T.C.
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
EKONOMETRİ ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

ÇOKLU KALİTE KARAKTERİSTİKLERİ İÇİN KARESEL KAYIP FONKSİYONLARI VE SİNYAL GÜRÜLTÜ ORANLARININ KULLANIMI ÜZERİNE BİR UYGULAMA

Sevilay ÇAKIR

Danışman
Yrd. Doç.Dr. Ali Kemal ŞEHİRLİOĞLU

2007

YEMİN METNİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ”**Çoklu Kalite Karakteristikleri İçin Karesel Kayıp Fonksiyonları Ve Sinyal Gürültü Oranlarının Kullanımı Üzerine Bir Uygulama**” adlı çalışmanın, tarafımdan, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin bibliyografyada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

Tarih .../..../.....
Sevilay ÇAKIR
İmza

DOKTORA TEZ SINAV TUTANAĞI

Öğrencinin
Adı ve Soyadı **:**Sevilay ÇAKIR
Anabilim Dalı **:**EKONOMETRİ A.B.D.
Programı **:** Doktora Programı
Tez Konusu **:**Çoklu Kalite Karakteristikleri İçin Karesel Kayıp Fonksiyonları ve Sinyal Gürültü Oranlarının Kullanımı
Sınav Tarihi ve Saati **:**

Yukarıda kimlik bilgileri belirtilen öğrenci Sosyal Bilimler Enstitüsü'nün …….. tarih ve ……. Sayılı toplantısında oluşturulan jürimiz tarafından Lisansüstü Yönetmeliğinin 30.maddesi gereğince doktora tez sınavına alınmıştır.

Adayın kişisel çalışmaya dayanan tezini …. dakikalık süre içinde savunmasından sonra jüri üyelerince gerek tez konusu gerekse tezin dayanağı olan Anabilim dallarından sorulan sorulara verdiği cevaplar değerlendirilerek tezin,

BAŞARILI	O	OY BİRLİĞİİ ile	O
DÜZELTME	O*	OY ÇOKLUĞU	O
RED edilmesine	O**	ile karar verilmiştir.	

Jüri teşkil edilmediği için sınav yapılamamıştır. O***
Öğrenci sınava gelmemiştir. O**

* Bu halde adaya 3 ay süre verilir.
** Bu halde adayın kaydı silinir.
*** Bu halde sınav için yeni bir tarih belirlenir.

	Evet
Tez, burs, ödül veya teşvik programlarına (Tüba, Fullbrightht vb.) aday olabilir.	O
Tez, mevcut hali ile basılabilir.	O
Tez, gözden geçirildikten sonra basılabilir.	O
Tezin, basımı gerekliliği yoktur.	O

JÜRİ ÜYELERİ				İMZA
……	□ Başarılı	□ Düzeltme	□ Red	……..
……	□ Başarılı	□ Düzeltme	□ Red	…….....
……	□ Başarılı	□ Düzeltme	□ Red	…. ……
……	□ Başarılı	□ Düzeltme	□ Red	…….....
……	□ Başarılı	□ Düzeltme	□ Red	…. …….

ÖZET

Doktora Tezi

Çoklu Kalite Karakteristikleri İçin Karesel Kayıp Fonksiyonları Ve Sinyal Gürültü Oranlarının Kullanımı Üzerine Bir Uygulama

Sevilay ÇAKIR

Dokuz Eylül Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü
Ekonometri Anabilim Dalı
İstatistik Programı

Taguchi yöntemi, ürünlerin veya süreçlerin performansını daha düşük maliyet ile ve daha az sürede geliştirmek için uygun bir tekniktir. Bunun yanı sıra parametre koşullarını optimize etmek (en iyilemek) için bir tek kalite karakteristiği üzerine odaklanır. Uygulamada ise birçok ürün ve/veya süreç birden daha fazla kalite karakteristiğine sahiptir.

Endüstriyel uygulamalarda kalite karakteristikleri statik veya dinamik karakteristiklerdir. Statik kalite karakteristiklerini içeren parametre tasarımını optimize etmek için bazı yaklaşımlar uygulanmıştır. Fakat çoklu ve aynı zamanda dinamik kalite karakteristikli optimizasyonlar üzerine çok az odaklanılmıştır.

Bu tezde, dinamik çoklu kalite karakteristikli parametre tasarımı için toplam beklenen kaybı eşzamanlı olarak minimize etmek için Taguchi' nin kuadratik kalite kayıp fonksiyonu yardımı ile koşullu istatistiksel bir model türetilmektedir ve bu yaklaşımı destekleyen bir örnek gösterilmektedir.

Anahtar Kelimeler: a) Kayıp Fonksiyonu**, b)** Çoklu Kalite Karakteristikleri

c) Statik Sistemler **d)** Dinamik Sistemler

e) Taguchi Yöntemi **f)** Koşullu Dağılımlar

ABSTRACT

Ph.D.Thesis

A Case Study On Using of Quadratic Loss Functions and Signal Noise Ratios For Multiple Quality Characteristics

Sevilay ÇAKIR

Dokuz Eylül University
Institute of Social Sciences
Econometri Chair
Statistic Program

The Taguchi method is a useful technique to improve the performance of products or processes at a lower cost and in less time. The Taguchi method focused on a single characteristic to optimize the parameter conditions. In practice, most products and processes have more than one quality characteristic.

Quality characteristics in industrial applications are static or dynamic characteristics. Several approaches have been applied to optimize the parameter design including static quality characteristics. However, little attetion has been focused on optimizing the multiple dynamic quality characteristics.

In this thesis, a conditional statistical formula corresponding to the model is derived from Taguchi' s quadratic quality loss function to minimize the expected total cost for the parameter design of multiple dynamic quality characteristics simultaneously. An example demonstrating this approach is illustrated.

Key Words: **a)** Loss Function, **b)** Multiple Quality Characteristics
c) Static Systems **d)** Dynamic Systems
e) Taguchi Method **f)** Conditional Distrubutions

ÖNSÖZ

Parametre tasarımının endüstriyel uygulamalarındaki son trendi "dinamik kalite karakteristikleri" olarak adlandırılan karmaşık sistemlerdir. Endüstriyel sistemlerin genellikle dinamik sistemler olması ve birden fazla karakteristik içermeleri nedeni ile son zamanlarda çoklu dinamik sistemler üzerine çalışmalar yapılmakta ve sayıları yeterli olmamaktadır. Özellikle de bu konu üzerine yapılan çalışmalar Türkiye' de çok azdır. Bu çalışmanın amacı bu konuda yapılan çalışmalar üzerine eleştirilsel bir yaklaşım ile yeni bir prosedür sunmaktır.

Çalışmamın hazırlanmasında yol gösterici yaklaşımı, tuttuğu ışık ve bilimsel önerileri nedeni ile Yrd. Doç.Dr. Ali Kemal Şehirlioğlu' na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çoklu Kalite Karakteristikleri İçin Karesel Kayıp Fonksiyonları Ve Sinyal Gürültü Oranlarının Kullanımı Üzerine Bir Uygulama

İÇİNDEKİLER

YEMİN METNİ ii
TUTANAK iii
ÖZET iv
ABSTRACT v
ÖNSÖZ vi
İÇİNDEKİLER vii
TABLOLAR LİSTESİ x
ŞEKİLLER LİSTESİ xi
GİRİŞ 1

BİRİNCİ BÖLÜM
TAGUCHI FELSEFESİ VE YÖNTEMBİLİMİ

1.1. Taguchi Yaklaşımı……..……5
1.2. Taguchi'nin Kayıp Fonksiyonu ve Kalite Karakteristikleri Tipi ……....7
1.2.1. Taguchi' nin Kayıp Fonksiyonu' nun Analitik Yorumu ve Beklenen Kayıp….……11
1.2.2. Kalibrasyon Yöntemi ve Kalite Seviyesi ……...…15
1.3. Taguchi' nin Tasarım Kavramı……...18
1.3.1. Faktörlerin Sınıflandırılması…….19
1.3.2.Taguchi' nin Tasarım Aşamaları …….21
1.3.3. Parametre Tasarımının Amacı ……...24
1.3.4. Parametre Tasarım Deneyi ve Ortogonal Dizinler……...…26
1.3.5. Performans İstatistiği Olarak SN Oranının Geometrik Yorumu…..……..28

İKİNCİ BÖLÜM
STATİK VE DİNAMİK SİSTEMLER

2.1. Statik Sistemler…….34

2.2. Dinamik Sistemler…….....36
2.2.1. C-C Tipi Dinamik Sistemler……..……38
2.2.1.1. Sinyal Faktörün Gerçek Değerinin bilindiği Durumlar……....40
2.2.2. C-D Tipi Dinamik Sistemler……...52
2.2.3. D-C Tipi Dinamik Sistemler……...52
2.2.4 D-D Tipi Dinamik Sistemler……53
2.2.4.1. Basit Oran Değişkeni Durumu İçin Sinyal Gürültü Oranı…..…...55
2.2.4.2. Yanıtın İki Sınıfta Değerlendirildiği Durumlarda Sinyal Gürültü Oranı……..….55
2.2.4.3 Hem Yanıtın Hem de Sinyal Faktörün Seviyesinin İki Sınıfta Değerlendirildiği Durumlar……57
2.2.4.4. Yanıtın İki Sınıfta Değerlendirildiği ve Sinyal Faktörünün Gerçek Değerinin Bilinmediği Durumlar……..61
2.3 Dinamik Sistemlerde Optimizasyon……..……..…..63
2.3.1 Dinamik Sistemlerde Parametre Tasarım Optimizasyonu İçin Performans Ölçüleri……..……66
2.3.2 Dinamik Sistemlerde Modelleme ve Analiz Stratejisi……70
2.3.2.1 Performans Ölçüsünü Modelleme……..…70
2.3.2.2 Yanıt Fonksiyonunu Modelleme……71
2.3.2.3 Parametre Tahminlerinin İlişkileri……..…73
2.3.2.4 Kayıp Model Yaklaşımı……...……74
2.3.2.5 Yanıt Model Yaklaşımı……..…76

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ÇOKLU KALİTE KARAKTERİSTİKLERİNDE OPTİMİZASYON

3.1 Statik Çoklu Kalite Karakteristikli Durum İçin Optimizasyon……..82
3.1.1 Toplam Normalize Edilmiş Kalite Kayıp Fonksiyonu Yaklaşımı…….....82
3.1.2 Taguchi' nin Kalite Kaybının Yüzdesel Azalımına Dayalı Bir Yaklaşım…87
3.1.2.1 Kalite Kaybının Yüzdesel Azalımı ve SN Oranı İlişkisi……..…..87
3.1.2.2 Çoklu Kalite Karakteristikleri Modeli……..……89
3.2 Dinamik Çoklu Kalite Karakteristikli Durum İçin Optimizasyon……..91
3.2.1 C-C Tipi Dinamik Modeli……91
3.2.2 D-D Tipi Dinamik Modeli……93
3.2.3 Tolerans Tasarımı……..94

3.3 Koşullu Dağılımlar…….96
3.4 Ortalama Kalite Kaybının Koşullu Varyans İle İncelenmesi ……..98

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
UYGULAMA

4.1 Problemin Tanımlanması……...104
4.2 Analiz…….107
4.3 Sonuç ve Yorumlar ……113

Kaynaklar……117

TABLOLAR LİSTESİ **Sayfa**

Tablo 1.1 Üretim Alanındaki Taguchi Yöntemi Uygulamaları 6
Tablo1.2 Parçaların Toplam ve Ortalama Kayıpları 14
Tablo 1.3 Ortogonal Dizinin Seçimi İçin Başlangıç Stratejisi 27
Tablo 1.4 Ortogonal Dizinin Seçimi İçin İleri Strateji 28
Tablo 2.1 Statik Problemler İçin SN oranları 36
Tablo 2.2 C-C Durumunda SN Oranı Hesaplamalarının Sınıflandırılması 41
Tablo 2.3. Sinyal Faktör ve Veri (yanıt) 43
Tablo 2.4 Sıfır Nokta Oransal Denkleminin Varyans Analiz Tablosu 45
Tablo 2.5 Referans Nokta Kalibrasyonu sonrasında Yanıtlar 46
Tablo 2.6 Referans Nokta Oransal Denklemi İçin Varyans Analiz Tablosu 48
Tablo 2.7 Doğrusal Denklem için Varyans Analiz Tablosu 50
Tablo 2.8 Dijital Değişkenlerde SN Oranı Sınıflaması 54
Tablo 2.9 0–1 Veri Tablosu 55
Tablo 2.10 İki Tip Hatalı Girdi-Çıktı Tablosu 57
Tablo 2.11 Hata Oranına Göre Girdi-Çıktı Tablosu 58
Tablo 2.12 Standartlaştırılmış Girdi-Çıktı Tablosu 58
Tablo 2.13 Yanıtın İki Kategoride Değerlendirildiği Deney Verileri 62
Tablo 2.14 Yanıtın İki Sınıfta Değerlendirildiği ve Sinyal Faktörünün Gerçek Değerinin Bilinmediği Durumlar İçin Varyans Analiz Tablosu 63
Tablo 2.15 Dinamik Problemler İçin SN Oranları 64
Tablo 2.16 Sinyal-Yanıt Sistemleri Örnekleri 66
Tablo 4.1 Sıcaklık Kontrol Devresinin Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri 105
Tablo 4.2 Sıcaklık Kontrol Devresinin Gürültü / Sinyal Faktörleri ve Seviyeleri 105
Tablo 4.3 Başlangıç Koşuluna İlişkin $R_{T\text{-}ON}$ ve $R_{T\text{-}OFF}$ Değerleri 106
Tablo 4.4 $R_{T\text{-}ON}$ Verileri 106
Tablo 4.5 $R_{T\text{-}OFF}$ Verileri 107
Tablo 4.6 Koşullu Yöntem İçin Her bir Denemeye Karşılık β, σ^2 ve η Değerleri 110
Tablo 4.7 Parametre Tahminleri 111
Tablo 4.8 Analiz Sonuçları 114
Tablo 4.9 SN Oranı ve Kayıp Analizi Karşılaştırması 113

ŞEKİLLER LİSTESİ **Sayfa**

Şekil 1.1 Geleneksel Kayıp Anlayışı 8

Şekil 1.2 Taguchi Kayıp Fonksiyonu 9

Şekil 1.3. Kuadratik Kayıp Fonksiyonunun Farklı Yapıları 11

Şekil 1.4 Ortalama Kalite Kaybının Değerlendirilmesi 15

Şekil 1.5 Sinyal Faktörün Dinamik Karakteristiği, *M* ve Ölçülen Karakteristik *y* 16

Şekil 1.6 Gürültü Faktörleri ile Toplumsal Kayıp Yapısı 20

Şekil 1.7 Fonksiyonel Limit ve Tolerans 23

Şekil 1.8 Üretim / Süreç Blok Diyagramı (P-Diyagramı) 24

Şekil 1.9 Taguchi' nin Parametre Tasarım Deney Örneği 27

Şekil 1.10 Yanıtın Hedef Değerden Açı Olarak Sapması 29

Şekil 1.11 Kaybın Ayrışımı 30

Şekil 1.12 Yanıtın Ayrışımı 31

Şekil 2.1 Satış Makinesi için 0-1 Verileri 55

GİRİŞ

Günümüzün küresel ekonomisinde yüksek kaliteli fakat düşük maliyetli ürünler (ve/veya süreçler) ayakta kalmanın yolu olmuştur. Bu konuda ürün kalitesini geliştirmek için çeşitli yaklaşımlar önerilerek, bazı yöntemler uygulanmıştır. Bu yaklaşımlarda, ürünün istenen özelliklerini ifade eden kalite karakteristikleri tek tek ele alınarak kalite geliştirilmeye çalışılmıştır. Ancak bu yaklaşımlar yeteri kadar etkin ve ekonomik olmamaktadır. Günümüzde iki veya daha çok yanıtı beraber analiz ederek ürünün kalitesi üzerindeki etkileri belirleyen ve buna göre en iyi kombinasyonları ortaya koyan yaklaşımlar önem kazanmıştır. Bu amaçla bazı yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yaklaşımların çoğu statik sistemler üzerinedir. Oysaki endüstriyel uygulamaların birçoğu dinamik karakteristik içeren sistemlerdir. Dinamik sistemler ile ilgili yapılan çalışmalar çok fazla yer almamaktadır. Özellikle de Türkiye'de bu konuda yapılan çalışma sayısı hemen hemen yok denecek kadar azdır. Bu nedenlerle, bu çalışmada çok sayıda kalite karakteristiğine sahip bir üretim sürecinin en iyilenmesi için hem statik hem de dinamik sistemlerde çoklu kalite karakteristiklerinin birlikte analiz edilebilmesi için sinyal gürültü oranlarının kullanımı Taguchi yöntemi esaslı olarak ele alınmıştır.

Çalışmanın amacı statik ve özellikle de dinamik robust tasarımın optimizasyon süreci hakkında uygulayıcılara, araştırmacılara bir fikir vermek, optimizasyon süreci adımlarını daha anlaşılır hale getirmek ve ortalama kalite kaybının koşullu dağılımlar çerçevesinde incelenmesini önermektir. Bu çerçevede alt amaçlar şu şekilde maddelenebilir:

- Bugüne kadar bu konuda yapılan yaklaşımları, çalışmaları tanıtmak,
- Bu yaklaşımların birbirlerine göre eksik ve üstün yönlerini tespit etmek

- Dinamik çoklu kalite karakteristikli durumlar için koşullu dağılımları dikkate alan kalite kaybı prosedürünü geliştirmek, problemlerin çözümünde etkin ve yaygın olarak kullanılmaları için uygulama ile daha iyi anlaşılmasını sağlamaktır.

Taguchi yöntemi esaslı olan bir çalışma olması nedeni ile çalışmanın birinci bölümünde Taguchi felsefesi ele alınmıştır. Taguchi' nin iki önemli kavramı, kayıp kavramı ve optimizasyon prosedüründe anahtar eleman olan parametre tasarımı kavramı tanıtılmıştır.

İkinci bölümde statik ve dinamik sistemler tanıtılarak bu sistemlerde kalite kayıp fonksiyonu, sinyal gürültü oranları (S/N) ve sinyal gürültü oranlarının veri analizinde kullanımı ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, çoklu kalite karakteristiği kavramı önceki bölümler üzerine ilave edilerek, hem statik hem de dinamik çoklu kalite karakteristiklerinin optimizasyon prosedürleri incelenmiştir. Optimizasyon sürecinde karşılaşılacak problemlere yer verilmiştir. Optimizasyon sürecinde kontrol edilebilen en iyi faktör kombinasyonunun belirlenmesi için performans istatistiği olarak sinyal-gürültü oranı' nın kullanımı ve kullanımının sakıncalı ve üstün yönleri açıklanmıştır. Çoklu kalite karakteristikli problemlere ilişkin geliştirilen yöntemler ileri derecede matematik ve istatistik bilgisi gerektirdiğinden orta seviyedeki uygulayıcıların anlaması açısından kullanımı kolay olan yöntemler de tanıtılmıştır. Ayrıca kalite kayıp fonksiyonunun şans değişkeninin koşullu dağılımına göre belirlenmesi ve daha sonra elde edilen bu kayıp fonksiyonunu minimize eden optimal seviyelerin belirlenmesi gerektiği vurgulanmış ve bu yaklaşıma göre yeni bir kalite kayıp fonksiyonu elde edilmiştir.

Dördüncü bölümde bir simülasyon (benzetim) uygulaması üzerinde üçüncü bölümde yer verilen yeni yaklaşım uygulanarak bu yöntemin anlaşılması, diğer yöntemlerle karşılaştırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır.

Son on yıldır dünyadaki birçok lider kuruluşun uygulamakta olduğu six sigma yönetim sistemi, şirketlerin her türlü sürecini daha verimli hale getirerek karlılıklarını arttırmalarına ve büyümelerine yardımcı olmuştur. Bu yöntem ile verilerin istatistiksel analizlerinin bir disiplin çerçevesinde kullanıldığı düşünülürse, süreçlerin iyileştirilmesi ve yeniden tasarımlanması açısından robust tasarım ve yeni, kolay, daha etkin optimizasyon prosedürü (en iyileme) kavramları önem kazanmaktadır.

Bölüm 1

TAGUCHI FELSEFESİ VE YÖNTEM BİLİMİ

Toplam kalite anlayışının gelişmesinde önemli katkıları olan Isikawa Kaoru Japonya' daki kalite hareketinde kalite denetimini geleneksel muayene, istatistiksel kalite denetimi ve ürün / süreç tasarımı olarak üç aşamada belirtmiştir. Ürün ve süreç tasarımında kalitenin geliştirilmesi konusunda ise Genichi Taguchi önemli katkılarda bulunmuştur. Özellikle istatistiksel deney tasarımına dayalı olarak kalite geliştirme için felsefe ve yöntembilim geliştirmiştir.

Taguchi kaliteyi iki alanda ele almıştır (Ross, 1988). Birincisi kalitenin ürün veya süreç geliştirme (tasarım) aşamasında geliştirilmesi *(Off-line -Çevrim Dışı- Kalite Kontrol)*, ikincisi üretim süreçlerini izleyerek kalitenin doğrulanması (*On-line -Çevrim İçi- Kalite Kontrol)*' dır.

Off-line kalite denetiminde ürün geliştirme sürecinde, tasarım mühendisleri müşteri isteklerini, ihtiyaç ve beklentilerini ürün spesifikasyonlarına dönüştürür ve üretim mühendisleri tasarlanan ürünün üretimini gerçekleştirirler. Bu nedenle geliştirilmiş süreç / ürün tasarımları hem üretim kusurlarını hem de buna bağlı olarak süreç kontrol ihtiyaçlarını azaltmakta ve kalite geliştirme çabaları daha düşük maliyet ile sonuçlanmaktadır.

Taguchi bu nedenler ile ürün kalitesini iyileştirme amacı ile tasarım aşamasında ürünlerdeki değişkenliğin azaltılmasını temel alan parametre tasarımı yaklaşımını geliştirmiştir. Amaç; değişkenliğe duyarlı olan bir sistem geliştirmektir.

Taguchi' nin yaklaşımında tasarım kavramının yanı sıra kayıp kavramı da önemli bir yere sahiptir. Taguchi kaliteyi, ürünün istenilen kalite seviyesine ulaşmaması durumunda uğradığı kayıp olarak tanımlamıştır. Bu kayıp müşterinin memnuniyetsizliği, yenileme veya tamir maliyetleri, pazardaki imaj kaybı ve pazar payı kaybı olarak ifade edilebilir. Bu yaklaşımda bir ürün, spesifikasyonları

karşılayabilir fakat müşteri şartlarını (hedef değeri) karşılamayabilir. Taguchi kaybın sadece spesifikasyonlara uymaması durumunda değil, hedef değerden sapması durumunda da ortaya çıkabileceğini ifade etmektedir.

1.1 TAGUCHI YAKLAŞIMI

Taguchi' nin kalite felsefesi yedi temel noktada özetlenebilir (Kackar,1986).

1. Üretilen ürünün kalitesinin önemli bir boyutu, toplumda o ürünün kalitesizliğinin yol açacağı toplam kayıp ile ifade edilebilir.
2. Rekabetçi bir ekonomide iş dünyasında kalabilmek için kaliteyi geliştirmek ve maliyetleri düşürmek gereklidir.
3. Sürekli kalite geliştirme programı, hedef değer etrafında performans karakteristiklerinin varyasyonunu sürekli azaltmayı içermelidir.
4. Bir ürünün performansındaki varyasyon (değişim) sonucunda ortaya çıkan ve müşterilerin katlandığı kayıp performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasının karesi ile orantılıdır.
5. Üretilen ürünün nihai kalite ve maliyeti, önemli oranda ürünün ve o ürünün üretim sürecinin mühendislik tasarımları tarafından belirlenir.
6. Bir ürünün (veya sürecin) performans varyasyonu, ürün ve süreç parametrelerinin performans karakteristikleri üzerindeki doğrusal olmayan etkileri giderilerek azaltılabilir.
7. İstatistiksel olarak planlanmış deneyler performans varyansını azaltan ürün veya süreç parametrelerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Taguchi yöntemi, üründe ve proseste değişkenliğe neden olan kontrol edilebilen faktörlerin seviyelerini, kontrol edilemeyen (gürültü) faktörlere karşı duyarsız olacak şekilde belirleyerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım yöntemidir. Bu yöntem, ürünlerin kalitesinin iyileştirilmesinin yanı sıra çok daha az deneme ile iyi sonuçlar veren ve istatistiksel araçlar ile ilgili bilgisi az uygulayıcılarında kolaylıkla uygulayabilecekleri bir yaklaşımdır (Şehirlioğlu, A.K.1997).

Taguchi yöntemi, üretim organizasyonlarında daha geniş bir uygulamaya sahiptir. Tablo 1.1' de Taguchi yöntemi' nin çeşitli üretim sektörlerindeki uygulamaları ve yöntemin kullanımının faydaları gösterilmektedir.

Tablo 1.1 Üretim Alanındaki Taguchi Yöntemi Uygulamaları (Antony,J ve Antony,F.J, 2001)

Süreç/ Ürün	**Problem**	**Deney Sayısı**	**Faydaları**
Enjeksiyon kalıbı yapma	Yüksek süreç değişkenliğine karşın yüksek ıskarta	8 deneme	Yıllık tasarruf £40,000 üzerinde
Dizel akıtma	Yüksek yeniden işleme oranı	16 deneme	Yıllık tasarruf £10,000 üzerinde
Kaynak süreci	Düşük kaynak dayanımı	16 deneme	Yıllık tasarruf £16,000 üzerinde
Kimyasal süreç	Düşük süreç çıktısı	8 deneme	Süreç çıktısı 10% gelişti
Bisküvi	Bisküvi boylarındaki yüksek değişkenlik	16 deneme	Bisküvi uzunluklarındaki değişkenlik 25% azaldı
Tel bağlama süreci	Düşük tel çekme dayanımı	16 deneme	Yıllık tasarruf £30,000 üzerinde

Taguchi yönteminin hizmet endüstrisinde kullanımı yaygın değildir. Bunun nedenleri:

—hizmetin performansını ölçmek daha zordur.

—bir hizmet sürecinin performansı davranışa ve hizmet sağlayıcının tutumuna bağlıdır ve zamana göre değişir.

—kontrol faktörlerini tanımlamak, ölçmek ve bunların performans karakteristikleri üzerindeki etkilerini belirlemek oldukça zordur.

Yöntemin hizmet sektöründeki uygulamaları için bazı örnekler şunlardır (Antony,J ve Antony,F.J, 2001) :

—müşteri şikayetlerini yanıtlamak için geçen sürenin azaltılması
—hizmet hatalarının azaltılması
—bir hastanenin acil odasında kalma süresinin uzunluğunun azaltılması

Kalitenin üretimden önce tasarım aşamasında başladığını öne sürerek kalite düşüncesinde devrim yapan Taguchi' nin kalite felsefesinin ana fikirleri aşağıda özetlenmiştir (Roy, 1990).

1. Kalite seviyesi süreç muayenesi ile değil, ürünün tasarım aşamasında gerçekleştirilmelidir.

2. Kalitenin en iyi şekilde elde edilmesi, kalite karakteristiklerinin hedeflenen üretim değerinden sapmalarının minimize edilmesi ile gerçekleşir. Ürün, kontrol edilemeyen çevresel faktörlerden etkilenmeyecek şekilde tasarımlanmış olmalıdır.

3. Kalitenin maliyeti, hedef değerden sapmaların bir fonksiyonu olarak ölçülmelidir. Kayıplar, sistem içerisinde ölçülebilir olmalıdır.

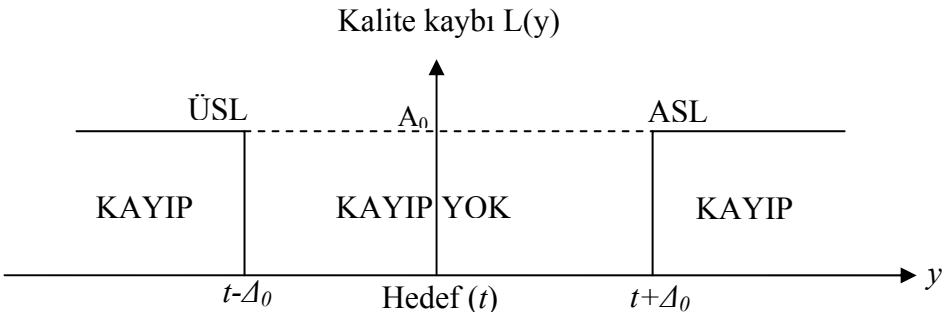
1 ve 2, Taguchi' nin parametre tasarımı, 3, Taguchi' nin kayıp fonksiyonu olarak bu bölümde açıklanacaktır.

1.2 TAGUCHI'NİN KAYIP FONKSİYONU VE KALİTE KARAKTERİSTİKLERİ TİPİ

Taguchi, kaliteyi ürünün yeterli bir kalite düzeyine ulaşmaması durumunda uğradığı kayıp olarak tanımlamaktadır. Bu kayıp, müşterinin memnuniyetsizliği, yenileme veya tamir maliyetleri, pazardaki imaj kaybı ve pazar payı kaybı olarak ifade edilebilir.

Geleneksel kalite kontrol anlayışında parçalar hedef değerden sapmalarına bakılmaksızın spesifikasyon sınırları içinde olup olmadıklarına göre değerlendirilirler. Parça, sınırların dışında ise hurdaya ayrılır, içinde ise kabul edilir. Firma açısından kayıp ya tamdır ya da sıfırdır.

$$\text{Kayıp} = \begin{cases} 0 & |y-t| \le \Delta_0 \\ A_0 & d.d \end{cases} \qquad 1.1$$



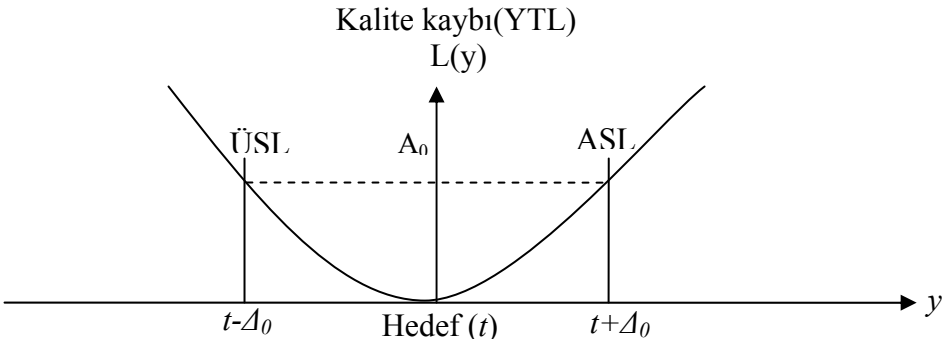
Şekil 1.1 *Geleneksel Kayıp Anlayışı*

Taguchi bu geleneksel görüşün yerine, ürünün yalnızca spesifikasyonlara uymaması durumunda değil aynı zamanda hedef değerden sapması durumunda da kaybın ortaya çıkacağını, hedef değerde olmayan her ürün karakteristiğinin toplumsal kayıba neden olduğunu ifade etmektedir. Bu ifadeyi karesel kayıp fonksiyonu ile açıklamıştır (Byrne ve Taguchi, 1988). Eşitlik 1.1' de y performans karakteristiği ve t hedef değerdir.

$$\text{Kayıp} = k(y-t)^2 \qquad 1.2$$

Taguchi kalite kaybını ikinci dereceden (karesel) kayıp fonksiyonu ile açıklayarak parasal kaybı fonksiyonel spesifikasyonlarla birleştirmiştir. Hedef değerden sapma arttıkça kayıp, sapmanın karesi miktarında artmaktadır. Bu fonksiyon hedef değerin

en iyi olarak kabul edildiği durumdur. Performans karakteristiği *y*' nin hedeften sapması ile *y* simetrik olarak artar.



Şekil 1.2 *Taguchi Kayıp Fonksiyonu*

Kalite karakteristiği *y*, sonlu bir hedef değere sahiptir ve sıfır değeri almaz. Kalite kaybı simetriktir. Bu gibi kalite karakteristikleri, *nominal-en iyi tipi kalite karakteristikleri* olarak adlandırılır ve Eşitlik 1.2, nominal-en iyi tipi kalite kayıp fonksiyonu olarak adlandırılır. Hedef Değeri *t*' dir. Şekil 1.2' de fonksiyon gösterilmektedir. Bir televizyonun renk yoğunluğu, bir güçlendirici devrenin voltaj çıkışı nominal(hedef)-en iyi tipi kalite karakteristiklerine örnek verilebilir.

Kayıp fonksiyonu farklı formlarda olabilir. İlgili kalite karakteristiği maksimize edilecekse, gerilme dayanımı gibi ya da minimize edilecekse parça büzülmesi gibi kayıp fonksiyonu yarım paraboldür. Taguchi yarım parabol durumunu daha küçük- daha iyi, daha büyük -daha iyi durumu olarak iki durumda ele almaktadır. Bunların dışında bir de asimetrik durumlar vardır.

Asla negatif değer almayan, ideal değeri "0" olan, değeri arttığında performansın kötüye gittiği karakteristikler *daha küçük- daha iyidir tipi kalite karakteristikleri*dir. Bir bilgisayarın yanıt verme süresi, bir otomobilin neden olduğu kirlilik bu tip için örnek verilebilir. Bu gibi durumlarda kalite kaybı aşağıdaki fonksiyona yaklaşır.

$$\text{Kayıp}= \begin{cases} 0 & y \to 0 \\ k(y^2) & d.d \end{cases} \qquad 1.3$$

t=0' dır. *y,* negatif değerler almadığından fonksiyon tek taraflı bir kayıp fonksiyonudur (Şekil 1.3.a).

Dayanım gücü gibi, negatif değer almayan, değeri arttıkça performansın daha iyiye gittiği karakteristikler *daha büyük –daha iyidir tipi kalite karakteristikleri*dir. Değeri arttıkça kalite kaybı daha küçük olur. İdeal değer, ∞' dur ve bu noktada kayıp sıfırdır. Eşitlik 1.4 daha büyük -daha iyi tipi kalite kayıp fonksiyonudur ve Şekil 1.3.b' de gösterilmektedir. Kayıp fonksiyonunda *y* için 1/*y* dönüşümü yapılır.

$$\text{Kayıp} = \begin{cases} 0 & y \to \infty \\ k(1/y^2) & d.d \end{cases} \qquad 1.4$$

Kayıp A_0, fonksiyonel limit Δ_0 olduğunda Eşitlik 1.4' te yerine konularak *k* sabiti,

$$k = A_0.\Delta_0^{\,2} \qquad 1.5$$

elde edilir. Nominal en iyidir ve daha küçük daha iyidir durumları için *k* sabiti,

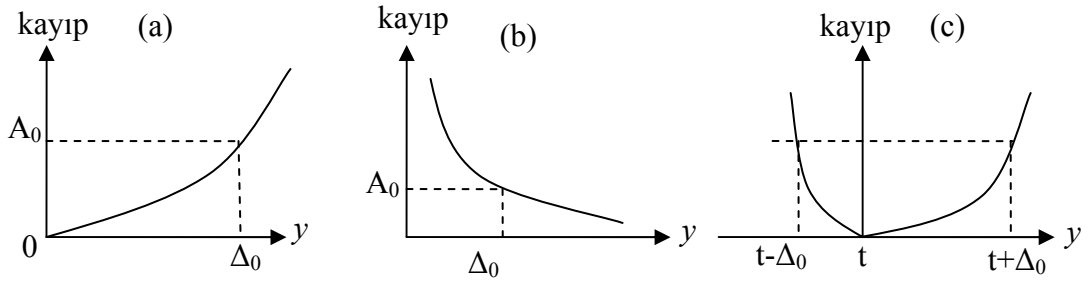
$$k = A_0 / \Delta_0^{\,2} \qquad 1.6$$

ile elde edilir.

Kalite karakteristiğinin nominal olması istendiğinde nominal (hedef değer) en iyidir, maksimum olması isteniyorsa daha büyük daha iyi durumu ile ilgileniriz. Kalite karakteristiğinin minimum olması isteniyorsa daha küçük daha iyi durumu ile ilgileniriz. Bu üç tip fonksiyonun yanı sıra bir de asimetrik durumlar vardır. Bu fonksiyonlarda fonksiyonun negatif veya pozitif kısmındaki sapması diğerine göre daha fazla kayıba neden olur. Bu gibi durumlarda iki yön için farklı bir katsayı

kullanılır. Bu fonksiyon eşitlik 1.7 ile verilmekte, Şekil 1.3.c ile gösterilmektedir. Görüldüğü gibi k_1 *ve* k_2 sabiti ile iki farklı bölge yer almaktadır ve bu plotta k_1, k_2'den daha büyüktür.

$$\text{Kayıp} = \begin{cases} k_1(y-t)^2 & y \le t \\ k_2(y-t)^2 & y > t \end{cases} \qquad 1.7$$



Şekil 1.3. *Kuadratik Kayıp Fonksiyonunun Farklı Yapıları*

Kalite kaybı ürünün sevkinden sonra oluşan tüm kaybın toplamıdır. Buna iadeler, garanti talepleri, müşterinin tamir masrafları gibi maliyetler dahildir. Taguchi felsefesinin geleneksel anlayışa göre bir farkı da kalite anlayışındadır. Ürünün kalitesi o ürünün toplumda neden olduğu kayıp ile ölçülür. Bu nedenle toplumsal kayıp ürünün istenilebilirliğini belirlemede bir ölçüdür. Toplum, ürünü toplumda sağlayacağı tasarrufa göre ödüllendirecek veya cezalandıracaktır. Bu nedenle kalite geliştirme için yapılan yatırımlar sadece firma açısından değil toplumda yaratacağı tasarruf açısından da değerlendirilmelidir. Bu nedenle kalite, ürün üretilmeden tasarım aşamasında sağlanmalıdır.

1.2.1 Taguchi' nin Kayıp Fonksiyonunun Analitik Yorumu ve Beklenen Kayıp

Kacker (1986)' in Taguchi felsefesinde önemli bir yere sahip olan kalite kaybı ve kayıp fonksiyonu ile ilgili önemli notları aşağıdadır.

1. Kalite kaybının parasal bir ölçümünü veren kayıp fonksiyonu, kalite karakteristiğinin hedef değerden sapmalarına bağlı olarak oluşan sürekli bir fonksiyondur.

2. Kalite kaybı, ürünün performans karakteristikleri ile fonksiyonel bir ilişkiye sahip olup ürün üzerinde yapılacak kalite iyileştirme ve geliştirme çalışmalarıyla minimize edilebilir. Kalitesizliği tasarım aşamasında önleme maliyeti, hurda, tekrar işleme ve ayıklama maliyetlerinden daha az olabilmektedir.

3. Müşteri tatminin sağlanamaması toplumsal kaybı (kalite kaybını) oluşturur. Oluşan kayıp üretim sürecinin bir noktasında ölçülmektense sistemin tamamında ele almak uygun bir yaklaşımdır.

Ürünün performans karakteristiği, *y,* ve hedef değer, *t* ile belirtilsin. Kalite karakteristiğinin *y* değeri, ürünün yaşam süresi boyunca *t* değerinden sapabilir. Bu nedenle *y* herhangi bir olasılık dağılımına sahip şans değişkenidir. *y* performans karakteristiğinin üretici (ve/veya kullanıcı)' ye olan kaybın parasal ölçümü L(*y*) ile belirtilmektedir. L(*y*)' nin gerçek fonksiyonel ifadesini belirlemek oldukça zor olduğundan Taguchi karesel kayıp fonksiyonu yaklaşımının kullanılmasını önermiştir. Hedef değer *y, t*' ye eşit olduğunda kayıp sıfırdır. Fonksiyonun birinci dereceden türevi de *y=t* noktasında sıfıra eşittir.

$$y=t \qquad \Rightarrow \qquad L(t)=0 \quad ve \quad L'(t)=0$$

Kayıp fonksiyonunun hedef değer t etrafındaki Taylor serisi açıldığında,

$$L(y)=L(t)+\frac{L'(t)}{1!}+\frac{L''(t)}{2!}+\frac{L'''(t)}{3!}+... \qquad 1.8$$

elde edilir. *y=t* olduğunda fonksiyon ve fonksiyonun birinci dereceden türevi de sıfıra eşittir. Üçüncü ve daha yüksek derecedeki terimler ihmal edilerek kayıp fonksiyonu,

$$L(y) = \frac{L''(t)}{2!}(y-t)^2$$

$$L(y) = k(y-t)^2 \qquad 1.9$$

eşitliği ile elde edilir (Taguchi,1991). k pozitif bir sabittir. y' nin herhangi bir değeri için eğer L(y) biliniyorsa k katsayısı belirlenebilir (Ross,1988).

k değerinin belirlenmesi, sistemin bütününde ele alınması ile ilgili olarak ve ortalama kayıp fonksiyonunun elde edilmesi örnek üzerinde ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Bunun için kullanılacak veriler Ross(1988) tarafından incelenen verilerdir (Tablo1.2).

Bu örnekte bir makine parçasının dış çapı için tolerans ±0,010 inch' dir. Ürün alt ve üst spesifikasyon (tolerans) limitini aşıyorsa parça hurdaya ayrılmakta ve hurdaya ayırma maliyeti parça başına 4$ olmaktadır. Hurda maliyeti burada kayıp olduğundan, kayıp 4$' dır. Eşitlik 1.3' te alt spesifikasyon limiti (ASL) için

$$4\$ = k(ASL-t)^2$$

$$k = \frac{4\$}{(ASL-t)^2}$$

şeklinde elde edilir. Görüldüğü gibi k spesifikasyon genişliğine bağlıdır. t=0, ASL=-0,010 için $k = 40.000\$/in.^2$ ' dir. Bu durumda çapı (-0,02 in.) olan parça için kayıp,

$$L = 40.000\$(-0{,}02-0{,}0)^2 = 0{,}16\$/in^2$$

-0,02 değerinde 11 parça bulunmaktadır. Bu durumda toplam maliyet (kayıp), parça başına düşen maliyet ile parça sayısı çarpılarak 1,76 $ olarak bulunur. Her bir parça için toplam kayıp Tablo 1.2' de yer almaktadır. Tüm parçaların toplam kayıpları toplanarak, toplam parça sayısına bölünerek ortalama maliyet, 0.11$ elde edilir.

Matematiksel olarak ortalama kayıp aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$L = k.\frac{\left[(y_1 - t)^2 + (y_2 - t)^2 + ... + (y_N - t)^2\right]}{N} \qquad 1.10$$

Eşitlik 1.9'un beklenen değerinin alınması ile beklenen kayıp,

$$R(y) = E[L(y)] = kE[(y-t)^2] = k.MSE(y)$$
$$R(y) = k.[(\mu - t)^2 + \sigma^2] \qquad 1.11$$

şeklinde elde edilir. Örnek veriler için beklenen kayıp (ortalama kayıp) aşağıdaki gibi yazılabilir.

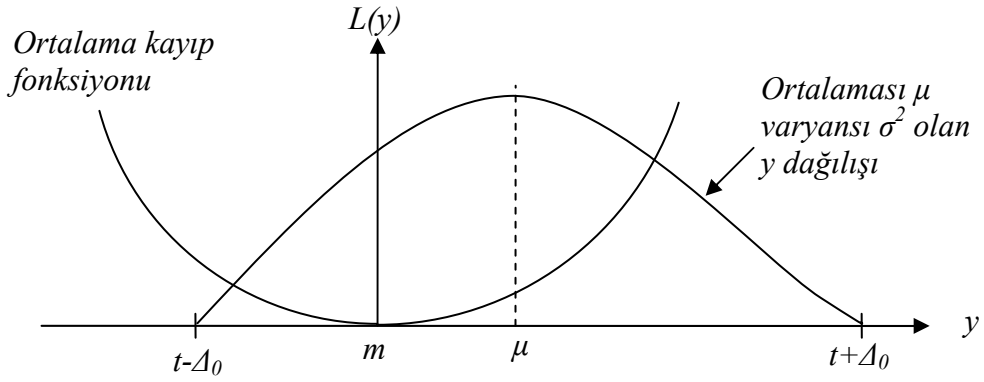
$$R(y) = k.[(\bar{y} - t)^2 + S^2] \qquad 1.12$$

S^2, y etrafındaki varyans, $\bar{y}$, grup için ortalama değerdir. $(\bar{y} - t)$, hedef değer t' den grup ortalamasının sapmasıdır. Tablo 1.2 örnek verileri için $S^2 = 2{,}64.10^{-6} in^2$, $\bar{y} = 0{,}0$ elde edilir. 100 parça için ortalama kayıp 1.12 eşitliği ile 0,11$ olarak bulunur.

Tablo1.2 *Parçaların Toplam ve Ortalama Kayıpları (Ross,1988)*

Çap	Kayıp/Parça ($)	Toplam Parça	Toplam Kayıp($)
-0,005	1.00	0	0.00
-0,004	0.64	2	1.28
-0,003	0.36	4	1.44
-0,002	0.16	11	1.76
-0,001	0.04	20	0.80
0,000	0.00	26	0.00
0,001	0.04	20	0.80
0,002	0.16	11	1.76
0,003	0.36	4	1.44
0,004	0.64	2	1.28
0,005	1.00	0	0.00
	Genel Toplam	100	10.56

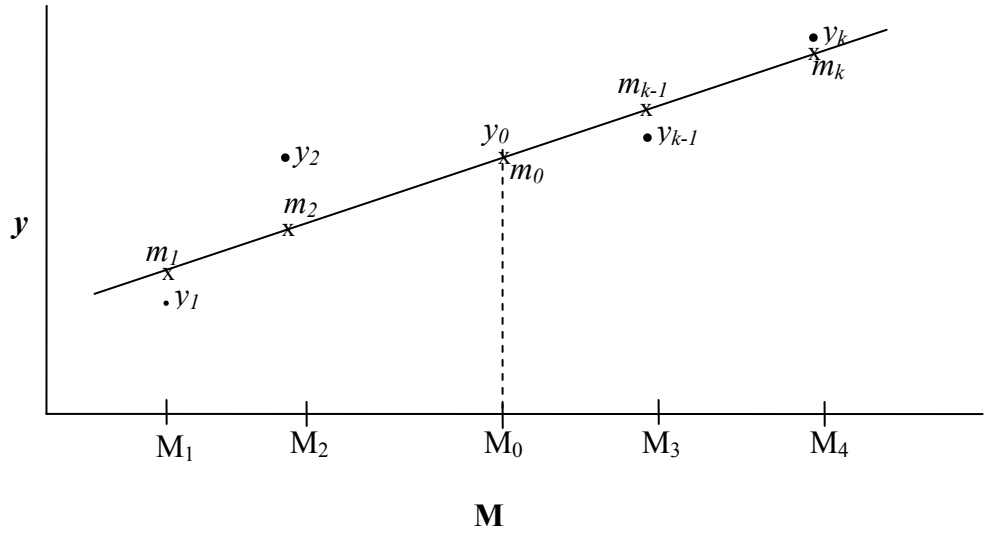
Görüldüğü gibi ortalama kayıp eşitlik 1.10 ve 1.12' ye göre 0,11$ olarak elde edilmiştir. Bu nedenle 1.10 ve 1.12 eşitliği birbirine eşittir.



Şekil 1.4 *Ortalama Kalite Kaybının Değerlendirilmesi*

1.2.2. Kalibrasyon Yöntemi ve Kalite Seviyesi

Üretim çalışmalarında ürünler farklı hedef değerlere sahip olabilmektedir. Böyle durumlarda sürecin kalitesi, hedef en iyidir durumu olmayıp dinamik bir fonksiyondur. Dinamik fonksiyonlu durumlarda her bir ürün farklı hedef değerlere sahiptir. Farklı hedef değerler $t_1,\ldots,t_k$ ile tanımlansın. Hedef değerleri değiştirmek için sinyal faktörlerine ihtiyaç vardır. Hedef değeri elde etmek için gerekli olan sinyal faktörü seviyeleri $M_1,\ldots,M_k$ ile tanımlansın. Düzeltme işleminden sonra ürünün karakteristik değerlerinin $y_1,\ldots,y_k$ olduğu kabul edilsin. Gerçekte elde edilmesi beklenen değerler $t_1,\ldots,t_k$ olması gerekirdi. Hedeflenen ve gerçekleşen üretim arasındaki farkın tüm seviyeler için aynı olduğu varsayılarak bu fark Δ ile belirtilsin. Şekil 1.5' te hedef değer t ile sinyal faktör M arasındaki ilişki M_0 noktasından geçen doğrusal bir ilişki ile gösterilmiştir (Taguchi 1991).



Şekil 1.5 *Sinyal Faktörün Dinamik Karakteristiği, M ve Ölçülen Karakteristik, y*

Kalite seviyesi, Q aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir.

$$Q = (A/\Delta^2).[(y_1 - t_1)^2 + ... + (y_k - t_k)^2].1/k \qquad 1.13$$

Her bir y_i değerinin t_i değerinden α değeri kadar farklı olduğu varsayılarak kayıp Q,

$$Q = (A/\Delta^2).\alpha^2 \qquad 1.14$$

elde edilir. Belirli bir sinyal faktörünün, referans noktası olarak adlandırılan, M_0 seviyesi kullanılarak, α farkı sıfır olacak şekilde üretimde düzeltme yapıldığında, değişkenliğe göre kayıp sıfır olacaktır. Bu prosedür "referans nokta kalibrasyonu" olarak adlandırılmaktadır. Referans nokta kalibrasyonundan sonra elde edilen $y_1,...,y_k$ değerleri için kalite seviyesi eşitlik 1.16 ile tanımlanmıştır. Referans nokta kalibrasyonu olmaksızın hedef değerden ortalama sapma,

$$\alpha = \frac{1}{k}[(y_1 - t_1) + ... + (y_k - t_k)] \qquad 1.15$$

şeklinde set edilerek kalite seviyesi Q,

$$Q = \frac{A}{\Delta^2}\frac{[(y_1 - \alpha - t_1)^2 + (y_2 - \alpha - t_2)^2 + ... + (y_k - \alpha - t_k)^2]}{k} \qquad 1.16$$

eşitliği ile elde edilir. Eşitlik 1.14 ile referans nokta kalibrasyonu ile elde edilen kalite seviyesi, eşitlik 1.16 aynıdır (Taguchi, 1991). Referans nokta kalibrasyonu sonrasındaki varyans,

$$\sigma^2 = \frac{1}{k}[(y_1 - \alpha - t_1)^2 + (y_2 - \alpha - t_2)^2 + ... + (y_k - \alpha - t_k)^2] \qquad 1.17$$

eşitliği ile elde edilebilir.

Referans nokta kalibrasyonunun yanı sıra başka kalibrasyon yöntemleri de vardır. Bu yöntemlerden en çok "sıfır nokta kalibrasyon" yöntemi daha sık kullanılmaktadır. Sıfır nokta kalibrasyonundan sonraki veriler $y_1,...,y_k$ olduğu kabul edilerek, sinyal faktör M ile olan ilişkisi için,

$$y = \beta M \qquad 1.18$$

ifadesi yazılabilir. Oransal sabitin kalibrasyonu M_0 yardımı ile yapılırsa, β için

$$\beta = y_0 / M_0 \qquad 1.19$$

yazılır. y_0, M_0 sinyal faktörüne karşılık gelen y değeridir. Bu durumda hata varyansı σ^2 aşağıdaki eşitlik ile sağlanabilir.

$$\sigma^2 = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left(\frac{M_0}{y_0}y_i - t_i\right)^2 \qquad 1.20$$

Kalite seviyesi ise,

$$Q = \frac{A}{\Delta^2}\sigma^2 \qquad 1.21$$

eşitliği ile elde edilir. Referans nokta oransal kalibrasyon durumunda standart bir referans noktası değerinin M_0 olduğu ve bu değere karşılık gelen yanıtın y_0 olduğu varsayılır. Sinyal faktör seviye değerleri $M_1',...,M_k'$ ve karşılık gelen yanıtlar $y_1',...,y_k'$ olsun. Referans nokta kalibrasyonunda, M_0 değeri tüm sinyal faktörü seviye değerlerinden çıkarılır.

$$\begin{aligned} M_1 &= M_1' - M_0 \\ M_2 &= M_2' - M_0 \\ &. \\ &. \\ &. \\ M_k &= M_k' - M_0 \end{aligned} \qquad 1.22$$

Bu işlem sonunda tüm sinyal faktörleri seviyeleri düzeltilmiş olarak elde edilir. Daha sonra benzer işlem yanıt değerleri üzerine uygulanır.

$$\begin{aligned} y_1 &= y_1' - y_0 \\ y_2 &= y_2' - y_0 \\ &. \\ &. \\ &. \\ y_k &= y_k' - y_0 \end{aligned} \qquad 1.23$$

Bu dönüşümlerden sonra sinyal faktörleri ile yanıt arasındaki ilişki incelenir. Bu inceleme Dinamik sistemler, kısım 2.2' de yer almaktadır.

1.3 TAGUCHI' NİN TASARIM KAVRAMI

Taguchi bir ürün veya sürecin tasarımını Sistem tasarımı, Parametre tasarımı ve Tolerans tasarımı olmak üzere üç aşamada ele alır. Ürün / süreç tasarım aşamalarını incelemeden önce bir ürünün performansını etkileyen faktörler açıklanacaktır. Daha sonra bu faktörlerin tasarım içindeki rolleri değerlendirilecektir.

1.3.1 Faktörlerin Sınıflandırılması

Bir robust tasarım deneyinde optimizasyon sürecinde ele alınan yanıt kalite karakteristiği olarak adlandırılır ve kalite karakteristikleri deneydeki parametreler tarafından etkilenir. Robust tasarımda "parametre" ifadesi yerine "faktör" ifadesi kullanılır. Taguchi ürünün (veya sürecin) fonksiyonel karakteristiğini etkileyen bu faktörleri iki sınıfa ayırmaktadır (Byrne ve Taguchi, 1988).

1.Kontrol edilebilen faktörler (Tasarım faktörleri)
2. Kontrol edilemeyen faktörler (Gürültü faktörleri)

1. Kontrol edilebilen faktörler, müşteri tarafından doğrudan değiştirilemeyen tasarımcı (üretici) tarafından set edilebilen faktörlerdir. Her bir kontrol faktörü seviye olarak adlandırılan çoklu değerler alırlar. Kontrol edilebilen faktörler kendi içinde dörde ayrılmaktadır.

1.Düzeltme faktörleri; ilgilenilen yanıtın sadece ortalamasını etkileyen faktörler.

2.Değişkenlik kontrol faktörleri; ilgilenilen yanıtın sadece değişkenliğini etkileyen faktörler.

3.Maliyet tasarım faktörleri; yanıtın veya ortalamanın değişkenliğini etkilemeyen ekonomik gereklilikler için kullanılan faktörlerdir.

4.Sinyal faktörleri; istenilen performansı veya çıktıyı elde etmek için kullanıcı tarafından set edilen ve söz konusu olan ortalama yanıt düzeyini etkileyen faktörlerdir. Sinyal faktörler tasarım mühendisi tarafından mühendislik bilgisine bağlı olarak seçilir.

2. Kontrol edilemeyen faktörler, müşterinin kullanımına bağlı olarak değişen, üreticinin, tasarımcının doğrudan kontrol edemediği faktörler olup üretim veya çevresel değişkenlik kaynaklarıdır. Bu faktörlerin kontrolü zor veya pahalıdır. Gürültü faktörleri bir ürünün fonksiyonel karakteristiğinin hedef değerden sapmasına

neden olmaktadırlar. Taguchi bu faktörlerin toplumsal kayba neden olan yapısını Şekil 1.6 ile göstermiştir (Byrne ve Taguchi, 1988).

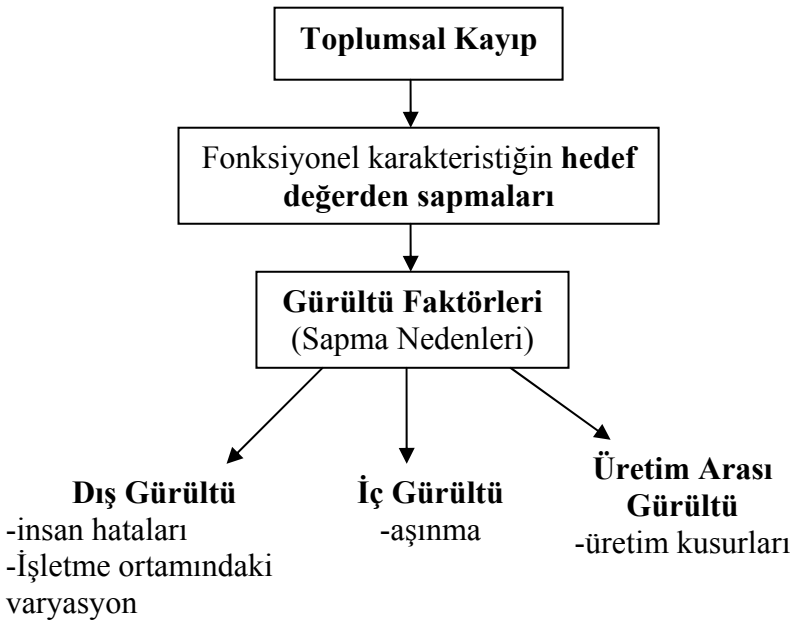
Gürültü faktörleri üç alt sınıfa ayrılmaktadır.

1. Dışsal Gürültü Faktörleri: Ortam sıcaklığı, basınç, nem gibi çevresel şartlara bağlı olarak oluşan değişkenliği tanımlayan faktörlerdir. Farklı partilerdeki malzemeler bir üretim sürecinde dış gürültü olarak görülebilir.

2. İçsel Gürültü Faktörleri: Üretim girdilerinin neden olduğu değişkenliği tanımlayan faktörlerdir. Rengin solması, kuruma, aşınma gibi zamana ilişkin fonksiyonlar olabilir.

4. Üretim Arası Gürültü Faktörleri:

Bir paslanma sürecinde sıcaklık ve nem dışsal gürültü, makinenin yaşı ve süreç faktörlerine ait toleranslar içsel gürültü, üretim kusurları üretim arası gürültü olabilir.



Şekil 1.6 *Gürültü Faktörleri ile Toplumsal Kayıp Yapısı*

1.3.2 Taguchi' nin Tasarım Aşamaları

Taguchi bir ürün veya sürecin tasarımını üç aşamada açıklamaktadır.

1.Sistem Tasarımı: Kalite karakteristiğinin hedef değerden sapmasız ve minimum değişkenliğe sahip olarak, ürünün istenilen ve gerekli olan fonksiyonlarını gerçekleştiren bir prototip tasarımın geliştirilmesi sistem tasarımını ifade etmektedir. Müşteri ihtiyaçlarına cevap veren bir tasarım modeli geliştirmek için bilimsel bilgi ve mühendisliğe başvurma, üretim teknoloji ve parçalarla, malzemelerin montaj sisteminin seçimi bu aşamada yapılır.

2. Parametre Tasarımı: Sistem tasarımı oluşturulduktan sonra geçilecek adım ürünün fonksiyonel karakteristiğinin hedef değerden sapmalarını minimize edecek olan, sistemdeki her bir elemanın parametreleri için optimum seviyelerin araştırılmasıdır.

Ürün parametre tasarımı, ürün parametrelerinin malzeme formülasyon değerleri, yüzey özellikleri gibi optimal değerlerin belirlenmesi bu aşamada yapılır. Süreç parametre tasarımında, kontrol edilebilen üretim süreç parametreleri için optimal seviye ve ayarlar belirlenir.

3. Tolerans Tasarımı: Sistem tasarımı gerçekleştirilip, sistemi oluşturan elemanların parametrelerinin optimum değerleri belirlendikten sonra oluşacak kalite kaybı sonucunda katlanılacak kalite maliyeti, oluşan bu kayıp ile birlikte değerlendirilerek her bir faktör ve/veya kalite karakteristikleri için toleranslar elde edilebilir. Bu aşamada en ekonomik toleranslar belirlenir.

İstenen kalite seviyesine parametre tasarımı ile ulaşılamadığında tolerans tasarımına geçilir. Eşitlik 1.9' da (y-t) yerine Δ_0 fonksiyonel limiti kullanılarak ve bu limitte oluşan toplumsal ortalama kayıp, A_0 kabul edilerek; diğer bir ifade ile $t \pm \Delta_0$' da kayıp A_0' dır.

$$A_0 = k.\Delta_0^{\,2} \qquad 1.24$$

ve burada *k* sabiti

$$k = A_0 / \Delta_0^{\,2} \qquad 1.25$$

elde edilir. Hedef değer en iyidir durumu için kayıp fonksiyonu,

$$L = (A_0 / \Delta_0^{\,2})(y - t)^2 \qquad 1.26$$

elde edilir. Ürünün yaşam ömrü boyunca çeşitli çevre koşulları altındaki hedef değeri ve gerçek değer arasındaki farkın karesinin ortalaması varyans σ^2, olarak adlandırılır. Kalite seviyesi Q, hedef değer en iyidir durumu için $\mu=t$ kabul edilerek,

$$Q = (A_0 / \Delta_0^{\,2})\sigma^2 \qquad 1.27$$

şeklinde elde edilir. Bir sürecin kalite seviyesi ilk olarak $\sigma^{2'}$ nin hesaplanması ile belirlenebilir. σ^2 , üretilen ürünlerin $y_1,y_2,...,y_n$ karakteristik değerlerinin ortalama karesel hatasıdır.

$$\sigma^2 = \frac{[(y_1 - t)^2 + ... + (y_n - t)^2]}{n} \qquad 1.28$$

Süreçteki hurda, yeniden işleme vb. kaybı, başka bir ifade ile fonksiyonel bozukluğun firma içinde oluşturduğu kayıp *A* ise kalite seviyesi,

$$Q = (A / \Delta^2)\sigma^2 \qquad 1.29$$

şeklinde tanımlanır. 1.27 ve 1.29 eşitlikleri ile

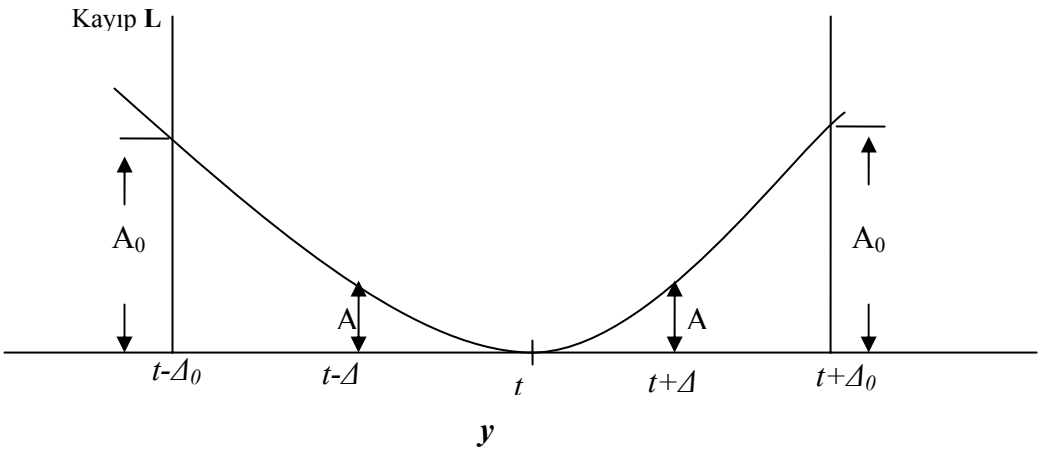
$$A_0 / \Delta_0{}^2 = A / \Delta^2$$

eşitliğinden firma toleransı,

$$\Delta = \sqrt{(A / A_0)}.\Delta_0 \qquad 1.30$$

şeklinde elde edilir.

Gürültünün etkisinin kaldırılması (varyansı azaltmak) parametre tasarımında en iyi seviyelerin seçilmesi ile olur. Parametre tasarımında varyasyonun nedenini kaldırmak veya kontrol altına almak ile ilgilenilmez. Gürültü faktörlerine karşı duyarlı (robust) olan kontrol faktör seviyelerinin seçimi ile ilgilenilir.



Şekil 1.7 *Fonksiyonel Limit ve Tolerans*

Tolerans tasarımında ise, kontrol faktörlerinin seçilen hedef değer etrafında tolerans daraltılarak varyasyonun nedeninin azaltılması veya elemine edilmesi ile ilgilenilir.

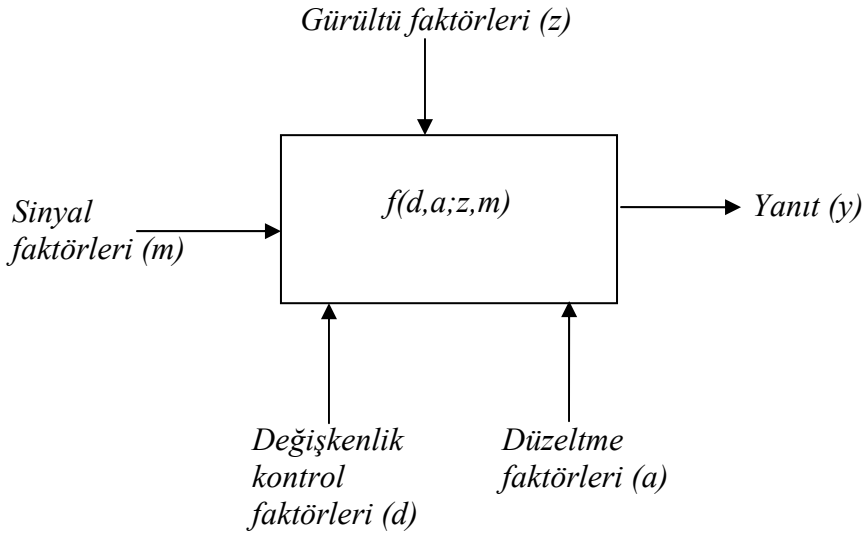
Taguchi yaklaşımıyla geleneksel tolerans yöntemleri arasındaki fark Taguchi yaklaşımında varyansa verilen önemdir. Amaç sinyal faktörlerinde ayarlamalar yaparak ortalama performans sürdürülürken, diğer yandan değişkenlik kontrol faktörlerinde değişiklik yapılarak varyansın azaltılmasıdır.

Parametre ve tolerans tasarımında gerçek kritik karakteristikler (kontrol faktörleri) tanımlanabilir ve minimize edilir. Parametre ve tolerans tasarımı prensiplerinden dolayı en önemli vurgulama kontrol faktörleri üzerinedir. Gürültü faktörleri kontrol faktörlerinin robust seviyelerinin belirlenmesi için deneylerde kullanılırlar. Deneyin amacı gürültü faktörlerinin performans karakteristiği üzerindeki etkisini minimize eden kontrol faktörlerinin seviyelerinin belirlenmesidir.

Geleneksel istatistiksel terimlerde, kontrol faktörleri sabit faktörler, gürültü faktörleri, şans faktörleri olarak kategorize edilirler. Sabit faktörler tasarımlanmış bir deneyde onların seviyeleri için seçilen spesifik değerlere sahip olan faktörlerdir. Şans faktörleri farklı operatör, farklı makine gibi tesadüfi olarak belirlenen seviyelere sahip olanlardır.

1.3.3 Parametre Tasarımının Amacı

Üretim sürecinin blok diyagramı Şekil 1.8 'de verilmektedir. Taguchi ve Phadke, (1984). *m* sinyal faktörlerini, *d* değişkenlik faktörlerini, *a* düzeltme faktörlerini, *z* gürültü faktörlerini, *y* yanıtı tanımlamaktadır.



Şekil 1.8 *Üretim / Süreç Blok Diyagramı (P-Diyagramı)*

Taguchi kontrol edilebilen faktörler sınıfında süreç ortalamasını ve varyansını etkileyen faktörleri tasarım faktörleri x=(d,a) olarak iki alt uzaya ayırmıştır. Düzeltme faktörleri (a), sadece ortalama küresel hatanın ikinci bileşeni olan sapmayı etkilemektedir. Değişkenlik kontrol faktörleri (d), sadece ortalama karesel hatanın ilk bileşeni olan varyans üzerinde etkisi olan faktörlerdir. Değişkenlik kontrol ve düzeltme faktörlerinin optimum (en iyi) seviyeleri parametre tasarımında belirlenir.

y yanıtı, sinyal, gürültü, düzeltme ve değişkenlik kontrol faktörlerinin bir fonksiyonudur.

$$y = f(d, a; z, m) \tag{1.31}$$

f fonksiyonu iki bölümden oluşur. Birincisi g ($m;d;a$) kestirilebilir kısım ve ikincisi e(d,a,z,m) kestirilemeyen kısım, Bu durumda;

$$y = g(m, d, a) + e(m, d, a, z) \tag{1.32}$$

Tasarımın amacı,

(i) Kestirilemeyen kısmı minimize ederken kestirilebilir kısmı eş zamanlı olarak maksimize eden kontrol faktör seviyelerini bulmaktır. Bu adımda fonksiyonel karakteristiğin değişkenliği minimize edilir. Eğer d ve a faktörlerinin uygun seviyeleri seçilirse bu amaç gerçekleşebilir.

(ii) Kestirilebilir kısmı, $g(m,d,a)$, düzeltme faktörü yardımı ile hedefe getirmek. Bu adım sonraki kısımlarda ayrıntılı olarak ele alınacak bir optimizasyon kriteri olan sinyal gürültü oranları ile gerçekleştirilebilir.

Kestirilebilirlik derecesi, g *(ortalama)* ve e *(hata)* varyanslarının oranı kullanılarak elde edilir.

$$\text{Kestirilebilirlik derecesi} = \frac{Var(g)}{Var(e)}$$

Kestirilebilirlik derecesi sabit bir ölçektir. İletişim teorisindeki gibi logaritması alınarak 10 ile çarpılırsa desibel ölçeğinde bir sinyal gürültü (SN) oranı elde edilir. Böylece SN oranı düzeltme ve kontrol faktörlerinin bir fonksiyonu olarak

$$\eta(d,a) = 10\log\frac{Var[g(d,a)]}{Var[e(d,a)]} \qquad 1.33$$

şeklinde elde edilir. Düzeltme faktörü *a*, özel bir tasarım faktörüdür ve *d*'nin herhangi bir değeri için istenen fonksiyonel ilişkiyi elde etmek için kullanılır. Düzeltme faktörlerinin SN oranı üzerindeki etkisini bu faktörün farklı seviyelerinde deneyler uygulamadan belirlemek mümkündür. Bu amaç için ilk olarak,

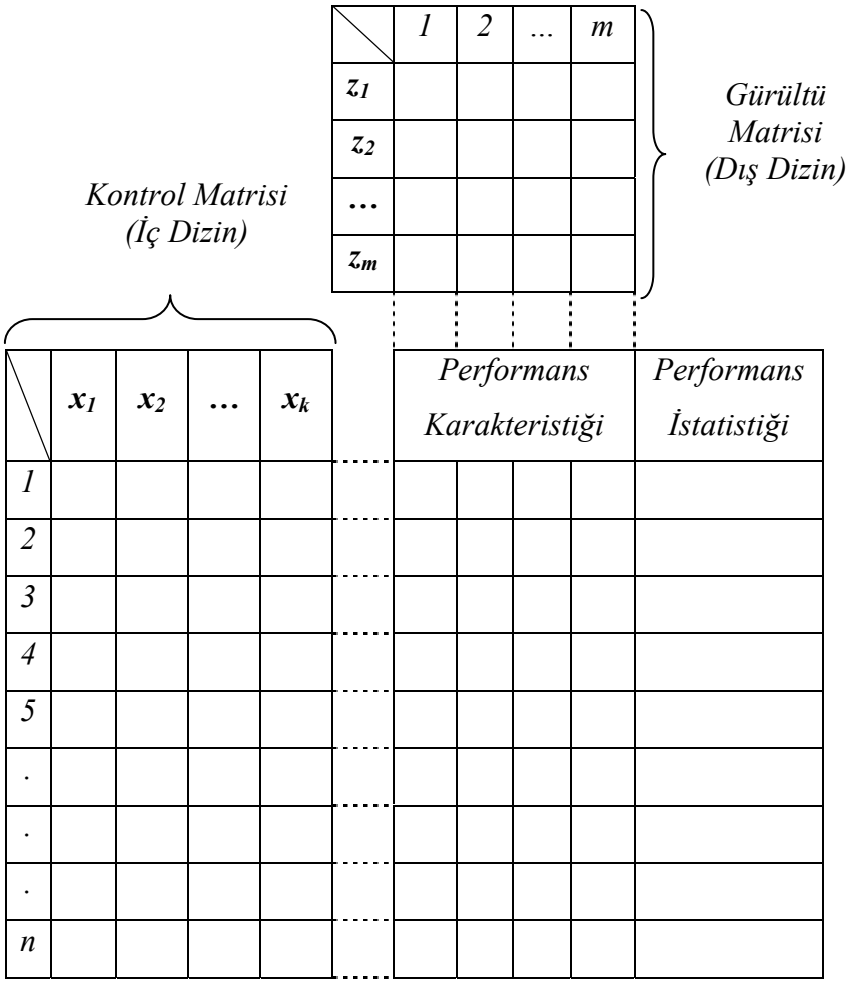
$$\eta'(d) = \max_d \eta(d,a) \qquad 1.34$$

ifadesi ele alınır. Daha sonra *d* uzayında bu tasarım optimizasyonu ele alınır. Düzeltme faktörünün varlığından dolayı, $\eta'(d)$' nin maksimizasyonu, Var(e) değerinin minimizasyonu anlamına gelmektedir (Taguchi, Phadke 1984). Kuadratik kayıp fonksiyonunda Var(e)' minimizasyonu, fonksiyonel değişkenliğe göre müşteri kaybının minimizasyonudur.

1.3.4 Parametre Tasarım Deneyi ve Ortogonal Dizinler

Yapılan deneylerden elde edilen verilerin analizinin yapılabilmesi, parametrelerin etkilerinin belirlenebilmesi için özel tasarım matrisleri kullanılır. Taguchi özel matrisler olarak ortogonal dizinlerin kullanılmasını önermektedir (Tablo 1.3 ve Tablo 1.4) (Phadke,1989).

Parametre tasarımı deneyi iki bölümden oluşur. Tasarım parametre matrisi (iç dizin) ve gürültü faktörleri matrisi (dış dizin). Taguchi' nin parametre tasarımı deneyi Şekil 1.9'da gösterilmektedir (Taguchi ve Phadke,1984)



Şekil 1.9 *Taguchi' nin Parametre Tasarım Deney Örneği*

Tablo 1.3 *Ortogonal Dizinin Seçimi İçin Başlangıç Stratejisi*

a) 2- Seviyeli faktörler için

2-seviyeli faktör sayısı	Tavsiye Edilen Ortogonal Dizin
2-3	L4
4-7	L8
8-11	L12
12-15	L16

b) 3-Seviyeli faktörler için

3-seviyeli faktör sayısı	Tavsiye Edilen Ortogonal Dizin
2-4	L9
5-7	L18*

*L18, bir tane 2 seviyeli faktör ve yedi tane 3-seviyeli faktör için kullanılabilir.

Tasarım parametre matrisinin kolonları, tasarım parametrelerini gösterir. Kolonlara tasarım parametrelerinin test etme seviyeleri girilir. Gürültü faktörleri matrisinin kolonları gürültü faktörlerini gösterir ve bu kolonlar, gürültü faktörlerinin

seviyelerinin farklı kombinasyonlarından oluşur. Her bir denemeye karşılık performans karakteristiği değeri elde edilir. Performans karakteristikleri, Performans İstatistiğini hesaplamak için kullanılır. SN oranları performans istatistiği olarak kullanılırlar. SN oranlarını hesaplamak için farklı SN formülleri yanıt için yapılacak sınıflamaya göre değişmektedir. Gelecek bölümde farklı SN oranları ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Tablo 1.4 *Ortogonal Dizinin Seçimi İçin İleri Strateji*

2-seviyeli faktör sayısı	**3-seviyeli faktör sayısı**							
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
0			L9	L9	L9	L18	L18	L18
1			L9	L9	L18	L18	L18	L18
2	L4	L8	L9	L9	L18	L18	L18	
3	L4	L8	L9	L16	L18	L18	L18	
4	L8	L8	L9	L16	L18	L18		
5	L8	L16	L16	L16	L18	L18		
6	L8	L16	L16	L16	L18			
7	L8	L16	L16	L18	L18			
8	L12	L16	L16	L18				
9	L12	L16	L16	L18				
10	L12	L16						
11	L12	L16						
12	L16	L16						
13	L16							
14	L16							
15	L16							

1.3.5 Performans İstatistiği Olarak SN Oranının Geometrik Yorumu

Yanıt *y*' nin istenen (hedef) değerden sapmasının kalite kaybı ile sonuçlandığını ve kuadratik kayıp fonksiyonunun,

$$L(y) = k(y-t)^2$$

ile ifade edildiği kısım 1.2'de açıklanmıştır. Karesel kayıp fonksiyonunda *k* sabiti, genellikle sinyal (*m*) faktörlerinin bir fonksiyonudur. Öyle ki bir soğutucu termostatın set edildiği ısı değerinden sapmasına bağlı olan kayıp, sapmanın büyüklüğü kadar seçilen ısıya da bağımlıdır.

Tasarım faktörlerinin verilen *x* kombinasyonu ve sinyal faktör *m* için beklenen kayıp,

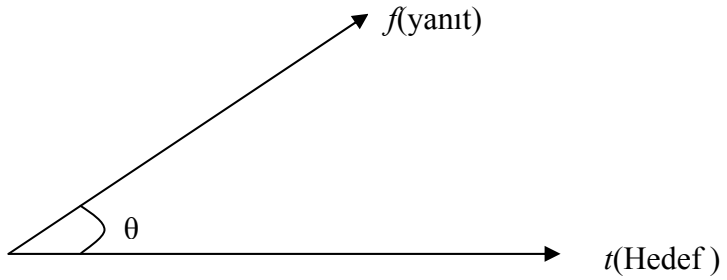
$$R(m) = \int k(m)[f(m;z,x) - t(m)^2 dg_1(z) \qquad 1.35$$

ile ifade edilir. bu eşitlikte g_1 fonksiyonu gürültünün yoğunluk fonksiyonudur ve $k \geq 0$' dır. Çeşitli sinyal faktör frekans değerlerine göre beklenen kayıp eşitlik (1)' in toplamı ile elde edilebilir (Dehnad,1989).

$$R(m;z) = \int R(m) dg_2(m) = \|f(x) - t\| \qquad 1.36$$

g_2 fonksiyonu, sinyal faktörün dağılımıdır. Elde edilen değer, *f* fonksiyonu ve *t* arasındaki uzaklığın karesidir. *f* ve *t* arasındaki θ açısı (bkz.Şekil 1.10) aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Dehnad,1989).

$$Cos(\theta) = \frac{\int k(m)(f.t) dg_1(z) dg_2(m).}{\|f\|\|t\|} \qquad 1.37$$



Şekil 1.10 *Yanıtın Hedef Değerden Açı Olarak Sapması*

Gürültü g_1 fonksiyonunun dağılımı, sinyal m faktöründen bağımsızdır. Bu aşağıdaki eşitlik ile açıklanır.

$$t - \frac{\|t\|}{\|f\|}.\cos(\theta).f$$

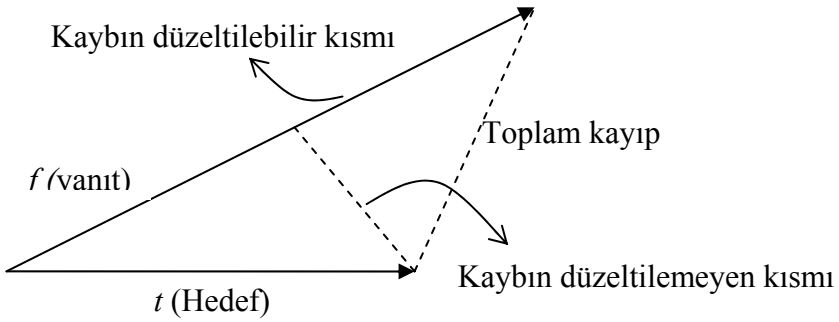
vektörü f fonksiyonuna dik olduğundan Şekil 1.11 pisagor teoremine göre beklenen kayıp ile bileşenin toplamı olarak yazılabilir.

$$\|f-t\|^2 = \left\|f - \frac{\|t\|}{\|f\|}\cos(\theta).f\right\|^2 + \left\|t - \frac{\|t\|}{\|f\|}\cos(\theta).f\right\|^2 \qquad 1.38$$

Bu ifadede birinci bileşen kaybın düzeltilebilir bileşenidir. İkinci bileşen ise düzeltilemeyen bileşen olarak adlandırılabilir. Sistematik kısım elimine edildikten sonraki kayıp,

$$\|t\|^2.\sin^2(\theta)$$

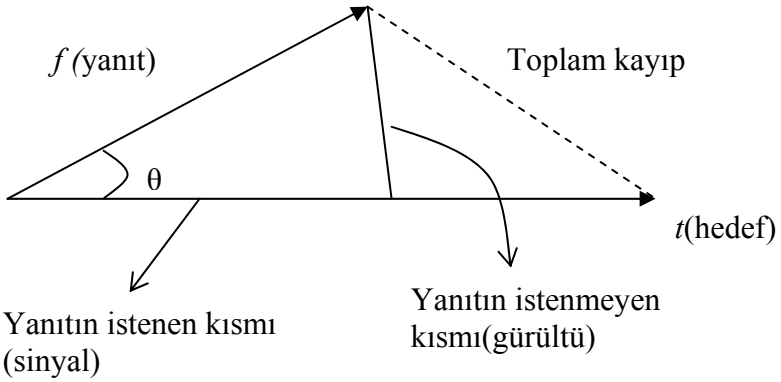
ile ifade edilir (Dehnad,1989).



Şekil 1.11 *Kaybın Ayrışımı*

Kaybın minimize edilmesi θ açısının minimize edilmesi ile aynıdır. Bu açı yanıtın f, hedef değer t' den açısal sapması olarak değerlendirilebilir. θ' nın azalan bir

fonksiyonu SN oranı olarak adlandırılır. En çok kullanılan ölçüm *log.Cot²(θ)*' dır. *Cot (θ)* istenilmeyen kısımın (gürültü), istenilen kısıma (sinyal) göre göreceli büyüklüğünün bir ölçümünü vermektedir (bkz. Şekil 1.12).



Şekil 1.12 *Yanıtın Ayrışımı*

Hedef değer, $t=\mu$ şeklinde sabit bir değere sahip olduğunda,

$$Cos^2(\theta) = \frac{[E(\mu.f)]^2}{E(\mu^2).E(f^2)}$$

$$Cos^2(\theta) = \frac{\mu^2.E(f)^2}{\mu^2 E(f^2)} = \frac{E(f)^2}{Var(f) + E(f)^2}$$

$$Cos^2(\theta) = \frac{1}{1 + Var(f)/E(f)^2}$$

ve,

$$Cos^2(\theta) = \frac{Cot^2(\theta)}{Cot^2(\theta) + 1}$$

olduğu için,

$$Cot^2(\theta) = \frac{E(f)^2}{Var(f)} \qquad 1.39$$

elde edilir (Dehnad, 1989). Eğer SN oranı, *Cot θ'* nın artan bir fonksiyonu ise bunun bir maksimizasyonu değişkenlik katsayısının minimizasyonuna eşdeğerdir. Bir sistemi gürültü faktörlerine duyarsız hale getirmek analitik olarak *f* eğer transfer fonksiyonu biliniyor ise başarılabilir. Bu bilginin mevcut olmaması durumunda, deneyler süreç faktörlerinin daha iyi yanıt değerlerini veren setlerini deneysel olarak elde etmek için kullanılır. Eğer sistemde düzeltme faktörü var ise,

$$f(z,m;d,a) = f_1(a).f_2(z,m;d) \qquad 1.40$$

eşitliği ile verilir. Böylece araştırmacı kaybın iki bileşeni ile aynı anda uğraşmaktan kurtulmuş olur.

İki prosedürü için, ilk önce SN oranını maksimize eden faktör seviyeleri seçilir. Bu seviyeler sistemin hedeften açısal olarak sapmasını dolayısı ile kaybın düzeltilemeyen bileşenini minimize eder. Daha sonra düzeltme faktörleri ile ilgilenilir. Bu faktörler SN oranını ve dolayısı ile kaybın düzeltilemeyen bileşenini etkilemez (Dehnad,1989).

$$Cos^2(\theta) = \frac{[\underset{z,m}{E}(t.f)]}{\underset{m}{E}(t^2).(E \quad \underset{m,z}{(f^2)}}$$

$$= \frac{f_1^{\,2}[\underset{m,z}{E}(t.f_2)]^2}{f_1^{\,2}\,\underset{m}{E}(t^2) \qquad \underset{m,z}{E}(f_2^{\,2})} \qquad 1.41$$

$$= \frac{[\underset{m,z}{E}(t.f_2)^2}{\underset{m}{E}(t^2) \qquad \underset{m,z}{E}(f_2^{\,2})}$$

Görüldüğü gibi *Cos (θ)* dolayısı ile *θ,* düzeltme *a* faktörlerine bağımlı değildir.

Bölüm 2

STATİK VE DİNAMİK SİSTEMLER

Robust tasarımın amacı, gürültüye en az duyarlı olan ve en iyi performansı sağlayan kontrol faktör seviyelerinin seçilmesi ile ürünlerdeki ve süreçteki performans değişkenliğini azaltmaktır. Robust tasarım hem statik hem de dinamik sistemleri içeren problemlere uygulanabilir. Statik sistemlerde sistemin çıktısı sabit bir hedef değere sahiptir. Dinamik sistemlerde ise hedef değer, kullanıcı tarafından set edilen girdi sinyaline bağlıdır. Dinamik sistem terimi mühendislik terimi olan zaman-değişim sistemi anlamına gelen sistem ile karıştırılabileceğinden Miller ve Wu(1996-1), Taguchi' nin dinamik sistemine "sinyal-yanıt sistemi" olarak alternatif bir isim vermişlerdir.

Dinamik sistemler için ideal kalite kavramı, sinyal ve yanıt arasındaki ideal ilişkiye bağlıdır. Kalite kaybı, bu ideal ilişkiden sapmalar ile oluşur. Hem sinyal hem de yanıt sistem tasarımcısı tarafından belirlenir. Kalite gelişimi için ilk olarak sistemin ideal fonksiyonu tanımlanır. Daha sonra optimal tasarımı yani ideal fonksiyondan sapmaları minimize eden tasarımı araştırmak için tasarımlanmış deneyler kullanılır.

Bu bölümde Dinamik ve Statik sistemler tanıtılarak, sınıflandırılacak, optimizasyon için modelleme ve analiz yöntemlerine yer verilecektir. İlgili yanıtın dinamik bir hedefe sahip olduğu deneylerin analizinde Taguchi iki-adım prosedürünü önermiştir. Bu prosedür;

(i) SN oranlarının hesaplanmasından sonra SN oranını maksimize eden kontrol faktör seviyelerinin bulunması

(ii) Düzeltme faktörünü değiştirerek eğimin hedef eğime getirilmesi

şeklindedir. Dinamik sistemlerin optimizasyonu kısmında bu konu ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Statik problemler için Shoemaker ilk olarak performans ölçülerinin tahminlerini hesaplayarak daha sonra optimal faktör kombinasyonlarını belirlemek için performans ölçüsünü modelleyen bir yaklaşım önermiştir. Bu yaklaşıma alternatif bir yaklaşım da ilk olarak gözlemlenen yanıtı modellemek ve sonra uyumu yapılan yanıt modelinden en iyi faktör seviyelerini belirlemektir. Bu yaklaşım ilk olarak Welch tarafından bulunan daha sonra Shoemaker tarafından geliştirilen yanıt modeli yaklaşımıdır. Kayıp model yaklaşımı (performans ölçüsünü modelleme) basit olması ve kayıp tahminlerinin doğrudan elde edilebilir olması nedeni ile endüstriyel uygulamalarda daha sık kullanılmaktadır. Uygulamaların çoğu kararlılığı III olan kesirli faktöriyel tasarımlardır. Analiz yöntemleri SN oranının analizi (kayıp model yaklaşımı analizi)' dir. Statik sistemlerdeki problemler için kayıp model yaklaşımı kesirli faktöriyel deneylerde faktöriyel etki tahminleri için gereksiz sapmalara neden olabilir. Bu durum optimal olmayan sonuçlara yol açacaktır. Diğer taraftan yanıt model yaklaşımında bu sapma problemi oluşmamaktadır. Ayrıca yanıt modelde gürültü faktörlerinin süreç varyansını nasıl azalttığı ile ilgili ek bilgi sağlanabilir. Bu açıklamalar bu bölüm içinde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.1 STATİK SİSTEMLER

Statik sistemlerde y kalite karakteristiğinin değeri tek bir spesifik hedef değere mümkün olduğu kadar yakındır. Sinyal faktör bu sistemlerde ihmal edilir. Diğer bir ifade ile sinyal faktör yoktur. Optimize edilecek süreç, birkaç kontrol faktörüne sahiptir. Kontrol faktörleri çıktının istenen/hedef değerine karar verir. Optimizasyon en iyi kontrol faktör seviyelerinin belirlenmesini içerir. Çıktı hedef değerdedir. Statik sistem ile ilgili Kacker ve Shoemaker (1986) silikon tabaka koyma sürecini ele almışlardır. Amaç, silikon tabaka kalınlığının mümkün olduğu kadar hedef değere yakın olmasıydı.

Statik sistemlerde kalite karakteristikleri, istenilen hedef değere bağlı olarak daha küçük daha iyi, daha büyük daha iyi, nominal en iyi, sınıflandırılmış değişkenler olarak sınıflandırılmaktadır. Tablo 2.1'de Statik problemler için SN oranları yer almaktadır.

1. *Daha Küçük - Daha İyi (STB):* Yanıt sürekli ve pozitiftir. Hedef (istenen değer) sıfırdır. Bu durum için amaç fonksiyonu;

η=-10 log (ortalama karesel yanıt)

$$\eta = -10.\log \frac{\sum y_i^{\,2}}{n} \qquad 2.1$$

şeklindedir.

2. *Hedef Değer En İyi (NTB):* Yanıt süreklidir. Bu durum için SN oranı,

$$\eta = -10.\log \frac{\mu^2}{\sigma^2} \qquad 2.2$$

şeklindedir. μ ve σ, yanıtın tahmin edilebilen ve tahmin edilemeyen kısmıdır. Varyansın ortalamadan bağımsız olduğu durumlar için Kackar (1985),

$$\eta = -10.\log \sigma^2 \qquad 2.3$$

oranının kullanılmasını tavsiye etmiştir.

3. *Daha Büyük- Daha İyi (LTB):* Kalite karakteristiği (yanıt) negatif olmayan bir dağılıma sahiptir. Hedef değer $t=\infty$' dur. SN oranı;

η= -10 log (yanıtın tersinin karesel ortalaması)

$$\eta = -10.\log[\sum \frac{(1/y_i^{\,2})}{n}] \qquad 2.4$$

eşitliği ile elde edilir.

4. *Sınıflandırılmış Değişkenler (CA):* Yanıtın çok kötü, kötü, kabul edilebilir, iyi, çok iyi olarak kategorize edildiği durumlardır.

Tüm durumlar için amaç, SN oranını (η performans istatistiğini) maksimize etmektir.

Tablo 2.1 *Statik Problemler İçin SN oranları*

Problem Tipi	**Gözlem aralığı**	**İdeal (hedef) değer**	**Düzeltme**	**SN Oranı**
Daha küçük daha iyi	$0 \le y < \infty$	0	yok	$\eta = -10.\log \frac{\sum y_i^2}{n}$
Nominal en iyi tipi	$0 \le y < \infty$	Sıfır değil, sonlu	Ölçekleme	$\eta = -10.\log \frac{\mu^2}{\sigma^2}$ $\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$ $\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \mu)^2$
Daha büyük daha iyi	$0 \le y < \infty$	∞	yok	$\eta = -10.\log[\sum \frac{(1/y_i^2)}{n}]$
Signed-hedef	$-\infty < y < \infty$	Sonlu, genellikle sıfır	Seviyeleme	$\eta = -10\log\sigma^2$ $\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \mu)^2$
Kusurlu	$0 \le p \le 1$	0	yok	$\eta = -10\log\left(\frac{p}{1-p}\right)$

2.2 DİNAMİK SİSTEMLER

Dinamik sistemlerde sistemin istenen çıktısı sinyal faktörün seviyelerine bağlıdır ve sistemde bir tek hedef değer yoktur. Yanıt, sinyalin bir fonksiyonudur. Bu nedenle

sinyal-yanıt ilişkisi, sistemin performansını ölçmek için önemli bir araçtır. Bu tip sistemleri Taguchi, "dinamik karakteristikli sistemler", Miller ve Wu (1996-1), "sinyal-yanıt sistemleri" olarak adlandırmaktadır.

Sinyal-yanıt ilişkisinin doğası, sistemin kontrol ve gürültü faktörlerine bağlıdır. Taguchi' nin "dinamik parametre tasarımı" olarak adlandırdığı sinyal-yanıt sistemleri robust parametre tasarımı, ürün / süreç gelişimi için etkili ve güçlü bir araçtır.

Sinyal-yanıt sistemlerinin robust parametre tasarımında üç önemli sorun ele alınmalıdır (Wu&Hamada, 2000)

(i) Verilen sinyal-yanıt ilişkisinin uygunluğunu değerlendirmek için kullanılacak doğru bir performans ölçüsü.
(ii) Modelleme ve analiz stratejisi (performans ölçüsünü ve yanıt fonksiyonunu modelleme).
(iii) Deney stratejisi.

(i) ve (ii) için Taguchi (1991) sinyal faktörün bilindiği ve bilinmediği durumlara göre sınıflama yaparak prosedürleri açıklamıştır. Bu sınıflama sistemin girdi ve çıktı değişkeninin sürekli olduğu durumlarda yapılmıştır. Kısım 2.1' de sınıflamalar açıklanmaktadır. Girdi (sinyal) ve çıktı (yanıt)' nın sürekli ve kesikli olmasına göre Wu ve Yeh (2005) sinyal-yanıt sistemleri (dinamik sistemleri)' ni dört tip olarak incelemişlerdir.

1. Sürekli-Sürekli (C-C Tipi)
2. Sürekli-Dijital (C-D Tipi)
3. Dijital-Sürekli (D-C Tipi)
4. Dijital-Dijital (D-D Tipi)

2.2.1 C-C Tipi Dinamik Sistemler

C-C tipi dinamik sistemde, kalite karakteristiği *Y*, bir sinyal faktör *M*' in fonksiyonudur. Hem kalite karakteristiği *Y*, hem de sinyal faktör *M*, pozitif veya negatif sürekli değerler alabilir. Sinyal-yanıt sistemlerinde ilk olarak *Y* ve *M* arasındaki ideal ilişki belirlenir. Örneğin sinyal *M*' in değeri sıfır olduğunda *Y* kalite karakteristiğinin değeri de sıfır olduğunda ideal ilişki, *Y*=M ile ifade edilir. *Y* ve *M* arasındaki ilişkinin eğimini düzeltmek için bir düzeltme (skalama) faktörü kullanılır.

Kalite karakteristiğinin çıktısı kontrol faktörleri seviyeleri, sinyal değerleri $M_1,M_2,\ldots,M_m$' in ve her bir sinyal değer için oluşan gürültü koşulları $z_1,z_2,\ldots,z_n$' nin bir fonksiyonudur. Sinyal, M_i ve gürültü koşulu z_j olduğunda y_{ij}, q tane kontrol faktörü seti $x=(x_1,x_2,\ldots,x_q)^T$ için bir gözlemdir. Bu durumda düzeltme faktörü olmaksızın kalite kaybı;

$$Q(x) = \frac{k}{m.n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - M_i)^2 \qquad 2.5$$

ile ifade edilir. *k,* sabit kayıp katsayısıdır. Ortalama kalite kaybı, iki kısıma ayrılmaktadır. İlk kısım, doğrusallıktan sapmaya göredir. İkinci kısım, 1' e eşit olmayan eğime göredir. Eğimi düzeltmek ikinci kısmın kalite kaybını elemine eder. Bu nedenle düzeltmenin belirlenmesi önem taşımaktadır. Verilen kontrol faktörleri setine göre düzeltmeyi elde etmek için ilk olarak y_{ij} ve M_i arasındaki en iyi doğrusal ilişkinin eğimi tahminlenmelidir. Taguchi (1991) ideal ilişkinin eğimi için "duyarlılık" kelimesini kullanmıştır.

Sinyal M_i ve yanıt y_{ij} arasındaki ilişki,

$$y_{ij} = \beta M_i + e_{ij} \qquad 2.6$$

ile ifade edilirse, β eğimi, en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilebilir. Hata kareler toplamının,

$$SSE = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} e_{ij}^{\ 2} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} (y_{ij-}\beta M_i)^2$$

β eğimine göre türevi alınarak sıfıra eşitlenirse,

$$\frac{d}{d\beta}[\sum_{i}^{m}\sum_{j}^{n}(y_{ij} - \beta M_i)^2] = \sum_{i}^{m}\sum_{j}^{n}(y_{ij} - \beta M_i).M_i$$

β eğimi,

$$\beta = \frac{\sum_{i}^{m}\sum_{j}^{n}(y_{ij}M_i)}{\sum_{i}^{m}\sum_{j}^{n}M_i^{\ 2}} \qquad 2.7$$

eşitliği ile elde edilir (Wu ve Yeh,2005).

Düzeltmeden sonra ortalama kalite kaybı, $v_{ij}=y_{ij}/\beta$ düzeltme değeri olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Q_a(x) = \frac{k}{m.n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(v_{ij} - M_i)^2 = \frac{k}{m.n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(\frac{y_{ij}}{\beta} - M_i)^2$$

$$= \frac{k}{\beta^2}\frac{1}{m.n}\sum\sum(y_{ij} - \beta M_i)^2 = k.\frac{m.n-1}{m.n}.\frac{\sigma_e^{\ 2}}{\beta^2} \qquad 2.8$$

$$\cong k.\frac{\sigma_e^{\ 2}}{\beta^2}$$

Hata varyansı σ^2_e ise,

$$\sigma_e^{\ 2} = \frac{1}{mn-1}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \beta M_i)^2 \qquad 2.9$$

eşitliği ile elde edilir (Wu ve Yeh,2005).

Taguchi (1991), C-C tipi dinamik kalite karakteristikleri için SN oranını,

$$\eta = -10\log Q_a(x) = 10\log\frac{\beta^2}{\sigma_e^{\ 2}} \qquad 2.10$$

eşitliği ile ifade etmiştir. Ortalama kalite kaybındaki *k* sabiti, genellikle ihmal edilir. Çünkü bir tek kalite karakteristiği için optimizasyon üzerinde etkisi yoktur. Fakat çoklu kalite karakteristikli deneylerde, optimal parametre koşullarının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığından ihmal edilmemelidir.

C-C tipi dinamik kalite karakteristikli durumlarda optimizasyon prosedürü için Taguchi' nin iki adım prosedürü uygulanabilir (Wu, Hamada, 2000). Bunun için ilk olarak SN oranı maksimize edilir. Daha sonra eğim, istenen eğime uygun bir düzeltme faktörü ile getirilir. Bu prosedür statik-nominal en iyi kalite karakteristikleri için kullanılan prosedür ile aynıdır. SN oranını maksimize etmek ortalama kalite kaybını minimize etmek ile aynıdır. Dinamik kalite karakteristikli durumlarda optimizasyon adımlarına ve yaklaşımlarına kısım 2.2.5' de ayrıntılı olarak yer verilmektedir.

C-C tipi dinamik karakteristikli durumlarda genel olarak prosedür yukarıda anlatıldığı gibidir. Sadece hata varyansı, sinyal faktörün doğrusal etkisi ve duyarlılık (eğim) katsayısının hesaplanması için verilen formüller sinyal faktörün gerçek değerinin bilindiği ve bilinmediği durumlara göre değişir. Bu durumlar için sınıflama Tablo 2.2' de verilmektedir. Bu kısımda, sinyal faktörün gerçek değerinin bilindiği durumlara yer verilecektir.

2.2.1.1 Sinyal Faktörün Gerçek Değerinin Bilindiği Durumlar

Sinyal faktörün gerçek değerinin bilindiği durumlarda, sinyalin doğrusal etkisi doğru olarak hesaplanabilir. Bu gibi durumlarda hata varyansı

doğrusallıktan sapmayı da içeren hata terimi ile tahminlenebilir. Sinyal faktörü (girdi) ve yanıt (çıktı) arasındaki var olduğu sayılan ideal fonksiyonel ilişkiye bağlı olarak farklı denklemler kullanılır.

Tablo 2.2 *C-C Durumunda SN Oranı Hesaplamalarının Sınıflandırılması*

(1)	Sinyal faktörün gerçek değerinin bilindiği durumlar
	1.Sıfır nokta oransal denklemi 2.Referans nokta oransal denklemi 3.Doğrusal denklem 4.Kalibrasyonsuz 5.Sabit nokta kalibrasyonu
(2)	Sinyal faktörün seviye aralıklarının ya da aralık oranlarının bilindiği durumlar
	1.Referans nokta oransal denklemi 2. Doğrusal denklem
(3)	Sinyal faktörün seviye değerlerinin oranlarının bilindiği durumlar
	1.Sıfır nokta oransal denklemi 2. Doğrusal denklem
(4)	Sinyal faktörün gerçek değerinin bilinmediği durumlar
	1.Düşük doğruluk seviyeli durum: Örnekler arasındaki değişkenliğin sinyal olarak değerlendirilmesi. 2.Düşük doğruluk seviyeli durum: Sinyal faktörü artık değerlerinin hata olarak değerlendirilmediği yaklaşım.
(5)	Sinyal faktörün mevcut olmadığı durumlar
	1.Hedef değer en iyidir durumu 2.Daha küçük daha iyidir durumu 3.Daha büyük daha iyidir durumu
(6)	Özel hesaplamanın gerekli olduğu durumlar
	1.Hesaplama için kullanılan veriler sapmalı olduğunda gerçek SN oranı içindeki transformasyon 2.Tekrar sayısının eşit olmadığı durumlar için hesaplama

(i) Sıfır Nokta Oransal Denklemi

Sinyal faktörün bilindiği ve m=0 olduğunda y=0 olduğu durumlarda y ve m arasındaki ideal ilişki,

$$y = \beta m \tag{2.11}$$

ile tanımlanır. Gerçekte yanıt, sinyal faktör m ve gürültü faktörleri $z_1,z_2,...,z_n$' nin bir fonksiyonudur:

$$y = f(m; z_1, z_2, ..., z_n) \tag{2.12}$$

Artık değeri e; eşitlik 2.11 ve 2.12' nin farka eşittir.

$$e = f(m, z_1, z_2, ..., z_n) - \beta m \tag{2.13}$$

β parametresi duyarlılık olarak adlandırılır ve artık kareler ortalamasının duyarlılığa oranı, SN oranının (η) tersine eşittir

$$\frac{1}{\eta} = \left[\frac{f(m; z_1, z_2, ..., z_n) - \beta m}{\beta} \right]^2 \tag{2.14}$$

Uygulamada k tane sinyal faktör seviyesi $m_1,m_2,...,m_k$ için gürültü faktörü uzayında r_0 adet noktada y_{ij} elde edilir. Kısacası r_0 adet tekrar yapılarak y_{ij} yanıt değerleri elde edilir. Sinyal m_i için yanıt değerleri toplamı y_i olmak üzere Tablo 2.3' de yanıt değerleri gösterilmektedir. Bu tabloda elde edilen veriler kullanılarak β, oransal katsayısı ve η sinyal gürültü oranı aşağıda verilen adımlar izlenerek hesaplanır.

(i) Sıfır nokta Oransal Denkleminin Hesaplanması: Duyarlılık katsayısı β, hata varyansının minimize edilmesi ile aşağıdaki eşitlik ile tahmin edilir.

$$\hat{\beta} = \frac{1}{r}(m_1 y_1 + m_2 y_2 + ... + m_k y_k) \qquad 2.15$$

Tablo 2.3. *Sinyal Faktör ve Veri (yanıt)*

Sinyal	m_1	m_2	m_3	...	m_k
Yanıt	y_{11}	y_{21}	y_{31}	⋯	y_{k1}
	y_{12}	y_{22}	y_{32}	⋯	y_{k2}
	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.
	y_{1r_0}	y_{2r_0}	y_{3r_0}	⋯	y_{kr_0}
Toplam	y_1	y_2	y_3	...	y_k

r, etkin bölen olarak adlandırılır ve

$$r = r_0(m_1^{\,2} + m_2^{\,2} + ... + m_k^{\,2}) \qquad 2.16$$

ile tanımlanır. Bu durumda y ve m arasındaki ilişki,

$$y = \hat{\beta} m \qquad 2.17$$

denklemi ile gösterilir.

(ii) *Sıfır Nokta Oransal Denkleminin Sinyal Gürültü Oranının Hesaplanması:* SN oranını elde etmek için varyans analizi uygulanır. Sinyal faktörün doğrusal etkisi, S_β ve toplam değişkenlik SS_T aşağıdaki genel denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$SS_T = y_{11}^{\,2} + y_{12}^{\,2} + ... + y_{kr_0}^{\,2} \qquad 2.18$$

$$SS_\beta = \frac{1}{r}(m_1 y_1 + m_2 y_2 + ... + m_k {y_k}^2) \quad 2.19$$

Hata değişkenliği,

$$SS_e = SS_T - SS_\beta \quad 2.20$$

eşitliği ile ve hata varyansı,

$$Var(e) = \frac{1}{kr_0 - 1} SS_e \quad 2.21$$

eşitliği ile hesaplanır. Tüm sonuçlar Tablo 2.4' deki varyans analiz tablosunda özetlenmiştir. Varyansın beklenen değerinden, β^2 ve σ^2 için tahmin değerleri,

$$\hat{\beta}^2 = \frac{1}{r}[SS_\beta - Var(e)] \quad 2.22$$

$$\hat{\sigma}^2 = Var(e) \quad 2.23$$

ile elde edilir. Böylece SN oranı,

$$\eta = \frac{\frac{1}{r}(SS_\beta - Var(e))}{Var(e)} \quad 2.24$$

şeklinde elde edilir (Taguchi,1991).

(ii) Referans nokta oransal denklemi

Referans bir m_s noktasının olduğu durumlardır. Bu gibi durumlarda referans noktadaki sapmayı sıfıra eşitlemek için referans nokta kalibrasyonu düzenlenir. Sinyal faktör, *m* ve yanıt, *y* arasındaki ideal ilişki,

$$y - \bar{y}_s = \beta(m - m_s) \qquad 2.25$$

denklemi ile tanımlanır. Bu denklem sinyalin sınırının sıfırdan oldukça uzakta olduğu durumlarda kullanılır.

Tablo 2.4 *Sıfır Nokta Oransal Denkleminin Varyans Analiz Tablosu*

Faktör (Değişkenlik Kaynağı)	**Serbestlik Derecesi** *(f)*	**Kareler Toplamı** *(SS)*	**Kareler Ortalaması** *(MS)*	*E(Var)*
Sinyal β	1	SS_β	*Var(β)*	$\sigma^2 + r\beta^2$
Hata e	$kr_0 - 1$	SS_e	*Var(e)*	σ^2
Toplam *T*	kr_0	SS_T		

(i) Referans nokta Oransal Denkleminin Veri Elde Etme Süreci: Tablo 2.3'deki veriler kullanılarak Tablo 2.5'de gösterildiği gibi referans nokta kalibrasyonu yapılır. Referans nokta kalibrasyonu, referans noktadaki verilerin ortalaması kullanılarak gerçekleştirilir. Standart referans nokta için yanıt değerleri, $y_{s1}, y_{s2}, ..., y_{sr_0}$ ' dir.

Ortalaması ise,

$$\bar{y} = \frac{(y_{s1} + y_{s2} + ... + y_{sr_0})}{r_0} \qquad 2.26$$

eşitliği ile elde edilir. Tablo 2.5' de gösterildiği gibi $\bar{y}$ tüm değerlerden çıkarılır. Sinyal değerleri $m_i - m_s$ şeklinde dönüştürülerek standart değerler modifiye edilir. Bu değerler referans noktanın seçimine bağlı olarak negatif değerler alabilir. y_i, dönüşümü yapılan verinin toplamıdır.

Referans nokta kalibrasyonu , $\bar{y}_s$ değeri yerine, referans noktada tekrarlı veriler arasından elde edilen herhangi bir değer kullanılarak da gerçekleştirilebilir.

Tablo 2.5 *Referans Nokta Kalibrasyonu sonrasında Yanıtlar*

Sinyal	$m_1 - m_s$	$m_2 - m_s$	...	$m_k - m_s$
Yanıt	$y_{11} - \bar{y}_s$	$y_{21} - \bar{y}_s$	...	$y_{k1} - \bar{y}_s$
	$y_{12} - \bar{y}_s$	$y_{22} - \bar{y}_s$	...	$y_{k2} - \bar{y}_s$
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	$y_{1r_0} - \bar{y}_s$	$y_{2r_0} - \bar{y}_s$	...	$y_{kr_0} - \bar{y}_s$
Toplam	y_1	y_2	...	y_k

(ii)Referans Nokta Oransal Denkleminin Tahmin Edilmesi: En iyi referans nokta oransal denklemi için duyarlılık katsayısı, β aşağıdaki eşitlik ile tahminlenir.

$$\hat{\beta} = \frac{1}{r}\left[y_1(m_1 - m_s) + y_2(m_2 - m_s) + ... + y_k(m_k - m_s)\right] \qquad 2.27$$

Bu eşitlikte etkin bölen r,

$$r = r_0[(m_1 - m_s)^2 + (m_2 - m_s)^2 + ... + (m_k - m_s{}^2)] \qquad 2.28$$

ile elde edilir. Tahminlenmiş regresyon denklemi;

$$(y - \bar{y}_s) = \hat{\beta}(m - m_s) \qquad 2.29$$

şeklinde tanımlanır.

(iii) Referans Nokta Oransal Denkleminin Sinyal Gürültü Oranının Hesaplanması: Sıfır nokta oransal denklemi için yapılan işlemler Tablo 6' daki verilere uygulanır. Toplam Değişkenlik ve sinyal faktörünün doğrusal etkisini hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$SS_T = \sum_{i}^{k} \sum_{j}^{r_0} (y_{ij} - \bar{y}_s)^2 \qquad 2.30$$

$$SS_\beta = \frac{1}{r}\left[y_1(m_1 - m_s) + y_2(m_2 - m_s) + ... + y_k(m_k - m_s)\right]^2 \qquad 2.31$$

ifadeleri ile ve hata değişkenliği ile hata varyansı,

$$SS_e = SS_T - SS_\beta \qquad 2.32$$

$$Var(e) = \frac{1}{kr_0 - 1} SS_e \qquad 2.33$$

eşitlikleri ile elde edilir. Sonuçlar Tablo 2.6' da özetlenmiştir.

SN oranı, η;

$$\eta = \frac{\frac{1}{r}(SS_\beta - Var(e))}{Var(e)} \qquad 2.34$$

şeklinde elde edilir (Taguchi,1991).

Hata serbestlik derecesi, $\bar{y}_s$ değerinin de hesaplanması nedeni ile $kr_0 - 2$ olması gerekirdi. Bu nedenle kr_0 değeri bu sapma nedeni ile yeterince büyük oluşturulmalıdır.

(iii) Doğrusal Denklem

Yanıt ve sinyal faktör arasında belirli bir kısıtlama olmaksızın doğrusal bir ilişkinin beklendiği durumlardır. *y* ve *m* arasındaki doğrusal ilişki,

$$y = \alpha + \beta m \qquad 2.35$$

denklemidir. Bu yöntem fonksiyonu belirlemek için gerekli olan α ve β parametrelerini aynı anda tahminler. Hata varyansı hesaplanabilir.

Tablo 2.6 *Referans Nokta Oransal Denklemi İçin Varyans Analiz Tablosu*

Faktör (Değişkenlik Kaynağı)	**Serbestlik Derecesi** *(f)*	**Kareler Toplamı** *(SS)*	**Kareler Ortalaması** *(MS)*	*E(Var)*
Sinyal β	1	SS_β	*Var(β)*	$\sigma^2 + r\beta^2$
Hata e	$kr_0 - 1$	SS_e	*Var(e)*	σ^2
Toplam *T*	kr_0	SS_T		

(i) Doğrusal Denklemin Tahminlenmesi: Doğrusal denklem aşağıda tanımlanan ortogonal polinomiale dönüştürülerek, parametre tahmini yapılır.

$$y = m + \beta(m - \overline{m}) \qquad 2.36$$

m ve β parametreleri aşağıdaki genel denklemler ile tahminlenir.

$$\hat{m} = \overline{y}$$

$$\hat{\beta} = \frac{1}{r}\left[y_1(m_1 - \overline{m}) + y_2(m_2 - \overline{m}) + ... + y_k(m_k - \overline{m})\right] \qquad 2.37$$

$$\overline{m} = (m_1 + m_2 + ... + m_k)/k$$

Etkin bölen,

$$r = r_0\left[(m_1 - \overline{m})^2 + (m_2 - \overline{m})^2 + ... + (m_k - \overline{m})^2\right] \qquad 2.38$$

ve fonksiyon,

$$y = \hat{m} + \hat{\beta}(m - \overline{m}) \qquad 2.39$$

eşitliği ile tanımlanır.

(ii) Doğrusal Denklemin Sinyal Gürültü Oranının Hesaplanması: SN oranını elde etmek için varyans analizi uygulanır. Toplam değişkenliği (SS_T), genel değişkenliği (SS_m) ve sinyal faktörün doğrusal etkisini(SS_β) hesaplamak için aşağıda tanımlanan genel denklemler kullanılır.

$$SS_T = {y_{11}}^2 + {y_{12}}^2 + ... + {y_{kr_0}}^2 \qquad 2.40$$

$$SS_m = \left(\sum y_{ij}\right)^2 / kr_0 \qquad 2.41$$

$$SS_\beta = \frac{1}{r}\left[y_1(m_1 - \overline{m}) + y_2(m_2 - \overline{m}) + ... + y_k(m_k - \overline{m})\right]^2 \qquad 2.42$$

Hata değişkenliği ve hata varyansı,

$$SS_e = SS_T + SS_m + SS_\beta \qquad 2.43$$

$$Var(e) = \frac{1}{kr_0 - 2} SS_e \qquad 2.44$$

Sonuçlar Tablo 2.7' de özetlenmiştir. Doğrusal denklem için SN oranı, η aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır (Taguchi,1991).

$$\eta = \frac{\frac{1}{r}(SS_\beta - Var(e))}{Var(e)} \qquad 2.45$$

Tablo 2.7 *Doğrusal Denklem için Varyans Analiz Tablosu*

Faktör (Değişkenlik Kaynağı)	**Serbestlik Derecesi** *(f)*	**Kareler Toplamı** *(SS)*	**Kareler Ortalaması** *(MS)*	*E(Var)*
Ortalama m	1	SS_m	$Var(m)$	$\sigma^2 + kr_0\sigma_m^2$
Sinyal β	1	SS_β	$Var(\beta)$	$\sigma^2 + r\beta^2$
Hata e	$kr_0 - 2$	SS_e	$Var(e)$	σ^2
Toplam T	kr_0	SS_T		

(iv) Kalibrasyonsuz Durum

Bu durum, ölçüm cihazının ölçeğinin doğru olduğu kabul edilerek, dönüşüm yapmadan ölçüm değerlerinin ele alındığı durumdur. Diğer bir ifade ile, m ve y arasındaki ideal ilişkinin,

$$y = m \tag{2.46}$$

olduğu varsayılır. $\beta = 1$ varsayımı ile SN oranı hesaplanır.

(i) SN Oranını Hesaplama: Sinyal faktör m_i *(i=1,2,…,k)* için elde edilen yanıt değerleri y_{ij} *(j=1,2,…,r_0)* olmak üzere, e_{ij}, hata terimi

$$e_{ij} = y_{ij} - m_i \tag{2.47}$$

eşitliği ile tanımlanır. Hata değişkenliği (SS_e), hata kareler toplamıdır.

$$SS_e = \sum e_{ij}^{\ 2} = \sum (y_{ij} - m_i)^2 \tag{2.48}$$

ve hata varyansı, hata değişkenliğini serbestlik derecesine bölünmesi ile aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$Var(e) = SS_e / kr_0 \qquad 2.49$$

Böylece SN oranı,

$$\eta = 1/Var(e) \qquad 2.50$$

eşitliği ile hesaplanır (Taguchi,1991).

(v) Sabit Nokta Kalibrasyonu Durumu

y_s yanıt değerleri, duyarlılık katsayısında herhangi bir düzeltme yapmadan, sabit bir m_s noktasında α sapma miktarı kadar düzeltildiği bir durumdur. İdeal ilişki,

$$y = m + \alpha \qquad 2.51$$

ile tanımlanır. Sabit m_s noktasında $y_{s1},...,y_{sr_0}$ değerlerinin ortalaması,

$$\bar{y}_s = (y_{s1} + y_{s2} + ... + y_{sr_0}) / r_0 \qquad 2.52$$

elde edilerek, α sapmasının tahmini,

$$\hat{\alpha} = \bar{y}_s - m_s \qquad 2.53$$

ile elde edilir.

(i) SN Oranını Hesaplama: Sinyal faktör m_i *(i=1,2,...,k)* için elde edilen yanıt değerleri y_{ij} *(j=1,2,...,r_0)* olmak üzere, e_{ij}, hata terimi,

$$e_{ij} = y_{ij} - \alpha - m \qquad 2.54$$

ve hata değişkenliği,

$$SS_e = \sum e_{ij}^{\ 2} = \sum (y_{ij} - \alpha - m_i)^2 \qquad 2.55$$

eşitliği ile, hata varyansı,

$$Var(e) = SS_e / (kr_0 - 1) \qquad 2.56$$

eşitliği ile tanımlanır. Böylece SN oranı,

$$\eta = 1 / Var(e) \qquad 2.57$$

ile ifade edilir (Taguchi,1991).

2.2.2 C-D Tipi Dinamik Sistemler

C-D Tipi dinamik sistemlerde girdi seti sürekli, çıktı kalite karakteristiği kesiklidir. Örneğin girdi seti sıcaklık ve çıktı ısı biriminin On-Off durumu olsun. Sıcaklık süreklidir ve On-Off durumu kesiklidir. Bu gibi durumlarda On fonksiyonu bir problem ve Off fonksiyonu ayrı bir problem olarak ele alınır. Bu problemlerin her biri ayrı bir sürekli-sürekli veya statik-nominal en iyi tipi problemi olarak görülebilir. Her iki problem için ayrı bir SN oranı elde edilir. Amaç (η_{on} + η_{off}) değerini maksimize etmektir.

2.2.3 D-C Tipi Dinamik Sistemler

D-C tipi bir problem için benzer durum dijitalden analoğa dönüştürücüdür. 0 ve 1 bitleri dönüştürme problemi sürekli değerlere ayrılabilir. 0 ve 1 dönüşümleri statik-nominal en iyi tipi problemi olarak görülebilir.

2.2.4 D-D Tipi Dinamik Sistemler

D-D tipi problemde, sinyal faktör ve kalite karakteristiği dijitaldir (kesiklidir). Dijital iletişim sistemleri ve bilgisayar operasyonları D-D tipi örnekleridir. "0" iletken olduğunda yanıt "sıfır" olarak kabul edilmelidir. "1" iletken olduğunda yanıt "bir" olarak kabul edilmelidir. D-D tipini test etmek için sinyal değerler $M_0=0$ ve $M_1=1'$ dir. Belirli kontrol faktörleri ve gürültü koşulları altında p, "0" iletken olduğunda bir alma olasılığı ve q "1" iletken olduğunda sıfır alma olasılığı olsun. "0" ve "1" iletken hataları eşit değilse bir iletişim sistemi etkili değildir. Taguchi $p=q$ yaparak daha etkili bir iletken elde edebilmeyi önermektedir. Taguchi iki olasılığı eşitleyerek $(p' = q')$ bunu sağlamaktadır.

$$p' = \left[1 + \sqrt{\frac{1-p}{p} . \frac{1-q}{q}}\right]^{-1} \qquad 2.58$$

D-D tipi problem için iletken sinyalinin eğimi (0.5,0.5) noktasından geçer. β eğimi,

$$\beta = \frac{0{,}5 - p'}{0{,}5} = 1 - 2p' \qquad 2.59$$

ile elde edilir. Eğimin düzeltilmesinden sonra kalite kaybı,

$$Q_a(x) = k\,\frac{\sigma_e^{\,2}}{\beta^2} = k\,\frac{p'(1-p')}{(1-2p')^2} \qquad 2.60$$

ile ifade edilir. Böylece D-D tipi problem için Taguchi SN oranını

$$\eta = -10\log Q_a(x) = 10\log\frac{(1-2p')^2}{p'(1-p')} \qquad 2.61$$

şeklinde tanımlamıştır. Bir D-D sistemini optimize etmek için strateji; η' yu maksimize etmektir. Bu durumda, η üzerinde etkisi olmayan bir kontrol faktörü

kullanılır. Taguchi (1991), D-D tipi sistemde SN oranını yanıtın ve sinyalin seviyesinin iki sınıfta değerlendirilme durumuna göre üç faklı durumda ele almıştır. Dijital değişkenlerde SN oranı için daha geniş bir sınıflama Tablo 2.8' de verilmiştir. Bu kısımda bu sınıflamalara yer verilecektir.

Tablo 2.8 *Dijital Değişkenlerde SN Oranı Sınıflaması (Taguchi,1991)*

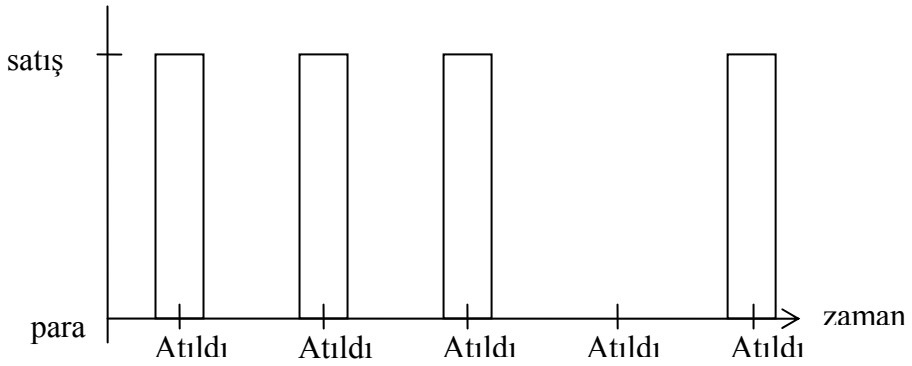
No	***Sınıflandırma***		***Önemli Karakteristik Örnekleri***
(1)	Basit Oran Değişkeni		Sayılabilen karakteristikler. Tipik örnekler kusur sayısı, kaza sayısı…vb
(2)	Sınıflanmış Değişkenler	Yanıtın iki sınıf içinde değerlendirildiği durumlar (tek tip hatanın olduğu durumlar)	Yanıt karakteristiği, iyi/kötü,başarılı/başarısız şeklinde sınıflandırıldığı durumlar. Analiz için bu değerlerden bir tanesi kullanılır. 0,1 verisi tipik örneklerdir.
(3)		Yanıtın ve sinyal faktör seviyelerinin iki sınıfta değerlendirildiği durumlar (iki tip hatanın olduğu durumlar)	İki değer alan bir girdi için yanıtın iki sınıfta değerlendirildiği durumlar, örneğin hem girdi hem de yanıtın dijital olduğu durumlar.
(4)		Yanıtın iki sınıfta değerlendirildiği ve sinyal faktör seviyelerinin gerçek değerinin bilinmediği durumlar	Yanıt karakteristiği iyi/kötü, 0/1, açık/kapalı gibi iki değer olabilir. Fakat sinyal faktör seviyeleri bilinmemektedir.
(5)		Yanıtın üç veya daha fazla sınıfta değerlendirildiği ve sinyal faktörün gerçek değerinin bilindiği durumlar	Sinyal faktörün yeteneklerinin önceden değerlendirilerek üç veya daha fazla ön sınıfta ele alındığı durumlar.
(6)		Yanıtın üçten fazla sınıfta değerlendirildiği ve sinyal faktörün gerçek değerinin bilinmediği durumlar.	Heterojen yapıdaki kaliteye sahip nesneleri değerlendirmek için kullanılır. Fotokopi veya elbise dikiminde iyi/kötü/orta/kötü gibi değerlendirilir.
(7)		Yanıtın üçten fazla sınıfta değerlendirildiği ve sinyal faktörün mevcut olmadığı durumlar	Değerlendirilmiş sınıflar arasından eklenebilirliğe sahip olan sınıflanmış değişkenler şeklinde ifade edilen karakteristiklerdir. Rank verileri örnek verilebilir.

2.2.4.1 Basit Oran Değişkeni Durumu İçin SN Oranı

Bu değişkenler başarı sayısı, hizmet sayısı, satış sayısı gibi kesikli sayılarla ifade edilir. bu sayılar 1 kişi, 2 kişi, 1 beklenen, 2 beklenen şeklindedir. SN oranı hesaplaması kısım 2.1.1.1' de açıklanan sürekli değişkenlerdeki ile benzer olarak yapılır.

2.2.4.2 Yanıtın İki Sınıfta Değerlendirildiği Durumlarda SN Oranı

Bu durum otomatik satış makinesi ile anlatılacaktır. Bunun için Şekil 2.1' de gösterilen makinenin çalışma yapısı açıklanacaktır.



Şekil 2.1 *Satış Makinesi için 0-1 Verileri*

Parayı makineye atma sinyal, satış ise yanıttır. Atılan para karşılığında malın satılması (verilmesi) 1, satılamaması 0 olduğundan yanıt kesikli (dijital) değişkendir. Tablo 2.9, *n* adet deney verisini göstermektedir.

Tablo 2.9 *0-1 Veri Tablosu*

Deney sayısı (faktör)	1	2	3	4	…	n
Yanıt	y_1	y_2	y_3	y_4	…	y_n

y_i, sadece 0 veya 1 değerini alır. p, satışın oransal ifadesidir ve aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmaktadır.

$$p = \frac{y_1 + y_2 + ... + y_n}{n} \tag{2.62}$$

Toplam değişkenlik;

$$SS_T = y_1^{\,2} + y_2^{\,2} + ... + y_n^{\,2} = np \tag{2.63}$$

ile elde edilir. Sinyal etkisi için 2.62 eşitliğindeki değişkenliğin elde edilmesi gerekmektedir. Eşitlik 2.62, doğrusal bir denklemdir ve serbestlik derecesi 1' dir. Değişkenliği,

$$SS_p = \frac{p^2}{katsayı\,kareler\,toplamı}$$

$$= \frac{\left[\frac{(y_1 + y_2 + ... + y_n)}{n}\right]^2}{\left(\frac{1}{n}\right)^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2 + ... + \left(\frac{1}{n}\right)^2} = \frac{\frac{(y_1 + y_2 + ... + y_n)^2}{n^2}}{\left(\frac{1}{n}\right)^2 x\, n} \tag{2.64}$$

$$= \frac{(y_1 + y_2 + ... + y_n)^2}{n} = nxp^2 = SS_m$$

eşitliği ile hesaplanır. Hata değişkenliği,

$$SS_e = SS_T - SS_p = np - np^2 = np(1-p) \tag{2.65}$$

0, 1 verileri için SN oranı sinyal değişkenliğinin hata değişkenliğine oranlanması ile desibel ölçeğinde,

$$\eta = 10\log\frac{SS_p}{SS_e} = -10\log\left[\frac{1}{p}-1\right] \qquad 2.66$$

şeklinde elde edilir (Taguchi, 1991).

2.2.4.3 Hem Yanıtın Hem de Sinyal Faktörün Seviyesinin İki sınıfta Değerlendirildiği Durumlar

İki tip hata mevcuttur. Diğer bir ifade ile 0 girdisi 1, 1 girdisi 0 olarak değerlendirilebilir. Girdi sinyali 0 ve 1 değerlerinin n_0 ve n_1 kez test edildiği varsayılsın. Girdi sinyali 0 ve 1 için oluşan hata sayısı da sırası ile n_{01} ve n_{10} olarak ve doğru deney sayıları sırası ile n_{00} ve n_{11} olarak tanımlansın. Tablo 2.10' da veriler gösterilmektedir.

Tablo 2.10 *İki Tip Hatalı Girdi-Çıktı Tablosu*

Girdi \ Çıktı	0	1	Toplam
0	n_{00}	n_{01}	n_0
1	n_{10}	n_{11}	n_1
Toplam	r_0	r_1	n

Eşitlik 2.66 , dijital sistem için kullanılabilir. Fakat 0 ve 1 sinyalleri için hata oranları p ve q eşit değilse, iletişim sistemi etkin değildir. Bu nedenle η değeri yeterince büyük varsayılarak $p=q$ düzeltmesi yapıldıktan sonra SN oranının hesaplanması gerekmektedir. Düzeltmeden sonra elde edilen hata oranı p_0, standart hata oranı olarak adlandırılır.

$$p = \frac{n_{01}}{n_0} \tag{2.67}$$

$$q = \frac{n_{10}}{n_1} \tag{2.68}$$

olduğu varsayılsın. Bu durumda Tablo 2.10' daki veriler Tablo 2.11' a dönüştürülebilir.

Tablo 2.11 *Hata Oranına Göre Girdi-Çıktı Tablosu*

Girdi \ Çıktı	0	1	Toplam
0	$1-p$	p	1
1	q	$1-q$	1
Toplam	$1-p+q$	$1+p-q$	2

Standart girdi-çıktı verileri ise Tablo 2.12' de verilmektedir.

Tablo 2.12 *Standartlaştırılmış Girdi-Çıktı Tablosu*

Girdi \ Çıktı	0	1	Toplam
0	$1-p_0$	p_0	1
1	p_0	$1-p_0$	1
Toplam	1	1	2

Standart hata oranı p_0 eşitlik 2.69' a göre elde edildikten sonra hesaplanan SN oranına standart SN oranı, η_0 denir ve eşitlik 10 ile desibel ölçeğinde ifade edilir (Taguchi&Phadke,1984).

$$p_0 = \frac{1}{1+\sqrt{\left(\frac{1}{p}-1\right)\left(\frac{1}{q}-1\right)}} \tag{2.69}$$

$$\eta_0 = -10\log\left[\frac{1}{(1-2p_0)^2}-1\right] \qquad 2.70$$

Eşitlik 2.69, SN oranı içinde hata oranlarının transformasyonu sonrasında ortalama olarak elde edilebilir. Girdi sinyali 0 ve 1 için hata oranlarının SN oranları,

$$\eta_1 = -10\log\left(\frac{1}{p}-1\right) \qquad 2.71$$

$$\eta_2 = -10\log\left(\frac{1}{q}-1\right) \qquad 2.72$$

ile ifade edilmektedir. η_1 ve η_2 değerlerini eşitleyerek p_0 standart oranını belirlemek için 0 ve 1 verilerinin eklenebilirliği dikkate alınarak SN oranı üzerinde kullanılan standart hata oranı aşağıdaki eşitlik ile elde edilir.

$$-10\log\left(\frac{1}{p_0}-1\right) = \frac{1}{2}\left[-10\log\left(\frac{1}{p}-1\right)-10\log\left(\frac{1}{q}-1\right)\right]$$

$$p_0 = \frac{1}{1+\sqrt{\left(\frac{1}{p}-1\right)\left(\frac{1}{q}-1\right)}} \qquad 2.73$$

Daha sonra eşitlik 2.70' de elde edilen SN oranı, sinyal faktörünün iki seviyesindeki 0,1 verilerinin analizinden elde edilir. Düzeltme faktörü,

$$DF = \frac{1}{n}\left(y_1 + y_2 + \ldots + y_{n0} + y_{n0+1} + \ldots + y_n\right)^2 = \frac{r_1^{\,2}}{n} \qquad 2.74$$

ve düzeltilmiş değişkenlik,

$$SS_T = y_1^{\,2} + y_2^{\,2} + \ldots + y_{n0}^{\,2} + \ldots + y_n^{\,2} - DF$$
$$= r_1 - \frac{r_1^{\,2}}{n} = \frac{r_1(n - r_1)}{n} = \frac{r_1 r_0}{n} \qquad 2.75$$

eşitliği ile elde edilir. Sinyal değişkenliği 0 ve1 sinyali için çıktıdaki farkın değişkenliği ile belirlenir. Bu fark L ile gösterilmek üzere,

$$L = \frac{n_{11}}{n_1} - \frac{n_{01}}{n_0} \qquad 2.76$$

eşitliği ile tanımlanır. L, doğrusal bir denklem olduğu için doğrusal denklemlerin değişkenlik hesaplamaları kullanılarak,

$$SS_L = \frac{\left(\frac{n_{11}}{n_1} - \frac{n_{01}}{n_0}\right)^2}{\left(\frac{1}{n_1}\right)^2 .n_1 + \left(\frac{-1}{n_0}\right)^2 .n_0}$$
$$= \frac{(n_0 n_1 - n_1 n_{01})^2}{n_0^{\,2}.n_1 + n_1^{\,2}.n_0} = \frac{(n_{00} n_{11} - n_{10} n_{01})^2}{n_0 n_1 n} \qquad 2.77$$

elde edilir. SN oranı sinyal değişkenliğinin hata değişkenliğine oranıdır. SS' ve SS'_e saf değişkenlikler ise,

$$\eta = \frac{SS_L'}{SS_e'}$$
$$= 10\log\frac{SS_L / SS_T}{SS_e / SS_T}$$
$$= 10\log\frac{\rho_L}{\rho_e}$$
$$= 10\log\frac{\rho_L}{(1-\rho_L)} = -10\log\left(\frac{1}{\rho_L} - 1\right) \quad (db) \qquad 2.78$$

sonucu elde edilir. ρ_L , sinyal faktörün katkı oranı, ρ_e, gürültü faktörünün katkı oranıdır. Sinyal faktörün katkı oranı

$$\rho_0 \approx \frac{SS_L}{SS_T} = \frac{\dfrac{(n_{00}n_{11} - n_{01}n_{10})^2}{n_0 n_1 n}}{\dfrac{r_0 r_1}{n}} = \frac{(n_{00}n_{11} - n_{01}n_{10})^2}{n_0 n_1 r_0 r_1} \qquad 2.79$$

$$n_{00} = n_{11} = 1 - p_0, \quad n_{01} = n_{10} = p_0, \quad r_0 = r_1 = n_0 = n_1 = 1$$

$$\rho_L = \frac{[(1-p_0)(1-p_0) - p_0 p_0]^2}{1.1.1.1} = (1-2p_0)^2 \qquad 2.80$$

$$\eta_0 = -10\log\left[\frac{1}{(1-2p_0)^2} - 1\right] \qquad 2.81$$

2.2.4.4 Yanıtın İki Sınıfta Değerlendirildiği ve Sinyal Faktörünün Gerçek Değerinin Bilinmediği Durumlar

Bu durumlar, ölçüm değerlerinin başarılı-başarısız, iyi-kötü gibi iki kategoride değerlendirildiği ve sinyal faktörün gerçek değerinin bilinmediği durumlardır. bu durum 0-1 verileri gibidir fakat bir tek sinyal faktör olduğundan analiz yöntemi farklıdır.

Dört panelistin A_1, A_2, A_3, A_4 görüntülerinin değerlendirildiği bir testin gerçekleştirildiği varsayılsın. m_1, m_2,...,m_k cihazlarının, dört panelist için r_0 defa denendiği deney Tablo 2.13'de verilmiştir.

Tablo 2.13 *Yanıtın İki Kategoride Değerlendirildiği Deney Verileri*

m	m_1	Alt	m_2	Alt		m_k	Alt	
Tekrar	$R_1,R_2,...R_r$	Toplam	$R_1,R_2,...R_r$	Toplam	…	$R_1,R_2,...R_r$	Toplam	Toplam
A_1	1 1 0…0	y_{11}	1 1 0…1	y_{12}		0 0 0…0	y_{1k}	y_1
A_2	1 0 1…1	y_{21}	0 1 1…0	y_{22}	…	0 0 1…0	y_{2k}	y_2
A_3	1 0 0…1	y_{31}	1 0 0…0	y_{32}		0 1 0…0	y_{3k}	y_3
A_4	1 1 1…0	y_{41}	0 1 0…1	y_{42}		0 0 0…0	y_{4k}	y_4

A_1 için SN oranının hesaplanması aşağıda verilmiştir. A_1 verileri kullanılarak,

$$CF = \frac{y_1^{\,2}}{kr_0} \qquad \text{(sd:1)} \qquad 2.82$$

$$SS_T = y_1 - \frac{y_1^{\,2}}{kr_0} \qquad \text{(sd: } kr_0 - 1\text{)} \qquad 2.83$$

$$SS_M = \frac{y_{11}^{\,2} + y_{12}^{\,2} + ... + y_{1k}^{\,2}}{r_0} - CF \qquad \text{(sd: } k\text{-1)} \qquad 2.84$$

$$SS_e = SS_T - SS_M \qquad \text{(sd: k}(r_0\text{-1)}\text{)} \qquad 2.85$$

Varyans analizi sonuçları Tablo 2.14' de özetlenmiştir.

A_1 için SN oranı,

$$\eta_1 = 10\log\frac{\frac{1}{r_0}(Var(m) - Var(e))}{Var(e)} \qquad 2.86$$

elde edilir (Taguchi,1991). Aynı şekilde A_2, A_3 ve A_4 için SN oranları elde edilerek karşılaştırılabilir. Dinamik sistemler için SN oranı Tablo 2.15' de özetlenmiştir.

Tablo 2.14 Yanıtın *İki Sınıfta Değerlendirildiği ve Sinyal Faktörünün Gerçek Değerinin Bilinmediği Durumlar İçin Varyans Analiz Tablosu*

Faktör (Değişkenlik Kaynağı)	**Serbestlik Derecesi** *(f)*	**Kareler Toplamı** *(SS)*	**Kareler Ortalaması** *(MS)*	*E(Var)*
Ortalama *m*	k-1	SS_m	*Var(m)*	$\sigma^2 + r_0\sigma_m^2$
Hata *e*	$k(r_0 - 1)$	SS_e	*Var(e)*	σ^2
Toplam *T*	$kr_0 - 1$	SS_T		

2.3 DİNAMİK SİSTEMLERDE OPTİMİZASYON

Taguchi' nin statik sistemler olarak adlandırdığı sistemleri Miller ve Wu (1996-2) "basit yanıt sistemleri" olarak adlandırmışlardır. Taguchi robust parametre tasarım metodolojisi için ikinci bir tip uygulama olarak "dinamik sistemleri" tanımlamıştır. Miller ve Wu (1996-2) dinamik tasarım problemlerini "sinyal-yanıt sistemleri" olarak adlandırmaktadır.

Kalite karakteristiğinin, *y* ve sinyal faktör *M* arasındaki ilişki olduğu sinyal-yanıt sistemleri,

$$y = f(M)$$

şeklinde modellenebilir. *f*, sinyal-yanıt ilişkisidir ve bu ilişki monoton bir fonksiyondur. *M,* etkili bir sinyal faktörüdür ve *y* üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir. *f* in davranışı sistemin gürültü ve kontrol faktörlerine bağlıdır.

Tablo 2.15 *Dinamik Problemler İçin SN Oranları*

Problem Tipi	Girdi Aralığı	Çıktı Aralığı	İdeal Fonksiyon	Düzeltme	SN Oranı
C-C Tipi	$-\infty < M < \infty$	$-\infty < y < \infty$ $M = 0$ *ise* $y = 0$	$y = M$	Ölçekleme	$\eta = 10\log\frac{\beta^2}{\sigma_e^{\,2}}$ $\beta = \frac{\sum_i^m \sum_j^n (y_{ij} - M_i)}{\sum_i^m \sum_j^n M_i^{\,2}}$ $\sigma_e^{\,2} = \frac{1}{mn-1}\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \beta M_i)^2$
C-D Tipi	$-\infty < M < \infty$	İkili, ON-OFF			Problem, On ve Off fonksiyonları için problemi iki ayrı C-C problemine veya nominal en iyi tipi problemine ayrılır.
D-C Tipi	İkili; 0,1	$-\infty < y < \infty$			Problem, iki nominal en iyi tipi problemine ayrılır.
D-D Tipi	İkili,0,1	İkili,0,1	$y = M$	Seviyeleme	$\eta = 10\log\left[\frac{(1-2p')^2}{p'(1-p')}\right]$ $p' = \left[1 + \sqrt{\frac{1-p}{p}\frac{1-q}{q}}\right]^{-1}$ =hata olasılığı p=girdi 0 olduğunda çıktının 1 olma olasılığı q=girdi 1 olduğunda çıktının 0 olma olasılığı

Miller ve Wu (1996-2), sinyal-yanıt sistemlerini, sistemin fonksiyonuna göre genel olarak iki sınıfta ele almaktadır.

1. *Çoklu hedef sistemleri,*
2. *Ölçüm sistemleri*

ve bir üçüncü sınıflama da *kontrol sistemleri* olarak ele alınabilir. Bu sınıflama yöntembilimi uygulamada önemli bir rol oynar. Örneğin parametre tasarım optimizasyonu için kullanılan performans ölçümünün seçimi sistemin tipine bağlıdır.

Çoklu Hedef Sistemi: Yanıtın değerinin sinyal faktörün seviyesinin değiştirilmesi ile düzenlenebildiği bir sistemdir. Arabaların fren sistemi örnek verilebilir. Fren pedalına basılan kuvvet sinyal olabilir. Yanıt frene basarken harcanan devir kuvveti miktarıdır. Kontrol faktörleri ıstampa malzemesi, ıstampa şekli olabilir. Gürültü faktörleri yolun yüzey koşulları, lastiğin koşulu, hız ve sürücünün yeteneği olabilir.

Ölçüm Sistemi: Ele alınan örnek için ilgilenilen yanıtın tahminini elde etmek için kullanılan bir süreçtir. Bu süreç, örneklemeyi, örneği tahminlemeyi, kalibrasyonu ve hatta ölçüm sürecini de içermektedir. Yanıtın gerçek miktarı, sinyal *M* olarak ele alınabilir. *M*, sistemi ölçülen bir değer veya yanıt *y*' ye dönüştürür. *M*' in *y*' ye bağlı olarak tahminlendiği öngörümlemede $y = f(M)$ sinyal-yanıt ilişkisi belirlenir. Parça kalınlığını ölçmek için kullanılan bir girdap akımı ölçüm prosedürünü optimize etmek için bir deney düzenlenmiştir. Bir girdap akımı makinesi, sertliği (*M*) tahmin etmek için bir elektronik sonda yardımı ile geri bildirimin yoğunluğunu (*y*), ölçmek için kullanılmıştır. Üç kontrol faktörü frekans, sonda sıcaklığı ve kazanç, olarak tanımlanmıştır. İki gürültü faktörü ölçümden ölçüme ve parçadan parçaya değişebilen kimyasal parça ve temizlik olabilir. Deneyin amacı, sertlikteki değişimlere geri bildirim yoğunluğunu duyarlı yapacak, fakat parça temizliği ve parça kimyasalındaki değişmelere duyarsız yapacak kontrol faktörleri setini tanımlamaktır.

Kontrol Sistemi: Sinyal-yanıt sisteminin üçüncü tipidir. Bir ön bildirim veya geri bildirim mekanizması kullanan sitemleri içerir. Duş suyu sıcaklığını ayarlama örnek olarak verilebilir. Yanıt su sıcaklığı ve sinyal çeşmeye uygulanana ayarlama miktarı olacaktır. *M'* den sinyal *y'* ye bir ön bildirim kontrolü için süre vardır.

Tablo 2.16' da çeşitli sinyal-yanıt sistemleri için örnekler verilmektedir (Wu ve Hamada, 2005). Sinyal-yanıt sistemlerinde iki sorun önem kazanmaktadır. *Birincisi,*

sistemin optimizasyonu için uygun bir performans ölçüsünün seçilmesi gerekmektedir. Bu seçim sistemin tipine bağlıdır. *İkincisi,* verilerin modellenmesi ve analizidir. Verilerin modellenmesinde iki strateji vardır. Bu iki sorun için geliştirilen yaklaşımlara bundan sonraki kısımlarda yer verilecektir.

Tablo 2.16 Dinamik (Sinyal-Yanıt Sistemleri)Örnekleri

I.Çoklu Hedef Sistemi	*Yanıt(y)*	*Sinyal (M)*
Enjeksiyon kalıbı	Parça ağırlığı	Yüksek enjeksiyon
Enjeksiyon kalıbı	Parça ebatı	basıncı
Parçaların yapımı	Parçanın çapı	Kalıp ebatı
Yüzeyin yapımı	Yüzey sağlamlığı	Kesme derinliği
Tabakayı kaplama	Kuşe ağırlığı	Kuşelenmiş bölge
Otomobil fren sistemi	Devir kuvveti miktarı	Pedal kuvveti
Fotoğraf	Fotoğraf görüntüsü	Gerçek görüntü
Kağıt besleme	Kağıdın dolaşım mesafesi	Rulenin yönü
II.Ölçüm Sistemi	*Yanıt(y)*	*Sinyal (M)*
Dengesiz şaftı çalıştırmak	Makine okuma	Dengesizlik
Girdap akımı yüzey sertliği	Geri bildirim yoğunluğu	Yüzey sertliği
III.Kontrol Sistemi	*Yanıt(y)*	*Sinyal (M)*
Aracın idare edilebilirliği	Aracın dönüş radyanı	Direksiyon açısı
Duş suyu sıcaklığı	Su sıcaklığı	Ayarlama miktarı
Termostat	Açık/kapalı	Sıcaklık

2.3.1 Dinamik Sistemlerde Parametre Tasarım Optimizasyonu İçin Performans Ölçüleri

Sinyal-yanıt sistemlerinin açıklanmasında en önemli ve öncelikli adım performans ilişkisini tanımlamaktır. Seçilen ölçünün optimize edilmesi ile, amacı elde eden kontrol faktör seviyeleri tanımlanır. Sinyal-yanıt sistemlerinde iki önemli kavram; duyarlılık ve dağılımdır. Sinyal-yanıt ilişkisi doğrusal olması durumunda sistem basit doğrusal regresyon modeli,

$$y = \alpha + \beta M + \varepsilon \qquad 2.87$$

ile gösterilebilir. Bu durumda duyarlılık β ile ve dağılım (yayılım) σ^2 ile ölçülebilir.

İlişki doğrusal değilse, en iyi doğrusal yaklaşımın eğimi ile doğrusal olmayan eğrinin eğimi yer değiştirilir. Her zaman küçük bir dağılıma sahip sinyal-yanıt ilişkisi istenen bir durumdur. Bu diğer bir ifade ile küçük bir σ^2değeri demektir. Eğer M değerindeki değişimi, y değeri üzerindeki etkisi önemli ise büyük bir duyarlılık istenir. Kısacası β değerinin büyük olması istenir.

Sonuç olarak doğru bir performans ölçüsü şunu önerir : σ^2 değeri küçük olmalı ve β değeri duruma göre büyük, nominale yakın ya da küçük olmalıdır. β ve σ^2' yi bir tek performans ölçüsüne dönüştüren performans ölçüsü sinyal-yanıt sistemleri için kısım 2.2.1' de açıklandığı gibi SN oranıdır.

$$\eta = \ln \frac{\beta^2}{\sigma_e^{\,2}} \qquad 2.88$$

Örnek verileri için,

$$\hat{\eta} = \ln \frac{\hat{\beta}^2}{S^2} \qquad 2.89$$

kullanılabilmektedir. Deneydeki her bir kontrol faktör kombinasyonu için hesaplanan SN oranı $\hat{\eta}$, kontrol faktörleri ile bir regresyon modeli kullanılarak uyumu yapılabilir. Bu modele dinamik SN oranı modeli denir. Eğer deneyde gürültü faktörleri varsa $\hat{\beta}$ ve S^2 tahminleri, verilen kontrol faktör kombinasyonları için sinyal faktör seviyeleri ve tüm gürültü faktör kombinasyonları için elde edilen gözlemlere bağlıdır.

Basit yanıt sistemleri, Taguchi' nin terminolojisine göre statik sistemler için parametre tasarımında olduğu gibi ikinci anahtar eleman, düzeltme faktörüdür.

Düzeltme faktörü, $\hat{\beta}$ üzerinde anlamlı bir etkiye sahip $\hat{\eta}$ üzerinde etkisi olmayan bir kontrol faktörüdür. Taguchi parametre tasarım optimizasyonu için iki-adım prosedürünü önermiştir.

(i) $\hat{\eta}$ değerini maksimize etmek için dinamik SN oranı modelindeki anlamlı kontrol faktörlerinin seviyelerini seç.

(ii) Eğimi hedefe getirmek için düzeltme faktörünün seviyesini seç.

Bazı durumlarda adım 2,

(ii) Kesimi hedefe getirmek için düzeltme faktörü seviyesini seç.

şeklinde olabilir. Dinamik SN oranının bir başka versiyonu için

$$y = \alpha + \beta M + \varepsilon \qquad 2.87$$

modeli ele alınsın. $\alpha = 0$ olsun. Kesim noktası sıfırdır. $\hat{\beta}$ ve S^2 değerleri en küçük kareler tahmini ile bu modele bağlı olarak elde edilebilir.

$$Var(y)\,\alpha\beta^2 \qquad 2.90$$

İlişkisi ile iki-adım prosedürü gösterilebilir. Sinyal-yanıt ilişkisi,

$$y = \beta(x_1, x_2)\left[M + \varepsilon(x_1)\right] \qquad 2.91$$

ve $E(\varepsilon) = 0$ ve $Var(\varepsilon) = Q(x_1)$ ise,

$$Var(y) = \beta^2(x_1, x_2)Q(x_1) \qquad 2.92$$

elde edilir ve,

$$\frac{\beta^2}{Var(y)} = \frac{1}{Q(x_1)} \qquad 2.93$$

2.92 modeli altında η' nı maksimize etmek modeldeki ε' nın varyansını minimize etmek ile aynıdır. Bu model için Taguchi' nin iki adım prosedürü bu durumda,

(i) $Q(x_1)$' i minimize etmek için x_1^* seç. 2.94

(ii) $\beta(x_1^*, x_2^*) = \beta_T$ eşitliğini sağlayan x_2^* seç.

şeklinde ifade edilir. β_T, hedef eğim değeridir.

x_1, dağılım faktörlerinden oluşan bir vektör ve x_2, düzeltme faktörüdür. η, düzeltme faktörüne bağlı değildir. Bu nedenle performans ölçüsü düzeltmeden bağımsızdır. Sinyal-yanıt sistemlerinde performans ölçülerinin düzeltmeden bağımsız olması ile ilgili daha ayrıntılı tartışma Leon,Shoemoker ve Kackar (1987)' de verilmektedir.

Farklı sınıf modelleri için iki adım prosedürü geliştirilebilir. Sinyal-yanıt ilişkisi,

$$y = \alpha(x_1, x_2) + \beta(x_1, x_2)M + \varepsilon(x_1) \qquad 2.95$$

modeli ile gösterilsin. $E(\varepsilon) = 0$ ve $Var(\varepsilon) = Var(y) = \sigma^2 = Q(x_1)$ 'dir. Modelde α, sıfır olmayan kesimdir ve y' nin varyansı β' ya bağlı değildir. x_1, dağılım faktörleridir. x_2, eğim için düzeltme faktörüdür. x_3, kesim (ortalama) için düzeltme faktörüdür. Varyans σ^2, x_2 veya x_3' e bağımlı olmadığından performans ölçüsü, düzeltmeden bağımsızdır. α_T ve β_T, kesim ve eğim için hedef değerler olsun. Bu durumda iki adım prosedürü aşağıdaki gibi olur.

(i) $\sigma^2 = Q(x_1)$ minimize etmek için x_1^* seç. 2.96

(ii) $\alpha(x_1^*, x_3^*) = \alpha_T$ ve $\beta(x_1^*, x_2^*) = \beta_T$ yapan x_2^* ve x_3^* seviyeleri seçilir.

Tüm (i) ve (ii)' lerde kesim ve eğim hedef değerdedir. Hedef değerin olmadığı durumlarda prosedürün ikinci adımında daha küçük veya daha büyük durumlarına göre α ve β arttırılır veya azaltılır.

2.3.2 Dinamik Sistemlerde Modelleme ve Analiz Stratejisi

Parametre tasarım deneyinin amacı, sistemin performansını etkileyen kontrol faktörlerini tanımlamaktır. Seçilen performans ölçüsü (PM), kontrol faktörlerinin bir fonksiyonu olarak modellenir. Bu kısımda iki modelleme stratejisi ele alınır: Performans ölçüsünü modelleme ve yanıtı modelleme.

2.3.2.1 Performans Ölçüsünü Modelleme (PMM)

(i) Deneydeki her bir kontrol faktör kombinasyonu için çeşitli sinyal ve gürültü seviyeleri kombinasyonu için elde edilen yanıt değerlerine bağlı olarak performans ölçüsü hesaplanır.

(ii) Kontrol faktörlerinin bir fonksiyonu olarak (i)' deki performans ölçüsü değerleri modellenir. Daha sonra kontrol faktörleri için tercih edilen seviyeleri uyumu yapılan modelden belirlenir.

(ii)' deki modelleme için bir analiz tekniği gerekmektedir. Performans ölçüsünün modellenmesi SN oranı kullanılarak gösterilebilir. Üç tane iki seviyeli kontrol faktörü (C_1, C_2, C_3), iki tane iki seviyeli gürültü faktörü (N_1, N_2) ve dört seviyeli sinyal faktör (M) için bir full faktöriyel deneyi ele alınsın. 8 farklı kontrol faktörü kombinasyonunun her biri için gürültü ve sinyal faktör kombinasyonuna ilişkin 16 gözlem vardır. Bu 16 gözlem, $y = \alpha + \beta M + \varepsilon$ modeline bağlı olarak bir regresyon doğrusu uyumu için kullanılır. Daha sonra performans ölçüsü, $\hat{\eta} = \ln\left(\beta^2 / S^2\right)$' yi tahmin etmek için parametre tahminleri kullanılır. 8 tane performans ölçüsü 2^3 deneyinde gözlemler olarak muamele edilir. Burada standart analiz teknikleri uygulanabilir.

Performans ölçüsü Taguchi' nin iki adım prosedüründeki ilk adım gibi optimize edilecek yanıt olarak ele alınır. İki adım prosedüründe veri uygulamasını tamamlamak için ikinci adımdaki yanıtın modellenmesi gerekir. İkinci adımda β eğiminin düzeltilmesi gerekir. Bu nedenle $\hat{\beta}$, eğim tahminini modellemek gerekmektedir. $\hat{\beta}$, kontrol faktörlerinin bir fonksiyonu olarak deneydeki her bir kontrol faktör kombinasyonu için hesaplanır. Böylece performans ölçüsünü modelleme yaklaşımı ikinci adımdaki yanıt olarak performans ölçüsünün modellenmesi ile gerçekleştirilir.

Taguchi' nin iki adım prosedürüne alternatif bir yaklaşım 2.96' dır. Performans ölçüsünü modelleme yaklaşımında her bir kontrol faktör kombinasyonuna göre elde edilen $\ln s^2, \hat{\beta}, \hat{\alpha}$' nin modellenmesini gerektirir. Taguchi' nin yaklaşımına performans ölçüsünü modelleme yaklaşımı tercih edilebilir. Çünkü daha sonrasında dinamik SN oranını içerir. Performans ölçüsünü modelleme yaklaşımı basit yanıt sistemleri için yer ölçüsü ve dağılımın modellenmesinin bir benzeridir. Yaklaşımda kural: İlk önce duyarlılığın ($\hat{\beta}$) ve dağılımın ($\ln s^2, \hat{w}$) modellenmesi daha sonra yer ölçüsü ($\bar{y}$) ve dağılımın ($\ln s^2, \hat{\eta}$)modellenmesi şeklindedir.

2.3.2.2 Yanıt Fonksiyonunu Modelleme (RFM)

Sinyal-yanıt ilişkisi yanıt olarak muamele edilir ve bu ilişki kontrol ve gürültü faktörlerinin bir fonksiyonu olarak modellenir. Performans ölçüsü kontrol faktörlerinin tercih edilen seviyelerine göre seçmek için uyumu yapılmış modellere göre değerlendirilir. Bu basit yanıt sistemleri için yanıtı modelleme yaklaşımının bir uzantısıdır.

Doğrusal sinyal-yanıt ilişkisi için yanıt fonksiyonunu modelleme aşağıdaki iki adım prosedürü ile ifade edilir.

(i) Deneydeki her bir kontrol / gürültü faktörü için sinyal-faktör seviyeleri üzerinde yanıt değerlerine bir regresyon doğrusu uyumu eşitlik 2.87 için yapılır. *i*. kombinasyon için $\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, s_i^2$ ile tahminler belirlenir.

(ii) Kontrol ve gürültü faktörlerinin fonksiyonları olarak $\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, \ln s_i^2$ için ayrı regresyon modelleri elde edilir. Seçilen performans ölçüsü bu modellere göre değerlendirilir ve tercih edilen kontrol faktör seviyeleri belirlenebilir.

(i) ve *(ii)* adımlarındaki modelleme ve analiz, teknik gerektirmektedir. Problemin hata yapısı daha karışık ise *(ii)* adımdaki modelleme için daha itinalı bir analiz gerekecektir. Sinyal-yanıt ilişkisi daha karışık ise kuadratik bir eğri veya spline fonksiyon verilebilir. Örneğin kuadratik bir ilişki için ek modellemede kuadratik regresyon modelindeki kuadratik katsayıyı içerir.

Yanıt fonksiyonunu modelleme yaklaşımının bir gösterimi için 32 tane kontrol ve gürültü faktörleri seviyelerinin kombinasyonu ele alınsın. Bu kombinasyonların her biri için sinyal faktörün seviyelerine ilişkin 4 gözlem vardır. Bu 4 gözlem sinyal-yanıt ilişkisi için bir regresyon doğrusu uyumu için kullanılır. $\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, s_i^2$ değerleri, 32 kontrol/gürültü kombinasyonunun her biri için elde edilir. $\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, s_i^2$ için regresyon modelleri kontrol ve gürültü faktörlerinin fonksiyonları olarak elde edilir. Seçilen performans ölçüsü bu modeller kullanılarak kontrol faktörlerinin farklı kombinasyonları için değerlendirilir.

Genel olarak performans ölçüsünü modelleme prosedürü tercih edilmez. Çünkü verideki kullanışlı bilgiyi gölgede bırakır. Performans ölçüsünü modelleme yaklaşımı sadece kontrol faktörlerinin sistemin genel performansını nasıl etkilediği ile ilgili bilgi sağlar. Belirli kontrol faktörlerinin sinyal-yanıt sisteminin şeklini veya belirli gürültü faktörleri ile etkileşimi nasıl etkilediği ile ilgili bilgi kayıptır. Yanıt modelleme yaklaşımında bu yetersizlik yoktur. Yanıtın ilk olarak modellenmesi daha faydalıdır. Daha sonra tercih edilen kontrol faktörlerinin seviyelerini tanımlamak için performans ölçüsü bu modele uygulanabilir.

Modelleme yaklaşımlarında önerilen farklı yaklaşımlarda geliştirilmiştir. Gelecek kısımda bu yaklaşımlar tanıtılacaktır. Bu yaklaşımlara yer verilmeden önce parametre tahmin ilişkileri açıklanacaktır.

2.3.2.3 Parametre Tahminlerinin İlişkileri

Kayıbı modelleme ve yanıtı modelleme yaklaşımlarını açıklamak için eklenebilir bir model ele alınacaktır. Yanıt *Y'* nin gerçek modeli,

(i) p kontrol faktörü $(C_1, C_2, \ldots, C_p)$
(ii) q gürültü faktörü $(N_1, N_2, \ldots, N_q)$

ile doğrusaldır. Her bir kontrol faktörü C_l, her bir gürültü faktörü N_h ve sinyal faktör M ile etkileşim halindedir (Tsui,1999).

$$Y = (\alpha_0 + \alpha^T C) + (\beta_0 + \beta^T C)M + \sum (\gamma_{h_0} + \gamma_h{}^T C)N_h + \varepsilon \qquad 2.97$$

$$C = (C_1, \ldots, C_p)^T$$

$$\alpha = (\alpha_1, \ldots, \alpha_p)^T$$

$$\beta = (\beta_1, \ldots, \beta_p)^T$$

$$\gamma_h = (\gamma_{hi}, \ldots, \gamma_{h_p})^T$$

N_h' ler ortalaması sıfır ve varyansı $\sigma_{Nh}{}^2$ ile bağımsız dağılırlar ve ε, ortalaması sıfır ve varyansı $\sigma_\varepsilon{}^2$ ile bağımsız dağılır. N_h ve ε, birbirinden bağımsızdır. *C'* nin herhangi bir sabit değeri için 2.97' deki yanıt modeli M ile basit bir doğrusal regresyon modeli olarak ifade edilir.

$$Y / C = \alpha'(C) + \beta'(C)M + e(C, N, \varepsilon) \qquad 2.98$$

$$\alpha'(C) = (\alpha_0 + \alpha^T C)$$

$$\beta'(C) = (\beta_0 + \beta^T C)$$

$$e(C, N, \varepsilon) = \sum_{h=1}^{q} (\gamma_{h_0} + \gamma_h{}^T C) N_h + \varepsilon$$

$e(C, N, \varepsilon)$, ortalaması sıfır ve varyansı

$$\sigma_e{}^2(C) = Var(e(C, N, \varepsilon) = \sum (\gamma_{h0} + \gamma_h{}^T C)^2 \sigma_{N_h}{}^2 + \sigma_\varepsilon{}^2 \qquad 2.99$$

ile bağımsız dağılır (Tsui,1999). Bu parametreler kontrol faktörlerinin fonksiyonlarıdır.

2.3.2.4 Kayıp Model Yaklaşımı

Kontrol faktörleri ve gürültü faktörleri için tasarım matrisleri ortogonal olsun ve aşağıdaki gibi gösterilsin.

$$\mathbf{X_c} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x_{C_{11}}} & \cdots & \mathbf{x_{C_{p1}}} \\ . & . & \cdots & . \\ . & . & \cdots & . \\ 1 & \mathbf{x_{C_{1m}}} & \cdots & \mathbf{x_{C_{pm}}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X_N} = \begin{bmatrix} \mathbf{x_{N_{11}}} & \cdots & \mathbf{x_{N_{q1}}} \\ . & \cdots & . \\ . & \cdots & . \\ \mathbf{x_{N_{1n}}} & \cdots & \mathbf{x_{N_{qn}}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X_M} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{x_M} \\ . & . \\ . & . \\ 1 & \mathbf{x_M} \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{X_{NK}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x_{N_{11}}} 1 & \cdots & \mathbf{x_{N_{q1}}} 1 \\ . & \cdots & . \\ . & \cdots & . \\ \mathbf{x_{N_{1n}}} 1 & \cdots & \mathbf{x_{N_{qn}}} 1 \end{bmatrix} \qquad 2.100$$

m ve *n*, deneydeki kontrol ve gürültü faktör kominasyonları sayısıdır. **1**, kx1 boyutlu vektör, $x_M = (x_{M1}, ..., x_{Mk})^T$ sinyal faktör *M*'in *k* tane test etme değerlerinin

vektörüdür. $\mathbf{X_M}$, kayıp model yaklaşımı için *nk*x2 buyutlu regresyon matrisidir ve $\mathbf{X_{Nk}}$, *nk*x*q* boyutlu matristir.

y_i, kontrol kontrol faktör tasarım matrisi $\mathbf{X_C}$' nin *i*' inci satırına ilişkin (nkx1) yanıt vektörüdür. Kayıp model yaklaşımı için, $\mathbf{X_C}$' nin her bir satırı için basit regresyon modeli y_i' ye uyumlanır (Tsui,1999). Kesişim, eğim ve varyans tahminleri aşağıdaki gibi hesaplanır. $\boldsymbol{b_i}$, regresyon kesişim ve eğim tahminlerinin *2x1* vektörüdür.

$$b_i = (X_M{}^T X_M)^{-1}(X_M{}^T y_i) \qquad i = 1,...,m \qquad 2.101$$

Eşitlik 2.99'daki $\sigma_e{}^2$ nin tahmini,

$$S_i{}^2 = \left(y_i - X_M b_i\right)^T \left(y_i - X_M b_i\right)/(nk-2) \qquad i = 1,...,m \qquad 2.102$$

Basit regresyon modeline uyumdan sonraki adım, her bir regresyon tahminine yanıt olarak muamele etmektir ve regresyon tahminini etkileyen kontrol faktör etkilerini tanımlamaktır. Kontrol faktör matrisi $\mathbf{X_C}$, ortogonaldir. Kontrol faktör etkileri,

$$\hat{\theta}_b = X_C{}^T b / m \qquad 2.103$$

ile tahmin edilebilir.

$b = (b_1, b_2, ..., b_m)^T$ ve $\hat{\theta}_b$, (*p*+1)x2 boyutlu matristir. İki kolon sırası ile kesişim ve eğimi etkileyen kontrol etki tahminlerini gösterir. Benzer şekilde,

$$\hat{\theta}_s = X_C{}^T S^2 / m \qquad 2.104$$

Genel olarak kayıp model yaklaşımını uygulama adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Tsui,1999).

Adım1. İlk olarak kesişim (α'), eğim (β') ve varyans parametreleri (eşitlik 2.98 ve eşitlik 2.99) tahminlenir.

Adım2. Adım 1' de elde edilen parametre tahminlerinin her biri ayrı bir yanıt olarak muamele edilir.

Adım3. Anlamlı kontrol faktör etkileri tanımlanır.

Adım 4. Dinamik sistemi optimize eden faktör seviyeleri belirlenir.

Eşitlik 2.99' daki σ_e^2, C' nin kuadratik bir fonksiyonudur. 2.97' deki yanıt modeli C' ye göre doğrusaldır. Bu durum kayıp model yaklaşımı için tahminlemede potansiyel bir sapmaya neden olabilir.

2.3.2.5 Yanıt Model Yaklaşımı

Yanıt model yaklaşımında, ilk olarak genel model 2.97 için tasarım matrisi oluşturulur. Model 2.97 için $mnkx(2+2p+q+2q)$ regresyon matrisi,

$$X=\begin{bmatrix} X_M & xc_{11}X_M & \dots & xc_{p1}X_M & X_{NK} & xc_{11}X_{NK} & \dots & xc_{p1}X_{NK} \\ . & . & \dots & . & . & . & \dots & . \\ . & . & \dots & . & . & . & \dots & . \\ X_M & xc_{1m}X_M & \dots & xc_{pm}X_M & X_{NK} & xc_{1m}X_{NK} & \dots & xc_{pm}X_{NK} \end{bmatrix} \qquad 2.105$$

şeklinde yazılır (Tsui,1999). $(2+2p+q+pq)$ tane kolon, model 2.97' deki

$$(\alpha_0,\beta_0),\ (\alpha_1,\beta_1),\dots,(\alpha_p,\beta_p),(\gamma_{10},\dots,\gamma_{q0}),(\gamma_{11},\dots,\gamma_{q1}),\dots,(\gamma_{1p},\dots,\gamma_{qp})$$

parametrelerine ilişkindir. 2.105' teki kolon blokları, ortogonaldir. $\mathbf{X_C}$, $\mathbf{X_N}$ matrislerindeki kolonlar da ortogonaldir. $\mathbf{X^TX}$ matrisi bloklanmış bir diagonal matristir.

$$X^TX = \begin{bmatrix} X_M^TX_M & 0 & ... & . & . & . & . & 0 \\ 0 & X_M^TX_M & ... & . & . & . & . & 0 \\ . & . & ... & . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & ... & X_M^TX_M & 0 & 0 & .. & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & (nk)I_q & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & 0 & (nk)I_q & ... & 0 \\ . & . & ... & . & . & . & ... & . \\ 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 & ... & (nk)I_q \end{bmatrix} \qquad 2.106$$

$\mathbf{I}_q$, bir q- boyutlu birim matristir. $\mathbf{X^TX}$ matrisinin tersi bloklanmış bir diagonal matristir. Benzer şekilde $y^T = (y_1{}^T,...,y^T{}_m)$ olmak üzere, $\mathbf{X^Ty}$ matrisi,

$$X^Ty = \begin{bmatrix} X_M{}^T\sum_i y_i \\ X_M{}^T\sum_i xc_{1i}y_i \\ . \\ . \\ X_M{}^T\sum_i xc_{pi}y_i \\ X_{NK}{}^T\sum_i y_i \\ X_{NK}{}^T\sum_i xc_{1i}y_i \\ . \\ . \\ X_{NK}{}^T\sum_i xc_{pi}y_i \end{bmatrix} \qquad 2.107$$

ile ifade edilir. Model 2.97'deki parametre tahminleri :

$$\hat{Q}_R = \left((\hat{\alpha}_0,\hat{\beta}_0),(\hat{\alpha}_1,\hat{\beta}_1),...,(\hat{\alpha}_p,\hat{\beta}_p),(\hat{\gamma}_{10},...,\hat{\gamma}_{q0}),(\hat{\gamma}_{11},...,\hat{\gamma}_{q1}),...,(\hat{\gamma}_{1p},...,\hat{\gamma}_{qp})\right)^T$$

aşağıdaki gibi hesaplanır (Tsui,1999).

$$\hat{Q}_R = (X^T X)^{-1}(X^T y)$$

$$= m^{-1}\begin{bmatrix} \sum_i (X_M^T X_M)^{-1}(X_m^T y_i) \\ \sum_i xc_{1i}(X_M^T X_M)^{-1}(X_m^T y_i) \\ . \\ . \\ \sum_i xc_{pi}(X_M^T X_M)^{-1}(X_m^T y_i) \\ (nk)^{-1}\sum_i X_{NK}^T y_i \\ (nk)^{-1}\sum_i xc_{1i} X_{NK}^T y_i \\ . \\ . \\ (nk)^{-1}\sum_i xc_{pi} X_{NK}^T y_i \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (X_C^T b)/m \\ (mnk)^{-1} X_{NK}^T \sum_i y_i \\ (mnk)^{-1} X_{NK}^T \sum_i xc_{1i} y_i \\ . \\ . \\ (mnk)^{-1} X_{NK}^T \sum_i xc_{pi} y_i \end{bmatrix} \qquad 2.108$$

Yanıt model yaklaşımında 2.98' deki kesim ve eğim fonksiyonları 2.108' deki parametre tahminleri kullanılarak belirlenir. 2.99'daki varyans fonksiyonu için saf hata σ_ε^2, **C**' den bağımsız bir sabittir. Bu durumda süreç varyansı σ_e^2, σ_ε^2' nun ihmal edilmesi ile yaklaştırılabilir. Optimal sonuç etkilenmeyecektir. Bununla birlikte bu durumda, σ_ε^2, **C**' nin bir fonksiyonu olduğunda ilk olarak uyumu yapılmış yanıt modeline bağlı olarak tahmin edilmek zorundadır.

Yanıt model yaklaşımı aşamaları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Adım 1. Genel satır verisi ve kombine edilmiş dizin tasarımı kullanılarak, eşitlik 2.97' deki tüm parametreler tahmin edilir.

Adım 2. Kesim, eğim ve varyans fonksiyonlarını $(\alpha'(C), \beta'(C), \sigma_e^2(C))$ yaklaştırmak için parametre tahminleri kullanılır.

Adım 3. Dinamik sistemi optimize eden kontrol faktör seviyeleri belirlenir.

Bu bölümde statik veya dinamik bir tek kalite karakteristikli durumlar için modelleme ve analiz stratejileri ele alınmıştır. Birden fazla statik veya dinamik kalite karakteristiğinin eş zamanlı optimizasyonu için analiz stratejileri sonraki bölümde tanıtılacaktır.

Bölüm 3

ÇOKLU KALİTE KARAKTERİSTİKLERİNDE OPTİMİZASYON

Geleneksel Taguchi yöntemi, bir kalite karakteristikli parametre tasarımında iyi bir performans elde edilmesi üzerine odaklanmaktadır. Fakat çoğu ürün ve süreç çoklu kalite karakteristiğine sahiptir. Çoklu kalite karakteristikli bir ürün için optimum seviyeleri belirlemek zordur. Çünkü her bir kalite karakteristiği, farklı parametre koşullarında genellikle değişir (Wu,F.C,2002).

Taguchi' nin parametre tasarımı deneylerinde çoklu kalite karakteristiklerinin optimizasyonundaki sorunlar Antony (2001) tarafından aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

1. Her bir kalite karakteristiği (yanıt) için ölçüm birimleri farklıdır. Dolayısıyla her bir yanıtın her biriminin neden olduğu kayıp farklıdır.

2. Farklı yanıtlar için nispi ağırlıklar (önemler) farklıdır.

3. Her bir yanıt için kayıp fonksiyonları daima farklıdır. Bu nedenle her bir yanıt için kayıp doğrudan karşılaştırılamaz ve eklenemez.

4. Nominal en iyi kalite karakteristiklerinin olduğu bir deneyde düzeltme faktörleri kullanılmalıdır. Bu faktörler ortalamayı hedef değere getirmek (ayarlamak) için kullanılacaktır.

Bu problemlerin çözülmesi için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Logothetis ve Haigh (1988) ilk olarak çoklu kalite karakteristiklerini optimize etmek için iki- aşama prosedürünü göstermiştir.

Pignatiello (1993), çoklu kalite karakteristikleri problemi için fonksiyonu minimize etmek için beklenen kayıp fonksiyonu ifadesini geliştirmiştir.

Elsayed ve Chen (1993), Pignatiello' nun yaklaşımına benzer olarak kayıp fonksiyonuna bağlı olan çoklu bir karakteristik modeli tanımlamıştır. Bu modelde öncelikle çoklu karakteristik problemini optimize etmek için bir kontrol faktörü kullanılmaktadır.

Su ve Tong (1997) ise ana bileşenler analizine bağlı bir yaklaşım geliştirmişlerdir.

Tong ve Su (1997), parametre tasarımını optimize etmek için bulanık mantık teoremini kullanmıştır.

Tong, Su ve Wang (1997), 0-1 arasındaki standart değerlerin hepsini set ederek ve her bir karakteristiğin kaybını standardize eden bir yaklaşım göstermiştir.

Chen (1997), kalite kayıp fonksiyonunun yerine SN oranına bağlı bir çoklu karakteristik modelini kullanmıştır.

Vining(1998), çoklu kalite karakteristiklerini optimize etmek için polinomial regresyon fonksiyonunu kullanmışlardır.

Tsui(1999), Pignatiello' nun yaklaşımını geliştirerek daha karmaşık bir model oluşturmuştur.

Bu yaklaşımların çoğu çoklu kalite karakteristikleri için Sinyal gürültü oranlarının kombinasyonunun maksimize edilmesi ile ilgilenmişlerdir.

Taguchi yöntemlerini kullanan pek çok mühendis, üretim prosesinin optimizasyonunda çoklu kalite karakteristikleri ile ilgilendiklerinde mühendislik yargısını kullanmışlardır. Bu yaklaşım subjektiftir ve karar verme sürecinde daima

bir belirsizliğe neden olmaktadır. Bu nedenle Antony(2001), Taguchi' nin kalite kayıp fonksiyonunu kullanarak bu gibi optimizasyon problemleri için alternatif bir yaklaşım sunmaktadır.

Wu(2002), çoklu kalite karakteristiklerinin parametre tasarımı için kayıp fonksiyonundan türetilen kalite kaybının yüzdesel azalımına bağlı genelleştirilmiş bir yaklaşım önermiştir.

3.1 Statik Çoklu Kalite Karakteristikli Durum İçin Optimizasyon

Ürün kalitesini ve süreç performansını geliştirmek için on beş yıldan fazla bir süredir Taguchi yöntemlerinin başarılı olduğu ispatlanmıştır. Birçok Taguchi deneyinde bir tek kalite karakteristiğinin optimizasyonu ele alınmıştır. Bu kısımda birden fazla statik kalite karakteristiklerinin eş zamanlı optimizasyonu, Taguchi' nin kalite kayıp fonksiyonunun kullanımına bağlı olarak açıklanacaktır.

3.1.1 Toplam Normalize Edilmiş Kalite Kayıp Fonksiyonu Yaklaşımı

Taguchi' nin parametre tasarımı deneylerinde çoklu kalite karakteristiklerinin optimizasyonundaki sorunlardan kısaca bahsedilmişti. Optimizasyon sürecindeki sorunların çözülmesi için kalite kayıp fonksiyonu yardımı ile gerçekleştirilecek bir optimizasyon süreci Antony(2001) tarafından ele alınmıştır. Bu yaklaşım için gerekli adımlar açıklanacaktır. Bu adımlar mühendislere, uygulayıcılara çoklu yanıt süreci optimizasyonu için yol gösterici olacaktır.

Adım 1. Deney İçin Faktörlerin Tanımlanması

Taguchi' nin parametre tasarım deneyinde faktörler kontrol, gürültü ve sinyal faktörler olarak sınıflandırılmaktaydı. Bu faktörler kısım 1.3.1' de tanımlanmıştır. Statik durumlarda sinyal faktör ele alınmadığından diğer faktörlerin belirlenmesi için üretim, kalite, tasarım bölümlerinden oluşan takım ile beyin fırtınası toplantısı yapılabilir. Bunun yanı sıra geçmiş verilerden de faydalanılabilir. Problemi etkileyen mümkün nedenlerin belirlenmesi için neden-sonuç analizi yönteminin kullanımı da

problemin daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Deney için faktörleri tanımlamak kadar bu faktörlerin seviyelerini de tanımlamak önemlidir.

Adım 2. Kalite Karakteristiklerinin veya Yanıtın Seçimi

Parametre tasarım deneyinde kalite karakteristikleri statik ve dinamik olarak iki kategoride ele alınmaktadır. Bu kısımda statik kalite karakteristiklerinin optimizasyonu ile ilgilenildiği için daha önce Kısım 2.1' de yapılan sınıflamaya göre veri ve problem için uygun olan sınıf seçilir.

Adım 3. Her bir Kalite Karakteristiği İçin Normalleştirilmiş Kalite Kaybının Hesaplanması

Her bir yanıt, farklı ölçüm birimlerine sahip olduğundan kalite kayıp fonksiyonunu normalleştirmek önemlidir. L_{ij}, j' inci denemedeki i' inci kalite karakteristiği için kalite kaybı ve L_i^*, tüm denemeler arasındaki i' inci kalite karakteristiği için max. kalite kaybı olsun. Bu durumda normalize edilmiş kalite kaybı y_{ij},

$$y_{ij} = \frac{L_{ij}}{L_i^*} \tag{3.1}$$

ile her bir deneme ve kalite karakteristiği için elde edilir. y_{ij}, değerleri 0 ve 1 arasında değerler alır.

Adım 4. Toplam Normalize Edilmiş Kalite Kaybının Hesaplanması

Her bir deneme koşulu için toplam normalize edilmiş kalite kaybı Y_j' nin hesaplanması için optimizasyon sürecinde ele alınan her bir kalite karakteristiği için bir ağırlıklandırma faktörü tahsis edilmelidir. w_i, i' inci kalite karakteristiği için ağırlık faktörünü göstersin. k, kalite karakteristiği sayısıdır ve yij, i' inci kalite karakteristiği ve j' inci deneme koşulu için kayıp fonksiyonu değeridir. Bu durumda toplam normalize edilmiş kalite kaybı,

$$Y_j = \sum_i^k w_i y_{ij} \qquad 3.2$$

eşitliği ile hesaplanır.

Adım 5. Çoklu sinyal-Gürültü Oranı (η_i)' nın Hesaplanması

Her bir deneme koşulu için toplam normalize edilmiş kalite kaybının hesaplanmasından sonraki adım her bir tasarım noktasındaki çoklu sinyal-gürültü oranının aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmasıdır.

$$\eta_j = -10\log(Y_j) \qquad 3.3$$

Adım 6. Anlamlı Faktör/Etkileşim Etkileri ve Optimal Seviyelerin Belirlenmesi

Daha küçük daha iyidir (STB) ve daha büyük daha iyidir (LTB) kalite karakteristikleri için optimal koşul en yüksek çoklu sinyal-gürültü oranlı faktör seviyelerinin seçilmesi ile elde edilir. Daha büyük daha iyidir kalite karakteristiklerinde ortalama için düzeltme faktörlerini tamamlarız. Bu faktörler η üzerinde etkisi olmayan sadece ortalama kalite karakteristiğini etkileyen faktörlerdir. Diğer bir ifade ile ilk olarak NTB kalite karakteristikleri için çoklu sinyal gürültü oranı analizi düzenlenir. Bunu ortalama kalite karakteristiği analizi izler. Amaç ürünün fonksiyonel performansındaki değişkenliği azaltmak ve daha sonra ortalama karakteristiği hedef değer üzerine getirmektir. Anlamlı faktör ve etkileşim etkileri için varyans analizi kullanılır. Çoklu kalite karakteristiğinin optimizasyon problemlerinde çoklu sinyal gürültü oranlarının toplam değişkenliği, faktörler (veya süreç parametreleri) ve hata terimi katkıları olarak ayrılması gerekmektedir.

Deneydeki kalite karakteristiklerinin tipine göre ayarlama faktörleri tanımlanır. Bir deneydeki kalite karakteristiklerinin dört durumu vardır.

1. Daha küçük daha iyi ve nominal en iyi karakteristiklerinin optimizasyonu
2. Daha büyük daha iyi ve nominal en iyi karakteristiklerinin optimizasyonu

3. Daha küçük daha iyi ve daha büyük daha iyi karakteristiklerinin optimizasyonu
4. Tümünün nominal en iyi olduğu karakteristiklerin optimizasyonu

1,2 ve 3 için düzeltme faktörünün seçiminde;

(i) Nominal en iyi karakteristikleri için çoklu sinyal gürültü oranınında anlamlı etkiye sahip olmayan fakat ortalama yanıt üzerinde anlamlı etkiye sahip olan herhangi bir faktör seçilir.

(ii) Düzeltme faktörü, ortalamayı hedef değere getirmek için kullanıldığında kalite karakteristiklerinin iyileştirildiği yön daha küçük daha iyi ve daha büyük daha iyidir durumlarının amacını eş zamanlı olarak karşılamalıdır.

4. için düzeltme faktörünün seçiminde,

Çoklu sinyal gürültü oranında anlamlı etkiye sahip olmayan, aday düzeltme faktörün kalite karakteristiği için ortalama yanıt üzerinde etkiye sahip olan ve diğer kalite karakteristikleri için ortalama yanıt üzerinde etkiye sahip olmayan herhangi bir faktör seçilir.

Çoklu sinyal gürültü oranını anlamlı bir şekilde etkileyen faktör ve etkileşim etkilerini araştırmak için yapılan varyans analizinde çoklu sinyal gürültü oranının toplam değişkenliği, çoklu sinyal gürültü oranı değerlerinin genel ortalamadan sapmalarının kareler toplamı ile ölçülür. Sinyal gürültü oranının kareler toplamı,

$$SS_T = \sum_{j=1}^{n} \eta_j^{\,2} - n\eta_m^{\,2} \qquad 3.4$$

eşitliği ile hesaplanır. η_j, her bir deneme için çoklu sinyal gürültü oranı, η_m, çoklu sinyal gürültü oranı genel ortalaması ve n, deneydeki deneme sayısıdır. Sinyal gürültü oranının kareler toplamı, ana etkiler, etkileşim etkileri ve hata değişkenlik

kaynaklarına (kareler toplamına) ayrılır. Herhangi bir faktörün kareler toplamı için, *A,* iki seviyeli herhangi bir faktör olsun.

A_1= *A* faktörünün düşük seviyedeki çoklu sinyal gürültü oranı değerlerinin toplamı
A_2= *A* faktörünün yüksek seviyedeki çoklu sinyal gürültü oranı değerlerinin toplamı
n_1= *A* faktörünün düşük seviyedeki gözlemlerinin sayısı
n_2= *A* faktörünün yüksek seviyedeki gözlemlerinin sayısı

olmak üzere A faktörünün kareler toplamı,

$$SS_A = \frac{A_1^{\,2}}{n_1} + \frac{A_2^{\,2}}{n_2} - n\eta_m^{\,2} \qquad 3.5$$

eşitliği ile verilir. Her bir faktör ve etkileşim etkisinin serbestlik derecesi (seviye sayısı-1)' dir. Doyurulmuş tasarımlarla çalışması durumunda hata için serbestlik derecesi kalmaması durumunda hata varyansı tahminini elde etmek için aktif olmayan daha küçük eklenebilir. Bu süreç pooling sürecidir. Varyans analizi yapılarak deneydeki her bir faktör veya süreç değişkeninin en iyi setini sağlayan optimal koşul belirlenir.

Adım 7. Doğrulama Deneyi

Analiz sonrasında deneyde elde edilen en iyi durumun geçekten bir iyileştirme sağladığını kanıtlamak için doğrulama deneyleri yapılır. Çoklu sinyal gürültü oranının tahminleşen ve gözlemlenen değerleri karşılaştırılır. Tahminlenen ile gözlemlenen çoklu sinyal gürültü oranı değerleri yakınsa eklenebilir bir modelin yeterli olduğu gibi varsayımlar yapılır. Etkileşimlerin önemli olup olmadığı sorgulanır.

3.1.2 Taguchi' nin Kalite Kaybının Yüzdesel Azalımına Dayalı Bir Yaklaşım

Literatürdeki yaklaşımların çoğu çoklu kalite karakteristikleri için Sinyal gürültü oranlarının kombinasyonunun maksimize edilmesi ile ilgilenmişlerdir. Wu(2002), çoklu kalite karakteristiklerinin parametre tasarımı için kayıp fonksiyonundan türetilen kalite kaybının yüzdesel azalımına bağlı genelleştirilmiş bir yaklaşım önermiştir.

3.1.2.1 Kalite Kaybının Yüzdesel Azalımı ve SN Oranı İlişkisi

Taguchi ortalama kayıp fonksiyonunu *L=k.MSD* şeklinde tanımlamıştır. *k,* kayıp katsayısı ve MSD, bir ürünün *n* adet birimi ölçüldüğünde örnek ortalama karesel sapmasıdır. Önceki bölümde de yer verildiği gibi Taguchi, kalite karakteristiği tipine göre MSD' nin farklı formlarını aşağıdaki gibi vermiştir.

$$MSD = \begin{cases} \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} y_i^{\,2} & STB\ için \\ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - t)^2 = \frac{n-1}{n}s^2 + (\bar{y} - t)^2 & NTB\ için \\ \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^{\,2}} & LTB\ için \end{cases} \qquad 3.6$$

n adet birimin örnek varyansı,

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \qquad 3.7$$

şeklinde elde edilir. Taguchi STB, ve LTB için SN oranını,

$$\eta = -10\log(MSD) \qquad 3.8$$

şeklinde ifade etmiştir. *L=k.MSD* olduğundan eşitlik 3.8 düzenlenerek,

$$\eta = -10\log\left(\frac{k}{L}\right)^{10} \tag{3.9}$$

veya ters olarak,

$$L = k.10^{-\eta/10} \tag{3.10}$$

şeklinde yazılabilir. Parametre tasarımından sonra varolan yeni bir ortalama kalite kaybı L' ve bu kayba ait bir başka η' oranı elde edilir.

$$L' = k.10^{-\eta'/10} \tag{3.11}$$

Kalite kaybının yüzdesel olarak azalımını ($PRQL$) elde etmek için, $\delta = \eta' - \eta$ olmak üzere,

$$\begin{aligned} PRQL &= \frac{L - L'}{L}.100\% \\ &= \left(1 - 10^{-\delta/10}\right)100\% \end{aligned} \tag{3.12}$$

eşitliği kullanılır (Wu,2002). NTB durumu için SN oranını yeniden tanımlarsak,

$$\eta = -10\log(MSD) = -10\log\left(\frac{n-1}{n}.s^2 + (\bar{y} - t)^2\right) \tag{3.13}$$

Bu oranı maksimize etmek için s^2 ve $(\bar{y} - t)^2$ aynı anda minimize edilmelidir. Eşitlik 3.13 yeniden düzenlenerek

$$\eta = 10\log\left(\frac{\bar{y}^2}{s^2}\right) \tag{3.14}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten örnek varyans,

$$s^2 = \bar{y}^2.10^{-\eta/10} \tag{3.15}$$

formunda yeniden yazılır (Wu,2002). Eşitlik 3.13 ve 3.15 ile NTB durumları için kayıp fonksiyonu,

$$L = k.\left(\frac{n-1}{n}.\left(\bar{y}^2.10^{-\eta/10}\right) + \left(\bar{y}-t\right)^2 \right) \tag{3.16}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda NTB için Kayıp fonksiyonunun yüzdesel azalımı,

$$PRQL = 1 - \left(10^{-\eta'/10}\left(\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1}\right)^2 + \frac{n}{n-1}\left(\frac{\bar{y}_2 - t}{\bar{y}_1}\right)^2 \right) / \left(10^{-\eta/10} + \frac{n}{n-1}\left(\frac{\bar{y}_1 - t}{\bar{y}_1}\right)^2 \right) \tag{3.17}$$

şeklinde tanımlanır. Ortalama hem başlangıç hem de optimal parametre koşullarında nominal için $\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = t$ şeklinde düzeltme faktörü kullanılırsa NTB durumu için düzeltme faktörü yeniden,

$$PRQL = 1 - 10^{-\eta'-\eta/10} = 1 - 10^{-\delta/10} \tag{3.18}$$

şeklinde yazılabilir (Wu,2002).

3.1.2.2 Çoklu Kalite Karakteristikleri Modeli

Bir ürünün $t_1,t_2,...,t_k$ hedef değerlerine sahip k adet kalite karakteristiğine sahip olduğu farz edilsin ve k adet karakteristiğin yanıtlarını etkileyen n adet, $x_1,x_{2,...},x_n$ kontrol faktörü olsun. Çoklu kalite karakteristikli bir ürün için parametre tasarımının amacı şudur:

$$\text{Minimize } L_{TQL} = (x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{k} L_i(x_1, x_2, ..., x_n) \tag{3.19}$$

SN oranı ortalamasının tahmini ve NTB için ürünün ortalamasının (SM) tahmini sırası ile aşağıdaki formlarda gösterilebilir.

$$\hat{\mu}_{SN} = \overline{\mu}_{x_1,SN} + \overline{\mu}_{x_2,SN} + ... + \overline{\mu}_{x_n,SN} - (n-1)\overline{T}_{SN} \qquad 3.20$$

$$\hat{\mu}_{SM} = \overline{\mu}_{x_1,SM} + \overline{\mu}_{x_2,SM} + ... + \overline{\mu}_{x_n,SM} - (n-1)\overline{T}_{SM} \qquad 3.21$$

$\hat{\mu}_{SN}$ ve $\hat{\mu}_{SM}$, deneydeki gözlemler olarak düşünülürse, SN oranı fonksiyonu ve SM fonksiyonu için etkileşimsiz ikinci dereceden çoklu regresyon modeli aşağıdaki gibidir.

$$SN(x_1, x_2, ..., x_n) = a + a_1 x_1^{\,2} + b_1 x_1 + a_2 x_2^{\,2} + b_2 x_2 + ... + a_n x_n^{\,2} + b_n x_n \qquad 3.22$$

$$SM(x_1, x_2, ..., x_n) = c + c_1 x_1^{\,2} + d_1 x_1 + c_2 x_2^{\,2} + d_2 x_2 + ... + c_n x_n^{\,2} + d_n x_n \qquad 3.23$$

Amaç, toplam kalite kaybını minimize etmek ve böylece toplam PRQL' i (kayıp fonksiyonunun yüzdesel azalımını) maksimize etmektir.

$$\max PRQL_{TQL}(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{k} k_i . 10^{-\eta_i / 10} . PRQL_i \qquad 3.24$$

Tasarımcı eğer bir kalite karakteristiği için kaybı arttırmayı istemiyorsa, modele istenen seviye kısıtını, eşitlik 3.25'i ekleyerek bunu sağlayabilir.

$$SN_i = (x_1, x_2, ..., x_n) \geq \tau_i \qquad 3.25$$

Çoklu kalite karakteristikli bir parametre tasarımı için optimizasyon adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Adım 1. Her bir kalite karakteristiği için SN oranı ve her bir NTB için SM değerini hesaplamak için geleneksel Taguchi deneyi oluşturulur.

Adım 2. Her bir kalite karakteristiği için faktörlerin ana etkisi hesaplanır.

Adım 3. Her bir kombinasyon için ortalama SN oranı ve her bir NTB için SM değeri tahminlenir.

Adım 4. Her bir kalite karakteristiğinin SN oranı fonksiyonu ve her bir NTB' nin SM fonksiyonu için etkileşimsiz ikinci derece bir çoklu regresyon modeli tahminlenir.

Adım 5. Başlangıç koşulunun ortalama SN oranı ve ortalama SM değeri hesaplanır.

Adım6. Çoklu kalite karakteristikli PRQL' in matematiksel programlama problemi oluşturulur ve optimal parametre tasarımı elde etmek için bu problem çözülür.

Wu(2002), bu yaklaşım ile SN oranlarının toplam miktarını maksimize etmenin optimal olmadığını bunun yerine PRQL değerinin maksimize edilmesi gerektiğini savunmuştur.

3.2 Dinamik Çoklu Kalite Karakteristikli Durum İçin Optimizasyon

3.2.1 C-C Tipi Dinamik Modeli

Bir ürün veya süreç, p tane dinamik C-C tipi kalite karakteristiğine $Y_1, Y_2, ..., Y_p$ sahip olsun. Y_i çıktısı, kontrol faktör seviyeleri, $M_1, M_2, ..., M_m$ sinyal değerleri ve $z_1, z_2, ..., z_n$ gürültü koşullarından etkilenir. y_{ijk}, q tane kontrol faktör seti $x = (x_1, x_2, ..., x_q)^T$ için Y_i kalite karakteristiğinin gözlemi olsun. Bu durumda sinyal M_j ve gürültü koşulu z_k' dır.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij}M_i\right)}{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}M_i^{\,2}} \quad \text{ve} \quad \sigma_e^{\,2} = \frac{1}{mn-1}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(y_{ij} - \beta M_i\right)^2$$

olmak üzere, toplam ortalama kalite kaybı, düzeltmeden sonra

$$
\begin{aligned}
Q_a(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^{p} \frac{K_i}{\beta_i^{\,2}} \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=1}^{n} (y_{ikl} - \beta_i M_k)^2 \\
&\quad + \sum_{i=1}^{p} \sum_{i<j}^{p} \frac{K_{ij}}{\beta_i \beta_j} \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=1}^{n} (y_{ikl} - \beta_i M_k)(y_{ikl} - \beta_j M_k) \\
&= \sum_{i=1}^{p} \frac{K_i}{\beta_i^{\,2}} \frac{1}{m.n} \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=1}^{n} e_{ikl}^{\,2} + \sum_{i=1}^{p} \sum_{i<j}^{p} \frac{K_{ij}}{\beta_i \beta_j} \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^{m} \sum_{l=1}^{n} e_{ikl} e_{jkl} \\
&= \sum K_i \frac{\sigma_{ie}^{\,2}}{\beta_i^{\,2}} + \sum_{i=1}^{p} \sum_{i<j}^{p} \frac{K_{ij}}{\beta_i \beta_j} (\sigma_{Y_i Y_j} - \sigma_{Y_i^* Y_j^*})
\end{aligned}
\qquad 3.26
$$

ile ifade edilir (Wu&Yeh,2005). K_i, Y_i' nin kayıp katsayısı ve K_{ij}, Y_i ve Y_j ' nin korelasyonlu kayıp katsayısıdır. $\sigma_{Y_i Y_j}$, Y_i ve Y_j gözlemlerinin kovaryansı, $\sigma_{Y_i^* Y_j^*}$, Y_i ve Y_j ' nin Tahminlenen (kestirim) değerlerinin kovaryansıdır. $Y_i^* = \beta_i M_k$ ' dır.

K_{ij}, aşağıdaki aralıkta sınırlandırılır (Wu, ve Yeh,2005).

$$
\left|K_{ij}\right| \le \left| \frac{\beta_i \beta_j}{\sigma_{ij} - \sigma_i^{\,*}{}_{j^*}} \right| . \min\left(\frac{K_i \sigma_{ie}^{\,2}}{\beta_i^{\,2}}, \frac{K_j \sigma_{je}^{\,2}}{\beta_j^{\,2}} \right) \qquad 3.27
$$

Wu(2006), k_{ij}' yi kalite kayıp miktarı ile de ifade etmiştir. Bunun için kalite karakteristiği y_i için, $Q_a\left(y_i = t_i \pm \Delta_{i0}\right)$' daki kalite kaybının miktarı A_{i0}, y_j, kalite karakteristiği için $Q_a\left(y_j = t_j \pm \Delta_{j0}\right)$ ile kalite kaybının miktarı A_{j0} olsun. y_i ve y_j'nin hedef değer t_i ve t_j'den sapmaları ile $Q_a\left(y_i = t_i \pm \Delta_{i0}, y_j = t_j \pm \Delta_{j0}\right)$' daki kalite kaybının miktarı A_{ij} olsun. y_i ve y_j arasındaki korelasyonlu kayıp katsayısı k_{ij},

$$
k_{ij} = \frac{A_{ij} - A_{i0} + A_{j0}}{\Delta_{i0} . \Delta_{j0}} \qquad 3.28
$$

eşitliği ile elde edilir (Wu, 2006).

Böylece parametre optimizasyon koşullarının amacı $\mathbf{x}^*$'ı bulmaktır. *Ω, x* kontrol faktörünün deney bölgesi olmak üzere parametre optimizasyon koşulları için amaç,

$$\underset{\mathbf{x}\in\Omega}{Min}\sum_{i=1}^{p} K_i \frac{\sigma_{ie}^{\ 2}(\mathbf{x})}{\beta_i^{\ 2}(\mathbf{x})} + \sum_{i=1}^{p}\sum_{i<j}^{p} \frac{K_{ij}}{\beta_i(\mathbf{x})\beta_j(\mathbf{x})}(\sigma_{Y_iY_j} - \sigma_{Y_i^*Y_j^*})(\mathbf{x}) \qquad 3.29$$

ile gösterilir (Wu ve Yeh,2005).

3.2.2. D-D Tipi Dinamik Modeli

Dinamik D-D kalite karakteristiği deneyin de kalite kaybı eğim düzeltildikten sonra,

$$Q_a(\mathbf{x}) = K\frac{\sigma_e^{\ 2}}{\beta^2} = K\frac{p'(1-p')}{(1-2p')^2} \qquad 3.30$$

olarak tanımlanır(Wu&Yeh, 2005). Eşitlik 1.3' ten çoklu dinamik D-D kalite karakteristikleri için toplam ortalama kayıp,

$$Q_a(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{p} K_i \frac{p_i'(1-p_i')}{(1-2p_i')^2} + \sum_{i=1}^{p}\sum_{i<j}^{p} \frac{K_{ij}}{(1-2p_i')(1-2p_j')}(\sigma_{Y_iY_j} - \sigma_{Y_i^*Y_j^*}) \qquad 3.31$$

eşitliği ile yeniden yazılır ve,

$$\sigma_{Y_iY_j} - \sigma_{Y_i^*Y_j^*} = \left(p_i'p_j'\sqrt{(1-p_i')(1-p_j')} + (1-p_i')(1-p_j')\sqrt{p_i'p_j'}\right) \qquad 3.32$$

elde edilir.

3.2.3 Tolerans Tasarımı

Parametre tasarım çabaları yeterli olmadığında tolerans tasarımı düzenlenir. Yanıtın varyansını tahmin etmek için ilk olarak her bir gürültü faktörüne karşılık gelen yanıtın sapmaları elde edilecektir. $\mathbf{x} = (x_1, x_2, ..., x_q)^T$ kontrol faktörlerini, $\mathbf{z} = (z_1, z_2, ..., z_n)^T$ gürültü faktörlerinin seviyelerini belirtsin. Bu durumda y kalite karakteristiğinin **x** ve **z**' ye bağımlılığı,

$$y = f(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \tag{3.33}$$

ile ifade edilir.

$\sigma_{z_1}^2, \sigma_{z_2}^2, ..., \sigma_{z_n}^2$, n adet gürültü faktörünün varyansları olsun. y' nin varyansı σ_y^2, bu durumda birinci derece Taylor serisi açılımına bağlı olarak aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} \sigma_y^2 &= (\partial f / \partial z_1).\sigma_{z_1}^2 + (\partial f / \partial z_2).\sigma_{z_2}^2 + ... + (\partial f / \partial z_n).\sigma_{z_n}^2 \\ &= \sum_{i=1}^{n} (\partial f / \partial z_i)_{z=\mu}^2 \sigma_{z_i}^2 \end{aligned} \tag{3.34}$$

z=μ, her bir gürültü faktörünün seviyesinin nominal değere eşit olduğunu ifade eder. Sonuç olarak σ_y^2, gürültü faktörleri $\sigma_{z_i}^2$' nin varyanslarının duyarlılık katsayısı $(\partial f / \partial z_i)^2$ ile çarpımlarının toplamıdır.

Yukarıdaki analizlere göre çoklu dinamik kalite karakteristikli problemler için optimizasyon süreci aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Adım 1. Her bir kalite karakteristiği için kayıp katsayısı ve iki kalite karakteristiği arasındaki korelasyonlu kayıp katsayısı belirlenir.

Adım 2. β_i , σ_{ie}^2 *ve* $\sigma_{ij} - \sigma_{i^* j^*}$ her bir deney kombinasyonu için hesaplanır.

Adım 3. ($\hat{\beta}_i$ $\hat{\sigma}_{ie}^2$ *ve* $\hat{\sigma}_{ij} - \hat{\sigma}_{i^* j^*}$) parametrelerinin çoklu polinomial regresyon modellerine uyumu ile en küçük kareler tahmincileri bulunur.

$$\beta_i = \boldsymbol{\alpha}_\mathbf{i} \mathbf{x}' \qquad 1 \le i \le p \tag{3.35}$$

$$\log\left(\sigma_{ie}^2\right) = \boldsymbol{\gamma}_\mathbf{i} \mathbf{x}' \qquad 1 \le i \le p \tag{3.36}$$

$$\sigma_{ij} - \sigma_{i^* j^*} = \boldsymbol{\lambda}_\mathbf{ij} \mathbf{x}' \quad 1 \le i < j \le p \tag{3.37}$$

$\mathbf{x}'$, kontrol faktörleri $\mathbf{x}$ için k-dereceden polinomial vektörü belirtir. $x' = \left[1, x_1, x_2, ..., x_q, x_1^2, x_2^2, ..., x_1 x_2, ...\right]$ ve α_i, γ_i ve λ_i, $\mathbf{x}'$' ne göre regresyon katsayılarının vektörleridir. .Eşitlik 3.36' da logaritma transformasyonu yapılarak hata varyansının pozitif değerleri sağlanır.

Adım 4. Eşitlik 3.29 ile optimal parametre koşullarını elde etmek için toplam ortalama kalite kaybı modeli minimize edilir.

Adım 5. Elde edilen optimal parametre seviyeleri değişkenliği azaltmak için yeterli olmadığında ürün değişkenliğine neden olan gürültü faktörlerinin katkısını analiz etmek için eşitlik 3.37 ile Taylor serisi açılımı kullanılır. Yukarıdaki analizden gürültü faktörleri için varyansın oranını hesaplayabiliriz. Daha sonra sistemdeki değişkenliği azaltmak için daha yüksek derecedeki malzemeler ve bileşenler belirlenir.

Hem C-C tipi hem de D-D tipi dinamik problemlerde robust ürün ve süreç tasarımı için toplam ortalama kalite kaybının minimize edilmesi ile en uygun parametre tasarımı elde edilir.

3.3 Koşullu Dağılımlar

X ve Y ortak olasılık yoğunluk fonksiyonu, $f_{X,Y}(x,y)$ olan sürekli şans değişkenleri olsun. $X=x$ olduğu bilindiğinde Y' nin koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f_{Y/X}(y/x) = \frac{f_{X,Y}(x,y)}{f_X(x)} \qquad 3.38$$

ile tanımlanır. $f_X(x)$, X' in marjinal olasılık yoğunluk fonksiyonudur ve $f_X(x) = 0$ olduğunda ise fonksiyon tanımsızdır.

(X,Y) iki boyutlu şans değişkeni ve *g(. , .)* iki değişkenli bir fonksiyon olsun. Bu durumda *g(X,Y)*' nin $X=x$ için koşullu bekleneni $E[g(X,Y)/X=x]$ ile belirtilir.

(X,Y) sürekli ise,

$$E[g(X,Y)/X=x] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x,y).f_{Y/X}(y_j/x).dy \qquad 3.39$$

(X,Y) kesikli ise,

$$E[g(X,Y)/X=x] = \sum g(x,y_j).f_{Y/X}(y_j/x) \qquad 3.40$$

şeklinde ifade edilir. Koşullu dağılışlarla ilgili birkaç tanım ve teorem uygulama kısmını desteklemek üzere aşağıda verilmektedir.

- *g(x,y)=y* ise, $E(Y/X=x) = E(Y/x)$ olarak tanımlanır. *E(Y/x)* ve *E(g(X,Y)/x), x'* in fonksiyonlarıdır. Bu tanım ikiden daha fazla boyut için genelleştirilebilir.

- *(X,Y)* iki boyutlu şans değişkeni olsun. Bu durumda,

$$E(g(Y)) = E\left[E\left[g(Y/X)\right]\right]$$
$$E(Y) = E\left[E\left[Y/X\right]\right] \qquad 3.41$$

- X şans değişkeni, $\varepsilon \sim N(0,\sigma^2)$ olmak üzere ,

$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_k X_k + \beta_m M + \varepsilon$ modelinin X=x noktasındaki tahmini $E(Y/X = x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k + \beta_m x_m$ olarak elde edilir ve $E\left[Y/X = x\right]$; x üzerinde Y' nin regresyon eğrisi olarak adlandırılır ve $\mu_{Y/X=x} = \mu_{Y/x}$ ile belirtilir.

- X=x ise Y'nin varyansı

$$Var\left[Y/X = x\right] = E\left[Y^2/X = x\right] - \left[E(Y/X = x\right]^2 \qquad 3.42$$

ile tanımlanır ve,

- Sapmasızlık koşulu altında *MSE(Y)=V(Y)* olmak üzere,

$$Var\left[Y\right] = E\left[Var(Y/X)\right] + Var\left[E(Y/X)\right] \qquad 3.43$$

olarak elde edilir (Mood,A.M , Graybill, F.A., Boes,D.C 1974). Sapmasızlık, aşağıda açıklanan Gauss Markov koşulu altındadır.

Modelin matematiksel fonksiyonu doğru tanımlanmış ve $\varepsilon \sim N(0,\sigma^2)$ olmak üzere Gauss Markov' a göre $\hat{\beta}_i$ tahmincileri regresyon modelindeki şans değişkeni *Y'* nin doğrusal bir fonksiyonu olmalıdır. Bunun yanı sıra tahmincinin gerçek değeri β_i olmak üzere,

$$E(\hat{\beta}_i) = \beta_i$$

olmalıdır. Bu özellikler sağlanıyorsa β_i tahmincilerinin sapmasız olduğunu söyleyebiliriz.

3.4 Ortalama Kalite Kaybının Koşullu Varyans İle İncelenmesi

Dinamik (sinyal-yanıt) sistemlerde ilk olarak yanıt ve sinyal arasındaki ideal ilişkinin belirlenmesi gerektiğinden önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Kalite karakteristiği, Y ve sinyal faktör, M_i arasındaki ideal ilişki, β eğim ve e_{ij} hata terimi olmak üzere;

$$y_{ij} = \beta M_i + e_{ij}$$

ile ifade edilmekteydi. y_{ij}, kalite karakteristiği Y_i' nin bir gözlemidir. İdeal modelde gerçekte kontrol faktörleri sabit olmak üzere Y_i ve M_i arasındaki ortalama ilişki incelenmektedir.

Regresyon, Y ile X arasındaki ortalama ilişkinin $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ gibi bir matematiksel fonksiyonla ifadesidir. Ortalama ilişki; X değişkeninin, bilinen bir X_i değerini aldığında Y' nin beklenen değeridir. Regresyon dediğimizde $E(Y/X=x)$ ifadesini kullanırız. Yani X şans değişkenini belli bir değerde sabitleyerek Y şans değişkeninin dağılımı incelenmiş olur. Bu da bir koşullu dağılımı tanımlamaktadır.

Deney esnasında sinyal değerleri veya kontrol faktörleri gürültülü olabilir. Gürültülü faktör ile ilgili daha ayrıntılı bilgi için Engel, J ve Huele, A.F (1996)' ya bakılabilir. Yine aynı makale de kontrol faktörü olan fırın sıcaklığı örneği verilmiştir. Fırın sıcaklığı 200^0 *C'* de sabitlendiğinde sıcaklığın 198^0C *ve* 202^0C arasında değiştiğini söyleriz. Bu nedenle bu bir gürültülü faktördür. Bu faktörlerin ortalama değerini kontrol etmek kolaydır fakat gerçek değerleri sabit seviyeler etrafında değişir. Bölüm 4' de ele alınan elektrik devresinde sinyal olarak bir rezistans ele

alınmıştır. Örneğin bu rezistansın ortalama değeri *0,5 KΩ* olarak verilmiştir. Fakat ölçtüğümüzde bu değer *0,49 KΩ* veya *0,51 KΩ* olabilir. Bu nedenle deneyde sinyal olarak ele alınan rezistans gerçekte bir gürültülü sinyaldir.

Bu çalışma gürültülü faktörlerin normal dağıldığı varsayımı altında yapılmıştır. Engel, J ve Huele, A.F (1996)' nin çalışmasına paralel olarak gürültülü sinyal ve/veya gürültülü kontrol faktörleri için dağılış varsayımı yapılarak bu çalışma farklı bir bakış açısı ile incelenebilir. Bunun içinde gürültülü faktörlerin dağılışı ile ilgili bir ön bilgiye ihtiyaç vardır.

Yukarıda bahsedilen açıklamalar nedeni ile dinamik sistemlerde ideal modelde incelenen ortalama ilişki gerçekte bir regresyondur ve şans değişkeni y_{ij}' nin, sinyal şans değişkeninin davranışından etkilendiği düşünülerek sinyali bir değerde sabitleyerek, şans değişkeni y_{ij}' nin dağılımı incelenmelidir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + ... + \beta_p X_p + \beta_k M + \varepsilon$$

modelinde kontrol faktörleri (X_i' ler), sabit olmak üzere, M (sinyal) şans değişkenini bir değerde sabitleyerek aşağıdaki koşullu dağılımı elde etmiş oluruz.

$$E(Y / M = M_k) = \beta M_k$$

Ya da kontrol faktörleri de gürültülü ise,

$$E(Y / X_i = x_i, M = M_k) = \beta_0 + \sum_i^p \beta_i x_i + \beta M_k$$

elde edilir.

Elde edilen koşullu dağılıma göre bir varyans hesaplayarak ortalama kalite kaybı hesaplanmalıdır. Diğer bir ifade ile ortalama kayıp fonksiyonu sapmasızlık

koşulu altında *Y*' nin koşullu dağılımı (varyansı) dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

Eşitlik 3.29' daki kalite kaybında, $\sigma_{ie}^{\ 2}$ değerinin eşitlik 3.43 ile her bir denemeye ve her bir sinyale karşılık gelecek şekilde hesaplanması prosedürü Koşullu Yöntem olarak adlandırılacaktır.

Koşullu Yöntem prosedürüne göre ortalama kalite kaybı (eşitlik 3.26), çoklu kalite karakteristikleri için $K_{12}=0$ olmak üzere aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_a(x) = \sum \frac{K_i}{\beta_i^{\ 2}} \cdot \frac{1}{m}\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}\left(y_{ikl} - \beta_i M_k\right)^2 \qquad 3.44$$

Bu fonksiyonda varyans bileşeni koşullu varyans ifadesi ile yeniden elde edilecektir. Varyans bileşeni:

$$Var(Y) = \frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(y_{ikl} - \beta_i M_k)^2 = \frac{1}{mn}\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{n}(y_{ikl} - E(Y/M = M_k))^2 \qquad 3.45$$

Koşullu varyans eşitliği, eşitlik 3.43' de verilmektedir. Koşullu varyans eşitliğine göre *Var(Y)* yeniden düzenlenecektir. Bunun için önce koşullu varyans eşitliğindeki her bir bileşen ele alınsın. *M* şans değişkeni (gürültülü sinyal faktörü) olmak üzere;

$$Var[Y] = E[Var(Y/M)] + Var[E(Y/M)]$$

ve $E(Y) = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n-1}$, $V(Y) = E[Y - E(Y)]^2$ ifadeleri kullanılarak;

1'inci Bileşen $E[Var(Y/M)]$' in Elde Edilmesi:

Varyans ve beklenen değer ifadeleri yardımı ile,

$$Var(Y/M=M_k) = E[Y/M=M_k - E(Y/M=M_k)]^2$$

şeklinde elde edilebilir. $V(Y/M=M_k)$ değeri, sinyalin her bir seviyesi ve deneme satırı (her bir j) için hesaplanır. Her bir deneme için elde edilen sinyal seviyelerine karşılık gelen varyans değerleri toplanır ve sinyalin seviye sayısına göre ortalaması alınır. Böylece 1. bileşen belirli bir kalite karakteristiği (p) için elde edilmiş olur. Aşağıdaki eşitlik ile bu hesaplama gösterilebilir.

$$E[V(Y/M=M_k)] = \frac{1}{k-1}\sum_{k=1}^{m}[(Y_{ik}/M=M_k) - E(Y_{ik}/M=M_k)]^2 \qquad 3.46$$

j, deneme sayısı $(j=1,...,n)$, i, kalite karakteristiği sayısı $(i:1,...,p)$ ve k, sinyal seviye sayısı $(k:1,...,m)$' dır.

2' inci Bileşen $Var[E(Y/M=M_k]$' nın Elde Edilmesi:

Varyans ve beklenen değer ifadeleri yardımı ile

$$Var[E(Y/M=M_k)] = E[E(Y/M=M_k) - E[E(Y/M=M_k)]]^2$$

$$= E[E(Y/M=M_k) - \mu_{Y/M=M_k}]^2$$

olarak elde edilir.

Yine 1.' inci bileşende olduğu gibi j, deneme sayısı $(j=1,...,n)$, i, kalite karakteristiği sayısı $(i:1,...,p)$ ve k, sinyal seviye sayısı $(k:1,...,m)$' dır. Her bir denemeye karşılık

gelen her bir sinyal seviyesi için $E(Y/M=M_k)$ ve $\mu_{Y/M=M_k}$ değerleri elde edilir. Daha sonra bu değerler ile varyans değeri elde edilir. Bu hesaplama aşağıdaki eşitlik ile kısaca gösterilebilir.

$$V(E(Y/M=M_k)) = \frac{1}{k-1}\sum_{k=1}^{m}\left[E(Y_{ik}/M=M_k) - \mu_{Y/M=M_k}\right]^2 \qquad 3.47$$

İki bileşenin hesaplama prosedürleri dikkate alınarak eşitlik 3.43 yeniden, her bir deneme satırı için,

$$V(Y) = \frac{1}{k-1}\left[\sum_{k=1}^{m}\left[(Y_{ik}/M=M_k) - E(Y_{ik}/M=M_k)\right]^2\right] + \frac{1}{k-1}\left[\sum_{k=1}^{m}\left[E(Y_{ik}/M=M_k) - \mu_{Y/M=M_k}\right]^2\right] \qquad 3.48$$

şeklinde yazılabilir. Burada $(Y_{ik}/M=M_k) = y_{ijk}$, $E(Y_{ik}/M=M_k) = \beta_i M_k$ 'dır. Bu durumda kalite karakteristiği *p* için her bir denemeye ait varyans, eşitlik 3.48 kullanılarak,

$$Var(Y) = \frac{1}{k-1}\left[\sum_{k=1}^{m}(y_{ijk} - \beta_i M_k)^2 + \sum_{k=1}^{m}(\beta_i M_k - \mu_{Y/M=M_k})^2\right] \qquad 3.49$$

şeklinde yazılır. Böylece kalite kayıp fonksiyonunda eşitlik 3.45 için eşitlik 3.49 kullanılarak yeni kalite kayıp fonksiyonu,

$$Q_a(x) = \sum_{i=1}^{p}\frac{K_i}{\beta_i^2}.\frac{1}{m}.\frac{1}{k-1}\left[\sum_{k=1}^{m}(y_{ijk} - \beta_i M_k)^2 + \sum_{k=1}^{m}(\beta_i M_k - \mu_{Y/M=M_k})^2\right] \qquad 3.50$$

şeklinde elde edilir. Burada *i,* kalite karakteristiği *(i:1,...,p) j*, deneme *(j=1,...,n),* ve *k*, sinyal seviyesi *(k:1,...,m)*' dir.

Böylece sinyali, M_k değerinde sabitleyerek y_{ijk} şans değişkeninin dağılımı incelenmiş ve bu dağılıma göre ortalama kalite kaybı elde edilmiştir. Bu çalışmada, çoklu dinamik kalite karakteristikleri için kalite kaybının yukarıda bahsedilen prosedür ve eşitlikler ile incelenmesini önermekteyiz. Bununla ilgili bir uygulama bir sonraki bölümde gösterilmektedir.

Bölüm 4

UYGULAMA

Bu bölümde Wu ve Yeh (2005)' te ısıtıcı devreye ilişkin kullanılan veriler Koşullu Yöntem için yeniden incelenerek analiz sonuçları elde edilecek ve yorumlanacaktır.

4.1 Problemin Tanımlanması

Belirli bir hedef sıcaklıkta ısı girdisini kontrol etmek için ısıtıcıyı ON veya OFF konumuna getiren bir devre ele alınmıştır. Termistör rezistansı R_T, sıcaklık artarken azalmaktadır. Sıcaklık belirli bir değere yükseldiğinde rezistans R_T eşik değerinin altına düşer ve OFF olur. Bu durumda yükselticinin terminal1'i ve terminal 2' si arasındaki voltaj farkı da yeterince büyük ve negatif olmaktadır. Röle bu durumda ısıtıcıyı OFF konumuna getirmek için hareket etmektedir. Benzer şekilde sıcaklık belirli bir değere düştüğünde rezistans R_T eşik değerinin üstüne çıkar ve ON olur. Terminal 1 ve terminal 2 arasındaki fark büyük ve pozitif olur. Bu durumda röle ısıtıcıyı ON konumuna getirmek üzere hareket eder.

Isıtıcı ON olduğunda eşik rezistansı $R_{T\text{-}ON}$, OFF olduğunda eşik rezistansı $R_{T\text{-}OFF}$ olmak üzere $R_{T\text{-}ON}$ ve $R_{T\text{-}OFF}$ kalite karakteristikleri olarak seçilmiştir. Matematiksel fonksiyonları aşağıda verilmektedir.

$$R_{T-ON} = \frac{R_3 R_2 (E_z R_4 + E_0 R_1)}{R_1 (E_z R_2 + E_z R_4 - E_0 R_2)}$$

$$R_{T-OFF} = \frac{R_3 R_2 R_4}{R_1 (R_2 + R_4)}$$

Sıcaklık kontrol devresinde dört kontrol faktörü ve bir sinyal faktörü vardır. Her biri 3-seviyelidir. A,B ve C faktörleri için seviye 2 başlangıç seviyesidir. Seviye

3 başlangıç seviyesinin 1,5 katı ve seviye 1 başlangıç seviyesinin 1/1,5 katıdır. D faktörü için seviye 3 seviye 2' nin 1,2 katı ve seviye 1 seviye 2' nin 0,8 katıdır.

Tablo 4.1 Sıcaklık Kontrol Devresinin Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A: Rezistans R_1 *(kΩ)*	2,667	4,0	6,0
B: Rezistans R_2 *(kΩ)*	5,333	8,0	12,0
C: Rezistans R_4 *(kΩ)*	26,667	40,0	60,0
D: Nominal voltaj E_z *(kΩ)*	4,8	6,0	7,2

Her biri 3-seviyeli olmak üzere beş gürültü faktörü vardır ve Tablo 4.2' de gösterilmektedir.

Tablo 4.2 Sıcaklık Kontrol Devresinin Gürültü / Sinyal Faktörleri ve Seviyeleri

Faktörler	Ortalama	Tolerans(%)	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A: Rezistans R_1 *(kΩ)*	4,0	5	1,0204	1,0	0,9796
B: Rezistans R_2 *(kΩ)*	8,0	5	1,0204	1,0	0,9796
C: Rezistans R_4 *(kΩ)*	40,0	5	1,0204	1,0	0,9796
D: Voltaj E_0 *(kΩ)*	10	5	1,0204	1,0	0,9796
E: Nominal voltaj E_z *(kΩ)*	6,0	5	1,0204	1,0	0,9796
M: Rezistans R_3 (sinyal faktör)			0,5kΩ	1,0kΩ	1,5kΩ

Gürültü faktörü için kompound yöntemi kullanılmıştır. Kompound seviyeleri aşağıda verilmektedir.

$$(CN)_1 : (R_1)_1 \quad (R_2)_3 \quad (R_4)_1 \quad (E_0)_3 \quad (E_z)_1$$
$$(CN)_2 : (R_1)_2 \quad (R_2)_2 \quad (R_4)_2 \quad (E_0)_2 \quad (E_z)_2$$
$$(CN)_3 : (R_1)_3 \quad (R_2)_1 \quad (R_4)_3 \quad (E_0)_1 \quad (E_z)_3$$

Sinyal faktörün her bir seviyesi için gürültü faktör seviyelerine karşılık gelen $R_{T\text{-}ON}$ ve $R_{T\text{-}OFF}$ değerleri hesaplanabilir. Kontrol faktörlerinin başlangıç değerlerine

göre $R_{T\text{-}ON}$ ve $R_{T\text{-}OFF}$ için dokuz değer Tablo 4.3' te verilmiştir. Kontrol, sinyal ve gürültü faktörlerinin seviyelerine ilişkin $R_{T\text{-}ON}$ ve $R_{T\text{-}OFF}$ için benzetim (simülasyon) verileri sırası ile Tablo 4.4 ve Tablo 4.5' te verilmektedir (Wu&Yeh, 2005).

Tablo 4.3 Başlangıç Koşuluna İlişkin $R_{T\text{-}ON}$ ve $R_{T\text{-}OFF}$ Değerleri

Test no.	R_3 *(sinyal faktör)*	*CN (kompound gürültü faktörü)*	$y_1=R_{T\text{-}ON}$ *(KΩ)*	$y_2=R_{T\text{-}OFF}$ *(KΩ)*
1	0,5	$(CN)_1$	1,2586	0,8054
2	0,5	$(CN)_2$	1,3462	0,8333
3	0,5	$(CN)_3$	1,4439	0,8621
4	1,0	$(CN)_1$	2,5172	1,6108
5	1,0	$(CN)_2$	2,6923	1,6667
6	1,0	$(CN)_3$	2,8878	1,7241
7	1,5	$(CN)_1$	3,7759	2,4161
8	1,5	$(CN)_2$	4,0385	2,5000
9	1,5	$(CN)_3$	4,3317	2,5862

Tablo 4.4 $R_{T\text{-}ON}$ Verileri

Deney	**Faktörler**				***$R_{3(1)}$=0,5kΩ***			***$R_{3(2)}$=1kΩ***			***$R_{3(3)}$=1,5kΩ***		
no	**A**	**B**	**C**	**D**	**$(CN)_1$**	**$(CN)_2$**	**$(CN)_3$**	**$(CN)_1$**	**$(CN)_2$**	**$(CN)_3$**	**$(CN)_1$**	**$(CN)_2$**	**$(CN)_3$**
1	1	1	1	1	1,4258	1,5426	1,6763	2,8516	3,0851	3,3527	4,2774	4,6277	5,0290
2	2	2	2	2	1,2586	1,3462	1,4439	2,5172	2,6923	2,8878	3,7759	4,0385	4,3317
3	3	3	3	3	1,1624	1,2349	1,3147	2,3248	2,4699	2,6294	3,4873	3,7048	3,9441
4	1	1	2	3	1,0919	1,1523	1,2177	2,1839	2,3047	2,4353	3,2758	3,4570	3,6530
5	2	2	3	1	1,2477	1,3194	1,3964	2,4955	2,6387	2,7929	3,7432	3,9581	4,1893
6	3	3	1	2	1,7625	1,9126	2,0833	3,5250	3,8252	4,1666	5,2875	5,7378	6,2449
7	1	2	1	2	2,0194	2,1543	2,3026	4,0388	4,3087	4,6052	6,0582	6,4630	6,9078
8	2	3	2	3	1,8054	1,9112	2,0257	3,6107	3,8224	4,0513	5,4161	5,7337	6,0770
9	3	1	3	1	0,5598	0,5898	0,6218	1,1196	1,1796	1,2435	1,6793	1,7694	1,8653
10	1	3	3	2	2,6149	2,7634	2,9233	5,2298	5,5267	5,8467	7,8447	8,2901	8,7700
11	2	1	1	3	0,8205	0,8653	0,9131	1,6411	1,7305	1,8262	2,4616	2,5958	2,7392
12	3	2	2	1	1,0297	1,1000	1,1771	2,0595	2,2000	2,3542	3,0892	3,3000	3,5313
13	1	2	3	3	1,5933	1,6712	1,7536	3,1867	3,3424	3,5073	4,7800	5,0136	5,2609
14	2	3	1	1	3,2960	3,6883	4,1665	6,5919	7,3766	8,3331	9,8879	11,0649	12,4996
15	3	1	2	2	0,5731	0,6044	0,6377	1,1462	1,2087	1,2755	1,7193	1,8131	1,9132
16	1	3	2	1	3,4383	3,7182	4,0353	6,8767	7,4364	8,0707	10,3150	11,1546	12,1060
17	2	1	3	2	0,7465	0,7834	0,8224	1,4930	1,5667	1,6447	2,2395	2,3501	2,4671
18	3	2	1	3	0,9204	0,9766	1,0375	1,8408	1,9533	2,0751	2,7611	2,9299	3,1126

Tablo 4.5 $R_{T\text{-}OFF}$ Verileri

Deney	Faktörler				$R_{3(1)}$=0,5kΩ			$R_{3(2)}$=1kΩ			$R_{3(3)}$=1,5kΩ		
no	A	B	C	D	$(CN)_1$	$(CN)_2$	$(CN)_3$	$(CN)_1$	$(CN)_2$	$(CN)_3$	$(CN)_1$	$(CN)_2$	$(CN)_3$
1	1	1	1	1	0,8054	0,8333	0,8621	1,6108	1,6667	1,7241	2,4161	2,5000	2,5862
2	2	2	2	2	0,8054	0,8333	0,8621	1,6108	1,6667	1,7241	2,4161	2,5000	2,5862
3	3	3	3	3	0,8054	0,8333	0,8621	1,6108	1,6667	1,7241	2,4161	2,5000	2,5862
4	1	1	2	3	0,8511	0,8824	0,9146	1,7022	1,7647	1,8292	2,5532	2,6471	2,7439
5	2	2	3	1	0,8511	0,8824	0,9146	1,7022	1,7647	1,8292	2,5532	2,6471	2,7439
6	3	3	1	2	0,6704	0,6897	0,7092	1,3408	1,3793	1,4184	2,0112	2,0690	2,1276
7	1	2	1	2	1,1180	1,1538	1,1905	2,2361	2,3077	2,3809	3,3541	3,4615	3,5714
8	2	3	2	3	1,1180	1,1538	1,1905	2,2361	2,3077	2,3809	3,3541	3,4615	3,5714
9	3	1	3	1	0,3931	0,4082	0,4237	0,7863	0,8163	0,8474	1,1794	1,2245	1,2712
10	1	3	3	2	1,8121	1,8750	1,9396	3,6242	3,7500	3,8793	5,4363	5,6250	5,8189
11	2	1	1	3	0,5369	0,5556	0,5747	1,0738	1,1111	1,1494	1,6108	1,6667	1,7241
12	3	2	2	1	0,5369	0,5556	0,5747	1,0738	1,1111	1,1494	1,6108	1,6667	1,7241
13	1	2	3	3	1,2766	1,3235	1,3719	2,5532	2,6471	2,7439	3,8298	3,9706	4,1158
14	2	3	1	1	1,0056	1,0345	1,0638	2,0112	2,0690	2,1276	3,0168	3,1034	3,1915
15	3	1	2	2	0,3783	0,3922	0,4065	0,7565	0,7843	0,8130	1,1348	1,1765	1,2195
16	1	3	2	1	1,6770	1,7308	1,7857	3,3541	3,4615	3,5714	5,0311	5,1923	5,3571
17	2	1	3	2	0,5897	0,6122	0,6356	1,1794	1,2245	1,2712	1,7691	1,8367	1,9068
18	3	2	1	3	0,4969	0,5128	0,5291	0,9938	1,0256	1,0582	1,4907	1,5385	1,5873

4.2 Analiz

$R_{T\text{-}ON}$ ve $R_{T\text{-}OFF}$' un R_3 ile olan ideal ilişkisi orjinden geçmektedir. ON ve OFF için ilişki;

$$R_{T-ON} = \beta_1 R_3 + e_1$$

$$R_{T-OFF} = \beta_2 R_3 + e_2$$

şeklinde ifade edilir. Ortogonal dizininin her bir satırı için β, σ^2 ve η değerleri Koşullu Yöntem prosedürüne uygun olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 4.6' da verilmiştir. Sadece $R_{T\text{-}ON}$ deneme 1 verileri için parametrelerin nasıl elde edildiği aşağıda gösterilmektedir.

$R_{T\text{-}ON}$ için deneme 1 :

Deney	Faktörler				$R_{3(1)}$=0,5kΩ			$R_{3(2)}$=1kΩ			$R_{3(3)}$=1,5kΩ		
no	A	B	C	D	$(CN)_1$	$(CN)_2$	$(CN)_3$	$(CN)_1$	$(CN)_2$	$(CN)_3$	$(CN)_1$	$(CN)_2$	$(CN)_3$
1	1	1	1	1	1,4258	1,5426	1,6763	2,8516	3,0851	3,3527	4,2774	4,6277	5,0290

M_1=0,5, M_2=1, M_3=1,5 olmak üzere y_{11k} yanıtları ile M seviyeleri arasındaki ilişki,

$$y_{11k} = \beta_1 M_k + e_{11k}$$

modeline göre en küçük kareler yöntemi ile tahmin edilir ve

$$y_{11k} = 3{,}096 M_k$$

olarak bulunur. Görüldüğü gibi sinyalin ilk seviyesi ve deneme 1 için β değeri 3.096' dır. Diğer denemeler ve $R_{T\text{-}OFF}$ verileri için de aynı işlemler gerçekleştirilerek duyarlılık katsayıları elde edilir.

$\hat{\sigma}_{1e}^{\,2}$ değerleri, koşullu dağılım eşitliği 3.49 ile elde edilen varyansların ortalamasıdır. Hesaplama prosedürü $R_{T\text{-}ON}$ deneme 1 için gösterilecektir. Bunun için önce deneme 1 için her bir sinyal değerine karşılık gelen gözlemler üzerinden regresyon uygulanır ve,

	A	**B**	**C**	**D**		**M_1=0,5**	
1	1	1	1	1	1,4258	1,5426	1,6763

$E(Y/M=M_1)=3{,}10M_1$, $E(Y/M=0{,}5)=1{,}55$

	A	**B**	**C**	**D**		**M_2=1**	
1	1	1	1	1	2,8516	3,0851	3,3527

$E(Y/M=M_2)=3{,}10M_2$, $E(Y/M=1{,}0)=3{,}10$

	A	**B**	**C**	**D**		**M_3=1,5**	
1	1	1	1	1	4,2774	4,6277	5,0290

$E(Y/M=M_3)=3{,}10M_3$, $E(Y/M=1{,}5)=4{,}65$

olarak elde edilir. Her bir sinyal değeri ve tüm denemeler için elde edilen $E(Y/M_k)$ değerlerinin 18 deneme için ortalaması alınır. Böylece her bir k için $\mu_{Y/M=M_k}$ değeri belirlenmiş olur. Bu değerler, $\mu_{Y/M_1} = 1{,}634$, $\mu_{Y/M_2} = 3{,}268$, $\mu_{Y/M_3} = 4{,}903$ olarak hesaplanmıştır. Sonraki adımda, Koşullu varyansın bileşenleri elde edilir. Deneme 1 ve sinyal $M_1=0{,}5$ için bileşenlerin elde edilmesi aşağıda gösterilmektedir.

$E(Y_{1k} / M = M_k) = 1{,}55$ değeri ve sinyal seviyesi 0.5 için deneme 1 gözlemleri ile eşitlik 3.46 elde edilir. Bu eşitlik birinci bileşendir ve sinyalin ilk seviyesi için 0.0157, ikinci seviyesi için 0,06280 ve üçüncü seviyesi için 0.1414 olarak hesaplanır.

Deneme 1 ve sinyalin ilk seviyesi için hesaplanan $E(Y_{1k} / M = M_k)$ değeri ve sinyalin ilk seviyesi için daha önceden bulunan μ değeri (1,634) ile eşitlik 3.47 elde edilir. Bu değer 0.0070' tir. Sinyalin diğer seviyeleri, deneme 1' göre seviye iki için 0,0282 ve seviye üç için 0.0640 olarak hesaplanır. Birinci ve ikinci bileşenler, bunların toplamları (koşullu varyans) deneme 1 için sinyalin her bir seviyesine göre aşağıda gösterilmektedir.

Sinyal Seviyeleri	*Birinci bileşen*	*İkinci Bileşen*	*Koşullu Varyans*
$M_1=0{,}5$	0,0157	0,0070	0,02277
$M_2=1$	0,06280	0,0282	0,09111
$M_3=1{,}5$	0,1414	0,0640	0,2055

Her bir sinyal seviyesine karşılık gelen varyans değerlerinin ortalaması alınarak R_{T-ON} kalite karakteristiği ve deneme 1 için varyans değeri,

$$\hat{\sigma}_{1e}{}^2 = (0{,}02277 + 0{,}091115 + 0{,}205494)/3 = 0{,}106$$

olarak elde edilmiştir. Diğer denemeler ve R_{T-OFF} verileri için de aynı işlemler gerçekleştirilerek her bir denemeye ait varyans değerleri yukarıda açıklanan prosedür ile elde edilir.. SN oranları (η) ise, elde edilen β ve σ^2 değerleri ile aşağıdaki eşitliğe

(eşitlik 2.10) göre her bir deneme için hesaplanmıştır, sonuçlar Tablo 4.6' da gösterilmektedir.

$$\eta = 10\log\frac{\beta^2}{\sigma_e^{\,2}}$$

Tablo 4.6 Koşullu Yöntem İçin Her bir Denemeye Karşılık β, σ^2 ve η Değerleri

Deney no	**Faktörler**				**$R_{T\text{-}ON}$**			**$R_{T\text{-}OFF}$**		
	A	**B**	**C**	**D**	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\sigma}_{1e}^{\,2}$	η_1	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\sigma}_{2e}^{\,2}$	η_2
1	1	1	1	1	3,096	0,106	19,56	1,667	0,026	20,28
2	2	2	2	2	2,699	0,417	12,42	1,667	0,026	20,28
3	3	3	3	3	2,475	0,771	9,00	1,667	0,026	20,28
4	1	1	2	3	2,308	1,090	6,89	1,765	0,006	27,15
5	2	2	3	1	2,668	0,487	11,64	1,765	0,006	27,15
6	3	3	1	2	3,959	0,501	14,95	1,380	0,216	9,45
7	1	2	1	2	4,392	1,384	11,44	2,308	0,300	12,49
8	2	3	2	3	3,879	0,425	15,49	2,308	0,300	12,49
9	3	1	3	1	1,191	5,093	-5,55	0,817	1,148	-2,35
10	1	3	3	2	5,590	6,078	7,11	3,751	4,417	5,03
11	2	1	1	3	1,751	2,771	0,43	1,111	0,571	3,34
12	3	2	2	1	2,243	1,357	5,69	1,111	0,571	3,34
13	1	2	3	3	3,364	0,038	24,73	2,648	0,837	9,23
14	2	3	1	1	7,816	21,09	4,61	2,069	0,084	17,07
15	3	1	2	2	1,222	4,948	-5,2	0,785	1,223	-2,97
16	1	3	2	1	7,643	20,91	4,46	3,462	3,196	5,74
17	2	1	3	2	1,577	3,372	-1,32	1,225	0,406	5,67
18	3	2	1	3	1,987	2,013	2,92	1,026	0,708	1,72

Tablo 4.6' da elde edilen veriler yardımı ile $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\sigma}_{1e}^{\,2}, \hat{\sigma}_{2e}^{\,2}$ parametre tahminleri en küçük kareler yöntemine göre minitab yardımı ile aşağıdaki modeller elde edilebilir.

$$\hat{\beta}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 A + \hat{b}_2 B + \hat{b}_3 C + \hat{b}_4 D + \hat{b}_5 AB + \hat{b}_6 AC + \hat{b}_7 AD + \hat{b}_8 BC + \hat{b}_9 BD + \hat{b}_{10} CD$$

$$+ \hat{b}_{11} A^2 + \hat{b}_{12} B^2 + \hat{b}_{13} C^2 + \hat{b}_{14} D^2$$

$$\hat{\sigma}_i = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 A + \hat{b}_2 B + \hat{b}_3 C + \hat{b}_4 D + \hat{b}_5 AB + \hat{b}_6 AC + \hat{b}_7 AD + \hat{b}_8 BC + \hat{b}_9 BD + \hat{b}_{10} CD$$

$$+ \hat{b}_{11} A^2 + \hat{b}_{12} B^2 + \hat{b}_{13} C^2 + \hat{b}_{14} D^2$$

Parametre tahmini $\hat{\beta}_i$ ve varyans tahmini $\hat{\sigma}_i^{\,2}$ her bir faktörün seviyelerine göre (her bir deneme için) elde edilmiştir. Tablo 4.7' de sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 4.7 Parametre Tahminleri

	$\hat{\beta}_1$	$Log(\hat{\sigma}_{1e}^{\,2})$	$\hat{\beta}_2$	$Log(\hat{\sigma}_{2e}^{\,2})$
Kesim	3,991	-2,14	1,706	-2,29
A	-0,219	-0,37	-0,781	1,38
B	3,069	0,87	0,451	1,02
C	-2,015	-0,77	0,175	-1,16
D	-1,937	1,69	0,101	-0,29
AB	-0,666	-0,518	-0,225	-1,18
AC	0,132	0,399	-0,067	-0,287
AD	0,133	0,151	0,008	-0,092
BC	-0,408	-0,113	0,094	-0,027
BD	-0,602	-0,686	-0,001	0,178
CD	0,489	-0,126	-0,028	0,165
A^2	0,021	0,136	0,158	0,448
B^2	0,461	0,490	0,101	0,271
C^2	0,274	0,117	-0,009	0,287
D^2	0,364	-0,097	-0,018	-0,001
R^2	0,99	0,88	0,99	0,80

$\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\sigma}_{1e}{}^2, \hat{\sigma}_{2e}{}^2$ parametre tahminlerinin her biri için elde edilen modelde kontrol faktörlerinin, etkileşimlerinin, ikinci derecelerinin 81 mümkün deneme için seviyeleri yerine konularak parametre tahmin değerleri Tablo 4.8' de elde edilmiştir.

Koşullu Yöntem için, kayıp katsayıları K_1 ve K_2' nin eşit ($K_1 = K_2 = 1$), K_{12}' nin sıfır olduğu varsayımı altında, elde edilen parametre değerleri aşağıdaki ortalama kayıp modeli (eşitlik 3.29)' nde yerine konularak 81 mümkün parametre kombinasyonu için kayıp değerleri hesaplanmıştır (bkz. Tablo 4.8). Minimum kayıp için en iyi parametre koşulu $\mathbf{A_1B_3C_3D_1}$ ($R_1 = 2{,}667,\ R_2 = 12,\ R_4 = 60,\ E_z = 4{,}8$) ve **kayıp=0,0004** olarak elde edilmiştir. (bkz. Tablo 4.8).

$$\min_{z \in \Omega} : K_1 \frac{\hat{\sigma}_{1e}{}^2(x)}{\hat{\beta}_1{}^2(x)} + K_2 \frac{\hat{\sigma}_{2e}{}^2(x)}{\hat{\beta}_2{}^2(x)} + \frac{K_{12}}{\hat{\beta}_1 \hat{\beta}_2}\left(\sigma_{12} - \sigma_{1*}\sigma_{2*}\right)(x) \qquad 3.29$$

4.3 Sonuç ve Yorumlar

Optimizasyon problemlerinde amaç SN oranını maksimize etmektir. Böylece kayıp minimum olur. Başlangıç koşuluna göre Koşullu Yöntem $\eta_1 = 34{,}12$, $\eta_2 = 45{,}87$ değerleri ile en yüksek SN oranlarına sahiptir. Ayrıca diğer yöntemlere (Wu&Yeh, Phadke ve Taguchi' nin önerdiği yöntemler) göre elde edilen SN oranlarından daha yüksektir. En önemlisi de diğer yöntemler arasında en düşük kayıp 0,0004 ile Koşullu Yöntem' e aittir. Tablo 4.9' da verilen sonuçlardan da görüldüğü gibi koşullu dağılıma göre elde edilen değer en etkin ve en iyi sonuçlardır. Wu ve Yeh' in, Taguchi ve Phadke' nin yöntemlerine alternatif ve daha etkin olarak sunduğu yaklaşımdan daha da etkin sonuçlar elde edilmiştir.

Taguchi, Phadke ve Wu ve Yeh' e göre optimal parametre koşulları sırası ile $A_1B_1C_3D_3$ $A_2B_1C_3D_3$ ve $A_3B_1C_3D_3$ olarak belirlenmiştir. Koşullu yöntem için ise en iyi parametre koşulu **$A_1B_3C_3D_1$** ($R_1 = 2{,}667$, $R_2 = 12$, $R_4 = 60$, $E_z = 4{,}8$) ve **kayıp=0,0004** olarak elde edilmiştir. (bkz. Tablo 4.8).

Tablo 4.9 SN Oranı ve Kayıp Analizi Karşılaştırması

Yöntem	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\sigma}_{1e}{}^2$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\sigma}_{2e}{}^2$	η_1	η_2	Ortalama kayıp
Taguchi	2,710	0,013	1,846	0,004	27,368	29,235	0,0030
Phadke	2,681	0,008	1,136	0,002	29,405	28,501	0,0026
Wu&Yeh	2,694	0,004	0,741	0,001	32,122	28,274	0,0021
Koşullu Yöntem	**4,181**	**0,007**	**2,423**	**0,0002**	**34,12**	**45,87**	**0,0004**

Koşullu yöntem ile amaç sadece daha düşük ortalama kayıp elde etmek değildir. Varyans hesaplanırken değişkenliğin şartlı (koşullu) varyans yaklaşımı kullanılarak elde edilmesinin daha gerçekçi olduğunu vurgulamaktır.

Tablo 4.8 Analiz Sonuçları

	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	A^2	B^2	C^2	D^2	β1	β2	$\sigma1^2$	$\sigma2^2$	$A\sigma1^2$	$A\sigma2^2$	$\beta1^2$	$\beta2^2$	η1	η2	Kayıp
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,06	1,64	-0,99	-1,67	0,1	0,021	9,37	2,69	19,6	21	0,0188
2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	3	1,86	1,69	-0,16	-1,73	0,7	0,019	3,46	2,84	6,97	21,8	0,2072
3	1	1	1	3	1	1	3	1	3	3	1	1	1	2	-0,42	1,78	0,97	-1,79	9,27	0,016	0,18	3,18	-17,2	22,9	52,798
4	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	1	3	1	1,79	1,76	-1,38	-2,46	0,04	0,003	3,21	3,11	18,9	29,5	0,014
5	1	1	2	2	1	2	2	2	2	3	1	1	3	3	0,59	1,81	-0,55	-2,52	0,28	0,003	0,35	3,27	0,93	30,4	0,8078
6	1	1	2	3	1	2	3	2	3	1	1	1	3	2	-3,16	1,99	0,95	-3,07	8,97	8E-04	9,98	3,97	0,46	36,7	0,8995
7	1	1	3	1	1	3	1	3	1	3	1	1	2	1	-0,29	1,92	-2,13	-4,11	0,01	8E-05	0,08	3,67	10,5	46,8	0,0894
8	1	1	3	2	1	3	2	3	2	1	1	1	2	3	-2,96	2,04	-0,92	-4,67	0,12	2E-05	8,76	4,18	18,6	52,9	0,0139
9	1	1	3	3	1	3	3	3	3	2	1	1	2	2	-5,24	2,14	0,21	-4,72	1,62	2E-05	27,4	4,59	12,3	53,9	0,0591
10	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	3	1	1	5,37	2,18	-0,43	-1,16	0,37	0,069	28,8	4,75	18,9	18,4	0,0274
11	1	2	1	2	2	1	2	2	3	2	1	3	1	3	4,17	2,22	0,41	-1,22	2,55	0,06	17,4	4,95	8,34	19,2	0,1585
12	1	2	1	3	2	1	3	2	1	3	1	3	1	2	3,69	2,33	3,59	-1,81	3882	0,015	13,6	5,41	-24,5	25,5	284,92
13	1	2	2	1	2	2	1	3	2	2	1	3	3	1	4,1	2,3	-0,82	-1,95	0,15	0,011	16,8	5,3	20,5	26,8	0,0111
14	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	3	3	3	2,9	2,35	0,01	-2,01	1,03	0,01	8,42	5,51	9,11	27,5	0,1245
15	1	2	2	3	2	2	3	3	1	1	1	3	3	2	0,95	2,53	3,58	-3,1	3758	8E-04	0,9	6,42	-36,2	39,1	4155,7
16	1	2	3	1	2	3	1	1	2	3	1	3	2	1	3,25	2,18	-1,26	-3,52	0,05	3E-04	10,6	4,77	22,9	41,9	0,0052
17	1	2	3	2	2	3	2	1	3	1	1	3	2	3	0,58	2,31	-0,05	-4,07	0,89	9E-05	0,34	5,35	-4,21	48	2,6342
18	1	2	3	3	2	3	3	1	1	2	1	3	2	2	0,1	2,42	3,13	-4,66	1355	2E-05	0,01	5,83	-51,2	54,3	132849
19	1	3	1	1	3	1	1	3	3	1	1	2	1	1	6,3	2,42	-1,33	-1,47	0,05	0,034	39,7	5,85	29,3	22,3	0,007
20	1	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	1	3	6,9	2,47	1,56	-2,06	36,1	0,009	47,6	6,08	1,2	28,4	0,7603
21	1	3	1	3	3	1	3	3	2	3	1	2	1	2	4,62	2,57	2,68	-2,11	482	0,008	21,4	6,58	-13,5	29,3	22,571
22	1	3	2	1	3	2	1	1	3	2	1	2	3	1	6,26	2,27	-1,43	-2,17	0,04	0,007	39,2	5,16	30,2	28,8	0,0023
23	1	3	2	2	3	2	2	1	1	3	1	2	3	3	6,86	2,32	1,47	-2,76	29,2	0,002	47,1	5,38	2,07	34,9	0,6215
24	1	3	2	3	3	2	3	1	2	1	1	2	3	2	3,11	2,5	2,97	-3,31	931	5E-04	9,68	6,27	-19,8	41,1	96,206
25	**1**	**3**	**3**	**1**	**3**	**3**	**1**	**2**	**3**	**3**	**1**	**2**	**2**	**1**	**4,18**	**2,42**	**-2,17**	**-3,82**	**0,01**	**2E-04**	**17,5**	**5,87**	**34,1**	**45,9**	**0,0004**
26	1	3	3	2	3	3	2	2	1	1	1	2	2	3	3,31	2,56	1,1	-4,91	12,6	1E-05	11	6,53	-0,61	57,2	1,151
27	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	2	2	2	1,03	2,65	2,23	-4,96	168	1E-05	1,06	7,04	-22	58,1	158,3

Tablo 4.8 devamı

	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	A^2	B^2	C^2	D^2	β1	β2	$σ1^2$	$σ2^2$	$Aσ1^2$	$Aσ2^2$	$β1^2$	$β2^2$	η1	η2	Kayıp
28	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	3	1	1	1	2,47	0,87	-1,06	-0,99	0,09	0,102	6,11	0,76	18,5	8,7	0,1491
29	2	1	1	2	2	2	3	1	2	2	3	1	1	3	1,27	0,92	-0,23	-1,05	0,59	0,089	1,62	0,84	4,36	9,73	0,4726
30	2	1	1	3	2	2	1	1	3	3	3	1	1	2	-1,4	0,98	0,45	-0,81	2,8	0,156	1,96	0,97	-1,55	7,92	1,5915
31	2	1	2	1	2	3	2	2	1	2	3	1	3	1	1,2	0,99	-1,45	-1,78	0,04	0,017	1,44	0,99	16,1	17,8	0,0411
32	2	1	2	2	2	3	3	2	2	3	3	1	3	3	0	1,04	-0,62	-1,84	0,24	0,014	0	1,08	-53,8	18,7	239883
33	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	3	1	3	2	-4,14	1,19	0,43	-2,09	2,71	0,008	17,1	1,42	8,01	22,4	0,1639
34	2	1	3	1	2	1	2	3	1	3	3	1	2	1	-1,27	1,45	-3,4	-2,53	0	0,003	1,61	2,09	36	28,5	0,0016
35	2	1	3	2	2	1	3	3	2	1	3	1	2	3	-3,94	1,57	-2,19	-3,09	0,01	8E-04	15,5	2,48	33,8	34,8	0,0008
36	2	1	3	3	2	1	1	3	3	2	3	1	2	2	-6,61	1,64	-1,51	-2,84	0,03	0,001	43,7	2,7	31,5	32,8	0,0012
37	2	2	1	1	3	2	2	2	2	1	3	3	1	1	4,78	1,41	-0,5	-0,48	0,32	0,329	22,9	1,99	18,6	7,81	0,1795
38	2	2	1	2	3	2	3	2	3	2	3	3	1	3	3,58	1,45	0,34	-0,54	2,17	0,287	12,8	2,11	7,72	8,67	0,3048
39	2	2	1	3	3	2	1	2	1	3	3	3	1	2	2,71	1,53	3,07	-0,83	1172	0,147	7,35	2,33	-22	12	159,56
40	2	2	2	1	3	3	2	3	2	2	3	3	3	1	3,51	1,53	-0,89	-1,27	0,13	0,053	12,3	2,35	19,8	16,5	0,0331
41	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2,31	1,58	-0,06	-1,33	0,88	0,046	5,34	2,49	7,84	17,3	0,1832
42	2	2	2	3	3	3	1	3	1	1	3	3	3	2	-0,03	1,73	3,06	-2,12	1135	0,008	0	3,01	-61,3	26	1E+06
43	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	3	3	2	1	2,27	1,71	-2,53	-1,94	0	0,012	5,16	2,94	32,5	24	0,0045
44	2	2	3	2	3	1	3	1	3	1	3	3	2	3	-0,4	1,84	-1,32	-2,49	0,05	0,003	0,16	3,4	5,23	30,2	0,3009
45	2	2	3	3	3	1	1	1	1	2	3	3	2	2	-1,27	1,92	1,41	-2,78	25,8	0,002	1,61	3,67	-12,1	33,4	16,036
46	2	3	1	1	1	2	2	3	3	1	3	2	1	1	7,72	2,25	0,1	2,82	1,25	653,1	59,6	5,05	16,8	-21,1	129,26
47	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	3	2	1	3	8,32	2,3	2,99	2,22	973	166,7	69,2	5,27	-11,5	-15	45,676
48	2	3	1	3	1	2	1	3	2	3	3	2	1	2	5,65	2,37	3,66	2,47	4603	292,4	31,9	5,59	-21,6	-17,2	196,41
49	2	3	2	1	1	3	2	1	3	2	3	2	3	1	7,68	2,1	0	2,11	1,01	130	59	4,42	17,7	-14,7	29,443
50	2	3	2	2	1	3	3	1	1	3	3	2	3	3	8,28	2,15	2,9	1,52	787	33,19	68,6	4,62	-10,6	-8,56	18,657
51	2	3	2	3	1	3	1	1	2	1	3	2	3	2	4,14	2,3	3,95	1,27	8892	18,62	17,1	5,3	-27,1	-5,45	522,06
52	2	3	3	1	1	1	2	2	3	3	3	2	2	1	5,21	2,55	-1,94	1,36	0,01	23,01	27,2	6,52	33,7	-5,48	3,5314
53	2	3	3	2	1	1	3	2	1	1	3	2	2	3	4,34	2,69	1,33	0,27	21,4	1,879	18,8	7,21	-0,56	5,84	1,3978
54	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	2	2	2	1,67	2,75	2,01	0,52	101	3,296	2,79	7,58	-15,6	3,62	36,746
55	3	1	1	1	3	3	3	1	1	1	2	1	1	1	1,82	-0,38	-1,55	-1,66	0,03	0,022	3,32	0,14	20,7	8,21	0,1596
56	3	1	1	2	3	3	1	1	2	2	2	1	1	3	0,23	-0,37	-1,17	-1,42	0,07	0,038	0,05	0,13	-1,05	5,45	1,5582

Tablo 4.8 devamı

	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	A^2	B^2	C^2	D^2	β1	β2	$\sigma1^2$	$\sigma2^2$	$A\sigma1^2$	$A\sigma2^2$	$\beta1^2$	$\beta2^2$	η1	η2	Kayıp
57	3	1	1	3	3	3	2	1	3	3	2	1	1	2	-2,05	-0,27	-0,04	-1,48	0,91	0,033	4,2	0,07	6,66	3,26	0,6881
58	3	1	2	1	3	1	3	2	1	2	2	1	3	1	0,16	0,04	-3,14	-1,55	0	0,028	0,03	0	15,6	-11,6	14,519
59	3	1	2	2	3	1	1	2	2	3	2	1	3	3	-1,43	0,06	-2,76	-1,31	0	0,049	2,04	0	30,7	-11,5	14,039
60	3	1	2	3	3	1	2	2	3	1	2	1	3	2	-5,18	0,24	-1,26	-1,86	0,06	0,014	26,8	0,06	26,9	6,3	0,2367
61	3	1	3	1	3	2	3	3	1	3	2	1	2	1	-1,92	0,2	-3,89	-3,2	0	6E-04	3,68	0,04	44,5	17,8	0,0165
62	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	2	1	2	3	-4,98	0,29	-3,13	-3,46	0	3E-04	24,8	0,09	45,2	23,9	0,0041
63	3	1	3	3	3	2	2	3	3	2	2	1	2	2	-7,26	0,39	-2	-3,51	0,01	3E-04	52,7	0,15	37,2	27	0,0022
64	3	2	1	1	1	3	3	2	2	1	2	3	1	1	6,14	0,76	0,51	2,45	3,25	279,9	37,7	0,58	10,6	-26,9	485,95
65	3	2	1	2	1	3	1	2	3	2	2	3	1	3	4,55	0,77	0,9	2,69	7,87	487,5	20,7	0,6	4,2	-29,1	814,18
66	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	2	3	1	2	4,07	0,88	4,08	2,1	1199	125,3	16,6	0,77	-28,6	-22,1	887,07
67	3	2	2	1	1	1	3	3	2	2	2	3	3	1	4,48	1,18	-1,08	2,56	0,08	359,7	20,1	1,4	23,8	-24,1	257,06
68	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	2	3	3	3	2,89	1,2	-0,7	2,8	0,2	626,6	8,36	1,44	16,2	-26,4	436,63
69	3	2	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	3	2	0,94	1,38	2,87	1,71	733	51,52	0,89	1,92	-29,2	-14,3	854,5
70	3	2	3	1	1	2	3	1	2	3	2	3	2	1	3,63	1,06	-1,52	0,99	0,03	9,863	13,2	1,13	26,4	-9,4	8,7143
71	3	2	3	2	1	2	1	1	3	1	2	3	2	3	0,57	1,16	-0,76	0,74	0,17	5,495	0,33	1,35	2,74	-6,09	4,5947
72	3	2	3	3	1	2	2	1	1	2	2	3	2	2	0,09	1,27	2,42	0,15	264	1,413	0,01	1,6	-45	0,54	31910
73	3	3	1	1	2	3	3	3	3	1	2	2	1	1	7,07	1	-0,39	2,15	0,4	139,6	50	1	20,9	-21,5	140,21
74	3	3	1	2	2	3	1	3	1	2	2	2	1	3	7,28	1,02	2,05	1,85	112	71,12	53	1,03	-3,24	-18,4	71,006
75	3	3	1	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	2	5	1,12	3,17	1,8	1489	62,52	25	1,24	-17,7	-17	109,84
76	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	2	2	3	1	6,64	1,15	-1,69	2,34	0,02	220,8	44,1	1,33	33,3	-22,2	166,38
77	3	3	2	2	2	1	1	1	1	3	2	2	3	3	6,85	1,17	0,76	2,05	5,7	112,5	46,9	1,37	9,16	-19,1	82,275
78	3	3	2	3	2	1	2	1	2	1	2	2	3	2	3,1	1,35	2,26	1,5	182	31,62	9,62	1,83	-12,8	-12,4	36,154
79	3	3	3	1	2	2	3	2	3	3	2	2	2	1	4,56	1,3	-2,43	0,69	0	4,92	20,8	1,7	37,5	-4,62	2,8983
80	3	3	3	2	2	2	1	2	1	1	2	2	2	3	3,3	1,41	0,39	-0,1	2,46	0,802	10,9	1,97	6,46	3,91	0,6319
81	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1,02	1,5	1,52	-0,15	32,8	0,705	1,04	2,26	-15	5,06	31,785

$A\sigma_i^2$: Antilog σ_i^2

KAYNAKLAR

Antony, J. ve Antony, F.J. (2001) "Teaching the Taguchi Method To Industrial Engineers" *Work Study (MCB University Pres),* volume. 50, No.4, 141-149

Antony, J. (2001) "Simultaneous Optimisation of Multiple Quality Characteristics in Manufacturing Processes Using Taguchi' s Quality Loss function" *Int.J.Adv.Manuf.Technol,* 17: 134-138

Byrne, D.M. ve Taguchi, S. (1988) "The Taguchi Approach To Parameter Design"

Chen,L.H. (1997) "Designing robust products with multiple quality characteristics" *Computers Operations Research*,24, 937-944

Dehnad,K.(1989), "Quality Control, Robust Design and Taguchi Method", W*adswort and Brooks/Cole, California.*

Engel, J ve Huele, A.F (1996)"Taguchi Parameter Design By Second-Order Response Surfaces" *Quality and Reliability Engineering International*, vol.12, 95-100

Elsayed,E.A ve Chen,A. (1993)"Optimal levels of process parameters for products with multiple characteristics*", International Journal of Production Research,* 31, 1117-1132

Kackar,R.N (1985), "Off-Line Quality Control Parameter Design and The Taguchi Methods" *Journal of Quality Technology,* 17, 176-188

Kackar,R.N (1986), "Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary," Quality Progress,December,21-29.

Kackar,R.N ve Shoemaker,A.S.(1986) "Robust Design:A Cost-Effective Method for improving Manucafturing Processes" *AT&T Technical Jornual*, 65

Logothetis,N ve Haigh,A. (1988) "Characterizing and optimizing multiresponse processes by Taguchi method" *Quality and Reliability Engineering International*, vol.4, 159-169

Leon, R.V., Shoemaker,A.C. ve Kackar, R.N.(1987) "Performans Measures Independent of Adjustment" *Techonometrics, 29,253-285.*

Miller, A. Ve Wu, C.F.J (1996-1) "Parameter Design for Signal-Response Systems:A Different Look at Taguchi' s Dynamic Parameter Design" *Statistical Science,* vol.11, No.2, 122-136

Miller, A. ve Wu, C.F (1996-2) "Commentary on Taguchi' s Parameter Design With Dynamic Characteristics" *Quality and Reliability Engineering International*, vol.12, 75-78

Mood,A.M , Graybill, F.A. ve Boes,D.C (1974) "Introduction to the Theory of Statistics" *Mc Graw Hill*.

Phadke,M.S. (1989) "Quality Engineering Using Robust Design" *Prentice Hall, Englewood Cliffs.*

Pignatiello,J.J(1993) "Strategies for robust multiresponse quality engineering", *IIE Transactions,*25, 5-15

Ross, P.J (1988) "Taguchi Techniques For Quality Engineering" *Mc Graw Hill*.

Roy R.K.(1990) "A Primer on the Taguchi Method, *Van Nostrand Reinhold,NewYork.*

Su,C.T ve Tong,L.I.(1997) "Multi-response robust design by principal component analysis" *Total Quality Management,*8, 409-416

Şehirlioğlu,A.K.(1997)"Ürün ve Süreç Kalitesini İyileştirmede Kullanılan İstatistiksel Modelleme Teknikleri Üzerine Bir Araştırma", *Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.*

Taguchi,G. ve Phadke, M.S.(1984),"Quality Engineering Through Design Optimization," Globecom 84 Meeting, IEEE Communications Society, November, Atlanta, 1106-1113.

Taguchi, G. (1991) “Taguchi Methods: S/N Ratio for Quality Evaluation” *Quality Engineering Series*, volume.3,ASI, Michigan.

Tong,L.I ve Su,C.T (1997) “ Optimizing multi-response problems in the Taguchi method by Fuzzy multiple attribute decision making” *Quality and Reliability Engineering International*, vol:13, 25-34

Tong,L.I ve Su,C.T, Wang (1997) “ The optimization of multi-response problems in the Taguchi method” *International Journal of Quality and Reliability Management,* 14, 367-380

Tsui, K.L. (1999) “Modeling and Analysis of Dynamic Robust Design Experiments” *IIE Transactions* 31, 1113-1122

Tsui, K.L. (1999) “Robust design optimization for multiple characteristics problems” *International Journal of Production Research*,37, 433-445

Vining,G.G. (1998) “A compromise approach to multiresponse optimization”, *Journal of Quality Technology*,30, 309-313

Wasserman, G.S. (1996) “Parameter Design With Dynamic Characteristics: A Regression Perspective” *Quality and Reliability Engineering International*, Vol:12, 113-117

Wu, F.C., Hamada, M. (2000) “Experiments, Planning and Analysis and Parameter Design Optimization”*Wiley*

Wu, F.C. (2002) “Optimisation of Multiple Quality Characteristics Based on Percentage Reduction of Taguchi’ s Quality Loss” *Int.J.Adv.Manuf.Technol,* 20:749-753

Wu, F.C ve Yeh, C.H. (2005) “Robust Design of Multiple Dynamic Quality Characteristics” *Int.J.Adv.Manuf.Technol*., 25: 579-588

Wu, F.C. (2006) “Sequential Optimization of Parameter and Tolerance Design for multiple Dynamic Quality Characteristics” *International Journal of Production Research, 1-16, preview article.*