça etkili deney düzenleri olan faktöriyel deneylerin tasarım düzenlerinin nasıl elde edildiği, tasarımın nasıl gerçekleştiği, tasarım noktasında nelere dikkat edilmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Tez dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; tezin amacı ortaya konulmuş ve deney tasarımı konusunda yapılmış olan çalışmalar irdelenmiştir. İkinci bölümde; deney tasarımı ile ilgili genel bilgilere yer verilmiş, deney tasarımının maliyetle olan ilişkisi incelenmiş, deney tasarımında mühendislik deneyiminin önemi vurgulanmıştır. Bu bölümde ayrıca deney uygulamacısının dikkat etmesi gereken önemli noktalara ve uygulamada en çok yapılan yanlışlara değinilmiştir.

Üçüncü bölümde ise faktöriyel deney tasarımlarının nasıl elde edildiği anlatılmıştır. Bu bölümde 2 düzeyli tam ve kesirli faktöriyel deneylerin, 3 düzeyli merkezi kompozit tasarımların ve doymuş tasarımların nasıl oluşturulacağı ortaya konulmuştur. Ayrıca tasarımlarda elde edilen veriler içerisinde ortaya çıkan aykırı/sapan değerlerin bulunması ve değerlendirilmesi de bu bölümde anlatılmıştır.

Dördüncü bölüm olan sonuç bölümünde ise tezle elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deney Tasarımı, Faktöriyel Deneyler, Kalite Mühendisliği, Merkezi Kompozit Tasarımlar

## **ABSTRACT**

### **PREPARATION STAGE FOR ENGINEERS WORKING ON STATISTICAL EXPERIMENT DESIGN**

KUMAŞ, Esra

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Engineering, M.Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

June 2011, 107 pages

At this study, for the purpose of developing a product or process in industrial applications, the importance of experiment design techniques applied to engineering studies, the benefit of implementing it has been mentioned and a roadmap on the experiment design has been specified.

At this study, the factors that are thought to have an impact on the product and the effective experiment order that makes it possible to guess the interaction between themselves, which is how factorial experiment design orders have been attained, how the design was realized and what needs to be considered from a design perspective – has been explained.

The thesis consists of four parts. At first part; the aim of the thesis has been explained and the research done on experiment design has been examined. At second part; general information on experiment design has been given, the relationship between experiment design and cost has been studied, the importance of engineering experience on experiment design has been emphasized. Also at this section, the points a experiment practitioner should be cautious about and the most made mistakes have been mentioned.

At the third chapter, factorial experiment designs have been explained. At this section, the way to form; 2 level positive and fractional factorial experiments, 3 level central composite designs and saturated designs have been explained. Also, finding the contrary values from within the values found from the designs and evaluation of these values have been explained in this chapter.

At the fourth chapter which is the conclusion chapter, the results of the thesis has been shown.

**Key Words:** Design Experiment, Factorial Experiments, Quality Engineering, Central Composite Designs

## TEŐEKKÖR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen, tez konusu hakkında ufkumu açan ve büyük bilgi birikimiyle bana yol gösteren, tez yöneticisi hocam, Sayın Prof. Dr. Burak BİRGÖREN' e, bana destek olan sevgili eşime, birçok konuda olduğu gibi, tezimi hazırlamam esnasında da yardımlarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	x
<b>SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Tezin Amacı .....	1
1.2. Literatür Taraması .....	3
<b>2. DENEY TASARIMI</b> .....	8
2.1. Deney Tasarımı ve Maliyet İlişkisi .....	10
2.2. Deney Tasarımında Mühendislik Deneyimi .....	15
2.3. Düzeylerin Seçimi .....	19
2.4. Robust Tasarım .....	21
2.5. Deney Tasarım Türleri .....	23
2.6. Deney Tasarımında Önemli Noktalar .....	25
2.6.1. Deney Tasarımında En Çok Yapılan Yanlışlar .....	26
2.6.2. Deneyin Başlangıcında Düşünülmesi Gereken Noktalar .....	27
2.6.3. Fikirlerin Geliştirilmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar .....	28
2.6.4. Deney Tasarımının Oluşturulmasında Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar .....	28
2.6.5. Deneyin Yürütülmesi Aşamasında Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar .....	29
<b>3. DENEYLERİN TASARLANMASI</b> .....	30
3.1. Faktöriyel Deney Tasarımları .....	30
3.2. Tam Faktöriyel Deney Tasarımları .....	30
3.2.1. 2 <sup>2</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımları .....	31
3.2.2. 2 <sup>3</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımları .....	41



3.2.2.1. Tasarım Matrisi Yöntemi.....	44
3.2.2.2. Tahmin Değerlerinin Hesaplanması .....	49
3.2.3. 2 <sup>4</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımları.....	50
3.2.3.1. Yarı-Normal Çizim.....	53
3.3. Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımları.....	54
3.3.1. Kesirli Tasarım Elde Etmek.....	55
3.3.2. ½ (2 <sup>4</sup> ) Kesirli Faktöriyel Deneylerin Tasarımı.....	59
3.4. Doymuş Tasarımlar.....	68
3.5. Merkezi Kompozit Tasarımlar .....	78
3.5.1. Varyasyonun Tahmini.....	80
3.5.2. Etkilerin Tahmini.....	81
3.5.3. Çoklu Regresyon Kullanımı.....	83
3.5.4. Tasarımın 2. Aşaması.....	85
3.6. Aykırı Değerler.....	91
<b>4. SONUÇLAR .....</b>	<b>96</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>98</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>103</b>
EK.1. T Testi Çizelgesi.....	103
EK.2. F Testi Çizelgesi .....	104
EK.3. Tek Bir Aykırı Değer İçin Grubbs Testi.....	105
EK.4. Biri Düşük Diğeri Yüksek İki Uç Gözlem Değeri İçin Aykırılık Testi.....	106
EK.5. Her İkisi de Düşük Veya Her İkisi de Yüksek İki Uç Değer İçin Aykırılık Testi.....	107

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

	<u>Sayfa</u>
3.1. Baz yağı türüne göre ortalama yakıt tasarrufu .....	32
3.2. Sürtünme düzenleyicisinin oranına göre ortalama yakıt tasarrufu.....	33
3.3. Basit bir faktöriyel deney tasarımı .....	36
3.4. 2 <sup>2</sup> Faktöriyel Deneyin Ortalama Yakıt Tasarrufuna Ait Sonuçları .....	36
3.5. Satır, sütun ve hücre ortalamaları.....	37
3.6. Hücre ve köşegen ortalamaları.....	38
3.7. Hücre standart sapması .....	39
3.8. Faktörler ve Faktör Düzeyleri .....	42
3.9. Faktör Düzeyleri İçin Deney Sonuçları.....	43
3.10. B ve C Faktörleri İçin Deney Kombinasyonlarına Ait Sonuçlar .....	44
3.11. 2 <sup>3</sup> Deneyler İçin Tasarım ve Sonuçlar .....	44
3.12. 2 <sup>3</sup> Deneyler İçin Standart Tasarım Matrisi Düzeni .....	45
3.13. AB Etkileşimi İçin Tasarım Matrisi.....	46
3.14. 2 <sup>3</sup> Deneyler İçin Matris Analizi.....	47
3.15. Etki ve Etkileşim Tahminleri ve Güven Aralıkları .....	48
3.16. L <sub>8</sub> Tasarım Matrisi .....	49
3.17. Tahmin Değerleri ve Artıklar.....	50
3.18. 2 <sup>4</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımı .....	51
3.19. 2 <sup>4</sup> Deneyi İçin Tahmini Etkiler .....	52
3.20. L <sub>16</sub> Deney Deseni .....	52
3.21. 2 <sup>3</sup> Kesirli Deneyler İçin Üç Yönlü Tablo.....	56
3.22. ½ (2 <sup>3</sup> ) Kesirli Deneyler İçin Matris Analizi.....	56
3.23. ½ (2 <sup>3</sup> ) Kesirli Deneyler İçin 2. Matris Analizi.....	57
3.24. 2 <sup>3</sup> Kesirli Deneyler İçin 2. Üç Yönlü Tablo.....	57
3.25. ½ (2 <sup>3</sup> ) Kesirli Deneyler İçin 3. Matris Analizi.....	59
3.26. 2 <sup>3</sup> Kesirli Deneyler İçin 3. Üç Yönlü Tablo.....	59
3.27. ½ (2 <sup>4</sup> ) Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımı ve Elde Edilen Sonuçlar .....	61
3.28. ½ (2 <sup>4</sup> ) Kesirli Faktöriyel Deney Tasarım Matrisinden Elde Edilen Etkilerin Tahminleri.....	62

3.29. A ve B faktörlerinin Seviyeleri İçin Ortalama Süreler.....	63
3.30. $\frac{1}{2}$ ( $2^3$ ) Kesirli Faktöriyel Deneyle İçin Tasarım Matrisi.....	64
3.31. $\frac{1}{2}$ ( $2^4$ ) Kesirli Faktöriyel İçin Tasarım Matrisi .....	64
3.32. $\frac{1}{2}$ ( $2^5$ ) Kesirli Deneyle Tasarım Matrisi.....	65
3.33. $\frac{1}{4}$ ( $2^5$ ) Kesirli Deneyle Tasarım Matrisi .....	66
3.34. $\frac{1}{4}$ ( $2^6$ ) Kesirli Deneyle Tasarım Matrisi .....	66
3.35. $2^7$ Deneyle İçin Gerçekleştirilebilecek Deneyle Tasarım Türleri .....	67
3.36. Yakıt Formülasyonları ve Bunlara Ait Yakıt Tüketimi Sonuçları.....	69
3.37. 12 Deneyle İçin Tasarım Matrisi .....	70
3.38. Etki Tahminleri .....	71
3.39. Artık Sütunlara Ait Sonuçlar.....	71
3.40. 16 denemeli Plackett Burman Tasarımı .....	74
3.41. 16 denemeli Plackett Burman Tasarımında Kalan Sütunlar .....	75
3.42. Etki Tahminleri .....	75
3.43. Önemli Etkiler İçin Yeni Spesifikasyon Değerlerinin Belirlenmesi.....	76
3.44. Plackett Burman Deneyle Tasarımının Oluşturulması .....	78
3.45. Tasarımın 1. Aşamasının Sonuçları .....	80
3.46. Ana Etki ve Etkileşimler .....	82
3.47. Tasarım İçin Korelasyon Matrisi .....	83
3.48. Tasarımın Tam Sonuçları.....	86
3.49. Korelasyon Matrisi.....	87
3.50. Standart Merkezi Kompozit Tasarım Setleri.....	90
3.51. Nitrozamin Değerleri .....	92
3.52. Aykırı Değerlerle İlgili Bazı Testler .....	95

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sebep-Sonuç Diyagramı.....	18
2.2. Hata Dağılımını Gösteren Pareto Analizi .....	19
3.1. Deneilerin 1. Ve 2. Aşamalarına Ait Veriler.....	34
3.2. Sürtünme Katsayısı ve Baz Yağ Türünün Yakıt Tasarrufu İle İlişkisi .....	35
3.3. Yarı-Normal Çizim .....	53
3.4. $\frac{1}{2}$ ( $2^4$ ) Deney Tasarımı İçin Yarı-Normal Çizim .....	62
3.5. Yarı-Normal Çizim .....	73
3.6. Tasarım ve Tasarımın1. Aşama Sonuçları .....	80
3.7. İkinci Dereceden $s$ Terimi İle Kontur Diyagramı .....	84
3.8. İkinci Dereceden $h$ Terimi İle Kontur Diyagramı.....	84
3.9. Tam Merkezi Kompozit Tasarım .....	86
3.10. İki Aşamalı Tahmin Denklemi İçin Kontur Diyagramı.....	89
3.11. Nitrozamin Değerleri İçin Çizelge.....	92
3.12. Normal Dağılımlı Veri İçin Histogram.....	93
3.13. Eğik Dağılımlı Veriler İçin Histogram .....	94

## KISALTMALAR DİZİNİ

RSD	Artık Standart Sapması
SD	Serbestlik Derecesi
S/N	Sinyal/Gürültü

# 1. GİRİŞ

## 1.1. TEZİN AMACI

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından sonra gümrük oranlarının azaltılması, korumacılığın kısmen kaldırılması, uluslar arası ticaretin yaygınlaşarak yabancı sermayelerin yerli pazarlarda dolaşma imkanına kavuşması, ekonomilerin liberalleşmesi gibi birçok gelişme ülkelerin pazar yapısını önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu değişimle beraber birçok şirket sahip oldukları pazarda yeni güçlü rakipleriyle karşı karşıya gelmişlerdir. Globalleşmenin bir sonucu olan yeni pazar yapısında şirketleri en çok zorlayan ve mevcut durumlarıyla pazarda kalmalarına müsaade etmeyen kavram ise rekabet olmuştur. Rekabetin sertleşmesi sonucu şirketler ayakta kalabilmek için üretimlerini dış pazarın standartlarına uygun hale getirmek zorunda kalmışlardır.

Üretimde teknolojik gelişmelerin henüz yaşanmadığı 1960' lı yıllarda pazarda rekabet edebilmenin en önemli unsuru kitle üretimken, 1970' lerde teknolojinin ilerlemesiyle düşük maliyetli üretim olmuştur. Bu dönemde pazarın hakimi üretim maliyetlerini azaltarak ürünlerini daha ucuza satan şirketler olmuştur. Bu dönemde yaşanan iki gelişme 1980'li yıllarda rekabetin pazardaki ibresini "kalite"ye çevirmiştir. Bu gelişmelerden birincisi şirketlerin ucuz ürün üretmek için müşteri isteklerini gözardı edip ucuza kaçarak kalitesiz ürün üretmeleri olmuştur ki bu şirketlerin pazardan silindiklerini görüyoruz. İkinci gelişme ise şirketlerin ürünlerini kaliteli fakat daha ucuza üretebilmek için maliyetleri azaltma yöntemlerini geliştirmeleri olmuştur. Kalite bazlı rekabette maliyet ögesi ikame edilmemiş, aksine yüksek kalite düşük maliyet birarada istenmiştir. Böylelikle 1980' li yıllarda pazarda bol, ucuz ve kaliteli ürün üreten şirketler söz sahibi olmuşlardır. 1990' lı yıllarda ise pazarda çeşitli farklı fonksiyonları içeren ürünler ve bu ürünleri en hızlı pazara ulaştıran şirketler rekabette öne geçmişlerdir (Kavrakoğlu, 1998).

Günümüzün sanayi ve ticaret dünyasına baktığımızda geçmişten bugüne gelen güçlü şirketlerin klasik yönetim yerine toplam kalite yönetimi felsefesini uyguladıkları

aşıkardır. İşletmelerin en önemli amacı hiç kuşkusuz ki kar elde etmektir. Bir işletme için karı en basit anlamıyla satış ile maliyet arasındaki fark olarak ifade etmek mümkündür. Satış fiyatı ile maliyet fiyatı arasındaki fark ne kadar büyük olursa kar o kadar büyük olacaktır. Küreselleşen dünyada rekabetin gücü işletmelerin ürünlerine biçtikleri satış fiyatını piyasa normallerinin üzerine çıkardıklarında piyasadan zamanla silinmelerine yol açmaktadır. Satış fiyatını belli bir düzeyin üzerine çıkaramayan işletmeler, karlarını artırmak için maliyetleri azaltma yoluna gitmek zorunda kalmışlardır. İşletmelerin burada karşılaşacakları en önemli tehlike, maliyetleri azaltırken kaliteyi ihmal etmeleri olacaktır. Halbuki, toplam kalite yönetiminin en önemli prensibi olan önlemeye dönük yaklaşım, kaliteyi artırırken maliyetleri azaltmayı hedeflemektedir. Önlemeye dönük yaklaşım prensibi; bir ürünün üretimi esnasında meydana gelecek hataları olmadan önleyerek hata maliyetlerini düşürmeyi böylelikle de üretim maliyetlerini azaltmayı sağlar. Bu nedenle kalite kontrolünün, daha ürün üretilmeden ürünün ve sürecin tasarımı aşamasında sağlanması gerekmektedir. Taguchi'ye göre rekabetçi bir ekonomide işletmenin varlığını sürdürebilmesi için kaliteyi sürekli olarak geliştirmesi ve maliyetleri düşürmesi gereklidir (Kackar, 1985).

Üretimde yaşanan değişimlerin yanında mikroelektronikğin bilgisayarlarda yarattığı imkanlar sanayide robotlaşmayı ve otomasyonu ön plana çıkarmış ve malzeme teknolojisindeki ilerlemelerle sıfır hatalı ürün üretimi firmalarda ön plana çıkmıştır. Bu durum mühendislik çalışmalarını sistem ve süreç geliştirmeye yöneltmiştir. Böylelikle mühendislik ve AR-GE çalışmalarında maliyetleri minimize edecek, kaliteyi ürünün her aşamasında sağlayacak hatasız ürün ve süreç tasarımı ve iyileştirmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kalitenin, ürünün ve ürünü oluşturan sürecin tasarımı aşamasında sağlanması için bütün bileşenlerin ürüne ve sürece etkilerinin ve birbirleriyle olan etkileşimlerinin araştırılması ihtiyacı giderek artmıştır. Bu araştırmanın yapılabilmesi için arge faaliyetlerinde deney tasarımı tekniklerinden faydalanılması zorunlu hale gelmiştir. Deney tasarımı teknikleri, ürün üzerine etki eden faktörlerin, bu faktörlerin farklı seviyelerinin ve faktörlerin birbiriyle etkileşimlerinin çıktı üzerindeki etkilerini araştırarak en iyi ürün ve sürecin elde edilmesine olanak sağlar. Deney tasarımı, özellikle yeni ürün tasarımı, üretim süreçleri geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gibi mühendislik alanlarında önemli rol

oyunmaktadır. Bu çalışmalarda amaç, dayanıklı tasarım elde etmektir. Burada dayanıklı ifadesi, kontrol edilemeyen faktörlere, örneğin nem, toz, ısı gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımında farklı uygulamalara ve malzemelerdeki farklılıklara karşı duyarsız, yani onlardan etkilenmeyen, ürün ve süreç anlamında kullanılır (Montgomery, 2001).

Küreselleşen dünyada her geçen gün rekabetin artması, ürün ve hizmet geliştirme süreçlerinde verimliliği artırmaya yönelik teknik, model ve metodolojiler oluşturmaktadır. İyileştirme süreçlerinin hayata geçirilmesi ile ilgili üretilen modellerin gerçek zamanlı uygulama yapılmadan önce gerçek ortamlarda, minimum maliyet ile maksimum bilgiyi elde etmeye yönelik deney tasarımları yapılabilmektedir.

Bu tezin temel amacı; birçok mühendislik alanında uygulanan deneylerin tasarım aşamasında mühendislerin dikkat etmesi gereken hususların belirlenmesidir.

Sanayide ve birçok bilimsel çalışmada proses değişkenleri ve proses değişkenlerinin ürüne nasıl bir etkisi olduğu önemli bir inceleme alanıdır. Bunun için araştırmacılar birçok deney yapıp çok sayıda parametrenin (faktörün) ürün üzerindeki olası etkilerini belirlemek amacıyla parametrelerin çeşitli değerleri için prosesi tekrarlar. Bu sürecin en verimli şekilde gerçekleştirilmesi için deney tasarımı çalışmalarında deneyi uygulayan kişiye kaynak teşkil etmek bu tezin hedefleri arasındadır.

## **1.2. LİTERATÜR TARAMASI**

Savaşkan (2003), “Deney Tasarımı Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Kullanımı İle İnce Sert Seramik Kaplı Matkap Uçlarının Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyonu” adlı doktora tezinde deney tasarımı tekniklerinin mühendislik çalışmalarına getirdiği avantajları karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Deney tasarımının detayları ince sert seramik kaplamalı matkap uçlarının işletme şartları altında optimizasyonu örneğinde ele alınmış, talaşlı imalatta önemli işleme şartlarının bir arada optimize edilmesi ile daha uzun takım ömürlerine ulaşılmasını mümkün kılacak çözüm için gerekli deney sayısının büyük oranda azaldığı



gösterilmiştir. Bu optimizasyon hedefinin yanı sıra doktora çalışmasının en önemli özelliği ve ağırlıklı olarak yoğunlaştığı konu, yapılacak olan deneylerin gerçekleştirilmesi için gerekli zaman ve diğer maliyetleri minimuma indirecek deney tasarımı türlerinin karşılaştırılması gözlemlenmesi olmuştur. Çalışmada elde edilen veriler tam faktöriyel deney tasarımı, Taguchi deney tasarımı, Box-Behnken deney tasarımı ve yüzey merkezli merkezi kompozit tasarım ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda değişik yaklaşımların birbirine yakın sonuçlar verdiği ve deney tasarım metodlarının uygulanmasının deney sayısını azaltarak zaman ve maliyetlerden yana avantaj sağlarken deney sonuçlarının da daha iyi yorumlanabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Deney tasarımı yöntemleri arasındaki karşılaştırmada ise prosesin özelliklerine göre uygun metodun seçilmesi önemli olmakla birlikte Taguchi deney tasarımının minimum deney sayısı ile yorum yapabilmeyi sağlayabilen metod olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Diğer metotlarda elde edilen bilgilerin ise daha nicel olmakla birlikte deney sayılarının oldukça arttığı gözlemlenmiştir.

Ross ve Sykes (1989), “Sıcak Damgalama Sürecinin En İyilenmesi” isimli çalışmalarında tasarım aşamasının yaklaşık iki ayda bitirilmesi düşünülen bir sıcak damgalama sürecinin tasarım aşamasında Taguchi yöntemini kullanarak imalat aşaması dahil bütün çalışmanın bir ay kadar bir sürede bitirilmesini sağlamışlardır. Dört tanesi iki seviyeli, bir tanesi ise 4 seviyeli olan 5 faktörün performans karakteristiği üzerine etkilerini araştırmak için yapılan probleme uygun hale getirilmiş bir  $L_8 (2^7)$  ortogonal dizinini kullanmışlardır. Uygulamada yapılan bu çalışmalar çalışmanın yürütüldüğü şirkete yaklaşık 20.000 dolarlık bir kar sağlamıştır.

Dervişoğlu ve Muluk (2006), “Taguchi Tasarımının Uygulanması Ve Klasik Kesirli Çok Etkili Tasarımla Karşılaştırılması” isimli çalışmalarında, Taguchi yöntemi kullanılarak daha verimli tahminlerin elde edilebileceğini göstermek amacıyla, ilk önce Taguchi yönteminde kullanılan ortogonal dizinlerin oluşturulması, Doğrusal Grafikler ve Üçgensel tabloların kullanımı detaylı olarak anlatmışlardır. Çalışmada örnek olarak  $L_{27} (3^{13})$  ortogonal dizinin oluşturulmasını incelemişlerdir. Çalışmanın ikinci kısmında, Hicks (1973) tarafından yapılmış olan tam faktöriyel bir deney

tasarımı uygulamasını Taguchi yöntemini kullanarak çözüme ulaştırmışlar ve Taguchi yöntemi ile bulunan sonuçların tam faktöriyel tasarım ile bulunan sonuçlar ile karşılaştırmasını yapmışlardır.

Bilişik ve Gençyılmaz (2006), “Hizmet Kalitesinin İyileştirilmesinde Deneysel Tasarım Metodu” isimli çalışmalarında, eğitim kurumlarındaki sınıf içi eğitim ve öğretim faaliyetlerinin kalitesini arttırmak amacıyla en uygun ders anlatım yönteminin belirlenmesini amaçlamışlardır. Yüksek öğrenim kurumunda yapılan çalışmada en uygun yöntemin belirlenmesinde L9 ortogonal dizini kullanılarak Taguchi Deneysel Tasarımı yaklaşımından faydalanmışlardır. Veriler MINITAB programı ile analiz edilmiş ve etki değerlerinin araştırılmasında, ANOVA analizi yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır.

Şanyılmaz (2006), “Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile Bir Uygulama” adlı çalışmasında, Kaleporselen Elektronik Sanayi A.Ş.’de üretilen NH bıçaklı sigorta buşonlarında meydana gelen çatlama probleminin çözümü için Taguchi yöntemini kullanmıştır. L<sub>8</sub> (2<sup>7</sup>) ortogonal dizini kullanılarak belirlenen şartlarda yapılan deneyler sonucunda, her bir deney konfigürasyonu için ortalama ve S/N oranı değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler varyans analizi ve faktör etkilerinin grafiksel gösterim metodu ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre buşon gövdesinin basınca karşı mukavemetini en büyükleyen faktör seviyeleri bulunmuş ve sonuçlar tam faktöriyel deney tasarımı ile doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda Taguchi yöntemi ile aynı sonuçlara daha az sayıda deney ile ulaşıldığı için Taguchi yönteminin tam faktöriyel deney tasarımına göre daha avantajlı olduğu saptanmıştır.

Muluk, Balce ve Köksoy (2000), “Deney Tasarımı Eğitimi-Helikopter Deneyi” adlı çalışmalarında Deney Tasarımı eğitiminde öğrencilere kuramsal bilgileri uygulamalı olarak anlatmanın yararlarına değinmiş ve öğrencilere uygulattıkları “helikopter deneyi” ile deney tasarımının basit bir mekanizmayla nasıl kurgulanacağı ve deney tasarımında karşılaşılabilecek problemlerin nasıl ortaya çıkacağını gösteren bir deney mekanizması gerçekleştirmişlerdir.

Savaşkan Taptık ve Ürgen (2004), “Deney Tasarımı Yöntemi İle Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu” adlı çalışmalarında deney tasarımı tekniklerinin mühendislik çalışmalarına önemli avantajlar getirdiği görüşünden yola çıkarak. deney tasarımı yaklaşımının detaylarını, ince sert seramik kaplı (TiAlN ve TiN) matkap uçlarının performans optimizasyonu örneği ile ele alarak incelemişlerdir. Çalışmada hedeflenen optimum noktaya ulaşabilmek için endüstriyel ortamda en önemli faktörler olan kaplama türü, kesme hızı ve ilerleme hızının etkileri Taguchi Deney Tasarımı tekniği yardımı ile incelenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde varyans analizi ve sinyal/gürültü oranı kullanılarak, Tam Faktöriyel Deney Tasarımında gereken deney sayısının sadece üçte biri ile (27 yerine 9 deney) hedeflenen sonuçların elde edilmesi mümkün olmuştur.

Aytaç, Yılmaz ve Deniz (2008), “Lastik Kordu Üretiminde Büküm Yönünün Etkilerinin Farklı Deney Tasarımı Yöntemleri İle İncelenmesi” adlı çalışmalarında lastik kordlarının dayanımını artırmak için deney tasarım yöntemlerinden yararlanmışlardır. Yıllardan beri kord üretiminde tek bükümlerde z ve katlı bükümlerde s büküm yönünün kullanımı en yüksek kopma dayanım değerini verdiği için tercih edilmektedir. Bu çalışma sonunda, tek bükümlerin s yönünde, katlı bükümün z büküm yönünde olduğu bileşim ile tek bükümlerin z yönünde katlı bükümün de s yönünde olduğu bileşimin hemen hemen aynı kopma dayanım değerini verdiği görülmüştür. Buna göre dayanım açısından (z.z.s) büküm yönü yerine (s.s.z) büküm yönü bileşiminin de kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Ancak, (z.z.s) büküm yönü bileşiminin değişkenliğinin, (s.s.z) büküm yönü bileşiminine göre daha az olduğu bulunmuştur. Kullanılan 2 düzeyli deney sisteminde, Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile bulunan sonuçlar tam etkensel tasarım yöntemi ile bulunan sonuçları desteklemiştir. Taguchi yönteminin; diğer deney tasarımı yöntemleri arasında en az deney sayısı ile karar verilebilmesi nedeniyle eniyileme çalışmaları için uygun ve güçlü bir araç olduğu sonucuna varmışlardır.

Taguchi ve Clausing (1990), “Robust Quality” adlı makalelerinde ürünlerin belirlenen tolerans değerleri arasında üretilmesi ile hedef değerde üretilmesi arasındaki farkı ve bu farkın önemini Sony ve Ford şirketlerinden örnekler vererek

anlatmış ve bu örneklerden hareketle Taguchi Kayıp Fonksiyonu hakkında özet bir bilgi sunmuşlardır.

Canıyılmaz ve Kutay (2003), “Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım” adlı makalelerinde daha önceden yapılmış olan bir çalışmanın gerçek sistemden elde edilen verilerini kullanarak, Varyans Analizi Yöntemi ile Faktör Etkilerinin Grafikselsel Gösterimi Yönteminin karşılaştırılmasını yapmış ve elde edilen sonuçlara dayalı olarak problemi, çok amaçlı karar verme problemi şeklinde tekrar modellenmişlerdir. Yeni modelin çözüm sonuçları ANOVA ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak mühendislik tasarımlarında Faktör Etkilerinin Grafikselsel Gösterimi Yönteminin Varyans Analizi Yöntemine göre daha iyi sonuç verebileceği sonucunu elde etmişlerdir.

Hamzaçebi ve Kutay (2003), “Taguchi Metodu: Bir Uygulama” isimli çalışmalarında, Taguchi metoduna genel bir bakış yapılmış, Taguchi'nin kaliteye kazandırdığı yeni anlam ve kalite sağlama tekniği olarak kullandığı istatistiksel deney tasarımı yöntemi derlenmeye çalışılmıştır. Uygulama kısmında ise, Dizdar'ın (1998), üretim sistemlerindeki olası iş kazalarının tahminine yönelik araştırmasında derlediği veriler kullanılarak üç faktör ve üç düzeyli yapılan çalışma L9 ortogonal dizinine göre tasarlanmış ve deney sonuçları Minitab yazılımında analiz edilmiştir. Çalışmada, Taguchi metodunun daha az deney ile zaman ve maliyet tasarrufu sağladığı ve bu metodun karar aracı olarak bütün alanlarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Saat (2000), “Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı” adlı makalesinde Taguchi yöntemi hakkında genel bir bakış açısı sağlamıştır. Saat makalesinde, kalite geliştirme sürecine giren her işletmenin Taguchi'nin deney tasarımı yönteminden yararlanabileceğini ancak Taguchi'nin bu yaklaşımının Toplam Kalite Yönetiminin bir parçası olduğunun unutulmaması gerektiğini, bu yüzden de tasarım çalışmalarına girecek işletmelerin bu yöntemi tek başına kullanmayarak TKY'ni de hayata geçirmeye çalışmasının gerekeceği görüşünü savunmuştur.

## 2. DENEY TASARIMI

Bir ürünün üretilmesinde, ilk önce ürüne ait fikir gerçekleşir daha sonra ürünün nasıl üretileceğine karar verilir. Tasarlanmış ürünü üretmek için gerekli işlemlerin geliştirilmesi de süreç tasarımı olarak ifade edilir. Ürün ve süreç tasarlanırken ürünün hangi malzemeden üretileceği, hangi boyutlarda olacağı, hangi işleme tabi tutulacağı, işlem sırasının nasıl olacağı, işlemin nasıl uygulanacağı gibi konulara karar verilir. Bu nedenle ürün ve süreç tasarımı ürünün kalitesini ve ürünün maliyetini doğrudan etkiler ve ürün tasarımı ya da süreç iyi değilse ürünün kalitesi sorunlu olur. Taguchi'nin kalite felsefesinde bu durum; ürünün nihai kalite ve maliyeti, önemli oranda ürünün ve imalat sürecinin mühendislik tasarımları tarafından belirleneceği şeklinde ifade edilmektedir (Kackar, 1985). Bir ürünün kalite düzeyinin de, önce tasarlanması sonra üretimle birlikte gerçekleştirilmesi gerekir. Bu durumda kaliteyi oluşturan faktörleri iki temel unsur içinde toplamak gerekir. Birinci unsur; tasarım kalitesi olarak kabul edilir. Ürünün fiziksel yapısı performans özellikleri ile beraber tasarlanır. İkinci unsur ise; uygunluk kalitesi olarak kabul edilir, ürünün tasarım kalitesi ile belirlenen ölçütlere uyma derecesini ifade eder. Belirli bir uygunluk kalitesinin gerçekleştirilmesinde maliyet dengelemesine gereksinim duyulur. Tasarım ve uygunluk kalitelerinin saptanmasında iki noktadan harekete geçilir. Bunlar tüketici tercihleri ve teknolojik olanaklardır (Önal ve Baylan, 2003).

Ürün geliştirmede tasarım mühendisleri; malzeme, parça şekil ve özelliklerini içeren komple ürün tasarım spesifikasyonlarını geliştirirken, süreç mühendisleri buna uygun süreç tasarımı yaparlar. İmalat mühendisleri ise, üretim sürecini kullanarak tasarlanan ürünün üretimini gerçekleştirirler. Sonuç olarak, ürün kalitesiyle ilgili sorun, özellikle ürün tasarımı aşaması daha sonra süreç tasarımı ve imalat aşamalarına önem vermeyi gerektirir. Geliştirilmiş süreç tasarımları hem imalat kusurlarını hem de buna bağlı olarak süreç denetimlerine olan ihtiyacı azaltmaktadır (Saat, 2000). Ishikawa (1984) bu konuyla ilgili kalite kontrol çalışmalarında üç aşama olduğunu bunlardan ilkinin geleneksel muayene, ikincisinin istatistiksel kalite kontrolü ve üçüncüsünün de ürün ve süreç tasarımı olduğunu söylemiştir.

Herhangi bir süreç veya sistem ile ilgili yeni bulgular keşfetmek amacıyla, pek çok alanda deneyler yapılmaktadır. Her bir deney, istatistik literatüründe, aslında bir sınamadır. Başka bir deyişle deney, bir süreç veya sistemin girdi değişkenlerinde yapılan anlamlı değişikliklerin çıktı üzerinde oluşturduğu değişim şeklini ve nedenini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen sınama veya sınama gruplarıdır. Deney tasarımı ise deney birimlerinin maruz kalacağı kontrol altındaki durumların düzenlenmesiyle ilgilidir (Lee, 1975). Sebep-sonuç ilişkilerini belirlemek amacıyla pek çok farklı deney tasarımı metotları (en iyi tahmin yaklaşımı, bir kerede bir faktör yaklaşımı veya faktöriyel tasarım gibi) uygulanabilir (Montgomery, 2001).

Deney tasarımı teknikleri sadece istatistiksel bir yaklaşım değil, tüm araştırma-geliştirme faaliyetlerinde kullanılacak, kaliteyi artıran, maliyetleri düşüren, sonuçların güvenilirliğini sağlamlaştıran, tüm diğer kalite tekniklerini destekleyen ve tamamlayan tekniklerdir. Uygulamada getirdikleri avantajlar performans ve kalitenin artırılması, kaynakların verimli kullanılması, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması, ürünün ve/veya prosesin kalite özelliklerini belirleyen değerlerin kontrol edilemeyen veya edilmesi zor/maliyetli faktörlere karşı daha az duyarlı olması şeklinde sıralanabilir (Savaşkan, 2003).

Deney tasarımında ilgilenilen durumlar/koşullar faktör olarak adlandırılır (Şenoğlu ve Acıtaş, 2010). Bunlar çıktı üzerinde etkisi olabilecek ve deneyde incelenen girdilerdir. Taguchi kalitenin, daha en başta ürüne göre tasarlanması gerektiğini, muayene ile kalite sağlanamayacağını ifade etmektedir. Gerçek kalite, geleneksel yaklaşımın üretim hattındaki muayene anlayışı ile sağlanamaz. Taguchi'ye göre hiçbir muayene kalitesiz ürüne kaliteyi geri getiremez. Muayene sadece, kalitesizliğin ortaya çıkartılmasıdır (Feigenbaum, 1991). İşte bu yüzden, kalite, önleme felsefesi ile geliştirilmelidir. Kalitesizliğe sebep olabilecek problemler/faktörler en başta ele alınmalıdır (Şirvancı, 1997). Yine bu çerçevede Taguchi'nin sistem tasarımı olarak da adlandırdığı aşamada ürün kalitesini etkileyen faktörler belirlenir ve bu faktörlerin ürüne etkisinin en az kılınmaya çalışıldığı bir tasarım gerçekleştirilir.

Deneyler genelde pek çok faktörü içermektedir. Bir deneyin amacı çoğunlukla bu faktörlerin çıktı üzerindeki etkilerini belirlemektir (Montgomery, 2001). Bir ürünün kalitesini etkileyen birçok faktör ve bu faktörlerin birden fazla seviyeleri bulunabilir. Deney yapan kişi faktörlerin, bu faktörlerin seviyelerinin ve faktörlerin birbiriyle etkileşiminin ürün üzerindeki etkisini araştırma konusu yapar. Faktörlerin seviyeleri belirlenirken bazı faktörler için düzeyler özel olarak bazıları içinse rasgele seçilir. Bir faktörün az sayıda olan düzeylerinin tamamının ya da faktöre ait fazla sayıdaki düzeylerden belli adedinin, keyfi olarak (araştırmacının ilgisine göre) alınması durumunda kullanılan model sabit etkili modeldir (Ünver ve Gamgam, 1986). Örneğin, bir üretim sürecinde kullanılacak olan suyun sıcaklığı ürün üzerine etki edecek bir faktör olarak düşünülün ve bu yüzden de su sıcaklığı için üç farklı seviye (10 C, 15 C, 20 C) özel olarak seçilsin. İşte faktör seviyeleri böyle özel seçimli olan deney modeli sabit etkili model olarak adlandırılır. Pratikte çoğunlukla sabit etkili modeller kullanılır; rassal seçimli modeller neredeyse hiç kullanılmazlar. Sabit etkili modellerde düzeylerin seçilmesinde araştırmacının geçmiş tecrübeleri ve deneyimi oldukça önemlidir. Çünkü araştırmacı, deneyde kullanacağı faktör düzeylerine geçmiş tecrübelerinin ve bu konuda edinmiş olduğu bilgilerin ışığında karar verir.

## **2.1. Deney Tasarımı Ve Maliyet İlişkisi**

Ürünlerin kalite karakteristiklerini (özelliklerini) müşterilerin ihtiyaç ve beklentileri belirlemektedir. Mesela bir televizyonun çözünürlüğü ya da cep telefonunun şarjının dayanma süresi müşterinin ürünlerde aradığı/ihityaç duyduğu kalite özellikleri olup dolayısıyla mühendisler tarafından iyi tasarlanması gerekir. Bir işletme için amaç müşterilerin talep ettiği kaliteyi, kalite karakteristikleri vasıtasıyla sağlamaya çalışırken aynı zamanda bunu minimum maliyetle karşılayabilmektir. Kalitesi yüksek, maliyeti düşük ürün üretebilme problemi; mühendislik, istatistik, ekonomi, işletme gibi bilimlerin ortaklaşa çalışmalarını gerektiren bir konudur. Sonuç olarak, “hangi maliyette ne kadar kalite istenmelidir” sorusunu cevaplayacak bir stratejinin geliştirilmesi gerekecektir (Köksoy ve Hocoğlu, 2005). Geliştirilecek deney stratejisi minimum maliyetle istenilen bilgiye ulaşılmasını sağlamalıdır.

Deney tasarımının önemini gösteren önemli bir araştırmanın sonucunda; tasarlanmadan, ön çalışma olmaksızın gerçekleştirilen çalışmalarda probleme hemen atlama yaklaşımı ile çözülmeye çalışılan problemlerde, problemin çözüm şansı %20, doğru çözüm şansı %30 ve ilk çözümden sonra yeni problemlerin oluşma olasılığı %70 olarak belirlenmiştir. İstatistiksel tasarım kullanılarak yapılan çalışmalarda ise problemin çözüm şansının ve bulunan çözümün doğru olma olasılığının %95 olduğu ve aynı zamanda ilk çözümden yeni problem doğma olasılığının çok düşük olduğu belirlenmiştir. İstatistiksel deney tasarımlarının düzensiz deneylerden daha verimli olmaları Ar&Ge çalışmalarında ürün ve kalite geliştirme amacıyla kullanılmalarını zorunlu hale getirmiştir. Böylece tesadüfen ulaşılan yüksek kaliteyi oluşturan sebepleri geriye dönerek tekrar araştırmak için harcanan zaman, para ve riski ortadan kaldırmak mümkün olur (Karakuş, 2001).

Kalite yetersizliğinin neden olduğu kayıp, satış fiyatının %10-25 ini oluşturur. Bu durumu aşmanın yolu, ürünün ve prosesin değişkenliğini azaltmayı hedef alan bir anlayışla ele alınıp doğru tasarım ve optimizasyon yöntemleri kullanılmasından geçmektedir (Taptık ve Keleş, 1998). Taguchi'nin kalite felsefesini özetleyen yedi aşamadan bir tanesinde; "sürekli kalite geliştirme programları, ürünün performans karakteristiklerinin hedef değerlerden sapmalarının kayda değer miktarda azaltılmasını içermelidir" denmektedir (Kackar,1985).

Bu konuyla ilgili olarak Ford Şirketi'nin 1980'lerdeki bir deneyimi, parça üretiminde hedef değerden sapma sonucunda oluşan değişkenliğin, işletmeye parasal kayıp olarak nasıl döndüğünü ortaya koymuştur. Ford şirketi, imal etmekte olduğu otomobillere şanzıman üretmek üzere iki ayrı firmaya sipariş vermiştir. Tedarikçi firmalardan biri Ford şirketinin ABD'deki kendi üretim tesisi, diğeri ise Japon Mazda firmasıdır. Her iki firma da şanzımanları, Ford'un spesifikasyonlarına uygun olarak üretilip teslim ederler. Garanti süresi içinde şanzıman sorunlarından kaynaklanan garanti talepleri ortaya çıkar. Ford yetkilileri sorunlu şanzımanları üretici firmaya göre sınıflandırdıklarında, ABD firmasının ürettiği parça grubunun sayısal olarak diğerinden birkaç kat daha fazla olduğunu görürler. Bunun üzerine parçaların bazı kritik performans değerlerinin olasılık dağılımlarını hesaplarlar. Burada her iki firmanın ürettiği parçaların performans ortalamaları aynı olmakla



birlikte, ABD firmasının parçalarının performanslarının varyansı Mazda'ninkilerden daha fazladır. Bu durumda ABD firmasının parçaları daha sık arıza yapıp Ford'un maliyetlerini arttırmaktadırlar (Gunter, 1987).

Taguchi ve Clausing (1990) hedef değerden sapmanın işletmeye olan maliyetini Sony şirketinin 1970' lerde yaşadığı bir olayla anlatmaktadırlar. Bu olay mühendislik ve ekonomik verilerin bir arada nasıl görülebileceğini göstermektedir. Sony ürün tasarım mühendisleri, müşterilerin memnuniyeti için özel bir çözünürlük değeri belirlemişlerdir (örneğin bu değer 10 olsun). Değer 10' dan saptığında müşterilerin memnuniyetsiz oldukları görülmüştür. Sony iki üretim yeri (San Diego ve Tokyo) için müşteri çözünürlük spesifikasyon değerlerini 7 ile 13 arası olarak belirlemişti. San Diego'dan gönderilen bütün televizyonlar bu tolerans değerleri içerisinde üretiliyordu. Ancak bu durumun aynı zamanda şöyle bir özelliği de vardı; bir müşterinin sözgelimi 12.6 çözünürlüğünde bir televizyon alma olasılığıyla 9.2 çözünürlüğe sahip bir televizyon alma olasılığı aynıydı. Aynı zamanda San Diego'da üretilen bir televizyonun şirketin belirlediği 7-13 sınırlarına uyma ihtimali ile 10 sınırına uyma ihtimali de aynıydı. Öte yandan Tokyo'dan gönderilen her 1000 üründen 3' ü bu sınırların dışında olmasına rağmen diğerleri 10 sınırının etrafında yoğunlaşmaktaydı. Sony genel müdürü bu durumu şu şekilde açıklamaktaydı: Japon işverenlerden birisine belli bir ürünün  $\pm 5$  sınırları içerisinde olması gerektiği söylendiğinde onlar bu değeri otomatik olarak sıfır toleransa indirmek için uğraşacaktır. Amerika'daki üretim tesisinde ise işçiler yönergelere mükemmel şekilde uyacak fakat geliştirmek için uğraşmayacaklardır. Yani onlara  $\pm 5$  tolerans değerleri verdiğinizde bu değerlerin dışına çıkmamaya çalışacak, ancak çok nadir sifıra yakın üretim gerçekleştireceklerdir. San Diego elbetteki tolerans değerlerinin dışında ürün üretmiştir ancak kesinlikle bu ürünleri göndermemiştir. Tokyo ise ürettiği bütün ürünleri kontrol etmeksizin göndermiştir. Burada şöyle bir kritik soru karşımıza çıkmaktadır: Genel Müdür Mourika Tokyo'yu San Diego'ya tercih etmeli midir? Cevap tabiki maliyetlerle ilgili olacaktır. Burada sıfır hata kuralları geçersiz olmuştur. Komşunuzun 13.1 çözünürlüğe sahip bir televizyonu varken sizin televizyonunuzun çözünürlüğünün 12.9 olması arasında önemli bir fark olmayacaktır. En azından bu fark sizin fark edebileceğiniz düzeyde olmayacaktır. Fark müşterilerin 13.1' e karşılık 10 değerinde bir televizyona sahip olduklarında

ortaya çıkacaktır. Değer 10' dan çok sapmış olacağından müşteri için tatminkar olmayacak ve müşteriler televizyonunun yeniisiyle değiştirilmesini talep edeceklerdir. Sony, televizyonların çözünürlüğünü hedefe yakın hale getirebilmek amacıyla ayarlama işlemi için birkaç dolar harcamak yerine müşterileri tatmin etmeyen televizyonlar için çok daha fazla para harcamak zorunda kalabilir. Öyle ki San Diego'nun ürettikleri televizyonların 2/3' ü bu şekildeydi. San Diego "hatasız" marjinal ürünlerini göndermiş fakat onların marjinal kalitesi çok pahalıya mal olmuştur. Kalite Kayıp Fonksiyonu kullanılarak Sony daha çarpıcı rakamlara ulaşabilirdi. Örneğin, şirket her televizyonun düzeltilmesi için çözünürlüğü 10 değerine ayarlamayı sağlayan bir hat kurduğunda bunun için gereken maliyet televizyon başına 9 \$ olacaktı, fakat hedeften 3 puan sapma gösteren 13 değerine sahip her bir San Diego üretimli televizyon için 81 \$ harcamak zorunda kalmıştır. Bu durumda, San Diego'daki toplam kalite kaybı Tokyo'dakinden 3 kez daha fazla olmuştur. Pekiyi sıfır hata işe yararıyorsa ne işe yarayacaktı? Daha önce de ifade edildiği gibi kalite ite tasarlanır, dışta kontrol edilmez. Ürün geliştirme mühendisleri her adımda kalite kaybını bilinen üretim maliyeti ile karşılaştırarak kararlarını ona göre vermelidir. Hedefleri belirlemeden herhangi bir kaybın fonksiyonunu ayırt edebilmek imkansız olacaktır.

Sony örneği bize aynı zamanda şunu da gösteriyor ki, kalite için hedeflenen değerden daha yüksek kalite de ürün üretseniz bile katlandığınız daha iyi kalite maliyeti kalitesiz ürün üretme maliyetine denktir. İşte bu yüzden "hedef değerden sapmanın" aşağı veya yukarı yönde azaltılması optimum maliyete yakınlılaştıracaktır.

1980'li yılların başında Motorola firmasında uygulanmaya başlayan ve giderek yaygınlaşan Altı Sigma yaklaşımı da değişkenliği azaltma yoluyla şirketlerin önemli miktarlarda kar elde etmesine olanak sağlamıştır. Örneğin, General Electric 1996'da girdiği Altı Sigma sürecinde 1999 yılına kadar 2 milyar dolardan fazla kar elde etmeyi başarmıştır (Sevi, 2006).

W.Edwards Deming'in 'performansı iyileştirmek için değişkenliklere odaklanılması gerekliliği' yaklaşımını, 1980'li yıllarda Amerikan Motorola firmasında mühendis olarak alışan Mikel Harry firma çalışanlarına benimsetmiştir. Mikel Harry tarafından ortaya konan yaklaşımın adına, Motorola firmasında yapılan her

iyileştirme çalışmasında 'altı sigma' seviyesini hedeflemiş olmasından dolayı 'Altı Sigma' denilmektedir. Başka bir deyişle, iyileştirilen sürecin 'milyonda 3.4 hata' ile çalışır hale getirilmesi hedeflenmektedir. Altı Sigma yaklaşımının amacı, süreçteki değişim miktarının, alt ve üst sınır limitleri arasındaki değerini  $\pm 6\sigma$  olacak şekilde azaltabilmektir. Diğer bir deyişle, normal dağılım eğrisinin aralığı ne kadar dar olursa değişkenlik de o kadar az olacaktır ki bu, Altı Sigma'nın hedefini oluşturmaktadır.

Mikel Harry'nin 'Altı Sigma' olarak nitelendirdiği bu yaklaşım; mükemmelle ulaşma, müşteri tatmini sağlama, süreç iyileştirme, sıfır hataya ulaşma gibi hedeflere, değişkenliğin ortadan kaldırılmasıyla ulaşılabileceğini savunmaktadır. Böylelikle değişkenlik daha ilk aşamada yok edilebilirse, doğru iş zamanında yapılmış olacak ve daha sonra hatayı düzeltmek veya tanımlamak için ikinci bir zahmetli ve maliyetli sürece girilmeyecektir (Sevi, 2006).

Görüldüğü üzere üretim sürecinde hedef değerden sapmaların en aza indirilmesi, bunun için de hedef değerden saptmaya neden olacak faktörlerin ve etkilerinin tespit edilmesi oldukça önemlidir. Deney tasarımı üretim süreciyle ilgili kalite karakteristiklerini etkileyen önemli faktörlerin belirlenmesinde uygulayıcılara yardımcı olur. Yapılması planlanan bir deney, girdi faktörlerinin sistematik olarak değiştirilerek çıktı üzerindeki etkisinin belirlenmesi işlemidir. Ürün performansına etki eden bu faktörler belirlenirken, deney tasarımcısı daha önceden bu konu ile ilgili yapılan çalışmalara ve kendi bilgi birikimine dayanarak hedef değerden saptamalara neden olabileceğini düşündüğü belirli faktörleri seçer. Bu faktörler belirlenirken beyin fırtınası, sebep-sonuç diyagramı gibi kalite araçları kullanılabilir (Durmaz, 2008).

Deney tasarımında yapılacak her yeni denemede mevcut faktörlerden birinin seviyesi değiştirilir ve diğer faktörler sabit tutulur. Böylece herhangi bir karakteristik için yapılacak deneyin deneme sayısı, faktörler iki seviyeli ise  $2^n$ , seviye sayısı üç ise  $3^n$  olur (burada n faktör sayısını gösterir). Yani her bir faktöre ait tüm seviyeler için deneme yapmak gerekmektedir. Bu, faktör sayısı arttıkça deney sayısında geometrik bir artışa neden olur (Aydın, 1994). Deney sayısındaki bahsedilen artış da maliyetleri

çok fazla arttırmakta ve önemli ölçüde zaman almaktadır. Deney tasarımına dayalı bu dezavantajı giderecek kesirli faktöriyel deneyler veya Taguchi metodu gibi istatistiksel yöntemler geliştirilmiştir.

## **2.2. Deney Tasarımında Mühendislik Deneyimi**

Mühendislerin karşı karşıya kaldıkları tipik görevlerden biri, ürün özellikleri veya proses şartlarını optimize etmek hedefiyle sistemin davranışını ve faktörler arasındaki ilişkileri gerçek şartlar altında modellemek ve bunun için gerekli deney stratejisini geliştirmektir (Savaşkan, 2003).

Deney tasarımı mühendislik dünyasında, üretim prosesinin performansının geliştirilmesinde oldukça önemli bir araç olmakla birlikte yeni işlemlerin gelişiminde de geniş uygulamaya sahiptir. Deney tasarımı tekniklerinin süreç geliştirme prosesinin başlangıcında uygulanması;

- Süreç çıktılarının iyileştirilmesini,
- Nominal veya hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılmasını,
- İyileştirme sürelerinin azaltılmasını,
- Toplam maliyeti azaltılmasını sağlayacaktır.

Deney tasarımının mühendislik uygulamalarındaki kullanımına şu örnekler verilebilir (Monygomery, 2001) :

- Temel tasarım kombinasyonlarının değerlendirilmesi ve karşılaştırılması,
- Malzeme alternatiflerinin değerlendirilmesi,
- Tasarım parametrelerinin, üretilen ürünün değişik çalışma koşullarından etkilenmeyecek başka bir deyişle dayanıklı/robüst olmasını sağlayabilecek şekilde seçilmesi,
- Ürünün performansını etkileyen önemli parametrelerin belirlenmesi.

Mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ulaşılmak istenen başlıca hedef gerek tasarlanan sistemin, gerekse geliştirilmek istenen ürünün maksimum performansa sahip olmasıdır. En iyi sonuçların elde edileceği şartları ortaya koyabilmek için öncelikle performansı belirleyen özellik belirlenir ve bu özelliği etkileyen faktörler incelenir. Ardından bu faktörlerin performansı belirleyen özellik üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve en uygun kombinasyonunun bulunması için (kontrol edilemeyen faktörler de gözetilerek) deneyler yapılır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen performans göstergesi değerlendirilerek optimum şartlar tespit edilir. Bu yaklaşım çerçevesinde yapılan deneyler, sisteme sorulan soru, deney sonuçları da sistemin verdiği cevap olarak algılanabilir. Kritik olan nokta ise doğru cevabı alabilmek için doğru sorunun sorulmasının gerekliliğidir (Savaşkan, 2003). Sisteme yanlış soru sorulduğunda alınan cevaplar ne kadar doğru ölçülürse ölçülsün anlamlı sonuçlar ortaya çıkmayacaktır.

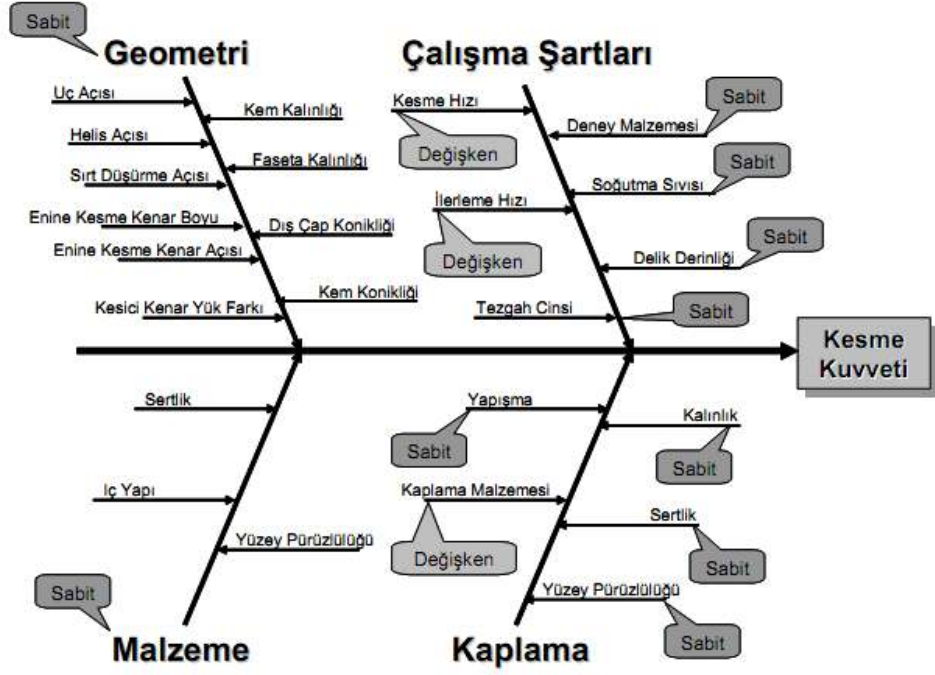
Üretim sürecinde, problemin belirlenmesi kolay bir nokta gibi görünse de tasarımın en önemli adımlarından birisidir. Yapılacak her işte olduğu gibi, deney tasarımından da en iyi sonucu alabilmek için yapılacak deneylere konu olan sorunun tam olarak bilinmesi şarttır. İlk bakışta konu ile ilgili birçok problem olabilir, ancak bunların içinden temel sorunu bulmak gerekir. Bunu için beyin fırtınası, balık kılçığı, Pareto analizi gibi kalite araçlarından faydalanılabilir (Şirvancı, 1997). Deneyin amacı ile ilgili tüm fikirler, problemin belirlenmesi aşamasında ortaya konulmalıdır. Konu ile ilgili birimlerden (üretim planlama, kalite güvence, pazarlama gibi) gerekli bilgilerin toplanması gerekir (Şanyılmaz, 2006). Bu aşamada ilgili bütün bölümlerden, mühendislik ve diğer birimlerde çalışanlardan (genellikle en çok fikre sahip ama en çok gözardı edilenler) fikir talep etmek önemlidir. Bu nedenle bu aşamada deneylerin tasarımında takım çalışması yaklaşımı benimsenmelidir (Montgomery, 2001).

Deney tasarımı tekniklerinden faydalanacak bir mühendis deney tasarımı aşamasında şu sorulara cevap aramalıdır;

- Çıktı/Ürün üzerinde etkisi en fazla olacak olan parametreler hangileridir?
- Kontrol edilebilen parametrelerin, çıktı/ürünün optimum seviyede olmasını sağlayacak seviyeleri nelerdir?

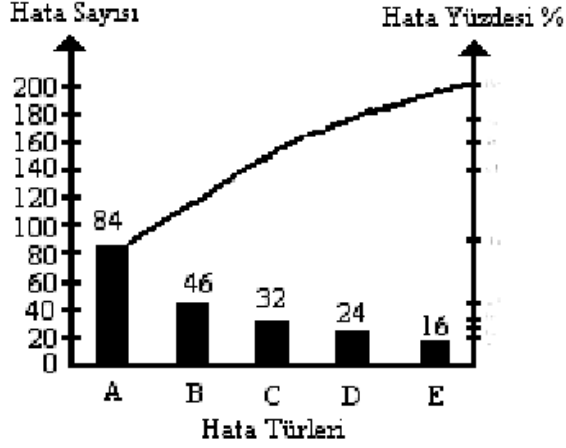
- Kontrol edilebilen parametrelerin, çıktı/ürünün değişkenliğini en aza indirmek için hangi seviyelerde tutulmalıdır?
- Kontrol edilebilen parametreler, kontrol edilemeyen parametrelerin etkilerini minimumda tutmak amacıyla hangi seviyelerde tutulmalıdır?

Mühendisler deney tasarımında gerek problemin belirlenmesi, gerek deneye etki eden faktörlerin belirlenmesi, gerekse yukarıdaki soruların cevaplarının bulunmasında hem geçmiş tecrübelerinden hem de kalite araçlarından faydalanabilirler. Örneğin, oluşturulacak bir sebep sonuç diyagramı sayesinde problemin olası nedenleri tespit edilebilir. Sebep sonuç diyagramı, sonuçları ortaya çıkaran sebepleri ortaya koymak, görselleştirmek ve üzerinde çalışmak için iyi bir araçtır. Diyagramın oluşturulmasında çok sayıda ve uzman kişilerin görüşlerinin alınacak olması ve bunun için beyin fırtınası tekniklerinden yararlanılacak olması deney tasarlayacak kişi için oldukça fayda sağlayacaktır. Diyagram sayesinde kontrol edilebilen/edilemeyen parametreler tespit edilebileceği gibi parametrelerden hangilerinin faktör olarak alınacağına hangilerinin sabitlenmesi gerektiğine de karar verilebilir. Şekil 2.1, Savaşkan ve arkadaşlarının (2004) ince sert seramik kaplı matkap uçlarının performans optimizasyonu probleminin çözümü için oluşturdukları balık kılıcı diyagramını göstermektedir. Diyagramda, matkap ucunun kesme kuvvetini etkileyen faktörleri, bu faktörleri etkileyen değişkenleri ve bunlardan hangilerinin sabit hangilerinin değişken olarak alınacağını göstermişlerdir.



Şekil 2.1. Sebep-Sonuç Diyagramı (Kaynak: Savaşkan vd., 2004)

Deneş tasarımı aşamasında Pareto analizinden de faydalanılabilir. Pareto analizi 80/20 kuralı olarak da bilinir. Sorunların %80' inin problemlerin %20' sinden kaynaklandığını, bu yüzden problemlerin en önemli %20' sinin halledilmesiyle sorunun büyük bir kısmının giderilmiş olacağı savına dayanır. Deneş tasarımında, problemin çözümü için ürüne etki eden faktörlerin ve bunların ürüne etkisinin önem derecesine göre sıralanmasında Pareto analizinden faydalanılabilir. Ayrıca problemin belirlenmesinde yapılacak beyin fırtınası tekniği sonucunda ortaya çıkan fikirlerin ağırlıklandırılması da bu yöntemle yapılabilir. Şekil 2.2 bir işletmede gözlenen 200 hatalı ürünün hata nedenlerine göre sınıflandırılmasını gösteren bir Pareto grafiğini göstermektedir. Grafikten de görüleceği gibi en çok hataya neden olan A hata türünün nedenlerinin araştırılması ve yok edilmesi sayesinde sürecin performansı önemli ölçüde artacaktır.



**Şekil 2.2.** Hata Dağılımını Gösteren Pareto Analizi (Kaynak: Can,2007)

Deney tasarımı aşamasında kullanılabilir bir diğer kalite aracı da Akış diyagramıdır. Akış diyagramı prosesleri anlaşılır hale getirir ve dokümante eder. Sürecin geliştirilebilir tarafları ve eksikleri diyagramda açıkça görülebilir.

Kalite sorunlarının çözümünde çoğu kez hatalara neden olan faktörler araştırılır. Tipik olarak bir değişkenin başka bir değişkenle ilişkisi incelenir. Örneğin, makine titreşiminin yüzey dalgalanmalarına etkisi veya basınç düşmesinin parçaların dayanıklılık performansına etkisi gibi (Can, 2007). İki değişken arasındaki ilişkinin belirlenmesinde Serpilme diyagramları oldukça etkili bir kalite aracıdır. Özellikle ne, neyi, nasıl etkiler sorusunun cevabını bulmak için serpilme diyagramları kullanılır. Serpilme diyagramları sayesinde iki değişken arasındaki ilişkinin yönü belirleneceği gibi aynı zamanda ilişkinin gücü de tespit edilebilir.

### 2.3. Düzeylerin Seçimi

Bir üretim sürecinde ürünün performansını etkileyecek birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin bazıları deney yapan kişi tarafından kontrol edilebilirken bazılarının kontrolü çok güç hatta bazen imkansız olabilir. Literatürde üretim sürecinde etkili olan faktörler kontrol edilebilen faktörler ve kontrol edilemeyen faktörler ya da gürültü faktörleri olarak ikiye ayrılmıştır. Kontrol edilebilen faktörler, ürün ya da proses üzerinde etkili olduğu varsayılan kontrol edilebilir girdilerdir. Sözgelimi



talaşlı imalatta proses üzerinde etkili olması muhtemel kesici uç, dalma derinliği, ilerleme hızı, dönme hızı gibi kontrolü elimizde olan faktörler kontrol faktörleridir. Deneysel tasarımdan maksat bu faktörlerin farklı düzeylerini kullanarak, kalite karakteristiğini ne şekilde etkilediklerini tespit etmektir (Savaşkan, 2003). Sistem üzerinde etkili olması muhtemel, sıcaklık, nem gibi kontrol edilmesi güç ya da kontrol edilmesi düşünülmeyen faktörler ise kontrol edilemeyen faktörler başka bir deyişle gürültü faktörleri olarak adlandırılır. Gürültü faktörleri kısa bir süreliğine kontrol altında tutulabilir ancak sürekli kontrolleri oldukça pahalıdır. Kontrol ve gürültü faktörleri sıcaklık, basınç, zaman, hız, akım gibi sayısal büyüklükler şeklinde ifade edilebilen sürekli faktörler olabileceği gibi, malzemenin cinsi, bir durumun varlığı veya yokluğu gibi soyut faktörler de olabilirler (Aytekin, 2010).

Kontrol edilebilir faktörlerin seviye sayıları ölçülebilir ve seviyelerinin ayarlanması kolaydır, kontrol edilemeyen faktörlerin ise seviyesi belirlenemez veya seviyelerinin kontrolü zordur (Ross, 1995).

Deney tasarımında ilk önce ürünün üzerinde etkili olduğu düşünülen faktörler belirlenerek bu faktörlerin değişim aralıkları ve deneylerde hangi seviyelerde tutulacağına karar verilmelidir. Bu faktörlerin istenilen seviyelerde nasıl kontrol altında tutulacağı ve nasıl ölçülmeleri gerektiği de üzerinde düşünülmesi gerekli konulardan biridir. Bunun için proses bilgisi gerekli olacaktır. Bu proses bilgisi, pratik deneyim ve teorik bilgilerin kombinasyonlarından oluşabilir (Montgomery, 2001). Taguchi seviye sayılarının mümkün olduğunca 2 veya 3 olarak seçilmesi gerektiğini belirtmekle birlikte Taguchi'nin deney tasarımları genellikle 2 düzey üzerine dayanır. Çünkü seviye sayıları yapılacak deney sayısını doğrudan etkilemekte bu nedenle de en ucuz deneyleri 2 düzeyli deneyler vermektedirler. Taguchi ancak nitel düzeyler (malzeme türü, işlem tipi gibi) söz konusu olduğunda 3 ya da 4 düzeyin kullanımını önermektedir. Ürünün performans karakteristiklerini etkileyen bağımsız değişkenleri tanımlamada ürünle ilgili ön bilgi ve deneyim kullanılır. Beyin fırtınası, neden-sonuç diyagramları ve akış diyagramı yararlı araçlardır (Savaşkan, 2003). Deneyin amacı faktör inceleme olduğunda, faktör seviyelerini az sayıda tutmakta fayda vardır. Genelde iki seviye seçme, bu tür çalışmalarda iyi sonuçlar vermektedir. Aralık seçme de önemli bir konudur. Faktör incelemede ilgilenilen aralığın geniş seçilmesi de verimli sonuçlar çıkaracaktır.

Hangi faktörlerin önemli olduğu ve hangi seviyelerde iyi sonuçlar verdiği öğrenildikçe, ilgilenilen aralık daraltılabilir (Montgomery, 2001).

Faktörlerin ilgilenilen düzeyleri, bunlardaki herhangi bir değişikliğin çıktı değişkeninde bir değişikliğe neden olup olmadığının belirlenmesini sağlayacak düzeylerdir. Eğer seçilen düzeylerdeki değişiklik çıktı değişkeninde bir değişikliğe sebep oluyorsa, düzeylerin, faktörler ve çıktı değişkeni arasındaki ilişkiyi belirleyen fonksiyonun şekli, eğimi gibi özellikleri net olarak ortaya koyabilecek aralıklarda olması gerekir (Çömlekçi, 2003). Bu aralıklar bazen düşük-yüksek olarak iki seviye olarak belirlenirken bazen bir faktörün varlığı ve yokluğunun etkileri de iki seviyeli olarak araştırılır.

Faktörler için belirlenen seviyeler ayrıca deneyin tasarım modelini de etkileyecektir. Bazı seviyeler deneyi yapan kişi tarafından sabit tutulurken, bazı seviyeler rassal seçimli, bazı seviyeler içinse bir faktör sabit diğeri rassal olan karma seviyeye sahip deneyler olabilir. Bu durum deney modelinin sabit etkili model, rasgele etkili model ve karma model olarak değişmesine neden olacaktır. Ancak pratikte rasgele etkili veya karma modellere neredeyse hiç rastlanmaz.

#### **2.4. Robust Tasarım**

Deney tasarım ve analizleri, özellikle yeni ürün tasarımı, üretim süreçlerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi gibi mühendislik alanlarında önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmalarda amaç, robust (sağlam) tasarım elde etmektir (Montgomery, 2001). Burada robust tasarım, kontrol edilemeyen faktörlere, örneğin nem, toz, ısı gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımında farklı uygulamalara ve malzemelerdeki farklılıklara karşı duyarsız, yani onlardan etkilenmeyen, ürün ve süreç anlamında kullanılmaktadır.

Robust tasarım, özellikle Taguchi tarafından geliştirilen ve temeli deney tasarımı yöntemine dayanan Taguchi yönteminde, kesirli deney tasarımı yöntemine ortogonal dizinler kavramıyla beraber dahil olmuştur. Yöntemin temel amacı, hedef değer

etrafındaki değişkenliği azaltmaktır (Şanyılmaz, 2006). Crosby'e göre, eğer ürün spesifikasyon sınırları içerisinde üretilmiş ise kalite sağlanmıştır. Bu, bir futbol karşılaşmasında topun iki kale direğinin arasında herhangi bir noktadan girip ağlarla buluşmasında gol sayılma olayına benzemektedir; ürün de iki spesifikasyon değeri arasında ise kaliteli sayılmaktadır. Ancak Taguchi böyle bir yaklaşımın doğru olmadığını ve ürünün hedeften sapmasıyla birlikte kalitesizliğin başladığını söylemektedir (Hamzaçebi ve Kutay, 2001). Taguchi'nin kalite çalışmalarında amaç, üründe ve süreçte hedef değerden sapmanın yani varyansın minimize edilmesidir. Varyansa, kontrol edilebilen faktörler ve kontrol edilemeyen faktörler neden olmaktadır. Kontrol edilemeyen ve Taguchi tarafından gürültü faktörleri olarak adlandırılan faktörler, kontrol edilmesi çok zor, çok pahalı ya da kontrol edilmesi imkansız olan, üründe farklılığa ya da varyansın artmasına neden olan faktörlerdir. Bunlar deneyde faktör olarak tanımlanmayan fakat çıktı üzerindeki etkisi olabilecek ve çıktı üzerinde değişkenliğe yol açabilecek bağımsız değişkenlerdir. Ürün üzerindeki varyansın azaltılarak hedef değerde üretimin gerçekleştirilebilmesi için, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin ürünün performansını nasıl etkilediklerinin deney tasarımı yöntemiyle araştırılması gerekir. Bu araştırmalarda, ürün tasarımının varyasyon yaratan faktörlere karşı duyarsız yani robust hale getirilmesi amaçlanır. Başka bir deyişle varyasyona neden olan faktörlerin ürün ya da süreç üzerindeki etkisini en aza indirmek, böylelikle bu faktörlere karşı üretim prosesini robust yapmaktır. Robust üretim prosesinin oluşturulabilmesi için, kontrol edilebilen faktörlerin seviyelerinin öyle ayarlanması gerekir ki belirlenen seviyeler kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini en aza indirebilsin.

Robust bir tasarım için ilk önce, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin, çıktı değişkeninin ve hedef değerin belirlenmesi gerekmektedir (Abate, 1995). Kontrol edilemeyen faktörler; ürünün kullanım ortamındaki sıcaklık, nemlilik, rüzgar, gürültü, toz, titreşim, ürün aşınması, özelliğini kaybetmesi, hammadde ve bileşenlerinin toleransındaki değişiklik vb. gibi kontrol edilmesi zor olan veya olanaklı olmayan değişkenlerdir (Taguchi, Wu, 1989). Bunlar performans değerleri üzerinde bozucu etkiye sahiptirler. Bu faktörlerin seviyeleri bir üründen diğerine, bir çevreden diğerine, bir andan diğerine göre değişir. Phadke (1989)'ye göre kontrol edilemeyen faktörlerin gerçek değeri değil, sadece istatistiksel karakteristikleri

bilinir. Bu nedenle performans değişkenliğine neden olan önemli kontrol edilemeyen faktörler bulunup ortadan kaldırılamaz. Bunun yerine ürünü kontrol edilemeyen değişkenlere daha duyarsız hale getirmek için kontrol edilebilen değişkenlerin değerlerinde ayarlamalar yapılır. Kontrol edilemeyen faktörlere içsel ve dışsal olarak iki grupta toplanabilir. Ürün hem iç ve dış, hem de birimden birime olan değişkenliklere karşı dayanıklı olarak tasarlanmalıdır. Bu amaçla kontrol edilebilen faktörlerin seviyelerinin farklı kombinasyonlarında ürün performansının değeri araştırılır. Böyle bir çalışma sonucu ürünlerin tasarımı, robust tasarım olarak adlandırılır (Aytekin, 2010).

Taguchi yönteminde, kontrol edilebilen faktörlerin farklı seviyelerinin karşılaştırılıp en uygun faktör-seviye kombinasyonunun seçilmesini sağlamak için performans istatistiği değerlendirme metodu kullanılır (Şanyılmaz, 2006). Performans istatistiklerinden bir tanesi S/N (Sinyal/Gürültü) olarak adlandırılan ortalamanın standart sapmaya oranını veren istatistiktir. Kontrol edilemeyen faktörleri tam olarak ölçmek çok zor veya imkansız olduğundan Taguchi S/N oranını hesaplarken yaklaşık fonksiyonlar kullanmakta ve performans karakteristiğinin olması istenilen durumlara göre S/N oranı geliştirmektedir (Şanyılmaz, 2006). S/N oranı değeri; küçük değer iyi, büyük değer iyi ve nominal değer iyi gibi kalite değerinin hedeflendiği değere göre değişik fonksiyonlarla hesaplanır ve analiz edilir. Değerlendirmede hangi S/N oranı fonksiyonu kullanılırsa kullanılsın sonuç olarak deneyde ele alınan faktörlerin seviyeleri içerisinde en yüksek S/N oranına sahip olan değer en iyi performansı verecektir. Ayrıca varyans analizi (ANOVA) ile hangi faktörün ne kadar önem derecesine sahip olduğuna hesaplanarak istatistiksel güvenilirlik sağlanmış olur. Böylece gerek S/N oranı gerekse varyans analizi yardımı ile faktörlerin optimum performansa ulaştıracak kombinasyonu tespit edilmiş olur. (Savaşkan, 2004). Başka bir deyişle sistem robust hale getirilmiş olur.

## **2.5. Deney Tasarım Türleri**

Üretimde kullanılan deney tasarım metotları, ürün üzerine etki eden faktörlerin en iyi kombinasyonunu bulmak üzere çeşitli yöntemler kullanarak geliştirilmiştir. İlk

zamanlarda her defasında bir faktörün seviyesi değiştirilip diğerleri sabit tutularak faktörlerin etkisi incelenmiştir. Daha sonraları Fisher birçok faktörün etkisinin aynı anda gözlemlenmesinin önemli avantajlar sağlayacağına işaret ederek faktöriyel deneylerin gelişmesine öncülük etmiştir.

Mühendisler tarafından pratikte sıklıkla kullanılan deneysel stratejilerden biri en iyi tahmin yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda mühendis çalıştığı sistem hakkında sahip olduğu teknik bilgisine ve deneyimine dayanarak en iyi kombinasyonu oluşturacak faktörleri ve bunların seviyelerini belirler. Ancak bu yöntemin bazı dezavantajları vardır. Bunlardan biri sezgisel olarak seçilen faktörlerin ve bu faktörlerin seviyelerinin başlangıç için istenilen sonuçları vermemesi olur ki bu durumda farklı bir tahmin yaklaşımı geliştirilmek zorundadır. Ayrıca uzun bir süre başarı garantisi olmaksızın deneylere devam etmek zorunda kalınabilir. Yöntemin başka bir dezavantajı ise başlangıç için uygun bir kombinasyon bulunmuş olunmasına karşılık bu sonucun en iyi sonuç olduğunun garantisinin olmamasıdır.

Literatürde geçen bir başka yaklaşım da bir kerede bir faktör yaklaşımıdır. Bu yaklaşım klasik deney tasarımı yaklaşımları içerisinde en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. Bu yaklaşımda, her bir deneyde faktörlerden birinin seviyesinde değişiklik yapıp diğer faktörlerin seviyeleri sabit tutularak ürün veya süreç performansında ortaya çıkan değişkenlik izlenir. Böylelikle her bir faktörün çıktı üzerine olan etkisi ayrı ayrı araştırılmış olur. Bir kerede bir faktör yaklaşımının en önemli dezavantajı faktörler arasında olabilecek etkileşimi göz ardı etmesidir. Etkileşim, bir faktörün, diğer bir faktörün farklı seviyelerinde çıktı değişkeni üzerinde aynı etkiyi sağlayamamasıdır (Montgomery, 2001). Bu durumda sağlıklı analiz sonuçları elde edebilmek için gerekli olan şart, faktörler arasında hiçbir etkileşimin olmamasıdır. Yani herhangi bir faktörün seviyesinin çıktı değeri üzerinde gösterdiği etkinin, diğer bir faktörün seviyesine bağlı olmamasıdır (Aytekin, 2010). Bir çok faktörün ve bu faktörlerin iki ve daha fazla seviyelerinin bulunduğu bir deneyde tüm faktörlerin bütün seviyeleri ve birbirleriyle olan etkileşimi incelenmek istenildiğinde ortaya bir kombinasyon problemi çıkacaktır. Deney tasarımında  $n$  faktör sayısını,  $k$  da seviye sayısını gösterebilir; bu durumda  $k^n$  tane deney yapmak gerekecektir. Bu yaklaşım sonucu ortaya çıkan deneyler faktöriyel deneyler olarak

adlandırılmaktadır. Faktöriyel deneyler birçok faktörün birlikte gözlemlenebilmesi ve etkileşimlerinin de göz önünde bulundurulması nedeniyle daha etkili sonuçlar verir.

Faktöriyel deneyler sayesinde birden çok faktörün değişik seviyeleri aynı anda incelenebilir, bir faktörün etkisinin diğer faktörlerin değişik seviyelerinde nasıl sonuçlara neden olduğu ve faktörler arasında karşılıklı etkileşim olup olmadığı ortaya çıkarılabilir. Faktöriyel deneyler sayesinde deneye etki eden faktörler arasında etkileşim olmasa bile, faktörler değişik şartlarda denediklerinden sonuçlar daha güvenilir ve daha geniş uygulama alanına sahip olmaktadır (Montgomery, 2001). Araştırmalarda çoğu kez birbiriyle ilişkili olmayan konuların belli bir özelliğe olan etkileri inceleme konusu olmuştur. Bu araştırmalarda bir faktörün ürün üzerindeki etkisinin yanında başka bir faktörle etkileşim içinde olup olmadığı da merak konusu olmuştur. Bu tip problemler özellikle son ürünü etkileme olasılığı yüksek olan pek çok kimyasal işlemin söz konusu olduğu proses endüstrisinde daha sık ortaya çıkmaktadır (Montgomery, 2001). Bu alanlarda kullanılacak deney tasarım yöntemlerinde etkileşimin göz önünde bulundurulduğu faktöriyel tasarımlar tercih edilmelidir.

## 2.6. Deney Tasarımında Önemli Noktalar

*“Bir deneyi tasarlamamanın en iyi zamanı o bittikten sonradır. En kötü zamanı ise başlangıçta çok az bilginizin olduğu zamandır”*

Bir deneyin planlanması ve tasarlanması en az onun uygulanması ve sonuçlarının yorumlanması kadar önemlidir. İyi planlama ve tasarlama deneysel tasarım teknikleri ile ilgili bilgi sahibi olmayı, prensipleri bilmeyi gerektirir. Fakat hepsinden önce çok dikkatli bir düşünme ve detaylı bir hazırlık gerektirir. İyi tasarımın alternatifi olamaz. Tasarım sürecinde ilgilenilmeyen sorunlar ya da daha kötüsü tasarım sürecinde ortaya çıkan sorunlar daha sonra asla tam olarak ortadan kaldırılamaz ve sonuç olarak da yanlış veya kararsız neticelere yol açabilirler (Boddy ve Smith, 2010). Bu bölümde deney tasarımında yapılan yanlışlar ve bu bilgiler doğrultusunda bir

deneyin planlanmasında, tasarlanmasında, uygulanmasında ve analiz edilmesinde gerekli olan ve göz önünde bulundurulması gereken noktalar irdelenecektir.

### **2.6.1. Deney Tasarımında En Çok Yapılan Yanlışlar**

Bir deneyin tasarımında içinde bulunulan süreçle ilgili bilgi eksikliğinden dolayı karar vermede bazı yanlışlıklar yapılması doğaldır. Ancak deney tasarımıyla ilgili bilgi eksikliğinden ortaya çıkabilecek hataların mümkün olduğunca olmadan engellenmesi gerekir. Aşağıda deney tasarımında en çok yapılan 23 yanlış sıralanmıştır (Boddy ve Smith, 2010) :

1. Bir seferde bir çıktı değişkeninin incelenmesi,
2. Bir seferde bir faktörün incelenmesi,
3. Etkileşim olasılıklarının göz ardı edilmesi,
4. Faktörlere ait sınırların çok küçük aralıklarda belirlenmesi,
5. Her zaman iyi çıktılar almak üzere tasarım yapılması ( Çok kötü olmamak kaydıyla zayıf (kötü) çıktılar da iyi bilgi sunabilir),
6. Gürültü faktörlerinin göz önünde bulundurulmaması,
7. Araştırma kapsamında o an için söz konusu olmayan süreç değişkenlerinin göz ardı edilmesi,
8. Bütün düzeylerde deneylerin başarıyla gerçekleştirileceğinin varsayılması,
9. Deneyin basitlikten ziyade kompleks olduğuna inanılması,
10. Hangi faktörlerin önemli olduğunu bilmeksizin deney tasarlanması,
11. Deneyimlerin uygun bir şekilde sıralanamaması (ki bu önemli bir etki gibi görünen çıktı değişkeninde bir zaman trendine yol açabilir),
12. Deneyin aşırı derecede tasarlanması ki böylece çok az sayıda deneyle çok sayıda faktörün araştırılması. Böylelikle sonuçların geçerliliği üzerinde tekrar bir sağlama yapma imkanının bulunmaması,
13. Araştırmacının kendine aşırı güvenmesi ve böylece bir deneyde optimum sonuca ulaşabileceğini düşünmesi. (Deneyi tasarlarken mutlaka sistematik bir yaklaşım kullanılmalıdır )

14. Faktörlerin düzeyleriyle çok fazla oynama yapılması,
15. Deneyden önce operasyonel personele danışılmaması,
16. Talimatları anlayamayan operatörlerin bulunması,
17. Talimatları yerine getiremeyen işçilerin bulunması,
18. Talimatları izlemeyi istemeye isteksiz olan işçilerin varlığı,
19. Yanlış gittiği açıkça ortadayken deneye devam edilmesi,
20. Veride aykırı/sapan değer olduğunun göz ardı edilmesi,
21. Sadece araştırmacının teorisine uymadığı için bazı gözlemlerin aykırı oldukları bahanesiyle dışarıda bırakılması,
22. Verinin grafiklerle incelenememesi ve anormal çıkan şekillerin araştırılmaması,
23. Parametreleri altta yatan etkilere değil de hatalara uydurmak yoluyla verilere çok fazla faktör ve etkileşim katılması.

### **2.6.2. Deneyin Başlangıcında Düşünülmesi Gereken Noktalar**

Bir deneye başlamadan önce deneyin amaçları çok açık ve net bir şekilde ifade edilmelidir. Deneye başlamadan önce mutlaka “Bu deneyin amacı nedir/ Bu deneyle ne amaçlanmaktadır” sorusu cevaplanmalıdır.

Deney tasarımı ve deney yapılacak konu ile ilgili daha önce yapılanlar ve literatür çok iyi bir şekilde incelenmelidir. Daha önceki deneyimler tasarım için oldukça faydalı olacaktır ancak incelenen deneylerin yapılacak deneyle ilgili olduğundan emin olunmalı ve daha önce geçerli olan şartların yapılacak deney için de geçerliliğini koruyup korumadığına dikkat edilmelidir.

Deneyi yürütecek veya deney konusuyla ilgili olan personelle mutlaka görüşülmeli ve fikirleri alınmalıdır (Boddy ve Smith, 2010).



### 2.6.3. Fikirlerin Geliştirilmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Yapılacak deneyle ilgili fikirler geliştirilirken aşağıdaki sorulara cevap aranmalıdır:

- Nasıl\ hangi tür bir deney yapılması gerekiyor?
  - Herhangi bir ürünün herhangi bir özelliğini değiştirmek amacıyla faktörlerin önemini araştırarak bir deney mi?
  - Faktörlerin asıl araştırma konusu olmadığı bir optimizasyon deneyi mi?
  - Ya da ürün kalitesinin herhangi bir spesifikasyona uyumunun uygun olup olmadığını araştıran ve bunun için faktörlerin düzeylerindeki değişimlerin araştırıldığı bir sağlamlık deneyi mi?
- Faktörler nelerdir?
- Her faktör için hangi aralık araştırılmalıdır?
- Hangi etkileşimler önemli olabilir?
- Hata kaynakları nelerdir ve onların muhtemel büyüklüğü ne olabilir?

### 2.6.4. Deney Tasarımının Oluşturulmasında Önemli Olan Noktalar

Bir deneye başlamadan önce belirlenen amaçlar, deney türü, değişken sayısı, değişkenlerin düzeyi ve etkileşimler göz önünde bulundurularak bir deney tasarım metodunun geliştirilmesi gerekir. Geliştirilecek tasarımda aşağıdaki sorulara yanıt aranmalıdır:

- Faktörler sürekli değişkenler midir (ısı ve zaman gibi) yoksa nitel değişkenler midir (makine ve uygulanan yöntem gibi). Eğer nitel değişkenler ise kaç uygulama yapılması gerekir?
- Hammaddenin aşınması, araştırma ve zaman faktörleriyle ilgisi olmayan önemli süreç değişkenleri gibi kontrol edilemeyen faktörler ile ilgili ne yapılabilir? Kontrol edilemeyen faktörler ilgilenebilmek için aşağıda tercih sırasına göre bazı yöntemler sunulmuştur:
  - Kontrol ederek değişmemelerini sağlamak,

- Bu değişkenleri bloklar halinde dengelemek (böylece etkileri yok edilebilir ve öngörülen etkilerde taraflılığa yol açılmamış olur),
  - Bu değişkenleri ölçerek etkilerini yok etmek,
  - Bütün deneyler boyunca kontrol edilemeyen değişkenlerin rasgele olduğundan emin olmak.
- Hangi çıktılar ölçülecek?
  - Tasarımda kaç tane faktörün yer alması gerekmektedir?
  - Araştırmanın doğru sonuçlar vermesi için plot deneylere gerek var mıdır?
  - Etkilerin önemli olduğunu gösterebilmek için kaç tane deney yapılması gerekmektedir?
  - Artık Standart Sapması (RSD)'nin minimum yapılması ve bir tarafın öne çıkmasının engellenmesi için deneylerin hangi sırayla yapılması gerekmektedir?

#### **2.6.5. Deneyin Yürütülmesi Aşamasında Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar**

- Deney planı operatörlerin onları kolayca uygulayabilmesi için çok fazla karmaşık mı?
- Operatörlerin üzerindeki yükü azaltmak için deneylerin sırasının değiştirilmesine gerek var mı?
- Eğer deney çalışmazsa ya da aykırı değerler verirse hangi prosedür kabul edilmelidir, onun yerine farklı düzeylerde başka bir deney mi konulmalıdır, deneyin tekrarlanmasına gerek var mıdır ya da deney durdurulmalı mıdır?

### 3. DENEYLERİN TASARLANMASI

#### 3.1. Faktöriyel Deney Tasarımları

Faktöriyel deney tasarımları, ürün üzerinde etkisi olduğu düşünülen faktörlerin etkilerinin ve birbirleriyle olan etkileşimlerinin tahmin edilmesine olanak sağlayan oldukça etkili deney düzenleridir. Bu nedenle uygulamada geniş bir alana sahiptir. Faktöriyel deney tasarımları, çok sayıdaki faktörün ikiden fazla seviyelerinin bir arada incelenmesine ve olası tüm faktör kombinasyonlarının elde edilmesine imkan verir. Böylelikle bir ürün ya da süreci etkileyen en önemli faktörlerin bulunmasını sağlar. Faktöriyel deney tasarımları mühendislik deneylerinde en çok kullanılan tasarımlardandır.

Faktöriyel deney tasarımları içerdikleri faktör sayısına göre 2-3-4... faktörlü, içerdikleri faktör seviyesine göre de 2-3-4... düzeyli olarak adlandırılırlar. 3 faktörün ve her bir faktörün 2 farklı düzeyinin bulunduğu bir faktöriyel deney düzeni “ $2^3$  faktöriyel deney” olarak gösterilir ve adlandırılır. Bu gösterimden de anlaşılacağı üzere faktör sayısının ve/veya seviyesinin artmasıyla birlikte yapılacak deney sayısı da hızlı bir şekilde artacaktır. Bu durum zaman ve maliyetleri de artıracığından faktöriyel deney tasarımları tam faktöriyel deney tasarımları ve kesirli faktöriyel deney tasarımları olarak ikiye ayrılır. Bu deneyler ve özellikleri bu bölümde alt başlıklar halinde anlatılacaktır.

#### 3.2. Tam Faktöriyel Deney Tasarımları

Faktörlerin her birinin etkilerinin ve etkileşimlerinin tahmin edilmesi ve değerlendirilmesi yönüyle en etkili deney tasarımlarıdır. Tam faktöriyel deney tasarımlarında gerekli deney sayısı faktör sayısı ve seviyesine bağlı olduğundan bu tasarımlar az sayıda faktör söz konusu olduğunda tercih edilirler. Tam faktöriyel deney düzenlerinde her faktörün her seviyesinden eşit sayıda deney gerçekleştirilir. Bu durum dengeli tasarım olarak adlandırılır.

### 3.2.1. 2<sup>2</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımları

İki seviyeli iki faktör için kullanılan deney türüdür. Bu tasarımın gerçekleşebilmesi için  $2^2=4$  deney yapılması gerekecektir. Yapılan deney sonucunda A ve B gibi iki faktörün ana etkisi ile bu faktörlerin etkileşimi (bundan sonra AB olarak gösterilecektir) tahmin edilebilir. Yani 4 deney ile  $4-1=3$  tahmin yapılabilir. 2 seviyeli deneylerde düşük seviye 1 veya (-) ile, yüksek seviye ise 2 veya (+) ile gösterilir.

2<sup>2</sup> tam faktöriyel bir deneyin nasıl tasarlanacağını, sonuçlara nasıl ulaşılacağını, sonuçların nasıl değerlendirileceğini, faktörler arası etkileşimin ne anlama geldiğini daha iyi anlatabilmek için Boddy ve Smith (2010) tarafından verilen bir örneği inceleyeceğiz.

Bir petrol şirketinin en iyi yakıt tasarrufunu sağlayacak bir benzin formülasyonu geliştirmek istediğini bunun için de geçmiş tecrübeler ve bilgilere dayanarak yakıt tasarrufunda etkili olacağı düşünülen 2 faktör belirlediğini varsayalım. Bu faktörlerden biri kullanılacak benzin türü diğeri de sürtünme düzenleyicisinin oranı olsun. Şirket geçmiş tecrübelerine dayanarak mineral ve sentetik olmak üzere 2 baz yağ türünü sürtünme düzenleyicisinin % 0.3 ve % 0.6 oranlarında denemeye karar versin.

1. Aşamada baz yağların etkisini tahmin etmek için iki baz yağı % 0.3 oranında sürtünme düzenleyicisi ile denemeye karar verilsin ve her karışım için 4 deney yapılsın. Galon başına kaç pb yakıt tasarrufu elde edildiğini gösteren deney sonuçları Çizelge 3.1'deki gibi olsun:

**Çizelge 3.1.** Baz yağı türüne göre ortalama yakıt tasarrufu (sürtünme düzenleyicisinin % 0.3 oranıyla)

	<b>Mineral</b>	<b>Sentetik</b>
	34.5	35.7
	35.1	35.2
	35.3	36.1
	34.9	35.8
<b>Ortalama</b>	34.95	35.70
<b>Standart Sapma</b>	0.342	0.374

Şirket, birçoğumuzun da yapacağı gibi bir yaklaşımla deneye başlar ve elde ettiği değerler de bir anlam ifade eder. Sürtünme düzenleyicisinin % 0.3 oranında mineral yerine sentetik baz yağ kullanarak galon başına 0.75 pb (35.70-34.95) tasarruf sağlanabilir. Bu değer anlamlı olup olmadığını test edecek olursak;

n=8 (8 deney gerçekleştirilmiştir)

n<30 olduğu için t dağılımı kullanılır (n>30 olduğunda normal dağılım kullanılır)

t testi uygulandığında;

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_{\Delta x}}$$
$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\frac{(\sigma_1)^2}{n_1} + \frac{(\sigma_2)^2}{n_2}}$$

Formülde;

$\bar{x}_1$ : Mineral baz yağa ait örnek ortalaması,

$\bar{x}_2$ : Sentetik baz yağa ait örnek ortalaması,

$\sigma_1$ : Mineral baz yağ verilerine ait Standart Sapma,

$\sigma_2$ : Sentetik baz yağ verilerine ait Standart Sapma,

$n_1$ : Mineral baz yağa ait deney sayısı,

$n_2$  : Sentetik baz yağa ait deney sayısı olmak üzere;

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\frac{(\sigma_1)^2}{n_1} + \frac{(\sigma_2)^2}{n_2}} = \sigma_{\Delta x} = \sqrt{\frac{(0.342)^2}{4} + \frac{(0.374)^2}{4}} = 0.253$$

$$z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma_{\Delta x}} = z = \frac{34,95 - 35,70}{0.253} = -2,96$$

$$\text{Serbestlik derecesi} = n_1 + n_2 - 2 = 4 + 4 - 2$$

Serbestlik derecesi = 6 % 95 güvenilirlikte;

2.96 test değeri 6 serbestlik derecesi (sd) ile tablo değeri= 2.45 (t-tablosu için bakınız EK 1)

Test değeri tablo değerinden büyük yani  $2.45 < 2.96$  olduğundan mineral yağ ile sentetik yağın ortalamaları arasındaki farkın anlamlı olduğu kabul edilir. Dolayısıyla % 0.95 güven düzeyinde sentetik baz yağının mineral baz yağından daha büyük yakıt tasarrufu sağladığı söylenebilir.

Bu sonuçtan sonra şirket daha iyi yakıt tasarrufu sağlayan sentetik baz yağının sürtünme düzenleyicisinin % 0.6 oranıyla nasıl sonuçlar verdiğini araştırmak istediğinde bunun için %0.6 oranında 4 deney daha gerçekleştirmesi gerekmiştir ve deney sonuçları Çizelge 3.2'deki gibidir:

**Çizelge 3.2.** Sürtünme düzenleyicisinin oranına göre ortalama yakıt tasarrufu (Sentetik baz yağı ile)

	Sürtünme Katsayısı	
	% 0.3	% 0.6
	35.7	36.6
	35.2	35.8
	36.1	36.1
	35.8	36.5
<b>Ortalama</b>	35.70	36.25
<b>Standart Sapma</b>	0.374	0.370

Elde edilen sonuçlar % 0.6 düzenleyici oranıyla daha fazla yakıt tasarrufu elde edileceğini gösterse de sonuçların güvenilirliği için yapılacak test sonucunda bu sonucun anlamlı olmadığı sonucu elde edilir (%95 güvenlilikte 6 sd ile t-testi sonucu tablo değeri 2.09 ve  $2.09 < 2.45$ ).

Bu durumda sonuçlar tekrardan gözden geçirilecek olursa;

Baz yağı etkisi = Sentetik kullan. ort. yakıt tasarrufu - Mineral kullan. ort. yakıt tasarrufu

$$= 35.70 - 34.95$$

$$= 0.75 \text{ mpg}$$

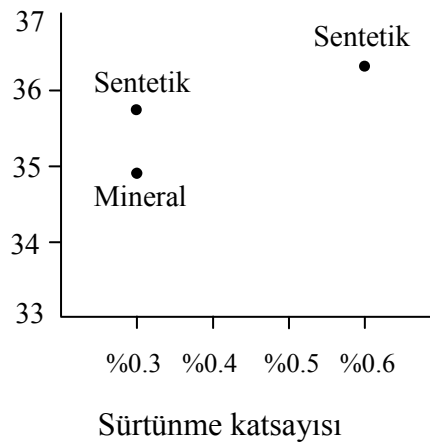
Bu farkın anlamlı olduğu test bilgisine dayanarak bu etki için % 95 güven aralığı oluşturulacak olursa;

$$\text{Baz yağı etkisi için \%95 güven aralığı} = (\bar{x}_B - \bar{x}_A) \pm ts \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}}$$

$$= (35.70 - 34.95) \pm \left( 2.45 \times 0.358 \times \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{4}} \right) = 0.75 \pm 0.62$$

Buradan; sentetik yağ kullanılarak galon başına 0.13 pb ile 1.37 pb arasında yakıt tasarrufu elde edilebileceği ortaya çıkmış olur. Şirketin toplamda yapmış olduğu 12 deneyin sonuçları grafiğe aktarıldığında karşımıza Şekil 3.1' deki gibi bir grafik çıkacaktır.

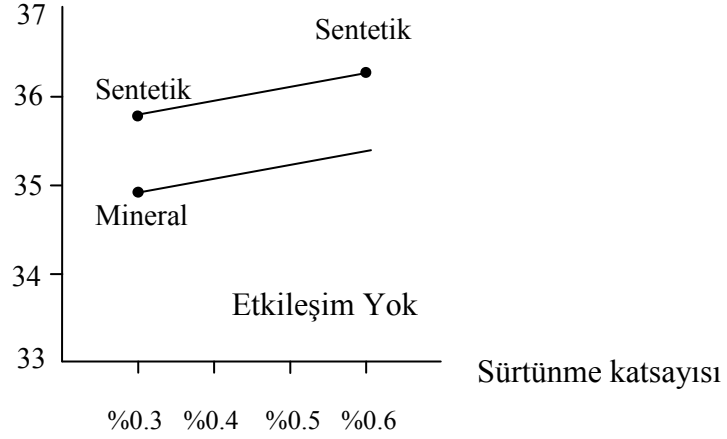
Yakıt tasarrufu (mpg)



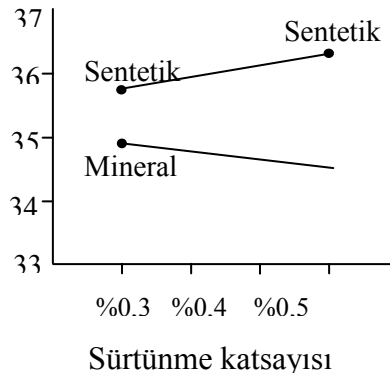
Şekil 3.1. Deneylerin 1. ve 2. Aşamalarına Ait Veriler

Mineral baz yağın % 0.6 ile nasıl sonuçlar vereceğini öğrenmek istenildiğinde ise elde edilen deney sonuçları ile oluşturulacak grafik, Şekil 3.2' deki gibi olası 3 duruma sahip olacaktır:

Yakıt tasarrufu (mpg)

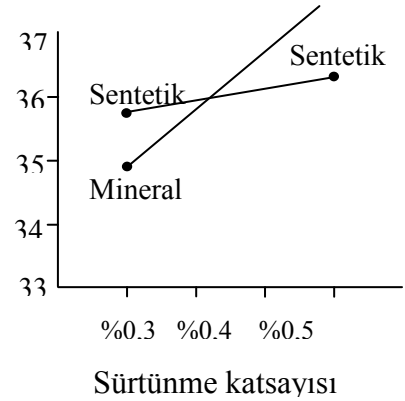


Yakıt tasarrufu (mpg)



Etkileşim Var

Yakıt tasarrufu (mpg)



Etkileşim Var

**Şekil 3.2.** Sürtünme Katsayısı ve Baz Yağ Türünün Yakıt Tasarrufu İle İlişkisi

Yanıt üzerinde etkisi olan bir faktörün etkileşime neden olması başka bir bağımsız faktörün düzeyine bağlıdır. Başka bir ifadeyle bir faktörün yanıt değişkenine olan etkisi başka bir faktörün hangi düzeyde olduğuna bağlı ise iki faktör arasında etkileşim var demektir. Etkileşim doğal bir sonuçtur ve etkileşim varsa bunun tespiti



ve tahmin edilmesi oldukça önemlidir. Ancak belki bir çoğumuzun da sezgisel olarak ilerleyeceği gibi şirketin yapmış olduğu deney düzeniyle (bir kerede bir faktör deneyerek) etkileşimlerin ortaya çıkması imkansızdır. Faktöriyel tasarımlar ise etki ve etkileşimlerin tahmin edilmesini sağladığı için söz konusu problemdeki iki faktörün tüm kombinasyonlarını çalıştırabilecek bir faktöriyel deney tasarlamak gerekecektir. Probleme ait faktöriyel düzen Çizelge 3.3’ deki gibi olacaktır;

**Çizelge 3.3.** Basit bir faktöriyel deney tasarımı

Baz Yağ Türü	Sürtünme Katsayısı	
	% 0.3	% 0.6
Mineral	XX	XX
Sentetik	XX	XX

Burada şirket tarafından her bir kombinasyon için 2 tekrar olacak şekilde 8 deney yapıldığını ve deney sonuçlarının Çizelge 3.4’deki gibi olduğunu varsayalım.

**Çizelge 3.4.**  $2^2$  Faktöriyel Deneyin Ortalama Yakıt Tasarrufuna Ait Sonuçları

Baz Yağ Türü	Sürtünme Katsayısı	
	% 0.3	% 0.6
<b>Mineral</b>	34.8	36.7
	35.1	37.2
<b>Sentetik</b>	35.5	36.4
	35.9	36.1

Etki ve etkileşimleri daha net görebilmek için veriler Çizelge 3.5’deki gibi düzenlensin;

**Çizelge 3.5.** Satır, sütun ve hücre ortalamaları

Baz yağı	Sürtünme katsayısı		
	%0.3	%0.6	Ortalama
Mineral	34.95	36.95	35.95
Sentetik	35.70	36.25	35.97
Ortalama	35.32	36.60	35.96

Karşılaştırılan satır ortalamaları:

$$\begin{aligned} \text{Baz yağı etkisi} &= \text{sentetik kullanıldığında ortalama yakıt tasarrufu} - \text{mineral} \\ &\text{kullanıldığında ortalama yakıt tasarrufu} \\ &= 35.97 - 35.95 \\ &= 0.02 \text{ mpg.} \end{aligned}$$

Karşılaştırılan sütun ortalamaları:

$$\begin{aligned} \text{Sürtünme katsayısı etkisi} \\ &= \text{yüksek sürtünme katsayısı yüzdesinde yakıt tasarrufu} \\ &- \text{düşük sürtünme katsayısı yüzdesinde yakıt tasarrufu} \\ &= 36.60 - 35.32 \\ &= 1.28 \text{ mpg.} \end{aligned}$$

Genel olarak;

$$\begin{aligned} \text{Bir faktörün ortalama etkisi} &= \\ \text{Faktörün yüksek düzeyde ortalama tepkisi} \\ &- \text{Faktörün düşük düzeyde ortalama tepkisi} \end{aligned}$$

Tabloda ortalamaları incelediğimizde sürtünme düzenleyicisinin düzeyi % 0.3'den % 0.6'ya çıkarıldığında eğer mineral yağ kullanılmışsa yakıt tasarrufu 2 pb iken sentetik yağ kullanılmışsa bu değer 0.75 pb olmaktadır. Yani sürtünme katsayısının

yakıt tasarrufuna etkisi kullanılan yağa göre değişmektedir. Bu durum bize bu iki değişken arasında etkileşim olduğunu göstermektedir. Genel olarak;

$$\text{Etkileşim} = \frac{1}{2} [(B'nin yüksek düzeyinde A faktörünün etkisi) - (B'nin düşük düzeyinde A faktörünün etkisi)]$$

Etkileşim için başka ve daha pratik yol, çapraz ortalamalar arasındaki farkı bulmaktır. Çizelge 3.6'dan bakacak olursak;

**Çizelge 3.6.** Hücre ve köşegen ortalamaları

Baz yağı	Sürtünme katsayısı		
	%0.3	%0.6	
			<b>36.32</b>
Mineral	34.95	36.95	35.95
Sentetik	35.70	36.25	35.97
			<b>35.60</b>

Böylece 4 deney sonucu elde ettiğimiz etki değerleri;

- Baz yağ etkisi = 0.02,
- Düzenleyicinin etkisi = 1.28,
- Baz yağ x Düzenleyici etkileşimi = 0.72

Bu sonuçları yorumlayacak olursak;

- Baz yağ türünün değişimi ortalama yakıt tasarrufunda 0.02 pb' lik etkiye sahiptir.
- Sürtünme düzenleyicisinin katsayısının seviyelerinin değişimi ise 1.28 pb' lik etkiye sahiptir.

- Baz yağ türü ile düzenleyici arasında bir etkileşim var ve bu durum yukarıdaki iki sonucu tek başlarına yanıltıcı ve değersiz kılar. Bir etkileşim olduğunda faktörlerin ortalama etkilerini tek başına değerlendirmek anlamsız olur.

Buraya kadarki kısımda etkilerin ve etkileşimlerin nasıl hesaplandığı bilgisine sahip olduk. Fakat elde edilen bilgilerin ya da tahminlerin kesinliğinin hesaplanması gereklidir. Bu hesaplama için güven aralığı hesaplamak dolayısıyla artık standart sapması (Rsd) değerini bulmak gerekecektir. Rsd hesabının nasıl yapılacağını yakıt tasarrufu sağlama örneğindeki verileri kullanarak gösterecek olursak;

$$RSD = \frac{(34.8 - 34.95)^2 + (35.1 - 34.95)^2}{2 - 1} = 0.212$$

Benzer şekilde diğer kombinasyonlar için Rsd hesapladığımızda sonuçlar çizelge 3.7'deki gibi olacaktır;

**Çizelge 3.7.** Hücre standart sapması

Baz yağı	Sürtünme katsayısı	
	%0.3	%0.6
Mineral	0.212	0.354
Sentetik	0.283	0.212

Elde ettiğimiz standart sapma değerlerini birleştirdiğimizde;

Birleştirilmiş standart sapma:

$$= \sqrt{\frac{\sum(df \times s^2)}{\sum(df)}}$$

$$= \sqrt{\frac{(1 \times 0.212^2) + (1 \times 0.283^2) + (1 \times 0.354^2) + (1 \times 0.212^2)}{1 + 1 + 1 + 1}}$$

= 0.272 dört serbestlik derecesine göre

2 seviyeli bir faktöriyel deneyde herhangi bir etki için güven aralığı;

$$Etki \pm \frac{2ts}{\sqrt{n}}$$

Burada;

$n$ =Deneydeki toplam deneme sayısı,

$s$ = Rsd değeri,

$t = s$  gibi aynı derece serbestlik dağılımından elde edilen değer olmak üzere;

%95 güvenlilikte t test değeri=2.78 dir.

$$Etki \pm \frac{2ts}{\sqrt{n}} = \frac{2 \times 2.78 \times 0.272}{\sqrt{8}} \\ = 0.53$$

Baz yağın etkisi için Güven Aralığı;  $0.02 \pm 0.53$

Sürtünme katsayısı etkisi için Güven Aralığı;  $1.28 \pm 0.53$

Etkileşim etkisi için Güven Aralığı;  $-0.72 \pm 0.53$

Örnekte verilen petrol şirketinde deneme yanılma yoluyla yapılan deney sonuçları ile faktöriyel deney tasarımı sonuçlarını karşılaştıracak olursak;

I. Deney;

- Bir defada bir faktör,
- 12 Deney,
- 2 ana etki tahmini,
- Herbir tahminin hassasiyeti 8 deneye dayanmaktadır,
- Etkileşim tahmini yok

II. Deney;

- 8 Deney,
- 2 ana etki ve 1 etkileşim tahmini,
- Tüm tahminlerin hassasiyeti 8 deneye dayanmaktadır.

Bu karşılaştırma ile de görüleceği üzere faktöriyel deney tasarımları kullanılarak daha az çalışma ile aynı hassasiyette daha fazla etki tahmin edilebilir. Bununla birlikte faktöriyel deney düzenleri dengeli bir deney olanağı sağlamaktadır.

Şirket basit bir faktöriyel deney tasarlayarak 4 farklı deneyle 2 faktörün etkisini ve bu faktörlerin etkileşim değerlerini hesaplama olanağına kavuşmuştur. Ayrıca deneyde elde edilen diğer sonuçlar şöyle olmuştur;

- En iyi yakıt tasarrufu; % 0.6 sürtünme katsayısında mineral yağ kullanılarak sağlanmıştır.
- Deney yapılan aracın motoru her deney tekrarından önce yıkanarak kontrol edilemeyen faktörlerin (örn; hava, toz vs) etkisi azaltılmıştır.
- Deneyler tekrarlanmamıştır (sonucun daha güvenilir olması için deney tekrarı önemli olmakla birlikte şart değildir)
- Diğer olası başka tepkiler incelenmemiştir (% 0.6 sürtünme katsayısı ile mineral yağ kullanımı belki aşırı aşınmaya neden olacaktır vs. Böyle bir durumu göz ardı etmemek daha doğru olacaktır)

### 3.2.2. $2^3$ Tam Faktöriyel Deney Tasarımları

2 seviyeli deneyler düşük maliyetle çok sayıda faktörün aynı anda incelenmesini sağlayan basit ve etkili tasarımlardır. 3 faktörün yer aldığı bir faktöriyel deney tasarımında  $2^3 = 8$  kombinasyon oluşur. 4 faktörün yer aldığı bir faktöriyel deney tasarımında ise bu sayı  $2^4 = 16$  olacaktır. Bu nedenle 3 faktörlü deneylere  $L_8$ , 4 faktörlü deneylere de  $L_{16}$  deneyleri denmektedir.  $L_8$  ve  $L_{16}$  deneylerinin nasıl tasarlandığı ve bu deneylerde etki hesabının nasıl yapılması gerektiği Boddy ve Smith (2010) tarafından verilen bir örnek üzerinden kolay ve pratik yollarla anlatılacaktır.

Her yıl milyonlarca transistör üreten bir firma, üretilen transistörlerdeki % 45 hatalı ürün yüzdesini iyileştirmek istemektedir. Bunun için Ar&Ge mühendisi tarafından, transistör hatasına neden olan faktörlerin hangi üretim aşamasından kaynaklandığı araştırılmıştır. Yapılan inceleme sonucunda hataların ana kaynağının elektro kaplamayla uygulanan kalay yüzey kalınlığından kaynaklandığı ortaya çıkmıştır. Bu kalınlığın 600-900 µm arasında olması gerektiği bunun üzerindeki kalınlıkların transistör hatasına neden olduğu görülmüştür. Ar&Ge mühendisi, kaplama sürecinde bazı iyileştirmeler yapılarak hatalı ürün yüzdesinin azaltılabileceğini düşünmektedir. Süreçle ilgili yapmış olduğu daha detaylı çalışma sonucunda kaplama sürecinde 3 faktörün etkili olduğunu görmüştür.

Bunlar;

- Banyo sıcaklığı,
- Kalay yoğunluğu,
- Akım seviyesidir.

Ar&Ge mühendisi 2 düzey 3 faktörlü bir deney tasarlayacaktır. Deneyde incelenecek faktörler ve düzeyleri çizelge 3.8' deki gibidir:

**Çizelge 3.8.** Faktörler ve Faktör Düzeyleri

<b>Değişken</b>	<b>Düşük Düzey</b>	<b>Yüksek Düzey</b>
Akım Değeri (A)	40 A	50 A
Banyo Sıcaklığı (B)	25°C	30°C
Kalay Yoğunluğu (C)	28g/kg	32 g/kg

Deney sonuçları Çizelge 3.9' daki gibidir;

**Çizelge 3.9.** Faktör Düzeyleri İçin Deney Sonuçları

A	Düşük C		Yüksek C	
	Düşük B	Yüksek B	Düşük B	Yüksek B
Düşük	46.3	44.1	21.4	22.7
Yüksek	36.2	36.4	40.8	39.3

Elde edilen deney sonuçları kullanılarak ana etki ve etkileşimler hesaplanması gerekecektir. Hesaplamanın nasıl yapıldığını göstermek için B ve C faktörlerinin etki değerleri ile bunlara ait etkileşim yani BC etki değerinin nasıl hesaplandığını örnek olarak gösterecek olursak;

Bir değişkenin temel etkisi : Değişkenin yüksek seviyede ortalama tepkisi –  
Değişkenin düşük seviyede ortalama tepkisi

$$\begin{aligned} \text{B'nin etkisi} &= \frac{44.1+36.4+22.7+39.3}{4} - \frac{46.3+36.2+21.4+40.8}{4} \\ &= 35.625 - 36.175 = - 0.55 \end{aligned}$$

$$\text{C'nin etkisi} = 31.05 - 40.75 = - 9.70$$

$$\text{BC'nin etkileşimi} = 36.125 - 35.675 = 0.45$$

Etkileşim hesabının yapılması bu yöntemle oldukça karmaşıktır. Örneğin BC etkileşim değeri hesaplanırken B ve C faktörlerinin her ikisinin de yüksek düzeylerinde ortalama değerleri ile her ikisinin de düşük düzeylerindeki ortalama değerlerinin ortalamasından, birinin yüksek diğerinin düşük olduğu durumlardaki ortalama değerlerin ortalamaları farkının alınması sonucu elde edilecektir. Yani;

$$\text{BC'nin etkileşimi} = ((B^+C^+)_{\text{ort.}}(B^-C^-)_{\text{ort.}})_{\text{ort.}} - ((B^+C^-)_{\text{ort.}}(B^-C^+)_{\text{ort.}})_{\text{ort.}}$$

B ve C için tüm kombinasyonlar Çizelge 3.10'daki tabloda gösterilmiştir;



**Çizelge 3.10.** B ve C Faktörleri İçin Deney Kombinasyonlarına Ait Sonuçlar

	Kalay Konsantrasyonu (C)		
	Düşük	Yüksek	Ortalama
Banyo Sıcaklığı (B)			<b>35.675</b>
Düşük	41.25	31.1	36.175
Yüksek	40.25	31.0	35.625
Ortalama	40.75	31.05	<b>36.125</b>

Bu çizelgenin kullanımı 2 faktör için etkili bir yöntem olmasına karşılık faktör sayısı 2' den fazla olduğunda etkinliği azalmaktadır. Örneğin; tabloda ABC etkileşimi hesaplayabilmek için A' nın düşük seviyesinde BC etkileşimini ve A' nın yüksek seviyesinde BC etkileşimini bulmamız gerekecektir. Bu hesap ise biraz karmaşık olabilir. Bu yüzden ikiden fazla faktör bulunan deneylerde “tasarım matrisi” tablosunu kullanmak daha faydalı olacaktır.

### 3.2.2.1. Tasarım Matrisi Yöntemi

Tasarım matrisi uygulaması için, daha önce elde edilen deney sonuçlarının Çizelge 3.11' deki gibi düzenlenmesi gerekecektir. Deney sonuçları ve faktörlerin düzeyleri birer sütunda gösterilecektir.

**Çizelge 3.11.** 2<sup>3</sup> Deneyler İçin Tasarım ve Sonuçlar

Akım (A)	Banyo Sıcaklığı (B)	Kalay Konsantrasyonu (C)	Hata %
40	25	28	46.3
50	25	28	36.2
40	30	28	44.1
50	30	28	36.4

**Çizelge 3.11. (devam)**

40	25	32	21.4
50	25	32	40.8
40	30	32	22.7
50	30	32	39.3

Deney sonuçları yukarıdaki gibi bir tabloya dönüştürüldüğünde şunu açıkça görebiliyoruz ki; A faktörü bir yüksek, bir düşük değerle, B faktörü 2 yüksek 2 düşük değerle, C faktörü ise 4 yüksek 4 düşük değerle tabloya yerleştirilmiştir. Bu yerleşim tüm  $2^3$  deneyleri için aynı olacaktır. Bundan sonraki aşamada daha genel bir görüntü verebilmek için düşük değerlerin (-) yüksek değerlerin ise (+) ile gösterildiği matris için standart düzenlemeye gidilecektir. Aşağıdaki tabloda bu düzen görülmektedir.

**Çizelge 3.12.  $2^3$  Deneyler İçin Standart Tasarım Matrisi Düzeni**

A	B	C	Hata %
-	-	-	46.3
+	-	-	36.2
-	+	-	44.1
+	+	-	36.4
-	-	+	21.4
+	-	+	40.8
-	+	+	22.7
+	+	+	39.3

Bu tabloda, örneğin C faktörünün etkisini hesaplayacak olursak bunun anlamı şu olacaktır; C' nin yüksek değerlerine karşılık gelen hatalı ürün yüzdelerinin ortalaması ile C' nin düşük değerlerine karşılık gelen hatalı ürün yüzdelerinin ortalamasının farkı.

Yani;

$$\begin{aligned} & \left( \frac{21.4 + 40.8 + 22.7 + 39.3}{4} \right) - \left( \frac{46.3 + 36.2 + 44.1 + 36.4}{4} \right) \\ & = 31.05 - 40.75 \\ & = -9.70 \end{aligned}$$

Şimdiye kadarki kısım işaretlemeler dışında bize yeni bir şey vermemiştir fakat matris tasarımının yararı aynı yolla etkileşimlerin hesaplanmasına izin vermesidir. Etkileşim hesabı yapabilmek için yeni bir matris tasarımına ihtiyaç olacaktır. Örneğin AB etkileşimini ele alacak olursak, AB etkileşim matrisi için Çizelge 3.13'deki gibi bir tablo ortaya çıkacaktır.

**Çizelge 3.13.** AB Etkileşimi İçin Tasarım Matrisi

A	B	
	-	+
-	+	-
+	-	+

Etkileşim tablosu oluşturulurken A ve B faktörleri için düşük (-) ve yüksek (+) işaretlemeleri yapıldıktan sonra iç kısımdaki değerlerin hangilerinin düşük ya da yüksek olacağına karar verilir. Bu karar negatif ve pozitif değerlerin birbiriyle çarpımı sonucu elde edilen değerlere benzer.

Yani;

- Düşük (-) X Yüksek (+) = (-),
- Düşük (-) X Düşük (-) = (+),
- Yüksek (+) X Yüksek (+) = (+),

sonucunu verecektir.

Benzer şekilde 3 faktör ve etkileşimleri için bir tablo oluşturulacak olursa şöyle bir matris elde edilir;

**Çizelge 3.14.** 2<sup>3</sup> Deneyle İçin Matris Analizi

A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Hata %
-	-	+	-	+	+	-	46.3
+	-	-	-	-	+	+	36.2
-	+	-	-	+	-	+	44.1
+	+	+	-	-	-	-	36.4
-	-	+	+	-	-	+	21.4
+	-	-	+	+	-	-	40.8
-	+	-	+	-	+	-	22.7
+	+	+	+	+	+	+	39.3

Bu tabloda etkileşimleri hesaplamak çok kolay olacaktır. Örneğin, AC etkileşimi hesaplanacak olursa;

$$\begin{aligned}
 \text{Etkileşim}_{AC} &= \text{AC'nin yüksek değerlerinin ortalaması} \\
 &\quad - \text{AC'nin düşük değerlerinin ortalaması} \\
 &= \frac{46.3+44.1+40.8+39.3}{4} - \frac{36.2+36.4+21.4+22.7}{4} \\
 &= 13.45
 \end{aligned}$$

Benzer şekilde ana etkiler ve etkileşimler hesaplandığında sonuçlar çizelge 3.15' deki gibi olacaktır:

**Çizelge 3.15.** Etki ve Etkileşim Tahminleri ve Güven Aralıkları

Etki	Değer	%95 Güven Aralığı
A	4.55	±2.02
B	-0.55	±2.02
AB	-0.10	±2.02
C	-9.70	±2.02
AC	13.45	±2.02
BC	0.45	±2.02
ABC	-1.30	±2.02

Genel Ortalama: 35.9

Standart sapma; deney sonuçları kullanılarak, mevcut verileri çoğaltarak veya geçmiş üretim verilerini kullanarak üç farklı veri setine dayanarak hesaplanabilir. Örneğin bu kısımda standart sapması 1.4 olan geçmiş 30 üretim kaydına dayanarak güven aralığı oluşturulduğu varsayalım. Bu durumda 2.04 t tablo değeri (29 sd ile %95 güvenilirlikte) ile etki değerleri için %95 güven aralığı;

$$\begin{aligned} Etki \pm \frac{2ts}{\sqrt{n}} &= Etki \pm \frac{2 \times 2.04 \times 1.4}{\sqrt{8}} \\ &= Etki \pm 2.02 \text{ olacaktır.} \end{aligned}$$

Bu tabloda %95 güven aralıkları da verilmiştir. Sonuçlar %95 güven aralığıyla değerlendirildiğinde A ve C faktörlerinin etkileri ile AC etkileşiminin önemli olduğu diğerlerinin ise ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir.

İki düzey 3 faktörlü ( $2^3$ )  $L_8$  deneyleri için standart deney düzeneği Çizelge 3.16' daki gibi olacaktır:

**Çizelge 3.16.** L<sub>8</sub> Tasarım Matrisi

ETKİLER						
ANA ETKİLER			ETKİLEŞİMLER			
A	B	C	AB	AC	BC	ABC
-	-	-	+	+	+	-
-	-	+	+	-	-	+
-	+	-	-	+	-	+
-	+	+	-	-	+	-
+	-	-	-	-	+	+
+	-	+	-	+	-	-
+	+	-	+	-	-	-
+	+	+	+	+	+	+

### 3.2.2.2. Tahmin Değerlerinin Hesaplanması

Çizelge 3.15’de elde edilen değerler sonucunda A ve C faktörlerinin etki ve etkileşim tahminlerine ait değerlerin önemli olduğu görülmektedir. Bu sonuç doğrultusunda A ve C faktörleri için 4 kombinasyon söz konusu olacaktır. Bunlar; A<sup>+</sup> C<sup>+</sup>, A<sup>+</sup> C<sup>-</sup>, A<sup>-</sup> C<sup>-</sup>, A<sup>-</sup> C<sup>+</sup>’ dir. Burada yüksek düzey ile düşük düzey için etkileşim düzeyi düşük olacaktır. Başka bir deyişle A<sup>+</sup>C<sup>-</sup> için AC<sup>-</sup>’ dir. Yüksek ve düşük düzeylerdeki yanıtların ortalaması arasındaki fark da ortalama yanıt değerini verecektir. Tahmin değerleri şu şekilde elde edilir:

Tahmin Değeri

$$\begin{aligned} &= \text{Genel Ortalama} + 1/2 (\text{A faktörünün etkisi} \\ &\quad - \text{C faktörünün etkisi} - \text{AC'nin etkileşimi}) \\ &= 35.90 + 1/2(4.55 - (-9.70) - 13.45) = 36.30 \end{aligned}$$

Benzer şekilde A ve C faktörlerinin tüm kombinasyonları için tahmin değerleri hesaplandığında sonuçlar Çizelge 3.17’ deki gibi olacaktır;

**Çizelge 3.17.** Tahmin Değerleri ve Artıklar

A	C	Tahmin Değerleri ±G.Aralığı	Gerçekleşen Değerler	Kalanlar/Artıklar
Düşük	Düşük	45.20±2.0	46.3-44.1	+1.10/-1.10
Yüksek	Düşük	36.30±2.0	36.2-36.4	-0.10/+0.10
Düşük	Yüksek	22.05±2.0	21.4-22.7	-0.65/+0.65
Yüksek	Yüksek	40.05±2.0	40.8-39.3	+0.75/-0.75

Tahmin değerleri için güven aralığı aşağıdaki formülden yararlanılarak oluşturulur:

$$Tahmin\ Değeri \pm ts \sqrt{\frac{q+1}{n}}$$

Burada q önemli olduğu tahmin edilen A, C ve AC etki değerlerinden dolayı 3 olacaktır.

Tablodaki sonuçlara bakıldığında gerçek sonuçların güven aralıkları içerisinde ve bunun %95 güvenilirlikte olduğu görülmektedir. Bu durumda en iyi hatalı ürün yüzdesini veren kombinasyon, akımın düşük düzeyinde (40 A) kalay yoğunluğunun yüksek düzeyiyle (32 gr) elde edilir.

### 3.2.3. 2<sup>4</sup> Tam Faktöriyel Deney Tasarımları

Transistör örneğine geri dönülecek olursa; şirket yapılan deneyin sonucundan memnun olmakla birlikte transistörlerin kaplama banyosunda geçirdiği sürenin de transistör hatasına neden olabileceğini düşünerek banyoda kalma süresini dördüncü bir faktör olarak belirlesin. Yapılacak 16 deneyin ilk 8' inde 8 dakikalık bekleme süresi, sonraki 8 denemede de 10 dakikalık bir bekleme süresi oluşturulsun. 2<sup>4</sup> tam faktöriyel tasarım elde edilirken 2<sup>3</sup> tam faktöriyel deney düzeninden faydalanılır. A, B ve C faktörlerinde 8 deney içeren 2<sup>3</sup> tam faktöriyel deneylerin tasarımı 2 kez tekrarlanarak 16 deney içerek hale getirilir. D faktörü için de ilk 8 deney (-) sonraki 8

deney (+) olacak şekilde tasarım matrisine yerleştirilir.  $2^4$  tam faktöriyel bir deneyde, 4 tane ana etki, 6 tane 2 faktörlü etkileşim, 4 tane 3 faktörlü etkileşim, 1 tane de 4 faktörlü etkileşim bulunur. Transistör örneği için  $2^4$  tam faktöriyel tasarım matrisi Çizelge 3.18' deki gibi olacaktır:

**Çizelge 3.18.**  $2^4$  Tam Faktöriyel Deney Tasarımı

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>% Hatalı</b>
-	-	-	-	46.3
+	-	-	-	36.2
-	+	-	-	44.1
+	+	-	-	36.4
-	-	+	-	21.4
+	-	+	-	40.8
-	+	+	-	22.7
+	+	+	-	39.3
-	-	-	+	41.7
+	-	-	+	33.4
-	+	-	+	41.2
+	+	-	+	34.8
-	-	+	+	18.9
+	-	+	+	36.2
-	+	+	+	19.7
+	+	+	+	37.0

Tahmini etki değerleri Çizelge 3.19' daki gibidir:



**Çizelge 3.19.**  $2^4$  Deneyi İçin Tahmini Etkiler

Etki	Tahmin	Etki	Tahmin
A	4.76	D	-3.04
B	0.04	AD	0.21
AB	0.19	BD	0.59
C	-9.76	ABD	0.29
AC	12.89	CD	-0.06
BC	0.31	ACD	-0.56
ABC	-0.89	BCD	-0.14
		ABCD	0.41

İki düzey dört faktörlü ( $2^4$ )  $L_{16}$  deneyleri için standart deney düzeneği Çizelge 3.20’deki gibidir:

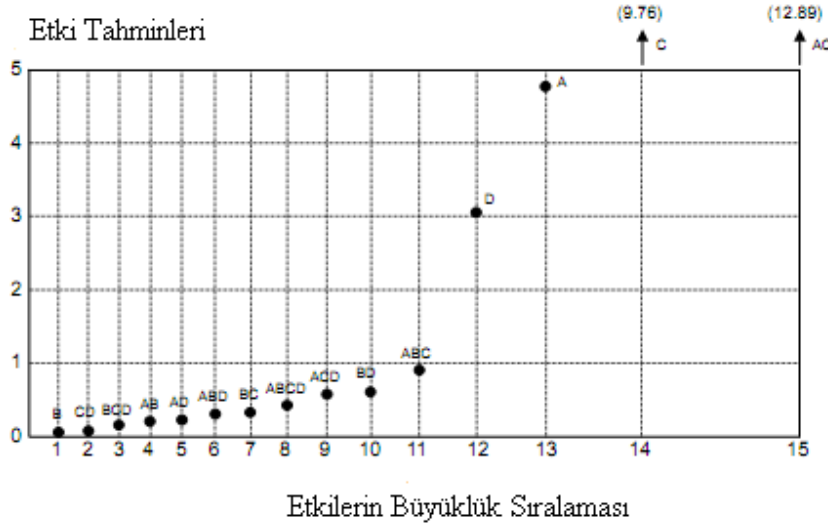
**Çizelge 3.20.**  $L_{16}$  Deney Deseni (Kaynak: Şirvancı, M. (1997) )

Std.Sıra	ANA FAKTÖRLER				ETKİLEŞİMLER										
	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
1	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
2	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
3	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
4	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
5	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
6	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
7	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
8	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
9	+	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
10	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+
11	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+
12	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-
13	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	+
14	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-
15	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-
16	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Kolon No															

### 3.2.3.1. Yarı-Normal Çizim

Faktöriyel deneyler için yarı –normal çizim güçlü bir tanı yöntemidir. Etki tahminleri işareti yok sayılarak küçükten büyüğe yarı-normal olasılık çizgisi üzerine yerleştirilir. Adından da anlaşılacağı gibi yarı-normal çizim normal dağılım grafiğinin yarısının ölçek olarak kullanılmasıyla elde edilir. Çizimde rasgele değişimlere sahip etkiler düz bir çizgi üzerinde toplanır. Önemli olan etkiler ise bu doğrusallık içinde yer almaz. Transistör örneğinde, en düşük etki 0.04 ile B faktörüne, en yüksek etki ise 12.89 ile AC etkileşimine aittir.

Çizelge 3.19’ da verilen etkiler için, yarı-normal çizim Şekil 3.3’ deki gibidir:



Şekil 3.3. Yarı-Normal Çizim

Şekilde en düşük etkiye sahip 11 değer düz bir çizgi üzerinde yer alırken D, A, C ve AC etkileri bu değerlerden ayrılır. Artık standart sapması hesaplanırken serbestlik derecesi 11 olacaktır.

$$RSD = \sqrt{\frac{n \sum (\text{Etki Tahminleri})^2}{4 \text{ Etki Sayısı}}}$$



20 Üç faktörlü etkileşim;	ABC, ABD, ...
15 Dört faktörlü etkileşim;	ABCD, ABCE, ....
6 Beş faktörlü etkileşim;	ABCDE, ABCDF,...
1 Altı faktörlü etkileşim;	ABCDEF

Hesap edilecektir. Böyle bir deneyde 64 deneyin 42 tanesi 3 ve daha fazla faktörlü etkileşim hesabı içermektedir. Yani yapılan deneylerin çoğu 3 ve daha fazla faktörün etkileşimlerinin belirlenmesi içindir. Ancak bu tür etkileşimler ya hiç söz konusu olmaz ya da ihmal edilebilir düzeydedir.  $2^6$  deney, hem çok büyük hem de çok fazla etki hesabına yol açacağından sadece ihtiyaç duyulan bölümlere ait deneyleri gerçekleştirmek daha anlamlı olacaktır. Tam faktöriyel bir deneyin bazı kısımlarının seçilerek elde edilen tasarımlar kesirli faktöriyel deney tasarımı olarak adlandırılır. Böylelikle zamandan ve maliyetten tasarruf edilmiş olur. Ancak bu tasarımlarda ana etki ile etkileşimler birbirine karıştırılmış olur bu nedenle de etkiler birbirinden ayrı olarak tahmin edilemez.

### 3.3.1. Kesirli Tasarım Elde Etmek

Kesirli tasarımların nasıl elde edileceğini daha iyi anlamak için basit bir örnek üzerinden açıklama yapılacaktır. Profesyonel bir bisikletçinin (bundan sonra yarışmacı olarak anılacaktır) bir millik bir mesafede tur atarak yarışacağını varsayalım. Yarışmacı yarıştan önce yarıştaki hızını etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin en iyi kombinasyonunu bulmak istesin. Bunun için yarışmacı, koltuk yüksekliği (A), gidon yüksekliği (B) ve lastik basıncı (C) gibi hızını etkileyeceğini düşündüğü 3 faktör belirlesin. Yarışmacının böylelikle  $2^3$  yani 8 deney yapması gerekecektir fakat bunlardan 4 tanesini yapmaya karar versin ve elde ettiği deney sonuçları Çizelge 3.21' deki gibi olsun;

**Çizelge 3.21.**  $2^3$  Kesirli Deneyler İçin 1. Üç Yönlü Tablo

A	Düşük B		Yüksek B	
	Düşük C	Yüksek C	Düşük C	Yüksek C
Düşük		123.2	123.6	
Yüksek		127.2		128.4

Çizelge 3.21’ deki verileri Çizelge 3.22’ deki gibi bir matris diyagramına aktarılacak olursa;

**Çizelge 3.22.**  $\frac{1}{2} (2^3)$  Kesirli Deneyler İçin 1. Matris Analizi

A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Y
-	+	-	-	+	-	+	123.6
+	+	+	+	+	+	+	128.4
+	-	-	+	+	-	-	127.2
-	-	+	+	-	-	+	123.2

Çizelge 3.22’ deki değerlere bakıldığında deneyin tasarımının dengeli olmadığı görülür. Örneğin, C faktörünün etkisini tahmin ederken C sütununda 3 (+)’ ya karşılık 1 (-) olduğu görülmektedir. Dengeli bir tasarımda bunların birbirine eşit olması gerekir yani her bir faktörün her bir seviyesindeki deney sayıları birbirine eşit olmalıdır. Deneyin dengeli olmaması etkilerin hesabına engel olmayacaktır fakat tam faktöriyel deneylerdeki işlem kolaylığı burada yakalanamayacaktır. Bu nedenle öncelikle deneyin dengeli hale getirilmesi için çalışılmalıdır. Ancak unutulmamalıdır ki  $2^3$  standart matris tasarımında 4 deneyde 2 (+) 2 (-) işaretlerini içeren satır ve sütunların elde edilmesi olanaksızdır. 4 deneyle  $2^3$  deney tasarımının bütün faydalarını beklemek oldukça iyimser bir yaklaşım olacaktır.

Bu noktada deneyi daha dengeli hale getirebilmek için üç ana etkinin dengeli olmasını sağlayacak bir deney tasarlanmalıdır. Dengeli bir deney tasarımını sağlayacak bir tasarım matrisi Çizelge 3.23’ deki oluşturulabilir:

**Çizelge 3.23.**  $\frac{1}{2}$  ( $2^3$ ) Kesirli Deneyler İçin 2. Matris Analizi

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>	<i>y</i>
-	+	-	-	+	-	+	123.6
+	+	+	+	+	+	+	128.4
+	-	-	+	+	-	-	127.2
-	-	+	-	+	+	-	124.8

**Çizelge 3.24.**  $2^3$  Kesirli Deneyler İçin 2. Üç Yönlü Tablo

<i>A</i>	<i>Düşük B</i>		<i>Yüksek B</i>	
	<i>Düşük C</i>	<i>Yüksek C</i>	<i>Düşük C</i>	<i>Yüksek C</i>
<i>Düşük</i>	124.8		123.6	
<i>Yüksek</i>		127.2		128.4

Tasarım matrisi tablosunu kullanarak şu tahminleri yapmak mümkündür:

- A faktörünün etkisi: 3.6
- B faktörünün etkisi: 0
- C faktörünün etkisi: 3.6
- AB’ nin etkileşimi: 1.2
- AC’ nin etkileşimi: ?
- BC’ nin etkileşimi: 1,2
- ABC’ nin etkileşimi: 0

Bu değerler dikkatli bir Şekilde incelendiğinde Şu çıkarımlarda bulunmak mümkündür:

- AC etkileşim değeri hesaplanamaz.
- Bütün tahmin değerlerinden ikişer tane vardır. Yani iftler halindedir (rneğin, A' nın etkisi ile C' nin etkisi aynı değere sahiptir)
- B faktörünün etkisi ile ABC etkileşiminin tahmin değeri sıfırdır. Yani B faktörünün etkisinin veya ABC etkileşiminin olmadığı tahmin edilmektedir.

ıkan bu sonuçlar tesadüf değildir başka bir deyişle kesirli bir tasarım elde etmenin yollarından biri; iŐaretlerinin hepsinin aynı olduğu dolayısıyla etkisi tahmin edilemeyen bir sütunun mutlaka olması gerekliliğidir (AC sütununda olduğu gibi).

Tahmin değerlerinin aynı olduğu çiftlerde faktörlerin etkileri birbirinden ayrılamaz. Yani, A faktörünün ve C faktörünün ana etkileri 3.6 sn gibi bir değerdir. Ancak bu 3.6 sn' lik zaman deęiŐiminin koltuk yüksekliğinden mi, lastik basıncından mı yoksa her ikisinin deęiŐiminden mi kaynaklandığı bilinemez.

Mevcut matris düzenini biraz daha etkili hale getirmek için yeni bir tasarım oluşturulacak olursa bu tasarımda Şunu yapmak akıllıca olacaktır; kesirli bir tasarım elde etmek için iŐaretlerinin aynı olduğu yani etkisini tahmin edemeyeceğimiz bir sütun olması gerekiyorsa bu sütun etkisi olmayan ya da çok az olan faktöre ait sütundan oluşturulabilir. Bu durumda, daha önceki verilerde etkileşim değeri 0 çıkan B faktörüne veya ABC etkileşimine ait sütunlardan birinin iŐaretlerinin hepsi aynı yapılabilir. B faktörü ana etki olduğu için ABC etkileşim sütunu aynı iŐaretlerden oluŐacak Şekilde yeni bir tasarım matrisi oluŐturulduęunda izelge 3.25' deki gibi tablo elde edilecektir:

**Çizelge 3.25.**  $\frac{1}{2}$  ( $2^3$ ) Kesirli Deneyler İçin 3. Matris Analizi

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>	<i>y</i>
-	+	-	-	+	-	+	123.6
+	+	+	+	+	+	+	128.4
-	-	+	+	-	-	+	123.2
+	-	-	-	-	+	+	128.0

**Çizelge 3.26.**  $2^3$  Kesirli Deneyler İçin 3. Üç Yönlü Tablo

<i>A</i>	<i>Düşük B</i>		<i>Yüksek B</i>	
	<i>Düşük C</i>	<i>Yüksek C</i>	<i>Düşük C</i>	<i>Yüksek C</i>
<i>Düşük</i>		123.2	123.6	
<i>Yüksek</i>	128.0			128.4

Oluşturulan matris düzeninde A ile BC' nin, B ile AC' nin, C ile de AB' nin aynı düzende olduğu görülmektedir. Bunun anlamı, bu çiftlerin etki değerlerinin aynı olacağı ve bu etkilerin birbirine karışacağıdır. Dolayısıyla da A faktörünün etkisini tahmin etmek için BC' nin, B faktörünün etkisini tahmin etmek için AC' nin, C faktörünün etkisini tahmin etmek için de AB' nin olmaması gerekirdi. Burada kesirli deneyleri anlatabilmek için  $2^3$  bir deney tasarımı kullanılmış olsa da kesirli faktöriyel deneylerin uygulamadaki etki ve etkileşim değerlerini ayırmak için yeterli değildir.

### 3.3.2. $\frac{1}{2}$ ( $2^4$ ) Kesirli Faktöriyel Deneylerin Tasarımı

Kesirli faktöriyel deneylerin uygulamadaki yararları 4 veya daha fazla faktör olan deneylerde daha kolay görülmektedir. 4 faktörlü iki seviyeli kesirli faktöriyel deneylerin nasıl tasarlandığını görmek için bisiklet yarışı örneğine geri dönecek olursa örnekte yarış hızını etkileyen yeni bir faktör olduğu varsayılarak örnek  $2^4$  şeklinde bir tasarım problemine dönüşecektir. Eklenen yeni faktörün tekerlek tipi olduğu varsayılınsın. Bunun için A ve B gibi 2 farklı tekerlek tipi olduğu kabul edilsin.



Burada tekerlek tipi nitel bir değişken olduğu için düşük seviye için tip A yüksek seviye için tip B belirlenebilir.

Kesirli faktöriyel deneyler bilindiği üzere bazı etkileşimlerin değerini göz ardı ederek deney sayısını azaltmaya yardımcı olur. Burada deneyi tasarlayan kişinin deneyimleri oldukça önemlidir. Çünkü tasarımcının, hangi faktörler arasında etkileşim beklenip hangilerinde etkileşim beklenmeyeceği bilgisiyle deneyin tasarım aşamasında, deneyde mutlaka olması gereken veya ihmal edilebilecek kombinasyonlara karar vermesi gerekebilir. Örneğin, bisiklet yarışında yarışmacı her bir faktörün ana etkisinin dışında A ile B faktörü, B ile C faktörü arasında bir etkileşim olabileceğini düşündüğünde elde edilecek deney tasarımı tamamen bu bilgilere göre şekillenecektir. Bu bölümde yarışmacı için bu varsayımları göz önünde bulundurarak  $1/2 (2^4)$  türünde kesirli bir faktöriyel tasarımının nasıl yapılacağı incelenecektir.

$1/2 (2^4)$  türünde kesirli bir faktöriyel deney 8 denemeyi içerecektir. Daha önceden de belirtildiği gibi kesirli faktöriyel deneyler tam faktöriyel deneylerin bazı bölümlerinin alınmasından elde edilmektedir. 8 denemeyi veren  $2^3$  tam faktöriyel bir deney düşünülüğünde;

- $2^3$  tam faktöriyel deneyden elde edilecek etki değerleri şunlardır;

A B C AB AC BC ABC

- Bu etkiler içinden yarışmacının varsayımlarına dayanarak önemli olan etkiler işaretlendiğinde;

A\* B\* C\* AB\* AC BC\* ABC

- Önemli olmadığı düşünölen etkilerden biri (AC veya ABC) D ile aynı etki tahmin değerine sahip çift yapılır (kesirli deneylerin tasarımında etkilerin tahmin değerinden ikişer tane vardır yani çiftler halindedir). Böylelikle seçilen etkileşimin değeri ihmal edilebilecek düzeyde olduğu için D' nin etkisi daha kolay elde edilebilecektir. Bu etkileşim 3 veya daha fazla faktörlü etkileşimlerin değeri büyük bir ihtimalle sıfır veya sıfıra yakın olacağı için ABC olarak seçilir.

- Kesirli tasarımlarda etkisi tahmin edilemeyen mutlaka bir etki/etkileşim değeri bulunacağından bu değer, etkileşimi imkansız olan ABCD olarak belirlenebilir.
- Her bir etki için aynı değere sahip çiftlerin belirlenmesi gerekir. Çiftler, etkisi tahmin edilemeyen etkileşim ile (örnekte yukarıdaki maddede ABCD olarak belirlediğimiz etkileşim) her bir faktörün çarpılmasıyla elde edilir. Çarpımda elde edilen karelerin yerine 1 yazılır. Örneğin, A faktörünün çifti;  $A*ABCD=A^2BCD=BCD$  dir. Bu şekilde elde edilen çiftler aşağıdaki gibidir;
  - $A^*$ , BCD
  - $B^*$ , ACD
  - $AB^*$ , CD
  - $C^*$ , ABD
  - AC, BD
  - $BC^*$ , AD
  - ABC,  $D^*$

Elde edilen çiftlerde etki değerinin tahmin edilmesi istenilenler (işaretili olanlar) aynı çift grubunda yer almamıştır. Bu istenilen bir durumdur çünkü böylelikle etkiler birbirine karışmayacaktır. Böylelikle elde edilen  $1/2 (2^4)$  deney tasarımı Çizelge 3.27' deki gibi olacaktır:

**Çizelge 3.27.**  $1/2 (2^4)$  Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımı ve Elde Edilen Sonuçlar

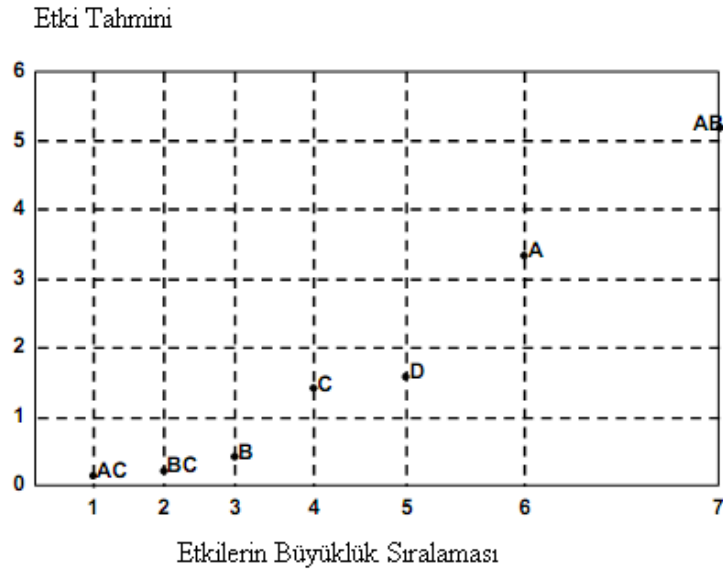
<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D=ABC</i>	<i>Süre</i>
-	-	-	-	122.3
+	-	-	+	129.4
-	+	-	+	126.1
+	+	-	-	126.0
-	-	+	+	122.1
+	-	+	-	132.0
-	+	+	-	129.5
+	+	+	+	125.9

Tablodan etki değerleri hesaplandığında elde edilen sonuçlar Çizelge 3.28’ deki gösterilmiştir;

**Çizelge 3.28.**  $1/2 (2^4)$  Kesirli Faktöriyel Deney Tasarım Matrisinden Elde Edilen Etkilerin Tahminleri

<i>Etki (Çifler)</i>	<i>Etki Değeri</i>
<i>A, BCD</i>	3.32
<i>B, ACD</i>	0.43
<i>AB, CD</i>	-5.17
<i>C, ABD</i>	1.43
<i>AC, BD</i>	-0.17
<i>BC, AD</i>	0.23
<i>ABC, D</i>	-1.58

Buradan da görülebileceği gibi en büyük etkiye sahip değerler A (ya da BCD) ve AB (ya da CD)’ dir. Elde edilen değerlerle  $1/2 (2^4)$  deney tasarımı için yarı-normal çizim gösterimi Şekil 3.4’ de verilmiştir:



**Şekil 3.4.**  $1/2 (2^4)$  Deney Tasarımı İçin Yarı-Normal Çizim

Şekilde açıkça A ve AB etkileşim değerlerinin diğer değerlerin çok üzerinde olduğu görülmektedir. A ve AB' nin etki değerleri çıkarılarak kalan 5 değer için standart sapma hesaplandığında sonuç 1.38 çıkacaktır. Her bir etki için güven aralığı  $\pm 2 \times 2.57 \times 1.38 \sqrt{8^{1/2}}$  elde edilir (Burada t test değeri 2.57, sd= 5, %95 güvenilirlikte). Böylece ana etki A ve etkileşim AB' nin önemli olduğu kabul edilir. A ve B için 4 kombinasyon olacaktır. Bunlar;  $A^+B^+$ ,  $A^+B^-$ ,  $A^-B^-$ ,  $A^-B^+$ . Bu durumlar için tahmin edilecek ortalama zamanlar Çizelge 3.29' daki gibidir:

**Çizelge 3.29.** A ve B faktörlerinin Seviyeleri İçin Ortalama Süreler

		Koltuk Yüksekliği (A)	
		Düşük	Yüksek
Gidon Yüksekliği (B)	Düşük	122.2	130.8
	Yüksek	127.8	126.0

Çıkan sonuçlara bakıldığında düşük koltuk seviyesi ile düşük gidon yüksekliği seviyesi en iyi süreyi veren kombinasyondur. Ancak en büyük etkileşim değeri de AB ye aittir. Yarışmacı aynı zamanda deneyden önce BC etkileşiminin de önemli olacağını düşünmüştür ancak bu varsayımda yanlış yapma olasılığı olabilir (BC etkileşim değeri çok küçük). En büyük etkileşim değeri (5.17) AB' ye de ait olabilir CD etkileşimine de (çift olduklarından etkiler karışmıştır ve ayrı olarak tahmin edilemez) ya da her ikisinin kombinasyonuna da ait olabilir.

Yarışmacı en iyi süreyi veren kombinasyonu 16 denemeden 8 tanesini yaparak elde etmiştir fakat etkileşimler hakkında varsayımlar kullandığı için sonuçlar kesin değildir.

Özetle, kesirli faktöriyel deneylerin tasarımlarında denemeler 16 veya daha fazlasına kadar genişleyebilir. Bunlar kolaylıkla tasarlanamayacağı için bu konuda geliştirilmiş aşağıda verilen tablolar veya bilgisayar programları kullanılabilir. Kesirli faktöriyel deneylerin en önemli özelliği tahmin sonuçlarının çiftler halinde olmasıdır. Eğer ki;

$(1/2)$  yerine  $(1/4)$  kesirli düzenler seçilirse bu sonuçlar çiftten ziyade grup olacaktır ve bir grupta 4 tane aynı değere sahip etki ortaya çıkacaktır.

$1/2$  ( $2^3$ ) kesirli deneyi için 4 deneme yapılır ve 4 deneme ile ancak 3 etki tahmin edilebileceğinden sadece 3 ana etki (A, B, C) elde edilir. Bu tasarımlarda üçlü etkileşime sahip olan ABC tahmin edilemeyen etki değeri olarak tasarlanır ve ABC kullanılarak çiftler bulunur. Üç değişkenli kesirli faktöriyel deney büyük bir tasarım gerektirmez ve bu deneylere ait tasarım matrisi Çizelge 3.30' daki gibidir:

**Çizelge 3.30.**  $1/2$  ( $2^3$ ) Kesirli Faktöriyel Deneyler İçin Tasarım Matrisi

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
-	-	-
+	-	+
-	+	+
+	+	-

$1/2$  ( $2^4$ ) deneyler 8 deneme gerektirir ve 7 etki tahmin edilmesine olanak verir. Bunlar genellikle 4 ana etki ve 3 iki faktörlü etkileşimlerdir. ABCD etkileşimi tahmin edilemeyen etkileşim olarak atanır.  $1/2$  ( $2^4$ ) kesirli faktöriyel için tasarım matrisi aşağıdaki gibidir:

**Çizelge 3.31.**  $1/2$  ( $2^4$ ) Kesirli Faktöriyel İçin Tasarım Matrisi

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
-	-	-	-
+	-	-	+
-	+	-	+
+	+	-	-
-	-	+	+

**Çizelge 3.31. (devam)**

+	-	+	-
-	+	+	-
+	+	+	+

Beş ve daha fazla faktörlü  $1/2$  kesirli deneyleri bütün ana etkilerin ve iki değişkenli etkileşimlerin tahmin edilmesine izin verir. 5 değişkenli  $1/2$  ve  $1/4$  deneyleri için ve  $1/4$  ( $2^6$ ) kesirli deneyler için kullanılabilir tasarım matrisleri Çizelge 3.32' deki gibidir:

**Çizelge 3.32.  $1/2$  ( $2^5$ ) Kesirli Deney Tasarım Matrisi**

<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
-	-	-	-	+
+	-	-	-	-
-	+	-	-	-
+	+	-	-	+
-	-	+	-	-
+	-	+	-	+
-	+	+	-	+
+	+	+	-	-
-	-	-	+	-
+	-	-	+	+
-	+	-	+	+
+	+	-	+	-
-	-	+	+	+
+	-	+	+	-
-	+	+	+	-
+	+	+	+	+

**Çizelge 3.33.**  $1/4 (2^5)$  Kesirli Deney Tasarım Matrisi

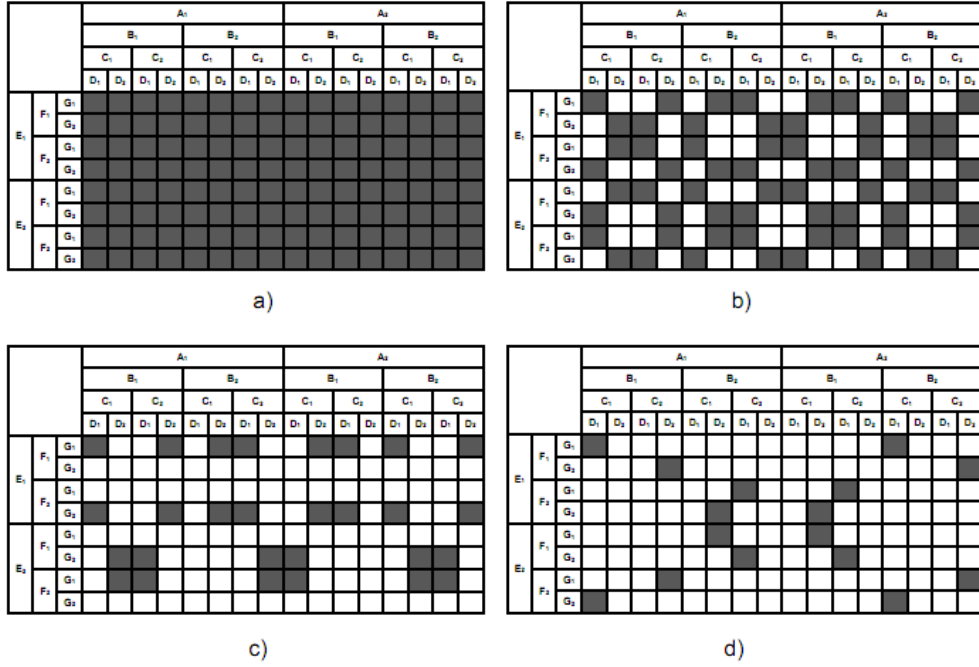
A	B	C	D	E
-	-	-	-	+
+	-	-	+	-
-	+	-	+	+
+	+	-	-	-
-	-	+	+	-
+	-	+	-	+
-	+	+	-	-
+	+	+	+	+

**Çizelge 3.34.**  $1/4 (2^6)$  Kesirli Deney Tasarım Matrisi

A	B	C	D	E	F
-	-	-	-	-	-
+	-	-	-	+	+
-	+	-	-	-	+
+	+	-	-	+	-
-	-	+	-	+	-
+	-	+	-	-	+
-	+	+	-	+	+
+	+	+	-	-	-
-	-	-	+	+	+
+	-	-	+	-	-
-	+	-	+	+	-
+	+	-	+	-	+
-	-	+	+	-	+
+	-	+	+	+	-
-	+	+	+	-	-
+	+	+	+	+	+

7 faktör iki düzeyli deneyler için çeşitli tasarımlar oluşturmak mümkündür. Örneğin, toplam 128 deney gerektiren tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi veya daha az sayıda deney içeren kesirli deney tasarımı yöntemleri kullanılabilir.  $2^7$  deneyler için Çizelge 3.35’ de gerçekleştirilecek deney tasarım türleri için ortaya çıkacak deneyler verilmiştir:

**Çizelge 3.35.**  $2^7$  Deneyler İçin Gerçekleştirilebilecek Deney Tasarım Türleri (Kaynak: Aytekin, 2010)



- (a) Tam faktöriyel bir tasarım uygulandığında yapılması gereken (toplam 128 deney) deneyleri,
- (b)  $1/2$  oranında kesirli faktöriyel tasarım uygulandığında yapılması gereken ( toplam 64 deney) deneyleri,
- (c)  $1/4$  kesirli faktöriyel tasarım için oluşan (toplam 32 deney) deneyleri,
- (d)  $1/8$  kesirli faktöriyel tasarım için oluşan (toplam 16 deney) deneyleri göstermektedir.



### 3.4. DOYMUŞ TASARIMLAR

Tam faktöriyel tasarımlar sayesinde faktörlerin ana etkilerinin ve etkileşimlerinin hepsinin değeri tahmin edilebilir. Ancak tam faktöriyel tasarımlar faktör sayısı arttıkça çok sayıda deney gerektirdiğinden deneyler içerisinde ihtiyaç duyulan bilginin elde edilmesini sağlayacak şekilde tam faktöriyel deneylerin uygun bir kesri elde edilmeye çalışılır. Kesirli faktöriyel tasarımların en ekonomik olanı en az sayıda deneyle bütün faktörlerin etkilerini tahmin etmeye olanak veren doymuş tasarımlardır. Doymuş tasarımlar, sadece faktörlerin ana etkilerini tahmin etmeyi sağlayacak kadar deney içerir.

Kesirli deneylerin bazıları, yalnızca ana etkilerin hesaplanmasına izin verir. Bu deneylerde etkileşim tahmini imkansızdır. Örneğin  $1/16$  ( $2^7$ ) bir kesirli deneyde 8 denemeyle 7 etki hesap edilmektedir. Bu 7 etki de faktörlerin ana etkilerine ait olmaktadır. Bu tür kesirli deneylere aşırı doymuş deney denilmektedir (Aytekin, 2010). Bu deneylerde yalnızca ana etkilerin hesabı mümkün olurken bu deneylerin maliyeti tam kesirli deneylere oranla oldukça düşüktür.

Doymuş tasarımların gösterildiği farklı metotlar bulunmakla birlikte tezde Plackett Burman tasarımı incelenecektir. Plackett Burman tasarımının temeli ve analizi Boddy ve Smith (2010)'e ait bir örnek üzerinde incelenecektir.

Bir petrol şirketi daha düşük yakıt tüketimi elde etmek için önemli olduğu düşünülen 7 bileşeni faktör olarak belirlemiştir:

Ek Paket	: $A_1$ veya $A_2$
Baz Yağ	: $B_1$ veya $B_2$
Pas Önleyici	: $C_1$ veya $C_2$
Deterjan	: $D_1$ veya $D_2$
Ester	: $E_1$ veya $E_2$
Sürtünme Düzenleyici	: $F_1$ veya $F_2$
Yapışkan Madde	: $G_1$ veya $G_2$

Mevcut yakıt  $A_1B_1C_1D_1E_1F_1G_1$  olarak belirlenmiştir. Yakıt tasarrufu sağlamak için 12 yakıt formülasyonu geliştirilerek elde edilen yakıtların denemesi yapılarak her bir yakıtın 100 km' de ne kadar tasarruf sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Plackett Burman deney tasarımına aktarılarak Çizelge 3.36' daki tasarım matrisi elde edilmiştir:

**Çizelge 3.36.** Yakıt Formülasyonları ve Bunlara Ait Yakıt Tüketimi Sonuçları

Formülasyon	A	B	C	D	E	F	G	Yakıt Tüketimi
1	$A_2$	$B_1$	$C_2$	$D_1$	$E_1$	$F_1$	$G_2$	11.76
2	$A_2$	$B_2$	$C_1$	$D_2$	$E_1$	$F_1$	$G_1$	11.37
3	$A_1$	$B_2$	$C_2$	$D_1$	$E_2$	$F_1$	$G_1$	11.91
4	$A_2$	$B_1$	$C_2$	$D_2$	$E_1$	$F_2$	$G_1$	12.11
5	$A_2$	$B_2$	$C_1$	$D_2$	$E_2$	$F_1$	$G_2$	11.32
6	$A_2$	$B_2$	$C_2$	$D_1$	$E_2$	$F_2$	$G_1$	12.02
7	$A_1$	$B_2$	$C_2$	$D_2$	$E_1$	$F_2$	$G_2$	12.62
8	$A_1$	$B_1$	$C_2$	$D_2$	$E_2$	$F_1$	$G_2$	12.11
9	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_2$	$E_2$	$F_2$	$G_1$	12.40
10	$A_2$	$B_1$	$C_1$	$D_1$	$E_2$	$F_2$	$G_2$	11.98
11	$A_1$	$B_2$	$C_1$	$D_1$	$E_1$	$F_2$	$G_2$	12.24
12	$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_1$	$E_1$	$F_1$	$G_1$	11.74

Bu şekilde 12 formülasyon için 12 deney yapılmıştır. Her bir satır her bir deneyi ve bu deneylerde denenen yakıtların formülasyonunu vermektedir (Örneğin 1. Satırda yer alan deneyde  $A_2B_1C_2D_1E_1F_1G_2$  denenecektir). 12 deney 11 etkiyi vereceğinden 7 faktöre ait sütunlara 4 sütun daha eklenir. Bunlar H-I-J-K sütunlarıdır. Böylelikle elde edilen tasarım matrisi Çizelge 3.37' deki gibi olacaktır:

**Çizelge 3.37.** 12 Deney İçin Tasarım Matrisi

Formülasyon	Faktörler							Artık Sütunlar				Yakıt Tüketimi
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	11.76
2	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	11.37
3	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	11.91
4	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	12.11
5	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	11.32
6	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	12.02
7	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	12.62
8	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	12.11
9	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	12.40
10	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	11.98
11	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	12.24
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.74

Bu tasarım matrisi 11 sütun 12 denemesi olan doymuş bir tasarımdır (2048 deney gerektiren  $2^{11}$  kesirli tasarımının özel bir halidir). Tasarımda her bir sütunda 6 (+) ve 6 (-) değer olduğu görülmektedir. Aynı zamanda herhangi iki sütun alındığında örneğin, A ve B gibi, A' nın 6 (+) değeri B' nin 3 (+) ve 3 (-) değerine ayrılır. Bu nedenle tasarım mükemmel derecede dengededir. Bunun anlamı, her bir etkinin diğer etkilerden bağımsız olarak tahmin edilebileceğidir. Tasarımda ilk olarak her bir bileşenin etkisi tahmin edilmeye çalışılmalıdır. Etki değerleri yakıt tüketimi verileri kullanılarak elde edilecektir. Örneğin, A faktörünün etkisi; A' nın yüksek seviyelerinin ortalaması ile düşük seviyelerinin ortalaması arasındaki fark alınarak elde edilir.

A' nın yüksek seviyelerinin ortalaması

$$= \frac{11.76 + 11.37 + 12.11 + 11.32 + 12.02 + 11.98}{6} = 11.76$$

A' nın düşük seviyelerinin ortalaması

$$= \frac{11.91 + 12.62 + 12.11 + 12.40 + 12.24 + 11.74}{6} = 12.17$$

$$A' nın etkisi = 11.76 - 12.17 = -0.41$$

Bunun anlamı A<sub>2</sub> paketi yerine A<sub>1</sub> paketinin kullanımı yakıt tüketimini her 100 km de 0.41 para birimi azaltacaktır. Her bir etkinin değeri benzer şekilde hesaplandığında Çizelge 3.38’deki sonuçlar elde edilir:

**Çizelge 3.38.** Etki Tahminleri

Bileşen	Kod	Etki Tahmini
Ek Paket	A	-0.41
Baz Yağ	B	-0.10
Pas Önleyici	C	0.25
Deterjan	D	0.05
Ester	E	-0.02
Sürtünme Düzenleyici	F	0.53
Yapıştırıcı	G	0.08

Elde edilen sonuçların kesinliği ile ilgili bir yargıya varmak için değişkenliğin değerlendirilmesi gerekir. Tahmin değerlerinin tesadüf mü yoksa faktörlerin gerçek etkisinden mi kaynaklandığına karar verilmelidir. Bunun için artık sütunların her biri için sütunlardaki (+) değerlerin ortalamasından (-) değerlerin ortalaması çıkarılarak karesi alınır. Sonuçlar Çizelge 3.39’deki gibi olacaktır:

**Çizelge 3.39.** Artık Sütunlara Ait Sonuçlar

Artık Sütun	“-” ve “+” Değ. Ort. Arasındaki Fark	Farkların Karesi
H	0.037	0.001369
I	0.083	0.006889
J	-0.023	0.000529
K	-0.027	0.000289
<i>Farkların Kareleri Toplamı</i>		0.009076

Bu sonuçlar kullanılarak artık standart sapması hesaplanır;

$$\begin{aligned}\text{Artık Standart Sapması} &= \sqrt{\frac{n \text{ Farkların Kareleri Toplamı}}{4 \text{ Artık Sütun Sayısı}}} \\ &= \sqrt{\frac{12 \cdot 0.009076}{4}} = 0.083\end{aligned}$$

Artık standart sapması değeri kullanılarak %95 güven aralığı ile her bir parametrenin etkisi değerlendirildiğinde;

$$\text{Etki} \pm \frac{2ts}{\sqrt{n}} = \text{Etki} \pm \frac{2 \times 2.78 \times 0.083}{\sqrt{12}} = \text{Etki} \pm 0.13$$

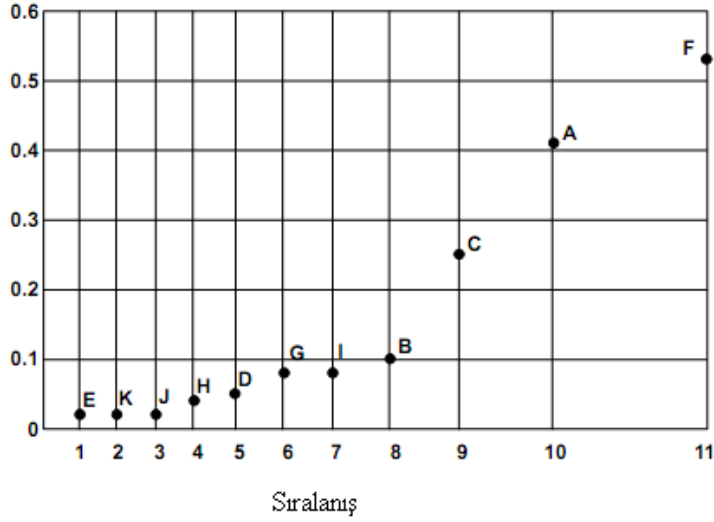
Bu değer ile sıfırı içermeyen güven aralığına sahip 3 parametre bulunmaktadır. Bunlar;

Ek Paket (A)	: -0.41±0.13
Pas Önleyici (B)	: 0.25±0.13
Sürtünme Düzenleyici (C)	: 0.53±0.13

Bu parametrelerden yalnızca A' daki değişim yani A<sub>1</sub> paketi yerine A<sub>2</sub>'yi kullanmak yakıt tüketimini azaltacak diğerlerinde yapılacak değişiklik ise yakıt tüketimini artıracaktır.

Artık standart sapmasını elde etmenin diğer bir yolu yarı-normal grafiği çizmektir. Grafikte; daha önceden de anlatıldığı gibi etki değerleri küçükten büyüğe sıralanır, en büyük değer normal dağılımın tam ortasına gelecek şekilde yerleşir.

Etki Büyüklüğü



Şekil 3.5. Yarı-Normal Çizim

Yapılan deney sonucunda, sadece 12 denemeye en iyi yakıt tüketimini veren yakıt formülasyonu geliştirilmiştir. Deney sonucunda A parametresinde  $A_1$  yerine  $A_2$  kullanmanın yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltacağı görülmektedir.

Plackett Burman deney tasarım metodunun dayanıklılığı, Boddy ve Smith (2010) tarafından verilen başka bir örnek üzerinden tespit edilebilir. Bir laboratuvar araştırması sonucunda alt ve üst limitleriyle 9 faktörden oluşan bir süreç elde edilecektir. Süreç çeşitli deneyler yapılarak geliştirilmiştir. Ancak belirlenen limitlerin doğruluğu test edilmek istenmektedir. Belirlenen limitler ile 9 faktör aşağıdaki gibi olsun.

Mobil Safha Kompozisyonu (A)	$10\% \pm 1\%$
Ph (B)	$6 \pm 1$
Enjeksiyon Hacmi (C)	$20 \pm 5\mu l$
Sütun Sıcaklığı (D)	$25 \pm 1^\circ C$
Akış Oranı (E)	$2.0 \pm 0.2 \mu l/dak.$
Akış Sıcaklığı (F)	$30^\circ C$ ve $40^\circ C$
Metanol Konsantrasyonu (G)	$10 \pm 2 \%$
Sanikasyon Zamanı (H)	$10 \pm 2$ dak.

Tasarım 8, 12, 16, 20 ve 24 denemeye izin verir. 9 faktörün etkisini tahmin edebilmek için en az 12 denemeyi içeren tasarım matrisi kullanılmalıdır. Ancak artık standart sapmasını tahmin edebilmek için 16 deney daha uygun olacaktır. Bu örnek için 16 deneyi içeren tasarım matrisi kullanılacak ve sonuçlar standart tasarım matrisine aşağıdaki gibi aktarılacaktır.

**Çizelge 3.40.** 16 denemeli Plackett Burman Tasarımı

Deney	Deney Parametreleri									Sonuçlar
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	+	-	-	-	+	-	-	+	+	11.45
2	+	+	-	-	-	+	-	-	+	11.36
3	+	+	+	-	-	-	+	-	-	12.10
4	+	+	+	+	-	-	-	+	-	11.52
5	-	+	+	+	+	-	-	-	+	12.25
6	+	-	+	+	+	+	-	-	-	11.66
7	-	+	-	+	+	+	+	-	-	12.16
8	+	-	+	-	+	+	+	+	-	12.24
9	+	+	-	+	-	+	+	+	+	11.84
10	-	+	+	-	+	-	+	+	+	12.63
11	-	-	+	+	-	+	-	+	+	12.25
12	+	-	-	+	+	-	+	-	+	11.82
13	-	+	-	-	+	+	-	+	-	11.81
14	-	-	+	-	-	+	+	-	+	12.58
15	-	-	-	+	-	-	+	+	-	12.30
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.73

**Çizelge 3.41.** 16 denemeli Plackett Burman Tasarımında Kalan Sütunlar

Deney	Kalan Sütunlar					
	J	K	L	M	N	O
1	-	+	-	+	+	+
2	+	-	+	-	+	+
3	+	+	-	+	-	+
4	-	+	+	-	+	-
5	-	-	+	+	-	+
6	+	-	-	+	+	-
7	-	+	-	-	+	+
8	-	-	+	-	-	+
9	-	-	-	+	-	-
10	+	-	-	-	+	-
11	+	+	-	-	-	+
12	+	+	+	-	-	-
13	+	+	+	+	-	-
14	-	+	+	+	+	-
15	+	-	+	+	+	+
16	-	-	-	-	-	-

Kalan sütunlar kullanarak elde edilen artık standart sapmasının değeri 0.081'dir.

Tasarım matrisinden elde edilen etkilerin tahmin değerleri Çizelge 3.42'deki gibidir:

**Çizelge 3.42.** Etki Tahminleri

Mobil Safha Kompozisyonu	A	-0.47
Ph	B	-0.04
Enjeksiyon Hacmi	C	0.34
Sütun Sıcaklığı	D	-0.01
Akış Oranı	E.	0.04



**Çizelge 3.42. (devam)**

Akış Sıcaklığı	F	0.01
Metanol Konsantrasyonu	G	0.45
Sanikasyon Zamanı	H	0.05
Medyan Partikül Boyutu	I	0.08

Tablodaki değerlerden üç parametrenin etki değerlerinin önemli olduğu ve sıfırı içermeyen güven aralığına sahip olduğu görülmektedir. Bunlar:

Mobil Safha Kompozisyonu (A)	$-0.47 \pm 0.10$
Enjeksiyon Hacmi (C)	$0.34 \pm 0.10$
Metanol Konsantrasyonu (G)	$0.45 \pm 0.10$

Deney sonuçlarına bakıldığında 16 tahmini etkinin standart sapmasının 0.39, artık standart sapmasının 0.081 olduğu görülür. Bu değerler arasındaki fark oldukça fazladır. Bu farkın nedeni önemli etkiye sahip 3 parametreden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bu parametrelerin sınırlarının küçültülmesi gerekir. Standart sapmalar arasındaki farkın fazlalığı ve parametrelerin limitlerinin ne zaman küçültülmesi gerektiğine karar vermek için standart sapma değerlerine bakılır. Tahmini etkilerin standart sapması artık standart sapmasından büyük olmamalıdır. 3 parametrenin limitleri, ortak standart sapma değerinin etki tatminine oranının belirlenen değerle çarpılmasıyla küçültülür. Elde edilen değerler Çizelge 3.43'deki gibidir:

**Çizelge 3.43. Önemli Etkiler İçin Yeni Spesifikasyon Değerlerinin Belirlenmesi**

		<i>Etki Tahminleri</i>	<i>Mevcut</i>	<i>Yeni Spesifikasyonlar</i>
				<i>Spesifikasyonlar</i>
<i>Mobil</i>	<i>Safha</i>	-0.47	$\pm 1\%$	$\pm \frac{0.81}{0.47} \times 1 = \pm 0.2\%$
	<i>Kompozisyonu</i>			
	<i>Enjeksiyon Hacmi</i>	0.34	$\pm 5\mu l$	$\pm \frac{0.81}{0.34} \times 5 = \pm 1.2\mu l$

### Çizelge 3.43. (devam)

<i>Metanol</i>		$\pm 2\%$	$\pm \frac{0.81}{0.45} \times 2 = \pm 0.4\%$
<i>Konsantrasyonu</i>	0.45		

Böylelikle 16 deneyle 9 parametre incelenmiş ve bunlardan 9'unun limitlerinin küçültülmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

Tasarımın nasıl elde edileceğine bakacak olursak;

Bu tasarımlar 8, 12, 16, 20 veya 24 deneyden oluşurlar. Tasarımların oluşturabilmesi için 1. Sütuna aşağıdaki gibi başlangıç matris düzenleri atanır:

n= 8 için; + + + - + - -

n= 12 için; + + - + + + - - - + -

n= 16 için; + + + + - + - + + - - - -

n= 20 için; + + - - + + + + - + - + - - - + + -

n= 24 için; + + + + + - + - + + - - + - - - -

n= 8 için bir tasarım matrisi oluşturulacak olursa;

- \* n= 8 için 7 faktör yani 7 sütun olacaktır. 1 sütuna (diyelim ki A faktörü olsun) n=8 için belirlenen başlangıç matrisi düzeni yerleştirilir (1 – 7 arasına).
- \* Tasarım başlangıç matris düzeni A' nın altına 1. Satırdan başlanarak yazılır.
- \* Başlangıç matris düzeni B sütunun altına ikinci satırdan başlanarak yazılır, yedinci satıra ulaşıldığında birinci satırdan devam edilir.
- \* Son satırda tüm değerlere ( - ) verilir.

Böylece tasarım Çizelge 3.44'deki gibidir;

**Çizelge 3.44.** Plackett Burman Deney Tasarımının Oluşturulması

	A	B	C	D	E	F	G
1	+	-	-	+	-	+	+
2	+	+	-	-	+	-	+
3	+	+	+	-	-	+	-
4	-	+	+	+	-	-	+
5	+	-	+	+	+	-	-
6	-	+	-	+	+	+	-
7	-	-	+	-	+	+	+
8	-	-	-	-	-	-	-

Diğer deney sayılarına sahip tasarımlar da aynı yöntem kullanılarak elde edilir.

### 3.5. MERKEZİ KOMPOZİT TASARIMLAR

Daha önceki bölümlerde, önemli etkileri belirlemede son derece önemli olan 2 seviyeli faktöriyel deney tasarımları incelenmiştir. 3 seviyeli tasarımlar; tepki yüzey modellemede ve proseslerin optimum koşullarını tahmin etmede kullanılır. Tahminin güven aralığının tasarımın merkezinde en düşük seviyede olduğu, uç noktalara gidildikçe arttığı gözlemlenir. Eğer optimum tepki tasarımın uç noktalarında veya yakınlarında gerçekleşmişse, tepkinin kesin ve net olarak yeri tahmin edilemez.

Bu bölümde birtakım fazla özelliklere sahip 2-düzeyle ve 3-düzeyle tasarımlar baz alınacaktır. Tasarım, merkezde bulunan tekrarlanmış noktaları kullanarak eğrilik ve tekrarlama tahminlerindeki hataları tespit ederek modelin toplam hatasını bulmaya çalışır.

Merkezi Kompozit Tasarım tahminin hassaslığı yaklaşık olarak tüm deneysel bölge genelinde aynı olacak şekilde planlanmıştır. Bununla birlikte, Merkezi Kompozit Tasarım iki farklı blok şeklinde tasarlanmış olup yapılacak deney aralarında belirli bir zaman farklı olacak şekilde iki farklı aşamada gerçekleştirilir.

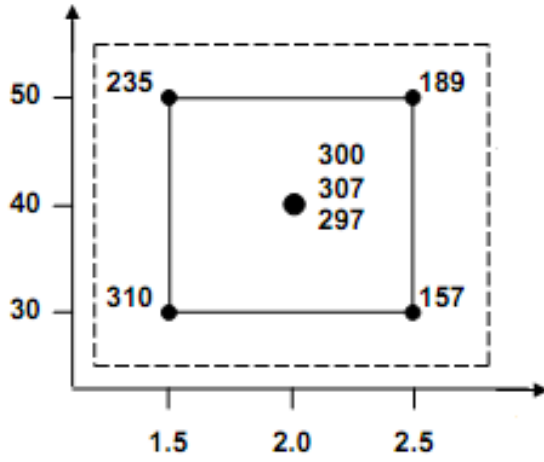
Tasarımın nasıl gerçekleşeceği Boddy ve Smith (2010) tarafından verilen bir örnekle anlatılacaktır. Örnek, bir gıda firmasında, kırılğan yeni bir bisküvi imalatı için geliştirme programı yürütülmesi üzerinedir. Halihazırda uygun özelliklere sahip bir bisküvi üretimi gerçekleştirilmiştir, fakat kırılğanlığı daha fazla artırılmış bisküvinin daha popüler olacağı fark edilir (Kırılğanlık, bisküviyi çtırdatarak ikiye bölme işlemi için gereken kuvvet miktarıdır). Firma, iki faktörün (karışımındaki su miktarı ve karıştırıcının karışımı besleme hızı) kırılğanlığı büyük ölçüde etkilediğini tanımlar. Bu iki değişkenin alabileceği olası değerler aşağıdaki gibidir:

Su oranı: 25 % ile 55 %

Besleme hızı: 1.2 – 2.8 devir/saniye

Bu sebeple her iki faktör düzeyinin etkileri incelenerek her iki faktör için de optimum durumu bulmak amacıyla bir çalışma yapmak istenir. Tepkinin iki faktör düzeyinin birbirleriyle ikili etkileşimlerinden etkilendiğini varsayarak, eğer bir optimum değer ikilisi varsa bahsedilen sınır değerler içinde herhangi bir yerde olabilir diye düşünülmektedir. İki aşamada yapılabilecek Merkezi Kompozit Tasarımın kullanılmasına karar verilir.

Firma ilk aşamada aynı seride üretilmiş olan ham maddeleri kullanarak 7 farklı deneme yapar. Belki akıllıca olarak sınır değerlerin bulunduğu uç noktaları incelemeye almaz ve  $2^2$  faktöriyel ve 3 fazladan nokta merkezde olacak şekilde bir tasarım oluşturulur. Tasarım, tepkilerle birlikte, Şekil 3.6 ve Tablo 3.45'de gösterilmiştir. Bu merkezi kompozit tasarımın ilk aşamasıdır.



Şekil 3.6. Tasarım ve Tasarımın 1. Aşama Sonuçları

Çizelge 3.45. Tasarımın 1. Aşamasının Sonuçları

Deney	Su Oranı	Besleme Hızı	Kırılgenlik
1	40	2.0	300
2	50	1.5	235
3	30	2.5	157
4	40	2.0	307
5	30	1.5	310
6	50	2.5	189
7	40	2.0	297

Tasarım iki ana etkinin önemini test etmeye imkan sunar; su oranı ve besleme hızı ile, eğriliğin. Bunu hesaplamadan önce varyasyonun tahminini elde etmelidir.

### 3.5.1. Varyasyonun Tahmini

Standart sapmayı tahmin etmenin iki alternatif metodu vardır.

1. Merkezdeki tekrarlanmış tepkileri kullanarak. Bunlar; 300, 307, 290. Bu tepkilerin,

Ortalaması: 299, Standart Sapması: 8.54 (2 serbestlik derecesi ile)

Bu standart sapma tahminine deneysel standart sapma denilir.

2. Deneysel dışında elde edilen tahminleri kullanarak firma halihazırda ideal koşullarda 16 set kullanarak bir tahmin elde etmiştir;

Standart Sapma: 14.0 (15 serbestlik derecesi ile)

Bu standart sapma tahminine harici standart sapma denilir.

2 serbestlik derecesine dayanan her turlu tahmin kesin olmayacağından 15 serbestlik derecesine sahip harici standart sapma kullanılır. Bu sayede ana etkilerin onemlilik derecesi olculebilecektir. Ancak, devam etmeden once, harici standart sapma değerinin deneysel standart sapma değerinden istatistiksel olarak anlamlı derecede farklı olup olmadığını test etmek gerekir. Bunu iki standart sapma değerlerini oranlayarak ve F-Testini kullanarak kontrol etmek gerekir.

Test Edilecek Değer= (Büyük Standart Sapma)<sup>2</sup> / (Küçük Standart Sapma)<sup>2</sup>

Test Edilecek Değer= (14.0)<sup>2</sup> / (8.54)<sup>2</sup> = 2.69

Tablo Değer: Ek 2'den 15 serbestlik derecesine sahip (Büyük Standart Sapma için) ve 2 serbestlik derecesine sahip (Küçük Standart Sapma için) bakılırsa: %5 anlamlılık düzeyinde 39.43 değerinin olduğunu görürüz.

Sonuç: Varyasyonlar anlamlı derecede farklıdır diyebilmek için yeterli kanıt bulunmamaktadır.

### 3.5.2. Etkilerin Tahmini

Ana etkiler ve etkileşimleri, yüksek ve düşük seviyelerde su oranındaki ve besleme hızındaki tepkileri baz alarak, iki yönlü tablo hazırlanıp incelenebilir. Marjinal ortalamalar ve köşegen ortalamaları da ayrıca gösterilmiştir.

**Çizelge 3.46.** Ana Etki ve Etkileşimler

Besleme Hızı	Su Oranı		
	30	50	
			<b>196.0</b>
1.5	310	235	272.5
2.5	157	189	173.0
			<b>249.5</b>

Bu etkilerin anlamlı olup olmadığını test etmek için 2-örnekli t-testi kullanılabilir.

$$\text{Test Edilecek Değer} = |\bar{x}_A - \bar{x}_B| / s \sqrt{(1/n_A) + 1/n_B}$$

$\bar{x}_A, \bar{x}_B$  karşılaştırılacak olan ortalama değerleri

$n_A, n_B$  gözlem sayısını

$s$  standart sapmayı göstermektedir

Su oranının ana etkisi (sütun ortalamalarının karşılaştırması)

$$\text{Test Edilecek Değer} = |212.0 - 233.5| / 14.0 \sqrt{1/2 + 1/2} = 1.54$$

Besleme hızının ana etkisi (satır ortalamalarının karşılaştırması)

$$\text{Test Edilecek Değer} = |173.0 - 272.5| / 14.0 \sqrt{1/2 + 1/2} = 7.11$$

Etkileşimin (diyagonal ortalamalarının karşılaştırması)

$$\text{Test Edilecek Değer} = |249.5 - 196.0| / 14.0 \sqrt{1/2 + 1/2} = 3.82$$

Bu testlere ait sonuçların her biri EK 1'den 15 serbestlik derecesi ve %5 anlamlılık düzeyi ile bakılırsa 2.13 olarak görülür. Böylece, etkileşim ve besleme hızı etkisinin anlamlı, fakat su oranının etkisinin anlamlı olmadığı sonucuna varılır.

Eğrilik durumuna bakıldığında, merkezdeki tüm noktaların aynı olması sebebiyle, belirgin bir şekilde herhangi bir eğrinin olup olmadığına karar verilebilir fakat, hangi değişkenlerin buna katkıda bulunduğuna dair bir şey söylenemez. Eğriliğin testi için tekrar 2-örnekli t-testi kullanılır.

Merkezdeki tekrarların ortalaması = 301.33 (n = 3)

Köşedeki noktaların ortalaması = 222.75 (n=4)

$$\text{Test Edilecek Değer} = |301.33 - 222.75| / 14.0 \sqrt{1/2 + 1/2} = 9.63$$

Tablo Değeri: Tablo değeri yine 2.13. Açıkça, anlamlı bir eğrilik söz konusudur.

### 3.5.3. Çoklu Regresyon Kullanımı

Veriyi analiz etmede kullanılan bir başka yöntem de Çoklu Regresyondur. Tasarım için korelasyon matrisi Çizelge 3.47' deki gibidir.

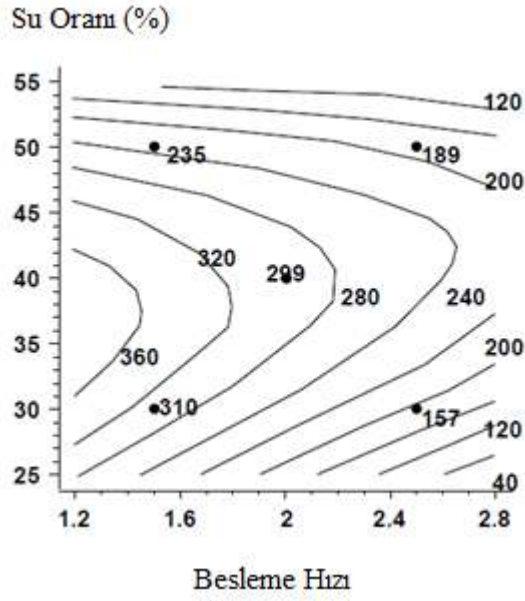
**Çizelge 3.47.** Tasarım İçin Korelasyon Matrisi

	s	h	sh	s <sup>2</sup>	h <sup>2</sup>
s	*	0.00	0.00	0.00	0.00
h		*	0.00	0.00	0.00
sh			*	0.00	0.00
s <sup>2</sup>				*	1.00
h <sup>2</sup>					*

Korelasyon matrisinde; s terimi su oranını, h ise besleme hızını ifade etmektedir. Korelasyon matrisi, s<sup>2</sup> ve h<sup>2</sup> karışıklığı dışında ideal bir yapıda olup 1.00 korelasyon değerini verir. Bu terimleri ayıramadığımız için iki farklı alternatif denklemi ve bunlara ait tepki yüzeylerinin incelenmesi gerekir.

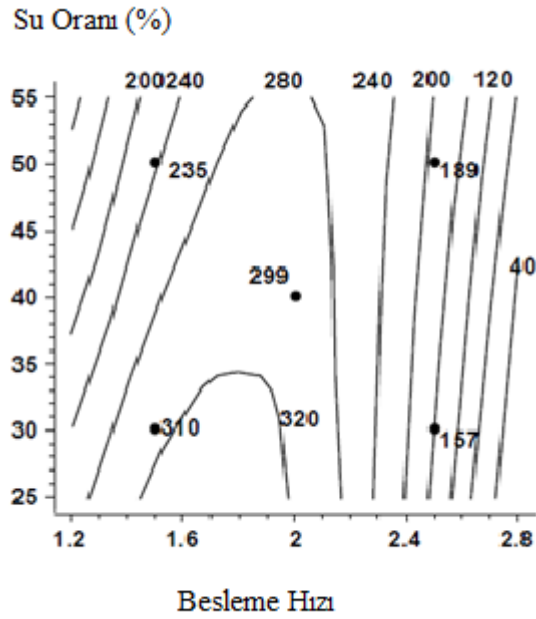
Birbirleriyle ikili etkileşime ait terimlerin test sonucunda anlamlı düzeyde geçerli olduğu öğrenildiğine göre, her denkleme ait kontur diyagramlarıyla (her nokta veya ortalama değerler eklenmiş olarak) devam edilmelidir. İlgili diyagramlar Şekil 3.7 ve 3.8' de görülebilir.





$$y = -251 + 49.2s - 313.5h + 5.35sh - 0.762s^2$$

Şekil 3.7. İkinci Dereceden  $s$  Terimi İle Kontur Diyagramı



$$y = -251 - 11.7s + 906.5h + 5.35sh - 305.0h^2$$

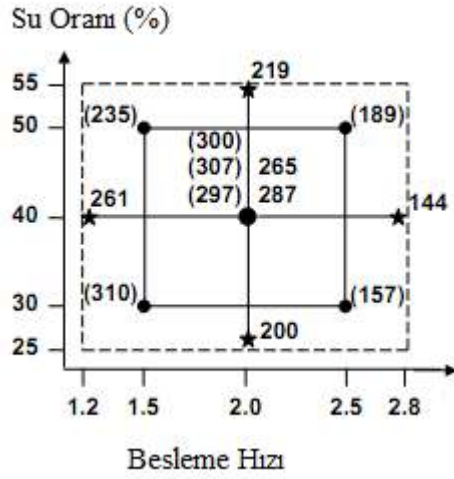
Şekil 3.8. İkinci Dereceden  $h$  Terimi İle Kontur Diyagramı

Kontur diyagramları hakkında birkaç not bulunmaktadır. Öncelikle şekil olarak birbirlerinden oldukça farklıdırlar, Şekil 3.7' ye göre kırılma oranı %37 su oranı ve 1.2 devir/saniyede maksimum olurken, Şekil 3.8' e göre bu değerler %25 su oranı ve 1.73 devir/saniyedir. Her iki sonuç da aynı anda doğru olamaz, içlerinden bir tanesi doğru olabileceği gibi, ikisinin arasında bir noktada da doğru sonuç yatıyor olabilir. Ayrıca, her iki diyagramda da deneysel noktalara (köşelerdeki ve merkezdeki noktalar) ait veriler aynı sonuçları vermektedir. Bu sonuçlar ilgili noktalardaki tepkilere (veya ortalama tepkilere) eşittirler. Son olarak, unutmamak gerekir ki kontur diyagramları sahte etkileri büyük doğrulukta verirler çünkü, herhangi bir noktada güven aralığına dair bir gösterge bulunmaz.

Daha iyi tahminler elde etmek önemli olduğu için, tasarımın 2. aşamasına geçmeye karar verilir. Bu aşamada fazladan 6 deney gerçekleştirilir; 2 tanesi merkezde, 4 tanesi de tasarımın yıldız noktalarında. Tüm tasarım Şekil 3.9 ve ilgili sonuçları ise Çizelge 3.48' de görülebilir. 1. aşamadaki sonuçlar ise Şekil 3.9' da parantez içinde gösterilen rakamlardır.

#### **3.5.4. Tasarımın 2. Aşaması**

Bu tasarıma ait korelasyon matrisi Çizelge 3.47'de görülebilir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta da bir tane daha faktörün ortama katılmasıdır, bir blok faktörü olarak B faktörü alınıyor (B faktörü ilk aşamada 1 değerini alırken, ikinci aşamada 2 değerini alır).



Şekil 3.9. Tam Merkezi Kompozit Tasarım

Çizelge 3.48. Tasarımın Tam Sonuçları

Deney	Su Oranı	Besleme Hızı	Kırılgnlık	Blok
1	40	2.0	300	1
2	50	1.5	235	1
3	30	2.5	157	1
4	40	2.0	307	1
5	30	1.5	310	1
6	50	2.5	189	1
7	40	2.0	290	1
8	40	2.71	144	2
9	40	2.0	265	2
10	54.1	2.0	219	2
11	25.9	2.0	200	2
12	40	2.0	287	2
13	40	1.29	261	2

**Çizelge 3.49.** Korelasyon Matrisi

	s	h	sh	s <sup>2</sup>	h <sup>2</sup>	B
s	*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
h		*	0.00	0.00	0.00	0.00
sh			*	0.00	0.00	0.00
s <sup>2</sup>				*	-0.13	0.06
h <sup>2</sup>						0.07
B						*

Çizelge 3.47. tasarımın önemli bir özelliğini gösterir; her 2 aşamadaki tepkiler farklı seviyededirler, etkilerin tahmin edilmesi esnasında birbirlerinden etkilenmezler (Örn: etkiler B blok değişkeni ile ilişkili değildir).

Çoklu regresyon analizi ile (blok faktör olan B dahil) tüm terimlerin tahminleri ile tepki yüzeyi modellenmesine devam edilebilir.

B blok faktörünün neredeyse önemli derecede etkin olduğu görülür. Blok faktörler etkin olmadığı durumda denklemden silinebilir.

Kontur diyagramlarına bakmadan önce standart sapma hatalarına bakarak geçerli bir tekrarlanmış standart sapmanın olup olmadığı incelenmelidir.

1. aşamanın tekrarlanmış standart sapması = 8.54 (2 serbestlik derecesine göre)
2. aşamanın tekrarlanmış standart sapması = 15.56 (1 serbestlik derecesine göre)

Bütünleşik tekrarlanmış standart sapma;

$$= \sqrt{\frac{\sum(2 \times 8.54^2) + (1 \times 15.56^2)}{2+1}} = 11.37$$

Artık standart sapma hatalarının belirgin bir şekilde tekrarlanmış standart sapmalardan büyük olduğu tespit edilmelidir. Belirgin bir şekilde büyük olması, modelin zayıf tahmin ettiğini (aykırı bir veri noktasından veya modelin yanlış formda kurgulanmasından ötürü) gösterir.

Devam etmek için öncelikle karelerin toplamı hesaplanmalıdır.

Model hatası ve tekrarlanmış hataların karelerinin toplamı = (standart sapma hatası)<sup>2</sup> x serbestlik derecesi = (13.99)<sup>2</sup> x 6 = 1174.3 (6 serbestlik derecesine göre)

Tekrarlanmış hataların karelerinin toplamı = (standart sapma hatası)<sup>2</sup> x serbestlik derecesi = (11.37)<sup>2</sup> x 3 = 387.8 (3 serbestlik derecesine göre)

Karelerin toplamları arasındaki farkı hesaplırsak model hatalarının karelerinin toplamını elde etmiş oluruz. Serbestlik derecesi de çıkarma işlemi sonucu bulunabilir.

Model hatalarının karelerinin toplamı= 1174.3 – 387.8 = 786.5 (6-3 = 3 serbestlik derecesine göre)

Test edilecek değer: Model Hatalarının Ortalama Karesi / Tekrarlanmış Hataların Ortalama Karesi = (Model Hatalarının Karelerinin Toplamı / Serbestlik derecesi) / (Tekrarlanmış Hataların Karelerinin Toplamı/ Serbestlik derecesi) = (786.5 / 3) / (387.8 / 3) = 2.03

Tablo Değeri: EK 2' den %5 anlamlılık seviyesinde ve tek yönlü 3-3 serbestlik derecesine sahip değer 9.28 olarak okunur.

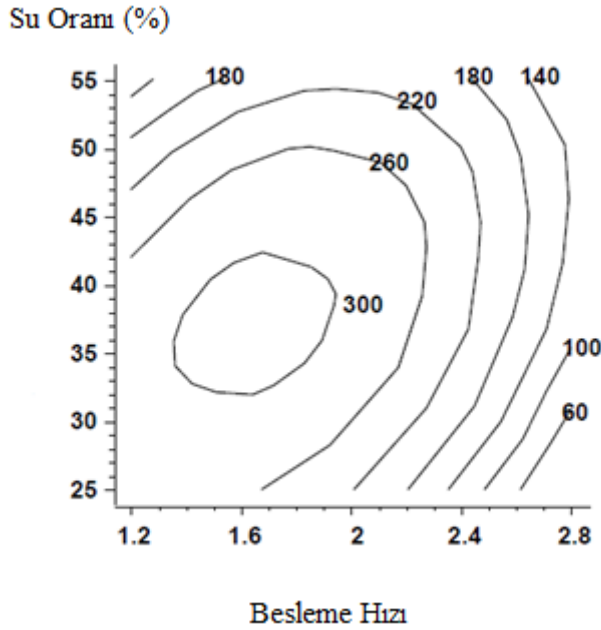
Sonuç: Modelin Hatası

Bu modelin hatası, tekrarlanmış modelin hatasından belirgin bir biçimde büyük değildir, bu karara her iki modelin standart sapmasını göz önünde bulundurulduğunda açıkça varılabilir.

Tepki yüzeyi incelendiğinde, tam denklem aşağıdaki gibidir:

$$y = -241.1 + 17.30s + 306.6h + 5.35sh - 0.353s^2 - 152.9h^2 - 19.0B$$

Denklemden B=1 olarak alındığında uygun bir kontur grafiklemesi elde edilebilir.



$$y = -260.1 + 17.30s + 306.6h + 5.35sh - 0.353s^2 - 152.9h^2$$

**Şekil 3.10.** İki Aşamalı Tahmin Denklemi İçin Kontur Diyagramı

Şekil daha önceki figürlere nazaran oldukça değişiktir ve bu sayede gerçek tepki yüzeyi hesaplanırken biraz daha sağlıklı sonuçlar alınabilecektir. Bu grafiğin kenar noktalarında ve merkezde bulunan noktada elde edilen değerlerin, önceki grafiklerde bulunan değerlerden farklı olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Yıldız noktaları, yüzeyin geri kalanının daha iyi anlaşılmasına imkan vermiştir.

Bu analizden optimum değerler 1.6 değerinde bir besleme değeri ile %37 su oranı olarak çıkmaktadır. Öngörülen kırılma değeri için istatistiksel güven aralığı +/- 26 olarak ortaya çıkmış ve bu sebeple optimum noktanın tam konumu ve kontur diyagramının tam şekli ile ilgili biraz belirsizlik bulunmalıdır. Optimum noktanın tam konumunu belirlemek için tahmin edilmiş olan optimum noktanın etrafında bulunan küçük bir alanda, daha fazla inceleme yapmak gerekmektedir. Optimum

noktadaki kırılganlık değerlerinde yapılan küçük bir değişiklik neticesinde fazla sayıda denemeler yapılması sonucunda daha net bir sonuca ulaşılabacaktır.

Merkezi kompozit tasarım, herhangi bir tahmine ait istatistiksel güven aralığı derinliğinin deneysel sınırlar dâhilinde hemen hemen aynı olduğu anlamına gelir. Tahmin edilen optimum nokta düzlemin ortasında değil de, bir quadrantın ortasında olması sebebiyle tasarım işe yaramıştır. Bu sayede, düzlem aracılığıyla bilgi sahibi olunarak, optimum noktanın konumu hakkında bir karar verilmiştir.

Fakat tahmin edilen kırılganlığın istatistiksel olarak güven aralığı oldukça geniş ve aynı zamanda kırılganlık tahmin edilen optimum koşullarla birlikte çok yavaş değişmektedir. Eğer en iyi koşulların daha net belirlenmesi gerekiyorsa, tahmin edilen optimum bölgede daha fazla deneyler ve daha fazla tekrarlamalar gerçekleştirmek gerekmektedir.

Çizelge 3.50 2 ile 6 arası sayıda faktör için standart merkezi kompozit tasarım setlerini göstermektedir. Köşe noktalarının +/-1 olarak kodlandığı varsayımıyla tabloda; köşelerde, merkezde, yıldız noktalarında (yıldız noktalarının merkeze olan uzaklıkları da) bulunması gereken nokta sayıları görülmektedir. Daha büyük tasarımlar için 2' den fazla blok kullanmak da mümkündür.

**Çizelge 3.50.** Standart Merkezi Kompozit Tasarım Setleri

Faktör Sayısı	Gözlem Sayısı				Toplam	Merkezle Yıldızlı Arası Uzaklık
	1.Blok		2.Blok			
	Köşe	Merkez	Merkez	Yıldız		
2	4	3	2	4	13	1.414
3	8	3	3	6	20	1.682
4	16	4	3	8	31	2.00
5	16	3	3	10	32	2.00
6	32	4	5	12	53	2.378

Merkezi kompozit tasarımlar aşağıdaki kriterlere göre oluşturulur;

- (a) Her noktadaki istatistiksel güven aralığı benzer genişliğe sahip olmalıdır
- (b) Etkilerin birbirleriyle korelasyonları sıfır olmalıdır
- (c) Bloklama değişkeni etkilerle sıfır korelasyona sahip olmalı, bu sayede iki aşamanın belirli bir zaman farkıyla, birbirinden bağımsız olarak yapılabilmesine imkan tanınmalıdır

Merkezi kompozit tasarımlar bu kriterlere neredeyse tamamen uyarlar. Bu durum, kriterlerin tüm deneyle alakalı olduğu anlamına gelmez. Örneğin, ilk kriter, yıldız noktalarını (değişkenlerin sayısı arttıkça) merkezden daha uzak yerlere yerleştirilmesini gerektirir. Gerçekten, 6 faktörlü bir tasarım için yıldız noktalarının merkezden 2.378 birim uzağa konulması gerekli midir, belki sadece 2 faktör önemli olacaktır ki bu durumda 1.414 değeri düzgün bir güven aralığı verecektir. Noktaların dağılımının seçilmesindeki esas kriter deneysel düzlemdir; eşit güven aralığı arzusu değildir. Bu sebeple, faktör sayısından bağımsız olarak, yıldız noktalarının 1.414 (ya da 1.5 yuvarlanmış grafikler için) ile limitli tutulmasını önerilmektedir.

### **3.6. AYKIRI DEĞERLER**

Gözlemlerin incelenebilmesi için her zaman bir veri kümesi elde edilmesi gereklidir. Ancak veriler kaydedilirken veya hesaplanırken yapılan yanlışlarla beklenmeyen koşullar altında bir değişimin etkisi aykırı bir değer oluşumuna neden olabilir. Bir veri kümesinde gözlemlerin çoğu tarafından önerilen modele uymayan gözlemlere uymayan gözlemlere sapan/aykırı değer denir. Bu değerler sonuçların geçerliliğini azaltabilir. İki tip gözlem analizi bozabilir; birincisi bir ya da daha fazla aşırı bağımsız değişkeni (faktörü) olan veri setleri, ikincisi ise bir regresyon çizgisi üzerinde aşırı güçlü çekme noktalarıdır. Aykırı gözlemler, veri setinin ortalamasının çok uzağına düşen gözlemlerdir. Bu değerler bir tane olabileceği gibi birden fazla da olabilir. Bu değerler, verilerin standart sapmasını artırmanın dışında dağılımın şeklini de değiştirebilir ve istatistik karar sonucunda hatalı kararlar verilmesine neden



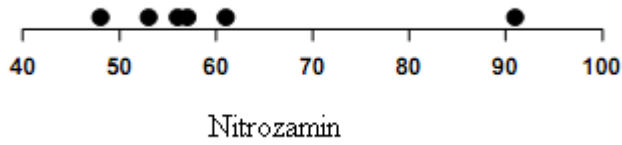
olabilirler (Üçkardeş vd., 2010). Ortalamadan uzak bir noktada bulunan bu gözlemlerin aykırı olup olmadığını belirleyebilmek amacıyla geliştirilmiş birçok istatistik test mevcuttur. Bu testlerden bazıları sadece bir, bazıları da aynı anda birden fazla gözlemin istatistiksel olarak aykırı gözlem olup olmadığını belirleyebilirler (Üçkardeş vd., 2010). Rosner, Dixon, Discordance, Walsh ve Grubbs testleri aykırı değerlerin belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş testlerden bazılarıdır.

Tek değişkenli veri kümesinde tek bir aykırı değer için en sık kullanılan test Grubbs testidir. Testin nasıl uygulandığını Boddy ve Smith (2010) tarafından verilen bir örnekte incelemek için Çizelge 3.51’de örneklerden elde edilen nitrozamin değerleri verilmiştir:

**Çizelge 3.51.** Nitrozamin Değerleri

Örnek	1	2	3	4	5	6	Ortalama	Standart Sapma
Nitrozamin	57	48	91	53	56	61	61.0	15.32

Bu değerleri Şekil 3.10’ daki gibi bir çizelge üzerinde gösterecek olursak;



**Şekil 3.11.** Nitrozamin Değerleri İçin Çizelge

Açıkça görülmektedir ki; 5 değer birbirine çok yakinken değişken değerlerinden biri oldukça uzaktır. Örneğin ortalaması 61 standart sapma değeri 15.32’ dir. Bu değerler kullanılarak aykırı değeri Grubbs testi ile aşağıdaki gibi test elde edilir:

$$Test\ Değeri = \frac{|x - \bar{x}|}{s}$$

Burada  $x$  aykırı değer olmasından şüphe duyulan gözlem değeri,  $\bar{x}$  örneğin ortalamasını,  $s$ 'de örneklem için standart sapma değerini ifade eder.

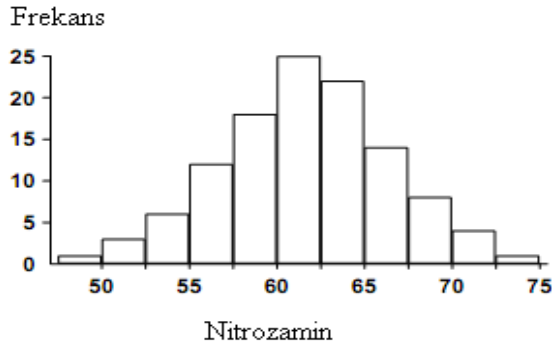
$$= \frac{|91 - 61.0|}{15.32} = 1.96$$

Tablo değeri: EK 3'den %5 önem düzeyinde 1.89'dur. Test değeri tablo değerini aştığından aykırı bir değer olduğu sonucuna ulaşılır.

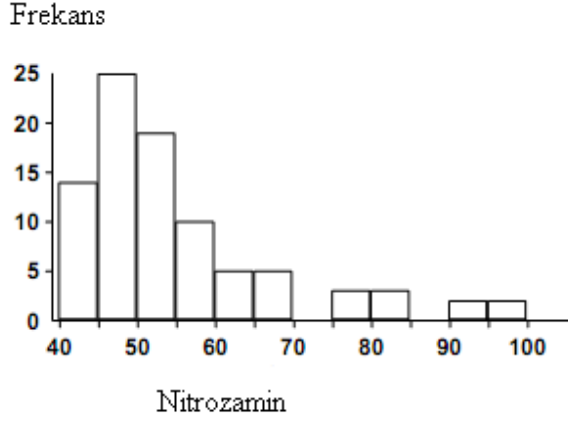
Grubbs testi verilerin normal dağılımına sahip olduğu varsayımına dayalıdır. Zaten bir çok istatistiksel analiz yöntemi de verilerin normal dağılımlı olduğu varsayımı üzerine geliştirilmiştir. Bu nedenle de asıl analizlere geçmeden önce verilere ilişkin normallik testlerinin yapılması gerekmektedir. Normal dağılıma sahip olması beklenen bir veri setinin normal dağılım göstermemesi durumunda da ilk akla gelen nedenlerden biri aykırı gözlemlerin varlığıdır (Üçkardeş vd., 2010).

Verilen örnek üzerinden iki varsayımlı duruma bakılacak olursa;

Eğer belirlenmiş dağılım şekli Şekil 3.11' deki gibi normal olursa 91 değerinin aykırı değer olduğu oldukça belirgindir. Bu durumda verinin aykırılık nedeni araştırılmalıdır.



**Şekil 3.12.** Normal Dağılımlı Veri İçin Histogram



**Şekil 3.13.** Eğik Dağılımlı Veriler İçin Histogram

Ancak veriler için belirlenen dağılım normal dağılıma değil de Şekil 3.12'deki gibi daha eğik olursa bu durumda 48 – 61 arasındaki 5 sonuç 91 olan 6. sonuç dağılıma uygun olmadığından aykırı değer olduğu düşünülen 91 değeri için hiçbir dayanak olmayacaktır.

Buradan da anlaşıldığı üzere aykırı değer, diğer gözlemlerin şekline uymayan sonuçtur. Tek bir değişkenin olduğu durumlarda gözlemlere ait dağılımın şekline bakarak aykırı değer tespit edilebilir. Aykırı değer testlerinin kullanılabilmesi için dağılımın şekli hakkında mutlaka bilgi verilmelidir. En yaygın kullanılan aykırı değer testleri normal dağılıma dayanıyor olsa da diğer dağılımlarla karşılaştığında dağılım, hipotez testinde ifade edilmelidir.

Örneğe ait verilerde 91 aykırı değeri çıkarılarak ortalama ve standart sapma hesaplandığında ortalamanın 55, standart sapmanın 4.85 olduğu görülmektedir. Aykırı değerlerin ortalama üzerinde daha az etkisi olabilir, ancak standart sapma üzerinde önemli bir etkisi vardır.

Grubbs testi iki ya da daha fazla değer olduğu durumlarda çok başarılı değildir. Bu durumda kullanılacak başka testler vardır. Örneğin; EK 4'de biri düşük, diğeri yüksek yani veri setinin sağında ve solunda kalan iki aykırı değer için kullanılabilir. Test değeri şöyle hesaplanır;

$$Test\ Değeri = \frac{\text{Bütün verilere ait standart sapma}}{\text{En büyük ve en küçük gözlemlere ait standart sapma}}$$

EK 5 'de de; her ikisi de yüksek ya da her ikisi de düşük iki aykırı noktanın test edilmesi için kullanılabilir.

Aykırı değerlerin bulunmasında kullanılacak bazı testler ve özellikleri aşağıdaki gibidir:

**Çizelge 3.52.** Aykırı Değerlerle İlgili Bazı Testler (Kaynakça: Üç kardeşler, 2006)

Testler	Normallik varsayımı	Örnek büyüklüğü	Aykırı gözlem sayısı	Test sınıfı
Dixon Test	Normal	$3 \leq n \leq 25$	Tek	Parametrik
Rosner Test	Normal	$n \geq 25$	Çok	Parametrik
Discordance Test	Normal	$n \leq 50$	Tek	Parametrik
Grubbs Test	Normal	$n \leq 50$	Tek/Çok	Parametrik
Walsh Test	Normal olmayan	$60 \leq n \leq 220 \quad \alpha = 0.10$ $n > 220 \quad \alpha = 0.05$	Çok	Parametrik olmayan

Bu testlerin sonucunda örnek veri setinde aykırı gözlem değeri var ise; bu değer otomatik olarak atılmalıdır. Bu değer için mümkünse sapmanın sebebi araştırılmalıdır. İlk olarak, veri girişi ve kayıtların doğru bir şekilde olup olmadığı kontrol edilmeli, eğer buradan sonuç alınmazsa, sapan değerleri etkileyebilecek faktörler (yanlış işlem yapılması gibi) belirlenmelidir.

## SONUÇLAR

Deney tasarımı teknikleri ürün veya sürecin iyileştirilmesi amacıyla mühendislik çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Deney tasarımı teknikleri kullanılarak geliştirilen sıfır hatalı ürün üretme endüstri uygulamalarında kabul görmüş ve oldukça yaygınlaşmıştır. Henüz yeterli kaynak ve çalışmanın bulunmadığı ülkemizde, deney tasarımı tekniklerine ait çalışma ve uygulamalar son yıllarda artmaktadır.

Deney tasarımı teknikleri uygulanarak elde edilen sonuçlar ne kadar dikkatli ölçülürse ölçülsün tasarım aşamasında yapılan yanlışlıklar giderilmedikçe doğru sonuçlar elde edilemeyecektir. Bu nedenle tasarım aşamasında nasıl bir hazırlıkta bulunulması gerektiği önemlidir. Bu nedenle çalışmada tasarımların nasıl elde edildiği üzerine yoğunlaşmış ve tasarım aşamasında yapılan hataların en aza indirilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada tam faktöriyel deneyler, kesirli faktöriyel deneyler ve bunların özel bir hali olan doymuş tasarımlar ile merkezi kompozit tasarımlar, endüstri uygulamalarında karşılaşılan çeşitli problemler ele alınarak anlatılmıştır. Böylelikle çeşitli alanlarda çalışan ve deney tasarımı tekniklerinden faydalanmak isteyen kişiler için kolaylık sağlanması hedeflenmiştir.

Çalışmada tam faktöriyel deneylerin faktörlere ait bütün kombinasyonların incelenmesine olanak sağladığı ancak bu tasarımların az sayıda faktörün olduğu sistemlerde en uygun tasarımlar olduğu görülmüştür. Kesirli faktöriyel tasarımlar ise faktör sayısı fazla olduğunda zaman ve maliyet açısından daha uygun olan ve etkili olduğu da söylenebilecek tasarımlar olduğu ortaya konulmuştur. Kesirli faktöriyel tasarımların olabilecek etkileşimleri yok sayarak değil, etkileşim olasılığı çok az olan ya da olmayan deneylerin elenerek elde edildiği deneyler olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışmada incelenen diğer bir deney tasarım tekniği olan merkezi kompozit tasarımların tam faktöriyel deney tasarımlarına alternatif olarak kullanılabilceği ifade edilmiş ve tasarımın nasıl elde edildiği örnekler üzerinde incelenmiştir.

Çalışmada vurgulandığı üzere incelenen birçok yöntem farklı durumlar için kullanılabilir. Ancak uygulamada daha yaygın kullanılan tasarımlar faktöriyel tasarımlardır. Özellikle kesirli faktöriyel tasarımlar sayesinde birçok faktör çok daha az deneyle incelenmektedir. Çalışmada deneysel tasarımın hazırlık aşamasına yoğunlaşmış olsa da tasarımların analiz edilmesinde bilgisayar teknolojisinin kullanılmasıyla deney tasarımı teknikleri daha etkin ve kullanılabilir hale gelmiştir. Kullanıcının sistemi iyi analiz etmesi ve doğru bir şekilde bilgisayara aktarmasıyla birçok analiz sonucu alınabilmektedir. Çalışma kapsamında deneysel tasarımın gelişimi, temel ilkeleri, deney tasarım türleri, robust süreçler, tasarımın maliyetle ilişkisi ve tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken noktalar hakkında bilgi verilmiş ve faktöriyel deney düzenlerinin elde edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

## KAYNAKLAR

- Abate, M.L.E., The Use Of historical data in statistical selection and robust product design, Doktora Tezi, Purdue University, USA, 1995.
- Aytaç, A., Yılmaz, B., Deniz, V., Lastik Kordu Üretiminde Büküm Yönünün Etkilerinin Farklı Deney Tasarımı Yöntemleri İle İncelenmesi, DEÜ İşletme Fakültesi Dergisi, İzmir, 61-71, 2008.
- Aytekin, A.G.Ç., Kalite Geliştirme Sürecinde Eniyileme Problemlerine Deney Tasarımı Yönteminin Uygulanması, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2010 .
- Aydın, M.E., Taguchi Deneysel Tasarım Metodu ve Segman Sanayinde Bir Uygulama, Standart Dergisi, 1994.
- Bayraktar, T., Kalite Geliştirmede Deneysel Tasarım ve Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.
- Bilişik, M.T., Gençyılmaz, G., Hizmet Kalitesinin İyileştirilmesinde Deneysel Tasarım Metodu, İstanbul Kültür Üniversitesi, VI. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul, 2006.
- Boddy, R., Smith, G., Effective Experimentation For Scientists and Technologists, John Wiley and Sons Inc., United Kingdom, 2010.
- Büyüköztürk, Ş., İki Faktörlü Varyans Analizi, Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Dergisi, Ankara, 1999.
- Büyüköztürk, Ş., Kovaryans Analizi, Ankara Üniversitesi Eğitim Bilimleri Dergisi, Ankara, 1999.

- Can, M., İstatistiksel Süreç Kontrolünde Deney Tasarımlı Süreç Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2007.
- Canıyılmaz, E., Kutay, F., Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım, Gazi Üniversitesi Müh.Mim.Dergisi, Ankara, 51-63, 2003.
- Çömlekçi, N., Deney Tasarımı İlke ve Teknikleri, Alfa, İstanbul , 2003.
- Dervişoğlu, N., Muluk, F.Z., Taguchi Tasarımının Uygulanması Ve Klasik Kesirli Çoketkenli Tasarımla Karşılaştırılması, Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Eskişehir, 2006.
- Durmaz, S., Taguchi Metodunun Kauçuğun Vulkanizasyonu Prosesine Uygulanması, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- Feigenbaum, A.V., Total Quality Control, New York: McGraw-Hill, 1991.
- Gunter, B., A Perspective On The Taguchi Method, Quality Progress, 1987.
- Hamzaçebi C., Kutay F., Kalite Maliyetlerine Genel Bir Bakış: Taguchi Kayıp Fonksiyonu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Pamukkale, 2001.
- Hamzaçebi C., Kutay F., Taguchi Metodu: Bir Uygulama, Teknoloji Dergisi, 6 (3-4), 2003.
- Ishikawa, K., Quality and Standardization: Progress For Economic Success, Quality Progress, 1984.
- Kackar, R.N., Off-line quality control, parameter design, and the Taguchi method, Journal of Quality Technology, 17 (4) , 176-188, 1985.



Karakuş, D.Ç., Kalite Fonksiyonlarını Geliştirme, Olası Hata Türü ve Etkileri Analizi ve Deneylerin Tasarımı Tekniklerinin Entegre Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2001.

Kavrakoğlu, İ., Toplam Kalite Yönetimi, Kalder Yayınları, 1998.

Köksoy, O., Hocaoğlu, G., Multi-Objective Optimization Solutions to the Taguchi's Problem, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Ankara, 613-626, 2005.

Montgomery, D.C., Design and Analysis Of Experiment, John Wiley and Sons Inc., NewYork, 2001.

Muluk, F.Z., Balce, A.O., Köksoy, O., Deney Tasarımı Eğitimi-Helikopter Deneyi, İstatistik Sempozyumu 2000, Gazi Üniversitesi, Ankara, 211-225, 2000.

Phadke, S. M., Introduction To Quality Engineering, Asian Productivity Organization, 1989.

Ross, W. ve Sykes, S., Optimization Of A Hot-Stamping Process. Michigan: Ameriken Supplier Institute Inc., 1989.

Ross, P.J., Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design, New York: McGraw-Hill, 1995.

Roy, R., A Primer on the Taguchi Method, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

Saat, M., "Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı", Gazi Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, II , 3: 97-108, 2000.

- Savaşkan, M., Deneş Tasarımı Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Kullanımı İle İnce Sert Seramik Kaplı Matkap Uçlarının Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2003.
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M., Deneş Tasarımı Yöntemi İle Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu, İTÜ Dergisi, İstanbul, 117-128, 2004.
- Sevi, D., Altı Sigma Kalite Yaklaşımının İşletme Maliyetlerine Etkisinin Araştırılması ve Bir Üretim İşletmesindeki Uygulama Sonuçlarının İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2006.
- Şanyılmaz, M., Deneş Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi İle Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2006.
- Şenoğlu, B., Acıtaş, Ş., İstatistiksel Deneşsel Tasarımı; Sabit Etkili Modeller, Ankara, 2010.
- Şırvancı, M., Kalite İçin Deneş Tasarımı "Taguchi Yaklaşımı", İstanbul, 1997.
- Taguchi, G., Clausing D., Robust Quality, Harvard Business Review, 65-75, 1990.
- Taguchi, G. ve Wu, Y., Taguchi Methods Case Studies From The Us And Europe. Michigan : Ameriken Supplier Institute Inc., 1989.
- Taptık, Y., Keleş, Ö., Kalite Savaşı, Kalder Yayınları, İstanbul, 1998.
- Taylan, D., Taguchi Deneş Tasarımı Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2009.
- Üçkardeş, F., Şahinler, S., Efe, E., Aykırı Gözlemlerin Belirlenmesinde Kullanılan Bazı İstatistikler, KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, 13(1), 2010.

Ünver, Ö., Gamgam, H., Uygulamalı İstatistik Yöntemler, Ankara, 1986.

## EKLER

### EK 1. T Dağılım Çizelgesi

S.d.	Anlamlılık Düzeyi					
	10% (0.1)	5% (0.05)	2% (0.02)	1% (0.01)	0.2% (0.002)	0.1% (0.001)
1	6.31	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	2.92	4.30	6.97	9.92	22.33	31.60
3	2.35	3.18	4.54	5.84	10.21	12.92
4	2.13	2.78	3.75	4.60	7.17	8.61
5	2.02	2.57	3.37	4.03	5.89	6.87
6	1.94	2.45	3.14	3.71	5.21	5.96
7	1.89	2.36	3.00	3.50	4.79	5.41
8	1.86	2.31	2.90	3.36	4.50	5.04
9	1.83	2.26	2.82	3.25	4.30	4.78
10	1.81	2.23	2.76	3.17	4.14	4.59
11	1.80	2.20	2.72	3.11	4.03	4.44
12	1.78	2.18	2.68	3.06	3.93	4.32
13	1.77	2.16	2.65	3.01	3.85	4.22
14	1.76	2.15	2.62	2.98	3.79	4.14
15	1.75	2.13	2.60	2.95	3.73	4.07
16	1.75	2.12	2.58	2.92	3.69	4.02
17	1.74	2.11	2.57	2.90	3.65	3.97
18	1.73	2.10	2.55	2.88	3.61	3.92
19	1.73	2.09	2.54	2.86	3.58	3.88
20	1.72	2.08	2.53	2.85	3.55	3.85
25	1.71	2.06	2.49	2.78	3.45	3.72
30	1.70	2.04	2.46	2.75	3.39	3.65
40	1.68	2.02	2.42	2.70	3.31	3.55
60	1.67	2.00	2.39	2.66	3.23	3.46
120	1.66	1.98	2.36	2.62	3.16	3.37
Infinity	1.64	1.96	2.33	2.58	3.09	3.29
Güven Düzeyi	90%	95%	98%	99%	99.8	99.9%

## EK 2. F Dağılım Çizelgesi

5% (0.05) significance level

Degrees of freedom for smaller SD		Degrees of freedom for larger SD																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30	60	Infinity	
1	647.8	799.5	864.2	899.6	921.8	937.1	948.2	956.7	963.3	968.6	976.7	984.9	993.1	1001.1	1010	1018	1018	
2	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.39	39.40	39.41	39.41	39.43	39.45	39.48	39.50	39.50	
3	17.44	18.04	18.44	18.73	18.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.28	14.17	14.17	13.99	13.90	13.90	
4	12.22	10.65	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.90	8.84	8.75	8.66	8.56	8.56	8.36	8.26	8.26	
5	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.33	6.12	6.02	6.02	
6	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.17	4.96	4.85	4.85	
7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.47	4.25	4.14	4.14	
8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.20	4.10	4.00	4.00	3.78	3.67	3.67	
9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.67	3.45	3.33	3.33	
10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.42	3.20	3.08	3.08	
12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.07	2.85	2.72	2.72	
15	6.20	4.77	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.76	2.52	2.40	2.40	
20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.46	2.22	2.09	2.09	
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.94	1.67	1.48	1.48	
Infinity	5.02	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.94	1.83	1.71	1.71	1.39	1.00	1.00	

### EK 3. TEK BİR AYKIRI DEĞER İÇİN GRUBBS TESTİ

S.d.	Anlamlılık Düzeyi	
	5% (0.05)	1% (0.01)
2	1.15	1.15
3	1.48	1.50
4	1.71	1.76
5	1.89	1.97
6	2.02	2.14
7	2.13	2.27
8	2.21	2.39
9	2.29	2.48
10	2.36	2.56
11	2.41	2.64
12	2.46	2.70
13	2.51	2.76
14	2.55	2.81
15	2.59	2.85
16	2.62	2.89
17	2.65	2.93
18	2.68	2.97
19	2.71	3.00
20	2.73	3.03
30	2.92	3.26
40	3.05	3.39
50	3.14	3.49
100	3.38	3.75

$$Test\ Değeri = \frac{|x - \bar{x}|}{s}$$

Burada;

x: Aykırı değer olmasından şüphe duyulan gözlem değerini,

$\bar{x}$  : Örneğin ortalamasını,

s : Örnekleme için standart sapma değerini ifade eder.

**EK 4. BİRİ DÜŞÜK DİĞERİ YÜKSEK İKİ UÇ GÖZLEM DEĞERİ İÇİN  
AYKIRILIK TESTİ**

S.d.	Anlamlılık Düzeyi	
	5% (0.05)	1% (0.01)
4	6.74	15.81
5	3.69	6.55
6	2.92	4.49
7	2.44	3.45
8	2.17	2.84
9	2.00	2.52
10	1.86	2.30
12	1.68	1.99
14	1.57	1.80
16	1.50	1.69
18	1.44	1.61
20	1.39	1.55
30	1.27	1.34
40	1.20	1.27
50	1.17	1.22
100	1.09	1.11

$$Test\ Değeri = \frac{\text{Bütün verilere ait standart sapma}}{\text{En büyük ve en küçük gözlemlere ait standart sapma}}$$

**EK 5. HER İKİSİ DE DÜŞÜK VEYA HER İKİSİ DE YÜKSEK İKİ UÇ DEĞER İÇİN AYKIRILIK TESTİ**

S.d.	Anlamlılık Düzeyi	
	5% (0.05)	1% (0.01)
4	2.10	2.16
5	2.41	2.50
6	2.66	2.79
7	2.87	3.02
8	3.04	3.22
9	3.18	3.40
10	3.31	3.56
12	3.56	3.82
14	3.75	4.02
16	3.90	4.18
18	4.04	4.33
20	4.17	4.47
30	4.60	4.97
40	4.87	5.32
50	5.08	5.53
100	5.63	6.07

$$Test\ Değeri = \frac{|En\ Büyük\ (veya\ küçük)\ iki\ sapan\ değer\in\ toplamı|}{Standart\ Sapma}$$