

28840

KALITE GELİŞTİRMEDE  
TASARIM ENİYİLEME PROBLEMİNE  
TAGUCHI YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASINDA  
SİSTEMATİK BİR YAKLAŞIM

Cafer ÇELİK

Doktora Tezi

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında

Şubat-1993

KALITE GELİŞTİRMEDE TASARIM ENİYİLEME PROBLEMİNE  
TAGUCHI YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASINDA  
SİSTEMATİK BİR YAKLAŞIM

Cafer Celik

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç.Dr. Nimetullah Burnak

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Subat-1993

Cafer Çelik'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı "Kalite Geliştirmede Tasarım Eniyileme Problemine Taguchi Yöntemlerinin Uygulanmasında Sistematik Bir Yaklaşım" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

.05/04/1993.

öye : Prof.Dr. A. Rıza KAYLAN



öye : Prof.Dr. Musa ŞENEL



öye : Doç.Dr. Nimetullah BURNAK  
(Danışman)



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09. NİSAN. 1993  
gün ve 347-4... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Küstem KAYA

Enstitü Müdürü

## ÖZET

İlgilenilen ürün karakteristiklerindeki değişkenliğin sistematik olarak azaltılması kalite geliştirme olarak adlandırılmaktadır. İmalat ve imalat öncesi olmak üzere iki aşamada yürütülen kalite geliştirme faaliyetlerinden imalat öncesine yönelik olanlar tasarım eniyileme problemi başlığı altında incelenebilir. Erisilebilen kaynaklarda tasarım eniyileme probleminin çözümünde Taguchi yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı gözlenmektedir.

Bu çalışmada, kalite geliştirmede tasarım eniyileme probleminin çözümünde kullanılacak Taguchi yöntemlerinin teorik yapısı ayrıntılı olarak incelendikten sonra, her durumda uygulanabilecek sistematik bir yaklaşım geliştirilmektedir. Yanısıra, Taguchi yöntemlerinde esas alınan sabit etki modelinden hareketle tasarım eniyileme probleminin matematiksel modelinin oluşturularak çözülebilmesi için bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımların, tasarım eniyileme amacıyla, yeni bir gerçek hayat problemine uygulanışları gösterildikten sonra elde edilen sonuçlar değerlendirilmektedir.

### Anahtar Kelimeler

Kalite Geliştirme  
Kalite Güvence Sistemi  
Kalite Mühendisliği  
Parametre Tasarımı  
Taguchi Yöntemleri  
Tasarım eniyileme

## SUMMARY

Reducing systematically the variation of the desired product characteristics is described as quality improvement. Quality improvement activities are carried out in two stages which are named off-line and on-line, respectively. Off-line quality improvement activities can be studied under the title of "the design optimization problem". In the literature, it can be observed that Taguchi methods are widely used in the solution of the design optimization problem.

In this study, after the thorough examination of the theoretical structure of Taguchi methods which are used for the solution of the design optimization problem for quality improvement, a systematic approach is developed, which is valid for all situations. In addition, on the basis of the fixed effect model used in Taguchi methods, an approach is proposed to be able to solve the design optimization problem by establishing the mathematical model. After showing the applicability of the proposed approaches to a new real life problem for the design optimization, the results are evaluated.

### Key Words

Quality Improvement  
Quality Assurance System  
Quality Engineering  
Parameter Design  
Taguchi Methods  
Design Optimization

**TESEKKOR**

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında karşılaştığım bütün problemlerin çözümünde yardımını her zaman hissettiğim Danışman hocam sayın Doç.Dr. Nimetullah Burnak'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Fakülte kaynaklarından yararlanabilmem için hiç bir fedakarlıktan kaçınmayan sayın hocam Prof.Dr. Musa Şenel'e (Anadolu Univ. Müh.-Mim Fak. Dekanı), her konuda yönlendirici önerilerini ve eleştirilerini belirten ve Bölüm kaynaklarından yararlanmamı sağlayan değerli bilim adamı sayın hocam Prof.Dr. İmdat Kara'ya (Anadolu Univ. Müh.-Mim. Fak. Endüstri Müh. Bölüm Başkanı), çok değerli önerilerini ve desteklerini her zaman gördüğüm hocalarım sayın Doç.Dr. A.Ekrem Özkul'a ve sayın Doç.Dr. Nihat Yüzügüllü'ye, uygulamaya olan katkılarından dolayı sayın hocam Doç.Dr. Sabri Çolak'a ve sayın Arş.Gör. Yüksel Abalı'ya teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
TESEKKOR .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. GÜNÜMÜZDE KALİTE ANLAYIŞINDAKİ GELİŞMELER .....	5
2.1 Kaliteye Yaklaşımlar .....	5
2.2 Günümüzdeki Kalite Yönetim Sistemleri ve Gelişim Süreci .....	7
2.2.1 Kalite ve bir işletme fonksiyonu olarak kalite kontrol .....	8
2.2.2 Sistem yaklaşımı anlayışında kalite kontrol .....	9
2.2.3 Kalite anlayışında son gelişmeler ve yeni kavramlar .....	11
2.3 Kalite Güvence Sisteminin Kapsamı ve Amaçları ..	14
2.4 Kalite Güvence Sisteminin Bileşenleri .....	15
2.5 Kalite, Kalite Değişkenliği ve Kalite Güvence Sistemi İlişkisi .....	17
2.5.1 Kalite değişkenliği .....	19
2.5.2 İmalat öncesi kalite güvencesi yöntemleri- nin kapsamı ve amaçları .....	20
2.5.3 İmalat aşaması Kalite Güvencesi yöntemle- rinin kapsamı ve amaçları .....	22
2.5.4 Uygulamada karşılaşılan sorunlar ve çözüm yolları .....	23
3. KALİTE GÜVENCE SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASINDA TAGUCHİ YÖNTEMLERİ .....	24
3.1 Taguchi'nin Kalite Anlayışı .....	25
3.2 Kalite Karakteristiği ve Performans Değişkenliği İlişkisi .....	29

**İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)**

3.3 Kalite Kayıp Fonksiyonu (kkf) .....	30
3.4 Ürün Geliştirme Çevrimi .....	37
3.5 Parametre Tasarımı .....	39
3.5.1 Tasarım eniyileme problemi .....	40
3.5.2 Parametre tasarımının ilkeleri .....	44
3.5.3 Parametre tasarım deneyinin genel yapısı ..	46
3.5.4 Parametre Tasarım Problemlerinin Sınıflandırılması .....	48
3.6 Tolerans Tasarımı .....	50
3.7 Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Etkin Yaklaşımın Belirlenmesi .....	51
3.7.1 Deneysel çalışmalarda kullanılabilir yaklaşımlar .....	51
3.7.2 Ortogonal diziler (OD) .....	52
3.8 Uygun Ortogonal Dizi(ler) Seçimi ve Değişkenlerin Yerleştirilmesi .....	55
3.8.1 Uygun ortogonal dizi(ler) seçimi .....	56
3.8.2 Doğrusal grafikler .....	57
3.9 Performans İstatistiği .....	59
3.10 Performans Karakteristiği Üzerinde Kontrol Edilebilen Değişkenlerin Etkilerinin Belirlenmesi.....	61
3.10.1 Varyans analizi .....	62
3.10.2 Hipotez testleri ve katkı yüzdesi .....	63
3.11 Doğrulama Deneyi .....	64
3.12 Taguchi Yöntemleri ile Klasik Deney Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması .....	65
4. TAGUCHI YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI .....	68
4.1 Taguchi Yöntemlerinin Uygulanmasında Temel İşlemlere Dayalı Sistemik Bir Yaklaşım .....	68
4.1.1 Problemin belirlenmesi ve ekibin oluşturulması .....	70
4.1.2 Performans karakteristiklerinin ve ölçüm sistemlerinin belirlenmesi .....	71
4.1.3 Performans karakteristiklerini etkileyen değişkenlerin belirlenmesi .....	71
4.1.4 Hazırlık deneylerinin yapılması .....	72
4.1.5 Kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi	72



## İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)

4.1.6	İncelenecek bileşik etkilerin belirlenmesi .....	73
4.1.7	Uygun ortogonal dizi(ler)in seçilmesi ve değişkenlerin yerleştirilmesi .....	74
4.1.8	Kayıp fonksiyonları ve performans istatistiklerinin belirlenmesi .....	75
4.1.9	Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi .....	75
4.1.10	Veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin eniyi değerlerinin belirlenmesi .....	76
4.1.11	Sonuçların test edilmesi .....	78
4.1.12	Tolerans tasarımı .....	80
4.1.13	Değerlendirme, yürütme ve izleme .....	81
4.2	Taguchi Yöntemlerinin Uygulanmasında Matematiksel Model Yaklaşımı .....	82
4.2.1	Matematiksel model gereksinimi .....	82
4.2.2	Matematiksel modelin kurulabilirliği .....	82
4.2.3	Matematiksel model ve varsayımları .....	84
4.2.4	Matematiksel modelin oluşturulması .....	85
4.3	İki Yaklaşımın Karşılaştırılması .....	87
5.	TAGUCHI YÖNTEMLERİNİN BİR ÖRETİM SÜRECİNDE UYGULANMASI .....	89
5.1	Seçilen Üretim Süreci: Fosforik Asit Üretimi ve Kullanılan Yöntemler .....	91
5.2	Taguchi Yöntemlerinin Fosforik Asit Üretim Sürecine Uygulanması .....	93
5.2.1	Problemin belirlenmesi ve ekibin oluşturulması .....	94
5.2.2	Performans karakteristikleri ve ölçüm sistemlerinin belirlenmesi .....	94
5.2.3	Performans karakteristiklerini etkileyen değişkenlerin belirlenmesi .....	95
5.2.4	Hazırlık Deneyleri .....	95
5.2.5	Kontrol edilebilen ve edilemeyen değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi .	95
5.2.6	İncelenecek bileşik etkilerin belirlenmesi .....	96
5.2.7	Uygun ortogonal dizi seçimi ve değişkenlerin yerleştirilmesi .....	96
5.2.8	Kayıp fonksiyonları ve performans istatistiklerinin seçilmesi .....	97

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam)

5.2.9	Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi .....	98
5.2.10	Veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin eniyi değerlerinin belirlenmesi	98
5.2.11	Sonuçların test edilmesi .....	104
5.2.12	Tolerans tasarımı .....	104
5.2.13	Sonuçların değerlendirilmesi, yürütülmesi ve gelişmelerin izlenmesi .....	104
5.3	Tasarım Eniyileme Problemine Matematiksel Modelin Uygulanması ve Etkinliği .....	105
5.3.1	Matematiksel modelin fosforik asit üretim sürecinde uygulanması .....	105
5.3.2	Matematiksel modelin etkinliği ve diğer çözümlerle karşılaştırılması .....	107
5.4	İki Yaklaşımın Uygulamalarının Karşılaştırılması .....	109
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	110
	KAYNAKLAR DİZİNİ .....	113
<b>EKLER</b>		
1.	Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Ortogonal Diziler ve Doğrusal Grafikleri	
2.	Ortalama Verileri Üzerine Düzenlenen Varyans Analizi Tabloları	
3.	Omega Dönüşüm Tablosu	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Etkinlik, yeterlik derecesi, kalite, verimlilik ve kârlılık arasındaki ilişki .....	1
2.1 Kalite-maliyet değerlendirilmesi .....	6
2.2 Kalite anlayışlarına göre KG faaliyetlerinin yoğunlaştığı alanlar .....	6
2.3 KGS'nin elemanları ve çıktıları .....	16
2.4 KG yöntemlerinin uygulanmasıyla kalite değişkenliğinin sistematik olarak azaltılması .....	17
2.5 İmalat öncesi ve imalat aşaması KG yöntemleri arasındaki ilişkiler .....	20
3.1 Taguchi yöntemlerinin mantığı .....	27
3.2 Kalite çevrimi .....	28
3.3 Geleneksel (adım) kayıp fonksiyonu .....	32
3.4 Modern (sürekli) kayıp fonksiyonu .....	33
3.5 "Daha küçük daha iyi" kayıp fonksiyonu .....	35
3.6 "Daha büyük daha iyi" kayıp fonksiyonu .....	36
3.7 Bir ürünün (sürecin) blok diyagramı .....	41
3.8 Taguchi'nin parametre tasarım deneyi modeli .....	47
3.9 Statik parametre tasarım probleminin blok diyagramı .....	48
3.10 Dinamik parametre tasarım probleminin blok diyagramı .....	49
3.11 Kontrol probleminin blok diyagramı .....	49
4.1 Taguchi yöntemlerinin uygulanmasında temel işlemlere dayalı sistematik bir yaklaşımın akış şeması	69
5.1 Deney düzeneği .....	92
5.2 a)Problem grafiği, b) $L_{25}(5^4)$ 'nin değiştirilmiş standart doğrusal grafiği .....	97
5.3 KD'in performans istatistiği "fosforik asit miktarı" üzerindeki etkileri .....	101
5.4 KD'in performans istatistiği "kalsiyum miktarı" üzerindeki etkileri .....	101

## CİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Değişkenlik kaynaklarına karşı alınabilecek önlemlerin ürün geliştirme aşamalarına göre dağılımı .....	38
5.1 KD ve ilgilenilen seviyeleri .....	96
5.2 Deneysel sonuçlar ve performans istatistikleri	99
5.3 Performans istatistiği "fosforik asit miktarı" verileri üzerine yapılan varyans analizi .....	100
5.4 Performans istatistiği "kalsiyum miktarı" verileri üzerine yapılan varyans analizi .....	100
5.5 Eniyi değişken-seviye birleşimi seçimi .....	102
5.6 Beklenen eniyi performans istatistiği değerleri ve güven aralıkları .....	104
5.7 Doğrulama deneyi sonuçları .....	104
5.8 Bazı deneysel çalışmalara matematiksel model yaklaşımının uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar	108

## SIMGELER VE KISALTMALAR DIZINI

Simgeler	Açıklama
A	Tüketicinin eline geçmiş hatalı bir ürünü onarma ve değiştirme maliyeti
$a_j$	Kontrol edilebilen j. değişkenin alt sınırı
$b_j$	Kontrol edilebilen j. değişkenin üst sınırı
$e_i$	i. deneyin hatası
B	Beklenen değer işlemi
$f(y)$	Y'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F_{\alpha;v_1,v_2}$	$v_1, v_2$ serbestlik dereceleri ve $\alpha$ anlam düzeyine göre F tablosu değeri
k	Hedeften sapan bir ürünü tekrar hedefe getirebilmek için imalatçının alacağı önlemlerin maliyeti
$l(Y)$	Y'nin kayıp fonksiyonu
m	$\mu$ 'nün kestiriminde kullanılan değişkenlerin serbestlik dereceleri toplamı
M	İşaret değişkenleri
$MS_e$	Hata kareler ortalaması
N	Toplam deney sayısı
$n_t$	Doğrulama deneyindeki tekrar sayısı
p	Hatalı üretim olasılığı
P	Olasılık işlemi
SS	Ortalamadan sapmaların kareler toplamı
$s^2$	Y'nin varyansı
$\bar{T}_i$	i. kısıt fonksiyonunun ortalama değeri
Y	Performans karakteristiği
$\bar{Y}$	Performans karakteristiğinin ortalaması
W	Kontrol edilemeyen değişkenler
X	Kontrol edilebilen değişkenler
$x_d$	Kontrol değişkenleri
$x_m$	Düzeltilme değişkenleri
$x_o$	Etkisiz değişkenler
Z	Performans istatistiği
$\bar{Z}$	Amaç fonksiyonunun ortalama değeri

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

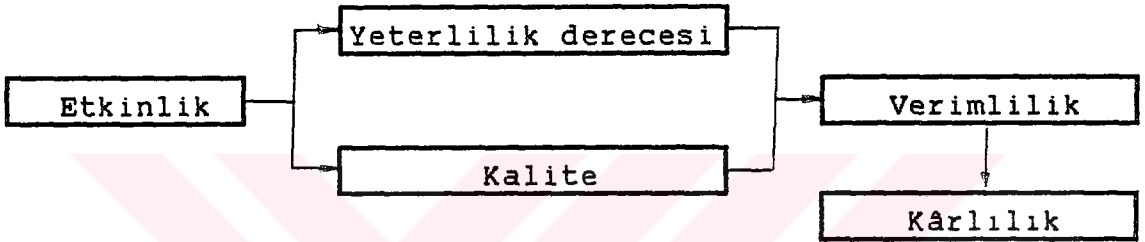
$\mu$	Deneylerin ortalama etkisi
$\tau$	Performans karakteristiğinin hedef değeri
$\Delta$	Performans karakteristiğinin toleransı

Kısaltmalar

ASI	American supplier institute
ASL	Alt spesifikasyon limiti
BDİ	Bilgisayar destekli imalat
BDK	Bilgisayar destekli kalite
BDT	Bilgisayar destekli tasarım
BDTi	Bilgisayar destekli tasarım ve imalat
DT	Deney tasarımı
ISK	İstatistiksel süreç kontrolü
ISO	Uluslararası standardizasyon kuruluşu
KD	Kontrol edilebilen değişkenler
KED	Kontrol edilemeyen değişkenler
KFY	Kalite fonksiyonu yayılımı
KG	Kalite güvencesi
KGS	Kalite güvence sistemi
KK	Kalite kontrolü
kkf	Kalite kayıp fonksiyonu
KÖ	Kabul örnekleme
OD	Ortogonal diziler
SD	Serbestlik derecesi
TY	Taguchi yöntemleri
ÖSL	Üst spesifikasyon limiti

## 1. GİRİŞ

Verimlilik, genelde, birim girdi başına elde edilen çıktı düzeyi olarak tanımlanmaktadır. İşgücü, hammadde, makina, teknoloji ve sermaye işletmenin kullandığı girdileri, elde edilen ürün/hizmet de çıktıları oluşturur. Bir işletmenin çıktısı kalite ve miktar yönlü ölçülebilmektedir. Bu nedenle verimlilik, sadece girdi ile çıktı arasındaki ilişkiyi değil, aynı zamanda etkinlik (effectiveness), kalite ve yeterlilik derecesi (efficiency) arasındaki ilişkiyi de içeren kuvvetli bir performans (başarım) ölçütüdür. Bu ilişki Şekil 1.1'deki gibi şematize edilebilir (Swaim and Sink, 1985).



Şekil 1.1 Etkinlik, yeterlilik derecesi, kalite, verimlilik ve kârlılık arasındaki ilişki

İşletmelerin performansını belirleyen önemli ölçütlerden biri etkinliktir. Etkinlik işletme faaliyetlerinin amacına ulaşma derecesi olarak tanımlanır (Aldemir, 1985; Swaim and Sink, 1985; Seçim, 1987). Teknik düzeyde ise beklenen ile gerçekleşen durum arasındaki ilişkiyi tanımlayan yeterlilik derecesi önem kazanmaktadır. Bir işletmenin ürünlerinin/hizmetlerinin kalitesi veya ulaşılan kalite düzeyi de performansının önemli bir bileşenidir. Bununla birlikte işletmenin, tüketicilerin miktar ve kalite yönlü taleplerini karşılayabilme yeteneği etkinliğinin bir ölçüsü olarak kabul edildiğinden, işletmenin etkinliği, büyük ölçüde o işletmenin kalite düzeyi ve yeterliliğini de içermektedir (Tersine, 1985). Diğer taraftan kârlılık, işletmenin belirli bir dönemde elde ettiği gelir üzerine kurulduğu için, satış tutarı ve işletmenin satış çabalarının bir sonucudur. İşletme faaliyetlerinin sürekliliği ilkesi gözönüne alındığında, bir işletmenin uzun dönemdeki başarı derecesini belirlemede en önemli ölçüt, kârlılık yerine verimliliğin artışı olmalıdır (Doğan, 1987).

Verimliliğin artırılması ve bu artışın sürekli kılınabilmesi, işletmenin rekabet edebilme, varlığını sürdürme ve

bağlı olarak gelişmesini de devam ettirebilmesi için temel bir unsurdur. Son yıllarda kalite kavramı gelişmiş ülkelerde verimliliği artırmada etkili bir araç olarak kullanılmaktadır<sup>2</sup>. Esasında bilinçli bir kalite anlayışı ya da diğer bir deyişle, kalitenin tasarım ve üretim (imalat) aşamasında oluşturulmasıyla zaman, para, işgücü ve enerji gibi girdilerden önemli ölçüde tasarruf sağlanır. İşletmenin sağladığı bu tasarrufların büyüklüğü ölçüsünde verimliliği de artacaktır. Ancak, bütün bunlar işletmenin kalite anlayışı ve bu anlayışı yasatabilmek için kullandığı kalite sistemi ile yakından ilgilidir.

Erisilebilen kaynaklarda kalite ile ilgili kavramlar geleneksel ve modern (günümüz) anlayış açısından incelenmiştir. Geleneksel yaklaşımda ürün spesifikasyonlarına uygun üretim yapmak, modern yaklaşımda ise ürünün hedef değeri civarında üretim yapmak amaçlanır. Geleneksel kalite anlayışının statik bir yöntem olarak yeterli olmadığı açığa çıkmış bulunmaktadır. Her an hedefe biraz daha yaklaşmak için çaba harcayan günümüz kalite anlayışında kalite güvencesi (quality assurance-KG) kavramı ile tasarım, üretim ve dağıtım işlemleri yanında ürünlerin ekonomik ömürleri içerisinde dayanıklılığını ve servis hizmetlerini daima daha iyiye yönlendirecek dinamik bir araç olarak ele alınmaktadır. Kalite güvence sistemi (quality assurance system-KGS) ile de bütün faaliyetlerin tek bir hedefe, yani iyi belirlenmiş tüketici gereksinimlerini karşılamaya yönelik olduğu ifade edilir. Cappis'e (1987) göre, tüketici ve onun gereksinimleri, işletme faaliyetinin hem başlangıcı, hem de sonucudur.

Çalışmanın izleyen kesimlerinde kalite ile ilgili değerlendirmeler modern kalite anlayışı doğrultusunda incelenecektir. Sırası geldiğinde her iki anlayış arasındaki farklılıklara da kısaca değinilecektir.

İnsanoğlunun yaşam düzeyinin yükselmesiyle birlikte, tüketici istek ve arayışlarında daha iyiye ve daha kaliteye doğru bir değişim gözlenmektedir. Daha kaliteli ürünü daha ucuza üretmek, yoğun rekabet ortamında pazarda kalabilmenin ön şartıdır. Böylesi bir ortamda pazardaki

---

<sup>2</sup> Kaylan (1991), verimliliğin tanımında; müşterinin beğenisini kazanmış ürünlerin çıktığı, etkin kullanılmış kaynakların da girdi olarak algılanması halinde kalite arttıkça verimliliğin artacağına açıkça görüleceğini belirtmektedir.



değişimlere çok kısa sürede ayak uydurabilmenin yanısıra rakiplerden bir adım önde olmak hedeflenir. Çevresinden etkilenen işletmenin olası değişimlere ayak uydurabilmesi de sürekli kalite geliştirme ile olurludur. Sürekli kalite geliştirme; tüketici beklentilerinin doğru belirlenmesi, beklentilere uygun tasarımın yapılması, tasarıma uygun imalatın gerçekleştirilmesi ve servis hizmetlerinin verilmesi olmak üzere dört ana gruptan oluşan sürekli faaliyetler zinciridir. Zincirdeki her halka ayrı bir öneme sahip olup, birbirini tamamlayan bir yapıdadır. Bununla birlikte, tasarım iyi yapılmadığında imalat aşamasında ne kadar özen gösterilirse gösterilsin ya da servis hizmetleri ne kadar iyi verilirse verilsin, istenilen kalite düzeyini ve ekonomikliği sağlamak mümkün değildir.

Son yıllarda, artan rekabet yönlü baskılara bir çıkış yolu olarak, öncülüğünü Taguchi'nin yaptığı, tasarım aşamasına yönelik faaliyetlerin yoğunlaştığı mevcut çalışmalara bakılarak söylenebilir. Günümüz uygulamalarının daha çok mühendislik bilimlerinde öbekleştirdiği Taguchi yöntemleri (Taguchi methods-TY), araştırma-geliştirme faaliyetlerinin yürütüldüğü bütün bilim (meslek) dallarında karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılabilir potansiyele sahiptir. Ancak, varolan potansiyel kullanılmadığı gibi, potansiyeli harekete geçirecek, her durumda geçerli olabilen, sistematik bir yaklaşımın olmadığı da gözlenmektedir.

İleride ayrıntılı kaynak araştırmasından da görüleceği üzere, TY ile ilgili ilk çalışmanın 1953 yılında Japon İna seramik firmasında gerçekleştirildiği, batı sanayiinin bu yöntemlerle 1980'lerin başında tanıştığı, izleyen yıllarda ise TY'nin benimsendiği ve uygulamaların arttığı söylenebilir. Aynı kaynak araştırmasında baskı devrelerin lehimlenmesinde hurda oranının asgariye indirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmanın (Shina, 1991) en yeni çalışmalardan biri olduğu ve kimya sanayiinde herhangi bir uygulamalı çalışmanın olmadığı gözlenmektedir. Sözü edilen nedenlerle, bir kimyasal süreç olan fosforik asit üretim sürecinin eniyilenmesinde TY'nin kullanıldığı bir deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesinin yararlı olacağı kanısına varılmıştır. Kalite geliştirme ve dolayısıyla da verimliliği artırmanın eniyi göstergeleri ise;

- Toplam maliyetteki azalma,
- Orün güvenilirliğinde sağlanan artış

olarak kabul edilmiştir.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında bu çalışmada, kalite geliştirmede tasarım eniyileme probleminin çözümünde TY etraflıca incelenecektir. İncelemenin bir sonucu olarak; her durumda geçerli olan, farklı meslekten kişilerce kolayca anlaşılabilen, araştırma-geliştirme faaliyetlerinin yürütüldüğü bilim dallarındaki deneysel çalışmaların yapılabilirliğini artıran, uygulamada karşılaşılabilecek sorunları ve çözümlerini ortaya koyabilen sistematik bir yaklaşımın geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, sistematik yaklaşıma bir alternatif olarak, geliştirilmek üzere başlangıç teşkil edecek, matematiksel model yaklaşımı da önerilecektir. Geliştirilen her iki yaklaşımın geçerliliği ve etkinliği TY'nin uygulanmamış olduğu bir gerçek hayat problemi üzerinde gösterilecektir.

Belirtilen genel çerçeve içerisinde ikinci bölümde kalite yaklaşımları, günümüzdeki kalite yönetim sistemleri ve gelişim süreci üzerinde kısaca durulduktan sonra, bugün geniş kabul gören KGS ele alınmaktadır.

KG'nin sağlanmasında TY'nin kullanımı üçüncü bölümde irdelenmektedir. Bu çerçevede, TY'nin işleyiş mantığı ve kullandığı araçlar üzerinde ayrıntılı olarak durulmaktadır.

Dördüncü bölümde uygulamada izlenmesi amacıyla sistematik bir yaklaşım geliştirilmektedir. Bu bölümde ayrıca, tasarım eniyileme probleminin çözümü için bir matematiksel model yaklaşımı da önerilmektedir.

TY'nin bir üretim sürecinde uygulanması beşinci bölümde açıklanmaktadır. Uygulamada, geliştirilen sistematik yaklaşım kullanılarak problemin belirlenmesi, deneyin tasarlanması, verilerin toplanması, işlenmesi ve sonuçların yorumlanması yapılmaktadır. Ayrıca, önerilen matematiksel model yaklaşımı, aynı süreç verilerine uygulanarak tasarım eniyileme probleminin matematiksel modeli oluşturulmakta ve modelin çözümü incelenmektedir.

Altıncı ve son bölümde ise genel bir değerlendirme ile birlikte bu çalışmanın ötesinde yapılabilir araştırmalara ilişkin önerilere yer verilmektedir.

## 2 GONOMOZ KALİTE ANLAYIŞINDAKİ GELİŞMELER

İnsanların topluluk halinde yaşamaya başlaması ile birlikte kalite kavramının gündeme gelmiş olduğu söylenebilir. Tam zamanı bilinmemekle beraber arkeolojik bulgulara göre ilk düzenli kalite kontrol (KK) faaliyetlerinin Mısır piramitlerinin yapımı zamanında gerçekleştirilmiş olabileceği, muayene ve ölçme faaliyetlerini belgeleyen duvar resimleri ve piramitlerin yapımlarındaki kusursuzluk dikkate alınarak söylenmektedir<sup>1</sup> (Banks, 1989; Evans and Lindsay, 1989).

Ancak, kalite hiçbir zaman günümüzdeki kadar önemli olmamıştır. Son yüz yıldaki ekonomik ve teknolojik gelişmeler ülkelerin çehrelerinde ve pazarlarında değişiklikler meydana getirirken, rekabet üstünlüğü kazanma ihtiyacını da en üst düzeye çıkarmıştır. Gelişen rekabet ortamında işletme varlığını sürdürmek ve başarı kazanmak, kalitenin hayati önemini zamanında kavramış olmakla mümkün olabilmıştır.

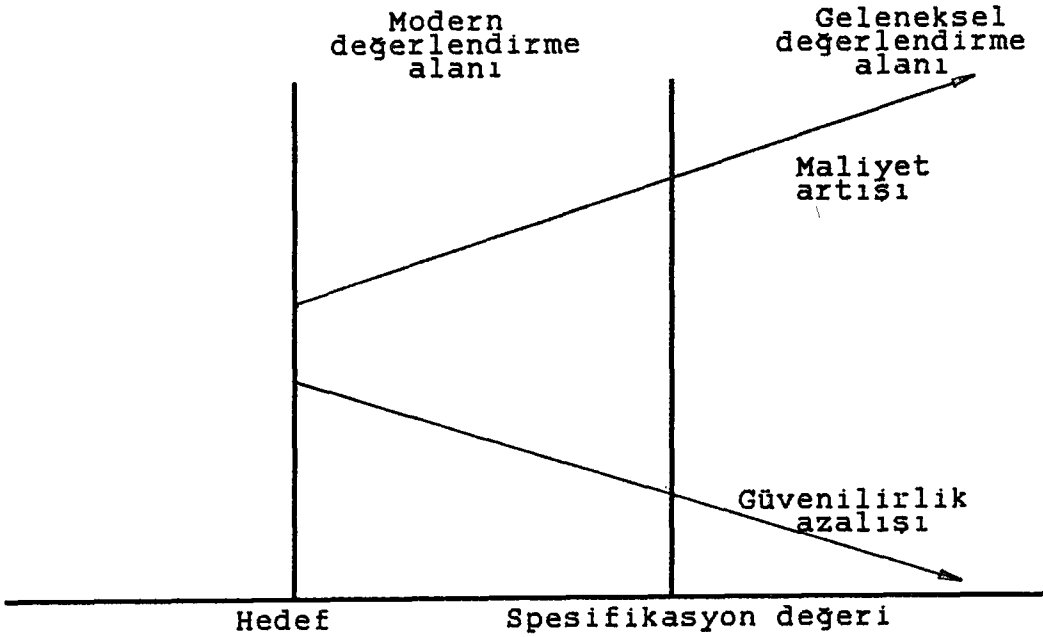
### 2.1 Kaliteye Yaklaşımlar

Kalite yaklaşımları geleneksel ve modern olmak üzere iki grupta ele alınabilir. Şekil 2.1, iki yaklaşımın bakış açılarını ve aralarındaki farklılıkları belirlemek açısından oldukça yararlıdır (Sullivan, 1984).

Geleneksel yaklaşım olan uygunluk odaklı kalite (conformance-oriented quality) anlayışında amaç spesifikasyonlara uygunluk sağlamaktır. Oysa bu anlayış, kalite kavramına oldukça sınırlı bir bakış açısı getirerek hem işleri güçleştirmekte, hem de maliyetleri artırmaktadır. Ayrıca, ürünlerin hedefe ne kadar yakın üretildiklerini belirleyip, çabaları süreci merkezlemeye yönelteceği yerde, spesifikasyon sınırları dışında bir durum görüldüğünde düzeltme yapmak gibi yanlış yönlendirmeye de neden olmaktadır.

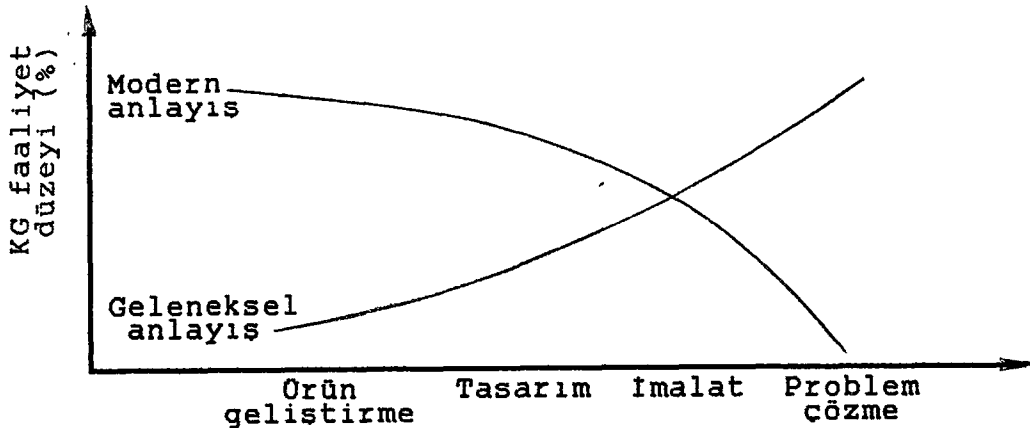
---

<sup>1</sup>Kalite kontrol çalışmalarının tarihsel gelişimi hakkında ayrıntılı bilgi için bkz. Dague, D., C., 1981, Quality-historical perspective, Society of Automotive Engineers, SAE-810389 (SP-483), 1-5.



Şekil 2.1 Kalite-maliyet değerlendirilmesi

Diğer bir ifadeyle, ürünler sadece iyi ve kötü olarak sınıflandırılmaktadır. Oysa Roslund'a (1989) göre, spesifikasyonlara uygunluk anlayışı sadece futbol gibi oyunlarda geçerlidir. Çünkü, bu gibi oyunlarda topun kaleye girmesi (gol olması) önemlidir. Nereden ve nasıl girdiği dikkate alınmaz. Bu anlayışta, kalite, belirli bir grubun sorumluluğu altındadır. Kusur ortaya çıktıktan sonra nedenlerinin belirlenmesi, düzeltici önlemlerin alınması ve sonuçların raporlanması gibi problem çözme faaliyetlerinin yoğunlaşması geleneksel anlayışın belirgin özelliklerindedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Kalite anlayışlarına göre kalite güvencesi faaliyetlerinin yoğunlaştığı alanlar (Sullivan, 1986)

Günümüz kalite anlayışı<sup>1</sup>, ürünlerin hedef değerlerinde üretildiklerinde eniyi kalitenin elde edilebileceğini savunmaktadır. Bu nedenle, modern kalite yaklaşımı, hedef odaklı kalite (target-oriented quality) anlayışı olarak adlandırılabilir. Şekil 2.1'den de görüleceği gibi hedefden uzaklaşıldıkça kalite ve güvenilirlik düşmekte, tüketici memnuniyetsizliği artmakta, bağlı olarak da işletmenin (garanti maliyetleri, tüketici kaybı,.. vb) ve toplumun kayıpları artmaktadır. Bu anlayışta, geleneksel anlayışın aksine kaliteden bütün çalışanlar sorumludur. Şekil 2.2'den görüleceği gibi, kalite güvencesine ilişkin faaliyetlerin daha çok ürün geliştirme ve tasarım aşamasında yoğunlaştırılması günümüz kalite anlayışının belirgin özelliklerindedir.

Çalışmanın izleyen kesimlerinde kalite ile ilgili değerlendirmeler modern yaklaşım açısından yapılacaktır. Bu nedenle, günümüzdeki kalite yönetim sistemlerini ve gelişim süreçlerini kısaca incelemekte yarar vardır.

## 2.2 Günümüzdeki Kalite Yönetim Sistemleri ve Gelişim Süreci

Kalite ile ilgili kaynaklar incelendiğinde kalite, kalite kontrol, toplam kalite kontrol, kalite yönetimi, firma çapında kalite kontrol, kalite sistemi, kalite denetimi ve kalite güvencesi gibi birçok kavramla karşılaşılmaktadır. Bütün bu kavramlar kalitenin çok önemli bir faktör olduğunu ve çeşitli yönlerini tanımlamakla beraber zaman zaman kavram kargaşasına da yol açmaktadır. Ancak, kaliteden esas olarak beklenen, bir ürünün fonksiyonlarını ekonomik olarak yerine getirerek tüketici tatminini sağlamasıdır. Sözü edilen özellikler ise pazar geliştirme, tasarım geliştirme, verimliliği artırma ve böylece de rekabet

---

<sup>1</sup>Evans and Lindsay (1989) günümüz kalite yaklaşımlarını Deming, Juran ve Crosby yaklaşımı olmak üzere üç grupta ele almaktadır. Bu çalışmada ise, sözü edilen yaklaşımların hepsi birden "modern kalite anlayışı" başlığı altında incelenecektir. Bununla birlikte, yaklaşımlar arasında bir tercih yapılması durumunda Deming'in yaklaşımı esas alınacaktır.

gücünün yükseltilmesiyle mümkündür. Bunun da temel yolu tüketici beklentilerinin sağlıklı olarak saptanıp, tüketicinin tam olarak tatmin edilmesidir (Kavrakoğlu, 1990).

Sanayi devrimiyle birlikte gittikçe artan bu terminolojilerin kronolojik sırada incelenmesi bu kapsamdaki gelişmelerin günümüze kadar hangi aşamalardan geçerek geldiğini göstermesi bakımından önem arzeder. Feigenbaum (1983) bu aşamaları; operatör KK, ustabaşı (formen) KK, muayene KK, istatistiksel KK ve firma çapında toplam kalite yönetimi olarak ifade etmektedir.

İlk düzenli KK faaliyetinden günümüze kadar olan gelişmeler;

- Kalite ve bir işletme fonksiyonu olarak KK,
- Sistem yaklaşımı açısından KK,
- Kalite anlayışında son gelişmeler ve yeni kavramlar

olmak üzere 3 grupta incelenebilir. İzleyen kesimlerde bu aşamalardaki önemli gelişmeler kısaca açıklanacaktır.

### 2.2.1 Kalite ve bir işletme fonksiyonu olarak kalite kontrol

Kalite karmaşık ve çok boyutlu bir kavramdır. Garvin (1984) kaliteyi; performans, özellik, güvenilirlik, uygunluk, süreklilik, servis hizmetlerinin varlığı, albeni ve estetik olmak üzere sekiz farklı boyutta incelemiştir. Kalitenin belirlenen bu boyutları ürünün doğasına ve tüketicinin gereksinimlerine göre değişiklik arz etmektedir. Bu nedenle, kalite kavramı ürünün ve/veya hizmetin kullanım alanına göre değişiklik arz edebilecektir (Kackar, 1986).

Klasik tanımı standartlara uygunluk olan kalite kavramı günümüzde amaca uygunluk olarak algılanmaktadır. KK ise "iş en doğru yapmanın yolu daha başlangıçta doğru yapmaktır" düşüncesinden hareketle iyi planlama için harcanacak az bir sürenin ileride oluşabilecek birçok sorunu ortadan kaldıracabileceği gerçeğine dayanır. Juran (1979) KK'nu;

gerçek kalite düzeyinin ölçüldüğü, standartlarla karşılaştırıldığı ve farklılık karşısında harekete geçildiği bir düzenleme süreci olarak tanımlar. Öte yandan, Japon endüstriyel standartları KK'nu; tüketicilerin gereksinimlerini karşılayan, kaliteli mal veya hizmetleri ekonomik olarak üreten bir üretim yönetim sistemi olarak tanımlamaktadır.

Başlangıçta hem imal eden, hem de kontrol eden aynı kişi iken bu durum sanayi devrimiyle birlikte yavaş yavaş değişmeye başlamıştır. İmalatta KK teknikleri kullanımının uzun bir tarihi vardır. Bununla birlikte, 1924 yılında W.A. Shewhart'ın istatistiksel kontrol şeması kavramını geliştirmesi, istatistiksel KK'nun başlangıcı olarak kabul edilmektedir. 1920'lerin sonlarına doğru H.F. Dodge ve H.G. Romig % 100 muayene seçeneğine karşı istatistiksel temele dayanan kabul örnekleme (KÖ) kavramını geliştirmişlerdir. 1930'lu yıllarda ise KÖ yaklaşımının iyice belirginleştiği ve muayene ile KK'nun eş anlamda kullanıldığı görülmektedir. İkinci dünya savaşının başlamasıyla birlikte kitle üretiminin ortaya çıkışı, istatistiksel tekniklerin imalat aşamasında kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. 1940'lardan itibaren de istatistiksel süreç kontrolü (İSK) yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

### 2.2.2 Sistem yaklaşımı anlayışında kalite kontrol

1960'lı yılların başında Feigenbaum tarafından ortaya atılan toplam kalite kontrolü (total quality control) kavramı ile yeni bir aşamaya girilmiştir. İşletme faaliyetlerinin ve dolayısıyla KK'nun sistem yaklaşımı açısından değerlendirilmesi bu aşamanın en belirgin özelliğidir.

Toplam kalite kontrolü tüketicilerin ihtiyaçlarını eniyi şekilde karşılayan bir yaklaşım olduğu kadar, maliyetleri de düşüren bir yönetim tarzıdır. Başka bir anlatımla, toplam kalite kontrolü hataları önlemeyi hedefler; böylece bir taraftan tüketici hatasız ürünlere sahip olurken, diğer taraftan da üreticinin (hatalı imalattan

kaynaklanan) maliyetleri düşer. Feigenbaum (1983) toplam kalite kontrolünü, tüketici isteklerini en ekonomik düzeyde karşılamak amacıyla işletme organizasyonu içindeki çeşitli birimlerin; kalitenin oluşturulması, yaşatılması ve geliştirilmesi yolundaki çabalarını bütünleştiren sistem olarak tanımlamaktadır.

Aynı yıllarda sıfır kusur (zero defect) kavramı ortaya çıkmıştır. Sıfır kusurlu program, gelişme ve ilerleme için ortaya konan hedeftir. İdeal durumu yansıtır. Yukarıdan aşağıya doğru yayılan kalite bilinçlenmesiyle, sistematik biçimde, adım adım gelişme sağlanır. Örneğin, yüzde olarak ifade edilen kusurlu oranı sürekli yürütülen bu çabayla milyonda olarak ifade edilmeye başlar (Kaylan, 1991). Toplam kalite kontrolü ve yönetiminde bir diğer önemli gelişme Japonya'da ortaya çıkan kalite çemberleri (quality circles) kavramıdır. Sıfır kusur programları gibi kalite çemberleri de çalışanların motivasyonu ve katılımlarını içerir. Kalite çemberleri, KK teknikleri konusunda gerekli eğitimi vermek ve KK kavramlarını tartışmak, kalite sorunlarını saptamak ve çözmek üzere atelye seviyesinde işçi ve ustabaşlarından oluşan küçük fakat etkin problem çözme gruplarıdır.

1970'li yıllarda makina operatöründen firma başkanına kadar bütün çalışanların KK fonksiyonuna katılımlarının önemine işaret eden; Ishikawa'nın firma çapında kalite kontrol (companywide quality control), Feigenbaum'un da örgüt çapında toplam kalite kontrol (total quality control organizationwide) kavramı ile ifade ettiği yeni bir aşamaya



girilmiştir. Ishikawa (1983) firma çapında kalite kontrolünü, kaliteli ürünü/hizmeti ekonomik olarak üreterek insanların hayat kalitesini geliştirirken elde edilen geliri de tüketiciler, çalışanlar ve üreticiler arasında bölüştüren bir sistem olarak tanımlamaktadır (Sullivan, 1986).

Aynı yıllarda ürün, süreç veya servisin kendisinden beklenen özellikleri sağlamasını amaçlayan ve kalite sistemi (quality system) ile ifade edilen yeni bir kavramın ortaya çıktığı görülmektedir. Feigenbaum (1983) kalite sistemi kavramını kalitenin ekonomik olarak imal edilmesi ve tüketici kalite memnuniyetini sağlamanın eniyi ve en pratik yolları konusunda firmayı bilgilendiren, makinalar ve çalışanların eylemlerini koordine eden, bütünleşik teknik ve yönetim prosedürlerini içeren, etkin dökümantasyon, firma çapında çalışma stratejileri gibi konularda fikir birliği sağlayan sistem olarak tanımlamaktadır. Bu tanım üst yönetimin seferber olmasının ve katılımının önemini açıkça göstermektedir. Bir diğer kavram olan katılımcı kalite kontrol (participative quality control), kalite sisteminin sadece bir boyutunu ele almaktadır. Katılımcı kalite kontrolünde süreçler, ürünler, isyeri ve çevre gibi konularda alınacak kararlarda çalışanların katılımları sağlanır.

### 2.2.3 Kalite anlayışında son gelişmeler ve yeni kavramlar

1970'li yılların sonlarından günümüze kadar devam eden gelişmeler bu aşamada ele alınabilir. Kalitenin imalat aşamasından çok tasarım aşamasında sağlanabileceği gerçeğinin Taguchi tarafından ortaya atılması bu aşamanın başlangıcı olarak kabul edilebilir.

Taguchi, ürün (süreç) performans karakteristiklerindeki değişkenliğin kalite kayıplarını artırdığını belirterek; performans değişkenliği nedenlerini ortadan kaldırmak yerine ürünü (süreci) bu değişkenliklere karşı duyarsız tasarlamının gerekli olduğunu göstermiştir. Taguchi'nin

önerdiği istatistiksel deney tasarımı (statistical design of experiment) veya Taguchi yöntemleri olarak anılan ve KG'ne önemli katkıları olan bu yöntemler imalat öncesi KG fonksiyonlarını yürütmek için kullanılmaktadır.

Endüstride bilgisayarların kullanılmasıyla birlikte önemli gelişmeler sağlanmıştır. 1970'li yılların sonlarına doğru bilgisayarlı otomatik test düzeni, bilgisayar destekli tasarım (computer-aided design-BDT), bilgisayar destekli imalat (computer-aided manufacturing-BDI), bilgisayar destekli süreç kontrolü, veri toplama, saklama ve analizleri yapılmaya başlanmıştır. KK'da bilgisayarların kullanılmaya başlanması oldukça yeni olmasına rağmen bu dönemde ortaya çıkan bilgisayar destekli kalite (computer-aided quality-BDK) kavramı, KK'da bütünüyle bilgisayar kullanımını ifade etmektedir. Feigenbaum'a (1983) göre BDK, ürünün test ve muayenesi ile birlikte imalatına rehberlik eden, ürünleri tasarlayan bütünlük mühendislik veri tabanıdır. Böylece, BDK, BDT ve BDI ile aynı veri tabanından çalışabilir (Banks, 1989).

Öte yandan, üretim anında ortaya çıkan her olay değişik özellikler göstereceğinden, sorunla karşılaştıkları anda karar vericilerin genel, yapılandırılmış bir çözüm yöntemi bulmaları oldukça zordur. Bu nedenle, kullanıcıya üretim kalitesiyle ilgili koşulları kavrama olanağı vererek önemli (kronik) kalite sorunlarını çözmeye yönelik bir araca, yani kalite kontrolde karar destek sistemlerine gereksinim olduğu belirtilmektedir (Ulusoy ve Akten, 1985).

Teknolojinin diğer birçok alanında olduğu gibi bilgisayarların kalite ile ilgili alanlarda kullanılmasıyla KG'nde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Ürün tasarım güvencesi (product design assurance), tedarik kalite güvencesi (procurement quality assurance), üretim kalite kontrol (production quality control) ve ürün kalite denetimi (product quality audit) gibi kavramlar bu kapsamda ele alınabilecek oldukça yeni olan gelişmelerdir.

Orün tasarımı güvencesi, ürün kalitesinde tasarım kalitesinin önemli rolü olduğunu, zayıf tasarımların imalatının ya mümkün olmadığını ya da çok pahalı olduğunu ifade eder. Böylece, BDT ve BDI'nın bütünleştirilmiş şekli olan bilgisayar destekli tasarım ve imalatın (computer-aided design and manufacturing-BDTi) gerekliliğini vurgular.

Tedarik kalite güvencesi, kaliteli bir ürünün üretilebilmesi kaliteli hammadde kullanmayı gerektirir ilkesinden hareketle hammadde ve yarı mamül olarak firma dışından sağlanan malzemelerin kalitesi ile ilgilenir.

Üretim kalite kontrolü, imalat sürecinde arzulanan kalite düzeyinin elde edilebilmesi için yapılması gereken bütün faaliyetleri içerir. Bu faaliyetler imalat ve süreç kontrolünde bilgisayar kullanmayı gerektirir.

Kalite denetimi ise kısaca bir örgütün kalite programlarının değerlendirilmesidir. Ancak, bu değerlendirme tüketicinin bakış açısına göre yapılır. Ürün kalite denetimi tüketicinin ürünü görmesinden önce yönetime ürünün tüketici tarafından nasıl karşılanabileceğine dair bilgiler sağlar. Bu nedenle, ürün kalite denetimi toplam kalite yönetim sisteminin önemli bir parçasıdır.

Günümüzde etkisi gittikçe hissedilmeye başlayan ve kısmen de uygulamaya konulan bir diğer kavram ise standart geliştirmedir. NATO ve ISO gibi uluslararası kuruluşların önderliklerinde geliştirilen standartların arasında istatistiksel yöntemler ve KG standartları sayılabilir.

Son yıllarda tüketicilerin kalite yönlü bilinçlenmeleri ve bu yöndeki isteklerinin artması, işletmelerin bu istekleri karşılayabilmek için bünyelerinde çeşitli düzenlemeler yapmalarını zorunlu hale getirmiştir. Bu gelişmeler ışığında ürün tasarım güvencesi, tedarik kalite güvencesi, üretim kalite kontrol ve ürün kalite denetimi fonksiyonlarının birbirinden ayrı olarak tasarlanmasının fazla bir anlam

taşımayacağı söylenebilir. Oysa, bu fonksiyonların bütünlleştirildiği KGS, daha güvenilir ve kaliteli ürünlerin daha ucuza üretilmesini sağlayarak hem tüketicileri, hem de üreticileri koruyan bir sistem veya yönetim tarzıdır.

Çalışmanın izleyen kesimlerinde kalite ve KK'na ilişkin kavramlar, kalite güvencesi terimi ile ifade edilecektir. Kaliteyi ekonomik olarak üretmek için yapılan çalışmalar ise kalite güvence sistemi başlığı altında ele alınacaktır.

### 2.3 Kalite Güvence Sisteminin Kapsamı ve Amaçları

Günümüzde oldukça popüler bir konu haline gelen KGS organizasyon şemalarında gittikçe artan sıklıkla görülmeye başlanmıştır. KGS, tasarım ve tedarik aşamalarından başlamak üzere imalat, satış ve satış sonrası hizmetlerini de kapsayan bir sürecin her aşamasında gerekli teknik ve örgütsel önlemlerle eniyi ve en akılcı çalışmayı sağlayarak, uygulamanın başarısı oranında hata yapma olasılığını azaltan veya tümüyle ortadan kaldıran, sistemi ve sistemin çıktılarını sürekli geliştiren, düzenleyici ve kendi kendini denetleyen, başarısında bütün çalışanların ortak payı olan dinamik bir yapı olarak tanımlanabilir. Sistemin başarısı, her kademedeki çalışanın kendi görev ve sorumluluklarının bilincinde olması ve yerine getirmesiyle olurlu olacaktır. Bu amaçla KGS kurulurken sistemin kuruluş amacı, çalışma şekli, görev ve sorumlulukları, gerekli bilgi ve beceriler konusunda eğitim programlarının düzenlenerek çalışanların bilinçlendirilmesi oldukça önemlidir.

KGS'de ürünün tasarımından kullanıcı eline geçinceye kadar bütün aşamalar önceden tariflenmiş olduğundan ve çalışanlar önceden eğitildiğinden maliyetleri artırmadan hem hedeflenen kalite seviyesine ulaşılacak, hem de süreklilik sağlanacaktır. Sistem yapılmış hataları aramak yerine, hata nedenlerini gidermeye çalışıldığından;

- Kalitede süreklilik,

- Verimlilik artışı,
- Rekabet gücü,
- Çağdaş çalışma ortamı,
- Çalışanlarda katılım ve yüksek motivasyon,
- Sistemin başarısı ve kararlılığı oranında KG fonksiyonu kapsamının daraltılması

gibi üstünlükleri de beraberinde getirir. Böylece, kalite sadece bu işle uğraşan birkaç uzmanın görevi olmaktan çıkıp, örgütün tüm çalışanlarının görevi haline gelmektedir.

#### 2.4 Kalite Güvence Sisteminin Bileşenleri

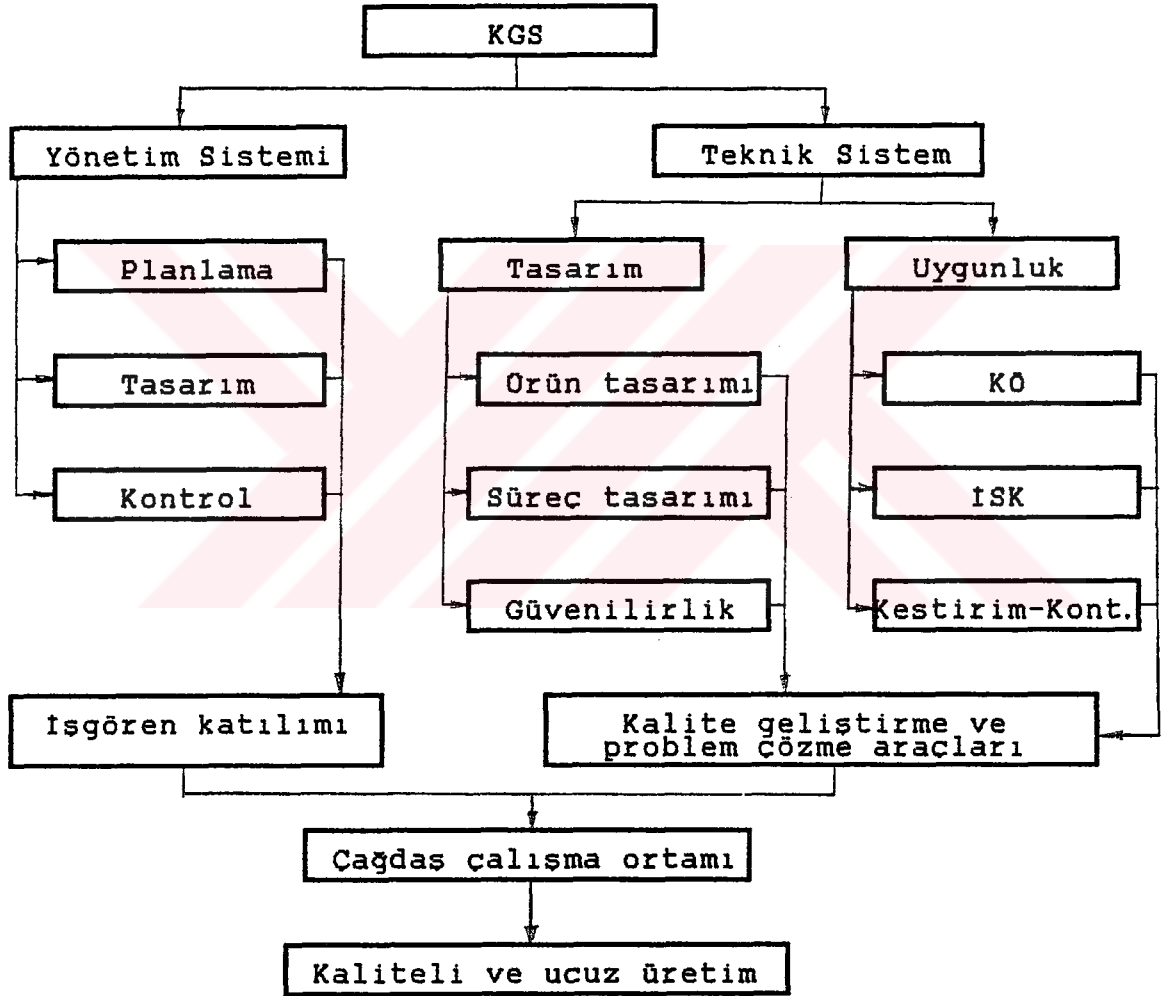
Orün/hizmet üreten her işletmede örgütlenmiş olsun veya olmasın kaliteli üretim yapmayı amaçlayan bir takım çalışmalar yapıldığı bilinen gerçektir. Yapılan her çalışma bir maliyet yükü getireceğine göre, karşılığında da bir getiri olması beklenir. Bununla birlikte, oluşan maliyetlerle elde edilen gelirler arasındaki karşılaştırmanın kısa dönem temelinde yapılması yanlış değerlendirmelere neden olabilir. Etkileri kısa dönemde görülmeyen faaliyetlerden biri de KGS'ne ilişkin olanlardır. Öte yandan, etkilerin uzun dönem temelinde karşılaştırıldığı durumda bile, kazançların enbüyüklenmesi, KGS faaliyetlerinin örgütlü bir şekilde yapılmasına bağlıdır. KGS ve çıktıları, Şekil 2.3'deki gibi;

- Yönetim sistemi,
- Teknik sistem

olmak üzere birbiriyle ilişkili iki alt sisteme ayrılır.

Yönetim sistemi, KG programlarının planlaması, tasarımı, örgütlenmesi ve yürütülmesi ile ilgilenir. Başka bir anlatımla üst yönetim tüketici gereksinimlerini, firmanın üretim sistemi yeteneğini ve bunların firmanın parasal durumu ile olan ilişkilerini bilmekle yükümlüdür.

Teknik sistem, mühendislik tasarımlarının güvenilirliği, ölçme ve test teknikleri, imalat sürecinin planlanması ve tasarımı, firma dışından gelen ve firmada üretilen birimlerin tedarik ve kontrolünün uyumlu bir şekilde yerine getirilmesinden, yani KG'nin sağlanmasından, sorumludur. Teknik sistem, kalite problemlerini belirlemek ve süreç kontrolünü ekonomik olarak gerçekleştirebilmek için genellikle istatistiksel araçlardan yararlanır.

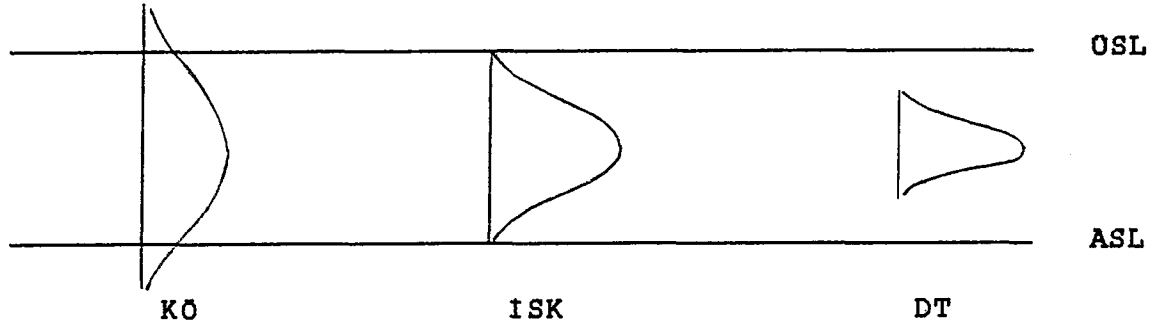


Şekil 2.3 KGS'nin elemanları ve çıktıları

KGS'nde yararlanılabilecek araçlar;

- Kabul örnekleme,
- İstatistiksel süreç kontrolü,
- Deney tasarımı (DT) veya Taguchi yöntemleri

olarak sayılabilir. Zaman içerisinde ilgilenilen kalite karakteristiğindeki değişkenliğin azaltılarak bunun nasıl gerçekleştirildiği Şekil 2.4'de görülmektedir (Montgomery, 1985).



Şekil 2.4 KGS yöntemlerinin uygulanmasıyla kalite değişkenliğinin sistematik olarak azaltılması

Değişkenliğin azaltılması oranında kalitenin yükseleceği, bunun da sistematik yöntemlerin kullanıldığı KGS ile başarılacağı ilkesinden hareketle izleyen kesimlerde açıklamalar bu yönde yoğunlaşacaktır.

## 2.5 Kalite, Kalite Değişkenliği ve Kalite Güvence Sistemi ilişkisi

Orn kalitesini oluşturan öğeler şunlardır (Juran, 1979):

- Tasarım kalitesi,
- İmalat (uygunluk) kalitesi,
- Güvenilirlik.

Tasarım kalitesi deyince, ürünün kendisinden beklenen fonksiyonları yerine getirebilmesi için ne gibi parçalardan oluşacağını ve bunların spesifikasyonlarının belirlenmesi akla gelmektedir. Tasarım kalitesi, sistem tasarımı için mevcut bilgi ve teknolojiyi geliştirmek veya yeni bilgi ve teknolojiler bulmak amacıyla yapılan araştırmaların etkinliğine bağlıdır. Yanısıra KGS'nde kullanılan yöntemler ve kapsamı, pazarın durumu ve işletmenin kalite anlayışı gibi çeşitli faktörlerin etkisi altındadır. Yeni ürün geliştirme düşüncesinin ortaya çıkmasıyla başlayıp,

prototip imalatın yapılarak ürünün üretilebilirliğinin sağlanması için mevcut sürecin iyileştirilmesi veya yeni süreçlerin geliştirilmesine kadar devam eden faaliyetler dizisinin sonucu olarak tasarım kalitesi ortaya çıkacaktır. Tasarım aşaması, TY'nin yaygın olarak uygulandığı bir aşamadır.

İmalat kalitesi, üretilen bir parçanın (veya birkaç parçanın birleşimi olan ürünün) tasarım aşamasında belirlenen fonksiyonlara ve spesifikasyonlara ne derece uygun olduğunu gösterir. Bu nedenle, uygunluk kalitesi olarak da adlandırılır. Uygunluk kalitesi imalat sürecinin seçilmesi, iş gücünün eğitim ve denetimi, kullanılan KG yöntemleri ve kapsamı, iş gücünün motivasyonu gibi çok sayıda faktör tarafından etkilenir. İmalat kalitesinin kontrolü ham ve yardımcı maddelerin sağlanmasından, malın ambalajlanıp depolanmasına kadar geçen tüm evreleri kapsar ve istatistiksel tekniklerin yaygın olarak uygulandığı alandır.

Güvenilirlik ya da kullanışta bekleneni verme kalitesi ise, tüketici tarafından satın alınan ürünün ne derece iyi çalıştığının ya da hizmet verdiğinin bir ölçüsüdür. Bu açıdan kullanışta bekleneni verme kalitesinin tasarım ve imalat kalitesinin bir sonucu olduğu söylenebilir.

Kalitenin somut bir ölçüsü ilgilenilen karakteristik(ler)deki değişkenlik miktarıdır. Değişkenliğin azaltılması kalitenin geliştirildiğinin bir işaretidir. Değişkenliğin azaltılması da değişkenlik nedenlerinin doğru belirlenmesine ve uygun önlemlerin zamanında alınmasına bağlıdır. Başka bir anlatımla, önce problemin teşhisinin doğru konulması, sonra da teşhise uygun önlemlerin zamanında alınması gerekir. Oluştugu kaynağa göre değişkenliği azaltmada yararlanılacak yöntemler ise imalat ve imalat öncesi olmak üzere iki aşamada uygulanmaktadır. Açıklamalar doğrultusunda, izleyen kesimlerde önce değişkenliğin nedenleri belirlenecek, sonra da sözü edilen nedenleri gidermede kullanılacak yöntemler açıklanacaktır.



### 2.5.1 Kalite değişkenliği

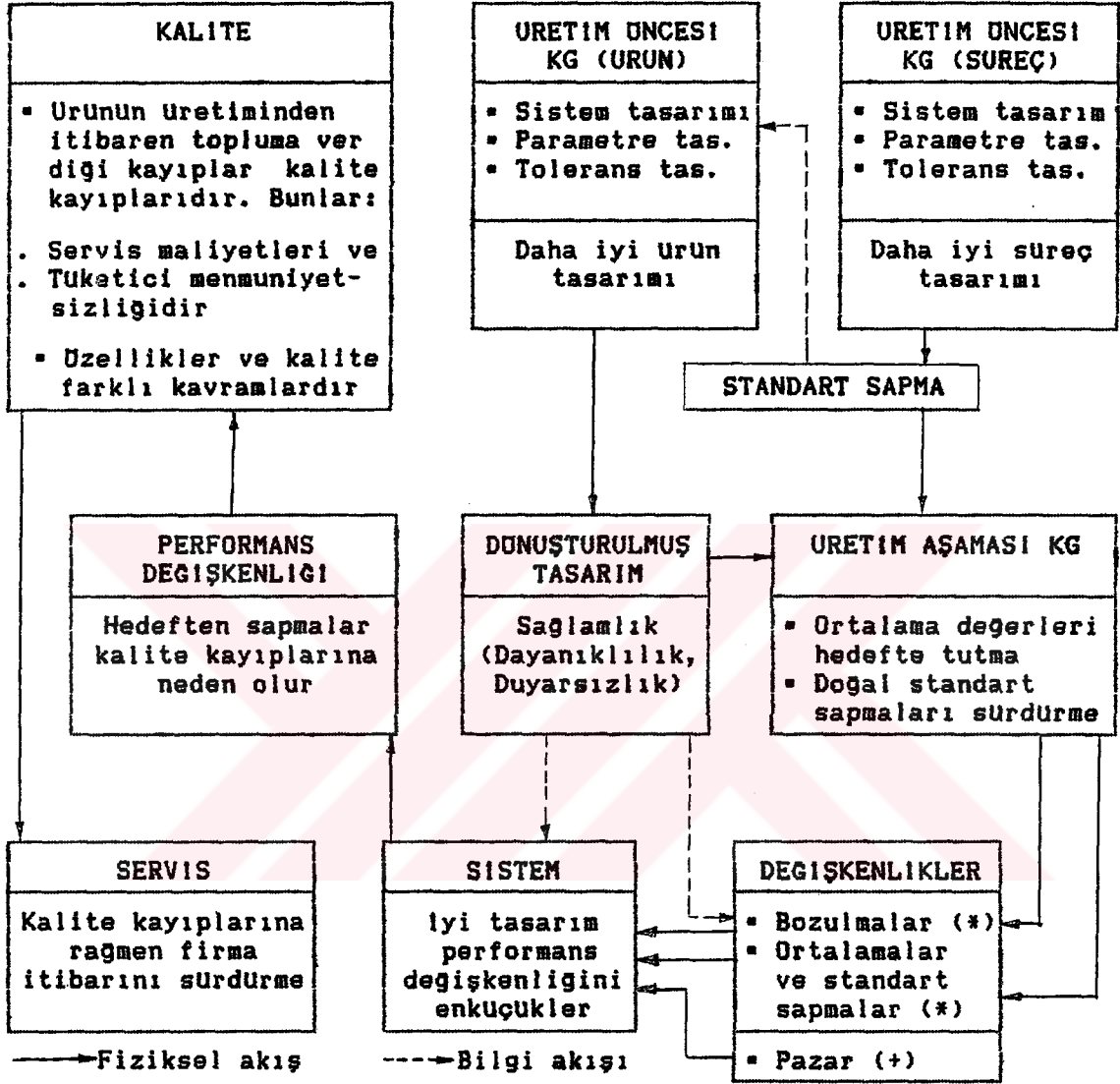
Tasarım, imalat ve kullanımın her aşamasında değişkenlik olması hayatın kaçınılmaz bir gerçeğidir. Bu değişkenliğin varlığı, düşük kaliteli ve güvenilir olmayan ürünler üretilmesine neden olur. Aynı zamanda bu değişkenlik, rekabet edebilme gücünü geliştirmek için de bir fırsattır. Japon sanayiinin bugünkü durumu bunun en güzel örneğidir.

Japon kalite devriminin mimarı Deming'e göre bütün kötülüklerin temelinde **değişkenlik** yatmaktadır ve her ne pahasına olursa olsun önlenmelidir. Öte yandan, imalatta kalite geliştirme çabalarına önemli katkıları olan Shewhart değişkenliğin iki ana nedene bağlanabileceğini kanıtlamıştır. Bunlar:

- Özel nedenler,
- Sistemden kaynaklanan (genel) nedenler

olarak sınıflandırılır. Özel nedenler insan, malzeme, süreç veya çalışma ortamındaki değişkenliklerden kaynaklanabilir. Özel nedenler imalat anında belirli noktalarda yapılacak düzeltici çalışmalarla önlenebilir. Buna karşılık sistemden kaynaklanan nedenler, imalat sisteminde değişiklik yapılmasıyla düzeltilebilir. Bu durumda ürün ve süreç spesifikasyonlarını etkileyecek geniş önlemler alınması söz konusudur. Genelde kalite değişkenliğine daha çok sistemden kaynaklanan nedenlerin yol açtığı gözlenmektedir; fakat hangi nedenden kaynaklanırsa kaynaklansın, bunları ortaya çıkarıp, değişkenliği azaltmak, mümkünse yok etmek gerekir.

Ürün kalitesindeki değişkenliği ekonomik olarak enküçüklemek için kullanılan KG yöntemlerinin imalat öncesi (off-line) ve imalat aşaması (on-line) olmak üzere başlıca iki uygulama alanı vardır. Bu yöntemler, tüketici gereksinimlerini karşılamaya yönelik olup birbirlerini tamamlayan yapıdadırlar. Clausing ve Barker bu alanlar arasındaki ilişkiyi Şekil 2.5'deki gibi belirlemişlerdir (Barker, 1986).



\*: Kontrol edilemeyen içsel değişkenler

+: Kontrol edilemeyen dışsal değişkenler

Şekil 2.5 İmalat öncesi ve imalat aşaması KG yöntemleri arasındaki ilişkiler

Kalite, muayene istasyonunda değil, tasarım ve imalat aşamasında oluşturulduğundan, daha yüksek başarı kazanmak için dikkatlerin öncelikle tasarım, sonra da imalat aşamasına yöneltilmesi gerekir. Bu nedenle, izleyen kesimlerde bu alanlarda KG tekniklerinin uygulanış biçimleri ve amaçları açıklanacaktır.

### 2.5.2 İmalat öncesi kalite güvencesi yöntemlerinin kapsamı ve amaçları

İmalat öncesi KG yöntemleri ürün kalitesini, güvenilirliğini ve imal edilebilirliğini geliştirmek, ürün geliştirme, imalat ve işletme maliyetlerini azaltmak için kullanılır.

İmalat öncesi KG yöntemleri olarak duyarlılık testleri, prototip testleri, hızlandırılmış ömür testleri ve güvenilirlik testleri sayılabilir. Bu tekniklerin birincil amacı kaliteyi değerlendirmektir. Bunlar bir doktorun termometresine benzer; termometre hastanın atesinin çok yüksek olduğunu gösterebilir, ancak bu hasta için bir ilaç değildir. Etkin bir KGS, imalat öncesi KG yöntemlerinin sadece kaliteyi değerlendirmek amacıyla değil, aynı zamanda kaliteyi geliştirme amacıyla da kullanılmasını gerektirir.

Yukarıda verilen imalat öncesi KG yöntemlerine ilave olarak, Taguchi'nin kullanmayı önerdiği DT'ları kalitenin hem değerlendirilmesini, hem de geliştirilmesini sağlar. TY, ürün kullanım koşullarını dikkate alarak; kontrol edilebilen değişkenlerin sistematik olarak değiştirilmesi neticesinde ilgilenilen kalite karakteristiğinde oluşan etkilere göre eniyi tasarım değerlerini belirlemeye yönelik çalışmalardır.

Günümüz rekabet ortamında pazar payının artırılabilmesi, imalat sürecinde sistemden kaynaklanan değişkenlik miktarının azaltılıp, ürün kalitesinin geliştirilmesi ile mümkündür. Sistemden kaynaklanan değişkenlik, tasarım aşamasında TY'ni kullanarak yapılacak daha iyi tasarımlarla azaltılabilir. TY, kayıp fonksiyonu kavramı ile değişkenliği doğrudan ilişkilendirerek kalite, güvenilirlik ve süreklilik amaçlarını daima başarmaktadır.

### 2.5.3 İmalat aşaması kalite güvencesi yöntemlerinin kapsamı ve amaçları

İmalat aşamasındaki KG yöntemleri süreci etkileyen özel nedenleri belirlemek ve karşılaşılan problemleri çözmek için kullanılır. Böylece, tasarım aşamasında belirlenen hedeflerin tutturulmasına ve imalat hatalarının oluşmasını engelleyecek önlemlerin alınmasına olanak sağlarlar. Günel (1990) imalat aşamasındaki KG çabalarını üç grupta toplamıştır:

- Kabul örnekleme,
- İstatistiksel süreç kontrolü,
- Önceden kestirim ve kontrol.

KÖ, partiler halinde gelen bir malın belirlenen nitel veya nicel ölçüleri sağlayıp sağlamadığına göre partinin kabulü veya reddi için uygulanan istatistiksel tekniklerin bütünüdür. Genelde imalat anında kullanılan bir teknik değildir. Bilinen kalitedeki partilerin belirli bir riskle kabul edilmesi yöntemini gösterir (Burnak ve Özkul, 1988).

ISK, süreci analiz etmek veya süreç çıktılarının istatistiksel kontrol altında olma durumunu sürdürebilmek için gereken müdahaleleri zamanında yapabilmek amacıyla imalatın ara aşamalarında kontrol semaları ve diğer istatistiksel tekniklerin kullanılmasıdır.

Önceden kestirim ve kontrol ise, sürecin herhangi bir andaki durum bilgilerini kullanarak ileride gösterebileceği davranışların belirlenmesi ve uygun önlemlerin alınmasıdır.

İmalat aşamasında yapılan KG faaliyetleri ile;

- Malzeme ve bileşenlerdeki değişkenlik,
- Süreçteki sapmalar,
- İşlerin yapılışındaki değişkenlik,
- Teçhizat veya ölçüm araçlarının kullanımındaki insan hataları

gibi konular kontrol edilebilir.

Tasarım, imalat ve kullanım aşamalarında mevcut olan değişkenlik, ölçülebilir toplumsal kayıplarla sonuçlanan performans azalmalarına neden olur. KGS ile tasarım aşamasında olduğu gibi, imalat aşamasında da değişkenliğin ölçüsü alınabilir. İmalat aşamasındaki KG yöntemleri, imalat süresince ve imalat sonrasında birimden birime olan kalite

farklılıklarını belirlemek ve kontrol etmek için kullanılır. Bu yöntemlerden KÖ ile, firma dışından temin edilen hammadde ve yarı mamüllerden belirli koşulları taşımayanların imalata alınması önlenir. İSK ile de imalat aşamasında özel nedenlerden kaynaklanan değişkenlik azaltılır ve süreç kararlı hale getirilir. Bu yönüyle, yaygın olarak uygulanan kalite geliştirme ve maliyetlerde tasarruf sağlama yöntemidir.

#### 2.5.4 Uygulamada karşılaşılan sorunlar ve çözüm yolları

Orün kalitesi tasarım, imalat ve güvenilirlik olmak üzere birbirini izleyen ve tamamlayan üç unsura bağlıdır. Orün tasarımının iyi yapılmadığı durumlarda İSK'nun yeterli olamayacağı açıktır. Söz konusu durumlarda, ya sürecin yeteneği olabildiğince geliştirilmeli ya da daha yoğun süreç kontrol çalışmaları tasarlanmalıdır. Ancak, bu faaliyet hem oldukça zor, hem de oldukça pahalıdır. Çünkü kalite kontrol edilemez, üretilir. Oysa, artan rekabet ortamında işletmeler varlıklarını sürdürebilmek için daha kaliteli ürünleri, daha ucuza üretmek zorunluluğunu her zaman hissetmektedirler. Kaliteli ürünleri ekonomik olarak üretmek için tasarım geliştirmenin gerekliliği, rekabet ortamında daha da belirginleşmektedir. Tasarım geliştirme fikrini ilk ortaya atan ve uygulayan Taguchi olduğu için bu kapsamdaki çalışmalar Taguchi yöntemleri olarak anılmaktadır. TY'nin bakış açısıyla, bilimsel temelli kalite geliştirmenin sürekli olarak başarılması, maliyetlerde azalma sağlayacaktır.

Günümüzde yeni problemleri klasik çözüm yöntemlerini kullanarak çözmek oldukça yaygındır. Çeşitli olumsuz yanları olsa da yeni problemlere yeni çözüm yöntemleri aramak, sonuçta insanlığın sürekli gelişmesine ve hayat seviyesinin yükselmesine neden olacaktır. Orün ve süreç kalitesi günümüz toplumunun yeni karşılaştığı problemlerdir. Sözü edilen problemlerin ekonomik olarak çözülebilmesi için Taguchi yeni çözümler önermektedir. Bu yüzden, TY'nin KGS'nde yaygın olarak kullanılması gerekir. Açıklamalar doğrultusunda izleyen bölümde TY üzerinde durulacaktır.

### 3 KALİTE GÖVENCE SİSTEMİNİN OLUŞTURULMASINDA TAGUCHI YÖNTEMLERİ

Belirlilik ortamında eniyileme süreci, eniyilenecek fonksiyonun veya fonksiyonların bilinmesini gerektirir. Bunların bilinmediği durumlarda deneysel yöntemlere başvurulur. TY, eniyilenecek fonksiyon(lar) ve kullanılacak dağılım(lar)ın bilinmediği durumda, eniyi ürün (veya süreç) tasarımını belirlemek için kayıp fonksiyonunu deneysel olarak enküçüklemeye çalışır. Pignettiello (1988) bu yönüyle TY'nin, belirsizlik ortamında karar verme sürecinin deneysel olarak yürütülmesi şeklinde düşünülebileceğini ifade etmektedir.

Tasarım eniyilemeye yönelik TY bir bütün olarak; gerekçesi, amaçları, kullandığı araçlar ve elde ettiği sonuçların değerlendirilmesi açılarından aşağıdaki gibi özetlenebilir (Sullivan, 1986):

1. Tüketici bir ürünü aşağıdaki nedenlerden dolayı satın alacaktır:

- İstenilen fonksiyonlara sahip olması ve onları karşılayabilmesi,
- Çevresel etkilere (sıcaklık ve nemlilik gibi), bozulmalara (yıpranma ve özelliğini kaybetme gibi) ve değişkenliğe (birimler arasındaki farklılıklar gibi) karşı daha güçlü ve fonksiyonel olması.
- Özellik, görünüş ve maliyet bakımından benzer ürünlere göre daha iyi olması.

2. Tüketicilerin beklentilerini karşılayabilmek için üreticilerin alacağı önlemler 3 grupta toplanabilir:

- Daha düşük maliyetle kaliteyi geliştirmek için ürün ve süreç tasarımlarını eniyilemek,
- Kalitede sağlanan gelişmeleri maliyet terimleri ile gösterebilmek için kalite kayıp fonksiyonunu (quality loss function) kullanmak,
- Planlama, tasarım, üretim, satış ve servis hizmetlerinde tüketici beklentilerini kalite fonksiyonu yayılımı (quality function deployment-KFY) ile çalışanlara benimsetmek.

3. Önlemlerin etkin şekilde alınabilmesi için 3 adımlı bir yaklaşım izlenir. Bu adımlar:

- Sistem tasarımı (system design),
- Parametre tasarımı (parameter design),
- Tolerans tasarımı (tolerance design).

4. 0ç adımlı yaklaşımı uygularken karşılaşılan zaman, para ve diğer sorunları en aza indirebilmek için kullanılan yöntemler 3 grupta toplanabilir:

- Ortogonal diziler (orthogonal arrays),
- Doğrusal grafikler (linear graphs),
- Kalite kayıp fonksiyonu (kkf).

5. Deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar iki açıdan değerlendirilebilir:

- Analiz sonuçlarının eniyi olması (istatistiksel olarak geçerli veya en uygun düzeyde) gerekmez. Ancak, önceki duruma göre daha iyi ve hızlı (yani 10 günde % 50 başarı elde etmek, 200 günde % 90 başarı elde etmekten daha iyidir) olmalıdır.
- Oldukça fazla sayıda üretim yapan süreçlerde sağlanacak küçük bir artışın geliştirme üzerindeki birikimli etkisi, bilinen problemlerin geliştirilmesi ile elde edilecek etkiden daha büyüktür.

Taguchi yöntemlerine bütünsel bakış açısı sağlayan bu aşamalar izleyen kesimlerde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

### 3.1 Taguchi'nin Kalite Anlayışı

Taguchi, kaliteyi, ürünün tüketiciye ulaştıktan sonra topluma verdiği kayıplar olarak tanımlamaktadır (Taguchi, 1986; Taguchi, 1987). Hatalı imal edilen bir ürünün işgücü, malzeme, enerji tüketeceği ve çevre kirliliği gibi yan etkilere sebep olacağı düşünülürse, yukardaki tanımın "ürünün imalatından itibaren topluma verdiği kayıplar" olarak algılanması daha tutarlı olacaktır.

Taguchi'nin kalite anlayışının eniyi açıklaması geleneksel kalite anlayışı ile karşılaştırılarak yapılabilir. Taguchi kalite anlayışında, kalite, tüketici odaklı (customer-oriented) olarak tanımlanmaktadır. Oysa bu tanım, önemli kalite performans ölçüleri garanti, yeniden işleme

ve hurda maliyetleri olan geleneksel kalite anlayışındaki üretici odaklı (producer-oriented) kalite tanımlamasıyla tamamen çelişmektedir. Kalite geliştirme terimi geleneksel anlayışta "problem çözme", Taguchi (modern kalite) anlayışında ise "değişkenliği azaltma" anlamına kullanılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında Taguchi anlayışının amacı kaliteyi kontrol etmek değil, kontrol edilemeyen değişkenlere (KED'e) karşı daha duyarsız olan kontrol edilebilen değişkenlerin (KD'in) değerlerini belirleyerek maliyetleri azaltmaktır.

Yüksek kaliteli ürünleri daha düşük maliyetle üretmek, pazar payını artırmanın en etkin yoludur. Çünkü tüketici hem kalitenin yüksek olmasını, hem de fiyatın düşük olmasını ister. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, fiyatın referans olarak alınmadığı durumlarda kalitenin hiç bir anlam taşımayacağıdır. Rekabet ortamında "kalitenin asla yeterince iyi, imalat maliyetlerinin de yeterince düşük olmadığı" stratejisi benimsenerek daima ürün imalat maliyetlerini azaltmak ve kaliteyi geliştirmek amaçlanmalıdır.

Günümüzde kalitenin hassas bir şekilde ölçülmesinde ve geliştirilmesinde kullanılabilecek en etkin yöntemlerin TY olduğu söylenebilir. TY, istatistik ve kalite anlayışının bütünleştirilmiş bir ifadesidir (Şekil 3.1) (Roslund, 1989). Ancak, ortogonal diziler (OD) ve varyans analizi gibi istatistiksel teknikleri kullanmasına rağmen TY istatistiksel bir yöntem değildir (Lin, et al., 1990). İstatistiksel yöntemler ile TY arasındaki temel fark;

- İstatistiksel yöntemler bir olayın meydana gelme nedenlerini,
- TY bu olayın meydana gelebilmesi için neler yapılması gerektiğini

açıklamasıdır<sup>1</sup>. Kalitenin ve verimliliğin geliştirilebilme-

---

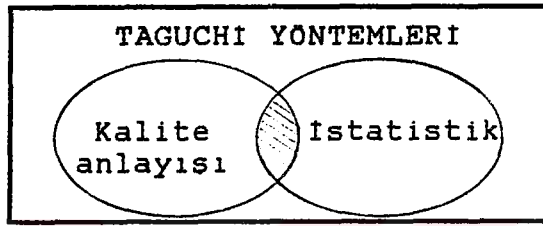
<sup>1</sup> İstatistiksel yöntemler (regresyon analizi gibi) ürün veya sürecin iki alt sistemi arasında kurulacak ilişkinin türünü belirtir. Bu ilişkinin nasıl sağlanacağını göstermez. TY ise iki alt sistem arasındaki bu ilişkinin nasıl sağlanacağını gösterir.



si için istatistiksel yöntemlerin ve TY'nin birlikte kullanılması bir zorunluluktur. Ancak, bu tekniklerden etkin bir şekilde yararlanabilmek için aralarındaki farklılıkların bilinmesi gereklidir. İstatistiğin bilimsel çalışmalar için gerekli bir amaç değil, bir araç olduğuna inanan ve bunu uygulayan Taguchi;

- Kalite nasıl değerlendirilebilir?
- Kalite nasıl geliştirilebilir?

soruları üzerinde hassasiyetle durmuştur.



Şekil 3.1 Taguchi yöntemlerinin mantığı

Kaliteyi değerlendiremedikçe geliştirmek mümkün değildir. Değerlendirme için benimsenecek ölçüt kalitede meydana gelebilecek en küçük değişimi dahi belirleyebilmelidir. Bu nedenle, kullanılacak ölçütün sürekli olması ve benimsenen kalite anlayışını temsil edebilmesi önemlidir. Taguchi (1987), bu özellikleri sağlayan değerlendirme ölçütünün kkk olduğunu belirtmektedir.

Kalitenin geliştirilmesi ise deney tasarım yöntemleri ile yapılabilir<sup>2</sup>. Ancak, en az çalışma ile en fazla bilgi toplamak amaçlandığından kullanılacak deney planlarının seçimi oldukça önemlidir. Taguchi'nin önerdiği istatistiksel deney planları, yüksek kaliteli ürünlerin daha ucuza üreti-

<sup>2</sup> İstatistiksel olarak tasarlanmış deneylerin endüstride uygulanması yeni bir olay değildir. Bu deneyler elektronik devre tasarımcıları ve zirai araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak, uygulamaların çoğu performans karakteristiğinin ortalama değerini eniyilemeye yöneliktir. Oysa, öncelikle değişkenliğin kontrol edilmesi gerekmektedir. Öte yandan, değişkenliği kontrol etmek ortalama kontrol etmekten daha zor ve pahalıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan parametre tasarım deneylerinin amacı ise değişkenliği ve ortalama kontrol etmektir.

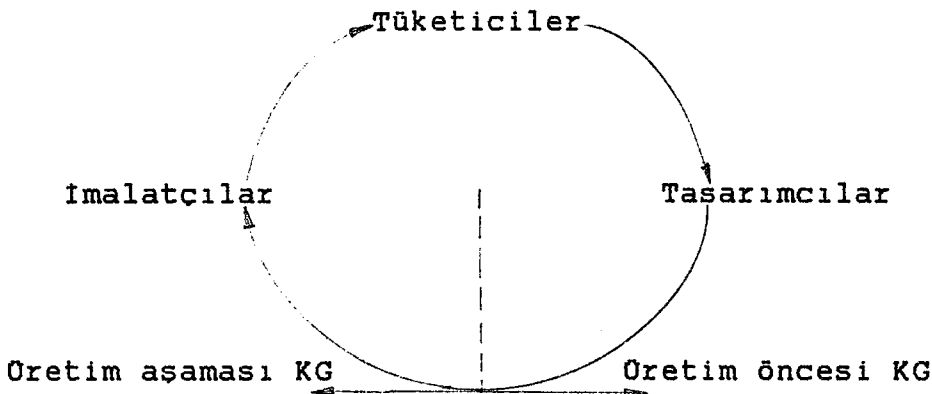
lebilmesine ve böylece de yaşam kalitesinin yükseltilmesine önemli katkılar sağlamıştır. Taguchi, istatistiksel deney planlarını 4 farklı amaç için kullanmıştır (Kackar, 1986):

- Performans karakteristiği üzerinde KED'in etkilerini enküçükleyen KD'in seviyelerini belirlemek,
- Kaliteden ödün vermeksizin maliyetleri azaltacak KD'in seviyelerini belirlemek,
- Performans karakteristiğinin ortalamasını etkileyen, değişkenliğini etkilemeyen KD'i belirlemek,
- Performans karakteristiği üzerinde etkileri bulunmayan KD'i belirlemek.

Bu açıklamalar doğrultusunda Taguchi'nin kalite anlayışı; sebzeleri az pişmiş olmasına rağmen sağlığa yararlı olan bir çorbaya, kullandığı yöntemler de bu çorbanın yapılabilmesine olanak sağlayan araçlara benzetilebilir. Bununla birlikte, TY'nin etkinliği büyük ölçüde tüketicilerin ürüne ilişkin beklentilerinin, ekonomik ve fonksiyonel hususların KFY ile tasarım ve imalat görevlilerine iletilmiş olmasına bağlıdır.

TY ve KFY birbirlerini tamamlayan kalite geliştirme yöntemleridir. KFY ürünün (sürecin) tüketici gereksinimleri ile olan ilişkilerini belirlemeye yarar. TY ise gerçekte mevcut olan ürün (süreç) ilişkilerini, bunların doğasını ve siddetini belirlemede kullanılır (Sriraman, et al., 1990).

Ross'a (1988 a) göre daha etkin ve rekabet edebilir konuma gelebilmek için tüketiciden başlayıp tasarımcı, imalatçı ve tekrar tüketiciye dönen sürekli bir bağlantının (kalite çevriminin) kurulması gerekir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Kalite çevrimi

Bu sistemde olan herhangi bir olay tüketicileri olumlu veya olumsuz yönde etkiler. Ürünün biçimi ve fonksiyonları tasarımcılar, üretilmesi ise imalatçılar tarafından yapılır. Üretilen ürünün fonksiyonlarını istenilen şekilde yerine getirebilmesi ise tasarımcı ve imalatçıların uyumlu çalışmasını gerektirir.

### 3.2 Kalite Karakteristiği ve Performans Değişkenliği İlişkisi

Kalite karakteristiği (quality characteristic) belirlenip ölçülemedikçe ürün kalitesi geliştirilemez. Bir ürünün birden fazla kalite karakteristiği olabilir. Bu karakteristiklerin her biri ürünün ayrı bir özelliğini temsil eder. Sürekli kalite geliştirme programının amacı, bu karakteristiklerin hedef değerleri civarındaki değişkenliğini enküçüklemektir. Bununla birlikte, bu karakteristiklerin hepsi aynı öneme sahip olmadığından, hepsinin birden geliştirilmesi ne ekonomik, ne de gereklidir. Tüketici gereksinimlerini karşılayan birincil kalite karakteristikleri bir ürünün **performans karakteristikleri** (performance characteristics) olarak alınabilir. TV'deki resmin netliği, performans karakteristiğinin bir örneğidir. Performans karakteristiğinin ideal değeri **hedef değer** (target value)<sup>1</sup> olarak adlandırılır. Yüksek kaliteli bir ürün, ekonomik ömrü süresince farklı çalışma koşulları altında fonksiyonunu daima hedef değer civarında yerine getirir. Buna göre farklı hava koşullarında görüntüsü değişen TV'nin düşük kaliteli olduğu söylenebilir.

Performans karakteristiğinin hedef değer civarındaki değişkenliği **performans değişkenliği** (performans variation) olarak adlandırılır. Hedef değer civarında daha küçük performans değişkenliği, daha iyi kalite anlamına gelir. Performans karakteristiğinin etkin olarak değerlendirilebilmesi için sürekli bir ölçekle ölçülmesi gereklidir.

---

<sup>1</sup> Bir ürünün hedef değeri tolerans aralığının orta değeri olabileceği gibi bu aralığın herhangi bir değeri de olabilir.

Cünkü, ancak bu şekilde kalitedeki çok küçük değişimler belirlenebilecektir. Bununla birlikte, performans karakteristiğinin doğasından veya ölçüm yöntemi sınırlamalarından dolayı bazen sürekli ölçekle ölçüm yapılamamaktadır. Bu gibi durumlarda ölçümler sadece "iyi" veya "kötü" olarak değil "zayıf", "orta", "iyi" ve "mükemmel" gibi sıralı bir şekilde alınırsa yaklaşık olarak sürekli bir dağılım elde edilebilir. Böyle bir dağılımla kalitede oluşabilecek çok küçük değişimler belirlenemeyebilir. Ancak, bu ölçeğin "iyi" veya "kötü" şeklindeki bir ölçeğe göre de oldukça etkin olduğu söylenebilir.

### 3.3 Kalite Kayıp Fonksiyonu (kkf)

Saatçioğlu (1976) karar kuralını eniyi şekilde tatmin eden yaklaşımın mümkün olan alternatif tasarım yaklaşımlarının eniyisi olarak seçilebileceğini ve bu amaçla kullanılacak karar kurallarından birinin de beklenen kayıp fonksiyonunun enküçüklenmesi olarak tanımlanabileceğini belirtmektedir. Aynı şekilde Taguchi yöntemlerinde de en uygun tasarım değerlerinin belirlenmesi, eniyilenecek bir ölçütü yani beklenen kayıpların miktarını veren kkf'nu kullanmayı gerektirir. Beklenen kayıp kavramı değişkenliğin azaltılması problemini somut bir hale getirir. Ayrıca farklı performans karakteristiklerindeki değişkenlikleri karşılaştırmak için genel bir temel teşkil eder.

Taguchi kalite anlayışının dayandığı temel nokta kalite kayıp fonksiyonudur. kkf tüketici memnuniyetsizliğinin derecesini belirleyen sürekli bir fonksiyondur. Çeşitli aşamalardan oluşan imalat sürecinde her aşama; bir önceki aşamaya göre tüketici, bir sonraki aşamaya göre de üretici konumunda kabul edilerek performans değerlendirilmesinde kkf'ndan yararlanılabilir. kkf, üretimin dağılım biçimine göre parasal açıdan değerlendirilebilmesini sağlar; buna göre dağılımın orta değeri en az, uç değerleri ise en fazla kayıba neden olmaktadır. Kayıp, tüketici memnuniyetsizliği olabileceği gibi, üreticiye gelen ilave işçilik, malzeme,

enerji ve garanti maliyetleri de olabilir. Yanısıra, firma adının kötü bir şöhret kazanması ve uzun dönemde pazar payındaki azalmalar da kayıp olabilir.

Hedeften uzaklaşıldıkça kalitede meydana gelen bozulmalar geometrik olarak artmakta ve oluşan kayıplar parçanın kendi değerinden daha yüksek miktarlara ulaşabilmektedir. Örneğin, ürünlerdeki bir alt montajın kalitesinin/güvenilirliğinin düşük olması, ürünün tamamının bozulmasına neden olabilmektedir.

Ürün performansı, güvenilirliği ve sürekliliğinin azalmasından dolayı en fazla zararı tüketicilerin ve dolayısıyla da toplumun gördüğü unutulmamalıdır. Düşük kalite, tüketiciyi beklentilerini karşılayacak başka ürünler aramaya yönelteceğinden, kalitesizliğin maliyeti sonsuzdur. Öte yandan günümüze kadar, hatta günümüzde bile, spesifikasyon sınırları içinde imalat olduğu sürece hiç bir kayıp olmadığını, spesifikasyon sınırları dışındaki ürünlerin ya yeniden işlenmesini veya hurdaya ayrılmasını savunan geleneksel uygunluk odaklı kalite anlayışında, tüketicilerin kayıpları hiç bir zaman dikkate alınmamaktadır. Oysa, tüketici kayıplarının aynı zamanda üretici kaybı olduğu açıklıkla görülmektedir. İşte bundan dolayı, ürünler, "sağlam" veya "bozuk" gibi iki grupta ele alınan bir basamak fonksiyonu ile değil, uygun seçilen bir sürekli fonksiyon ile değerlendirilmelidir.

Performans karakteristiğinin değeri  $Y$  ile,  $Y$ 'nin hedef değeri de  $\tau$  ile gösterilsin.  $Y$ 'nin  $\tau$ 'dan sapması istenmeyen bir durumdur.  $\Delta$  gibi bir tolerans var ve  $|Y-\tau|>\Delta$  olan ürünler tüketici tarafından kabul edilmiyorsa,  $\Delta$  tüketici toleransını,  $\tau-\Delta$  ile  $\tau+\Delta$  ise tüketici spesifikasyon sınırlarını gösterir.

Performans karakteristiği  $Y$  olan bir ürünün herhangi bir tüketiciye verdiği kayıpların parasal değeri  $K(Y)$  ile gösterilir ve  $Y$ 'nin kkf olarak adlandırılır. Benimsenen kalite yaklaşımına göre kullanılacak kkf ve beklenen kayıp ifadeleri de farklılık arz etmektedir.

Geleneksel yaklaşımda, Grant ve Leavenworth (1980)'un da belirttikleri gibi, kkf'nun;

$$l(Y) = \begin{cases} 0, & \tau - \Delta \leq Y \leq \tau + \Delta \\ A, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.1)$$

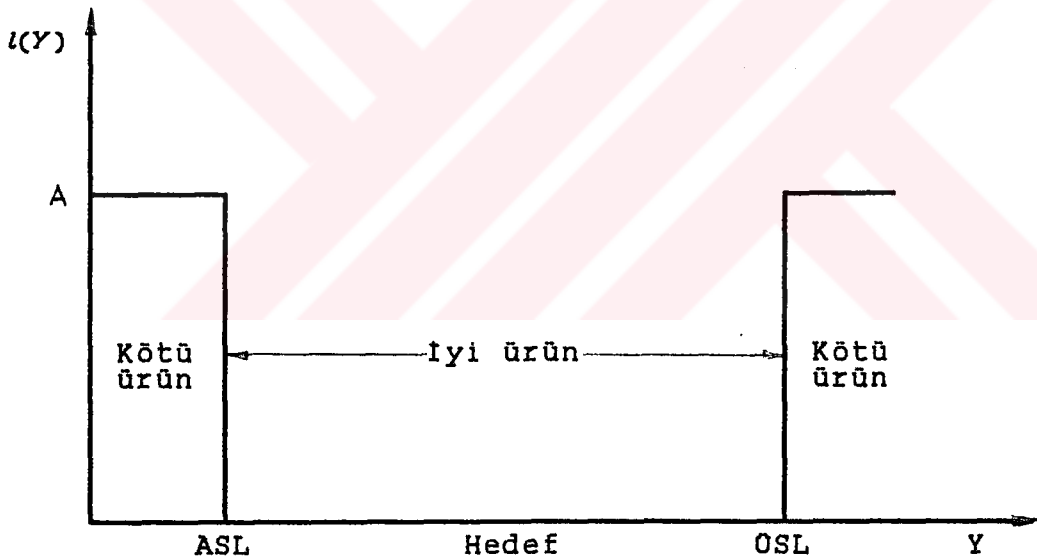
sekinde bir basamak fonksiyonu olduğu kabul edilir (Şekil 3.3). Burada A, tüketicinin eline geçmiş hatalı (spesifikasyon sınırları dışında olan) bir ürünü onarma veya değiştirme maliyetidir. Bu yaklaşıma göre beklenen kayıplar;

$$p = 1 - P[\tau - \Delta \leq Y \leq \tau + \Delta] \quad (3.2)$$

hatalı üretim olasılığı olmak üzere,

$$B[l(Y)] = pA \quad (3.3)$$

ile ifade edilir (Fathi, 1990).



Şekil 3.3 Geleneksel "basamak" kayıp fonksiyonu

Taguchi (1986), geleneksel yaklaşımın aksine, Şekil 3.4'deki gibi sürekli bir fonksiyon kullanmayı önermiştir. Kayıp fonksiyonunun genel biçimi,

$$l(Y) = k \sum_{i=1}^n (Y_i - \tau)^2 = k(\sigma^2 + (\bar{Y} - \tau)^2) \quad (3.4)$$

sekinindedir. Ancak, gerçek kayıp fonksiyonunu analitik olarak belirlemek son derece güç veya olanaksız olduğundan genellikle yaklaşık bir fonksiyon olan karesel kayıp fonk-

siyonu kullanılır<sup>1</sup>. Başka bir anlatımla, uygulamada

$$l(Y) = k(Y - \tau)^2 \quad (3.5)$$

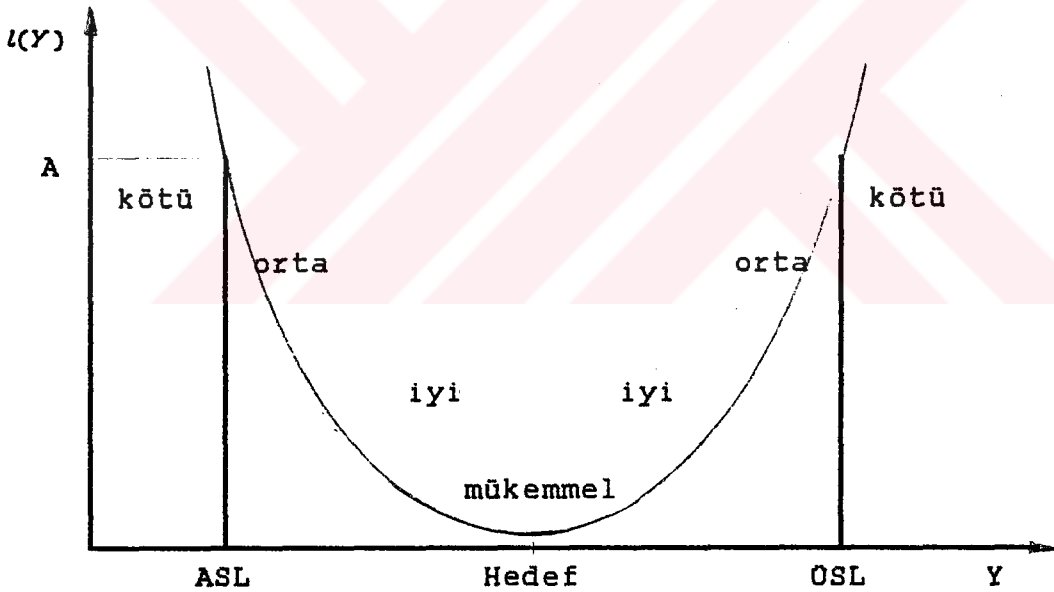
yaklaşık karesel kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır (Ross, 1988 a; ASI, 1988). Esitlikteki  $k$  parametresi hedeften sapan bir ürünü tekrar hedef değerine getirebilmek için imalatçının alacağı önlemlerin maliyetini gösterir. Hedeften her iki yönde olacak uzaklaşmaların

$$l(\tau + \Delta) - l(\tau - \Delta) = A - k\Delta^2$$

aynı anlamı taşıdığı dikkate alınarak,

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (3.6)$$

ifadesiyle belirlenir. Kolay anlaşılabilmesi için  $l(Y)$ 'nin  $\tau$  etrafında simetrik olduğu (nominal değer eniyi) kabul edilmiştir.



Sekil 3.4 Modern (sürekli) kayıp fonksiyonu

$Y$ 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu  $f(y)$  ile gösterilirse, bu yaklaşıma göre birim ürün başına beklenen kayıplar;

<sup>1</sup> Pignatiello (1988) karesel kayıp fonksiyonunun gerçek kayıp fonksiyonuna Taylor açılımı yaklaşımının kısaltılmış basit bir şekli olarak düşünülebileceğini belirtmektedir. Fathi (1990) ise bu fonksiyonunun kullanımının, gerçek kayıp fonksiyonunun analitik biçiminin bilinmediği durumlarda sınırlı olması gerektiğini vurgulamıştır.

$$B[l(Y)] = \int_{-\infty}^{\infty} l(y)f(y)dy \quad (3.7)$$

ifadesiyle belirlenir.

kkf'nun biçimi performans karakteristiği Y'nin özelliğine göre belirlenir. Y'nin özelliğine göre kullanılan kkf bazı durumlarda simetrik, bazı durumlarda da simetrik olmayan bir yapı gösterir. Bu çalışmada, simetrik ve simetrik olmayan kkf'larından sadece üçüne değinilecektir. Bunlar;

- Nominal değer eniyi (nominal is best),
- Daha küçük daha iyi (the smaller the better),
- Daha büyük daha iyi (the larger the better)

olarak isimlendirilmektedir<sup>1</sup>. Simetrik olan "nominal değer eniyi" durumuna ilişkin açıklamalar yukarıda verilmiştir.

Simetrik olmayan kkf'larından ilki "daha küçük daha iyi" durumu için yazılabilir. "Daha küçük daha iyi" durumu için kayıp fonksiyonunun genel biçimi,

$$l(Y) = k \sum_{i=1}^n \frac{Y_i^2}{n} = k(\bar{Y}^2 + \sigma^2) \quad (3.8)$$

seklindedir. Y negatif olmayan bir dağılıma sahip ve hedef değeri de sıfır ise kkf'nun simetrik fonksiyonlar için yazılan yaklaşık biçiminden hareketle;

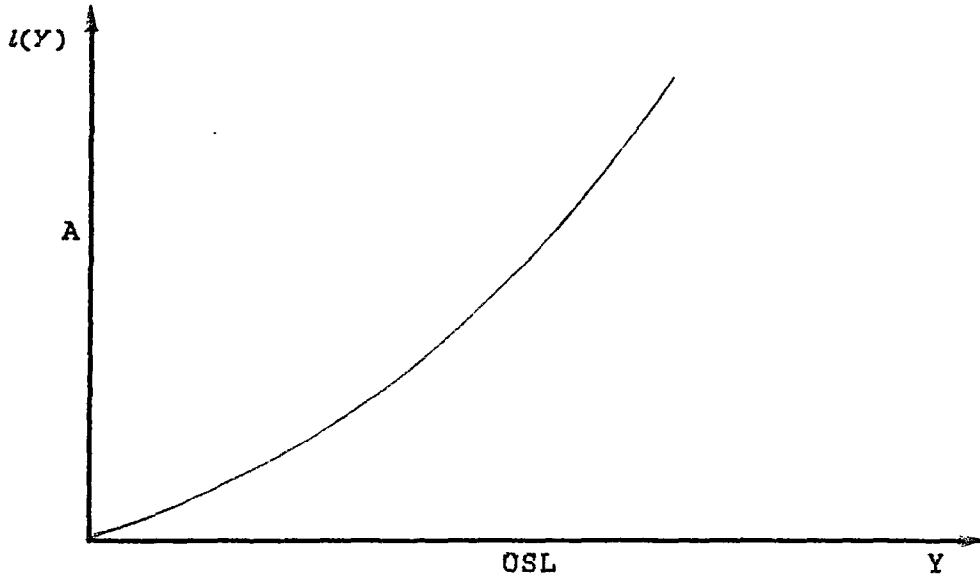
$$l(Y) = kY^2 \quad (3.9)$$

olarak belirlenir (Ross, 1988 a; ASI, 1988). Uygulamada ise eşitlik 3.8'deki genel biçim yerine eşitlik 3.9'daki yaklaşık biçimi kullanılan bu fonksiyon Şekil 3.5'de verilmiştir. Fonksiyon incelendiğinde, hedeften (sıfırdan) uzaklaşıldıkça kayıpların arttığı görülmektedir.

---

<sup>1</sup> Sözelimi, kalite karakteristiği bir otomobil kapı çerçevesinin genişliği ve bunun hedef değeri de 86 cm ise, 86 cm'ye en yakın ürün eniyi üründür (nominal değer eniyi). Kalite karakteristiği bir üründe istenmeyen madde miktarı ise, istenmeyen madde miktarı enaz olan ürün eniyi üründür (daha küçük daha iyi). Kalite karakteristiği bir ürünün kırılmalara karşı dayanımı ise, en fazla dayanıma sahip ürün eniyi üründür (daha büyük daha iyi).





Şekil 3.5 "Daha küçük daha iyi" kayıp fonksiyonu

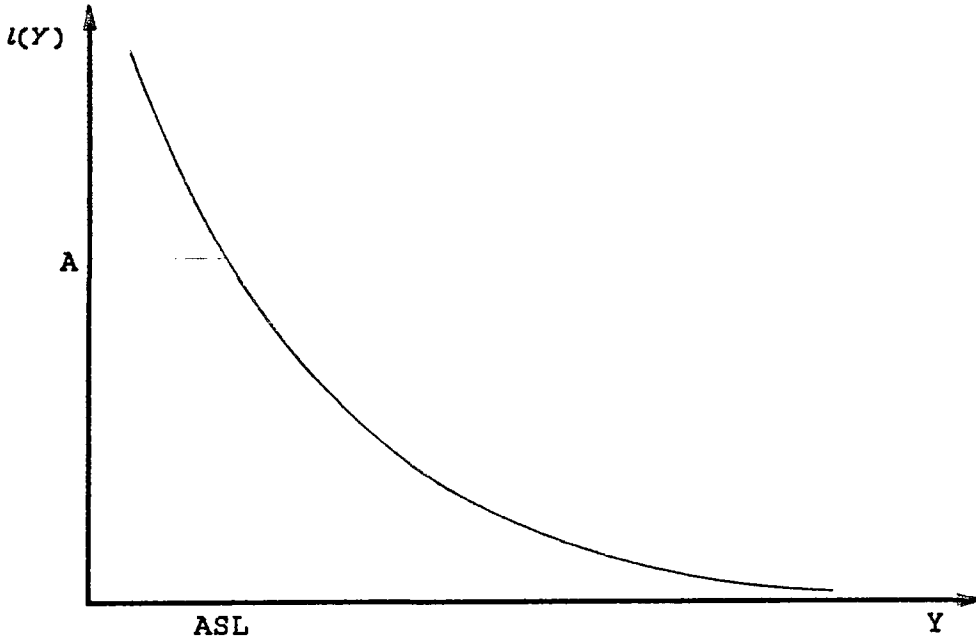
Simetrik olmayan kkf'lerinden ikincisi "daha büyük daha iyi" durumu için yazılabilir. "Daha büyük daha iyi" durumu için kkf'nun genel biçimi,

$$l(Y) = k \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) = k \left( \frac{1}{\bar{Y}^2} \left( 1 + 3 \frac{\sigma^2}{\bar{Y}^2} \right) \right) \quad (3.10)$$

şeklindedir. Y negatif olmayan bir dağılıma sahip ve hedef değeri de sonsuzdur. Y'nin tersi alındığında hedef değer sıfır olur. Bu değer simetrik fonksiyonlar için yazılan yaklaşık karesel fonksiyonda yerine koyulursa,

$$l(Y) = k \frac{1}{Y^2} \quad (3.11)$$

olarak elde edilecektir (Ross, 1988 a; ASI, 1988). Uygulamada ise eşitlik 3.10'daki genel biçim yerine eşitlik 3.11'deki yaklaşık biçimi kullanılan bu fonksiyon Şekil 3.6'da verilmiştir. Fonksiyon incelenirse performans karakteristiği sıfırdan uzaklaştıkça kayıpların azaldığı görülecektir. Başka bir anlatımla, bu fonksiyonun "daha küçük daha iyi" durumunun özel bir şekli olduğu söylenebilir.



Şekil 3.6 "Daha büyük daha iyi" kayıp fonksiyonu

Performans karakteristiğinin sürekli bir ölçükle ölçülemeyen durumlarda yukarıda verilen  $kkf$ 'leri kullanılamaz. Bu gibi durumlarda  $p$  ilgilenilen kusurlu oranı olmak üzere,

$$l(Y) = k \frac{p}{1-p} \quad (3.12)$$

kalite kayıp fonksiyonu kullanılır (Phadke, 1989).

Basamak fonksiyonuna göre spesifikasyonlar arasında üretilen bir ürün tüketiciye herhangi bir kayıp getirmez. Sürekli fonksiyona göre ise benzer şekilde üretilen bir ürün, hedeften uzaklaştığı ölçüde tüketicinin kaybının arttığını vurgulayarak tüketiciyi koruyan bir yapı arzeder. Bununla birlikte, rekabet ortamında tüketiciler genellikle daha düşük kayıp olasılığına sahip ürünleri tercih edeceklerinden dolayı pazar payında oluşabilecek kayıpları önceden haber vermesiyle de üreticiyi koruyan bir yapı arzetedir.

$kkf$ 'nin diğer bir uygulama alanı da üretim aşaması KG çalışmalarında sık sık karşılaşılan sürece ne kadar sıklıkta müdahale yapılacağı sorusunun belirlenmesidir. Bilinen

en yaygın müdahale şekli, üretim anında sürecin veya makinanın kontrol edilerek düzeltilmesidir. Muayene ve düzeltmenin maliyeti bilindiğinden kkf yardımıyla müdahalelerin düzeyi ve miktarı standart hale getirilebilir.

### 3.4 Orün Geliştirme Çevrimi

Orün geliştirme çevrimi birbirini tamamlayan üç aşamaya ayrılabilir:

- Orün tasarımı,
- Süreç tasarımı,
- İmalat.

Orün tasarım aşamasında mühendisler tarafından malzeme spesifikasyonları, bileşenler, görünüş ve özellikleri içeren tam bir ürün tasarım spesifikasyonları belirlenir. İkinci olarak, süreç mühendisleri bu ürünün imal edileceği sürecin tasarımını yaparlar. Süreç tasarımında yeni ürünü üretebilmek için ya yeni bir süreç tasarımı veya mevcut süreçte bir takım değişiklikler yapılır. Son olarak, imalat mühendisleri bu süreci kullanarak yeni ürünü üretirler.

Genel olarak ürün performansı çevresel değişkenler, ürün bozulması ve imalat hatalarından etkilenir. Orün bozulması, ürünün zamanla fonksiyonunu yapamaz hale gelmesidir. İmalat hataları ise, imal edilen ürünün KD'inin nominal değerlerinden sapmasına neden olur. İmalat sürecindeki kaçınılmaz belirsizlikler nedeniyle oluşan bu hatalar, ürün performans değişkenliğinin birimler arasında farklı olmasının asıl nedenidir. Orün geliştirme çevriminin bütün aşamaları ürünün maliyet ve kalitesini etkilemesine rağmen performans değişkenliği ve imalat maliyetlerinin miktarı büyük ölçüde ürün ve süreç tasarım aşamasında belirlenir. Çizelge 3.1'de de gösterildiği gibi çevresel değişkenler ve ürün bozulmaları nedeniyle oluşan ürün performans değişkenliği, sadece ürün tasarım aşamasında önlenmektedir (Kackar, 1986).

İmalat hataları daha çok imalat sürecinin tasarımı aşamasında şekillenir. İyi tasarlanmamış bir süreçte, imalat hatalarını azaltmak için süreç kontrol çalışmalarının sık-

laştırılması gerekir. Oysa bu çalışmalar, maliyetlerin artmasına neden olur. Bu yüzden, hem sürecin kontrol edilmesine duyulan gereksinim, hem de imalat hataları azaltılmalıdır. Bu ise, süreç tasarımının geliştirilmesiyle mümkündür. Cizelge 3.1 Değişkenlik kaynaklarına karşı alınacak önlemlerin ürün geliştirme aşamalarına göre dağılımı

Ürün geliştirme aşamaları	Değişkenlik kaynakları		
	Çevresel değişkenler	Ürün bozulması	İmalat hataları
Ürün tasarımı	+	+	+
Süreç tasarımı	*	*	+
İmalat	*	*	+

+ : Önlem alınabilir                      \* : Önlem alınamaz

Performans karakteristikleri ile birlikte ürün (süreç) KD'inin bütün spesifikasyonları ideal değer terimleriyle ifade edilmelidir. Sanayide bu spesifikasyonları yalnızca tolerans aralığı terimleriyle ifade etmek oldukça yaygındır. Bu durum, imalatçıları sadece tolerans aralığında ürün üretmek gibi yanlış yönlendirebilir. Ürünlerin bütün KD'i tolerans aralığında olsa bile, değişkenler arasındaki bağımlılıktan dolayı ürün fonksiyonlarını uygun bir şekilde yerine getiremeyebilir. Bir ürün, bütün KD'i hedef civarında üretildiğinde fonksiyonunu en iyi şekilde yerine getirebilir. Ayrıca, ürün KD'inin ideal değerlerinin bilinmesi sürekli kalite geliştirmeyi özendirir.

Taguchi, ürün (süreç) KD'inin nominal değerlerini ve toleranslarını belirlemek için üç adımlı bir yaklaşım önermiştir (Taguchi, 1987; Taguchi et al., 1989):

- Sistem tasarımı,
- Parametre tasarımı,
- Tolerans tasarımı.

Sistem tasarımı, ilgilenilen ürünün temel fonksiyonel prototip modelini üretmek için bilimsel ve mühendislik bilgilerinin kullanımını gerektirir ve bir takım yenilikleri

içerir<sup>2</sup>. Ürünün (sürecin) KD'inin başlangıç değerleri prototip modelinden belirlenir. Sistem tasarımı hem tüketici gereksinimlerinin, hem de imalat süreci gereksinimlerinin anlaşılması gerektirir. Bir ürün tüketicinin isteklerine göre tasarlanmamışsa tüketici gereksinimlerini karşılamayacaktır. Benzer şekilde tasarlanan yeni ürünün üretilebilmesi de imalat süreci gereksinimlerinin ve kapasitesinin anlaşılmasıyla mümkündür.

Geleneksel anlayışta sistem tasarımından sonra genellikle tolerans tasarımı aşamasına geçilmekte, maliyetlerin azaltılmasında ve kalitenin geliştirilmesinde oldukça etkili olan, parametre tasarımı aşaması ihmal edilmektedir. Oysa, tolerans tasarımı, parametre tasarımı aşamasında değişkenliğin yeterince azaltılmadığı durumlarda yapılır (Byrne and Taguchi, 1987). Taguchi'nin önerdiği bu üç aşamalı yaklaşım, biri diğerini tamamlayan bir yapıdadır. Sistem tasarımı daha çok kavramsal yönlü bir faaliyet olduğu için mühendislik deneyimi gerektirir ve istatistiksel yöntemlerin bu aşamadaki rolü önemsiz derecededir. Fakat, bir eniyileme süreci olan parametre ve tolerans tasarımı aşamalarında istatistiksel tekniklerden yararlanılmaktadır. İzleyen kesimlerde parametre ve tolerans tasarımları üzerinde durulacaktır.

### 3.5 Parametre Tasarımı

Parametre tasarımı, değişkenlik kaynaklarını kontrol etmektense, değişkenlik kaynaklarının performans değişkenliği üzerindeki etkilerini azaltarak mühendislik tasarımlarını geliştirmede oldukça etkin bir yöntemdir. Bu nedenle, performans değişkenliğini enküçükleyen ürün (süreç) KD'inin değerlerini belirlemek için yapılan araştırmalar parametre

---

<sup>2</sup> Sözcüğü, bir elektronik devre geliştirilirken, (devreyi voltaj dalgalanmalarına karşı korumak için) wheatstone köprüsü kullanılarak prototip modeli üretilebilir. Bir iş merkezi tasarımında ise torna, freze, matkap,...vb gibi bulunması gereken teçhizatlar belirlenebilir. Ancak, KD'in eniyi değerleri belirlenmez.

tasarımı olarak adlandırılır<sup>1</sup>.

Bir üründen (süreçten) istenen fonksiyon, KD'in değerlerinin farklı birleşimleri kullanılarak elde edilebilir. KD'in farklı birleşimlerinde performans değişkenliği de farklı olabilecektir. İşte bu değişkenlik hem imalat, hem de servis maliyetlerini artırır. Öte yandan "parametre tasarımı" ifadesi, mühendislikte "ürün karakteristikleri" yerine "ürün parametreleri" teriminin kullanılması geleneğinden kaynaklanmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da KD'in eniyi değerlerinin belirlenmesine ilişkin yapılan çalışmalar parametre tasarımı olarak adlandırılmaktadır. Parametre tasarımı ile;

- Kaliteli tasarım,
- Maliyetlerde azalma,
- Daha kısa ürün geliştirme çevrimi,
- Gecikme ve israfın önlenmesi,
- Verimlilik artışı

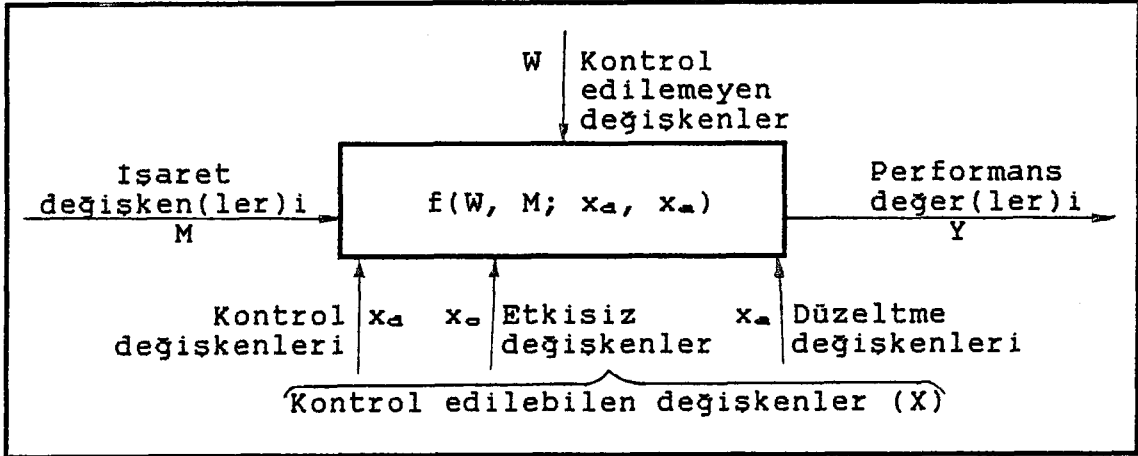
sağlanabilir.

### 3.5.1 Tasarım eniyileme problemi

Taguchi and Phadke (1984) ürün (süreç) girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi Şekil 3.7'deki blok diyagramı ile ifade etmişlerdir (Phadke, 1986). Bu diyagramın performans değer(ler)i (çıktısı) Y ile gösterilir. Performansı etkileyen değişkenler 3 grupta incelenebilir:

---

<sup>1</sup> Sistem tasarımı aşamasında üründe (süreçte) bulunmasına karar verilen ve başlangıç değerleri tesbit edilmiş olan elemanların eniyi değerleri belirlenir. Örneğin, devreyi voltaj dalgalanmalarına karşı eniyi şekilde koruyacak wheatstone köprüsü dirençlerinin biri 5, diğeri 12 ohm olarak belirlenebilir. İş merkezinden en fazla gelir elde edebilmek için 3 freze, 2 torna, 1 matkap,..vb gibi tezgahların bulunması gerektiği belirlenebilir.



Şekil 3.7 Bir ürünün (sürecin) blok diyagramı

1. **İşaret Değişkenleri (M):** Hedef performans değerini elde edebilmek için değeri kullanıcı/operatör tarafından belirlenen değişkenlerdir<sup>1</sup>. İşaret değişkenleri (signal variables) tasarımcı tarafından seçilir. Bazen iki veya daha fazla işaret değişkeni aynı birleşimde kullanılabilir. Bazı durumlarda ise işaret değişkenleri sabit değer alır (tasarımcı tarafından başlangıçta belirlenir, kullanıcının müdahalesi olamaz).

2. **Kontrol Edilebilen Değişkenler (KD):** Taguchi'nin tasarım parametreleri (design parameters) kavramı ile ifade ettiği bu değişkenlerin değerleri tasarımcı tarafından belirlenir. KD bir parçanın boyutları, malzemesi veya bir devrenin çıkış voltajının seçimi gibi basit önlemlerle kontrol edilebilen değişkenlerdir. KD;

- $x_d$  varyansı ve ortalamayı etkileyen değişkenler,
- $x_a$  sadece ortalamayı etkileyen değişkenler,
- $x_o$  ortalamayı ve varyansı etkilemeyen değişkenler olmak üzere, üç elemanlı bir küme olarak

$$X = \{x_d, x_a, x_o\}$$

<sup>1</sup> Sözcüğümlü, direksiyon açısı otomobil direksiyon mekanizması için veya hız kontrol ayarı da fan için bir işaret değişkenidir.

şeklinde yazılabilir ve incelenebilir<sup>1</sup> (Pignatiello, 1988). Taguchi,  $x_a$  değişkenlerini kontrol değişkenleri,  $x_m$  değişkenlerini düzeltme değişkenleri ve  $x_o$  değişkenlerini de etkisiz değişkenler olarak nitelemektedir. KD'i  $X=\{x_a, x_m, x_o\}$  olarak ayırmanın asıl nedeni kontrol değişkenleri ( $x_a$ ) ile ürün (süreç) değişkenliğini enküçükledikten sonra düzeltme değişkenleri ( $x_m$ ) ile performans karakteristiğini hedef değerine yaklaştırmaktır. Yanısıra, etkisiz değişkenlerin ( $x_o$ ) en ekonomik değerlerinin belirlenmesidir. Böylece hem ortalama hedefe yaklaştırılacak, hem değişkenlik enküçüklenecek ve hem de maliyetler enazlanacaktır. Bu ise çok yönlü bir eniyileme anlamına gelmektedir.

Düzeltilme Değişkenleri ( $x_m$ ), işaret değişkeni (M) ile ilgilenilen performans değeri (Y) arasındaki arzulanan fonksiyonel ilişkinin sağlanabilmesi için kolaylıkla ayarlanabilen değişkenlerdir. KD'in eniyi değerleri bir kez belirlendikten sonra ürünün (sürecin) hedef değerinde yapılacak olan mâkul değişimler (boyut büyütme, küçültme gibi) sadece düzeltme değişkenlerinin değerleri değiştirilerek gerçekleştirilebilmektedir.

Kontrol edilebilen değişkenlerin herbiri birden fazla değer alabilir. Bu değerler seviyeler veya konumlar (levels) olarak adlandırılır. Bir değişkenin alabileceği farklı değerler, o değişkenin değer kümesi olarak adlandırılmaktadır<sup>2</sup>. Tasarım eniyileme çalışmalarının

---

<sup>1</sup> Hunter (1985) bunlara ilave olarak, sadece varyansı etkileyen değişkenlerin ( $x_v$ ) dördüncü bir bileşen olarak dikkate alınmasını önermektedir. Buna göre  $X=\{x_a, x_m, x_v, x_o\}$  olmak üzere dört elemanlı bir küme ile ifade edilmelidir.

<sup>2</sup> Örneğin, bir elektronik devrede kullanılacak reçinenin sıcaklığı devrenin performans karakteristiğini etkileyen değişkenlerden biri olsun. Bu değişkenin değer kümesi 25, 37 ve 50 °C ise gösterimde standardizasyon ve işlemlerde kolaylık olması için bu değerler amaca uygun olarak kodlanır ve reçine sıcaklığı değişkeninin seviyeleri olarak anılır.



amacı kontrol edilebilen değişkenlerin eniyi değerlerini belirlemektir. Eniyi değerleri belirlemede birden fazla ölçüt kullanılabilir.

**3. Kontrol Edilemeyen Değişkenler (KED):** Örün (süreç) kullanım ortamındaki sıcaklık, nemlilik, rüzgar, gürültü, toz, titreşim, ürünün aşınması, özelliğini kaybetmesi, hammadde ve bileşenlerin toleranslarındaki değişkenlik ...vb gibi kontrolleri ya çok zor veya mümkün olmayan değişkenlerdir. Bunlar ilgilenilen performans değer(ler)i üzerinde bozucu etkiye sahiptir. Bu değişkenlerin seviyeleri bir üründen diğerine, bir çevreden diğer çevreye ve bir andan diğer ana değişir. Phadke'ye (1986) göre KED'in gerçek değerleri değil, sadece istatistiksel karakteristikleri bilinir. Bundan dolayı performans değişkenliğine neden olan en önemli KED belirlenip ortadan kaldırılamaz. Bunun yerine, ürünü KED'e karşı daha az duyarlı yapmak için KD'in değerlerinde ayarlamalar yapılır. Yani, kaliteyi olumsuz yönde etkileyen KED'i bulup gidermek yerine, bu değişkenlerin etkileri azaltılmaya veya ortadan kaldırılmaya çalışılır. KED içsel ve dışsal değişkenler olmak üzere iki grupta toplanabilir<sup>1</sup>. Örün hem içsel ve dışsal, hem de birimden birime olan değişkenliklere karşı daha dayanıklı (duyarsız-sağlam) olarak tasarlanmalıdır. Bu amaçla, KD'in seviyelerinin farklı birleşimlerinde (kombinasyonlarında) ürün performansının değerleri araştırılır. Böyle bir çalışma sonucunda tasarlanan ürünler gürbüz (sağlam-kaliteli) tasarım (robust design) olarak adlandırılır.

---

<sup>1</sup> Taguchi, kontrol edilemeyen değişkenler yerine gürültü kaynakları (sources of noise), içsel değişken yerine içsel gürültü (internal noise), dışsal değişken yerine de dışsal gürültü (external noise) kavramlarını kullanmaktadır. Sözgelimi, ürünün zamanla bozulması içsel, ürün kullanım koşullarının neden olduğu değişkenlik de dışsal değişkenlerin yansımalarıdır.

izleyen kesimlerinde kullanılan matematiksel ifadelerde; KD yerine  $X=[x_a, x_m, x_o]$ , KED yerine ise  $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$  gösterimi kullanılacaktır. İşaret, kontrol, düzeltme ve kontrol edilemeyen değişkenlere bağımlı olan performans değeri, açık yazılırsa;

$$Y=f(W, M; x_a, x_m) \quad (3.13)$$

fonksiyonu ile ifade edilebilir. Kavramsal olarak f fonksiyonu iki parçadan oluşur:

- Y ile M arasında arzulanan ve kestirilebilen fonksiyonel ilişki,  $g(M; x_a, x_m)$ .
- Y ile M arasında daha az arzulanan ve kestirilemeyen fonksiyonel ilişki,  $e(W, M; x_a, x_m)$ .

f fonksiyonu yeniden yazılırsa;

$$Y=g(M; x_a, x_m)+e(W, M; x_a, x_m) \quad (3.14)$$

biçimi elde edilir. Y ile M arasındaki ilişkinin doğrusal olması istendiğinden g, M'nin doğrusal fonksiyonu olmalıdır. Doğrusal olmayan bütün terimler ve kontrol edilemeyen değişkenlerin etkileri de e içinde olacaktır (Phadke, 1986).

Performans karakteristiğinin yapısına göre bazı farklılıklar göstermesine rağmen, genel olarak, tasarım eniyilemesi iki adımda yapılabilir:

1. Y fonksiyonunun kestirilebilen kısmı (g) enbüyüklenirken, kestirilemeyen kısmını (e) enküçükleyen kontrol değişkenlerinin ( $x_a$ ) değerleri belirlenir.
2. Kestirilebilen kısmını (g) hedef değere yaklaştıran düzeltme değişkenlerinin ( $x_m$ ) değerleri belirlenir.

Bu süreçte birinci adımda değişkenlik azaltılmakta, ikinci adımda ise hassasiyet artırılmaktadır. Eniyileme süreci kısım 4.1'de ayrıca inceleneceğinden burada daha fazla ayrıntıya girilmeyecektir.

### 3.5.2 Parametre tasarımının ilkeleri

Parametre tasarımı ürün performansını etkileyen değişkenlerin KD ve KED olmak üzere iki ayrı grupta incelenmesi

üzerine kuruludur. Performans karakteristiği üzerinde ürün (süreç) KD'nin doğrusal olmayan etkilerinden yararlanarak değişkenlik kaynaklarına karşı daha duyarsız (sağlam) tasarımlar yapılması parametre tasarımının esasını oluşturur.

Performans karakteristiğinin ortalama değerini hedef değerine düzeltmek, performans değişkenliğini azaltmaktan daha kolay bir mühendislik problemidir. Bu nedenle, önce değişkenliği istenilen düzeye indirmek, sonra da ortalamaı hedefe yaklaştırmak son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, bu şekilde yapılan bir tasarımın ürünündeki (süreçteki) diğer performans karakteristiklerinin değişkenliklerini artırmamasına özen gösterilmelidir.

Parametre tasarım deneyleri iki şekilde yapılabilir (Kackar, 1986; Byrne and Taguchi, 1987; Lin, 1987):

- Fiziksel deneyler,
- Bilgisayar benzetim denemeleri.

Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, parametre tasarım deneyinin aşamaları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- KD'in seviyeleri sistematik olarak değiştirilir,
- KD'in her bir birleşiminde (yani, her bir ürün tasarımında) KED'in etkileri incelenir.

Bu işlem sonunda KD'in eniyi seviyeleri belirlenir. Deney sonuçlarının tutarlılığı, ürünün (süreçin) gerçek kullanım ortamlarındaki koşulların deneysel ortamda sağlanmış olmasına bağlıdır. Bilgi eksikliği ve fiziksel sınırlamalardan dolayı bir parametre tasarım deneyi bütün KED'i içermeyebilir. Bu nedenle, ürün (süreç) performansını etkileyen önemli değişkenlik kaynakları belirlenerek deneye alınmalıdır.

KD'in verilen bir birleşimi  $X=[x_1, x_2, \dots, x_k]$  için performans karakteristiğinin bir dağılımı  $Y(X,W)$  vardır. Aynı zamanda, bu dağılıma karşı gelen kayıpların da bir dağılımı söz konusudur. Barker (1985), bu dağılımların bilindiği ( $Y(X,W)$  fonksiyonunun sayısal olarak değerlendirilebildiği) durumda parametre tasarım deneylerinin bilgisayar benzetim denemeleri ile yapılabileceğini belirtmektedir.  $Y(X,W)$

fonksiyonunun sayısal olarak değerlendirilemediği durumlarda ise parametre tasarım deneyleri fiziksel deneyler yoluyla yapılmalıdır.

$Y=f(X,W)$  fonksiyonunun sayısal olarak değerlendirilebildiği durumlarda ürün (süreç) tasarımını eniyilemek için deney tasarımından başka eniyileme yöntemleri (çeşitli sayısal algoritmalar,... vb.) de kullanılabilir. Bilinen fonksiyonlar yardımıyla daha ayrıntılı analizler daha etkin olarak yapılabilmektedir (Kackar and Shoemaker, 1986). Kaynaklarda bu konuda yapılan çalışmalar vardır<sup>1</sup>.

### 3.5.3 Parametre tasarım deneyinin genel yapısı

Parametre tasarım deneyi iki kısımdan oluşur:

- KD matrisi,
- KED matrisi<sup>2</sup>.

KD matrisinde sütunlar KD'i, satırlar ise KD'in test seviyelerinin farklı birleşimlerini (aynı ürünün/sürecin farklı tasarım şekillerini) gösterir. KED matrisinde ise satırlar KED'i, sütunlar bu değişken konumlarının farklı bileşimlerini gösterir. Tam bir parametre tasarım deneyi, KD ile KED matrislerinin birleşimlerini içerir (Şekil 3.8). KD matrisinin her bir test çalışması için KED matrisinin bütün sütunları teker teker ele alınır. Bir test çalışması için elde edilen performans değerleri, KD'in belirli bir birleşimiyle elde edilen ürünün (sürecin) farklı çalışma koşulları altında göstereceği performans değişkenliğini ifade eder. Şekil 3.8'de KD matrisindeki bir test çalışması için  $n$  adet olmak üzere,  $m$  test çalışması için toplam  $m*n$

---

<sup>1</sup> Ayrıntılı bilgi için bkz. Brayton, R.,K., Director, S.,W. and Hatchel, G.,D. (1980), Yield maximization and worst-case design with arbitrary statistical distributions, IEEE Transaction on Circuit and Systems, CAS-27, 756-764; Singhal; K. and Pinel J.,F. (1981), Statistical design entering and tolerancing using parameter sampling, IEEE Transaction on Circuit and Systems, CAS-28, 692-702.

<sup>2</sup> Taguchi, KD matrisi yerine içsel dizi (inner array), KED matrisi yerine de dışsal dizi (outer array) kavramlarını kullanmaktadır.

deneme yapılacağı görülmektedir. Böylece aynı fonksiyonu görece ürün (süreç) için yapılabilecek farklı tasarımların farklı çalışma koşullarında göstereceği performans değişkenliği kümesi elde edilecektir. Şekil 3.8'den de görüleceği gibi, herbir test çalışmasından elde edilen performans karakteristiği değerleri, o test çalışmasına ilişkin performans istatistiği ölçütünü hesaplamak için kullanılır. Performans istatistiği değerlerine göre eniyi ürün tasarımı belirlenir.

Test No	KD Matrisi		Performans Değerleri		Performans İstatistiği
	$X_{11}$ ... $X_{1t}$ ... $X_{1k}$	$Y_{11}$ ... $Y_{1s}$ ... $Y_{1n}$	$Z(x_1)$		
1	$X_{11}$ ... $X_{1t}$ ... $X_{1k}$	$Y_{11}$ ... $Y_{1s}$ ... $Y_{1n}$	$Z(x_1)$		
2	$X_{21}$ ... $X_{2t}$ ... $X_{2k}$	$Y_{21}$ ... $Y_{2s}$ ... $Y_{2n}$	$Z(x_2)$		
.	.	.	.		
.	.	.	.		
.	.	.	.		
i	$X_{i1}$ ... $X_{it}$ ... $X_{ik}$	$Y_{i1}$ ... $Y_{is}$ ... $Y_{in}$	$Z(x_i)$		
.	.	.	.		
.	.	.	.		
.	.	.	.		
m	$X_{m1}$ ... $X_{mt}$ ... $X_{mk}$	$Y_{m1}$ ... $Y_{ms}$ ... $Y_{mn}$	$Z(x_m)$		

Şekil 3.8 Taguchi'nin parametre tasarım deneyi modeli

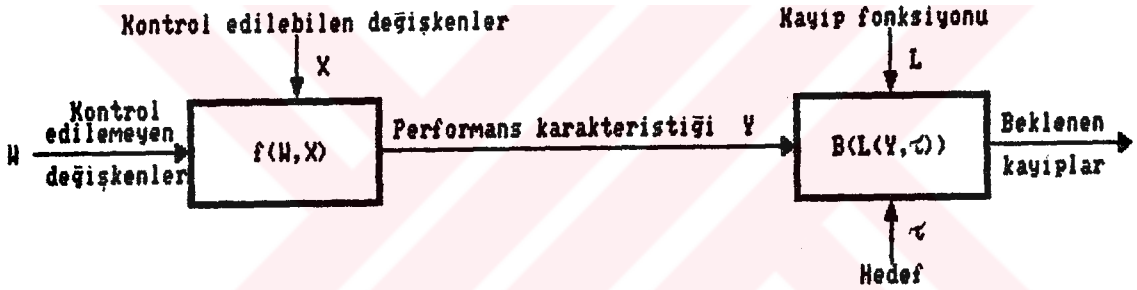
Deneylerin nasıl yürütüleceği ve deneysel sonuçlardan girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkileri nasıl belirleneceği, KG çalışmalarında karşılaşılan en önemli sorulardan bazılarıdır. Burada önemli olan KD ve KED ile bunların seviyelerinin doğru ve hassas bir şekilde belirlenebilmesidir. Bunların belirlenebilmesi ise ürün (süreç) hakkında yeterince bilgi sahibi olmayı gerektirir. Belirlenen değişkenlerin KD ve KED matrislerine yerleştirilmesi OD'in ilke ve kurallarına göre yapılır. Bu aşama doğru bir şekilde icra edilirse yukarıda değinilen sorular büyük ölçüde cevaplanmış olur.

### 3.5.4 Parametre tasarım problemlerinin sınıflandırılması

Parametre tasarım problemleri statik ve dinamik olmak üzere başlıca iki grupta ele alınmaktadır. Her grup kendi içinde alt gruplara ayrılmaktadır. Performans karakteristiğinin yapısı, bu ayrımı belirleyen en önemli etkindir. Performans karakteristiğinin özelliğine göre kullanılacak kkf ve performans istatistiği de farklı şekillerde tanımlanır.

#### i. Statik parametre tasarım problemi

Performans karakteristiğinin hedef değerinin tasarımcı tarafından başlangıçta sabit olarak belirlendiği problemler statik parametre tasarım problemi olarak adlandırılır. Leon, et al (1987) bu problemi Şekil 3.9'daki gibi ifade etmişlerdir.



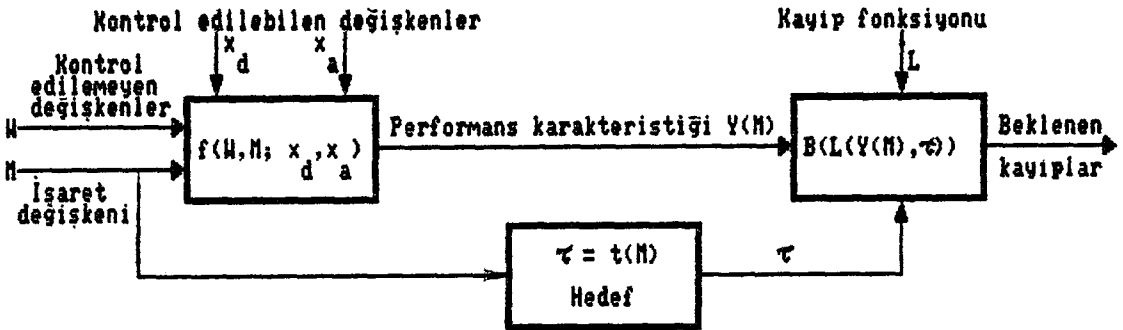
Şekil 3.9 Statik parametre tasarım probleminin blok diyagramı

KED'in rassal ve tasarımcının kontrolü dışında olduğu bilindiğinden  $Y=f(X,W)$  transfer fonksiyonu altında KD değiştirilerek farklı performans değerleri ( $Y$ 'ler) elde edilir. Amac(lar)a uygun olarak, beklenen kayıpları enküçükleyen KD değerleri eniyi tasarım değerleri olarak belirlenir.

#### ii. Dinamik parametre tasarım problemi

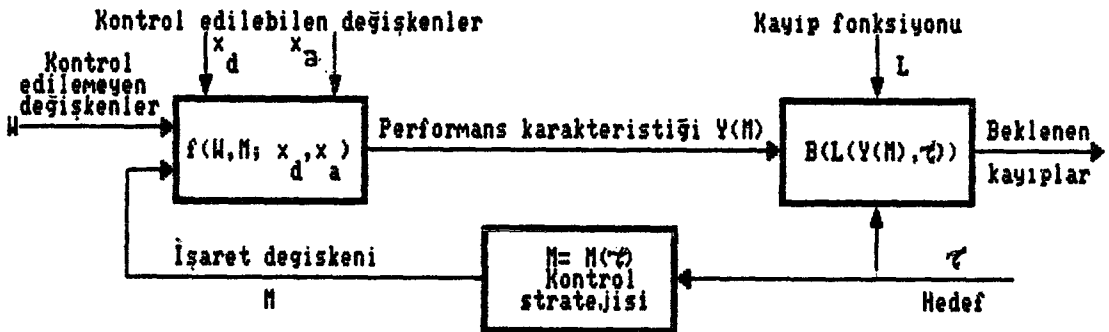
Bazı durumlarda ürünün (sürecin) özelliğinden dolayı hedef tasarımcı tarafından başlangıçta sabit olarak belirlenemez. Böyle durumlarda performans karakteristiği ve onun hedef değeri, bir veya birkaç işaret değişkeni tarafından ürünün (sürecin) kullanımı anında belirlenir. Amacı performans karakteristiğini ve hedef değerini dinamik olarak kontrol etmek olan bu tür sistemlere dinamik sistemler

denir. Bu sistemler için kullanılan parametre tasarım problemi de dinamik parametre tasarım problemi olarak adlandırılır. Leon, et al (1987), dinamik sistemlere ilişkin parametre tasarım problemini Şekil 3.10'daki gibi belirlemişlerdir.



Şekil 3.10 Dinamik parametre tasarım probleminin blok diyagramı

Dinamik parametre tasarım probleminin statik parametre tasarımı probleminden farkı bir işaret değişkeninin olması ve hedef değerinin de bu işaret değişkeni tarafından belirlenmesidir<sup>2</sup>. Ancak, Şekil 3.10'daki diyagram bütün dinamik parametre tasarım problemlerini kapsamaz. Buna göre biraz farklılık arzeden kontrol probleminin diyagramını ayrı göstermekte yarar vardır. Leon, et al. (1987), kontrol problemini Şekil 3.11'deki gibi ifade etmektedirler.



Şekil 3.11 Kontrol probleminin blok diyagramı

<sup>2</sup> Örneğin terazi bir dinamik sistemdir. Terazinin performans karakteristiği (okunan ağırlık) girdi işaret değişkenine (kefedeki cismin gerçek ağırlığına) bağlıdır. Ayrıca performans karakteristiği sıcaklık, toz ve nemlilik gibi KED tarafından da etkilenir.

Bu diyagramda, işaret değişkeni, kontrol stratejisi ve hedef değere göre belirlenir. Amaç, beklenen kayıpları enazlamak için sadece KD'in eniyi değerlerini belirlemek değil, aynı zamanda eniyi kontrol stratejisini de belirlemektir.

### 3.6 Tolerans Tasarımı

Parametre tasarımı aşamasında imalat maliyetlerini düşürebilmek için toleranslar oldukça geniş tutulur. Eğer parametre tasarım aşamasında fonksiyonel değişkenlik istenilen düzeye düşürülemediyse tolerans tasarımına başvurulur. Tolerans tasarımında fonksiyonel değişkenlik üzerinde önemli etkiye sahip olan değişkenlerin toleransları, maliyetler dikkate alınarak, azaltılır.

Tolerans tasarımı, parametre tasarımı ile belirlenen nominal değerler civarındaki toleransları belirleme sürecidir. Toleransların dar olması imalat maliyetlerini, geniş olması da performans değişkenliğini artırır. Bu nedenle, tolerans tasarımı, imalat maliyetlerindeki artış ile performans değişkenliğinden dolayı oluşan tüketici kayıpları arasında bir ödünleşme noktası (trade-off point) bulunmasını gerektirir. Tolerans tasarımında ürünlerdeki değişkenliğe en fazla katkısı olan bileşenler belirlenir. Böylece ürünlerdeki bütün bileşenlerin toleranslarının sıkı olması yerine; bazı bileşenlerin toleranslarının sıkı, bazılarının da gevsek olması sağlanır. Tolerans tasarımı daha iyi malzemeler, bileşenler ve teçhizatlar kullanmayı gerektirdiğinden bir maliyet yükünü de beraberinde getirir.

Tolerans tasarımı, değişken varyansı ile ilgilenilen performans karakteristiği varyansı arasındaki ilişki üzerine kuruludur. Bir miktar ilave harcama yapılarak değişkenin varyansı azaltılırsa (kalitesi geliştirilirse), performans karakteristiğinin varyansı da azalmış olacaktır. Sonuçta birim başına olan toplumsal kayıplar azalacaktır.

Deneyde incelenen kontrol edilebilen bağımsız değişkenler A, B, C, D, E ve F olmak üzere değişken varyansları ve toplam varyans arasındaki ilişki;



$$S_7^2 = S_A^2 + S_B^2 + S_C^2 + S_D^2 + S_E^2 + S_F^2 + S_G^2 \quad (3.15)$$

şeklindedir. Sözü edilen varyans, değişkenin kendi varyansı olmayıp, değişken varyansından kaynaklanan performans karakteristiğinin varyansıdır.  $S_e^2$ 'nin hata varyansını gösterdiği eşitlik 3.14'de daha büyük varyansa sahip olan değişkenler performans karakteristiği üzerinde daha önemli, daha küçük varyansa sahip olanlar ise daha az önemli olan değişkenlerdir. Kayıp fonksiyonu, toplumsal kayıpları, toplam varyans üzerinden hesapladığından tolerans tasarımında toplam varyans üzerinde çok fazla etkiye sahip olan değişkenleri kullanmayı gerektirir (Ross, 1988 b).

İzleyen kesimlerde, çalışmanın amaçları doğrultusunda, tolerans tasarımı hakkında daha fazla ayrıntıya girilmeyecektir.

### 3.7 Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Etkin Yaklaşımın Belirlenmesi

Eniyileme sürecinin etkin bir şekilde tamamlanabilmesi, az sayıda yapılan deneylerden en fazla bilgiyi türetecek deneysel yöntemlerin kullanılmasına bağlıdır. Asıl amaç, KD'in farklı birleşimlerinin incelendiği deneysel ortamda, bu değişkenlerin seviyelerinde yapılan değişimin performans karakteristiğine olan etkisinin belirlenebilmesine olanak sağlayan denemeler sistemini seçmektir.

#### 3.7.1 Deneysel çalışmalarda kullanılacak yaklaşımlar

Bir deneysel çalışmada izlenebilecek yaklaşımlar;

- Her defasında bir değişkeni değiştirip diğerlerini sabit tutarak bu değişkenin etkisini test etmek,
- Tam faktöriyel tasarım yöntemini kullanmak,
- Ortogonal diziler yöntemini kullanmak

olmak üzere üç grupta incelenebilir. Birinci yaklaşım, ilk bakışta eniyi çalışma koşullarını belirlemek için bilimsel bir yöntem olarak görülmektedir. Oysa, bu yöntem etkin olmadığı gibi, bileşik etkileri (interactions) de belirleyemez. Bu yöntemde bir değişkenin seviyelerinin karşılaştırılması, deneydeki diğer değişkenlerin sabit tutulması ile

yapılabilir. Bulunan sonuç, sadece deneyde sabit tutulan diğer değişkenlerin seviyelerinde geçerlidir. Deneyler süresince sabit tutulan bu değişkenlerden birinin (veya birkaçının) seviyesinin değişmesi halinde aynı sonuç elde edilemeyebilir. Başka bir anlatımla, çeşitli değişkenlik kaynaklarının etkisi altında olan imalat koşullarında, daha önce deneysel ortamda hesaplanmış olan değişken etkilerini elde etmek çoğunlukla mümkün değildir. Açıklanan yönleriyle imalat ortamlarına uygun olmaması, yöntemin kullanımını sınırlamaktadır.

Klasik istatistiksel yaklaşım olan ikinci yöntemde çalışmanın yapılmasını sınırlayacak kadar çok sayıda deneme yapmak gerekir. Sözgelimi, herbiri 3'er seviyeli olan 13 değişkenli bir deneysel tasarımda 1594323 adet deneme yapılmalıdır. Asıl etkilerin (main effects) yanısıra olabilir tüm bileşik etkilerin kestirilmesi bu kadar deney yapmanın tek nedenidir. Uygulamada ise, ikinci dereceden büyük bileşik etkilerle oldukça nadir karşılaşılmaktadır. Hatta, Taguchi, ikinci dereceden bileşik etkilerin bile önemsenmemesi gerektiğini belirtmektedir. Yapılması gereken deney sayısının çok fazla olması bu yöntemin uygulanmasını sınırlayan en önemli nedendir. Bu yöntem ile 2 veya 3 değişkenli çalışmalar ekonomik olarak yapılabilir.

Üçüncü yöntem olan OD, çalışmada açılması gereken bir konu olduğundan, izleyen alt başlıkta ele alınmıştır.

### 3.7.2 Ortogonal diziler (OD)

Gerçek uygulamalarda değişken sayısının fazla olduğu dikkate alınırsa çok sayıda deney yapılması gerektiği görülür. Bu gibi durumlarda deneysel maliyetler sağlanacak tasarrufları aşacağından çoğu kez deneylerin başlamadan bitmesine neden olmaktadır. Amaç, çalışmalarda kaynakları israf etmeyen etkin deneysel yaklaşımı kullanmaktır. Bunun

için izlenmesi gereken en pratik yol Fisher'in geliştirmiş olduğu OD'in (dik doğrusal bağıntıların) kullanımını içeren sistematik deneysel yaklaşımdır<sup>1</sup>.

OD, tam faktöriyel tasarımın belirli birleşimlerinden ibaret olduğu için genellikle ayırmalı faktöriyel tasarım (fractional factorial design) olarak da adlandırılmaktadır. Tam faktöriyel tasarım ile karşılaştırıldığında, olabilir tüm durumların çok küçük bir kısmının (sadece belirli birleşimlerinin) araştırılması gerektiğinden, OD'in kullanımı çok ekonomiktir. Daha önce bahsedilen herbiri 3'er seviyeli olan 13 değişkenli çalışma sadece 27 denemeye yapılabilmektedir. Test sayısı arasındaki büyük farkın ana nedeni OD'de sadece her bir değişkenin asıl etkisinin araştırılmasıdır. Ayrıca, varlığı bilinen bileşik etkilerin deneye dahil edilerek belirlenmesi de mümkündür.

OD'in asıl gücü bir bütün olarak deneyin yayılımı ve ortalaması üzerinde her bir değişkenin etkisini ayırabilmesinde yatmaktadır. Lin'e (1987) göre OD'de sütunlar birbirinden bağımsız olduğundan değişkenlerin bireysel etkileri kolaylıkla ayrıştırılabilmektedir. Bu nedenle, bir deneysel tasarımda etki karışımı olmaksızın aynı zamanda çok sayıda değişken incelenebilmektedir. OD, bu yönüyle, olabilir tüm bileşimlerin oluşturulmasına duyulan gereksinimi de ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca, bir deneyin sonucunu beklemeden diğerinin yapılmasına da olanak sağlamaktadır (Ealey, 1990). Daha açık bir anlatımla, OD ekonomikliği nedeniyle endüstride deney tasarımı çalışmalarının yapılabilirliğini artırmaktadır.

KD ve KED ilgili uzaylardan rassal olarak çekilmediği için hesaplamalarda sabit etki (fixed effect) modeli kullanılır. OD'in kullanımını içeren istatistiksel model;

$Y_{i:1}$ : i. deneyin ilgilenilen performans karakteristiği değeri,  $i=1,2,\dots,N$

$\mu$  :Deneylerin ortalama etkisi,

<sup>1</sup> Flippone (1989) OD'in esasının Euler'in Greco Latin karelerine dayandığını ve deney tasarımlarında ilk defa ikinci dünya savaşı sırasında kullanıldığını belirtmektedir.

$X_i$ : i. deneyde kullanılan değişken/bileşik etki seviye birleşimlerinin ilgilenilen performans karakteristiği üzerindeki sabit etkisi,

$e_i$ : i. deneyin rassal hatası

olmak üzere,

$$Y_i = \mu + X_i + e_i \quad (3.16)$$

şeklinde yazılan toplamsal modeldir. Eğer toplamsal model gerçek duruma uygun bir yaklaşım ise parametre tasarımı deneyleri sonunda belirlenen yeni konumlar başlangıç seviyelerinden daha iyi olacaktır.

OD kullanılarak, diğer yöntemlerle mümkün olamayacak kadar, çok sayıda değişken aynı anda incelenebilir. Diğer taraftan, OD yaklaşımı kullanılarak yapılan bir deneysel çalışmanın tam faktöriyel tasarım yaklaşımına göre yapılan çalışmasının en az % 90'ı kadar etkin olduğu gösterilmiştir. Etkinlikteki bu küçük kayıp, deneysel maliyetlerde sağlanan tasarruflarla karşılaştırıldığında yapılan ödünleşme kabul edilebilir düzeyde olmaktadır (ASI, 1986). OD'in genel gösterimi;

L : Ortogonal bağıntı,

p : Yapılacak deney sayısı,

q : Değişkenin seviye sayısı,

r : Değişken sayısı

olmak üzere,  $L_p(q^r)$  şeklindedir. Yaygın olarak kullanılan OD ve bunların doğrusal grafikleri Ek 1'de verilmiştir. Ek 1'den de görüleceği üzere OD'in herhangi iki sütunu arasındaki bileşimler aynı sayıda tekrarlanmıştır. Değişkenlerin asıl etkilerinin belirlenmesine olanak sağlayan bu özellik ortogonalite olarak adlandırılır. Bu özellikten yararlanarak deneyler süresince denenmemiş olan değişken-seviye birleşimlerindeki performans karakteristiklerinin kestirimi yapılarak, eniyi birleşim belirlenmektedir.

Performans karakteristiğinin olabildiğince hassas olarak ölçülmesi gerekliliği OD'in kullanıldığı deneysel yaklaşımın en zayıf yanıdır. OD kullanılarak yapılan deneylerde başarının garanti olduğu söylenemez. Başarılı sonuç alabilmek için asıl etkilerin toplanabilir bir yapıda

olması gerekir. Öte yandan, analiz üzerinde ters etkiye sahip olan ve çalışma süresince dikkate alınmayan bileşik etkiler, deneyler sonunda yapılan doğrulayıcı testler ile dikkate alınmaktadır. KD arasında önemli bazı bileşik etkilerin olması başarısız sonuçların alınmasına neden olabilir. Önemli bileşik etkilerin olması durumunda izlenmesi gereken üç yol vardır. Bunlardan birincisi, oldukça pahalı olan tam faktöriyel tasarımı kullanmaktır. İkincisi ise, mevcut deneysel sonuçların en iyi birleşimini seçmektir. Yapılacak hiç bir şey kalmadığında başvurulacak bir çözüm seklidir. Üçüncüsü de aşağıdaki yollardan birini veya birkaçını birlikte kullanmaktır (Taguchi and Wu, 1979):

- Performans karakteristiğini toplanabilir bir yapıya dönüştürmek.
- KD ve seviyeleri arasındaki ilişkileri (bağıntıları) düzelterek ele almak.
- Sınıflandırılmış veriler için birikimli analiz ve benzeri uygun yöntemler kullanmak.

Uygun deney planının seçimi ve hazırlanması zaman alıcı olup değişkenlerin ve bileşik etkilerin sütunlardaki yerlerinin belirlenmesinde hatalar yapılabilir. Bu gibi hatalar doğru olmayan deney sonuçlarının elde edilmesine, hatta daha da kötüsü, deneylerin yapılamamasına neden olur (Lewandowski and Lindeke, 1989). Deney planının doğru seçilmesi ise uygulamacının bilgi ve becerisine bağlıdır. Lin'e (1987) göre test edilecek değişkenlerin ve bunların farklı seviyelerinin OD'e yerleştirilmesi oldukça ucuz, istatistiksel olarak geçerli ve fiziksel olarak da olurludur. İşlemi daha da kolaylaştırmak için seçilen deney planına göre önceden belirlenmiş değişkenlerin ve bileşik etkilerin OD'e hatasız olarak yerleştirilmesini sağlayan çeşitli düzeylerde bilgisayar yazılımları geliştirilmiştir.

### **3.8 Uygun Ortogonal Dizi(ler) Seçimi ve Değişkenlerin Yerleştirilmesi**

Bir problem için ortogonal dizi tasarımı iki aşamada yapılabilir (Lee, et al., 1989):

- Standart OD kümesinden uygun bir ortogonal dizi seçilir.
- Bu dizinin uygun sütunlarına değişkenler ve öngörülen bileşik etkileri yerleştirilir.

Problemin yapısına göre kullanılacak OD farklı olacaktır. OD'in seçimi ve değişkenlerin bu dizilere nasıl yerleştirileceği izleyen kesimlerde açıklanacaktır.

### 3.8.1 Uygun ortogonal dizi(ler) seçimi

Deneyde kullanılacak OD'nin seçimi;

- incelenecek değişken ve bileşik etki sayıları,
- incelenecek değişkenlerin seviye sayıları

dikkate alınarak yapılır. Sözü edilen iki durum bütün deney için toplam serbestlik derecesini (SD) belirler. Bir değişkenin SD;

$$SD_{Değişken} = Değişkenin\ seviye\ sayısı - 1 \quad (3.17)$$

iken bileşik etkinin SD de ilgili değişkenlerin SD çarpımına eşittir. Bir deney için gereken SD, deneye alınan bütün değişkenler ve bileşik etkilerin SD toplamına eşittir.

N toplam deney sayısını göstermek üzere OD'nin SD,

$$SD_{OD} = N - 1 \quad (3.18)$$

kadardır. OD kullanılırken dikkat edilecek en önemli hususlardan biri de her SD için enaz bir deney yapılması gerektiğidir. Bir deney için seçilecek OD'nin,

$$SD_{OD} \geq SD_{Deney} \quad (3.19)$$

eşitsizliğini sağlaması gerekir.

Bu karakteristikler uygun ortogonal dizinin seçiminde bazı ipuçları verirler. Gerçek seçim ise oldukça karmaşıktır. Örneğin, üç seviyeli bir değişkenin iki seviyeli bir sütuna yerleştirilemeyeceği görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, sadece iki seviyeli sütunlardan oluşan bir ortogonal dizi bazı değişkenleri üç seviyeli olan problemler için uygun görülmemektedir. Oysa, bir ortogonal dizide iki seviyeli üç sütun birleştirildiğinde dört seviyeli bir sütun

elde edilmektedir. Bu sütünun bir seviyesi kullanılmazsa<sup>1</sup> üç seviyeli bir sütün elde edilmiş olur. Benzeri düzenlemelerle standart OD'den probleme yönelik OD elde edilebilir.

### 3.8.2 Doğrusal grafikler

Verilen bir problem için uygun ortogonal dizi seçildikten sonra değişkenler ve bileşik etkiler dizideki sütunlara yerleştirilir. Bu aşama, problem grafiğinin standart doğrusal grafiğe uydurulmasıyla başlar.

Değişkenlerin ve bileşik etkilerin seçilen OD sütünlarına yerleştirilmesi;

- Doğrusal grafikler,

- Üçlü tablolar (triangular tables)

yardımıyla yapılır (Ross, 1988 b). Her OD'ye ait doğrusal grafikler ve üçlü tablolar kümesi vardır. Doğrusal grafikler değişkenlerin ve bileşik etkilerin yerleştirilebilecekleri sütünları gösterir. Üçlü tablolar ise sütünlar arasındaki olası tüm bileşik etkileri içerir.

Standart doğrusal grafik ortogonal dizinin önemli kombinatoryel özelliklerinin gösterimidir. Ayrıntılı olarak bir standart doğrusal grafik;

- Toplam sütün sayısını,

- Her bir sütünundaki seviye sayısını,

- Sütünlarda seviyelerin göreceli değişim frekanslarını,

- Seçilen sütünlar arasındaki bileşik etkileri

gösterir. Taguchi, standart OD'e ilişkin çok sayıda standart doğrusal grafik geliştirmiştir<sup>2</sup> (Lee, et al., 1989).

Problem grafiği, verilen problemin grafiksel gösterimidir. Problem grafiği doğrusal grafiklere oldukça benzemektedir. Bu grafikte değişkenler küçük çemberler ile, bileşik

---

<sup>1</sup> Dört seviyeli bir sütün üç seviyeli bir değişken yerleştirilir. Dördüncü seviye yerine diğer üç seviyeden herhangi biri (en kolay ve en ucuz olanı) tekrarlanır. Bu işlem, boş deneme (dummy treatment) olarak adlandırılır (Ross, 1988 b)

<sup>2</sup> Ayrıntılı bilgi için bkz. Taguchi, G., 1987, System of experimental design, Vol. 1-2, Unipub, New York, 1176 p.

etkiler de çizgiler yardımıyla gösterilir. Seviyesi az değişmesi gereken değişkenler içi boş küçük bir çember ile, seviyesi sık değişebilen değişkenler de içinde nokta olan küçük bir çember ile gösterilir. Bunların dışında gösterimi kolaylaştıracak başkaca semboller de kullanılabilir. Çemberler ve çizgiler üzerindeki rakamlar da sütun numaralarını göstermektedir.

Problem grafiğinin standart doğrusal grafiğe uydurulması üç aşamada yapılabilir:

1. Yukarıda bahsedilen kurallara göre problem grafiği çizilir.
2. Problem grafiği standart doğrusal grafiklerden birine uydurulur<sup>1</sup>. Problem grafiği, standart doğrusal grafiğin alt grafiği olabilir ama tersi sözkonusu değildir. Gerektiğinde problem grafiği aşağıdaki kurallara göre değiştirilebilir:

- Küçük çemberi, çizgiye dönüştürmek.
- Küçük çemberi, içi noktalı küçük çember ile değiştirmek.
- İçi noktalı küçük çemberi, küçük çember ile değiştirmek.
- Bir çemberdeki seviye sayısını artırmak.

Bunlardan ilk ikisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğerleri, ancak ilk ikisinin uygulanması sonucunda başarısız olunmuşsa kullanılır. Problem grafiği, seçilen ortogonal dizinin herhangi bir standart doğrusal grafiğine uydurulamıyorsa daha büyük bir ortogonal dizi seçilir ve önceki adıma dönülür, değilse sonraki adım icra edilir.

3. Problem grafiğindeki değişkenler ve bileşik etkiler standart doğrusal grafiğe yerleştirilir.

---

<sup>1</sup> Problem grafiğini standart doğrusal grafiğe mükemmel bir şekilde uydurmak mümkün değildir. Amaç, değişkenler arasındaki ilişkileri koruyacak şekilde küçük çemberlerin, içi noktalı küçük çemberlerin ve çizgilerin eniyi şekilde uyacağı uygun standart doğrusal grafiği belirlemektir.



Deney tasarımının daha ekonomik olması isteniyorsa bazı tasarım düzenlemeleri yapılabilir. Sözelimi, daha küçük ortogonal dizi seçmek için aralarında bileşik etki olmadığı bilinen iki değişken birleştirilerek özel bir değişken elde edilebilir. Yanısıra, problem için öneminin az olduğuna inanılan değişkenler ya da bileşik etkiler tasarımdan çıkarılarak daha küçük ortogonal dizi seçilebilir. Kaybedilen bilgi ile sağlanacak maliyet ve zaman tasarrufu arasında bir ödünleşme noktasının olduğu ve kararın buna göre verilmesi gerektiği unutulmamalıdır.

### 3.9 Performans İstatistiği

Performans ölçüsü (performance measure) KD'in farklı seviyelerini karşılaştırıp eniyisinin seçilmesini sağlayan bir ölçüttür. Bu ölçüt, KD'e bağlı olarak tanımlandığından farklı mühendislik tasarımları farklı performans ölçüleri kullanmayı gerektirir. Öte yandan, kkf da bir performans ölçüsüdür. Ancak, hem istenilen bilgileri verememesi, hem de bazen gereğinden fazla karmaşık olması nedeniyle performans ölçüsü olarak kullanılamamaktadır.

KD'e göre tanımlanan performans ölçüsünün gerçek fonksiyonu belirlemek son derece güç veya olanaksızdır. Bunun yerine, kkf'nda olduğu gibi, yaklaşık fonksiyonlar kullanılmaktadır. Performans karakteristiğinin yapısına (sürekli veya kesikli oluşuna ve hedef değerine) göre farklı yapıda tanımlanan ve performans ölçüsü yerine kullanılan yaklaşık fonksiyonlar performans istatistiği (performance statistic) olarak adlandırılmaktadır. Taguchi, performans istatistiği yerine gürültü işaret oranı (signal to noise ratio) terimini kullanmaktadır.

Verilerin normalleştirilebilmesi ve toplanabilirliklerinin sağlanabilmesi için varyans yerine performans istatistiği kullanılır. Böylece, ortalama ile performans istatistiği aynı analiz tekniği ile analiz edilebilmektedir. Aynı zamanda, ortalama ve ortalama etrafındaki değişkenliğin üzerine kurulu olan performans kestirimleri de yapılabilir (ASI, 1986).

Performans karakteristiğinin hem ortalaması, hem de ortalama civarındaki değişkenliği (varyansı) kontrol edilmedir. Ortalama dikkate alınmadığında varyans tek başına fazla bir anlam taşımaz<sup>1</sup>. Bu nedenle, performans istatistiğinin seçiminde dikkat edilecek husus ortalama ve varyansı aynı anda kontrol edebilmesidir.

Performans istatistiği ortalama ile değişkenlik arasında bir ödünleşme noktası bulmaya çalışır. En basit şekliyle performans istatistiği, ortalamanın standart sapmaya oranı (değişim katsayısının tersi) olarak ifade edilebilir. Bu özelliğinden hareketle, daha kaliteli tasarım yapabilmek için performans istatistiği enbüyüklenmeye çalışılır.

Etkin bir performans istatistiği performans karakteristiğinin dağılımı, kayıp fonksiyonu ve mühendislik gereksinimleri hakkında bilgi sağlar. Performans karakteristiğinin özelliğine bağlı olarak kkf, kkf'na bağlı olarak da performans istatistiği tanımlanır. Böylece, performans istatistiğinin enbüyüklendiği noktada kkf enküçüklenir. Bu ise, aranılan eniyi ürün (süreç) KD'i konumlarının belirlendiği anlamına gelir.

Taguchi, performans karakteristiğinin ve dolayısıyla da kkf'nun özelliğine bağlı olarak 40'dan fazla performans istatistiği geliştirmiştir<sup>2</sup>. Performans istatistikleri statik ve dinamik olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu çalışmada, statik performans istatistiklerinden yaygın olarak kullanılan 4 tanesine değinilecektir.

Performans karakteristiği  $Y$  sürekli bir değişken ve  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$   $Y$ 'nin gözlemlenebilir tüm değerlerini,  $Z(X)$  de performans istatistiğini gösterebilir. Taguchi, sabit hedefli (statik), negatif olmayan sürekli performans karakteristikleri için kkf'larının açıklanan biçimlerine bağlı

<sup>1</sup> Sözelimi, performans karakteristiği çıkış voltajı olan bir elektriksel devrenin standart sapması 2 volt olsun. Bu devreye ilişkin çıkış voltajının ortalaması 1000 volt ise ürünün kaliteli, 24 volt ise kalitesiz olduğu kabul edilir.

<sup>2</sup> Ayrıntılı bilgi için bkz. Taguchi, G., 1987, System of experimental design, Vol. 1-2, Unipub, New York, 1176 p.

olarak performans istatistiklerini;

$$\bar{y}(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad s^2(x_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}(x_i))^2$$

olmak üzere "nominal değer eniyi" durumu için,

$$Z_N(X_i) = 10 \text{Log} \left( \frac{\bar{y}^2(x_i)}{s^2(x_i)} \right) \quad (3.20)$$

"daha küçük daha iyi" durumu için,

$$Z_S(X_i) = -10 \text{Log} \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (3.21)$$

"daha büyük daha iyi" durumu için,

$$Z_B(X_i) = -10 \text{Log} \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right) \quad (3.22)$$

olarak tanımlamıştır (Kackar, 1986; Pignettiello, 1988). Ayrıca, performans karakteristiğinin sürekli bir ölçekle ölçülemediği durumlarda ise p ilgilenilen oran olmak üzere,

$$Z_P(X_i) = 10 \text{Log} \left( \frac{p}{1-p} \right) \quad (3.23)$$

ifadesinin performans istatistiği olarak kullanılması önerilmektedir (Kackar, 1986; Phadke, 1989).

### 3.10 Performans Karakteristiği Üzerinde Kontrol

#### Edilebilen Değişkenlerin Etkilerinin Belirlenmesi

Veri analizinin amacı, ortalamayı hedefde tutarken standart sapmayı enazlayan değişken-seviye birleşimini belirlemektir. Buna eniyi değişken-seviye birleşimi denir.

Değişken etkilerinin anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılan yöntemlerden en fazla kabul göreni varyans analizidir. Ancak, performans karakteristiği üzerinde değişken etkilerinin belirlenmesinde varyans analizinin yanı sıra göze hitab eden grafiksel yaklaşımların kullanılması karar vericiye önemli bilgiler sağlar.

### 3.10.1 Varyans analizi

OD'e göre deneyler yapılarak veriler toplandıktan sonra hem ortalama, hem de performans istatistiği verileri üzerine varyans analizi yapılır. Varyans analizinin amacı, toplam değişkenliği, bu değişkenliğe katkıda bulunan her bir değişkene ve hataya göre ayırmaktır. Daha sonra değişkenlerin önemli olup olmadıklarını belirlemek için F testi yapılır. F testinin sonuçları anlamlılık düzeyi ile gösterilir. Bir değişkenin % 5 düzeyinde anlamlı olduğu söylendiğinde, bu değişkenin değerinde % 5 veya daha az değişim yapılırsa performans değerinin (cevap değişkeninin) aynı kalacağı sonucu çıkarılır. Değişken % 5 düzeyinde anlamlı değilse, bunun değeri % 5'den fazla değiştirildiğinde cevabın aynı kalacağı söylenir (Phadke, et al, 1983).

F testi sonunda anlamlı bulunan değişkenler<sup>2</sup> performans karakteristiğini eniyi yapacak seviyelerinde, diğerleri de değer kümelerinin en ekonomik değerlerinde seçilir.

Düzenlenen varyans analizi tablosunda, enküçük sütun etkisi kendinden büyük olan ilk sütun etkisiyle karşılaştırılır ve anlamlı F oranının elde edilip edilmediği kontrol edilir. Anlamlı F oranı söz konusu değilse bu iki sütun etkisi birleştirilir. Birleştirilen sütun etkileri kendilerinden büyük olan bir sonraki sütun etkisiyle benzer şekilde karşılaştırılır. F oranı anlamsız ise karşılaştırılan sütun etkileri birleştirilir. Karşılaştırılan sütun etkileri arasında anlamlı F oranı belirleninceye kadar birleştirme (pooling) işlemine devam edilir. Daha sonra bu düzenleme doğrultusunda ikinci bir varyans analiz tablosu hazırlanır.

Performans istatistiklerinin analiz edilmesiyle KD ve KED arasındaki bileşik etkileri incelemeye duyulan gereksinim genellikle ortadan kalkar. Öte yandan, asıl ve bile-

---

<sup>2</sup> Taguchi, test istatistiği 2 veya daha büyük ( $F \geq 2$ ) olan değişkenlerin F testi sonucuna (anlamlı olup olmadıklarına) bakmaksızın ayrıntılı olarak incelenmesi gerektiğini belirtmektedir (Phadke, et al., 1983).

sık etkilerin ayrıca incelenmesi<sup>1</sup>, gözden kaçabilen ve hatalı kararlara neden olan hususlarda ilave bilgiler sağlar.

### 3.10.2 Hipotez testleri ve katkı yüzdesi

KGS'nin asıl amacı kârı artırmaktır. Bir üründe aynı kalite düzeyini tutturabilmek için iki yol izlenebilir:

- Toplam varyans üzerinde oldukça etkili olan yüksek maliyetli tek bir parça kullanmak (maliyeti artırır)
- Toplam varyans üzerinde orta seviyede etkili olan düşük maliyetli birkaç bileşen kullanmak (maliyeti düşürür).

Uygulamalar, orta etkiye sahip düşük maliyetli bileşenlerin kalite geliştirmede oldukça etkin olduklarını göstermiştir. Eğer ikinci yol kullanılarak kalite geliştirilecekse, değişkenleri ve etkilerini açıklamakta hipotez testini kullanmak uygun değildir. Çünkü, hipotez testleri sadece etkisi kuvvetli olan değişkenleri belirler, orta veya az etkiye sahip olan değişkenleri belirleyemez (onları ihmal eder). Oysa, değişken etkilerini kantitatif olarak belirlemek gerekir. Bu yüzden, TY'nde değişkenleri ve etkilerini açıklamak için hipotez testi yapmak yerine değişkenlerin toplam varyansa olan % katkı miktarları kullanılır (Lin, et al., 1990).<sup>1</sup>

Taguchi, istatistiksel olarak anlamlı olan bir değişkenin mühendislik açısından anlamlılığını katkı yüzdesi (percent contribution) ile ölçmeyi önermiştir. Bir değişkenin katkı yüzdesi, o değişkenin kareler toplamından hata kareler ortalamasının uygun kestirimi çıkarıldıktan sonra genel kareler toplamına yüzdesi alınarak belirlenir. Başka bir anlatımla, katkı yüzdesi;

$$\%p = \frac{SS_i - SD_i * MS_e}{SS_T} * 100 \quad (3.24)$$

<sup>1</sup> Varyans analizi ile performans istatistiği ve ortalama üzerinde etkili olan değişkenler belirlenir. Ancak, değişkenlerin farklı seviyelerinde ortalama ve performans istatistiği üzerindeki etkisinin şeklini ve şiddetini kolayca belirleyebilmek için grafiksel inceleme yapılmalıdır.

ifadesiyle belirlenir. Katkı yüzdesinin büyüklüğü, ilgili değişken değerinin değiştirilmesiyle elde edilecek başarının düzeyini gösterir (Phadke, et al., 1983). Katkı yüzdesi, değişkenlerin performans değişkenliğine olan katkı miktarının bir göstergesidir. Bu açıdan bakıldığında, katkı yüzdesinin regresyon analizindeki belirlilik katsayısının işlevini gördüğü söylenebilir.

Varyans analizi tablosundaki değişkenlerin % katkıları kullanılarak orta etkili değişkenler kolayca belirlenebilir. Ek olarak üründeki bir bileşenin geliştirilmesiyle ürün kalitesinde meydana gelen gelişme belirlenebilmektedir. Geliştirilmeden önce bu bileşenin varyansa olan % katkı miktarına göre sağlanacak tasarruflar ve oluşacak kayıp değer yaklaşık olarak belirlenebilir. Böylece, bileşenin kalitesini geliştirebilmek için harcanacak para ile sağlanacak tasarruflar karşılaştırılarak bileşenleri ekonomik olarak geliştirmek suretiyle ürünün fiyatı rekabet edebilecek düzeyde tutulabilir. Yanısıra, elde edilecek tasarruflar harcanacak parayı karşılamayacaksa, yapılacak çalışmanın doğuracağı israf da önlenmiş olacaktır.

### 3.11 Doğrulama Deneyi

İstatistiksel modeller kullanılarak tasarımı ve analizi yapılan bir deneyin doğru olup olmadığını bilmek mümkün değildir. Bu nedenle, başlangıç prototip modeline göre daha iyi olduğu belirlenen KD'in seviyelerinin gerçekten iyi olup olmadıkları test edilmelidir. Başarılı bir doğrulama deneyi (confirmation run) modeldeki uygun olmayan varsayımların şüphelerini ortadan kaldırır veya enazından azaltır. Kackar and Shoemaker'a (1986) göre doğrulama deneyi çalışmada yapılabilecek yanlış varsayımlara karşı bir sigortadır.

Parametre tasarım deneyleri hangi yöntemle yapılırsa yapılsın ürünün bir bütün olarak sağlamlığının testi fiziksel olarak bu aşamada yapılır. Doğrulama deneyi, önceki aşamada elde edilen sonuçların geçerliliğinin sınındığı son aşamadır. Yapılan prototipler sistem tasarımı aşamasında

yapılmış olan standart ürün (başlangıç prototip) ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma aynı olağanüstü koşullar altında yapılır ve performans istatistiği ile belirlenmiş olan sonuçları doğrulayıp doğrulamadıkları kontrol edilir. Fiziksel performans testinin olağanüstü koşullar altında yapılmasının gerekçesi; olağanüstü koşullarda fonksiyonunu iyi bir şekilde yerine getiren ürün, normal koşullar altında fonksiyonunu daha iyi bir şekilde yerine getireceği üzerine kuruludur.

Bu aşamada önemli olan husus, parametre tasarım deneyleri ile belirlenen eniyi tasarıma karşı gelen prototiplerin sistem tasarımı aşamasında yapılan standart üründen (ilk prototipten) daha kaliteli (sağlam, dayanıklı ve ekonomik) olduğunun belirlenmesidir. Bu kontrol yapılmadan sistem tasarımı aşamasında yapılan standart üründe KD'in başlangıç seviyeleri değiştirilemez.

Üretime başlamadan önce böyle bir doğrulama testinin yapılması, tüketicilerin bu ürünü benzerleri arasında nasıl görececeklerini belirten önemli göstergeleri üreticiye sunar. Böylece, üretici, hem başarısız girişimden dolayı oluşacak maliyetlerden, hem de firmanın prestijini azaltacak hareketlerden kaçınmış olacaktır. Doğrulayıcı testlerin tasarım mühendisleri açısından açıklaması ise; tasarım aşamasında gözden kaçan hususların düzeltilerek yöneticilerin güvenlerinin sarsılmasını önleyici bir aşama olarak görülebilir.

Doğrulama testi başarıyla sonuçlandığında tüketicinin ürüne (sürece) bağlılığını (albenisini) artıran düzeltmeler (rötuslar) yapılır ve üretime hazır hale getirilir.

### **3.12 Taguchi Yöntemleri ile Klasik Deney Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması**

Uygulamada genellikle TY ile klasik deney tasarım yöntemlerinin birbirinin aynı veya çok benzeri olduğu şeklinde bir yanlış anlaşılma ile karşılaşılmaktadır. Oysa, deney tasarımı bilim adamları ve mühendislerin deneylerinin etkinliklerini geliştirmek için başvurdukları istatistiksel

yöntemler bütünüdür. Klasik deney tasarım yöntemlerinde vurgu (amaç) istatistik üzerine olup, istatistiksel ilkelere tam bir bağlılık vardır.

TY ise, kaliteyi müşteri gibi algılayarak geliştirme amacına yönelik kullanılan istatistiksel ve istatistiksel olmayan yöntemler bütünüdür. Vurgu (amaç) gelişmeyi olabildiğince etkin ve verimli olarak başarmak üzerine olup, istatistiksel ilkelere tam bağlılık söz konusu değildir.

TY ile klasik deney tasarım yöntemleri arasındaki diğer farklılıklar aşağıdaki gibi özetlenebilir (Phadke, et al., 1983):

- Klasik yöntemlerde performans karakteristiğinin sadece ortalaması eniyilenirken, TY'nde hem ortalama ve hem de değişkenlik eniyilenmektedir.
- Klasik yöntemlerde performans karakteristiğinin sadece sürekli biçimi incelenebilirken TY'nde hem kesikli, hem sürekli ve hem de karma biçimleri incelenebilmektedir.
- Klasik yöntemlerde daha fazla deney yapmak gerekirken, TY'nde çok daha az deney yaparak aynı bilgiye yaklaşık olarak ulaşılabilir. TY'nde daha az deney yapma nedeniyle bir kısım bilgi kaybolurken, deneysel maliyetlerde önemli miktarlarda tasarruf sağlanmaktadır. Sağlanan tasarruflar ile kaybedilen bilgi miktarı karşılaştırıldığında TY'nin deney tasarım çalışmalarının yapılabilirliğini artırdığı gözlenmektedir<sup>1</sup>.

Phadke (1989) ise, TY'nin istatistiksel deney tasarımı-na yeni boyutlar eklediğini, bunlardan birinin de laboratuvar ortamında (pilot çapta) ulaşılan eniyi sonuçların imalat ve tüketici kullanım ortamlarında geçerliliklerinin sağlanabilirliği olduğunu belirtmektedir.

---

<sup>1</sup> Jiang, et al., (1989) robot süreç yeteneğini belirlemek ve eniyilemek için yaptıkları çalışmalarında; klasik istatistiksel yöntemlerden rassal tam bloklar tasarımını ve TY'ni kullanmışlardır. Çalışma sonunda her iki yöntem ile robot süreç yeteneğini yaklaşık olarak aynı belirlemişlerdir. Buna ilaveten rassal tam bloklar yönteminin üçte biri oranında veri kullanan TY ile robot süreç yeteneğini eniyilemişlerdir. Başka bir anlatımla, klasik istatistiksel yöntemlerin en önemli eksikliklerini yaptıkları bu çalışma ile bir kez daha belirginleştirmişlerdir.



KD arasında önemli bileşik etkiler var ve bunlar deneye dahil edilmemişse TY'nin başarısız olacağı söylenebilir. TY'nin başarısı, performans karakteristiğinin KD arasında bileşik etki olmayacak şekilde seçilmesine bağlıdır. Ancak, KD arasında bazı bileşik etkilerin incelenmesi gerektiğinde, bunlar deneye dahil edilerek incelenebilir. Bununla birlikte, deneye katılmadığı halde, diğer bütün bileşik etkileri incelemek mümkün olmadığı gibi, gerekli de değildir. Kontrol edilemeyen değişkenlik kaynaklarına karşı daha duyarsız tasarımı geliştirebilmek için KD ile KED arasındaki bileşik etkiler incelenmelidir. KD ve KED arasındaki bütün bileşik etkiler belirlenemeyebilir. Ancak, deney süresince KD'in dengeli ve sistematik bir şekilde değiştirilmesi ve uygun performans istatistiği kullanılması ile istenen değerler belirlenebilir (Byrne and Taguchi, 1987).

TY'nin doğasındaki bazı eksiklikler nedeniyle her zaman bütünsel eniyiye ulaşılamayabilir. Zaman ve para sınırlaması nedeniyle izin verilen bilgi kaybının hatalı çıkarsamalarla sonuçlanmaması için doğrulama deneyleri yapılır. Bütün bu olumsuzluklara rağmen, TY, endüstride deneysel çalışmaların yapılabilirliğini artırmış ve bu sayede çözülemeyen veya teşhisi doğru koyulamayan birçok problemin çözümüne de olanak sağlamıştır. İlk uygulandığı günden günümüze değin önemi gittikçe artan TY, günümüzde de kalitenin geliştirilmesinde yararlanılabilecek en etkin yöntemlerden biridir. Son yıllarda Japon ürünlerinin ve endüstrisinin gösterdiği gelişmeler, yöntemlerin uygulamaya başlanmasıyla elde edilen sonuçların en güzel örneğidir.

#### 4 TAGUCHI YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI

TY genel olup mikrobiyolojiden ziraat ve kimyaya, sağlık bilimlerinden mühendislik bilimlerine kadar çok geniş çerçevede uygulanabilir. Böylesine geniş bir yelpazede uygulama alanına sahip olan TY'nin günümüzdeki uygulamalarının daha çok mühendislik bilimlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Oysa, TY'nin farklı bilim dallarında karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılabilmesi için,

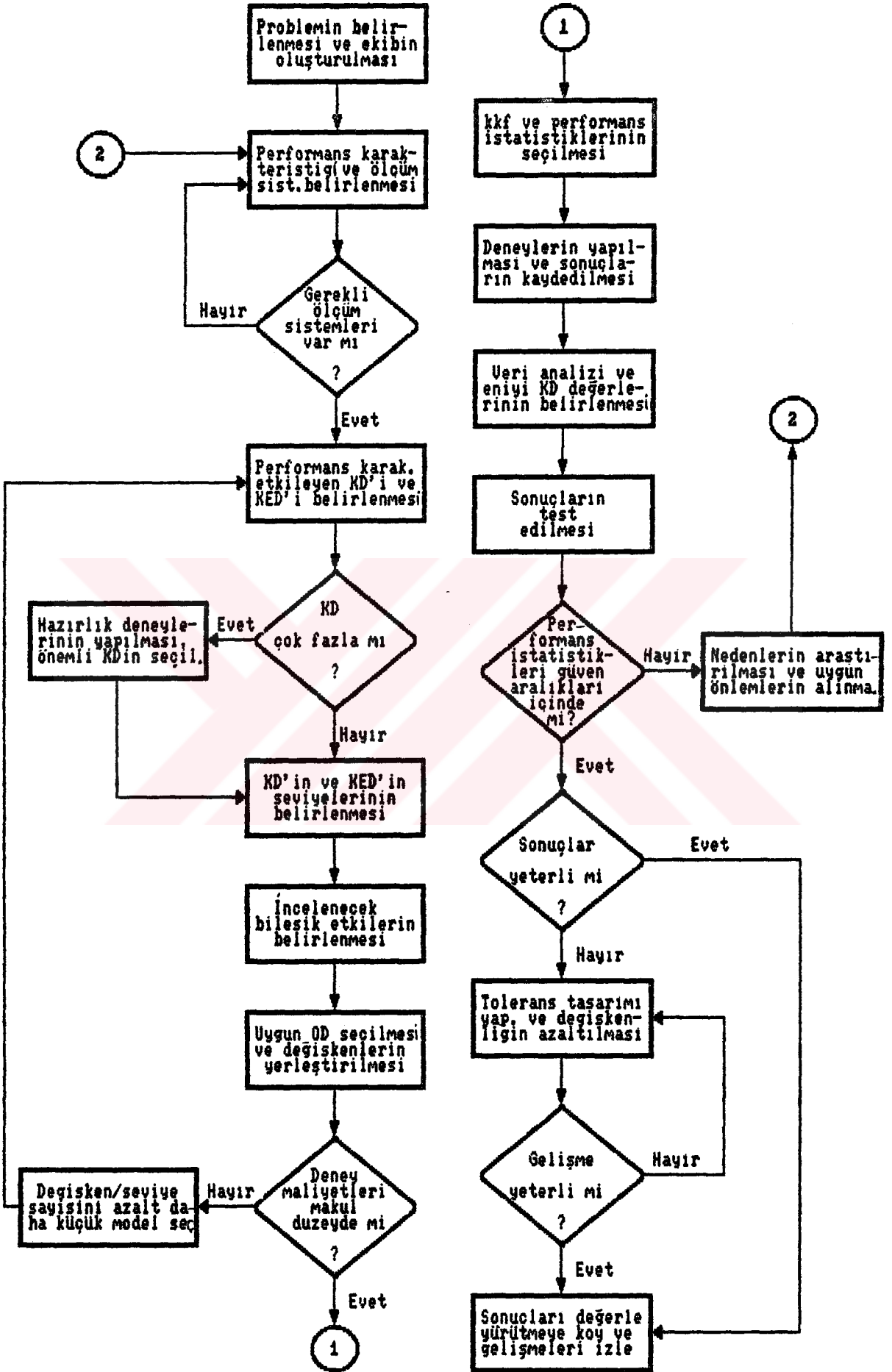
- Uygulama alanı ister ürün, ister süreç olsun veya ister sağlık bilimleri ister mühendislik bilimleri olsun her durumda geçerli olan,
- Farklı meslekten kişilerce kolayca anlaşılabilen,
- Çalışma için gereken tüm aşamaları, ekibe alınacak elemanları, gerekli ekipman ve ölçü aletlerini, çalışmanın parasal ve zaman boyutunu önceden ortaya koyan,
- Çalışmanın amaçlarını ve amaçları etkileyen değişkenlerin seçim ölçütlerini belirleyen,
- Amaçları etkileyen değişkenlerin sınıflandırılması ve her bir sınıftaki değişkenlerin ayrı ayrı değer kümelerinin belirlenmesi ölçütlerini açıklayan,
- İncelenen problemde değişken ve/veya seviye sayısının çalışmanın yapılmasını engelleyecek kadar çok olması halinde çalışmanın yapılabilirliğini artıran,
- Uygulamada karşılaşılabilecek sorunları ve bunların çözümlerini ortaya koyabilen

yaklaşımlara gereksinim vardır.

Erişilebilen kaynaklarda yukarıda belirtilen gereksinimleri bütünüyle karşılayacak yaklaşımların olmadığı görülmüştür. İzleyen kesimlerde bu gereksinimleri karşılayacak sistematik bir yaklaşım geliştirilmektedir. Ayrıca, tasarım eniyileme probleminin çözümüne alternatif olarak, geliştirilmek üzere, bir matematiksel model yaklaşımı da önerilmektedir.

##### 4.1 Taguchi Yöntemlerinin Uygulamasında Temel İşlemlere Dayalı Sistematik Bir Yaklaşım

TY'nin bir ürün veya süreçte başarılı bir şekilde uygulanabilmesi sistematik bir yaklaşımın izlenmesine bağlıdır. Bu amaçla geliştirilen sistematik yaklaşımın akış seması Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Taguchi yöntemlerinin uygulanmasında izlenecek sistematik yaklaşımın akış şeması

Akış şemasındaki işlemler 13 aşamada toplanabilir:

- 1.Problemin belirlenmesi ve ekibin oluşturulması.
- 2.Performans karakteristiklerinin ve ölçüm sistemlerinin belirlenmesi.
- 3.Performans karakteristiklerini etkileyen değişkenlerin belirlenmesi.
- 4.Hazırlık deneylerinin yapılması.
- 5.Kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen değişkenlerin seviyelerinin (değer kümelerinin) belirlenmesi.
- 6.Incelenecek bileşik etkilerin belirlenmesi.
- 7.Uygun OD'in seçilmesi ve değişkenlerin dizilere yerleştirilmesi.
- 8.Kayıp fonksiyonu ve performans istatistiklerinin belirlenmesi.
- 9.Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi.
- 10.Veri analizi ve KD'in eniyi değerlerinin belirlenmesi
- 11.Sonuçların test edilmesi.
- 12.Tolerans tasarımı.
- 13.Değerlendirme, yürütme ve izleme.

Bu aşamalar aşağıda ayrıntılı olarak incelenecektir.

#### 4.1.1 Problemin belirlenmesi ve ekibin oluşturulması

Yeni bir ürünün (sürecin) geliştirilmesi durumunda bu çalışma hiç bir araştırmaya gerek olmadan yapılır. Söz konusu çalışma mevcut bir ürün (süreç) için yapılacaksa, bu ürünün (sürecin) nasıl seçileceği sorusu önem kazanmaktadır. Genelde izlenen yol ürüne (sürece) ilişkin hurda, yeniden işleme, garanti ve servis maliyetleri ile tüketici şikayetlerinin esas alınması şeklindedir.

Çalışma alanı (problem-belirli bir ürün veya sürecin alt kısmı) belirlendikten sonra çalışmayı yürütecek ekip oluşturulur. Ekipte problemin ilgili olduğu kısımlardan elemanlar (probleme yönelik teknik bilgilere sahip olanlar), deney tasarımcısı (deneyin planlanması, yürütülmesi ve sonuçların analizini yapmak için gerekli istatistiksel ve istatistiksel olmayan bilgiye sahip olan) ve bu iki gruptaki kişilerden gelecek yönlendirmeler doğrultusunda deneyleri yapacak elemanlar bulunur. Bunların dışında

işlemlerin gerektiği gibi yürütülebilmesini sağlayacak üst yönetim temsilcisi de ekipte bulunmalıdır. İzleyen aşamalardaki işlemler ekipteki elemanlar tarafından yürütülecektir.

#### **4.1.2 Performans karakteristiklerinin ve ölçüm sistemlerinin belirlenmesi**

Performans karakteristiklerinin seçimi oldukça önemlidir. Amaçları yansıtmayan performans karakteristiklerinin seçilmesi, yapılan çalışmanın başarısız olmasına neden olacaktır.

İlk olarak, ilgilenilen çalışma alanında tüketici açısından önemli olan performans karakteristikleri belirlenir. Bir ürünün (sürecin) birden fazla performans karakteristiği olabilir. Bunların içinden çalışmaya esas olacak önemli performans karakteristikleri seçilmelidir. Performans karakteristikleri, KFY ve tasarım kayıtları gibi çalışmalar yardımıyla belirlenir.

İkinci olarak, performans karakteristiklerinin nasıl ölçüleceği (ölçüm sistemi) belirlenir. Farklı karakteristikler için farklı ölçüm sistemleri kullanmak gerekebilir. Gereken ölçüm sistemlerinden biri veya birkaçının temin edilmesi mümkün değilse ilgili karakteristik(ler) dikkate alınmaz.

#### **4.1.3 Performans karakteristiklerini etkileyen değişkenlerin belirlenmesi**

Orün (süreç) performans karakteristiklerini etkileyen bağımsız değişkenler belirlenir. Beyin fırtınası, sebep-sonuç şeması ve akış şeması performans karakteristiklerini etkileyen değişkenleri belirleyebilmek için yararlanılacak araçlardan bazılarıdır. Bağımsız değişkenlerden kolayca kontrol edilebilenler KD grubuna, kolayca kontrol edilemeyenler ise KED grubuna alınır.

#### 4.1.4 Hazırlık deneylerinin yapılması

KD'in çok fazla olması halinde hem süre, hem de maliyet açısından deneyin yapılması son derece zor olmaktadır. Çalışmanın başlamadan bitmesine neden olan bu durumdan kurtulabilmek için değişkenlerden bazılarını deney dışında tutmak gerekir. Başlangıçta hangi değişkenin önemli, hangisinin önemsiz olduğunu bilmek her zaman için mümkün olmayabilir. Deneyimlere dayanarak bazı değişkenlerin deney dışı bırakılması mümkün olsa bile, çoğu zaman "deney dışı bırakılan değişkenler önemli miydi?" sorusu zihinlerden kaybolmayacaktır. Daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için belirlenen bütün değişkenleri içeren hazırlık (ön eleme-ayıklama) deneyleri (screening design) yapılır. Hazırlık deneylerinde değişkenlerin seviye sayısı olabildiğince az (genellikle 2) tutulur. Deneyler sonunda elde edilen veriler analiz edilerek ilgili performans karakteristikleri üzerinde önemli ve önemsiz olan değişkenler belirlenir. İzleyen aşamada önemsiz olan değişkenler deney dışı tutulurken, önemli olan değişkenler ayrıntılı deneyler yapabilmek için asıl deney grubuna alınır.

#### 4.1.5 Kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi

Asıl deney grubuna alınan değişkenlerin seviye sayıları özelliklerine uygun olarak belirlenir. Böylece KD için olurlu seçenekler (değer kümesi) belirlenir ve kodlanır. KD'in seviyelerinin olabilir tüm durumlar kümesi KD uzayı olarak adlandırılır.

Taguchi, KD'in her biri için üç veya daha fazla test seviyesi seçilmesini önermiştir (Kackar, 1985). Üç veya daha fazla test seviyesi performans karakteristiği üzerinde KD'in asıl etkilerindeki doğrusal olmayan ilişkiyi ortaya çıkarmaktadır. Seçilen alt kümelerden oluşan KD matrisinin KD uzayının tümünü veya büyük bir bölümünü kapsayabilmesi için test seviyeleri birbirinden bağımsız ve ayrık olarak seçilmelidir.

ikinci olarak, performans değişkenliğini en fazla etkileyen veya ürün performansının duyarsız olması istenen KED'in değer kümeleri belirlenir. Fiziksel sınırlamalardan dolayı KED'in hepsi deneye alınamayacaktır. Bu nedenle, KED belirlenirken karşılaşılabılır tüm durumları temsil edebilmesine özen gösterilmelidir. KED'in olabilir tüm durumlarını içeren küme KED uzayı olarak adlandırılır. Kackar'a (1985) göre KED'in test değerlerinin seçiminde Taguchi'nin izlediği ilkeler, KED'in ( $w_1$ 'lerin) dağılımının ortalaması ve standart sapması yaklaşık olarak, sırasıyla,  $\bar{w}_1$  ve  $S_1$  olmak üzere;

- Performans karakteristiği Y üzerinde  $w_1$ 'nin doğrusal bir etkisi varsa  $(\bar{w}_1, -S_1)$  ve  $(\bar{w}_1, +S_1)$  olmak üzere iki test değeri seçilmelidir.
- Performans karakteristiği Y üzerinde  $w_1$ 'nin eğrisel etkisi varsa  $(\bar{w}_1, -\sqrt{\frac{3}{2}}S_1)$ ,  $\bar{w}_1$  ve  $(\bar{w}_1, +\sqrt{\frac{3}{2}}S_1)$  olmak üzere üç test değeri seçilmelidir.

Test değerlerinin seçimi KED'in yaklaşık olarak simetrik dağıldığı varsayımı üzerine kuruludur. Daha sonra seçilen test değerleri KD'inde olduğu gibi kodlanır.

KED'in çok fazla olduğu veya deney esnasında kontrollerinin çok zor olduğu durumlarda, deneyde incelenecek KED'i ve bunların seviyelerini belirleyerek KED matrisini oluşturmak genellikle mümkün değildir. Böyle durumlarda, ilgili deneysel birleşimde belirli sayıda tekrar yapmak izlenecek en pratik yoldur (ASI, 1986; Fox and Lee, 1990).

#### 4.1.6 Incelenecek bileşik etkilerin belirlenmesi

Performans karakteristikleri üzerinde asıl etkilerin yanısıra bileşik etkiler de önemli etkiye sahip olabilir. Oysa, Taguchi performans karakteristiklerinin seçiminde gösterilecek özen ile önemli olabilecek bileşik etkilerin önemsiz kabul edilerek deneye alınmayabileceğini vurgulamaktadır (Taguchi and Wu, 1979). Taguchi'ye göre bir bileşik etkiyi elde edebilmek için iki tane asıl etkiyi kontrol etmek gerektiğinden dolayı bileşik etkiler ihmal edilebilir (Ross, 1988 b). Ancak, deney tasarımcısının bu

özeni gösteremeyeceği veya o düzeyde bilgiye sahip olamayacağı da olasıdır. Gereken deneysel süre ve maliyetler çok yüksek olduğu için bütün bileşik etkilerin deneye dahil edilmeleri genellikle mümkün değildir. Bu yüzden, önemli olacağı zannedilen bileşik etkiler deneye dahil edilir. Öte yandan, olanaklar çerçevesinde önemli bir takım bileşik etkilerin deneye dahil edilmesi çalışmanın başarı şansını da artıracaktır.

#### 4.1.7 Uygun ortogonal dizilerin seçilmesi ve değişkenlerin dizilere yerleştirilmesi

KD ve KED olmak üzere iki ayrı değişken grubu için iki ayrı OD seçilecektir. KD ve KED uzaylarının hepsinin araştırılması ekonomik bir yaklaşım değildir. İstatistiksel deney tasarım yöntemleri kullanılarak KD ve KED uzaylarını temsil edebilecek uygun alt kümeler seçilebilir. Bu amaçla, Taguchi, KD ve KED matrislerinin oluşturulmasında OD'in kullanılmasını önermiştir. Deneydeki KD'in fazla olması ve ayrıca bileşik etkileri de içermesi nedeniyle KD dizisinin seçimi ve değişkenlerin yerleştirilmesi daha önemlidir. Ancak, KD matrisi oluşturulurken en az sayıda deney ile en fazla bilgiyi elde edecek şekilde düzenlenmesine dikkat edilmelidir. Seçilen bu alt kümeler KD matrisine belirli bir sistematiğe yerleştirilir.

Deneye alınan değişkenlerin seviye sayılarına göre ya standart bir OD aynen seçilir ya da seçilen standart OD üzerinde bir takım düzenlemeler yapılır.

Değişkenlerin ve bileşik etkilerin OD'ye yerleştirilmesi ise seçilen OD standart grafiğinin çizilen problem grafiğine uygun hale getirilmesiyle başılır. KED dizisi de sadece SD'ne göre seçilir ve değişkenler diziye gelişigüzel sırada yerleştirilir. KED'in test değerleri uygun bir şekilde seçilirse OD yardımıyla KED uzayını kapsayacak bilgiler alınabilir.



KD ve KED dizileri, Kısım 3.5.3'de açıklanan Şekil 3.8'deki gibi, birleştirilerek parametre tasarım modeli oluşturulur. Modele göre yapılması gereken deney sayısının süre ve maliyet açısından olurlu olup olmadığı araştırılır. Olurlu ise bir sonraki aşama, olurlu değilse değişken (KD ve KED) ve/veya seviye sayısı azaltılarak Kısım 4.1.3'de açıklanan 3. Aşama icra edilir.

#### **4.1.8 Kayıp fonksiyonu ve performans istatistiklerinin belirlenmesi**

İlgilenilen problemin (ürünün veya sürecin) geliştirilmesi esnasında birden fazla performans karakteristiği ile karşılaşılabılır. Performans karakteristiklerinin özelliklerine (hedef değeri, sürekli veya kesikli oluşu) uygun kkf'ları ve performans istatistikleri seçilir.

Deneyler yapıldıktan sonra elde edilen verilerin analizi seçilen performans istatistiklerine göre yapılacaktır. Performans istatistiklerinin hatalı seçilmesi ise eniyi KD değerlerinin hatalı belirlenmesine ve geliştirme çalışmasının başarısız olmasına neden olacaktır. Bu yüzden, performans istatistikleri seçiminde gereken özen gösterilmelidir.

#### **4.1.9 Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi**

Daha önce de ifade edildiği gibi, parametre tasarım deneyleri iki şekilde yapılır:

- Fiziksel deneyler,
- Bilgisayar benzetim denemeleri.

Her iki yöntemde de KD'in bir birleşimi KED'in bütün birleşimlerinde değerlendirilir ve elde edilen sonuçlar (ölçümler) modelde ayrılan uygun alanlara yazılır.

Fiziksel deneylerin yapılması halinde, olurlu ise deneylere başlamadan evvel gerekli olan deney malzemeleri yeterince tedarik edilmelidir. Böylece, malzeme partileri arasındaki farklılıklar önlenebileceği gibi, dikkatlerin sadece deney üzerinde yoğunlaştırılması da sağlanmış olacaktır.

Bileşik etki sütunları bu sütunları oluşturan asıl etki sütunlarına bağlıdır. Fiziksel deneylerin yürütülmesinde istemeyerek yapılabilen ortogonalliğin (dengeli olma durumunun) bozulması hataları ile karşılaşılmaması için bileşik etki sütunları test stratejisini (birleşimlerini ve sırasını) gösteren kağıtlara yazılmaz. Başka bir anlatımla, test stratejisini gösteren kağıtlarda sadece asıl etki sütunlarının bulunması daha güvenilir sonuçlar için gereklidir.

Deney süresince değişebilen ve deney sonuçlarını etkileyen, fakat kontrol edilemeyen faktörlere (değişkenlere) karşı korunabilmek için deneme sırası rassallaştırılır. Deneyin durumuna (yapısına ve özelliğine) göre tam rassallaştırma (complete randomization), basit tekrarlama (simple repetition), bloklar içinde tam rassallaştırma (complete randomization within blocks),..., vb. gibi yöntemlerden uygun olanı kullanılarak rassallaştırma yapılır.

DeneySEL sonuçların anlamlı olarak yorumlanabilmesi için deneylerin yapılacağı koşullar ile deneyler yapılırken karşılaşılan, fakat başlangıçta öngörülmemiş olan, koşullar kaydedilmelidir.

#### 4.1.10 Veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin eniyi değerlerinin belirlenmesi

Parametre tasarım modelindeki KD'in her bir birleşimi için elde edilen dENEYSel verilerin ortalaması, varyansı ve performans istatistikleri hesaplanır. Varyans analizleri yapılarak KD'in performans karakteristikleri üzerine olan etkileri belirlenir. Etkileri görsel olarak ortaya koymak için asıl ve bileşik etki grafiklerinden de yararlanılır.

Bir üretim problemini çözmek üzere deney yapıldığında, deneyde gözlenen toplam değişkenlik, üretimde gözlenen değişkenliğin % 75'inden fazla olmalıdır. Bu, uygun değişkenlerin deneye alınıp alınmadığının bir göstergesi olup, kesinlik ifade etmez. Deneydeki verilerin açıklığı üretim verilerine göre çok küçük ise, deneye alınan değişkenler anlamlı olsa bile, problemin kontrolü için yeterli olmayacak ve başka değişkenlerin araştırılması gerekecektir. Öte

yandan, hatadan (bilinmeyen ve kontrol edilemeyen değişkenlerden) kaynaklanan katkı yüzdesi düşük (% 15 veya daha az) ise önemli bütün değişkenlerin deneye alınmış olduğu kabul edilir. Bu değer yüksek (% 50 veya daha fazla) ise bazı önemli değişkenlerin deneye alınmadığı, şartların hassas olarak kontrol edilemediği veya ölçüm hatasının oldukça fazla olduğu kabul edilir (Ross, 1988 b).

Performans istatistiğini enbüyükleyen KD'in seviyeleri eniyi ürün tasarım seviyeleri olarak belirlenir. Ancak, performans istatistiğinin özelliğine göre kullanılacak eniyileme süreci de farklı olacaktır. "Nominal değer eniyi" durumunda performans değişkenliğini enazlamak için iki adımlı bir eniyileme süreci kullanılır (Lin, et al., 1990):

- Performans istatistiği üzerinde anlamlı etkiye sahip olan değişkenleri belirle ve performans değişkenliğini enazlayan değişken seviyelerini bul.
- Sadece ortalama üzerinde anlamlı etkiye sahip olan değişkenleri belirle<sup>1</sup>. Ortalamayı hedef değere olabildiğince yaklaştıran değişken seviyelerini bul.

Bu süreçte birinci adımda değişkenlik azaltılmakta, ikinci adımda ise hassasiyet artırılmaktadır.

"Daha küçük daha iyi" durumunda (negatif değer istenmiyor) en fazla arzulanan durum sıfır olmasına rağmen ortalama hiç bir zaman sıfıra getirilemez. Bu nedenle, değişkenliği azaltabilmek için tek adımlı eniyileme süreci kullanılır.

- Toplam varyansı etkileyen değişkenleri belirle ve toplam varyansı enküçükleyen değişken seviyelerini bul.

"Daha büyük daha iyi" durumunda ise performans karakteristiğinin tersi alınarak "daha küçük daha iyi" süreci kullanılabilir.

---

<sup>1</sup> Düzeltme değişkenlerinin seçiminde, bunların performans karakteristiği ile doğrusal ilişkiye sahip olmasına ve imalat anında kolayca değiştirilebilir olmasına dikkat edilmelidir.

Varyans analizleri ve grafiksel gösterimleri kullanarak elde edilen KD'in eniyi değerleri farklı performans karakteristiklerine göre bir çelişki arzedebilir. Bu çelişkinin etkisini enazlayabilmek için KD değerleri farklı performans karakteristikleri, maliyetler ve işlemin zorluk düzeyi gibi farklı ölçütleri içeren genel değerlendirme tablosu ile son bir değerlendirmeye tabi tutulur. Amaçlar (performans karakteristikleri) arasında çelişki olması halinde çeşitli ödünleşmeler yapılarak eniyi (en uygun) KD değerleri tesbit edilir. Belirlenen eniyi tasarım değerlerine karşı gelen performans değerleri hesaplanır ve izleyen aşamalarda anlamlı karşılaştırmalar yapabilmek için ortalamalara ilişkin güven aralıkları<sup>2</sup> oluşturulur. Kestirilen eniyi değişken-seviye birleşiminin güven aralığı, seçilen  $\alpha$  anlam düzeyinde;

$N$  : Toplam deney sayısı,

$n_e$  : Doğrulama deneyindeki tekrar sayısı,

$MS_e$  : Hata kareler ortalaması (birleştirilmiş),

$m$  :  $\mu$ 'nün kestiriminde kullanılan değişkenlerin SD toplamı

olmak üzere

$$\mu \pm \sqrt{F_{\alpha;1,SD,MS_e} * MS_e * \left( \frac{1+m}{N} + \frac{1}{n_e} \right)} \quad (4.1)$$

bağıntısıyla hesaplanır (Ross, 1988 b).

#### 4.1.11 Sonuçların test edilmesi

Parametre tasarım deneyinde OD kullanıldığında KD ile performans istatistikleri arasındaki ilişkinin doğrusal veya doğrusala çok yakın olduğu kabul edilir. OD, bazı doğrusal olmayan ilişkilerin (KD arasındaki bileşik etkilerin) incelenbilmesine olanak sağlar. Bununla birlikte, ilişki oldukça fazla eğrisel ise Kısım 4.1.10'da

<sup>2</sup> İstenildiğinde performans istatistikleri ve KD'in herbiri için güven aralıkları oluşturulabilir. Ancak, konuyu daha fazla dağıtmamak için burada ayrıntıya girilmeyecektir. Ayrıntılı bilgi için bkz. Taguchi, G., 1987, System of experimental design, Vol. 1-2, Unipub, New York, 1189 p.

açıklanan 10. Aşamada belirlenen eniyi KD değerleri başlangıç tasarım değerine göre bir gelişme arzitemeyebilir. Bu gibi durumlara karşı korunabilmek için eniyi KD değerlerini içeren birkaç doğrulama deneyi yapılır (Kackar and Shoemaker, 1986).

OD'in özelliğinden dolayı tasarım değişkenlerinin eniyi seviyelerinin birleşimini içeren deney çalışma süresince hiç denenmemiş olabilir. Belirlenen seviyelerin gerçekten eniyi olup olmadıklarını kontrol etmek için bu seviyeleri içeren doğrulama deneyleri yapılmalıdır. Doğrulama deneylerinde KD'in hem başlangıç ve hem de eniyi seviyelerinin birleşimini içeren deneyler yapılır ve karşı gelen performans değerleri ölçülür. Daha sonra bu tasarımlara karşı gelen performans istatistikleri hesaplanır. Doğrulama deneyleri sonunda hesaplanan performans istatistikleri hem birbirleriyle (başlangıç ve eniyi tasarım) ve hem de veri analizi aşamasında hesaplanmış olan performans istatistikleri ile karşılaştırılarak kontrol edilir.

Doğrulama deneyi ile elde edilen performans istatistikleri, parametre tasarım deneyi ile (veri analizi aşamasında) belirlenen performans istatistikleri güven aralıkları içinde değilse nedenlerini araştırmak ve gereken önlemleri almak amacıyla Kısım 4.1.2'de açıklanan 2. Aşamaya dönülür. Belirlenen performans istatistikleri güven aralıkları içinde ise başlangıçtan itibaren yapılan bütün varsayımların doğru olduğuna karar verilebilir. Eniyi tasarım değerleri ile elde edilen sonuçlar, başlangıç tasarımı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında sağlanan gelişme yeterli bulunuyorsa Kısım 4.1.13'de açıklanan 13. Aşama, yeterli bulunmuyorsa Kısım 4.1.12 de açıklanan 12. Aşama icra edilir.

Doğrulama deneyi sonuçları güven aralıkları dışına düşüyorsa aşağıdaki durumlardan biri veya birkaçı sözkonusudur:

- Deneyler yürütülürken ve/veya veri analizi yapılırken bir takım hatalar (ölçüm, hesaplama,..vb. hataları) yapılmış olabilir.

- Performans karakteristikleri üzerinde önemli etkiye sahip olan değişkenlerden bazıları deney dışında bırakılmış olabilir.
- Önemli bazı bileşik etkiler sözkonusudur ve bunlar deney dışı bırakılmıştır.
- Performans karakteristikleri yanlış seçilmiş olabilir

Doğrulama testi sonunda performans istatistiğinin hesaplandığı gibi yeterince iyi olmadığı görülürse öncelikle bunun nedenleri araştırılarak giderilmelidir. Eğer giderilemiyorsa gözden kaçan başka KD'in veya KED'in olup olmadığı veya mevcut KD ve KED'in seviyeleri arasında kurulan ilişkilerde bir takım hatalar olup olmadığı araştırılmalıdır. Yapılan kontroller ve ilave çalışmalar sonunda gelişme sağlanamıyorsa KD arasında önemli bileşik etkilerin olup olmadığı araştırılmalıdır. Mümkünse varolan önemli bileşik etkiler deney planına dahil edilerek incelenmelidir. Varolan önemli bileşik etkilerin deney planına alınıp incelenmesi mümkün değilse, ya uygun dönüşümlerle (logaritma, karekök,....,vb. dönüşümler) bu etkiler giderilir veya performans karakteristiği, KD arasında bileşik etkiler olmayacak şekilde, yeniden tanımlanır. Sözü edilen kontroller sonunda gelişme sağlanamamışsa performans karakteristiklerinin yanlış seçilmiş olabileceği olasılığı üzerinde durulmalıdır. Karşılaşılan problemi giderecek uygun önlemler alındıktan sonra Kısım 4.1.2'de açıklanan 2. Aşamaya dönülür ve işlemler yeniden yapılır.

#### 4.1.12 Tolerans tasarımı

Parametre tasarımı aşamasında sağlanan gelişme yeterli olmamışsa tolerans tasarımı ile geliştirme yapılır. Performans karakteristiği üzerinde en fazla etkiye sahip olan değişken(ler)in varyans(lar)ı ilave bir harcamayla azaltılır. Yapılan harcama ile sağlanan gelişme yeterli oluncaya kadar çalışma sürdürülür. Durma noktası veya yapılabilecek (katlanılabilecek) ek harcamanın miktarı kayıp fonksiyonu yardımıyla belirlenebilir.

#### 4.1.13 Değerlendirme, yürütme ve izleme

Eniyi tasarım seviyeleri belirlenerek doğrulayıcı deneyler ve gerekiyorsa tolerans tasarımı yapıldıktan sonra yeterli gelişme sağlanmış demektir. Artık yapılan harcamalar ve elde edilen gelişmeler kalite ve maliyet açısından değerlendirilebilir.

KD'in eniyi değerlerini belirlemek için yapılan geliştirme çalışmasının birim ve yıllık getirisi (tasarrufu) ile çalışma için yapılan harcamalar karşılaştırılır. Öte yandan, yapılan geliştirmenin tüketiciler ve çalışanlar üzerinde meydana getireceği etkiler ile rakiplere karşı kazanılan rekabet gücü belirlenerek raporlanır.

Bütün bu aşamalardan sonra gelişmeler yeterli bulunuyorsa ilgili birimlere gerekli spesifikasyonlar gönderilir ve uygulama başlatılır. Oluşabilecek aksaklıkların giderilebilmesi için ilgili süreç ISK ile izlemeye alınır.

#### 4.2 Taguchi Yöntemlerinin Uygulanmasında Matematiksel Modelleme Yaklaşımı

Genel olarak bilimsel çalışmalarda izlenen yol; problemin belirlenmesi, gözlem yapılması, modelin kurulması, çözülebilirliğinin sağlanması ve geçerliliğinin kanıtlanarak sonuçların kullanılmasını içerir. Konuya daha da açıklık getirmek için tasarım kalitesini geliştirme problemi bir karar modeli gibi düşünülebilir. Taguchi yöntemleri bu bakış açısıyla ele alındığında, matematiksel modellemeye uygun olduğu görülür. TY'deki kontrol edilebilen değişkenler modelin karar değişkenlerini, deneyler sonucu elde edilen ortalama performans karakteristiği (karakteristikleri) değerleri kümesi modelin kısıtlarını oluşturur. Performans istatistiği (istatistikleri) değerleri kümesi de modelin amaç fonksiyonu (fonksiyonları) olur. Problemi bir karar modeli ile ifade ettikten sonra beklenen kayıpları enazlayan karar değişkenlerinin değerlerini bulmak için modelin çözülmesi ve modelin geçerliliğinin sınanması gerekmektedir.

#### 4.2.1 Matematiksel model gereksinimi

Tasarım eniyileme probleminin çözümü için;

- KD'i sürekli olarak ele alabilen,
- Deneysel ve ölçüm hatalarını enküçükleyen,
- KD'in değer kümelerinin yanlış seçilme olasılığını enazlayan veya ortadan kaldıran,
- Performans karakteristikleri arasındaki ödünleşmeyi doğru yapabilen,
- Yanlış deney planı seçme olasılığını enküçükleyen veya ortadan kaldıran,
- Ölçüm aleti olmayışı nedeniyle performans karakteristiği ihmalini gerektirmeyen,
- Ekipman, malzeme veya eleman yokluğu nedeniyle çalışmanın yapılmasını engellemeyen,
- KD'in duyarlılık analizlerini yapmaya olanak sağlayan,
- Zaman ve para kısıntısı yüzünden çalışmanın yapılmasını sınırlamayan

yöntem ve yaklaşımlara gereksinim vardır. Bütün bu gereksinimleri karşılamada matematiksel model yaklaşımından yararlanılabilir. Erisilebilen çalışma ve araştırmalarda, tasarım eniyileme probleminin çözümünde yukarıdaki gereksinimleri bütünüyle karşılayan matematiksel model yaklaşımının veya başka bir yaklaşımın olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, izleyen kesimlerde açıklanacak matematiksel model yaklaşımının da yukarıda belirtilen gereksinimleri bütünüyle karşılayacağı söylenemez. Ancak, sözü edilen gereksinimlerin (beklentilerin) çözümüne veya karşılanabilmesine bir başlangıç teşkil edeceği söylenebilir. İzleyen kesimlerde açıklanacak matematiksel model yaklaşımına bu açıdan bakmak ve bu yaklaşımı geliştirilmek üzere bir başlangıç olarak kabul etmek yararlı olacaktır.

#### 4.2.2 Matematiksel modelin kurulabilirliği

$Y=f(X,W)$  fonksiyonunun sayısal olarak değerlendirilebildiği durumda tasarım eniyileme probleminin bilgisayar benzetim denemeleri veya sayısal çözüm yöntemleri yoluyla



cözülebileceği daha önce ifade edilmişti.  $Y=f(X,W)$  fonksiyonunun bilinmesi veya bu fonksiyona çok iyi yakınsanabilmesi halinde kısıtlı doğrusal olmayan karar modeli yazılabilir. Uygun doğrusal olmayan programlama algoritması kullanılarak tasarım eniyileme problemi çözülebilir. Genelde bu fonksiyonun analitik biçimi ya bilinmez ya da elde edilmesi çok zordur. Böyle durumlarda kestirim yöntemlerine başvurulur. Fonksiyon belirlenirken bazı varsayımlar yapılmaktadır. Varsayımların çokluğu oranında güvenilirlik de azalmaktadır.

Kaynak araştırması sırasında bu konuda başlatılan çalışmalara rastlanılmıştır. Bunlardan en önemlisi Fathi (1991) tarafından kaleme alınmıştır. Fathi (1991), fonksiyonun analitik biçiminin bilinmesinin veya çok iyi yakınsanabilmesinin yanısıra sürekli ve iki kez diferansiyelinin alınabilir olması halinde doğrusal olmayan programlama modelinin oluşturulmasında fonksiyonel yaklaşım (functional approximation)<sup>1</sup> yönteminin kullanılabilmesini belirtmiştir. Yöntemin özünde; verilen bir nokta ( $\mu$ ) civarında  $f$  fonksiyonunun karesel terimlerine kadar Taylor serisi açılımının alınması ve bu noktadaki varyansın kestirilmesi yatmaktadır. Problemin özelliğine göre tasarım eniyileme (parametre tasarım) modeli için farklı planların geliştirilebileceği, ardışık karesel varyans yaklaşım yönteminin (successive quadratic variance approximation method) de bunlardan biri olduğu aynı makalede belirtilmektedir.

Çalışmaların ortak amacı ise  $Y=f(X,W)$  fonksiyonunun belirlenmesinde her durumda geçerli olabilecek etkin bir yaklaşım geliştirmektir. İzleyen kesimlerde deneysel veriler esas alınarak tasarım eniyileme problemini farklı açıdan ele alan bir yaklaşım açıklanacaktır.

---

<sup>1</sup> Ayrıntılı bilgi için bakınız, Tukey, J.,W., 1958, Propagation of errors fluctuations and tolerances: Basic generalized formulas, Technical Report No. 12, Statistical Research Group, Princeton University, NJ.

#### 4.2.3 Matematiksel model ve varsayımları

Tasarım eniyileme problemine Taguchi yaklaşımında performans karakteristikleri ile KD arasındaki ilişkinin genellikle toplamsal (additive) olduğu kabul edilmektedir (Taguchi, 1987; ASI, 1986). Benzer bir kabul (varsayım) matematiksel model oluşturulurken de yapılabilir. Buna göre KED'in etkin olduğu ortamda performans karakteristiği (Y) ; her bir kontrol edilebilen değişkenin performans karakteristiği ile olan ilişkisinin ifade edildiği matematiksel fonksiyonların toplamından oluşmaktadır. Daha açık bir anlatımla, oluşturulacak matematiksel modelin amaç fonksiyonu,  $f(x_1, W)$  kontrol edilebilen değişken  $x_1$ 'nin performans karakteristiği ile olan ilişkisini göstermek üzere;

$$Y = f_1(x_1, W) + f_2(x_2, W) + \dots + f_n(x_n, W) - (n-1) \cdot \bar{Z} + e$$

şeklinde olacaktır. Eşitliğin sabit terimi " $(n-1) \cdot \bar{Z} + e$ " KD'in eniyi değerlerinin belirlenmesi üzerine bir etkisi olmayan, fakat amaç fonksiyonunun değeri üzerinde etkili olan bir düzeltme faktörüdür. Tasarım eniyileme probleminin amacının KED'in bozucu etkilerine karşı daha duyarsız (sağlam) tasarım yapmak olduğu, aynı düşüncenin matematiksel model yaklaşımına da aktarıldığı görülmektedir. O halde yapılması gereken şey, KED'in var olduğu ortamda her bir kontrol edilebilen değişken ( $x_j$ ) ile performans karakteristiği (Y) arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktan ibarettir.

$Y = f(X, W)$  fonksiyonu, bu fonksiyonu oluşturan KD'in sayısı kadar alt fonksiyonlara ayrılmıştır. Böylece bütün fonksiyonun birden yazılması yerine her bir kontrol edilebilen değişken ile performans karakteristiği arasındaki fonksiyon belirlenmektedir. Belirlenen bireysel fonksiyonlar birleştirilerek bütün fonksiyona ulaşılmaktadır. Amaç fonksiyonu olarak ele alınacak bu fonksiyonu oluştururken izlenen yol, gerektiğinde kısıt fonksiyonlarını oluşturmak amacıyla da kullanılabilir. Bunların ötesinde yapılması gereken şey ise kontrol edilebilen değişkenlerin değer kümelerini belirleyen kısıtları yazmaktır. Yukarıdaki açıklanan ilişkiler matematiksel gösterimlerle ifade edilirse, tasarım eniyileme amacıyla kullanılacak matematiksel model;

i : Kısıt sayısı,

$x_j$  : Kontrol edilebilen j. değişken,  
 $a_j$  : Kontrol edilebilen j. değişkenin alt sınırı,  
 $b_j$  : Kontrol edilebilen j. değişkenin üst sınırı,  
 $e_k$  : k. hata sabiti  
 $\bar{T}_i$  : i. kısıt fonksiyonunun ortalama değeri,  
 $\tau_i$  : i. kısıt fonksiyonunun hedef değeri,  
 $\bar{Z}$  : Amaç fonksiyonunun ortalama değeri

olmak üzere,

$$g_{i1}(x_1, W) + g_{i2}(x_2, W) + \dots + g_{in}(x_n, W) - (n-1) \cdot \bar{T}_i + e_i \leq \tau_i \quad (4.2)$$

$$a_j \leq x_j \leq b_j \quad (4.3)$$

kısıtları altında

$$Y = f_1(x_1, W) + f_2(x_2, W) + \dots + f_n(x_n, W) - (n-1) \cdot \bar{Z} + e_k \quad (4.4)$$

fonksiyonunun enbüyüklenmesi olarak yazılır. Modelin 4.2 ve 4.4 nolu denklemleri KED'in etkin olduğu ortamda elde edilen veriler üzerine oluşturulduğundan, W'ler modelde kapalı bir şekilde temsil edilmekte olup ilave değişkenler olarak görülmeyecektir. Başka bir ifadeyle, W'ler modelin gizli değişkenleri, X'ler de modelin karar değişkenleridir. Modelin çözümüyle W'lere karşı daha duyarsız olan X değerleri elde edilecektir.

Oluşturulan model genellikle doğrusal olmayan tek (veya çok) amaçlı bir model olup, performans istatistiğinin özelliğinden dolayı her zaman için enbüyüklenecektir. Yazılan bu model "nominal değer eniyi" durumu için geçerlidir. "daha küçük daha iyi" ve "daha büyük daha iyi" durumlarında ise 4.3 ve 4.4 denklemlerini içeren model geçerlidir<sup>1</sup>.

#### 4.2.4 Matematiksel modelin oluşturulması

$y_1 = f_1(x_1, W)$  ile  $g_1(x_1, W)$  fonksiyonel ilişkilerinin belirlenebilmesi için izlenecek adımlar şöyle sıralanabilir:

<sup>1</sup> Bu model incelenen problemde tek performans karakteristiği (amaç) olduğu varsayımı üzerine kuruludur. Birden fazla performans karakteristiğinin olması halinde, model; tek amaçlı yazıldığında ilave kısıtlar, çok amaçlı yazıldığında ise ilave amaç fonksiyon(ları)u gerekecektir.

1. Deneysel çalışma sonunda ölçülen performans karakteristiği değerleri her bir kontrol edilebilen değişkenin seviyelerine göre gruplanır.
2. Uygun bir bilgisayar paket programı ile bu verilere eğri uydurulur. Bu amaçla enküçük kareler yönteminden yararlanılabilir.
3. Uydurulan eğrinin matematiksel fonksiyonu (denklemleri) belirlenir ve geçerliliği test edilir.
4. Kontrol edilebilen değişkenlerin her biri için belirlenen alt fonksiyonlar birleştirilerek asıl fonksiyon(lar) (amaçlar ve kısıtlar) oluşturulur. Mevcut deneysel birleşimler için bu fonksiyon(lar) sayısal olarak değerlendirilir ve ortalama değer(ler)i belirlenir.
5. Performans istatistiği verileriyle oluşturulan fonksiyon(lar) modelin amaç fonksiyonu (fonksiyonları), ortalama verileriyle oluşturulan fonksiyon(lar) ile KD'in alt ve üst sınırları da modelin kısıtlarıdır.
6. Mevcut deneysel birleşimler için modelin çözümünün olup olmadığı ve çözüm değerlerinin deneysel sonuçlara yakınsayıp yakınsamadığı kontrol edilir. Sonuçlar yakınsamıyorsa Adım 2, yakınsıyorsa Adım 7 icra edilir.
7. Model uygun eniyileme yöntemleriyle bilgisayar ortamında çözümlenerek eniyi X değerleri belirlenir.
8. Modelin çözümü ile belirlenen eniyi X değerleri deneysel yöntemlerle belirlenen eniyi X değerleri ile karşılaştırılır. Sonuçlar birbirine yakın veya aynı ise herhangi bir şey yapılmaz. Sonuçlar farklılaşmış ise doğrulama deneyleri yapılarak sonuçların geçerliliği sınanır.

Öte yandan, incelenen olayda birden fazla performans karakteristiği olması halinde izlenecek iki yol vardır:

- En önemli performans istatistiği verilerini kullanarak oluşturulan fonksiyonu modelin amaç fonksiyonu, diğerlerini de kısıt fonksiyonları olarak belirlemek ve tek amaçlı karar modeli olarak ele almak.
- Performans istatistikleri verileriyle oluşturulan fonksiyonları modelin amaç fonksiyonları olarak belirlemek ve çok amaçlı karar modeli olarak ele almak.

Önerilen matematiksel model yaklaşımı tasarım eniyileme probleminin çözümü için bir alternatif olup, bazı durumlarda fiziksel deney sonuçlarına göre daha iyi olabilir. Doğal olarak, önerilen yaklaşımın uygunluğu problemin durumuna ve özelliğine bağlı olacaktır.

#### 4.3 İki Yaklaşımın Karşılaştırılması

Tasarım eniyileme probleminin çözümünde TY'nin uygulanmasında kullanılacak sistematik yaklaşım ile matematiksel model yaklaşımı arasındaki farklılıklar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sistematik yaklaşımda değişkenler kesikli, matematiksel model yaklaşımında ise sürekli olarak değerlendirilmektedir.
- Sistematik yaklaşım ile her zaman için bütünsel eniyeye ulaşılamazken matematiksel model yaklaşımında bütünsel eniyeye ulaşılabilir.
- Sistematik yaklaşımın kullanıldığı fiziksel deneyler için gereken isgücü, para ve işlem yükü problemin boyutu (KD'in sayısı) arttıkça daha da fazlalaşırken, matematiksel model yaklaşımında gerekli bilgisayar zamanı çok fazla artmamaktadır.
- Gerekli ölçme aletlerinin olmayışı veya aşırı maliyet yükü nedeniyle sistematik yaklaşımın kullanıldığı fiziksel deney durumunda bazı performans karakteristikleri ihmal edilirken, matematiksel model yaklaşımında böyle bir durum söz konusu değildir.
- Fiziksel deney durumunda deneysel ve ölçme hatalarıyla, matematiksel model yaklaşımında ise modelin yanlış kurulması durumları ile karşılaşılabılır.
- Matematiksel model yaklaşımı, deneysel veriler üzerine uygulanarak KD'in verilen aralıkta sürekli olarak değerlendirilebilmesine olanak sağlar.
- Performans karakteristikleri çok ise aralarındaki ödünleşme matematiksel model yaklaşımıyla daha doğru ve daha kolay yapılabilir.
- KD arasında varolan bütün önemli bileşik etkiler matematiksel modele aktarılarak incelenebilirken,

sistemantik yaklaşımın kullanıldığı fiziksel deney durumunda sadece bazı önemli bileşik etkiler incelenebilmektedir.

- Matematiksel model yardımıyla KD'in duyarlılık analizleri yapılabilirken sistemantik yaklaşımla yapılamaz,
- Sistemantik yaklaşıma göre matematiksel model yaklaşımının uygulanması daha kolay ve daha ucuzdur.

Yukarıdaki açıklamalardan tasarım eniyileme probleminin çözümünde matematiksel model yaklaşımının daha etkin olduğu sonucu çıkarılabilir. Ancak, bütün bu üstünlükler KD ile performans karakteristi(kleri)ği arasındaki fonksiyonel ilişkilerin analitik olarak belirlenmesi durumunda geçerlidir. Diğer durumlarda ise tasarım eniyileme probleminin çözümünde başvurulabilecek eniyi araç, önceki kesimlerde açıklanan, sistemantik yaklaşımdır.

## 5 TAGUCHI YÖNTEMLERİNİN BİR ÜRETİM SÜRECİNDE UYGULANMASI

Arastırma, tasarım ve imalat çalışmalarında incelenen olayları veya karşılaşılan problemleri etkileyen birden fazla değişken söz konusudur. Değişken sayısının çok olduğu problemlerin çözümünde yararlanılabilecek en ekonomik ve sistematik yöntemlerin başında TY gelir. Batı sanayiinin 1980'lerde tanıştığı bu yöntemlerin en önemli özelliklerini açıklayan ilk makale Kackar (1985) tarafından kaleme alınmıştır. İzleyen yıllarda herbiri TY'nin çeşitli yönlerini inceleyen ve eleştiren çok sayıda makale araştırmacılar tarafından bilimin ve teknolojinin hizmetine sunulmuştur. Ancak, TY'nin teorik yapısına ilişkin yayınlanan çok sayıda makaleye karşın, uygulamaya yönelik makalelerin sayısı pek fazla değildir.

TY'nin imalat hattında ilk kullanımının 1953 yılında Japon Ina seramik firması tarafından gerçekleştirildiği söylenebilir. Fırındaki homojen olmayan ısı dağılımına karşı daha dayanıklı (duyarsız) seramik imal etmek için eniyi değişken-seviye birleşimi araştırılmıştır. 1959 yılında Japon ulusal demiryolu şirketi tarafından ark kaynağı süreç değişkenlerinin eniyi değerlerinin belirlenmesi için bir çalışma yapılmıştır. Ayrıca, bilinmeyen direnç elemanlarının değerini belirlemede kullanılan Wheatstone köprüsü değişkenlerinin eniyi değerlerini belirleyen bir çalışmanın yapıldığı da belirtilmektedir (Taguchi and Wu, 1979).

Phadke, et al., (1983) metal oksit yarı iletken devrelerde kontakt pencere şekillendirme sürecini eniyileyen bir araştırma yapmışlardır. Phadke (1986) baskı devrelerin uygun boyutlarda kesme işlemini gerçekleştiren bıçakların ömrünün artırılması ve yükseltici elektronik devrelerin eniyilenmesi amacıyla iki çalışma yapmıştır. Kackar, et al., (1986) ise bütünleşik elektronik devrelerde kullanılan silikon plakalarda epitaxial tabaka büyütme sürecini eniyilemek için bir çalışma yürütmüştür. Barker (1986) çim biçme makinalarının karbüratörlerinde kullanılan küçük plastik

bir kelebeğin dayanımını artırmak üzere plastik enjeksiyon sürecini eniyileyen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Byrne and Taguchi (1987) otomobil motorlarında gerekli çekme performansını sağlayan elastrometrik konnektörün naylon tüpe ekonomik olarak monte edilmesi yöntemini belirlemek üzere bir çalışma yapmışlardır. Enright (1988) motor pistonu döküm işleminde kubbe oluşumunu önleyecek eniyi tasarım değişkeni değerlerini belirlemek için bir uygulama yapmıştır. Schlack (1988) hız ölçüm ve körük salıverme kablolarını çevreleyen plastik kaplamanın büzülmesi nedeniyle oluşan hurda oranını azaltmak için eniyi değişken-seviye birleşimlerini belirleyici çalışmaların yapıldığını ifade etmektedir. Fox and Lee (1990) metal enjeksiyon kalıplama sisteminde eniyi makina ayarlarını belirlemişlerdir. Jiang, et al. (1990) robot süreç yeteneğini belirlemek ve eniyilemek için klasik deney tasarım yöntemleri ile TY'ni kullanarak karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Shiau and Jiang (1991) üç boyutlu makina gösterim sisteminin yeteneğini belirlemek ve eniyilemek için bir çalışma yapmışlardır. Shina (1991) baskı devrelere elektronik devre elemanlarının bağlantı noktalarının lehimlenmesi işleminde karşılaşılan hurda oranını enazlamak için bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Konu ile ilgili kaynaklardaki uygulamalı çalışmalar incelendiğinde fosforik asit üretim sürecinin eniyilenmesine ilişkin herhangi bir çalışma yapılmadığı gözlenmiştir. Kaynak araştırmalarında ortaya çıkan bir diğer sonuç ise ülkemizde TY'nin teorik veya uygulamalı olarak incelendiği bir çalışmanın olmayışdır.

Belirtilen nedenlerden dolayı, hem özel bir problem olan fosforik asit üretim süreci değişkenlerinin eniyilenmesinde TY'nin kullanımı, hem de ülkemiz koşullarında TY'nin tanıtımı için uygulama yapılmasının yararlı olacağı kanısına varılmıştır. Uygulamada, geliştirilen sistematik



yaklaşımın kullanılması ve aynı verilere matematiksel model yaklaşımının uygulanmasıyla bu yaklaşımların geçerlilikleri ve etkinlikleri de gösterilecektir.

### 5.1 Seçilen Üretim Süreci: Fosforik Asit Üretimi ve Kullanılan Yöntemler

Önemli kullanım alanları gübre ve kimya sanayileri olan fosfor elementi doğada bol olmasına rağmen, oksijene olan ilgisinden dolayı kimyasal bileşikler halinde bulunur. Fosfat kayası deyimi ise bir veya birkaç fosfat kayası minerali içeren cevherler için kullanılır. Dünya fosfor tüketiminin yılda ortalama % 8 artması, fosfat kayası cevherinin aranan bir madde olarak dünya ekonomisindeki yerini uzun süre koruyabileceğinin göstergesidir. Dünya fosfat kayası rezervlerinin 74-192 milyar ton, ülkemiz rezervlerinin ise 37.5-196 milyon ton olduğu belirtilmektedir (Anonymous, 1979).

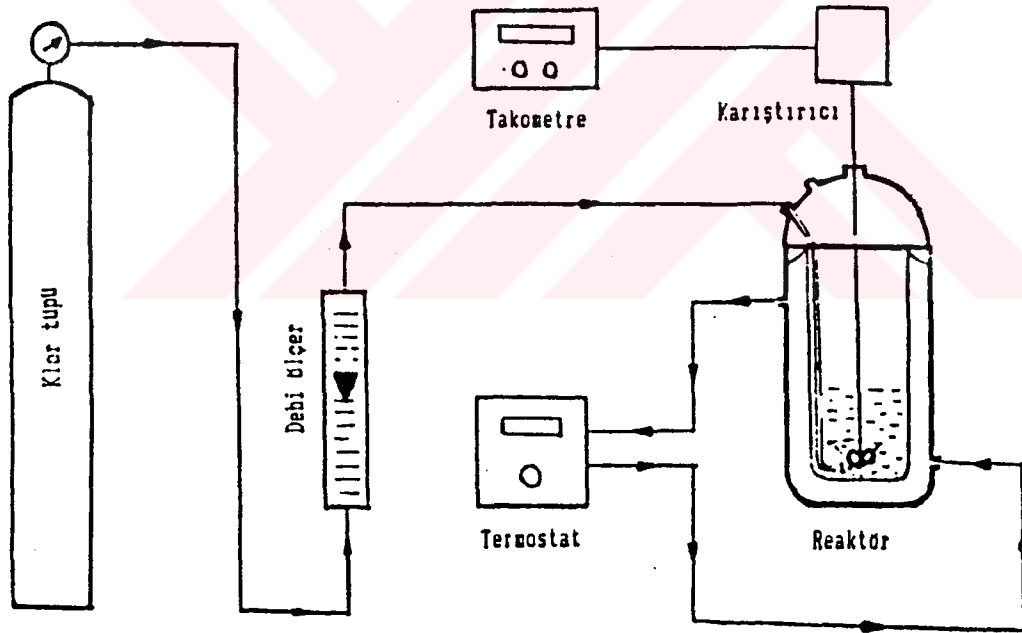
Fosfat cevherlerinin tenörü içerdiği  $P_2O_5$  miktarına göre; % 12-16 ise düşük, % 17-25 ise orta ve % 26-34 ise yüksek olmak üzere üç grupta incelenir. Fosfat yataklarında değişik tip ve kalitede cevher vardır. Cevherin  $P_2O_5$  yüzdesini yükseltmek için çeşitli zenginleştirme (mekanik, flatasyon ve kalsinasyon) yöntemleri uygulanır (John, 1961). Ülkemizin işletilebilir en önemli fosfat kayası yatakları Mardin Mazıdağı civarındadır. Buradaki fosfat kayası cevheri ortalama % 18.02  $P_2O_5$  içerdiğinden cevher zenginleştirilerek % 30.55  $P_2O_5$  tenörlü konsantre hale getirildikten sonra kullanıma sunulmaktadır.

Fosfat cevherlerinden gübre ve fosforik asit elde etmede kullanılan en önemli yöntemlerden birisi fosforik asit üretimindeki "yaş proses" (wet process) dir. Yöntemin özünde fosfat kayası ile sülfirik asitin sıvı ortamdaki reaksiyonundan orto fosforik asit üretilmesi yatmaktadır.

Kaynak araştırması sırasında karşılaşılan çalışmaların hemen hepsinin patent olarak verildiği belirlenmiştir. Ticari değeri nedeniyle izlenen bu yol, süreç değişken (parametre) değerlerinin genelde kapalı kalmasının başlıca nedenidir.

Çalışmada kullanılmak üzere önerilen (geliştirilen) yöntem aşağıdaki noktalar itibarıyla farklılık göstermektedir: Yas proses yönteminin kullanıldığı bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmaların aksine, asit, kullanım anında üretilmektedir. Bu amaçla klor ve kükürtdioksit gazları saf su çözeltisine birlikte gönderilerek asidik (sülfirik ve hidroklorik) çözelti elde edilmektedir.

Ölkemizin petrol ve demirden sonra en fazla döviz ödediği maddelerin başında fosfat kayası ve fosfatlı gübrelerin olmasının yanı sıra, önerilen yöntemde de bazı farklılıkların bulunması, süreç değişkenlerinin eniyilenmesini gerekli kılmaktadır. Süreç değişkenlerinin eniyilenmesi amacıyla Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarları'nda Şekil 5.1'de verilen düzene kullanılarak bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1 Deney düzeneği

Bir deney için yapılması gereken işlemler 3 grupta incelenebilir:

1. Deney öncesi hazırlıklar,
2. Deneyin yapılması,
3. Sonuçların ölçülmesi.

1. **Deney Öncesi Hazırlıklar:** Donanımın dışında deney süresince kullanılacak malzemeler hazırlanır. Bu çalışma için gerekli olan malzemeler; konsantre cevher, stok çözelti (klor ve kükürtdioksit gazları ile doyurulmuş PH'sı 0.20 olan saf su çözeltisi), klor ve kükürtdioksit gazları, filtre kağıdı, cam kaplar, kroze, amonyak, amonyum molibdat ve magnezya çözeltileri olarak sıralanabilir. Sözü edilen malzemeler yeterince tedarik edilmeden çalışmaya başlanılmayacağı gibi, deney esnasında kolayca erişilebilecek bir alanda toplanmaları da gerekmektedir.

2. **Deneyin Yapılması:** Deney düzeneği, deney yapmak için hazır hale getirilir. Gerekli bağlantılar sağlanır, reaksiyon kabı temizlenir, sıcaklık sirkülatörü çalıştırılarak istenilen sıcaklık sağlanır, karıştırıcısının devir sayısı ayarlanır, gerekli miktarda doygun çözelti reaksiyon kabına koyulur, klor gazının debisi ayarlanır, deney düzeneği çalıştırılır ve gerekli miktarda konsantre cevher çözeltiye ilave edilir. Öngörülen şartlar sağlandıktan sonra, deney öngörülen süre kadar sürdürülür.

3. **Sonuçların Ölçülmesi:** Deney sonunda elde edilen karışım uygun kaplarda süzülür. Süzme işlemi sonunda çözünen kısım çözünmeyen kısımdan ayrılır. Gerekli ölçümler ise süzme işlemi sonunda elde edilen çözelti üzerinden yapılacaktır. İstenilen ölçümlerin alınabilmesi için çözeltiye amonyak eklenerek nötr hale getirilir, önceden hazırlanmış amonyum molibdat çözeltisi eklenir ve amonyum fosfo molibdat olarak çökmesi için bir süre (8 saat) bekletilir. Daha sonra çözelti yeniden süzme işlemine tabi tutulur. Çözeltiden numune alınır ve titrimetrik yöntemle kalsiyum tayini yapılır. Elde edilen katı kısım amonyak ile çözüldükten sonra magnezya çözeltisi ilave edilir ve magnezyum pirofosfat olarak çöktürülür. Çöken katı kısımdan numune alınarak kül fırınında 1000°C'de sabit tartıma getirilir ve fosforik asit tayini yapılır.

## 5.2 Taguchi Yöntemlerinin Fosforik Asit Üretim Sürecinde Uygulaması

TY'nin ürün veya süreç geliştirme amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Kullanım alanı ister ürün, ister süreç olsun

izlenecek metodoloji aynı olacaktır. İzlenecek metodolojinin aynı olması, metodolojinin uygulamaya aktarılış biçimini önemli kılmaktadır. Yanısıra, uygulamada karşılaşılabilecek sorunlar ve bunların çözüm yolları da önem arz etmektedir.

İzleyen kesimlerde ele alınacak süreç geliştirme çalışmasında, yukarıda değinilen ve uygulamacılar için çeşitli sınırlamalar getiren problemler inceleneceği gibi, bunların çözüm şekilleri de açıklanacaktır. Uygulamada ise Kısım 4.1'de açıklanan sistematik yaklaşım izlenecektir.

### 5.2.1 Problemin belirlenmesi ve ekibin oluşturulması

Yeni bir sürecin geliştirilmesi söz konusu olduğundan problemin (amacın) belirlenmesi için bir ön araştırmaya gerek yoktur. Problem, önerilen yeni sürecin eniyilenmesidir. Sürecin eniyilenmesi ise KD'in eniyi değerlerinin belirlenmesine bağlıdır.

Konsantre fosfat kayası cevherinden fosforik asit üretim için önerilen yeni yöntem eniyilenecektir. Çalışma 2 Kimya yüksek mühendisi ve 1 Endüstri yüksek mühendisinden oluşan ekip tarafından yürütülecektir. Deneylerin ve ölçümlerin ekipteki Kimya yüksek mühendisleri tarafından yapılması kararlaştırılmıştır. Ekip belirli aralıklarla biraraya gelerek gerekli bilgilerin üretilebilmesi için beyin fırtınası oturumları yapmıştır. Oturumlarda belirlenen bilgiler, yapılan görev bölümüne göre ilgili elemanlarca uygulamaya konulmuştur.

### 5.2.2 Performans karakteristikleri ve ölçüm sisteminin belirlenmesi

Yapılan incelemeler, üretim süreci sonunda ürünün yanısıra çözünmeyen hammadde ve bazı safsızlıkların da oluştuğunu göstermiştir. Üretilen ürün miktarının olabildiğince fazla olması, safsızlıkları içermemesi ve maliyetinin düşük olması istenmektedir. Başka bir anlatımla, ilgilenilen performans karakteristikleri;

- Maliyetlerin enküçüklenmesi,
- Üretilen fosforik asit miktarının enbüyüklenmesi,

▪ Cözeltideki kalsiyum miktarının enküçüklenmesi olarak sıralanabilir. Öte yandan, belirlenen performans karakteristiklerinin ölçümü için gereken aletler (PH metre, hassas tartım aleti, magnetik karıştırıcı, kül fırını) laboratuvarda mevcut olduğundan, herhangi bir dış kaynağa başvurulmayacaktır.

### 5.2.3 Performans karakteristiklerini etkileyen değişkenlerin belirlenmesi

Ekibin yapmış olduğu beyin fırtınası oturumları sonunda performans karakteristiklerini etkileyebilecek değişkenler aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- Reaksiyon sıcaklığı (°C),
- Katı/sıvı oranı (gram/mililitre),
- Klor gazı debisi (mililitre/dakika),
- Karıştırma hızı (devir/dakika),
- Reaksiyon süresi (dakika),
- Doygun çözelti PH'sındaki dalgalanma (asidik yapının gittikçe azalması),
- Klor gazı debisindeki dalgalanma (karıştırma hızı ve katı/sıvı oranından kaynaklanan),
- Dış ortam sıcaklığı,
- Dış ortamdaki havanın birleşimi.

Bunlardan ilk beşi, kontrolleri kolay olduğundan KD grubuna, diğerleri ise KED grubuna alınmıştır.

### 5.2.4 Hazırlık deneyleri

İncelenen KD'in sayısı (5 adet) çalışmanın yapılmasını engelleyecek kadar çok olmadığı için önemsiz KD'in deney dışı bırakılmasına yönelik olan hazırlık deneyleri yapılmamıştır.

### 5.2.5 Kontrol edilebilen ve edilemeyen değişkenlerin seviyelerinin belirlenmesi

Beyin fırtınası oturumlarının devamı olarak incelenecek

KD'in seviyeleri Çizelge 5.1'deki gibi belirlenmiştir<sup>1</sup>. KD az olmasına rağmen incelenmesi istenen değer kümelerinin oldukça geniş olması, herbiri için 5 farklı değer seçilmesinde etkili olmuştur. Seviyeleri belirlerken daha önce yürütülmüş çalışmalar ve yapılan ön deneyler esas alınmıştır. Yanısıra, KD'in seviyelerinin ticari üretim değerlerini kapsayacak şekilde seçilebilmesi için gereken önlemler de alınmıştır. Ayrıca, yapılan çalışmanın olabildiğince mevcut kaynaklar kullanılarak yapılması da öngörülmüştür.

Çizelge 5.1 KD ve ilgilenilen seviyeleri

DEĞİŞKENLER		SEVİYELER				
		1	2	3	4	5
A	Reaksiyon sıcaklığı	12	20	25	30	40
B	Katı/sıvı oranı	1/3	1/5	1/7	1/10	1/15
C	Klor debisi	0	40	80	120	200
D	Reaksiyon süresi	5	10	20	30	60
E	Karıştırma hızı	300	450	600	750	900

Çalışmanın yapıldığı üretim sürecinde KED'in deney anında kontrolleri çok zor olduğundan KED'i kullanarak KED matrisini oluşturmak yerine, her bir deneysel birleşimde 2 tekrar yapılması kararlaştırılmıştır.

#### 5.2.6 Incelenecek bileşik etkilerin belirlenmesi

Yapılan beyin fırtınası oturumları sonunda KD arasında önemli bileşik etkilerin olmadığına karar verilmiştir. Bu nedenle, deneylerde bileşik etkiler incelenmeyecektir.

#### 5.2.7 Uygun ortogonal dizi seçimi ve değişkenlerin yerleştirilmesi

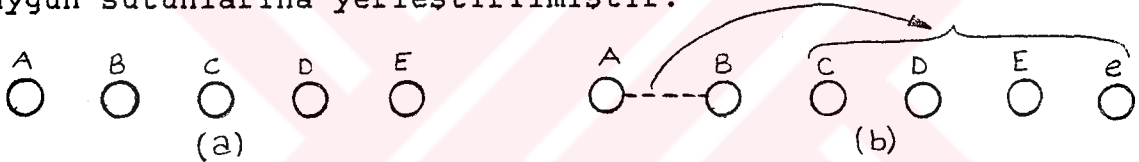
Eşitlik 3.17 yardımıyla  $SD_{\text{Deney}}=20$  olarak belirlenmiştir. Herbiri 5'er seviyeli olan 5 değişken inceleneceğinden

<sup>1</sup> Anlatımda kolaylık sağlamak ve olası bir indis karışıklığını önlemek amacıyla fiziksel deney aşamasında KD için  $X=[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$  yerine  $X=[A, B, C, D, E]$  gösterimi kullanılacaktır.

Ek 1'de verilen standart OD'den bu şartlara en uygun olanı  $L_{25}(5^6)$  dizisidir. Eşitlik 3.18 kullanılarak seçilen dizi için  $SD_{OD}=24$  olarak hesaplanmıştır. Öte yandan, belirlenen bu değerler 3.19 eşitsizliğini de sağlamaktadır.

Seçilen standart  $L_{25}(5^6)$  dizisi ile herbiri 5'er seviyeli olan 6 değişken incelenebilir. Problemden sadece 5 değişken olduğundan seçilen dizinin bir sütunu boş bırakılacaktır. Bu sütun hatayı kestirebilmek amacıyla kullanılmıştır.

Değişkenlerin 5 seviyeli olması ve herhangi bir bileşik etki içermemesi, çizilecek problem grafiğini oldukça kolaylaştırmaktadır. Yanısıra,  $L_{25}(5^6)$  dizisinin standart doğrusal grafiği de basit olup, problem grafiğine uygun hale getirilmesi oldukça kolaydır (Şekil 5.2). Bu grafiğe göre deneye alınan değişkenler seçilen ortogonal dizinin uygun sütunlarına yerleştirilmiştir.



Şekil 5.2 a) Problem grafiği, b)  $L_{25}(5^6)$ 'in değiştirilmiş standart doğrusal grafiği

Yukarıda açıklandığı üzere, KED'in etkilerini gözlemleyebilmek için KED matrisini oluşturmak yerine herbir deneysel birleşim için 2 tekrar yapılacaktır.

#### 5.2.8 Kalite kayıp fonksiyonları ve performans istatistiklerinin seçilmesi

İncelenecek performans karakteristikleri sürekli bir ölçekle ölçülebilmektedir. Performans karakteristikleri farklı yapıda olduklarından kullanılacak kkf'ları ve performans istatistikleri de farklı yapıda seçilecektir.

Öretilen fosforik asit miktarının enbüyüklenmesi istendiğinden "daha büyük daha iyi" durumu için kkf ve performans istatistiği seçilmelidir. Buna göre, kkf ve performans istatistiği olarak, sırasıyla, eşitlik 3.11 ve 3.22 seçilmiştir. Bir diğer performans karakteristiği ise kalsiyum

miktarının enazlanmasıdır. Kalsiyum miktarının enazlanabilmesi için "daha küçük daha iyi" durumuna uygun kkf ve performans istatistiği seçilmelidir. Bu yüzden, kkf ve performans istatistiği olarak, sırasıyla, eşitlik 3.9 ve 3.21 seçilmiştir.

#### 5.2.9 Deneylerin yapılması ve sonuçların kaydedilmesi

Seçilen deney planına göre KD sütunlara yerleştirildikten sonra deney sırası elde edilmiştir. Ancak, deney esnasında oluşabilecek ve sonuçları olumsuz yönde etkileyebilecek, fakat başlangıçta öngörülememiş olan değişkenlik kaynaklarına karşı korunabilmek için deney sırası rassallaştırılmıştır. Deney esnasında sıcaklık değişkeninin değiştirilmesi diğerlerine göre daha zor olduğundan sıcaklık değişkenine göre bloklama yapılmış ve blok içinde rassallaştırma uygulanmıştır.

Deneylere başlamadan önce gerekli olan donanımın yanı sıra, konsantre cevher, klor ve kükürtdioksit gazları, doymuş molibdat ve magnezya çözeltileri, cam kaplar ve diğer yardımcı malzemeler yeterince tedarik edilmiştir. Bu yüzden, deneyler, başladıktan itibaren seri olarak yapılmıştır. Elde edilen numunelerden ilgilenilen performans karakteristikleri ölçülmüş ve modelde ayrılmış olan uygun alanlara kaydedilmiştir.

#### 5.2.10 Veri analizi ve kontrol edilebilen değişkenlerin eniyi değerlerinin belirlenmesi

Öngörülen deneyler ve ölçümler yapıldıktan sonra elde edilen verilerden; basit aritmetik ortalamaların yanı sıra 3.21 ve 3.22 eşitlikleri kullanılarak performans istatistikleri de hesaplanmış ve Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2'deki veriler, performans karakteristiklerine göre ayrı ayrı analiz edilmelidir. Veri analizi IBM uyumlu PC ortamında ANOVA-TM paket programı ile yapılmıştır. Programın icrası sonunda elde edilen varyans analizi tabloları Çizelge 5.3, 5.4 ve Ek 2'de verilmiştir. Taguchi'nin (1987) önerisi doğrultusunda, hem gerekli hata serbestlik derecesinin sağlanması ve hem de  $F > 2$  olan değişkenlerin anlamlı olabilecekleri dikkate alınarak varyansı



düşük olan değişkenlerin varyansları hata varyansı ile birleştirilmiştir<sup>2</sup>.

Cizelge 5.2 Deneysel sonuçlar ve performans istatistikleri

No	Fosforik Asit (%)				Kalsiyum (%)			
	1	2	$\bar{X}$	$Z_0(X)$	1	2	$\bar{X}$	$Z_0(X)$
1	41.97	32.45	37.210	31.19939	24.49	20.24	22.365	-27.03041
2	83.63	65.75	74.69	37.27813	40.98	35.10	38.040	-31.63067
3	96.83	94.87	95.850	39.63048	28.14	34.22	31.180	-29.91861
4	85.32	92.94	89.130	38.97667	9.22	10.83	10.025	-20.04980
5	93.00	94.74	93.870	39.44942	9.33	10.50	9.915	-19.94095
6	49.37	38.23	43.800	32.61819	28.32	24.32	26.320	-28.43072
7	92.35	91.11	91.730	39.24963	40.54	41.93	41.235	-32.30655
8	97.25	96.02	96.635	39.70216	25.42	22.31	23.865	-27.57363
9	68.97	70.11	69.540	36.84382	12.77	5.55	9.160	-19.86493
10	72.85	76.83	74.840	37.47348	15.91	24.36	20.135	-26.26616
11	56.98	48.71	52.845	34.38022	32.59	29.22	30.905	-29.81347
12	79.21	70.83	75.020	37.46288	6.66	37.76	22.210	-28.66339
13	78.03	91.62	84.825	38.48678	18.19	24.10	21.145	-26.58815
14	89.51	99.17	94.340	39.45975	31.10	44.04	37.570	-31.62375
15	80.31	81.39	80.850	38.15302	10.83	12.49	11.660	-21.35592
16	56.10	46.86	51.380	34.10577	30.72	25.99	28.355	-29.08270
17	90.79	89.53	90.160	39.09964	40.30	43.70	42.000	-32.47210
18	91.28	80.30	85.790	38.61534	23.94	44.51	34.225	-31.06236
19	96.33	97.62	96.975	39.73262	16.88	23.38	20.130	-26.18863
20	68.54	77.67	73.105	37.22810	14.41	19.29	16.850	-24.62212
21	46.81	44.82	45.810	33.21401	27.49	26.71	27.100	-28.66028
22	70.08	54.86	62.470	35.71959	39.15	32.68	35.915	-31.14061
23	83.75	83.56	83.655	38.44982	34.83	39.45	37.140	-31.41361
24	69.27	83.44	76.355	37.54441	29.21	23.80	26.505	-28.51158
25	81.81	81.48	81.645	38.23854	13.74	13.20	13.470	-22.58910

<sup>2</sup> Taguchi (1987) anlamlı karşılaştırmalar yapabilmek için gerekli hata serbestlik derecesinin en az 6 olması gerektiğini belirtmektedir. Bu amaçla ya deneylerin bitiminden sonra hatayı belirlemeye yönelik birkaç deney yapılmasını ya da daha küçük varyansa sahip değişkenlerin varyanslarının hata varyansı ile birleştirilmesini önermiştir.

Cizelge 5.3 Performans istatistiği "fosforik asit miktarı" üzerine yapılan varyans analizi

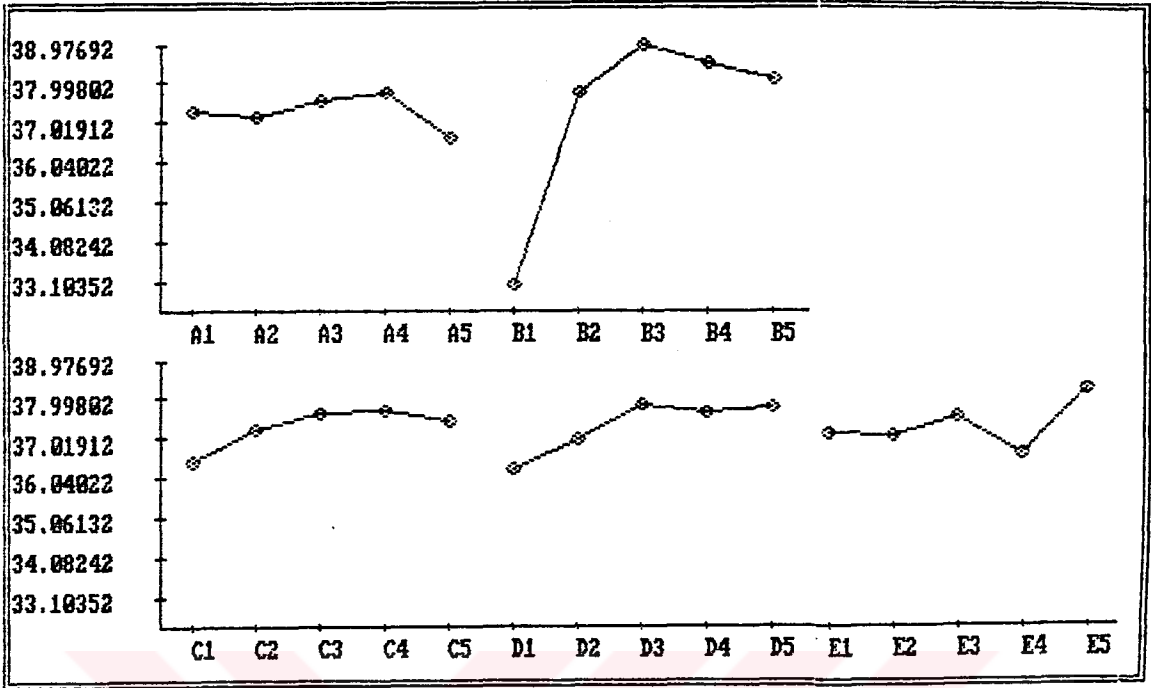
DEĞİSKENLİK KAYNAĞI		SD	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F	Katkı yüzdesi
A	Reaks. sıcaklığı	4	3.75381	0.938453		
B	Katı/sıvı oranı	4	113.78480	28.446200	27.2508**	78.47
C	Klor debisi	4	4.59439	1.148600		
D	Reaksiyon süresi	4	9.28490	2.321225	2.23184	3.67
E	Karıştırma hızı	4	6.55550	1.638875		
HATA		4	1.73710	0.434275	-----	-----
BİRLESTIRILMIS HATA		(16)	(16.64080)	(1.04005)	-----	(17.86)
GENEL		24	139.71050	5.821270	-----	100.00
** % 1 düzeyinde anlamlı olan değişkenler					$F_{(0.01),4,16}=4.77$	

Cizelge 5.4 Performans istatistiği "kalsiyum miktarı" üzerine yapılan varyans analizi

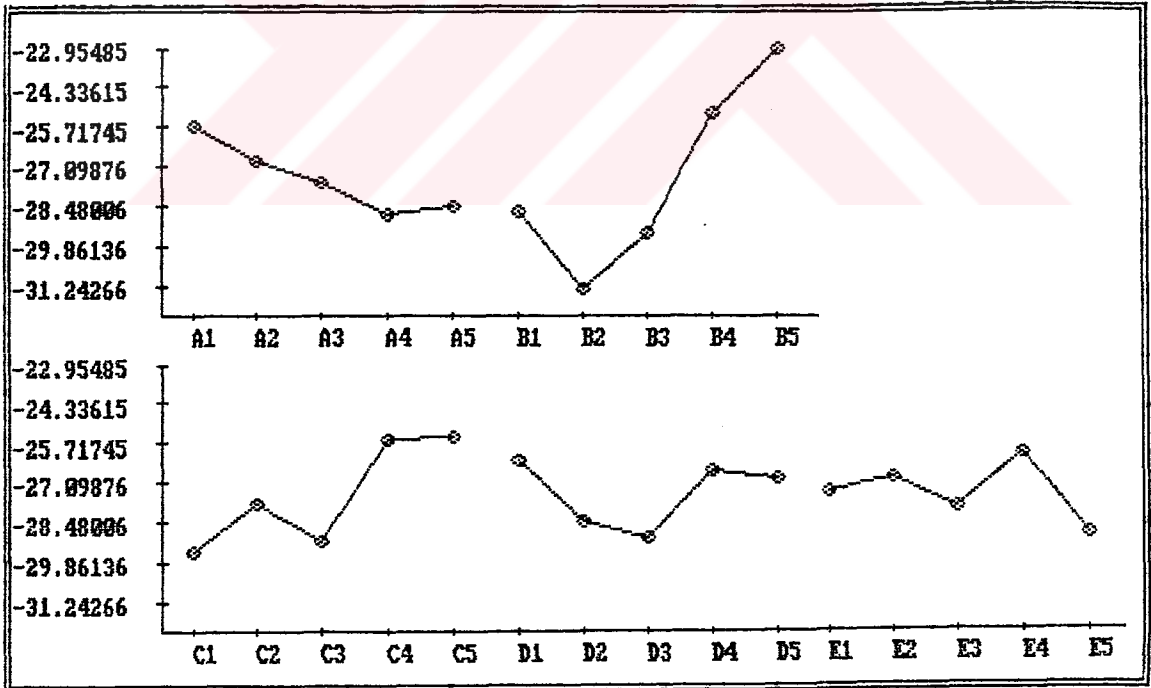
DEĞİSKENLİK KAYNAĞI		SD	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F	Katkı yüzdesi
A	Reaks. sıcaklığı	4	29.52329	7.38082		
B	Katı/sıvı oranı	4	221.16671	55.29168	9.13782**	50.92
C	Klor debisi	4	68.83951	17.20988	2.84420	11.54
D	Reaksiyon süresi	4	27.42398	6.85600		
E	Karıştırma hızı	4	20.62474	5.15619		
HATA		4	19.24173	4.81043	-----	-----
BİRLESTIRILMIS HATA		(16)	(96.81374)	(6.05086)	-----	(37.54)
GENEL		24	386.81996	16.11750	-----	100.00
** % 1 düzeyinde anlamlı olan değişkenler					$F_{(0.05),4,16}=3.01$	

Varyans analizi tabloları incelenirse; her iki tabloda da B (katı/sıvı oranı) değişkeninin oldukça önemli olduğu, fosforik asit için D (karıştırma hızı), kalsiyum için de C (klor debisi) değişkenlerinin incelenmeye değer oldukları görülmektedir.

Elde edilen sonuçları görsel olarak ortaya koyabilmek için herbir değişkenin performans istatistikleri üzerindeki etkisini gösteren grafikler Şekil 5.3 ve 5.4'deki gibi çizilmiştir.



Şekil 5.3 KD'in performans istatistiği "fosforik asit miktarı" üzerindeki etkileri



Şekil 5.4 KD'in performans istatistiği "kalsiyum miktarı" üzerindeki etkileri

Grafikler incelendiğinde; varyans analizi sonuçlarının doğrulanmasının yanısıra değişkenlerin hangi seviyelerinin

seçilmesi gerektiği de görülmektedir. Performans istatistiğinin özelliğinden dolayı grafiklerde enbüyüğe ulaşılan noktalar, bireysel amaçların potansiyel eniyi noktalarını göstermektedir.

Varyans analizleri ve grafikler birlikte dikkate alınarak üretilen fosforik asit miktarını enbüyükleyen KD değerleri  $A_4B_3C_4D_3E_3$  olarak belirlenirken, kalsiyum miktarını enküçükleyen KD değerleri de  $A_1B_3C_4D_1E_4$  olarak belirlenmiştir. Ancak, nihai değerlendirme yapılırken sözü edilen performans karakteristiklerin yanısıra maliyetler de dikkate alınmalıdır. Maliyetlerin dikkate alındığı nihai değerlendirme Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5 Eniyi değişken-seviye birleşimi seçimi

DEĞİŞKENLER	Seviye	F. asit miktarı		Kalsiyum miktarı		Maliyet	Seçim
		$\bar{X}$	$Z_0(X)$	$\bar{X}$	$Z_0(X)$		
A Reaksiyon sıcaklığı	12	78.150	37.30682	22.305	-25.71405	En az	A <sub>1</sub>
	20	75.309	37.17745	24.143	-26.88840		
	25	77.576	37.58853	24.698	-27.60893		
	30	79.482	37.75630	28.312	-28.68558	En çok	
	40	69.988	36.63327	28.028	-28.46303		
B Katı/sıvı oranı	1/3	46.210	33.10352	27.009	-28.60352	En az	B <sub>3</sub>
	1/5	78.814	37.76198	35.880	-31.24266		
	1/7	89.351	38.97692	29.511	-29.31127		
	1/10	85.268	38.51145	20.678	-25.24769		
	1/15	80.862	38.10851	14.408	-22.95485	En çok	
C Klor debisi	0	70.930	36.49351	30.042	-29.42466	En az	C <sub>4</sub>
	2	75.994	37.24636	26.658	-27.80391		
	4	77.977	37.60657	29.335	-29.03446		
	6	78.762	37.69720	19.585	-25.59168		
	10	76.842	37.41873	21.864	-25.50528	En çok	
D Reaksiyon süresi	5	67.706	36.23680	21.545	-26.31889	En az	D <sub>3</sub>
	10	72.418	36.97771	26.836	-28.41585		
	20	81.159	37.80932	30.108	-29.00686		
	30	78.683	37.64173	24.849	-26.68694		
	60	80.559	37.79680	24.146	-26.93146	En çok	
E Karıştırma hızı	300	76.242	37.13972	25.279	-27.38872	En az	E <sub>3</sub>
	450	72.902	37.07121	25.160	-26.99210		
	600	77.700	37.50269	24.151	-27.93941		
	750	70.666	36.60587	22.051	-26.16624		
	900	82.995	38.14288	30.843	-28.87351	En çok	

Buna göre eniyi değişken-seviye birleşimi  $A_1B_3C_4D_3E_3$  olarak belirlenmiştir. Bir önceki değerlendirme yöntemine göre bulunan sonuçlarda bazı değişiklikler gözlenmiştir.

Birbirleriyle çelişen amaçlara göre karar verilirken amaçlar arasında ödünleşme noktalarının esas alınması değişikliğin en önemli nedenidir. Ek 1'de verilen  $L_{25}(5^e)$  dizisi ile Çizelge 5.1 ve 5.2 birlikte incelenirse eniyi değişken-seviye birleşimine karşı gelen deneylerin çalışma süresince yapılmadığı görülür. OD'in dengeli (balanced) olması özelliğinden yararlanılarak eşitlik 3.16 yardımıyla eniyi değişken-seviye birleşimine karşı gelen performans değerleri kestirilebilir<sup>1</sup>. Hesaplanacak ortalama değerler yüzdelik (%) olduğundan, Taguchi'nin (1987) önerdiği gibi, Omega dönüşümü yapılarak hesaplanacak, daha sonra ters dönüşüm ile ilgilenilen değerler belirlenecektir. Ek 2'deki varyans analizi tablolarından anlamlı değişkenler belirlendikten sonra, bu değişkenlerin seçilen seviyelerinin ortalama performans değerleri Çizelge 5.5'den, karşı gelen Omega dönüşüm değerleri Ek 3'den alınır ve 3.16 eşitliğinde yerine koyulursa;

$$\mu_{\text{fosforikasi}} = 5.548 + 9.26 + 6.354 + 5.421 - 3 * 5.030 = 11.493 \longrightarrow \%93.35$$

$$\mu_{\text{katilyan}} = -3.783 - 6.129 - 1 * (-4.655) = -5.26 \longrightarrow \%22.95$$

değerleri elde edilir. Bunlar birer nokta değeri olup, doğrulama deneyi sonuçlarının anlamlı olup olmadıklarını belirlemek için güven aralıkları oluşturulmalıdır. Eşitlik 4.1 yardımıyla ortalamaların % 95 anlam düzeyindeki güven aralıkları;

$$93.35 \pm \sqrt{4.18 * (40.3023) * \left(\frac{17}{50} + \frac{1}{2}\right)} \longrightarrow 93.35 \pm 11.896$$

$$22.95 \pm \sqrt{4.18 * (44.8326) * \left(\frac{9}{50} + \frac{1}{2}\right)} \longrightarrow 22.95 \pm 11.29$$

olarak hesaplanmış ve Çizelge 5.6'da verilmiştir. Ortalamalar ve güven aralıkları hesaplanırken Ek 2'deki ortalamalar üzerine düzenlenen varyans analizi tablolarından yararlanılmıştır.

<sup>1</sup> Bu kestirim, ilgili varyans analizi tablosunda istatistiksel olarak anlamlı bulunan değişkenler ile yapılır.

Cizelge 5.6 Beklenen eniyi performans değerleri ve güven aralıkları

Performans karakteristiği	Beklenen eniyi performans değeri	Güven aralığı
Fosforik asit miktarı	% 93.35	% 81.45-% 100.00
Kalsiyum miktarı	% 22.95	% 11.66-% 34.24

Öte yandan, eniyi değişken-seviye birleşiminde elde edilen fosforik asit, kalsiyum ve maliyetler yetkililer tarafından yeterli bulunmuştur.

#### 5.2.11 Sonuçların test edilmesi

Cizelge 5.6'daki sonuçların doğru olup olmadıkları test edilmelidir. Bu amaçla, belirlenen eniyi değişken-seviye birleşimi 2 kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar Cizelge 5.7'de verilmiştir.

Cizelge 5.7 Doğrulama deneyi sonuçları

Performans karakteristiği	Test no		$\bar{X}$	Z(X)
	1	2		
Fosforik asit miktarı	% 89.43	% 89.73	% 89.58	39.04
Kalsiyum miktarı	% 18.03	% 15.55	% 16.79	-24.52

Elde edilen sonuçlar Cizelge 5.6'da belirlenen güven aralıkları içinde olduğundan % 95 güven düzeyinde deney sonuçlarının doğru olduğu söylenebilir.

#### 5.2.12 Tolerans tasarımı

Kısım 4.1.12'de açıklandığı üzere, parametre tasarımı aşamasında, ilgilenilen performans karakteristiklerinde sağlanan gelişmeler uzmanlar tarafından yeterli görüldüğü için tolerans tasarımı yapılmamıştır.

#### 5.2.13 Sonuçların değerlendirilmesi, yürütülmesi ve gelişmelerin izlenmesi

TY'nin araştırma, tasarım ve imalat çalışmalarında karşılaşılan problemlerin çözümünde etkin olduğu daha önce yapılan uygulamalarla gösterilmişti. Bu örnek olayda ise fosforik asit üretim sürecinin eniyilenmesinde karşılaşılan

problemlerin çözümünde TY'nden nasıl yararlanılabileceği gösterilmiştir. Çalışma sonunda kontrol edilemeyen değişkenlerin bozucu etkilerine karşı daha sağlam (duyarsız) süreç geliştirilmiştir.

Planlama, deneyleri yapma ve sonuçları analiz etme olmak üzere üç bölümde yürütülen çalışma, deney aşamasında bazı cihazların ortak kullanımı nedeniyle, 60 günde gerçekleştirilmiştir. Pazar ekonomisinin gereklerinden olan verimlilik artışı ve maliyet azalışı da çalışmanın olumlu sonuçlarından ikisidir. TY ile mevcut girdi ile elde edilen ürün miktarı artırıldığı gibi, maliyetler de azaltılmıştır.

Elde edilen olumlu sonuçlardan bir diğeri de çalışanlar üzerindeki motivasyon düzeyidir. Sağlanan motivasyon, sürekli kalite (tasarım) geliştirme programlarının devamlılığının güvencesidir. Sürekli kalite geliştirme programlarının devamlılığı da çağdaş çalışma ortamı ve çalışanların iş tatmininin sigortasıdır. Sanayi devrimi ile çalışanlarda gözlenen iş tatminsizliğini ortadan kaldırmak sürekli kalite geliştirme programlarının devamlılığı ile olurludur. Açıklanan yönleriyle çağdaş çalışma ortamı sağlayan bu uygulamanın bir ileri adımı olarak pilot tesis kurulup sürekli üretim çalışmaları yapılabilir.

### **5.3 Tasarım Eniyileme Problemine Matematiksel Modelin Uygulanması ve Etkinliği**

Bu kapsamda Kısım 4.2'de açıklanan matematiksel model yaklaşımı, Kısım 5.2'deki fosforik asit üretim sürecinin deneysel olarak eniyilenmesi verileri üzerine uygulanarak tasarım eniyileme probleminin matematiksel modeli oluşturulduktan sonra bilgisayar ortamında çözümü incelenecektir. Ayrıca, matematiksel modelin etkinliği ve tutarlılığı TY'nin uygulandığı iki çalışma üzerinde gösterilecektir.

#### **5.3.1 Matematiksel modelin fosforik asit üretim sürecinde uygulanması**

Deneysel sonuçlar Çizelge 5.5'de KD'in seviyelerine göre gruplanmıştır. KD ile performans karakteristikleri

arasındaki bireysel fonksiyonları belirleyebilmek için performans istatistiği verileri IBM uyumlu PC ortamında GRAPHER paket programında değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonunda fosforik asit verileri için elde edilen bireysel fonksiyonlar;

$$y_1 = 41.6 - 0.7x_1 + 0.03x_1^2 - 0.00045x_1^3$$

$$y_2 = 34.7 + 72.8x_2 - 364.1x_2^2 + 394x_2^3$$

$$y_3 = 36.5 + 0.4x_3 - 0.03x_3^2$$

$$y_4 = 35 + 0.3x_4 - 0.01x_4^2 + 0.00009x_4^3$$

$$y_5 = 74 - 0.3x_5 + 0.0009x_5^2 - 0.000001x_5^3 + 0.0000000005x_5^4$$

iken kalsiyum verileri için elde edilen fonksiyonlar da;

$$k_1 = -27.96 + 0.482x_1 - 0.03x_1^2 + 0.00044x_1^3$$

$$k_2 = -14 - 150x_2 + 318x_2^2$$

$$k_3 = -29.2 - 0.16x_3 + 0.2x_3^2 - 0.013x_3^3$$

$$k_4 = -22.6 - 0.9x_4 + 0.04x_4^2 - 0.0004x_4^3$$

$$k_5 = -104.8 + 0.6x_5 - 0.002x_5^2 + 0.000002x_5^3 - 0.000000001x_5^4$$

olarak belirlenmiştir. Çalışmanın amaçları açısından fosforik asit üretim miktarının enbüyüklenmesi birinci önceliğe, kalsiyum miktarının enazlanması ise ikinci önceliğe sahip performans karakteristiğidir. Bu nedenle, fosforik asit miktarına ilişkin birleştirilmiş fonksiyon oluşturulacak tek amaçlı doğrusal olmayan karar modelinin amaç fonksiyonu, kalsiyum miktarına ilişkin birleştirilmiş fonksiyon da modelin kısıt fonksiyonu olarak seçilmiştir. Ayrıca KD'in alt ve üst sınırları da modelin diğer kısıtlarıdır. Bütün bu ilişkiler birleştirilirse, doğrusal olmayan karar modeli;



$$12 \leq x_1 \leq 40$$

$$0.067 \leq x_2 \leq 0.333$$

$$0 \leq x_3 \leq 10$$

$$5 \leq x_4 \leq 60$$

$$300 \leq x_5 \leq 900$$

$$0.482x_1 - 0.03x_1^2 + 0.00044x_1^3 - 150x_2 + 318x_2^2 - 0.16x_3 + 0.2x_3^2 - 0.013x_3^3 - 0.9x_4 + 0.04x_4^2 - 0.0004x_4^3 + 0.6x_5 - 0.002x_5^2 + 0.000002x_5^3 - 0.000000001x_5^4 \leq 89$$

kısıtları altında

$$\text{Enb } Y = -0.7x_1 + 0.03x_1^2 - 0.00045x_1^3 + 72.8x_2 - 364.1x_2^2 + 394x_2^3 + 0.4x_3 - 0.03x_3^2 + 0.3x_4 - 0.01x_4^2 + 0.00009x_4^3 - 0.3x_5 + 0.0009x_5^2 - 0.000001x_5^3 + 0.0000000005x_5^4 - 22$$

olarak yazılır. Kurulan bu model IBM uyumlu PC ortamında GINO paket programı ile çözülmüştür. Modelin çözümü için programın toplam çalışma süresinin, IBM uyumlu matematik işlemciye sahip 386/SX PC ortamında, 25 saniye olduğu gözlenmiştir. Çözüm sonuçları ise;

$$x_1 = 12.00$$

$$x_2 = 0.126$$

$$x_3 = 6.67$$

$$x_4 = 20.83$$

$$x_5 = 900.00$$

$$\text{Enb } Y = 39.46$$

olarak belirlenmiştir.

### 5.3.2 Matematiksel modelin etkinliği ve diğer çözümlerle karşılaştırılması

Kısım 5.3.1'de oluşturulan matematiksel modelin etkinliği incelenirken ilk dikkati çeken nokta bazı katsayıların oldukça küçük olmasıdır. Matematiksel modeldeki bazı katsayıların oldukça küçük olması, ilgili katsayının anlamsız (önemsiz) olduğu kanısını uyandırabilir. Deneysel çalışmada KD için seçilen seviye sayısının 3'den fazla olması bunun en önemli nedenidir. Şekil 5.3 ve 5.4'den görüleceği üzere, KD için 5'er seviye seçilmesiyle; birden fazla büküm noktası olan eğrilerin elde edilmesi ve eğrilere uygun matematiksel fonksiyonların böylesine küçük katsayılı yüksek dereceli polinomlar olarak belirlenmesi ile sonuçlanmıştır. Oysa, KD için öngörülen değer kümesi 5 yerine 3 seviye ile ifade edilebilseydi, KD ile performans karakteristiği değerleri arasındaki eğrisel

ilişkinin belirlenmesinin yanısıra hem daha az deney yapılması ve hem de oluşturulacak matematiksel modelin daha basit bir yapıda (daha büyük katsayılı ve daha düşük dereceden polinom) olması sağlanabilirdi.

Öte yandan, Kısım 4.2'de açıklanan matematiksel model yaklaşımı wheatstone köprüsü direnç değerlerinin eniyilenmesi (Taguchi, 1987) ile plastik enjeksiyon süreci değişkenlerinin eniyilenmesi (Barker, 1987) deneysel çalışmalarına da uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 Bazı deneysel çalışmalara matematiksel model yaklaşımının uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar

Değişken	Wheatstone Köprüsü Değerleri		Plastik Enjeksiyon Değerleri	
	(Taguchi, 1987)	Mat. Model	(Barker, 1987)	Mat. Model
A	20	20	1200	1142.6
B	--	--	480	474.4
C	50	50	950	950
D <sup>1</sup>	10	11.1	100	113
E	30	30	360	353.2
F	2	2	360	359.5
Amaç	58.59	60.78	45.38	45.40

Çizelge 5.8 incelenirse deneysel sonuçlarla matematiksel model sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın oldukları görülür. Ayrıca, incelenen deneysel çalışmalarda KD için 3'er seviye seçilmiş olduğundan, yukarıda sözü edildiği gibi, varolan eğrisel ilişkilerin belirlenmesinin yanısıra matematiksel modelin daha basit yapıda olduğu da gözlenmiştir.

<sup>1</sup> Barker'ın (1987) çalışmasında D değişkeninin değer kümesi (nominalden % 30 az, nominal, nominalden % 30 fazla) olarak verilmiştir. Bu çalışmada ise anlamlı karşılaştırmalar yapabilmek için D değişkeninin değer kümesi (70, 100, 130) olarak alınmıştır.

#### 5.4 İki Yaklaşımın Uygulamalarının Karşılaştırılması

Tasarım eniyileme probleminin çözümü için Taguchi yöntemlerine dayalı geliştirilen sistematik ve matematiksel model yaklaşımlarının fosforik asit üretim sürecine uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi değerlendirilebilir:

Uygulama için gereken süre, ekipman, eleman ve maliyetler karşılaştırıldığında matematiksel model yaklaşımının çok daha uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca, matematiksel model kullanıldığında KD seçilen aralıkta sürekli olarak değerlendirilebilmektedir.

DeneySEL verilerden yararlanılarak oluşturulan matematiksel modelin çözümü ile elde edilen değerlerin Çizelge 5.5, 5.6 ve 5.7'de verilen deneySEL sonuçların eniyi değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Tasarım eniyileme amacıyla deneySEL veriler üzerine oluşturulan karar modeli tek amaçlı olduğundan, modelin çözümü sonunda elde edilen bütün değerler Çizelge 5.5'de seçilen eniyi değerler ile aynı iken  $x_5=900$  olarak belirlenmiştir. Çok amaçlı karar modelinin oluşturularak uygun yöntemlerle çözülmesi halinde, amaçlar arasındaki ödünleşmeler dikkate alınacağından daha iyi sonuçların elde edileceği söylenebilir.

## 6 SONUC VE ÖNERİLER

KGS'nin amacı, işletme faaliyetlerinin odak noktasını oluşturan tüketici gereksinimlerini eniyi şekilde (daha kaliteliyi daha ucuza ve zamanında) karşılayabilmektir. Sistem yapılmış hataları aramak yerine, hata nedenlerini gidermeye çalışıldığından kendi kendini sürekli yenileme özelliğine sahiptir. KGS bünyesinde kullanılabilecek yöntemler imalat öncesi ve imalat aşaması olmak üzere iki grupta toplanmaktadır. Günümüzde imalat aşaması KG yöntemlerinin uygulanmasında bir doygunluğa ulaşıldığı, artan rekabet yönlü baskılara bir çıkış yolu olarak imalat öncesi KG yöntemlerinin ön plana çıktığı görülmektedir. Öncülüğünü Taguchi'nin yaptığı tasarım aşamasına yönelik faaliyetlerin KGS'de bulunan boşluğu dolduracağı, uygulamanın başarısı oranında imalat aşamasına yönelik KG faaliyetlerinin kapsamının daralacağı söylenebilir. Böylece, daha önce yapılan hataların tekrar ortaya çıkma olasılığı olabildiğince düşürüleceğinden günümüz üretim sistemlerinin gereklerinden olan; birim girdi başına elde edilen çıktı miktarının (verimliliğin) artırılması, maliyetlerin düşürülmesi, kalitenin geliştirilmesi ve daha da önemlisi verilen taahütlerin zamanında eksiksiz yerine getirilebilmesi olurlu kılınabilmektedir. Zaten, KGS'nin doğasında, modern üretim sistemlerinin önşartı olan sürekli kalite geliştirme düşüncesi yatmaktadır.

Sürekli kalite geliştirme herşeyden önce bir yaklaşım, bir anlayış veya bir yaşayış biçimidir. Başarı için temel koşul, basta üst yönetim olmak üzere, işletme genelinde kalite ve kaliteye ilişkin kavramların günümüz kalite anlayışı çerçevesinde ele alınmasıdır. Çalışmayı örgütlü ve sistematik bir şekilde yürütecek ekip (KGS planlayıcıları ve uygulayıcıları) dışında, kalite, görevli bütün işletme personelinin sorumluluğunda olmalıdır.

Sürekli kalite geliştirmede tasarım eniyileme probleminin çözümünde TY'nin uygulanabilirliğinin incelendiği bu

çalışmada, ulaşılan sonuçlar ve daha sonra yapılabilir araştırmalara ışık tutabilecek diğer öneriler şöyle özetlenebilir:

Tasarım eniyileme problemi ister fiziksel, ister bilgisayar benzetim denemeleri şeklinde olsun, çözümü ekip çalışmasını gerektirir. Ekip, probleme göre farklı uzmanlardan oluşacağı için çalışma yapılırken izlenecek sistematik bir yaklaşımın gerekli olduğu saptanmıştır. Bu amaçla geliştirilen yaklaşım, ekipte bulunacak farklı meslek (bilim) dallarından kişilerce anlaşılabilen bir anlatımla tanıtılmıştır.

TY'nde performans karakteristikleri sürekli ölçekle ölçülse bile, KD'in sadece belirli değerlerinin birleşimleri incelendiğinden, çözüm kümesinin sadece belirli noktaları için performans karakteristiklerinin değerleri ölçülmüştür. Başka bir anlatımla, eniyileme problemine performans karakteristiklerinin ölçümü açısından bakıldığında süreklilik, KD açısından bakıldığında ise kesiklilik durumu ile karşılaşılmaktadır. Bunun olumsuz etkilerini giderebilmek için deneysel veriler esas alınarak, KD ile performans karakteristikleri arasındaki ilişkilerin matematiksel olarak ifade edilebildiği ve oluşturulan matematiksel modelin uygun eniyileme yöntemleri ile bilgisayar ortamında çözülebildiği gösterilmiştir. Çözüm sonuçlarının deneysel sonuçlara yakınsadığı ve hatta bazen daha da iyi olduğu belirlenmiştir. Böylece, deneyler anında KD uzayının sadece belirli noktaları incelenirken, deneysel veriler üzerine oluşturulan matematiksel modelin çözümü ile de bir bakıma KD uzayının bütün noktaları incelenmiş (KD'e süreklilik kazandırılmış) olmaktadır.

Geliştirilen sistematik yaklaşım kullanılarak TY'nin yeni bir gerçek hayat problemine uygulanmasıyla; kullanılan fosfat kayası cevherindeki fosforik asit miktarının tamamına yakınının (% 99) elde edilebildiği, maliyetler dikkate alındığında bunun ekonomik olmadığı, benimsenen eniyi değişken-seviye birleşiminde ise kullanılan cevherdeki fosforik asit miktarının % 90'ının elde edilebildiği, bunun

ekonomik ve yeterli olduğu yetkililerin ifadeleriyle belirlenmiştir. Yanısıra, istenildiğinde çözeltideki kalsiyum miktarının olabildiğince azaltılabileceği (% 8), fakat bunun elde edilen fosforik asit miktarını da azaltacağı belirlenmiştir.

Tasarım eniyileme problemi için önerilen matematiksel modelin oluşturulup çözülmesiyle, deneysel sonuçlara yakın değerlerin elde edildiği gözlenmiştir. İlgilenilen problemde tek performans karakteristiği (tek amaç) varsa doğrusal olmayan tek amaçlı karar modelinin, birden fazla performans karakteristiği (çok amaç) varsa doğrusal olmayan çok amaçlı karar modelinin oluşturulup çözülmesi daha uygun olacaktır.

Klasik deney tasarım yöntemlerine göre çok daha az sayıda deney ile tasarım eniyilemesine rağmen, tasarım eniyileme (parametre tasarımı) problemine farklı açılardan yaklaşan, yöntemin uygulama zamanını ve maliyetini enazlayan yaklaşımlara gereksinim olduğu tartışılmaz bir gerçektir. Bu yönde başlatılan çalışmalardan bazılarının sonuçlandığı, bazılarının ise halen devam ettiği yapılan kaynak araştırması sırasında belirlenmiştir. Ancak, şimdiye kadar kısmi başarılar dışında tatmin edici sonuçların elde edilemediği de gözlenmiştir. Çalışmaların ortak hedefi, incelenen olayda performans karakteristikleri ile KD arasındaki ilişkinin ifade edildiği  $Y=f(X,W)$  fonksiyonunu belirleyebilmektir. Her durumda geçerli olabilecek fonksiyonel ilişkinin en kolay ve en ucuz şekilde belirlenebilmesi halinde, tasarım eniyileme problemi mevcut eniyileme yöntemleri ile çözülebilecektir. Bu yönüyle, fonksiyonun analitik biçiminin belirlenmesi ve çok amaçlı karar modelinin oluşturulmasının yanısıra modelin ikilinin oluşturulabilirliği, duyarlılık analizlerinin yapılabilirliği ve bunun tolerans tasarımı ile ilişkilendirilmesi başka çalışmaların konusu olabilecek değere sahip potansiyel problem alanları olarak görülmektedir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Aldemir, M.,C., 1985,** Örgütlerin yönetimi: makro bir yaklaşım, Bilgehan basımevi, İzmir, 224 s.
- Anonymous, 1979,** Kimya sektör araştırması: Fosfor, Türkiye Sınai Kalkınma Bankası, No: 17, 1-8.
- ASI, 1986,** Executive awareness the methods of Dr. Genichi Taguchi, American Supplier Institute Center For Taguchi Methods, Birmingham, 48 p.
- ASI, 1988,** Taguchi methods-Quality engineering-Executive briefing, American Supplier Institute Center For Taguchi Methods, Dearborn, Michigan, 240 p.
- Banks, J., 1989,** Principles of quality control, John Wiley & Sons, Signapore, 634 p.
- Barker, T.,B., 1985,** Quality by experimental design, Marcel Dekker Inc. ASQC Quality Press, New York, 384 p.
- Barker, T.,B., 1986,** Quality engineering by design: Taguchi's philosophy, Quality Progress, 19, 12, 32-42.
- Brayton, R.,K., Director, S.,W. and Hatchel, G.,D., 1980,** Yield maximization and worst-case design with arbitrary ststistical distributions, IEEE Transaction on Circuit and Systems, CAS-27, 756-764.
- Burnak, N. ve Özkul, A.,E. 1988,** A systematic approach for the implementation of SPC applied to tire-cord manufacturing, IASTED International Conference: Reliability and Quality Control (June 22-24), Paris.
- Byrne, D.,M. and Taguchi, S, 1987,** The Taguchi approach to parameter design, Quality Progress, 20, 12, 19-26.
- Cappis, M.,C., 1987,** Ost yönetici-kalite ilişkisi (Çev. A.İ. GÜCLÜ), Standard, 7, 26-30.
- Dague, D.,C., 1981,** Quality-historical perspective, Society of Automotive Engineers, SAE-810389 (SP-483), 1-5.
- Doğan, O., 1985,** Verimlilik analizleri ve verimlilik-ergonomi ilişkileri, İzmir Ticaret Borsası Yayın no 31, İzmir, 272 s.
- Ealey, L.,A., 1990,** Ortogonal array: setting the right targets for design, Harward Business Review, Jan-Feb., 70-71.
- Enright, T.,P., 1988,** Statistical methods reduce casting defects at Ford, Modern Casting, December, 37-40.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam ediyor)

- Evans, J. and Lindsay, W.,M., 1989, The management and control of quality (professional review copy, not for sale), West Publishing Co., New York, 586 p.
- Fathi, Y., 1990, Producer-consumer tolerances, Journal of Quality Technology, 22, 2, 138-145.
- Fathi, Y., 1991, A nonlinear programming approach to the parameter design problem, European Journal of Operational Research, 53, 371-381.
- Feigenbaum, A.,V., 1983, Total quality control, McGraw-Hill International Book Co., New York, 394 p.
- Flippone, S., 1989, Using Taguchi methods to apply the axioms of design, Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 6, 2, 133-142.
- Fox, R.,T. and Lee, D., 1990, Optimization of metal injection molding: Experimental design, The International Journal of Powder Metallurgy, 26, 3, 233-243.
- Hunter, J.,S., 1985, Statistical design applied to product design, Journal of Quality Technology, 17, 4, 210-221.
- Grant, E.,L. and Leavenworth, R.,S., 1980, Statistical quality control (fifth edition), McGraw-Hill International Book Co., Tokyo, 684 p.
- Gunter, B., 1987, A perspective on the Taguchi methods, Quality Progress, 20, 6, 44-52.
- Günel, E., 1990, Seminars in quality improvement, Bilkent University, Ankara, 3 p.
- Jiang, B., Black, J.,T., Hool, J.,N. and Wu, C.,M., 1989, Determining robot process capability using Taguchi methods, Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 6, 1, 55-66.
- John, R.,V.,W., 1961, Phosphorus and its compounds, Interscience Publishers, New York, 1095 p.
- Juran, J.,M., 1979, Quality control handbook (third edition), McGraw-Hill International Book Co., New York.
- Kackar, R., 1985, Off-line quality control, parameter design and Taguchi methods, Journal of Quality Technology, 176-188.



## KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam ediyor)

- Kacker, R., 1986, Taguchi quality philosophy: analysis and commentary, *Quality Progress*, 19, 12, 21-29.
- Kacker, R. and Shoemaker, A., S., 1986, Robust design: A cost effective method for improving manufacturing process, *AT&T Technical Journal*, 65, 2, 51-68.
- Kavrakoğlu, İ., 1990, Toplam kalite yönetiminin Türk sanayii için önemi, TSE dünya kalite günü sempozyumu bildiriler.
- Kaylan, A., R., 1991, Toplam kalite yönetim sistemi, Endüstri Mühendisliğinde Bilgisayar Uygulamaları Seminer-Sergisi, 7-11 Mayıs, Bursa, Bildiriler.
- Lee, N., S., Phadke, M., S. and Keny, R., 1989, An expert system for experimental design in quality control, *Expert Systems*, 6, 4, 239-249.
- Leon, R., V., Shoemaker, A., C. and Kacker, R., N., 1987, Performance measure independent of adjustment, *Technometrics*, 29, 3, 253-265.
- Lewandowski, H., S. and Lindeke, R., R., 1989, An automated method for the preparation of ortogonal arrays for use in Taguchi designed experiments, *Computers & Industrial Engineering*, 17, 1-4, 502-507.
- Lin, C., W., 1987, A statistical analysis tool for variation simulation modeling, *Computers & Industrial Engineering*, 15, 1-4, 386-391.
- Lin, P., K., H., Sullivan, L., P. and Taguchi, G., 1990, Using Taguchi methods in quality engineering, *Quality Progress*, 23, 9, 55-59.
- Montgomery, D., C., 1985, Introduction to Statistical quality control, John Wiley & Sons Inc., New York, 489 p.
- Phadke, M., S., 1989, Quality engineering using robust design, Prentice-Hall, New Jersey, 334 p.
- Phadke, M., S., Kacker, R., N., Speeney, D., V. and Grieco, M., J., 1983, *The Bell System Technical Journal*, 62, 5, 1273-1308.
- Pignatiello, J., J., Jr., 1988, An overview of the strategy and tactics of Taguchi, *IIE Transactions*, 20, 3, 247-254.


**KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam ediyor)**

- Roslund, J.,L., 1989,** Evaluating management objectives with the quality loss function, *Quality Progress*, 22, 8, 45-49.
- Ross, P.,J., 1988 a,** The role of Taguchi methods and the design of experiments in QFD, *Quality Progress*, 21, 6, 41-47.
- Ross, P.,J., 1988 b,** Taguchi techniques for quality engineering, McGraw-Hill, New York, 279 p.
- Saatçioğlu, Ö., 1976,** Sistem güvenilirliği, Kalite Kontrol Yöneticiler Toplantısı ve Sempozyumu, MPM, Ankara, 224-239.
- Schlack, M., 1988,** Flex drives quality route to automotive success, *Plastics World*, July, 48-53.
- Seçim, H., 1987,** Sanayi işletmelerinde norm kadro tesbit yöntemi, Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi Yayın no 122, 82 s.
- Shiau, Y.,R. and Jiang, B.,C., 1991,** Determine a vision system's coordinate measurement capability using Taguchi methods, *International Journal of Production Research*, 29, 6, 1101-1122
- Shina, S.,G., 1991,** The succesful use of the Taguchi method to increase manufacturing process capability, *Quality Engineering*, 3, 3, 333-349.
- Singhal K. and Pinel, J.,F., 1981,** Statistical design entering and tolerancing using parameter sampling, *IEEE Transaction on Circuit and Systems*, CAS-28, 692-702.
- Sriraman, V., Tosirisuk, P. and Chu, H.,W., 1990,** Object-oriented databases for quality function deployment and Taguchi methods, *Computers & Industrial Engineering*, 19, 1-4, 285-289.
- Sullivan, L.,P., 1984,** Reducing variability; a new approach to quality, *Quality Progress*, 17, 7, 15-21.
- Sullivan, L.,P., 1986,** The seven stages in company-wide quality control, *Quality Progress*, 19, 5, 77-83.
- Sullivan, L.,P., 1987,** The power of Taguchi methods, *Quality Progress*, 20, 6, 76-79.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam ediyor)**

- Swaim, J. and Sink, D.,S., 1985, Productivity measurement in the service sector: a hotel/motel application of the multi-factor productivity measurement model, success stories in productivity improvement, Hamlin, J.,R., (editor), Industrial Engineering and Management Press, 77-79.**
- Taguchi, G., 1986, Introduction to quality engineering, Unipub, White Plains, 200 p.**
- Taguchi, G., 1987, System of experimental design, Vol. 1-2, Unipub, New York, 1189 p.**
- Taguchi, G. and Clausing, D., 1990, Robust quality, Harward Business Review, Jan-Feb., 65-75.**
- Taguchi, G., Elsayed, A.,E. and Hsiang, C.,T., 1989, Quality Engineering in production systems, McGraw-Hill, 172 p.**
- Taguchi, G. and Wu, Y.,I., 1979, Introduction to off-line quality control, Central Japan Quality Control Association,Meiki Nakamura-Ku Nagoya, Japan, 111 p.**
- Tersine, R.,J., 1985, Production/operations management: concept,structure & analysis (second edition), Elsewre Publishing Co., inc., 752 p.**
- Tukey, J.,W., 1958, Propagation of errors fluctuations and tolerances: Basic generalized formulas, Statistical Research Group, Princeton University, Technical Report No. 12,**
- Ulusoy, G. ve Akten, O., 1985, Kalite kontrolde karar destek sistemleri ve bir uygulama, Boğaziçi Üniversitesi FBE-EM 85/1 Araştırma Raporu.**

## **EKLER**

1. Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Ortogonal Diziler ve Doğrusal Grafikleri
  2. Ortalama Verileri Üzerine Düzenlenen Varyans Analizi Tabloları
  3. Omega Dönüşüm Tablosu
- 

Ek.1. Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Ortogonal Diziler ve Doğrusal Grafikleri

$L_4(2^3)$

Col no			
No	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Linear Graph of  $L_4(1)$

Gp 1      Group 2

$L_8(2^7)$

Col no							
No	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Gp 1    Gp 2      Group 3

$L_{12}(2^{11})$

Col no											
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

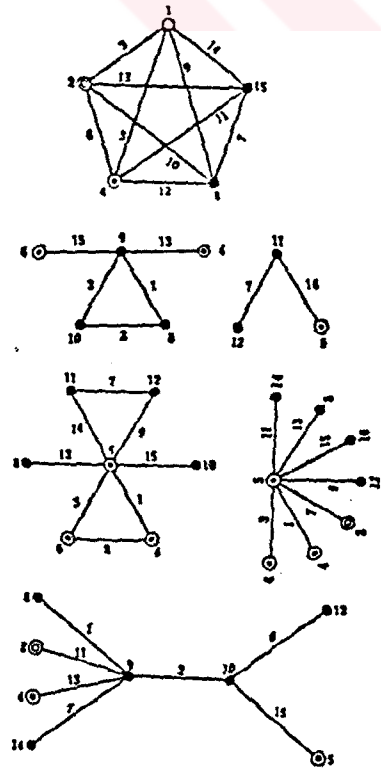
Gp 1      Group 2



$L_{16}(2^{15})$

Col no															
No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Gp 1    Gp 2      Group 3      Group 4



Ek.1. Yaygın Olarak Kullanılan Bazı Ortogonal Diziler ve Doğrusal Grafikleri (Devam)

$L_{11}(2^1 \times 3^7)$

Col no. No	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Group 1      Group 2      Group 3

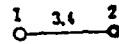
(1)



$L_9(3^4)$

Col no. No	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

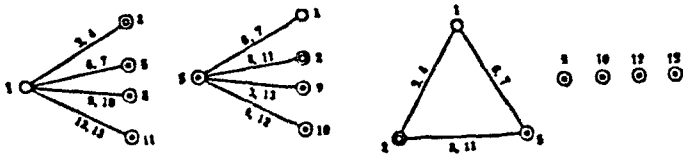
Group 1      Group 2



$L_{27}(3^{13})$

Col no. No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

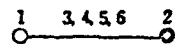
Group 1      Group 2      Group 3



$L_{25}(5^6)$

Col no. No	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	3	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

Gp 1      Group 2



Ek.2 Ortalama verileri üzerine düzenlenen varyans analizi tabloları

a) fosforik asit miktarı ortalama verileri üzerine yapılan varyans analizi

DEĞİŞKENLİK KAYNAĞI	SD	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F
A	4	558.01223	139.50306	3.4614*
B	4	11830.958	2957.7395	73.3889**
C	4	379.00061	94.75015	2.3510
D	4	1360.6149	340.15372	8.4401**
E	4	898.76734	224.69183	5.5752**
HATA	29	1168.76746	40.3023	-----
GENEL	49	16196.120	330.53306	-----

\* % 5 düzeyinde anlamlı değişkenler  $F_{(0.05),4,29}=2.70$   
\*\* % 1 düzeyinde anlamlı değişkenler  $F_{(0.01),4,29}=4.04$

b) Kalsiyum miktarı ortalama verileri üzerine yapılan varyans analizi

DEĞİŞKENLİK KAYNAĞI	SD	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F
A	4	269.80647	67.45162	1.5045
B	4	2724.3807	681.09517	15.1920**
C	4	848.85628	212.21407	4.7335**
D	4	409.17650	102.29412	2.2817
E	4	424.27444	106.06861	2.3659
HATA	29	1300.14618	44.8326	-----
GENEL	49	5976.6405	121.97226	-----

\* % 5 düzeyinde anlamlı değişkenler  $F_{(0.05),4,29}=2.70$   
\*\* % 1 düzeyinde anlamlı değişkenler  $F_{(0.01),4,29}=4.04$







## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER :

Adı ve Soyadı : Cafer Çelik  
Doğum Yeri ve Yılı : Tortum (ERZURUM), 20.02.1962  
Medeni Hali : Bekâr  
İşyeri Adresi : Atatürk Üniversitesi Mühendislik  
Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü  
25240 ERZURUM  
Telefon ve Fax (İş): (011) 84120/2294 - (011) 87141

### KAZANDIĞI EĞİTİM DERECELERİ :

1. 24 Temmuz 1985, Endüstri Mühendisliği Lisans Derecesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Sakarya
2. 9 Eylül 1988, Endüstri Mühendisliği Yüksek Lisans Derecesi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir

### İŞ DENEYİMİ :

6 Mart - 30 Eylül 1986 : Araştırma Görevlisi  
(Atatürk Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi)  
1 Ekim 1986 - 30 Haziran 1990: Araştırma Görevlisi  
(Atatürk Üniversitesi adına  
Anadolu Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesinde)  
1 Temmuz 1990 - : Araştırma Görevlisi  
(Atatürk Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi)