

ÜRETİM ÖNCESİ KALİTE KONTROLUNDA
TAGUCHİ YÖNTEMİ VE
KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT YÖNTEMİNE
UYGULANMASI

73415

C. Hakan KAĞNICIOĞLU

DOKTORA TEZİ

İşletme Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yaşar HOŞCAN

T 73415

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

Mayıs 1998

DOKTORA TEZ ÖZÜ

ÜRETİM ÖNCESİ KALİTE KONTROLUNDA TAGUCHİ YÖNTEMİ VE KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT YÖNTEMİNE UYGULANMASI

C. Hakan Kağmcıoğlu

İşletme Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mayıs 1998

Danışman: Prof. Dr. Yaşar Hoşcan

Üretim öncesi kalite kontrol disiplini, ürün ya da üretim süreci geliştirme işini yapan mühendisin işini kaliteli yapmasını ve aynı zamanda kaliteli bir ürün ya da üretim sürecinin olası en düşük maliyetle üretilmesini sağlar. Bu disiplin, kayıp fonksiyonunun anlaşılmasına dayanır ve üç aşamada yapılır: sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı. Kalitenin ürünlerdeki sapmalarla bozulduğu ve bu sapmaların müşterileri olumsuz etkilediği bilinen bir gerçektir. Taguchi yönteminin bunu engellemeye yönelik yaklaşımı, onu diğer kalite kontrol yöntemlerinden farklı yapmaktadır. Taguchi'nin tam ve bütünleşik sistemi, ürün(üretim süreci) spesifikasyonlarını belirlemekte, bu spesifikasyonlara göre tasarım geliştirmekte ve ürünün(üretim sürecinin) bu spesifikasyonlara göre üretilmesinde yardımcı olmaktadır. Taguchi yöntemi, performansı etkileyen gürültü kaynaklarından kurtulmak yerine, ucuz malzeme ve parçalar kullanarak gürültü kaynaklarına karşı duyarsız ürün(üretim süreci) kurmaya çalışır. Bu çalışmanın uygulamasında, sitrat yöntemi için gürültü kaynaklarına karşı duyarsız en iyi kontrol faktörleri düzeyleri belirlenmeye çalışılmıştır.

ABSTRACT

The discipline of off-line quality control enables the product or process development engineer to do his job in a quality manner and at the same time produce a quality product or process at the lowest possible cost. This discipline is based on an understanding of the loss function and is done in three stages: system design, parameter design and tolerance design. It is a common fact that quality is destroyed by variability and this variability affects customers negatively. Taguchi's approach to prevent this variability makes this approach different from other methods of quality control. Taguchi's complete and integrated system assists to determine product(process) specifications, develop design and manufacture the product(process) according to these specifications. Rather than remove the sources of noises affecting the performance, Taguchi method seeks to build products and processes that are robust against sources of noises, using inexpensive components and materials. In the application of this study, the optimal control factors levels that are robust against the sources of noises have been tried to determine for the citrat process.

DEĞERLENDİRME KURULU VE ENSTİTÜ MÜDÜRLÜĞÜ ONAYI

İmza

Danışman : Prof.Dr. Yaşar HOŞCAN

Üye : Prof.Dr.Nimetullah BURNAK

Üye : Doç.Dr. Ahmet ÖZMEN

Tezin kabul edildiği tarih: 8..Haziran.1998

Tez, ilgili yasa ve yönetmeliklerin öngördüğü teknik ve bilimsel koşulları karşılamış ve aday İşletme (Sayısal) Yöntemleri Anabilim / Anasanat Dalında Yüksek Lisans-Doktora / Sanatta Yeterlik derecesi almaya hak kazanmıştır.

Prof. Dr. Enver ÖZKALP
Enstitü Müdürü



ÖZGEÇMİŞ

C. Hakan Kağnıcıoğlu

İşletme Anabilim Dalı

Eğitim

Y. Ls.	1994	Nova Southeastern University, Master of Science
Y. Ls.	1991	Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü
Ls.	1989	Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü
Lise	1984	Eskişehir Anadolu Lisesi, Fen Bölümü

İş

1990 -	Araştırma Görevlisi. Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi
--------	---

Dernek

1990 -	Anadolu Üniversitesi İİBF Mezunlar Derneği
--------	--

Yayın

"Veri Tabanlı Pazarlama," Pazarlama Dünyası, 6, 34: 11-17, Tem.Ağus. 1992.

"Veri Tabanlı Pazarlamanın Tasarım Süreci," Pazarlama Dünyası, 6, 35: 27-33, Eyl.
Ekim 1992.

Kişisel Bilgiler

Doğum yeri ve yılı: 31 Mayıs 1966

Cinsiyet: Erkek

Yabancı dil: İngilizce

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	ii
ABSTRACT.....	iii
DEĞERLENDİRME KURULU VE ENSTİTÜ MÜDÜRLÜĞÜ ONAYL.....	iv
ÖZGEÇMİŞ.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

KALİTE GELİŞTİRMEDE ÜRETİM ÖNCESİ KALİTE KONTROLU

1. DEĞİŞEN DÜNYAMIZDA KALİTE KAVRAMI.....	4
1.1. Kalitenin Değişen Tanımı.....	4
1.2. Kalitenin Değişik Boyutları.....	7
1.3. Üretim Sistemlerinde Kalite.....	10

2. KALİTE MÜHENDİSLİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ VE TARİHSEL	
GELİŞİMİ.....	13
2.1. Kalite Mühendisliğine Genel Bir Bakış.....	13
2.2. Kalite Mühendisliğinin Tarihsel Gelişimi.....	15
3. KALİTE GELİŞTİRMEYE GENEL BİR BAKIŞ.....	19
3.1. Kalite Geliştirme ve Verimlilik.....	19
3.2. Verimlilik ve Kalite Geliştirmenin Ekonomik Etkileri.....	21
3.3. Kalite Geliştirmede Kullanılan İstatistiksel Yöntemler.....	23
3.4. Kalite Geliştirmede Tasarım Kalitesinin Önemi.....	27
3.5. Kalite Geliştirmede Ürün ve Üretim Süreci Tasarımının Önemi..	29
4. TAGUCHİ BAKIŞ AÇISINDAN KALİTE MÜHENDİSLİĞİ.....	32
4.1. Üretim Sonrası Kalite Kontrolü.....	33
4.2. Üretim Öncesi Kalite Kontrolü.....	36

İKİNCİ BÖLÜM

ÜRETİM ÖNCESİ KALİTE KONTROLUNDA TAGUCHİ YÖNTEMİ

1. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KALİTE FELSEFESİ VE GETİRDİĞİ	
YENİLİKLER.....	39
1.1. Taguchi Yönteminin Kısa Tarihi.....	39
1.2. Taguchi Yönteminin Kalite Felsefesi.....	41
1.3. Taguchi Yönteminin Getirdiği Yenilikler.....	46

2. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN DAYANDIRILDIĞI KURAMSAL ESASLAR	50
2.1. Taguchi Kayıp Fonksiyonu.....	50
2.2. Performans Değişkenliği.....	58
2.3. Değişkenlik ve Varyans Analizi.....	59
2.3.1. Tek Faktör Varyans Analizi.....	60
2.3.2. İki Faktör Varyans Analizi.....	64
2.3.3. Üç Faktör Varyans Analizi.....	65
2.4. F Testi ve Katkı Yüzdelерinin Belirlenmesi.....	66
2.5. Tam Faktöriyel Diziler.....	71
2.6. Kesirli Faktöriyel Diziler.....	72
2.7. Ortogonal Diziler.....	73
2.7.1. L_2^n Serisi Ortogonal Diziler.....	76
2.7.2. L_3^n Serisi Ortogonal Diziler.....	77
2.8. Ortogonal Dizilerin Serbestlik Derecesi ile İlişkisi.....	78
2.9. Doğrusal Grafikler.....	80
2.9.1. Faktörlerin Doğrusal Grafiğe Atanması.....	81
2.9.2. Standart Doğrusal Grafiklerin Değiştirilmesi.....	82
2.10. Çok Düzeyli Ortogonal Diziler.....	85
2.10.1. İki Düzeyli Ortogonal Dizilerden İkinci Katları Düzeyli Ortogonal Dizilerin Oluşturulması.....	85
2.10.2. Üç Düzeyli Ortogonal Dizilerden Üçüncü Katları Düzeyli Ortogonal Dizilerin Oluşturulması.....	87
2.10.3. Değişik Düzeydeki Faktörlerden Ortogonal Bir Dizin Oluşturulması.....	87

3. TAGUCHİ YÖNTEMİ YAKLAŞIMI VE UYGULAMASINDA TEMEL

BASAMAKLAR.....	90
3.1. Ürün ve Üretim Süreci Tasarımına Taguchi Yaklaşımı.....	90
3.1.1. Sistem Tasarımı.....	91
3.1.2. Parametre Tasarımı.....	92
3.1.2.1. Gürültü kaynakları.....	93
3.1.2.2. Kontrol faktörleri.....	95
3.1.2.3. Parametre tasarım deneyinin genel modeli.....	96
3.1.2.4. Parametre tasarım deneyinin oluşturulması.....	98
3.1.2.5. Performans istatistiği.....	101
3.1.2.6. Parametre tasarım yöntemi.....	104
3.1.3. Tolerans Tasarımı.....	107
3.2. Taguchi Yönteminin Diğer Klasik Deney Tasarım Yöntemleri ile	
Karşılaştırılması.....	109
3.3. Taguchi Yönteminin Uygulamasında Temel Basamaklar.....	111
3.3.1. Çalışma Ekibinin Kurulması.....	111
3.3.2. Amaçların Belirlenmesi.....	113
3.3.3. Performans Karakteristiklerinin ve Ölçüm Sistemlerinin	
Belirlenmesi.....	114
3.3.4. Performans Karakteristiklerini Etkileyen Faktörlerin	
Belirlenmesi ve Sınıflandırılması.....	116
3.3.5. Kontrol Faktörlerinin ve Gürültü Faktörlerinin	
Düzeylerinin Belirlenmesi.....	116
3.3.6. Potansiyel Etkileşimlerin Belirlenmesi.....	119

3.3.7. Uygun Ortogonal Dizilerin Seçilerek Atamaların Yapılması.....	120
3.3.8. Taguchi Kayıp Fonksiyonu ve Performans İstatistiklerinin Belirlenmesi.....	121
3.3.9. Deneyin Hazırlanması.....	122
3.3.10. Deneylerin Yapılması ve Kontrol Faktörlerinin En İyi Değerlerinin Bulunması.....	123
3.3.11. Doğrulama Deneyinin Yapılması.....	128

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT YÖNTEMİNE LABORATUVAR ORTAMINDA UYGULANMASI

1. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT YÖNTEMİNE UYGULANMASI.....	131
2. SEÇİLEN ÜRETİM SÜRECİ SİTRAT YÖNTEMİ VE DENEY DÜZENİĞİNİN VE MALZEMENİN HAZIRLANMASI.....	135
2.1. Seçilen Üretim Süreci Sitrat Yöntemi.....	135
2.2. Deney Düzenığının ve Malzemenin Hazırlanması.....	136

3.TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT YÖNTEMİNE UYGULANMASINDA İZLENEN TEMEL

BASAMAKLAR.....	140
3.1. Çalışma Ekibinin Kurulması.....	140
3.2. Amaçların Belirlenmesi.....	141
3.3. Performans Karakteristiklerinin ve Ölçüm Sistemlerinin Belirlenmesi.....	142
3.4. Performans Karakteristiklerini Etkileyen Faktörlerin Belirlenmesi ve Sınıflandırılması.....	143
3.5. Kontrol Faktörlerinin ve Gürültü Faktörlerinin Düzeylerinin Belirlenmesi.....	144
3.6. Potansiyel Etkileşimlerin Belirlenmesi.....	146
3.7. Uygun Ortogonal Dizilerin Seçilerek Atamaların Yapılması.....	146
3.8. Taguchi Kayıp Fonksiyonu ve Performans İstatistiklerinin Belirlenmesi.....	148
3.9. Deneyin Hazırlanması.....	149
3.10. Deneylerin Yapılması ve Kontrol Faktörlerinin En İyi Değerlerinin Bulunması.....	150
3.11. Doğrulama Deneyinin Yapılması.....	160
SONUÇ.....	164
EKLER.....	170-196
KAYNAKÇA.....	197-203

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. Ürün geliştirme aşamasında değişkenlik kaynaklarına karşı önlemler.....	30
Tablo 2. Türkiye'de Linyitle Çalışan Santrallerin Üretim ve Yakıt Özellikleri.....	133
Tablo 3. Kontrol Faktörleri ve Düzeyleri.....	145
Tablo 4. Rassallaştırılmış Deney Sıraları ve Kontrol Faktörleri Kombinasyonu.....	151
Tablo 5. Deney Sonuçları ve İşaret Gürültü Oranları.....	152
Tablo 6. Performans İstatistiği Çözeltinin Doygunluğa Ulaşma Süresi için Varyans Analizi.....	154
Tablo 7. Performans İstatistiği Çözeltinin Kükürdioksit Gazını Yüksek Verimlerde Tutma Süresi için Varyans Analizi.....	155
Tablo 8. Kontrol Faktör Düzeylerinin Performans İstatistikleri ve Maliyetleri.....	158
Tablo 9. Performans Karakteristiklerinin % 95 ve % 99 Güven Aralığındaki Değerleri.....	161
Tablo 10. Doğrulama Deneyi Sonuçları.....	162

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1. Kalite Üçgeni.....	5
Şekil 2. Üretim Sistemi.....	11
Şekil 3. Verimlilik ve Kalitenin Ekonomik Etkileri.....	22
Şekil 4. Kalitenin Oluşması.....	29
Şekil 5. Geliştirilmiş Süreç Tasarımı.....	32
Şekil 6. Kalite Mühendisliği.....	34
Şekil 7. Geleneksel Kayıp Fonksiyonu.....	52
Şekil 8. Taguchi Kayıp Fonksiyonu.....	52
Şekil 9. Daha Büyük Daha İyi Karakteristiği için Kayıp Fonksiyonu.....	57
Şekil 10. Daha Küçük Daha İyi Karakteristiği için Kayıp Fonksiyonu.....	57
Şekil 11. Faktörlerin ve Etkileşimlerin Ortogonal Bir Diziye Atanması.....	84
Şekil 12. Gürültü Kaynakları.....	94
Şekil 13. Parametre Tasarım Deneyinin Genel Modeli.....	98
Şekil 14. Parametre Tasarım Deneyi.....	100
Şekil 15. Belirli Bir Hedef Değer En İyi için Parametre Tasarım Yöntemi.....	106
Şekil 16. Deney Düzenegi.....	137
Şekil 17. $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ Dizisinin Standart Doğrusal Grafiği.....	148
Şekil 18. Kontrol Faktörlerinin Performans İstatistiği Çözeltilinin Doygunluğa Ulaşma Süresi Üzerindeki Etkileri.....	156
Şekil 19. Kontrol Faktörlerinin Performans İstatistiği Çözeltilinin Kükürtdioksit Gazını Yüksek Verimlerde Tutma Süresi Üzerindeki Etkileri.....	156

GİRİŞ

İşletmeler, günümüz pazarlarında etkili bir şekilde rekabet edebilmek için ürünlerin kalitesini geliştirirken aynı zamanda maliyetlerini de azaltmak için yollar aramaktadırlar. Ayrıca, işletmeler ürünlerini hızlı bir şekilde, en az araştırma ve geliştirme maliyeti ile pazara sunmalıdır. Değişen ve gelişen kalite tanımı müşteriye en ön plana çıkarmıştır. İşletmeler için ürünün kalitesi müşteri memnuniyeti ile ölçülmektedir.

Müşterinin istediği kalitede ürünü üretmek işletmeler için en büyük amaç olmuştur. Bu amacı başarma doğrultusunda çalışmalar yapan işletmeler pazarda iyi yerlere gelmiştir. Kaliteyi geliştirmek için yapılan sürekli geliştirme çabaları bazı durumlarda maliyet engeline takılmıştır. Kaliteyi arttırırken maliyetlerin de artması bu çalışmaların devamını engellemiştir. Üretim sonrasında kalite kontrolüne yönelik yapılan çalışmalar, maliyetleri arttırması ve kalıcı çözümler bulmada çok yeterli olmamasından dolayı belirli bir yere kadar başarılı olmuştur. Ürün üretilmeden önce istenilen kalitenin o ürüne verilebilmesi için üretim öncesi kalite kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Böylelikle, ürün ve üretim süreci tasarımı eniylenirken aynı zamanda üretim sonrası kalite kontrolü de desteklenmiş olmaktadır.

Üretim öncesi kalite kontrolunda ürün ya da üretim süreci tasarımının en iyilenmesine yönelik çeşitli yöntemler olmasına rağmen, en etkili ve başarılı olanı Taguchi yöntemidir. Taguchi, istatistiksel kurallara dayanarak ve mühendislik bilgilerini kullanarak bir yöntem geliştirmiştir. Taguchi'ye göre müşteriye gönderilen kalitesiz bir ürün hem işletme hem de toplum için maddi bir kayıp olması nedeni ile geliştirdiği yöntem maliyet etkilidir. Taguchi yöntemi ile ürün ya da üretim sürecinde değişkenliğe neden olan kaynakların belirlenip kontrol altına alınması yerine değişkenlik kaynaklarından en az etkilenen ürün/üretim süreci kontrol faktörleri değerlerinin bulunması temel amaçtır.

Üretim öncesi kalite kontrol yöntemlerinden Taguchi yöntemi üzerine yapılan bu tez çalışmasının birinci bölümünde hızla değişen dünyamızda kalite kavramındaki gelişmelerden, verimliliğe etkisinden, kalite geliştirme yöntemlerinden, ürün ve üretim süreci tasarımından ve Taguchi kalite mühendisliğinden söz edilmiştir.

İkinci bölümde ise Taguchi yöntemi felsefesinin getirdiği yenilikler, Taguchi yönteminin dayandırıldığı kuramsal esaslar, Taguchi kayıp fonksiyonu, ortogonal diziler, Taguchi yöntemi yaklaşımı ve uygulamasında temel basamaklar yer almıştır.

Son bölümde ise Taguchi yöntemi, temel basamakları izlenerek laboratuvar ortamında uygulanmıştır. Son yıllarda ülkemizde hava kirliliği ve termik santrallerin buna etkisi çok tartışılmakta ve çözüm yolları önerilmektedir. Bu uygulamada da termik santrallerden çıkan kükürtdioksit gazının giderilmesinde sitrat yönteminin kullanılması

araştırılmış ve yöntemin en iyilenmesine yönelik bir çalışma yapılarak en iyi kontrol faktörleri düzeyleri belirlenmiştir. Ülkemizdeki termik santrallerin tamamına yakın bir bölümünde kükürtdioksit giderici bir yöntemin kullanılmaması sonucu hava kirliliğini olumsuz yönde etkilemesi ve toplumun tepkisinin giderek artması bu çalışmanın önemini daha da arttırmaktadır. Uygulamanın sonunda deney çalışmalarının sonuçları özetlenerek, uygulamaya yönelik önerilerde bulunulmuştur.



BİRİNCİ BÖLÜM

KALİTE GELİŞTİRMEDE ÜRETİM ÖNCESİ KALİTE KONTROLU

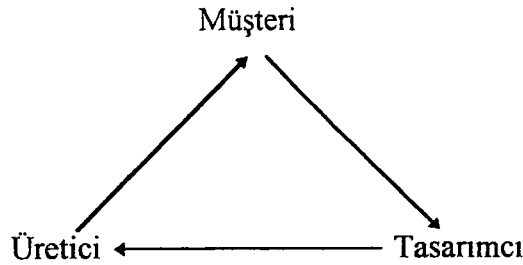
1. DEĞİŞEN DÜNYAMIZDA KALİTE KAVRAMI

1.1. Kalitenin Değişen Tanımı

Ürünler müşteri gereksinim ve beklentilerine göre performansını açıklayan karakteristiklere sahiptir. Bir arabanın yakıt tüketimi, olta sapının kırılma gücü ya da bir su ısıtıcısının güç kaybı gibi karakteristikler müşteriye ilgilendiren karakteristiklerdir. Bir ürünün kalitesi bu karakteristiklerle ölçülür. Kalite, ürünün yaşamı süresince toplumda neden olduğu kayıp ile ilişkilidir. Gerçekten yüksek kaliteli bir ürün yaşamı boyunca toplumda en az kayıba neden olan üründür. Müşterinin karşılaştığı kayıp bir çok şekil alabilmesine rağmen genelde bir ürünün işlevini ya da özelliğini kaybetmesi

şeklinde meydana gelir. Diğer kayıplar olarakta zaman, kirlilik ve gürültü sayılabilir. Kalitenin tek bir değerlendiricisi vardır, o da müşteridir¹. Bu durum Şekil 1'deki kalite üçgeni ile açıklanabilir.

Şekil 1. Kalite Üçgeni



Modelde müşteri hem yargıç, hem jüri, hem de cellatdır. Müşteri ürünü kendi gereksinimlerini karşılamasına, fiyatına ve performansını göre değerlendirir. Tasarımcı müşterinin istek, gereksinim ve beklentilerini belirleyerek bunları ürün spesifikasyonlarına dönüştürür. Üretici bu bilgi ve gerekli makinaları kullanarak ürünü üretir. Hazır olan ürün pazarlama kanalları ile müşteriye ulaştırılır. Müşteriyi memnun etmek için ürün doğru miktarda, doğru zamanda, doğru yerde ve doğru zaman diliminde doğru işlevleri yerine getirmelidir. Ayrıca, bunlara müşterinin istediği fiyat da ilave edilmelidir. Tüm bunların yerine getirilmesi zordur, fakat yüksek kalitenin en basit tanımı mutlu müşteridir.

Kalite konusunda uzman olan kişiler arasında kalitenin tanımı hakkında tam bir uyum yoktur. J. M. Juran kaliteyi "kullanım için uygunluk" şeklinde tanımlarken P. Crosby "isteklere uygunluk" şeklinde bir tanımlama yapmıştır. W. E. Deming "kalitede

¹ Philip J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, (USA: McGraw Hill, 1988), s.2.

hedef tüketicinin şimdiki ve gelecekteki gereksinimleri olmalıdır" demiştir. Amerikan Kalite Kontrol Örgütü (The American Society for Quality Control) kaliteyi "bir ürün ya da servisin belirli gereksinimleri karşılama kabiliyetine sahip tüm karakteristik ve özellikleri" şeklinde tanımlamıştır². Tüm bu tanımlar birbirinden farklı olmasına rağmen, bazı ortak noktaları da vardır.

- Kalite, müşterilerin istek ve gereksinimlerinin karşılanma ölçüsüdür.
- Kalite statik değildir, çünkü müşteri beklentileri değişebilir.
- Kalite, müşteri gereksinimlerini karşılamak için ürün ya da servis spesifikasyonlarının ve standartlarının geliştirilmesini (kalite tasarımı) ve bu spesifikasyon ve standartlara göre ürünlerin üretilmesini (kalitenin uygunluğu) içerir.

Kaliteye, müşterilerin beklentilerini karşılamak açısından bakıldığı zaman, beklentilerde hem açıklanan hem de açıklanmayan beklentiler söz konusudur. Tüm ürünlerin standartlaşmış özellikleri vardır ve bu özellikler müşteri beklentilerinde belirtilme gereği duyulmaz, çünkü bu özellikler ürün ile özdeşleşmiştir ve beklentilere dikkat edilmelidir.

Genichi Taguchi kalite için değişik bir tanımlama yapmıştır: "Kalite, ürün müşteriye gönderildikten sonra ürünün asıl işlevlerinin neden olduğu kaybın dışında toplumda neden olduğu kayba denir". Kayıp ile Taguchi iki kategoriden söz etmektedir:

1. İşlev değişkenliğinin neden olduğu kayıp
2. Zararlı yan etkilerin neden olduğu kayıp

² Robert H. Lochner ve Joseph E. Matar, **Designing for Quality: An Introduction to The Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Experimental Design**, (USA: Chapman and Hall, 1990), s.11.

İşlev değişkenliğinin neden olduğu kayba örnek olarak soğuk mevsimde çalışmayan bir araba verilebilir. Eğer araba sahibi arabasını çalıştırmak için birisine ödemedi bulunursa, parasal kayba uğramış olur. Zararlı yan etkilerin neden olduğu kayba örnek olarak da soğuktan çalışmayan arabanın sahibinin ellerinin donması verilebilir. Taguchi, arızalı bir ürünün yeniden işlenerek müşteriye gönderilmesini kalite kaybı olarak değil işletmeye bir maliyet olarak görür. Ayrıca, bir ürünün beklendiği şekilde çalışması sırasında neden olduğu kaybı, Taguchi kalite kaybı olarak kabul etmemektedir. Taguchi'ye göre bu kayıplar kültürel ya da yasal sorunları yansıtır, mühendislik sorunlarını yansıtmaz. Bu duruma örnek olarak, radar detektörü olan bir arabanın aşırı hızdan dolayı kaza yapması gösterilebilir. Uygun çalışan radar detektörünün topluma neden olduğu kayıp kalite kaybı olarak kabul edilemez.

1.2. Kalitenin Değişik Boyutları

Bir ürünün kalitesi bir çok şekilde değerlendirmeye alınabilir. Bir üründeki değişik kalite boyutlarını ayırdedebilmek çok önemlidir. Bu ayrımı yapabilmek için aşağıda kalitenin sekiz boyutu kısa olarak özetlenmiştir³:

1. Performans (ürün istenilen işi yapacak mı?):

Potansiyel müşteriler genelde ürünü spesifik işlevlerine ve bu işlevlerini yerine getirme şekline göre değerlendirirler. Örneğin, bir dikiş makinası dikiş hızına ya da dikiş çeşitlerine göre değerlendirilebilir.

³ "David A. Garvin, "Competing in the Eight Dimensions of Quality," *Harvard Business Review*, Sep.-Oct. 1987, s.66-75" James R. Evans ve William M. Lindsay, *The Management and Control of Quality*, (USA: West Pub. Co., 1989), s.9'daki alıntı.

2. Güvenilirlik (ürün ne kadar sıklıkla bozuluyor?):

Uçak ya da otomobil gibi karışık ürünler hizmet süreleri boyunca tamir ister. Bir otomobil belirli zamanlarda tamir ya da bakım ister, eğer bu tamirler sıklaşırsa, müşterinin gözünde bu otomobil güvenilir değildir. Bu endüstride müşterinin kaliteye bakış açısı kalitenin güvenilirlik boyutundan etkilenir.

3. Dayanıklılık (ürün ne kadar süre ile dayanır?):

Ürünün yaşam boyu etkili hizmet süresidir. Müşteriler bilindiği gibi ürünün performansını uzun dönem sürdürmesini ister. Müşteriler için otomobil sektöründe güvenilirlik boyutu gibi dayanıklılık boyutu da çok önemlidir.

4. Hizmet verebilmesi (ürünü tamir ettirmek ne kadar kolay?):

Bir çok endüstri kolunda müşterilerin kaliteye bakış açısı ürünlerin tamir hızı ve maliyeti ile doğrudan etkilenir. Bir otomobilin periyodik bakım süresi ve fiyatı buna en iyi örnektir.

5. Estetik (ürün nasıl görünüyor?):

Bu, ürünün görünen şekli ile ilgilidir. Ürünün tarzı, rengi, şekli, paketlenme alternatifleri ve diğer elle tutulur özelliklerini içerir. Kolalı içecek satan firmaların değişik şekil ve renkteki şişeleri buna örnektir.

6. Özellikler (ürün ne yapar?):

Müşteriler, genelde çok özelliği olan ürünü yüksek kaliteli olarak kabul ederler. Onların gözünde rakip ürünlerden bir kaç fazla özelliği olan ürün daha kalitelidir. Bu

özelliklerin gerçekten kullanılıp kullanılmayacağını önemi yoktur. Bir otomobilin içine okumaya yardım etmesi için koyulan fazladan bir lamba buna en iyi örnektir.

7. Algılanan Kalite (Ürün ya da firma ne kadar tanınıyor?):

Bir çok durumda müşteriler işletmenin kaliteli ürünleri için geçmiş ününe güvenirler. Bu ün ürünün toplum önünde çalışıp çalışmaması ile ve kalite ilgili bir sorunda müşteriye davranış şekli ile doğrudan olarak etkilenir. Algılanan kalite müşteri bağımlılığı ve aynı işletme ile tekrar tekrar çalışılması birbiriyle içiçe bağımlıdır. Sürekli belirli bir şirkete ait uçak ile seyahat eden bir işadamı her zaman yerine zamanında ulaşırsa ve valizleri bozulmazsa, bu işletmeyi tercih etmeye devam edecektir.

8. Standartlara uygunluk (ürün tasarımcının istediği gibi üretilmiş mi?):

Genel olarak, istenilen standartları sağlayan ürün yüksek kaliteli kabul edilir. Tasarımcının isteklerine uymayan ürün parçaları önemli kalite sorunlarına neden olabilir. Bu ürün karışık bir ürünün parçası olarak kullanılırsa kalite sorunu daha da büyür. Binlerce parçadan meydana gelen bir otomobilin bir kısım parçaları az büyük ya da küçük üretilirse birçok parçası yerine yerleştirilemez ya da otomobil tasarlandığı gibi çalışmaz.

Tüm bu tanımlamalara bakıldığı zaman kalitenin birçok boyutunun olduğu görülür ve müşterileri tüm bunlara göre memnun etmenin ne kadar zor olduğu meydana çıkar. Bu nedenle kalite bir işletmede en üst düzeyden en alt düzeye kadar herkesin sorumluluğunda olmalıdır.

1.3. Üretim Sistemlerinde Kalite

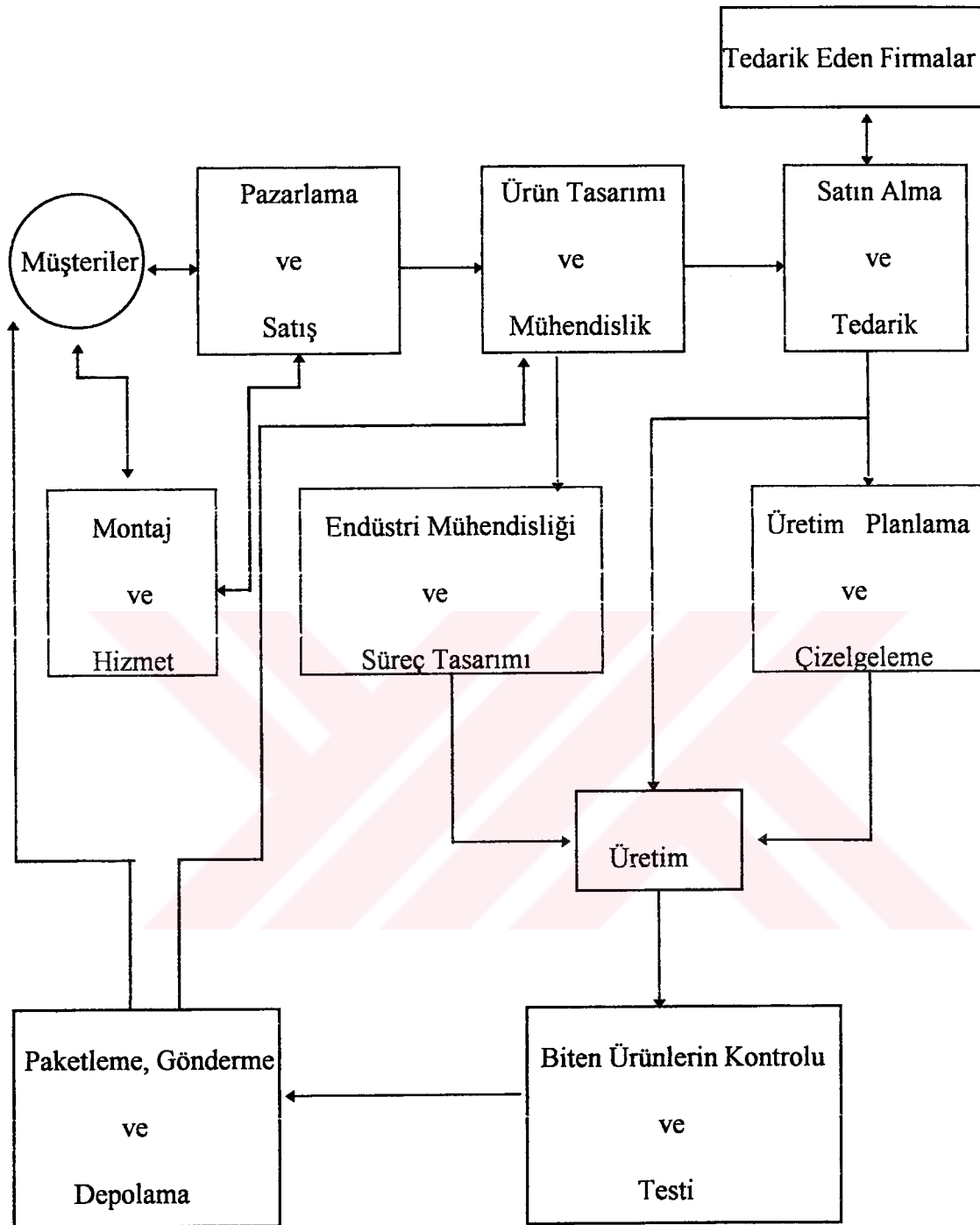
Kalitenin işletmeleri her yönden etkilediği tartışma götürmez bir gerçektir. Bu nedenle, bir üründe başarılı olabilmek için kalitenin güvence altına alınması zorunludur.

Üretim bir işletmedeki hazır kaynakların ürün ve hizmete dönüştürülmesi sürecine denir. Ürün ve hizmet üretiminde birbiriyle ilişkili tüm faaliyet ve işlemlerin toplamına üretim sistemi denir⁴. Hizmet firmaları da üretim sistemlerinin içinde dahil olmasına rağmen, burada sadece üretim firmaları ile ilgilenilecektir.

Kalite ile ilgili üç ana alan tüm üretim sistemleri için kritiktir: **ürün geliştirilmesi, üretim süreci ve ürün kullanımı**. Ürün geliştirme ve ürün kullanımı müşteri odaklı faaliyetlerdir. Bu faaliyetlerdeki kalite çalışmalarının odak noktası müşteri isteklerini ve hizmet gereksinimlerini belirleyerek bu istek ve gereksinimlerini kullanıma uygunluk kriterini karşılayacak ürün tasarımına dönüştürmek olmalıdır. Üretim süreci kaynakları ürün ya da hizmete dönüştüren fiziksel tesis, bilgi ve kontrol sistemlerini içerir. Üretim süreci genel olarak işletme yönetiminin kontrolü altındadır. Buradaki kalite çalışmaları ürünün spesifikasyonlara uyumlu olmasını sağlamaya yöneliktir.

⁴ Evans, a.g.e., s.9.

Şekil 2. Üretim Sistemi



Kaynak: James R. Evans ve William M. Lindsay, *The Management and Control of Quality*, (USA: West Pub. Co., USA, 1989), s.10.

Şekil 2, üretime yönelik tipik bir üretim sistemini göstermektedir. Kalite güvencesinin etkili olması istenirse, kalite, üretim sisteminin tüm kısımlarını içine almalıdır. Her bir kısımda kalitenin rolü aşağıda özetlenmiştir.

Pazarlama ve Satış: Pazarlama ve satış personeli müşterilerin ürün gereksinim ve beklentilerini belirlemekten sorumludur. Bu bilgi ürünün tanımlanmasında önemlidir. Etkili pazar araştırması ve müşteri geri beslemesi kaliteli ürün geliştirmek için gereklidir.

Ürün Tasarımı ve Süreç Mühendisliği: Pazarlama tarafından belirlenen müşteri isteklerini karşılayan ürün ve üretim süreçlerinin teknik spesifikasyonlarının geliştirilmesi faaliyetlerinden sorumludur.

Satın Alma ve Tedarik: Satın alma bölümü satın alınan parçaların ürün tasarımında belirlenen kalite isteklerini karşılamasını güvence altına alınmasından sorumludur. Tedarik ise satın alınan parçaların ulaştıktan sonra gerçekten istenilen kalitede olduğunun kontrol edilmesinden ve olmayanların üretime gönderilmemesinden sorumludur.

Üretim Planlama ve Çizelgeleme: Düzgün bir üretim akışı için doğru malzeme, araç ve alet istenilen zamanda istenilen yerde bulunmalıdır. Düşük kalite genelde eksik planlama ve çizelgelemeden meydana gelir.

Üretim: Kalite güvencesinin birinci koşulu kalitenin ürün içine kurulmasıdır. İşçilik, malzeme ve aletlerin kontrolü yüksek kaliteyi elde etmek için gereklidir.

Endüstri Mühendisliği ve Süreç Tasarımı: Bir üretim süreci spesifikasyonları sürekli olarak sağlayan ürünler üretmelidir. Endüstri mühendisleri ve süreç tasarımcıları ürün tasarımcıları ile işbirliği yaparak gerçekçi spesifikasyonlar geliştirmeye çalışmalıdır.

Biten Ürünlerin Kontrolü ve Testi: Biten ürün kontrolünün amacı üretimin kalitesini sınavarak olabilecek sorunları engellemek ve müşteriye bozuk ürün ulaşmamasını sağlamaktır.

Paketleme, Gönderme ve Depolama: Bu lojistik faaliyetler ürün üretildikten sonra kalitesini korumaya yöneliktir.

Montaj ve Hizmet: Ürünün müşteriye faydalı olabilmesi için doğru kullanılmalıdır. Müşteriler ürünü anlamalı ve uygun montajı ve çalışması için kullanım talimatı olmalıdır. Üründe bir sorun çıkması durumunda müşteri memnuniyeti satış sonrası hizmetine bağlıdır.

Yukarıdaki tüm faaliyetlerin kalite üzerine etkisi olması nedeni ile kalite güvencesi, müşteriye istenilen kalitede ürünü sunmak amacıyla bir üretim sistemindeki kaliteyi planlamak, organize etmek, yönetmek ve kontrol etmek için yapılan tüm çabalar olarak tanımlanabilir.

2. KALİTE MÜHENDİSLİĞİNE GENEL BİR BAKIŞ VE TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1. Kalite Mühendisliğine Genel Bir Bakış

Kalite mühendisliği, bir üründe kalitenin tasarlanma sürecini ve üretimden önce potansiyel kalite sorunlarının belirlenmesini işaret eder. Kalite mühendisliği ürün ve hizmetlerde kalitenin değerlendirilmesi ve tasarımı için planlar, işlemler ve yöntemler

ile ilgilenir. Kalite mühendisliğine daha fazla önem verilmesi için gereksinim günümüz ürünlerinin eskiye göre daha karmaşık olmasından kaynaklanmaktadır. Bisiklet, el aletleri gibi geleneksel ürünler günümüz elektronik ürünleri yanında tasarım açısından çok kolay kalmaktadır. Günümüz karmaşık ürünlerinde yüksek kalite ancak üretim devresinin en başında, ürün ve üretim sürecinin tasarımında, başlanırsa başarılı olabilmektedir⁵. Kaliteyi sağlamak için yapılan tasarım müşterinin kullanım uygunluğunu karşılayacak ürün teknik spesifikasyonlarını belirlemeyi içermelidir. Ayrıca, üretim mühendisi üretim süreci spesifikasyonlarını belirlemelidir. Bunların arasında üretimin nasıl yapılacağı, girdilerin kontrolü, üretim sürecinin kontrolü, ürünün paketlenmesi ve dağıtımı sayılabilir.

Spesifikasyonlara uygunluk satın alma ve üretim bölümlerinin sorumluluğundadır. Satın alınan parçaların kullanılması durumunda, bu parçaların spesifikasyonlara uygunluğunun kontrolü gereklidir. Yetersiz üretim yöntemleri ürün kalitesinin düşmesine ve sık sık ürün arızalarına neden olur. Paketleme ve dağıtım bölümü ürünün müşteriye sağlam ulaşmasını sağlamalıdır. Bu durum da ilk tasarım aşamasında göz önüne alınmalıdır. Son olarak, kullanım kılavuzunun ve satış sonrası hizmetinin kalitesi ürünün başarısında önemlidir.

Ürün tasarımcıları tasarımlarında çok zaman ürünün maliyetini ve üretilebilme yeteneğini düşünmeden hareket ederler. Üretim ve tasarım mühendisliği arasındaki koordinasyon eksikliği bir çok üretim sorunlarına neden olur. Uygun olmayan

⁵ William Y. Fowlkes ve Clyde M. Creveling, **Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development**, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1995, s.4.

toleransların kullanılması da ciddi üretim sorunlarına ve çok fazla standartlara uymayan ürün üretimine yol açar. Tüm bu ve buna benzer nedenlerden dolayı tasarım, üretim ile karşılıklı iletişim halinde çalışmalıdır.

Kalite güvenliğinden sorumlu kişiler bu koordinasyonu sağlamada birinci derecede önemlidir. Kalite mühendisleri spesifikasyonlara uygun üretilebilen ürün geliştirmede tasarımcılara yardımcı olurlar. Tasarım standartlarını üretim ile en iyi ilişkilendiren ve üretimde en çok sorunla karşılaşılan bölümleri bilen kalite mühendisleri tasarım maliyetleri ile kalite maliyetlerini karşılaştırarak dengeyi sağlamaya çalışırlar. Kalite mühendisleri hurda, tamir ve hizmet kayıtlarını en iyi bilen kişidir. Süreç yetenek analizi ile de üretim araçlarının istenilen üretim yeteneğine sahip olup olmadığı belirlenir⁶.

Kalite mühendisliği sadece maliyet ve pazarlama açısından değil yasal açıdan da önemlidir. Kullanılan üründen kaynaklanan yaralanmalar ya da ölümlerde işletmenin sorumluluğu göz önüne alınırsa, ürün tasarımı daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle, ürün sorumluluğu ürünün tasarımından itibaren dikkate alınmalıdır.

2.2. Kalite Mühendisliğinin Tarihsel Gelişimi

Amerikalıların dünyadaki en iyi mucitler olduğu ve verimliliği arttırmada dünya lideri olduğu söylenmesine rağmen, kalite geliştirmede uluslararası rekabette daima geride kalmışlardır. Bir kaç Amerikan şirketinin ürün ve üretim sürecinde mükemmel

⁶ Evans, a.g.e., s.191.

kaliteye ulaşmasına rağmen, genelde büyük çoğunluğu pazar payının büyük bir kısmını yabancılara, özellikle Japon şirketlerine kaptırmıştır.

Kalite sistemleri yirminci yüzyılın oluşumudur. Endüstri devriminden önce kalite ürün üretilirken içinde oluşuyordu. Başka bir anlatımla, üretilen ürün kalitesinde beraberinde getiriyordu. Kabul edilmeyen bir ürün üretmek çok pahalıydı. Ürünün her bir parçası bir kişi ya da bir grup tarafından teker teker üretilerek ürün meydana getirilirken, müşterinin üründen ne beklediği bilinirdi. Yol ya da köprü gibi büyük kamu projeleri vasıfsız elemanlarla inşa edilir, ancak vasıflı yöneticiler ve kamu müfettişleri tarafından sürekli olarak kontrol edilerek, işin yolunda gitmesi sağlanırdı. Endüstri devrimi ile birlikte binlerce vasıfsız eleman yüksek hızlı üretim sistemlerinin içine dahil edildi. Bu vasıfsız elemanlar yeni üretim süreçlerini ve ardındaki teknolojiyi anlamadılar. Yöneticiler bu kadar hızlı ve büyük üretim sistemlerini yürütmekte tecrübeye sahip olmadıkları için işler daha çok karıştı. 1900 yılları civarında Frederick Taylor "Bilimsel Yönetim" yöntemini tanıttı. Taylor'a göre yöneticiler sistemi yönetmeli ve işçilerde onlara söyleneni yapmalıdır⁷. Taylor tüm süreçleri küçük parçalarına bölerek, her bir parça için yapılması gerekli işleri açıkladı. Taylor'ın fikirleri kısa zamanda kabul görmüş ve büyük üretim sistemlerinde uygulanmaya başlandı. Bunun sonucunda verimlilik arttı, fakat kalite bir sorun olarak kaldı. Kaliteyi artırmanın en iyi yolu değişkenliğin azaltılması olarak görüldü. 1920 yılında Walter Shewhart kontrol grafiklerini süreçleri sabitleştirmek için bir araç olarak tanıttı. Shewhart'a göre tüm süreç değişkenliği ortadan kaldırılamaz, ancak bu değişkenlik ölçülerek bir kısmı

⁷ Arthur G. Bedeian., **Management**, (Third Edition. USA: The Dryden Press, 1993), s.31.

ortadan kaldırılabilirdi. Değişkenlik kontrol edilebilen ve edilemeyen şeklinde ikiye ayrılır ve kontrol grafikleri bunların tanımlanmasına yardımcı olur⁸.

Daha sonraki yıllarda Shewhart'ın grafiği daha da geliştirilerek kullanılmaya devam edildi. Ayrıca, kontrol grafiklerinden başka, son ürünlerin kontrolunda örneklem plan tabloları da kullanıldı. Bununla birlikte, kalitenin artırılması ile ilgili yapılan işlemlerde odak noktası ürünün ya da üretim sürecinin izlenmesinden daha ileriye gidemedi. İkinci Dünya Savaşı sırasında Amerikan Savaş Bölümü alımlarında istatistiksel örneklem planları uygulandı. Ayrıca, örneklem planları, kontrol şemalarının kullanımı ve temel istatistiksel kavramlar konusunda kurslar verildi. Bu eğitim kursları sonucunda mühendisler ve diğer elemanlar üretim süreçlerini nasıl izlemeleri gerektiğini öğrendiler.

İkinci Dünya Savaşı sonunda Avrupa ve Asyadaki üretim gücünün büyük kısmı tahrip oldu. Buna karşılık Amerikan üretim gücü savaşın etkisiyle çok gelişmiş ve barış zamanı üretimine dönüş için hazırды. Dünyadaki üretim mallarına talepte çok yüksekti. O zaman geçerli olan kural, eğer üretebiliyorsan satabilirsin şeklindeydi. Üretilen ürünlerin bir kısmının bozuk olması sorun değildi. Müşteri bu ürünleri tamir ya da geri iade için geri getirirdi. O zamanlar, hiç kimse araba gibi karışık bir ürünün bir kerede doğru yapılabileceğine inanmazdı. IBM firması ününü kalite ile sağlamasına rağmen ilk bilgisayarların hiç birisi ilk kuruldukları yerde doğru çalışmamıştır. Bununla birlikte, firma sorunları iyi servis ile gidermiştir ve 1950 ve 1960'larda iyi kalite iyi servis anlamına gelmiştir.

⁸ Donald J. Wheeler, David S. Chambers, **Understanding Statistical Process Control**, (Second Edition. Tennessee, USA: SPC Press, 1992), s.4.

İkinci Dünya Savaşının sonunda Japonya'da üretim gücü diğer ülkelerin hepsinden çok daha kötü durumdadır. Japonya'da üretilen ürünlerin kalitesi diğer ülkelerin hiçbirisinde kabul edilebilir seviyede değildir. Kısaca, Japon üretimi hurda ürün anlamına geliyordu. Japon Bilim Adamları ve Mühendisleri Örgütü (The Japanese Union of Scientists and Engineers), Japonya'nın ekonomik varlığını tehdit eden bu sorunu çözmek için girişimde bulundu. Bu kuruluş 1950 yılında W. E. Deming'i kalite geliştirme ile ilgili fikirlerini Japonya'nın önde gelen sanayicilerine açıklaması için Japonya'ya davet etti. Deming kalite yönetimi konusunda engin bilgiye sahip olmasına rağmen, Amerika'da kendisini kimse dinlemiyordu, çünkü herkes para kazanma ile meşguldu. Japonlar onu dinledi ve önerilerini uyguladılar. Diğer Amerikan kalite uzmanları da gelişmelerinde yardımcı olmak için Japonya'yı ziyaret ettiler. J. M. Juran istatistiksel süreç kontrolunu Japonlara öğreterek isim sahibi oldu⁹. Japon endüstrisi üretimde büyük bir gelişme sağladı. Bugün, Japonya kalitede takdir edilen bir dünya lideridir. Tüm dünyada Kaoru Ishikawa ve Genichi Taguchi gibi Japon kalite uzmanlarının çalışmaları okunmaktadır. 1950'li yıllarda Japon mühendis ve yöneticilerine Amerikan işletmelerinde Amerikan kalitesinin sırlarını öğrenebilmeleri için turlar düzenlenirdi. Şimdi, Amerikan ve Avrupa firmaları Japonya'ya turlar düzenlemektedir. Japonların kalitedeki bu büyük başarılarının bir nedeni de üretimin her basamağında en ufak ayrıntıda bile kalite geliştirmenin izlenmesidir. Amerikan ve diğer ülke işletmelerinin en büyük yanlış teknolojik üstünlüklerine güvenerek, sürekli gelişme fırsatını kaçırmalarıdır.

⁹ Lochner, a.g.e., s.6.

Bugün dünyada bir çok işletme ürün ve üretim süreci kalitesinde fark edilebilir seviyede gelişme sağlamıştır. Rekabetin çok çetin olduğu günümüzde kalite sürekli gelişmekte ve buna tüm işletmeler uymak zorundadır. Bugünün kalite gereksinimleri sadece kontrol ile karşılanamaz. İstatistiksel süreç kontrolü bile yeterli değildir. Kalite ürüne tasarım basamağında verilmelidir.

3. KALİTE GELİŞTİRMEYE GENEL BİR BAKIŞ

3.1. Kalite Geliştirme ve Verimlilik

Geleneksel olarak, üretimden sorumlu kişiler kendi işlerini verimliliği geliştirmeye yönelik görerek kalite olayını kalite kontrolden sorumlu kişilere bırakırlar. Bunun sonucunda, verimliliği geliştirmek teknolojik yenilik ile birleştirilir. Teknoloji, ürün ve hizmetlerin üretiminde kullanılan bir grup süreçler, yöntemler ve araçlardan oluşur. Teknoloji verimliliğin geliştirilmesinde gerçekten önemli bir rol oynar.

Teknolojik gelişmeler bir çok işletmeye rakipleri karşısında avantaj sağlamıştır. Teknolojik gelişmelerin ışığında kullanılan yeni makineler, araçlar ve yöntemler bu işletmelerin pazar payının artmasına, dolayısıyla karlarının artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte, teknolojik gelişmeler tüm verimlilik sorunlarını çözmeye yeterli değildir. Bazı üretim sorumluları hala kalite geliştirme verimliliği azaltacağına inanırlar. Bunun en büyük nedeni ise bu sorumluların maliyet ve çıktı miktarına göre değerlendirilmeleridir¹⁰. P. Crosby, bir ürünün kaliteli üretiminin işletme üretim

¹⁰ James R. Evans, *Applied Production and Operations Management*, (USA: West Pub. Co., 1993), s.55.

maliyetlerini arttırmadığını, çünkü satış sonrası hizmetler, hurda ürünler, tamir edilen ürünler ve müşteri memnuniyetinden sağlanan tasarrufun çok daha fazla olduğunu belirtir. Ayrıca, kullanıma uygunluk için ürüne yeni özellikler konulması tamirleri azaltır ve müşteriyi daha çok memnun eder¹¹.

Benzer şekilde, kalite konusunda uzman olan W. Edwards Deming kalitedeki gelişmenin boşa harcanan işçi zamanını ve makina zamanını iyi ürünler ve daha iyi hizmet üretilmesine dönüştüreceğini belirtmiştir¹². Değiştirilen ürünler, tamir edilen ürünler, yeniden test edilen ürünler fabrika kapasitesinin bir kısmının boşa kullanılmasına neden olmaktadır. Bunun en büyük nedeni ise kötü kalitedir.

Genelde, üretim süreci kalitesindeki gelişmeler, tamirleri ve diğer işlem kayıplarını azaltır, işgücü ve malzeme maliyetlerini azaltır, işlerin kontrolünü ve üretim akışını geliştirir, çalışanların moralini artırır ve yatırımların geri dönüşünü hızlandırır.

Verimlilik ve kalitedeki gelişmeler davranış değişikliklerine de neden olur. Müşteri memnuniyetine önem verilmesi, işyerinin temizliği, karar vermeye çalışanların dahil edilmesi, donanım ile çalışanlara sorumluluk verilmesi ve performans ölçümleri süreç geliştirmede çalışanların katılımını teşvik eder.

Verimlilik ölçümlerine dar açıdan bakılırsa kalite geliştirmenin verimlilik düzeyini düşürdüğü kanısına varılabilir. Verimlilik ölçümünde kullanılan ölçütler

¹¹ Philip B. Crosby, **Quality is Free**, (USA: McGraw-Hill, 1979), s.18.

¹² Edwards W. Deming, **Out of Crisis**, (Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineering Studies, 1986), s.26.

yöneticiler tarafından dikkatlice seçilmelidir. Verimlilik ölçümünde kalite, maliyet ve müşteri memnuniyeti ön plana çıkarılmalıdır.

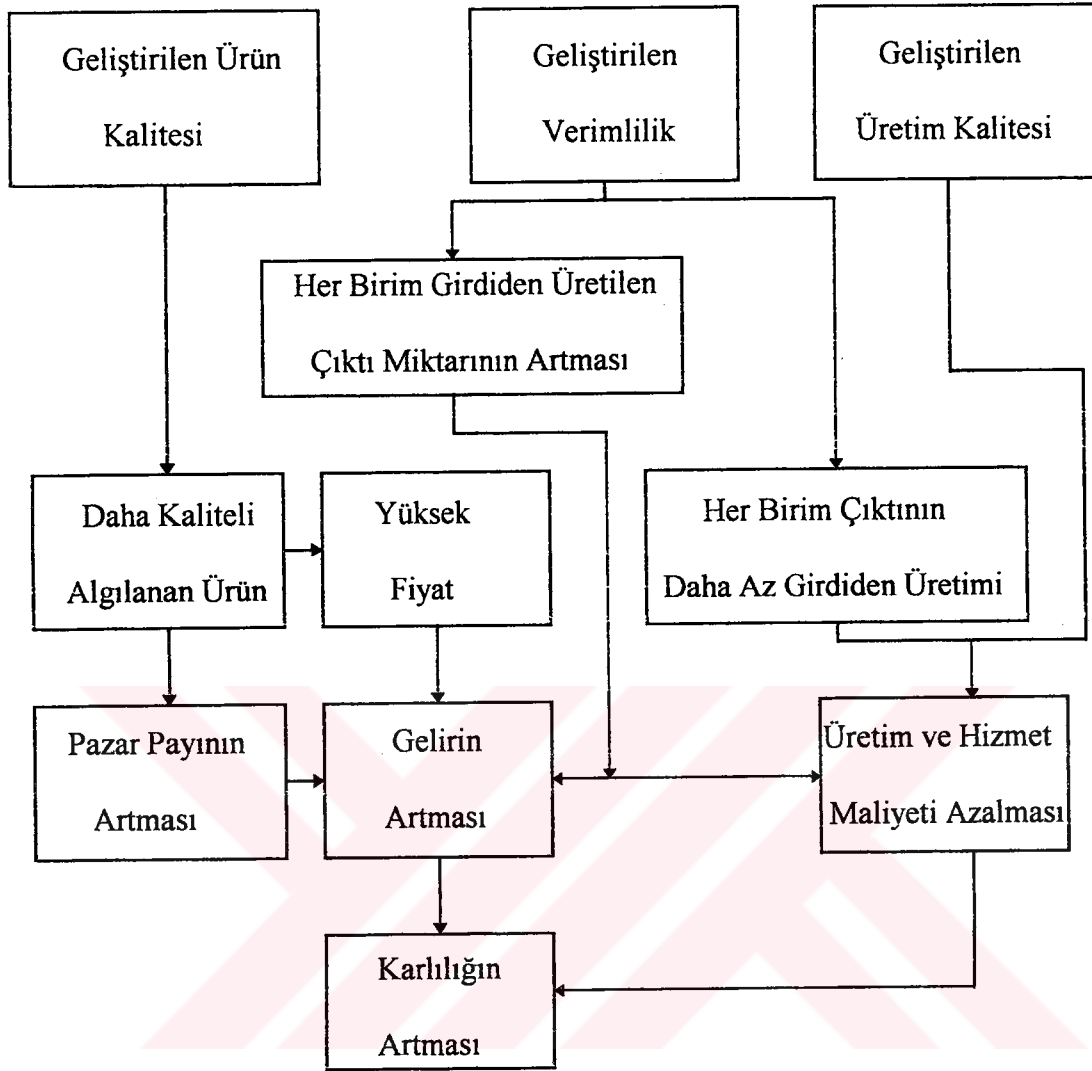
3.2. Verimlilik ve Kalite Geliştirmenin Ekonomik Etkileri

Kâr amacı güden bir işletmenin yatırımcıları ve hissedarları yönetimi işletmenin uzun dönem kârlılığına göre değerlendirir. Kâr amacı gütmeyen işletme yöneticilerinin performansı kârlılık ile değerlendirilmemesine rağmen, yöneticiler maliyetlerinin gelirler ile denge halinde olmasına dikkat ederler. Bu durum da hem kâr amacı güden hem de gütmeyen işletmelerin ekonomik performanslarını ön planda tutmaları gerektiğini gösterir.

Kârlılık gelir ve maliyetin fonksiyonudur. Gelir satış fiyatına ve satış hacmine dayanır; maliyet çıktının üretilmesinde kullanılan kaynakların ya da girdilerin değeridir. Üretimden sorumlu yönetici girdilerin çıktı haline dönüştürülmesinden sorumlu olduğu için yöneticinin verimlilik ve kalite kararları gelirleri, maliyeti ve kârlılığı doğrudan etkiler.

Girdilerin maliyetinde artış olduğu zaman işletme bu maliyet artışını dengelemek için satış fiyatını arttırarak gelirini arttırmak ister. Bununla birlikte, yoğun rekabetin olduğu bir ortamda fiyattaki artış satış miktarının azalmasına ve sonuçta gelirlerin artmamasına neden olur. Bu durumda, kârlılığın devamlılığını sağlamak için girdilerin her biriminden elde edilen çıktı miktarı arttırılmaya çalışılır. Böylece, verimlilik arttırılmış olur.

Şekil 3. Verimlilik ve Kalitenin Ekonomik Etkileri



Kaynak: James R. Evans, *Applied Production and Operations Management*, (USA: West Pub. Co., 1993), s.55.

Gelirleri ya da karlılığı arttırmanın başka bir yolu da, ürünlerin kalitesini geliştirerek daha yüksek fiyata satmak ya da pazar payını arttırmaktır. O halde, kârlılık hem verimlilik hem de kalitedeki değişikliklere duyarlıdır. Geliştirilmiş üretim kalitesi hurda sayısının ve tamir sayısının azalmasına, dolayısıyla üretim ve hizmet

maliyetlerinin azalmasına neden olur. Böylece, kârlılık artacaktır¹³. Bu durum Şekil 3'de gösterilmektedir.

İşletmelerin verimliliği ve rekabet gücünü arttırmak yöneticilerin en önemli sorumluluğudur. Bunun anlamı, kâr amacı güden işletmeler için kârlılığın artırılması ve kâr amacı gütmeyen firmalar için ise daha iyi hizmet ve müşteri memnuniyetinin sağlanmasıdır¹⁴. Verimlilik ve kalite üretimden sorumlu yöneticilerin günlük kararlarında akıllarından çıkarmamaları gereken en önemli konulardan biridir.

3.3. Kalite Geliştirmede Kullanılan İstatistiksel Yöntemler

Kalite geliştirmede en fazla kullanılan üç yöntem vardır. Bunlar sırasıyla **istatistiksel süreç kontrolü, deney tasarımı ve kabul örnekleme (acceptance sampling)**'dir¹⁵.

Bir ürünün müşteri isteklerini karşılaması isteniyorsa, bu ürün sürekli olarak değişmeyen sabit bir süreçle üretilmelidir. Başka bir deyişle, bu süreç ürün kalite karakteristik hedef değerlerinden çok az sapmayla işlemini yapma yeteneğine sahip olmalıdır. İstatistiksel süreç kontrolü süreç sabitliğinin sağlanmasında ve değişkenliğin azaltılmasına yönelik yeteneğin artırılmasında kullanılan bir grup etkili sorun çözme aracıdır.

¹³ Evans, J.R., 1993, a.g.e., s. 59.

¹⁴ Y. K. Shetty, V. M. Buehler, *Productivity and Quality Through Science and Technology*, (New York: Quorum Books, 1988), s.68.

¹⁵ Douglas C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, (Third Edition. USA: John Wiley and Sons, Inc., 1996), s.12.

İstatistiksel süreç kontrol araçları arasında histogram, pareto şeması, neden sonuç şeması ve kontrol şeması sayılabilir. Kullanımı en fazla olanı kontrol şemasıdır. Kontrol şemasında süreçten alınan her bir örneklemin belirli bir kalite karakteristiğine göre ortalaması çizilir. Bu grafiğe göre merkez çizgisi ile alt ve üst kontrol sınırları belirlenir. Merkez çizgi, olağandışı değişkenlik kaynağı olmadığı zaman süreç karakteristiğinin bulunması gereken çizgiyi gösterir. Genel olarak, kontrol şeması sistemin çıktı değişkenlerine uygulanır. Kontrol şeması süreç izleme tekniğinde çok faydalıdır. Olağandışı değişkenlik kaynağı bulunduğunda, örneklem ortalaması kontrol sınırlarının dışına çıkar. Bu durumda süreç kontrol altında değildir ve üretim süreci üzerinde araştırma yapılarak olağandışı değişkenlik kaynağı ortadan kaldırılarak gerekli düzeltmelerin yapılması zorunludur. Üretim sürecinin kendisinin şans eseri neden olduğu değişkenliklerde çalışması durumunda ise bu üretim süreci için kontrol altında denilebilir. Fakat noktaların dağılımına dikkat edilmelidir. Kontrol şemasının sistematik kullanımı değişkenliğin azaltılmasında yararlı bir yoldur¹⁶.

Deney tasarımı, üretim süreciyle ilgili kalite karakteristiklerini etkileyen önemli faktörlerin belirlenmesinde çok yardımcı olur. Tasarlanmış bir deney, girdi faktörlerinin sistematik olarak değiştirilerek çıktı üzerine etkisinin belirlenmesi yaklaşımıdır. Yapılan bir deneyin amaçları arasında şunlar sayılabilir¹⁷:

1. Ürün performansı üzerinde en çok etkisi olan faktörlerin belirlenmesi.
2. Ürün performansının istenilen hedef değere yakın olmasını sağlamak için etkili faktörlerin değerlerinin belirlenmesi.

¹⁶ Eugene L. Grant ve Richard S. Leavenworth, **Statistical Quality Control**, (Seventh Edition. USA: McGraw-Hill Co. Inc., 1996), s.38.

¹⁷ Montgomery, **a.g.e.**, s.478.

3. Ürün performansındaki değişkenliği en aza indiren etkili faktör değerlerinin belirlenmesi.
4. Kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini en aza indiren etkili faktör değerlerinin belirlenmesi.

Deney tasarımı üretim süreci performansını arttırmak ya da dış kaynaklı değişkenlere karşı duyarsız bir üretim süreci elde etmek için yeni bir üretim süreci geliştirmede ya da üretim sürecine sorunlarına çözüm bulmakta kullanılabilir¹⁸.

İstatistiksel süreç kontrolü ve deney tasarımı üretim süreçlerinin geliştirilmesinde ve en iyilenmesinde en kuvvetli iki silah, birbiri ile ilişki içindedir. Bir üretim süreci kontrol altında olmasına rağmen yeterli kapasitede değil ise değişkenliğin azaltılması zorunludur. Tasarlanmış deneyler bunu istatistiksel süreç kontrolüne göre daha etkili yaparlar. İstatistiksel süreç kontrolünde üretim sürecinde değişiklik istendiğine dair bilgi gelinceye kadar süreç sadece izlenerek beklenir. Oysa ki, deney tasarımı aktif bir istatistiksel yöntemdir: üretim süreci ile ilgili girdilerde değişiklikler yapılarak deneyler yapılmakta ve çıktı sonuçları izlenmektedir. Bu sonuçlara göre üretim sürecinin geliştirilmesi ile ilgili bilgiler elde edilmektedir.

Deney tasarımı üretim sürecinin geliştirilmesinde önemli bir mühendislik aracıdır. Ayrıca, yeni üretim süreçlerinin geliştirilmesinde de geniş bir kullanım alanı vardır. Üretim süreci geliştirme devresinde bu tekniğin kullanımı şu avantajları sağlar:

1. Geliştirilmiş çıktı sonucu,

¹⁸ Richard E. Devor, Tsong H. Chang ve John W. Sutherland, **Statistical Quality Design and Control: Contemporary Concepts and Methods**, (USA: Macmillan Pub. Co., 1992), s.16.

2. Azaltılmış değişkenlik ve hedef değerlere yaklaşmış uygunluk,
3. Azaltılmış geliştirme zamanı,
4. Azaltılmış toplam maliyet.

Yukarıda belirtildiği gibi deney tasarımı üretimin erken safhalarında ve geliştirme faaliyetlerinde kullanıldığı için üretim öncesi kalite kontrol aracıdır.

Kalite geliştirmede kullanılan araçların üçüncüsü kabul örneklemesidir. Bu kalite kontrol tekniği ürünlerin kontrolü ve test edilmesi ile ilgilidir. Bu tekniğin temeli kalite geliştirmek için istatistiksel yöntem geliştirilmesinden çok daha eskiye dayanır. Bir süreçte kontrol bir çok noktada yapılabilir. Bir yığın üründen rastgele bir örneklem kütlesinin seçilerek kontrol edilmesi ve sınıflandırılması olan örneklem kabulünde en önemli karar ürünlerin kabulü ya da reddidir¹⁹. Kontrol genel olarak iki noktada yapılmaktadır: gelen hammaddenin ya da parçanın olduğu yerde ve ürünün tamamlandığı yerde.

Modern kalite güvenlik sistemleri bu tekniğe az yer vermekte ve bunun yerine istatistiksel süreç kontrolünü ve deney tasarımı kullanmayı tercih etmektedir. Bu teknik spesifikasyonlara uygunluk kalite görünümünü zorlar ve üretim sürecine ve mühendislik sürecine ya da geliştirilmesine geri beslemede bulunarak dolaylı olarak kalite geliştirilmesine yol açar.

¹⁹ T. C. E. Cheng, "Quality Control: Changing with the Times," *International Journal of Quality and Reliability Management*, V.7, No.6: 36-46, 1990, s.40.

3.4. Kalite Geliştirmede Tasarım Kalitesinin Önemi

Her mühendislik ürünü bir gereksinimin karşılanmasına yönelik olduğundan, beklentiler potansiyel müşterilerin isteklerini yansıtır. Bu isteklerin türlerinin, sayılarının ve asgari yerine getirilme düzeylerinin, ürünün kalite derecesinin oluşmasında çok önemli yerleri vardır. Bu isteklere nitelik ve nicelik kazandırılmasıyla, amaçlanan tasarım kalitesi tanımlanmış olur. Örneğin, pahalı bir otomobilin bir aile otomobilinden daha kaliteli sayılması, ilkinin bir otomobilde olması beklenen işlevleri daha üst düzeyde yerine getirmesi ya da daha çok sayıda işleve sahip olmasıdır; daha yüksek ivme, daha özenli iç döşeme, klima, ABS fren sistemi gibi. Bir ürün ya da hizmetin istenen özelliklere sahip olması tasarım kalitesi ile ilgilidir²⁰. Çünkü hiç bir üretim, bir tasarımda var olmayan kalite elemanlarını sağlayamaz. Bugün çok iyi bilinen ve kabul edilen bir gerçek, bir ürünün ya da hizmetin kalitesinin ve maliyetinin büyük çapta tasarım aşamasında oluştuğudur; çünkü olmayan bir kalite üretilemez.

Elde edilebilecek tasarım kalitesinin derecesi, tasarımcıların kişisel bilgi, beceri ve deneyimleri ile de büyük ölçüde bağımlıdır. Tasarımın kaliteli olması, ürünün kalitesi için kesinlikle gerekli fakat tek başına yeterli değildir. Çünkü tasarlanan kalite düzeyini üretimde tutturmak ayrı, bu kalite düzeyini tüm ürünlerde sürdürmek ise ayrı bir sorundur. Hiç bir tasarım matematiksel kesinlikle üretilmeyeceğinden, beklentilerin gerçekleştirilebilme derecesi, kaçınılmaz biçimde, tasarım aşamasındaki varsayımlardan farklıdır. Aradaki farklılık uyum kalitesi deyiimi ile tanımlanır. Uyum

²⁰ İbrahim Kavrakoğlu, **Kalite: Kalite Güvencesi ve ISO 9000**, (İkinci Basım. İstanbul: KalDer Yayınları, 1996), s.11.

kalitesi, bir diğer anlatımla, tasarımdaki kalite hedeflerine üretimde ne ölçüde yaklaşıldığının ölçüsüdür.

Bir ürünü kaliteli tasarlayabilmek, bu kaliteyi üretim sırasında tutturmak ve sürdürmek ve kullanım sırasında korunmasını sağlamak, farklı görünen, fakat aynı amaca yönelik konulardır. Kalitede güvenilirlik, varsayımların isabet derecesi olarak da algılanabilir. Varsayımın isabet derecesinin azaldığı ölçüde güvenilirlik azalır. Varsayımların isabet derecesinin düşmesi tasarımı etkileyen faktörlerin değişken olmasından kaynaklandığı gibi, çözüm yolu getirebilmekteki bilgi, deneyim ve olanaklarla da bağımlıdır. Dolayısıyla, bir tasarım üretim aşamasına geçilebilecek kadar somutlaştığında, tasarımın beklentileri yerine getirebilme düzeyi tasarlanan kalitenin altındadır. Aynı anlayışla, pazara verilen ürünün kalitesi de, tasarım aşamasındakinden daha düşüktür. Ürünün yaşam süreci düşünüldüğünde, kullanıma ilişkin nedenlerle ortaya çıkan değişkenler de bir kısım belirsizliklere, dolayısıyla kalitenin derecesinde bir kısım azalmaya neden olacaktır. Tasarımın kalitesi güvencenin en başta gelen etmenidir. Tasarım yetersizliğinden kaynaklanan yetmezliklerin en riskli ve olumsuz yönü, özellikle seri üretim durumunda, bunların tekrarından doğan halkanın, yanlış fark edilinceye kadar, giderek genişlemesidir. Ürünün müşteriye ulaşmasından sonra, bunun bir işletme için çok büyük zararlara yol açabileceğinin bir çok örneği vardır.

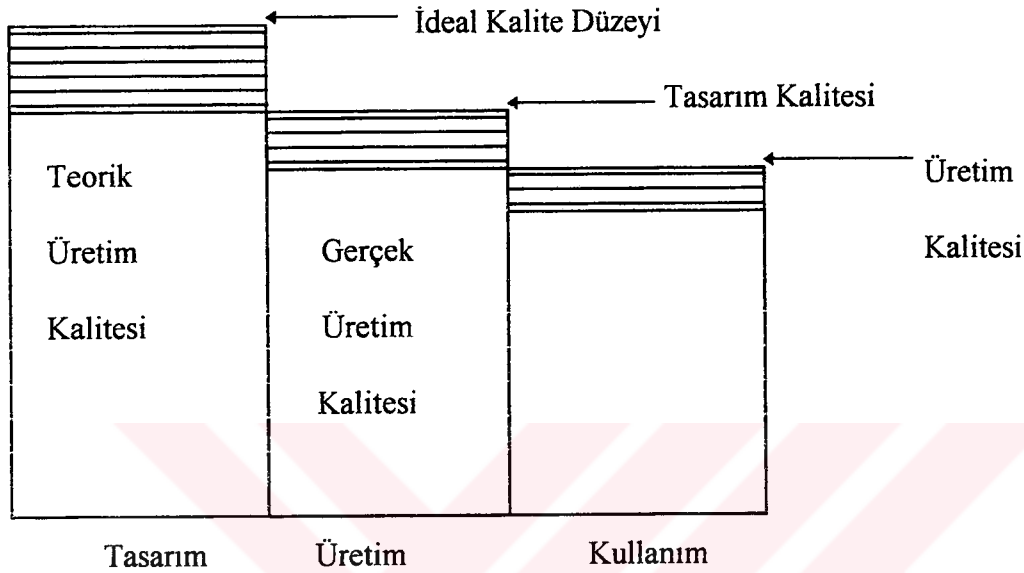
Özetle, yüksek tasarım kalitesi, pazara sürülen bir ürünün yüksek kalitede olması için gerekli fakat kendi başına yeterli olmayan bir koşuldur²¹. Aynı anlayışla, uyum kalitesinin yüksek olması da, kendi başına, bir ürüne tasarım kalitesinde olmayan

²¹ Alp Esin, Macit Karabay ve Yüksel Kılıçaslan, *Kalite Sistemine Hazırlık ve TS-ISO 9000*, (Ankara: KOSGEB, 1993), s.4.

derecede kalite kazandıramaz. Tasarımda kalitenin oluşması Şekil 4'te gösterilmektedir.

Taralı bölümler, beklentilerden kısa düşmeyi göstermektedir.

Şekil 4. Kalitenin Oluşması



Kaynak: Alp Esin, Macit Karabay ve Yüksel Kılıçaslan, **Kalite Sistemine Hazırlık ve TS-ISO 9000**, (Ankara: KOSGEB, 1993), s.4.

3.5. Kalite Geliştirmede Ürün ve Üretim Süreci Tasarımının Önemi

Üretimi tamamlanmış bir ürünün kalite ve maliyeti büyük ölçüde ürünün teknik tasarımı ve üretim süreci tarafından belirlenir. Bir ürünü geliştirme birbirini izleyen üç aşamaya ayrılabilir: **ürün tasarımı, üretim süreci tasarımı, üretim**. Her bir ürün geliştirme aşamasının birçok basamağı vardır. Bir basamağın çıktısı onu izleyen basamağın girdisidir. Bu nedenle, bütün basamaklar, özellikle transfer noktaları, son

kalite ve maliyeti etkiler. Bununla birlikte, modern ürünlerdeki karmaşıklık nedeni ile ürün ve süreç kontrolleri önemli bir rol üstlenir. Otomobil, endüstri robotları ve optik aletler gibi yüksek teknoloji gerektiren ürünlerde hakimiyeti olan işletmelerin esas gücünün temelinde ürünlerin ve üretim süreçlerin teknik tasarımındaki başarıları bulunmaktadır.

Tablo 1. Ürün Geliştirme Aşamasında Değişkenlik Kaynaklarına Karşı Önlemler

Ürün Geliştirme Aşamaları	Değişkenlik Kaynakları		
	Çevre Değişkenleri	Ürün Bozulması	Üretim Değişkenleri
Ürün Tasarımı	O	O	O
Üretim Süreci Tasarımı	X	X	O
Üretim	X	X	O

O: Önlem olası

X: Önlem olası değil

Kaynak: Raghu N. Kacker, "Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary," *Quality Progress*, V.19, No.12: 21-29, (Dec. 1986), s.24.

Ürün tasarımının önemi üretilen ürünlerin çok büyük şikayetlere ve başarısızlıklara neden olması sonucunda artmıştır. İşletmelerin şikayetlere neden olan ürünleri aynı zamanda işletmeleri büyük zarara uğratmıştır. Bunun sonucunda işletmeler ürün tasarımında daha titiz hareket etmeye başlamıştır. Genellikle, bir ürünün performansı çevresel değişkenlerden, ürün bozulmasından ve üretim hatalarından etkilenir. Bu değişkenlik kaynakları kronik sorunlardır. Üretim hataları üretilen ürünün

parametre değerin nominal değerinden sapmasıdır. Üretim hataları üretim sürecindeki kaçınılmaz belirsizliklerden meydana gelir ve bir ürünün birimleri arasındaki performans değişkenliğinden sorumludur. Tablo 1'de görüldüğü gibi, çevre değişkenlerinin, üretim değişkenlerinin ve ürün bozulmasının neden olduğu performans değişkenliğine karşı önlem ancak bu ürünün tasarım aşamasında yapılabilir²².

Tablo 1'e göre, ürün tasarımı aşamasında çevre değişkenlerine, ürün bozulmasına ve üretim değişkenlerine karşı ürünü korumak için önlem almak olasıdır. Ancak, üretim süreci tasarımı ve üretim aşamalarında sadece üretim değişkenlerine karşı ürünü korumak için önlem alınabilmektedir. Ürün tasarımının önemini göstermesi açısından Tablo 1 önemlidir. Ayrıca, bu tablo üründe kaliteyi sağlamanın yolunun ilk önce ürün tasarımından geçtiğini göstermektedir.

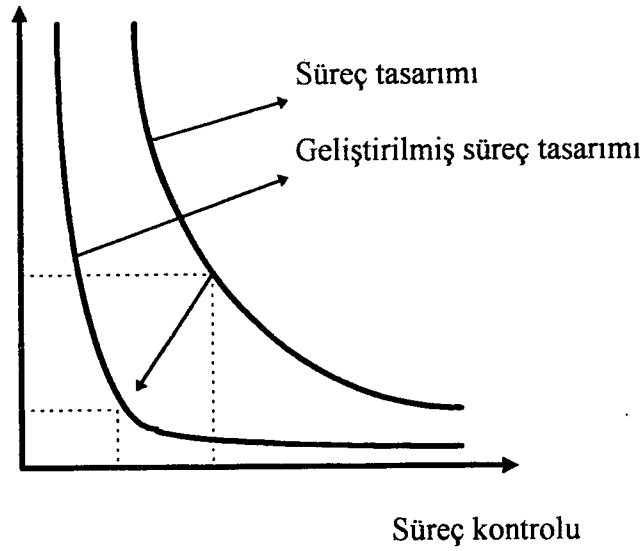
Bir ürünün üretim maliyeti ve üretim hataları genellikle üretim sürecinin tasarımıyla belirlenir. Süreç tasarımına göre arttırılan süreç kontrolü üretim hatalarını azaltabilir, fakat aynı zamanda süreç kontrolü maliyetleri de arttırır. (Bu durumda süreç kontrolünün maliyeti üretim hatalarının neden olduğu kayıptan az olduğu sürece devam edilir). Bu nedenle, hem üretim hataları hem de süreç kontrolüne olan gereksinim azaltılmalıdır. Bunu başarmanın tek yolu maliyet eğrisini aşağıya çekmek için süreç tasarımının geliştirilmesidir²³. Bu durum Şekil 5'de gösterilmektedir.

²² Raghu N. Kacker, "Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary", *Quality Progress*, V.19, No.12: 21-29, (Dec. 1986), s.24.

²³ Kacker, a.g.m., s.25.

Şekil 5. Geliştirilmiş Süreç Tasarımı

Üretim Hataları



Kaynak: Raghu N. Kacker, "Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary," **Quality Progress**, V.19, No.12: 21-29, (Dec. 1986), s.24.

Bir üretim sürecini istatistiksel olarak kontrol altına almak varolan bir üretim süreci tasarımının geliştirilmesinde ilk basamaktır. Üretim süreci tasarımının geliştirilmesinde yer alan kronik problemlerin neden olduğu değişkenliğin azaltılması zor bir olaydır. Sürecin kontrol altında olmaması durumunda ise olanaksızdır. Bu nedenle, üretim sürecinin dengede olması gereklidir.

4. TAGUCHİ BAKIŞ AÇISINDAN KALİTE MÜHENDİSLİĞİ

Taguchi felsefesini yeni öğrenenlerdeki yanlış, bu yöntemin sadece deney tasarımı ile ilgilendiğinin düşünülmesidir. Gerçekte, Taguchi ideolojisi kaliteye çok

daha geniş açıdan bakarak, kalite teknik ve araçları ile ilişki içindedir. Taguchi'nin tüm kalite felsefesini içine alan şemsiyesine **kalite mühendisliği** denir.

Kalite mühendisliğinin çatısı hem tasarım mühendisliği hem de üretim ile karşılıklı ilişkidir. Kalite mühendisliği, ürün araştırma ve geliştirme, üretim süreci tasarımı, üretim ve müşteri memnuniyeti aşamalarının her birinden oluşan kalite kontrol faaliyetlerini içerir. Bu faaliyetlerin her birinin görevleri arasında sürekli geliştirmeyi desteklemek, sorunları hızlı kavramak, sorunlara hızlı çözüm bulmak ve kaliteyi sabit tutarken maliyetlerde düşüş sağlamak sayılabilir.

Bu amaçları desteklemek için Taguchi, kalite mühendisliğini Şekil 6'da görüldüğü gibi iki sınıfa ayırmıştır²⁴:

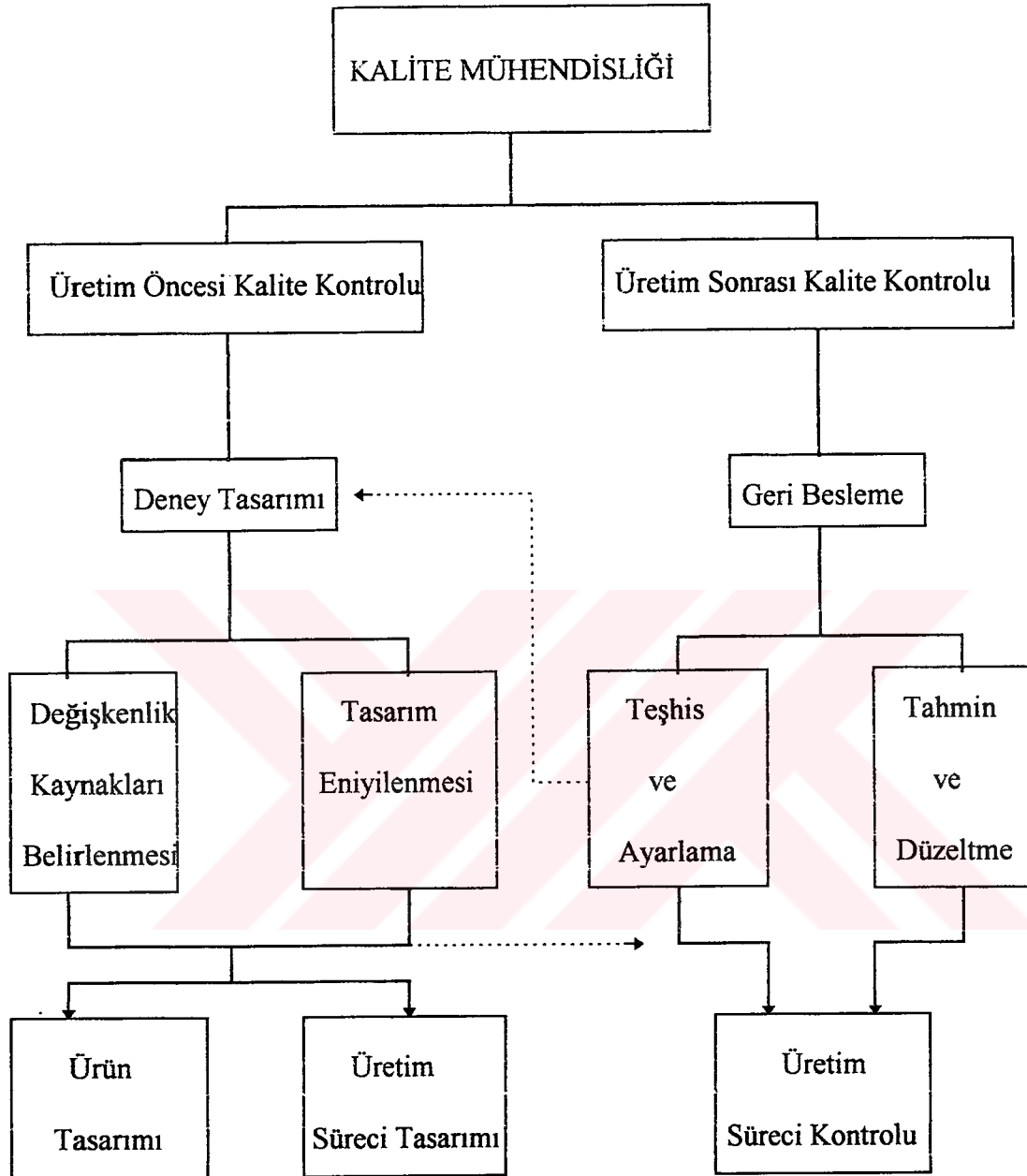
1. Üretim sonrası kalite kontrolü
2. Üretim öncesi kalite kontrolü.

4.1. Üretim Sonrası Kalite Kontrolü

Üretim sonrası kalite kontrolü, ürün tasarımı aşamasında oluşturulan ürün spesifikasyonlarında üretimin yapılması ile ilgilendir. Ayrıca, müşterilerden gelen istekler geliştirme için fırsat yaratırsa ürün ve üretim süreci tasarımları gözden geçirilebilir. Üretim sonrası kalite kontrol çalışmaları ürünlerin gerçek üretimini içerir.

²⁴ Glen S. Peace, *Taguchi Methods: A Hands-on Approach to Quality Engineering*, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1993), s.6.

Şekil 6. Taguchi Kalite Mühendisliği



Kaynak: Glen S. Peace, **Taguchi Methods: A Hands-on Approach to Quality Engineering**, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1993), s.6.

Bu aşamada kullanılan tekniklerden bazıları üretimin izlenmesi, üretim kalitesinin ölçülmesi, potansiyel sorunların belirlenmesi ve doğrudan düzeltmenin yapılmasıdır. Bilgi geri besleme sistemi, işçileri ve üretimden sorumlu yöneticilerin üretim süreci performansı hakkında bilgi sahibi olmasını sağlar.

Taguchi'ye göre üretim sonrası kalite kontrolü iki aşamadan oluşmaktadır:

1. Üretim kalite kontrol yöntemleri
2. Müşteri ilişkileri.

Üretim sonrası kalite kontrol yöntemlerinin iki şekli vardır: teşhis ve ayarlama, tahmin ve düzeltme. Ham verinin kaydedilmesi önemli olmasına rağmen, daha fazlasına gereksinim vardır. Bu durumda teşhis ve ayarlama önem kazanmaktadır. Üretim süreç değerlerinin uygun olduğunun belirlenmesi için gelen bilgi analiz edilmelidir. Bunun anlamı, üretim verilerinin belirlenen hedef değerlerle karşılaştırılmasıdır. Analiz sonucunda koşullar kabul edilebilir değil ise, süreci kabul edilebilir bir aralığa getirmek için ayarlama yapılmalıdır. Tahmin ve düzeltme işlevleri teşhis girdilerini ve ayarlamaları destekler ve etkiler. Eldeki verilere ve daha önceki çalışmalara göre, tahmin edilen hedefler şu anki üretim süreci durumunun kabul edilebilir bir aralıkta mı olduğunu, yoksa ayarlama yapılması gereklidir sorusuna referans olurlar. Ayrıca, ayarlamaların miktarı düzeltme yapmak için belirlenebilir.

Önleyici bakım, hassas aletlerin kalibrasyonu ve ekonomik kontrol yöntemleri de üretim sonrası kalite kontrolünün içinde yer almaktadır. Bu işlevlerin her biri maliyet azaltıcı süreç kontrolüne yardımcı olmaktadır.

Müşteri ilişkileri aşamasında müşteri hizmeti, bozuk ürünlerin değiştirilmesini, tamir edilmesini ya da para iadesini içerebilir. Şikayeti ele alma yöntemi müşteri ile ilişkide çok önemlidir. Müşterilerin şikayetleri, bozuk ürünler, müşterinin ürünü algılaması gibi bilgiler düzeltme yapmak için örgütteki ilgili bölümlere ulaştırılmalıdır.

4.2. Üretim Öncesi Kalite Kontrolü

Üretim öncesi kalite kontrol yöntemleri, ürün geliştirme döneminde ürün ve üretim süreci tasarım aşamasında uygulanan kalite ve maliyet kontrol faaliyetleridir. Üretim öncesi kalite kontrol faaliyetlerinin amacı üretimi yapılabilen ve güvenilir ürün geliştirirken aynı zamanda, ürün geliştirme ve yaşam boyu maliyetlerini azaltmaktır. Endüstrinin iyi geliştirilmiş ve üzerinde araştırma yapılmış üretim öncesi kalite kontrol yöntemlerine gereksinimi vardır. Başka bir deyişle, endüstrinin performans değişkenliğini ve üretim maliyetlerini azaltmak için ürün ve üretim süreci tasarım spesifikasyonlarını tanımlayan bilimsel yöntemlere gereksinimi vardır²⁵.

Deney tasarımı üretim öncesi kalite kontrolünün temel aracıdır. Deney teknikleri iki önemli rol oynarlar;

1. değişkenlik kaynaklarını tanımlaması,
2. tasarım ve süreç eniyilemeyi belirlemesi.

²⁵ "Khosrow Dehnad, *Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method*, (USA:Wadsworth and Brooks/Cole Adv. Books, 1989), s.51" Raghu N. Kacker, "Off-line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method," *Journal of Quality Technology*, (17 Oct., 1985), s.179'daki alıntı.

Değişkenliği etkileyen temel faktörlerin belirlenmesi, işlevsel değişkenliği etkileyen en önemli faktörler üzerinde çalışmanın yoğunlaşmasına ve ürünün kalitesi üzerinde az etkisi olan ürünlerden uzaklaşılmasına neden olur. Bu kritik faktörlerin en iyi düzeylerinin belirlenmesi üretim sonrası kalite kontrol faaliyetleri için hedef değerleri belirler ve üretimde meydana gelen sorunlara çözüm bulur.

Üretim öncesi kalite kontrolü genel olarak şu faaliyetleri kapsamaktadır:

1. Müşteri gereksinim ve beklentilerinin doğru olarak belirlenmesi,
2. Müşteri beklentilerine cevap verebilen ürün tasarlanması,
3. Ekonomik ve devamlı üretilen ürün tasarlanması,
4. Üretim için belirgin ve yeterli spesifikasyonların, standartların, yöntemlerin ve araçların geliştirilmesi.

Üretim öncesi kalite kontrolü iki aşamadan oluşur: ürün tasarımı aşaması ve üretim süreci tasarımı aşaması. Ürün tasarımı aşamasında yeni bir ürün geliştirilir ya da varolan bir ürün yenilenir. Üretim süreci tasarımı aşamasında ise ürün tasarımı aşamasında tasarlanan ürünü üretebilen üretim süreci geliştirilir. 1, 2 ve 3 numaralı faaliyetler ürün tasarımının bir parçası olurken, 4 numaralı faaliyet üretim süreci tasarımı aşamasında yer almaktadır²⁶.

Taguchi üretim öncesi kalite kontrolün her aşamasında kaliteyi güvence altına almak için üç basamaklı bir yaklaşım geliştirmiştir:

²⁶ Lochner, Matar, a.g.e., s.15.

1. Sistem tasarımı

2. Parametre tasarımı

3. Tolerans tasarımı.

Bu basamaklar hakkında ayrıntılı bilgi ikinci bölümde sunulmaktadır.



İKİNCİ BÖLÜM

ÜRETİM ÖNCESİ KALİTE KONTROLUNDA TAGUCHİ YÖNTEMİ

1.TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KALİTE FELSEFESİ VE GETİRDİĞİ YENİLİKLER

1.1. Taguchi Yönteminin Kısa Tarihi

1949 yılında Japon Nippon Telefon ve Telgraf şirketinin iletişim laboratuvarı ulusal iletişim sistemini geliştirmek için bir projeyi üstlendi. Mühendislik becerilerini ve gelişen yöntemleri deney tasarımıyla en verimli şekilde uygulaması nedeni ile Taguchi'ye bu laboratuvarın Araştırma ve Geliştirme bölümünde verimlilik konusunda sorumluluk verilmiştir. Böylece, Taguchi kalite mühendisliğinin temelleri burada atılmıştır. Süreç gelişiminin gerçekleştiği yaklaşık 45 yıllık zaman diliminde de

Taguchi yöntemi tüm dünya endüstri topluluklarından ve akademik topluluklardan büyük övgü almış ve saygı görmüştür.

Endüstriye katkılarından dolayı Taguchi dört defa Deming ödülünü almıştır. Japon imparatoru, Japon endüstrisinin verimliliğine sağladığı katkılardan dolayı Taguchi'yi ödüllendirmiştir.

Bir çok endüstri lideri, mühendislik tarihçisi ve kalite uzmanları, yirminci yüzyılın son çeyreğinde, Taguchi'yi, mühendislik konularına ve ürün kalite geliştirme süreçlerine en fazla katkıda bulunan kişilerinden biri olarak görmektedir.

Taguchi 1980 yılında, savaştan sonra Amerikanın Japonya'nın yeniden inşasına katkılarına karşılık jest olarak, Amerikan iletişim endüstrisinde kendi yöntemlerini uygulamak amacıyla New Jersey'de AT&T Bell laboratuvarlarına gelmiştir. Daha sonra, Ford Motor Co. ve Xerox Co. gibi şirketlerde Taguchi yöntemleri adapte edilmeye çalışılmıştır¹.

Taguchi bu konulardaki birkaç önemli kişiyi derinden etkileyerek kalite mühendisliği yöntemlerinin daha da ileriye gitmesine neden olmuştur. Taguchi yöntemlerinden etkilenen kişiler arasında Dr. Madhav Phadke, Dr. Don Clausing ve Bernard M. Gordon gibi büyük şirketlerde yöneticilik yapmış ya da Taguchi yöntemi ile ilgili kitap yazmış kişiler vardır.

¹ William Y. Fowlkes, Clyde M. Creveling, **Engineering Methods for Robust Product Design**, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1995), s.14.

Taguchi, Ford Motor Co. ile ilişkisi aracılığı ile Larry Sullivan ile tanışmış ve beraber American Supplier Institute(ASI) adlı kâr amacı olmayan, sadece Amerikan şirketlerine kalite mühendisliği yöntemlerinin uygulanmasında yardımcı olmayı amaçlayan örgütü kurmuşlardır. Bu örgütün başkan yardımcısı Taguchi'nin oğlu Shin Taguchi tüm dünyada bu yöntemlerin öğretilmesinde ve uygulanmasında danışmanlık yapmaktadır.

Taguchi hala ASI'nin başkanlığında, endüstride danışmanlık yapmakta, derslere konuk hoca olarak katılmakta ve makale ve kitap yazarak kalite mühendisliğini daha da ileriye götürmeye çalışmaktadır. Taguchi'nin makale ve kitapları bir çok üniversite ve işletmelerde bu konu ile ilgilenenlere kılavuzluk yapmaktadır. Ayrıca, bu konu ile ilgilenen uzmanlarla birlikte kitap ve makaleler de çıkarmaktadır.

1.2. Taguchi Yönteminin Kalite Felsefesi

İşletmeler genel olarak, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin içine kalite kontrolünü dahil etmeme eğilimindedir. Bunun en büyük nedeni kalite kontrol denilince akla hemen kontrol tablolarının ve süreç kontrolünün gelmesidir. Oysa Japonlar, Genichi Taguchi'nin katkılarıyla, kalite yöntemlerini süreç tasarımının içinde kullanmaktadırlar. Taguchi, kalite kontrolünün sadece üretim esnasında değil, aynı zamanda üretim öncesinde de önemini vurgulayarak, deney tasarımı ve analiz tekniklerini daha da geliştirmiştir. Taguchi'nin tam ve bütünlük sistemi, ürün ya da üretim süreci spesifikasyonlarını belirlemekte, bu spesifikasyonlara göre tasarım

geliştirmekte ve ürünün ya da üretim sürecinin bu spesifikasyonlara göre üretilmesinde yardımcı olmaktadır².

Üretim öncesi kalite kontrol disiplini, ürün ya da üretim süreci geliştirme işini yapan elemanın kaliteyi ön planda tutmasını sağlarken, aynı zamanda kaliteli bir ürün ya da üretim sürecinin olası en düşük maliyetle üretilmesine de yardımcı olur. Bu disiplin kayıp fonksiyonunun anlaşılmasına dayanırken, üç bölümden meydana gelir: sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı. Bu bölümlerin her biri mühendisliğin temelindeki bilgi birikimine gereksinim duyar ve deney tasarımı yöntemleri kullanarak kararları kesinleştirirken, kaynakların en az kullanımıyla en iyi çözüme ulaşır.

Kalitenin üründe meydana gelen değişimlerle bozulduğu ve bu değişimlerden müşterinin olumsuz etkilendiği bilinen bir gerçek iken, Taguchi yaklaşımının bunu engellemeye yönelik yaklaşımı, onu diğer kalite kontrol yöntemlerinden farklı yapmaktadır. Taguchi yöntemi tüm mühendislik ve üretim sürecini içine alacak şekilde çalışır.

Taguchi yönteminin uygulanması sonucunda üretimde ve sonrasında kalite kontrol fonksiyonları azalır. Bu azalmanın sağladığı tasarruf, Taguchi felsefesini öğrenmek için gösterilen çabanın en geçerli nedenlerinden biridir³.

² Thomas B. Barker, "Quality Engineering By Design: Taguchi's Philosophy," **Quality Progress**, V.19, No.12: 32-42, (Dec.1986), s.32.

³ Robert H. Lochner ve Joseph E. Matar, **Designing for Quality: An Introduction to the Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Experimental Design**, (USA, Chapman and Hall, 1990), s.20.

Genichi Taguchi kalite geliştirilmesi konusundaki katkılarından dolayı dünya kalite sahnesinde önemli bir yer almakta ve onun kalite mühendislik sistemi Japonya ve pek çok ülkede başarıyla uygulanmaktadır. Taguchi üretim sonrası geleneksel kalite kontrol araçlarından daha çok ürün ve üretim süreci tasarım kalitesine önem vermiştir. Taguchi yaklaşımını diğer lider kalite uzmanlarının yaklaşımlarından ayıran en önemli özelliklerden birisi Taguchi'nin kalitenin yönetim felsefesi ya da istatistiğinden daha çok teknik tarafla ilgilenmesidir. Ayrıca, Taguchi deney tasarımını, ürünleri gürültü faktörlerine karşı daha az duyarlı yapmak için temel bir araç olarak kullanmaktadır. Başka bir deyişle, Taguchi deney tasarımını, ürün ve üretim süreci kalite özelliklerindeki değişkenliğin etkilerini azaltmak için bir araç olarak görmektedir. Deney tasarımının ilk uygulamaları değişkenliğin etkilerini gözardı ederek, ortalama ürün performans özelliklerini en iyilemeye çaba göstermiştir.

Taguchi yöntemi kalite felsefesini aşağıdaki 7 temel maddede özetlenebilir⁴.

1. Üretilen ürünün kalitesinin önemli bir ölçüsü bu ürünün toplumda meydana getirdiği kayıptır. Müşteri toleransının en alt limitinde ürün üreten bir çok firmanın olduğu bir ortamda, ürün kalitesinin ölçüsü olarak toplumda meydana getirdiği kaybın alınması çok ilginçtir. Müşteri toleransının en alt limitinde üretilen bir ürünün özellikleri her an değişkenlik gösterebilmekte ve bu da müşteride tatminsizlik yaratmaktadır. Bunun sonucu da toplum için bir kayıptır. Burada söz edilen toplumsal kayıp; ürünün kullanım amacına , dolayısı ile tüketici gereksinmelerine uygunsuzluğu, kendisinden beklenen performans düzeyine ulaşmaması ve kullanımı sırasında ortaya çıkan zararlı yan etkilerden kaynaklanmaktadır. İşte zayıf performansın neden olduğu

⁴ Raghu N. Kacker, "Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary," **Quality Progress**, V.19, No.12: 21-29, (Dec. 1986), s.24.

tüm bu kayıplar söz konusu ürünün kalite düzeyini belirlemektedir. Tüm bunların engellenebilmesi için ürün tasarımından itibaren değişkenliklere karşı duyarsız ürün üretilmelidir.

2. Rekabetçi ekonomide, firmaların iş hayatında kalabilmesi için kalite geliştirme ve maliyet azaltma çalışmalarının sürekli olması gereklidir. Faaliyetlerinden belirli bir kâr elde edemeyen firmalar varlıklarını uzun süre koruyamazlar. Japon firmalarının diğer ülke firmalarından temeldeki en büyük farkı, özellikle Amerikan firmaları geliştirdikleri yeni teknolojilerin ve buluşların peşinde koşarken, Japon firmalarının ellerindeki teknolojiyi ve yaptıkları her şeyi yavaş yavaş sürekli olarak geliştirmeleridir. Taguchi, deney tasarımını kalite maliyetlerini azaltmak için de kullanmaktadır. Taguchi üç tür kalite maliyeti tanımlamaktadır: Araştırma ve geliştirme maliyetleri, üretim maliyetleri ve yönetim maliyetleri. Bu üç tür maliyet, deney tasarımının en iyi şekilde uygulanmasıyla, azaltılabilir.

3. Sürekli bir kalite geliştirme programı ürün performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasının sürekli olarak azaltılması çalışmalarını içermelidir. Bir ürünün performans karakteristikleri, müşteri isteklerinin karşılanmasında ürün performansını belirleyen temel kalite karakteristikleridir. Performans karakteristiğinin ideal değerine **hedef değer** denir. Bir ürünün performans karakteristikleri belirlenerek ölçülmediği sürece kaliteyi geliştirmek olası değildir. Ayrıca, sürekli bir kalite geliştirme programı söz konusu performans karakteristiklerinin ideal değerlerine ilişkin bilgiye de bağlıdır. Performans karakteristikleri değişkenlik gösterebilen büyüklüklerdir. Bu değişkenlik aynı üretim sürecinden aynı anda alınan benzer ürünler

arasında olabileceği gibi bu süreçten farklı zamanda alınan ürünlerde zamana bağlı bir değişme şeklinde de ortaya çıkabilir⁵.

4. Bir ürün performansındaki değişkenlikten dolayı müşterinin kaybı, sözkonusu performans karakteristiğinin hedef değerden sapmasının karesi ile orantılıdır. İkinci dereceden bu kayıp fonksiyonuna göre, hedeften az sapmalar müşteri için kayba neden olur, fakat hedeften büyük sapmalar çok daha büyük kayıplara neden olur.

5. Üretilen bir ürünün kalitesi ve üretim maliyeti, ürünün ve bu ürünün üretim sürecinin mühendislik tasarımları tarafından belirlenir. Bugün kalite kontrol, ürün ve üretim süreci tasarımında ortaya çıkan kronik problem belirtilerini düzeltmeye çalışan bir problem çözücü olarak görülmektedir. Gelecekte işletmeler daha fazla istatistiksel yöntemler kullanarak, üretim süreçlerindeki sapmaları daha kolay anlayacaklar ve kalite geliştirme faaliyetlerini ürün ve üretim süreci tasarımında yoğunlaştıracaklardır.

Bir ürünün üretim maliyeti ile üretim kusurları için üretim sürecinin tasarımı büyük ölçüde belirleyici olmaktadır. Bu nedenle, maliyetli olan süreç kontrolleri üretim kusurları ile birlikte azaltılmalıdır. Bu da ancak maliyetleri azaltacak bir üretim süreci tasarımı geliştirilmesi ile olasıdır.

6. Bir ürün ya da üretim sürecinin performans değişikliğinde azalmalar, bu ürün ya da üretim sürecine ilişkin faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki doğrusal olmayan etkisinin ortadan kaldırılması ile sağlanır. Üretim öncesi kalite kontrolün ana

⁵ Nurettin Peşkircioğlu, "Toplam Kalite Güvenilirliği Programlarının Entegre bir Parçası olarak Taguchi Yöntemi," *Verimlilik Dergisi*, 65-92, (1990), s. 79.

temasını belirten bu cümle çok önemlidir. Ürün spesifikasyonlarını süreç kapasitesinin ötesine getirmeye çalışmaktansa, tasarımda yapılacak bir değişiklik ile bu spesifikasyonlar daha kolay istenilen düzeye ulaştırabilir. Dolayısıyla, faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkileri yeni tasarımlarla daha kolay ve daha etkili olarak ortadan kaldırılabilir.

7. İstatistiksel deney tasarımları, performans değişkenliğini azaltan ürün ya da üretim süreci faktör değerlerinin saptanmasında kullanılabilir. Böylece, kalite, verimlilik, performans, güvenilirlik ve kâr gelişir. İstatistiksel deney tasarımları günümüzün stratejik kalite silahlarıdır.

1.3. Taguchi Yönteminin Getirdiği Yenilikler

Japonya'da çalışanlar, işletme amaçlarına ulaşırken, işlerine getirdikleri yeniliklerle sağladıkları katkıya göre terfi ettirilmektedirler. Oysa ki, Amerika ve diğer ülkelerde bunun tam tersi uygulanmakta ve çalışanlara işini nasıl yapması gerektiği gösterilmekte ve bu kuralların dışına çıkanlar uyarılmaktadır. Ayrıca, üst yönetim işinde söylenenin dışına çıkanlardan rahatsız olmakta ve bu çalışanları kolay kolay terfi ettirmemektedir.

Taguchi yönteminin gerçek değeri, işletmelerde değişikliğin başlamasına neden olmasında yatmaktadır. Geleneksel istatistiksel yöntemlerle işletmeler ancak kendi durumlarını koruyabilmiştir. Daha sonra istatistiksel süreç kontrolü uygulamaları ile işletmelerde az da olsa değişim başlamıştır. Bununla birlikte, geleneksel deney tasarımı

yöntemlerinin Taguchi düşünce tarzına göre uyarlanmasına kadar fazla bir etkisi olmamıştır. Taguchi yönteminin işletmelerde meydana getirdiği en önemli altı değişim şunlardır:⁶

1. Kalite ve Kalite Geliştirmenin Tanımı: Taguchi yönteminin işletmelerde meydana getirdiği en önemli değişikliklerden birisi kalite ve kalite geliştirme kavramlarının yeniden tanımlanmasıdır. Taguchi yönteminin ana teması değişkenlikleri azaltırken maliyetleri de azaltmak olduğu için, kalitenin tanımı daha fazla spesifikasyonlara uygunluk olarak kalmaz. Kalite geliştirmenin anlamı da problem çözümünden, hedef değerden sapmaların azaltılmasına değişmiş ve kalite geliştirmenin nasıl ölçüleceği önemli bir noktayı oluşturmuştur. Geleneksel olarak, işletmelerde kalite geliştirme yıllık maliyet tasarruflarıyla ölçülmektedir. Taguchi yönteminde ise kalite geliştirme otomatiktir ve her geliştirme sonucunda maliyetlerde azalma meydana gelir. İşletmelerdeki tüm birimlerin performans göstergesi maliyet tabanlı olduğu için kalite tesadüfi olmaktan çıkarak tüm çalışanların izlemesi gereken iş stratejisi olur. Yeni kalite düşüncesinde, süreç değişkenliği en aza indirilmeye çalışılırken, kalite geliştirme sürekli devam ettirilmektedir.

2. Finansal Kontrol Sistemleri: Kalite kayıp fonksiyonu işletmelerin finansal sistemini değiştirme potansiyeline sahiptir. Kalite kayıp fonksiyonu işletmelerin çalıştığı geleneksel maliyet kontrol kurallarını yeniden tanımlayarak ekonomik bir perspektif yaratır. Her büyük işletmenin sermaye harcamalarını ve ürün tasarım

⁶ Lawrence P. Sullivan, "The Power of Taguchi Methods," *Quality Progress*, V.20, No.6: 76-79, (June 1987), s.77.

geliştirmelerini geri ödeme oranları ile birlikte gösteren bir finansal sistemi vardır. Belirlenen kurallara uymayan kalite geliştirme fikirleri uygulanamamaktadır. Geleneksel kalite tanımına göre (spesifikasyon limitlerine uygunluk) ürün parça özelliklerinin bu toleranslar içinde olduğu yerlerde, kurallar gelişmeyi engellemektedir. Kalite kayıp fonksiyonu, yıllık maliyet tasarruflarını ürün özelliklerinin, spesifikasyon sınırları içinde bile olsa, hedef değere doğru yaklaşması olarak görmektedir. Bu düşünce tarzı, kaliteye tümüyle yeni bir ekonomik perspektif kazandırmakta ve maliyetleri düşürme yöntemi olarak sürekli iyileştirmeyi teşvik etmektedir.

3. Mühendislik Hedef Değerleri: Parametre tasarımının etkili olması için ürün planlama fonksiyonu ve mühendislik faaliyetleri her bir müşterinin gereksinimlerine göre hedef değerler saptamalıdır. Teorik olarak, teknik gereksinimleri gösteren spesifikasyon sınırları daha fazla kullanılamaz. Bu nedenle, fonksiyon, görünüm ve uyumun en iyi düzeyde olacağı hedef değerlerin geliştirilmesi için pazarlama becerilerinin ve mühendislik bilgilerinin değişime gereksinimi vardır. Hedef değerler saptandıktan sonra, mühendislik faaliyetleri ürün geliştirme aşamasında ürün tasarımını bu saptanan hedeflere göre en iyilemelidir. Ürün tasarımında hedef değerler tam olarak uygulanarak, bu değerler için değiş tokuşa ya da uzlaşmaya gidilmemelidir. Aksi takdirde, çevre koşullarından etkilenmeyen ürün tasarımı olanaksızlaşacaktır.

4. Üretim Süreç Geliştirme: Taguchi yönteminin uygulanması üretim sistemini büyük ölçüde değiştirecektir. Geleneksel olarak, ürün parçaları spesifikasyon sınırları içinde olduğu sürece sorun yoktur ve geliştirme istenmemektedir. Oysa ki, Taguchi

yöntemi ve üretim sonrası kalite kontrol yöntemleri uygulayan işletmelerde oluşan çeşitli değişimler şunlardır:

- **Değişimleri azaltmaya yönelik sürekli geliştirme çabaları:** Sürekli geliştirme ile kalite kontrol denetiminin amacı hedef değere olabildiğince yaklaşmaktır. Bu değişim, kalite çalışmalarını problem çözümünden değişimleri azaltmaya yönlendirir. Böylece, işletmenin tüm çalışanlarının odak noktası hedef değerler olur.

- **Süreç geliştirmeyi finanse etmek için yeni kurallar koyulması:** Bir çok işletme ilk önce eski araçlarını en iyilemeden, yeni süreç ve araçlara yatırım yapmaktadır. Halbuki, yeni kurallara göre Taguchi yöntemi ile varolan makine ve araçlar en iyilenmeden yenilerine izin verilmemektedir. Böylece bu kurallar maliyetleri azaltmakta ve üretim süreç kabiliyetini geliştirmektedir.

- **Kontrol tablolarına ve süreç kabiliyet analizine daha az güvenme**

duygusu: Üretim sonrası kalite kontrol uygulayan işletmelerin istatistiksel süreç kontrolüne gereksinimleri azalır ve hedefleri kalite kontrolünden maliyet azaltmaya yönelir. Geleneksel süreç kontrolü maliyete Taguchi yöntemi kadar önem vermez. Oysa ki, Taguchi'nin geliştirdiği üretim sonrası kalite kontrol, en iyi denetim ve test aralıklarını belirlemeye yönelik maliyet denklemlerinden oluşmaktadır⁷.

5. Yatay Teknik Etkileşim: İşletmelerin genelde dikey iletişimi iyi olmakla birlikte yatay iletişimi iyi değildir. Çok fonksiyonlu takım iletişimi isteyen Taguchi yöntemi işletmelerin kalite geliştirme yöntemlerini değiştirmiştir. Problemin

⁷ Mohamad R. Nayeypour, William H. Woodall, "An Analysis of Taguchi's On-Line Quality-Monitoring Procedures for Attributes," *Technometrics*, V.35, No.1: 53-60, (Feb. 1993), s.54.

çözümünden en fazla sorumlu olan kişiye görevin verilmesi, sonuç vermemektedir. Taguchi yöntemi konusunda takım eğitiminin teşvik edilmesi ve örnek olayların uygulanması yatay etkileşimi artırır. Bu durum tek başına, işletme içinde kalite gelişimini arttıran ve maliyetleri azaltan en büyük değişimdir.

6. Endüstriyel Standartlar: Taguchi yönteminin uygulanması, yeni kalite teknolojisini ilerlemeye ve standartlaşmaya yöneltir. Bir çok işletme kalite fonksiyon yayılımını, Taguchi uygulamalarının en faydalı olacağı birbirini tutmayan tasarım isteklerini tanımlamakta yatay bir mekanizma olarak kullanmaktadır. Japon Standartları Derneği bir çok ürün için maliyet ve süreç kabiliyetlerini göz önüne alarak tolerans kuralları geliştirmektedir. Değişik endüstrilerde yararlı mühendislik faaliyetlerinin geliştirilmesi standardizasyonun diğer bir avantajıdır. Taguchi yöntem teknolojisi kullanılarak ekonomik ve fonksiyonel genel tolerans kuralları kurulmuştur.

2. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN DAYANDIRILDIĞI KURAMSAL ESASLAR

2.1. Taguchi Kayıp Fonksiyonu

Geleneksel olarak, ürünün kritik özellikleri ile teknik spesifikasyonları karşılaştırılarak ürün kalitesi ölçülmektedir. Bugün ürün spesifikasyonları önemini korumaktadır, fakat ürün kalitesini belirleyici unsurun üretim süreci olduğu günümüzde, üretim süreci özelliklerinin kontrol edilmesi daha çok önem kazanmıştır. Üretim süreci ve ürünlerdeki değişkenlikler azaltılarak, ürün özellikleri hedef değerlerine yaklaştırılmaya çalışılmaktadır. Bu durum kalite kayıplarını azaltacaktır. Teknik spesifikasyonlar ürün ya da üretim sürecinde ne kadar sapmaya izin verileceğini

göstermektedir. Teknik spesifikasyonlar genelde aşağıdaki örneklere benzer şekilde olur⁸:

1. Tek standard değer: 82 °C sıcaklıkta fırınlama.
2. İki-taraflı tolerans limitleri: Fırınlama sıcaklığını 80 °C ile 84 °C arasında tut.
3. Toleranslı hedef değer: 82 °C $\pm$ 2 °C
4. Sadece yukarı tolerans limiti: Siparişi aldıktan sonra 72 saat içinde ürünü gönder.
5. Sadece aşağı tolerans limiti: Gerilme gücü en az 30 psi olmalıdır.

Birinci örnekte verilen tek standard değer teknik spesifikasyonu bir çok süreç için yeterli değildir. Spesifikasyona uygunluğun ne zaman bozulacağı konusunda açıklayıcı bir kriter bulunmamaktadır. Fırınlama sıcaklığını tam 82 °C tutmak çok zordur, çünkü termostat bu sıcaklığa ayarlansa bile bazı değişimlerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Ne kadarlık bir değişkenliğin kabul edilebilir olduğu belirtilmelidir.

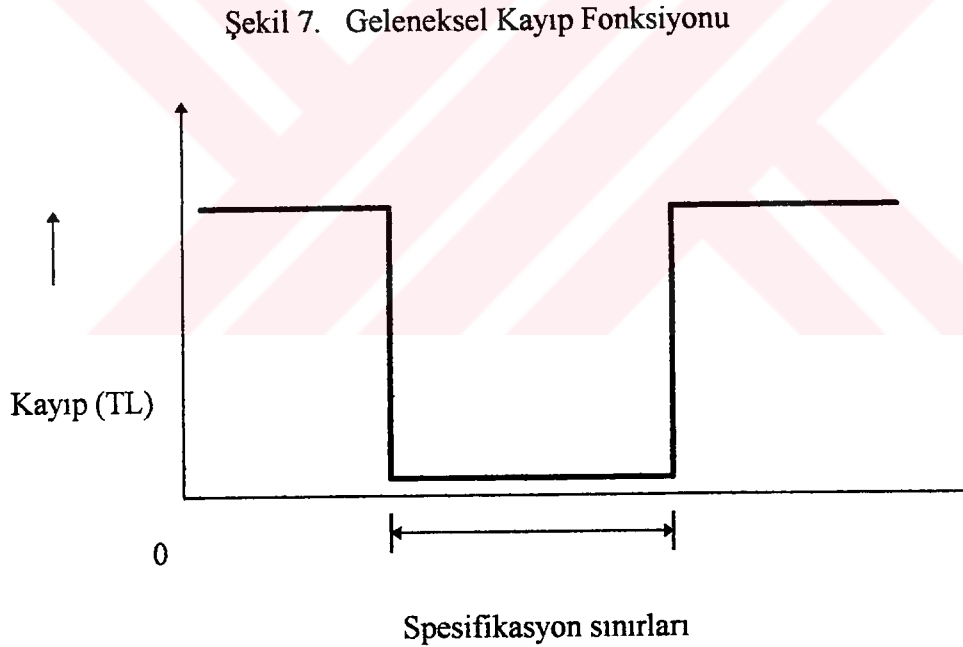
İkinci örnekteki iki taraflı tolerans limitleri teknik spesifikasyonun tolerans sınırları olmasına rağmen, hedef değeri yoktur. Mühendislik bakış açısından kalite isteklerini belirtmesine rağmen, sürekli kalite geliştirmeyi kapsayan kalitenin yeni tanımına göre yeterli değildir.

Üç, dört ve beş numaralı örneklerde teknik spesifikasyonlar tam olarak belirlenmeliydi. Üç numaralı örnekte belirli bir hedef değer vardır, ancak dört ve beş numaralı örneklerde hedef belirgin değildir. Fakat anlaşılacağı gibi, hedefler dört numaralı örnekte siparişi aldıktan sonra ürünü gönderme süresini azaltmak ve beş

⁸ Locher, Matar, a.g.e., s.13

numaralı örnekte de gerilme gücünü arttırmaktır. Taguchi örnek üçteki gibi kalite özelliğine “belirli bir hedef değer en iyi” adını vermektedir. Örnek dört ve beşteki kalite özelliklerine de sırasıyla “daha küçük daha iyi” ve “daha büyük daha iyi” adlarını vermiştir. Bu konu daha sonra Taguchi işaret gürültü oranında etraflıca anlatılacaktır.

Daha önce belirtildiği gibi Taguchi felsefesinin kalbinde kalite kayıp fonksiyonu kavramı vardır. Bu kavram Taguchi yönteminin ne yapmaya çalıştığını ve neden başarılı olduğunun anlaşılmasında temel olmaktadır⁹. Taguchi’nin kalite anlayışı geleneksel kalite anlayışı ile karşılaştırıldığı zaman daha iyi anlaşılmaktadır. Hedef değerleri göz önüne almadan sadece spesifikasyon sınırları içinde ürün üretilirse kayıp fonksiyonu Şekil 7’deki gibi olur¹⁰.



Kaynak: T.C.E. Cheng, "Quality Control: Changing with the Times," **International Journal of Quality and Reliability Management**, V.7, No.6: 36-46, (1990), s.43.

⁹ Berton Gunter, "A Perspective on the Taguchi Methods", **Quality Progress**, V.20, No.6: 44-52, (June 1987), s.45.

¹⁰ T.C.E. Cheng, "Quality Control: Changing with the Times," **International Journal of Quality and Reliability Management**, V.7, No.6: 36-46, (1990), s.43.

Bu durumda eğer ürün özellikleri spesifikasyon sınırları içinde ise müşteriye gönderilir, değilse ürün kabul edilmez. Gerçek hayatta problemler bu kadar kolay çözümlenemez. Bir ürünün parçası tam istenildiği gibi uyum sağlayabilir, spesifikasyon sınırlarına yakın yerde uyum sağlayabilir, ya da hiç uyum sağlamayabilir.

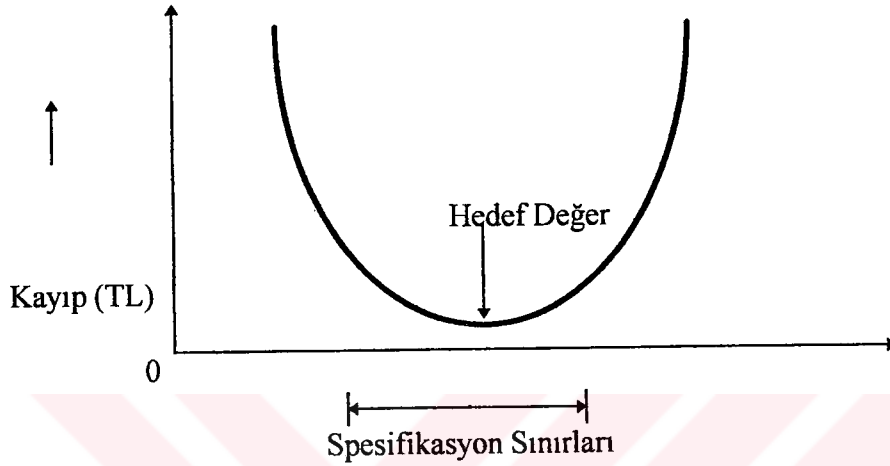
Restorant'daki bir yemek çok iyi, iyi, orta, kötü olabilir. Ancak bu durumlar Şekil 7'deki modelle açıklanamamaktadır. Bu şekilde açıklanan bir modelde kayıp sadece spesifikasyon sınırları dışında değil, bunun içinde de oluşabilir. Alt ya da üst spesifikasyon sınırlarına yakın olan durumlarda ürünün müşteriye memnun etmemesi çok büyük olasılıktır. Bazı yazarlara göre, Şekil 7'de olduğu gibi, ürünün spesifikasyon sınırları içinde olması iyi kalitede olduğunun bir kanıtıdır¹¹. Oysa ki, bu durum sadece tasarımcıları ve üreticileri kapsamaktadır, müşterilerin istekleri göz ardı edilmektedir. Eğer ürünün spesifikasyon sınırları müşteri isteklerini karşılamıyorsa, kaliteli bir üründen söz edilemez. Müşteri her zaman ürünün hedef değere yakın olmasını isterken, üreticide ürünün spesifikasyon sınırlarını geniş ister.

Yukarıda söz edilen hedef değere yakın olma isteği, Şekil 8'de gösterilmektedir. Taguchi, Şekil 8'deki gibi durumlarda ikinci dereceden kayıp fonksiyonlarının kullanımını önermiştir. Bu kayıp fonksiyonu, hedef değerden uzaklaştıkça kaybın arttığını göstermektedir. Ayrıca, bu kayıp fonksiyonu ürünün bozulmasından dolayı müşteri gözünde hedef değerden ve ürün karakteristiğinden sapmanın parasal kaybına karşı kalite değerinin maliyetini tahmin eder. Açıkça ifade edilirse, bu kayıp fonksiyonu değişkenliği azaltarak hedef değere yakın olmanın ekonomik değerini göstermede bir

¹¹ Philip B. Crosby, *Quality is Free*, (USA: McGraw Hill., 1979), s.24.

yoldur¹². Bu kayıp fonksiyonunun gerçek şeklini belirlemek için, ölçülen ürün özelliğinin bazı seçilmiş değerlerinin gerçek kayıpları bilinmelidir. Fakat bu durum her zaman deney tasarımının konusu değildir. Önemli nokta, kaliteyi arttırmak ya da kaybı azaltmak için ürün ve üretim süreci özelliklerini hedef değerlerine yakın tutmaktır.

Şekil 8. Taguchi Kayıp Fonksiyonu



Kaynak: Geanie W. Margavio ve Thomas M. Margavio, "Quality Improvement Technology Using the Taguchi Method", *The CPA Journal*, V.63: 72-75, 1993, s.74

Taguchi kayıp fonksiyonu, hem müşterinin ürünün her parçasında istediği kalite devamlılığını hem de üreticinin düşük maliyetli üretim yapma isteğini kabul eder. Toplumsal kayıp, üretim süreci maliyetleri ve ürün kullanımında karşılaşılan maliyetleri (tamir, bozulma, iş kaybı gibi) kapsar. Üründen dolayı toplumda meydana gelen kayıpları azaltmak için geliştirilen strateji, üretim ve tüketim noktasında değişmeyen ürünün en düşük maliyetle üretilmesini teşvik eder.

Fonksiyonel spesifikasyonlardaki değişiklikler kalite kaybına neden olur. Garanti, artan hizmet maliyetleri ve tatmin olmayan müşteriler doğrudan kalite kaybına

¹² A. Jeang, "An Approach of Tolerance Design for Quality Improvement and Cost Reduction," *International Journal of Production Research*, V.35, No.5:1193-1211, (May 1997), s.1193.

neden olmaktadır. Pazar payı kaybı, rekabeti yenmek için arttırılan pazarlama çabaları da dolaylı olarak kalite kaybına neden olmaktadır.

Uygun bir kalite geliştirme programının ana amacı, ürün performansının hedef değerdeki değişkenliğinin en aza indirilmesi olmalıdır. Sapma ne kadar az olursa kalite o oranda daha iyi olur. Hedef değerden ne kadar çok uzaklaşırsa, müşterinin kaybıda o kadar artmaktadır. Bu kayıp Taguchi'nin kayıp fonksiyonu ile yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir.

Taguchi kayıp fonksiyonu hedef değer sonlu olduğu zaman şu şekilde oluşur:

Belirli bir performans karakteristiğinin değeri Y ve sonlu hedef değer m olsun. Y performans karakteristiğinin m hedef değerinden sapmasından dolayı oluşan $L(Y)$ Taguchi kayıp fonksiyonun m hedef değeri civarındaki Taylor açılımı

$$L(Y) = L(m + Y - m) = L(m) + \frac{L'(m)}{1!} (Y - m) + \frac{L''(m)}{2!} (Y - m)^2 + \dots$$

şeklindedir¹³.

$L(m)$ kayıp fonksiyonunun 0 değerine eşit olduğu varsayıldığı ve $L(Y)$ 'nin $Y = m$ olduğu zaman minimum değerini aldığı bilindiği için $L'(m)$ 'nin değeri 0 olur. Böylece kayıp yukarıdaki açılımda sadece üçüncü terimle yaklaşık olarak

$$L(Y) \cong k (Y - m)^2$$

şekli alır.

Bu açılımda k kayıp katsayısıdır ve müşteri tolerans limitleri aşıldığı zaman kayıplar hakkında parasal bilgi varsa kayıp katsayısı k belirlenebilir.

¹³ Thomas B. Barker, **Engineering Quality by Design: Interpreting the Taguchi Approach**, (USA: ASQC Quality Press, 1990), s.19.

Taguchi kayıp fonksiyonu hedef değeri sonsuz olduğu zaman da şu şekilde oluşur:

Belirli bir performans karakteristiğinin değeri Y ve hedef değeri m sonsuza eşit ise (daha büyük daha iyi karakteristiği), $L(Y)$ kayıp fonksiyonunun $Y = \infty$ komşuluğundaki Laurent açılımı

$$L(Y) = L(\infty) + \frac{L'(\infty)}{1!} * \frac{1}{Y} + \frac{L''(\infty)}{2!} * \frac{1}{Y^2} + \dots$$

şeklinde ifade edilebilir¹⁴.

$L'(\infty)$ 'un sifıra eşit olduğu ve Y performans karakteristiği sonsuza eşit olursa kayıp fonksiyonu $L(Y)$ 'nin minimum değeri aldığı varsayılırsa, $L'(\infty) = 0$ olduğu ortaya çıkar. Bu durumda kayıp fonksiyonu $L(Y)$ yaklaşık olarak

$$L(Y) \cong \frac{K}{Y^2}$$

şeklinde tanımlanabilir.

Daha büyük daha iyi karakteristiği için kayıp fonksiyonunun grafiği Şekil 9'deki gibidir.

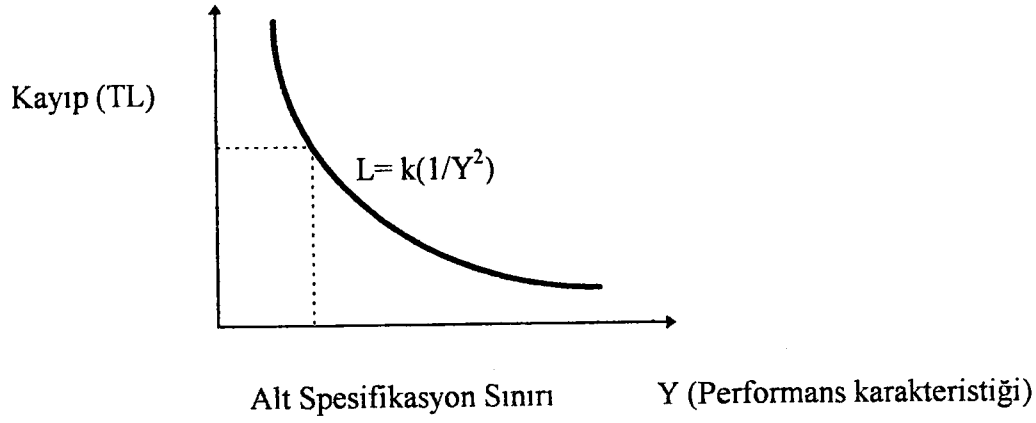
Daha küçük daha iyi durumunda da benzer olarak $L(Y)$ kayıp fonksiyonu

$$L(Y) \cong K * Y^2$$

şeklinde formüle edilebilir.

¹⁴ N. Logothetis, H. P. Wynn, **Quality Through Design**, (Oxford: Clarendon Press, 1989), s.6.

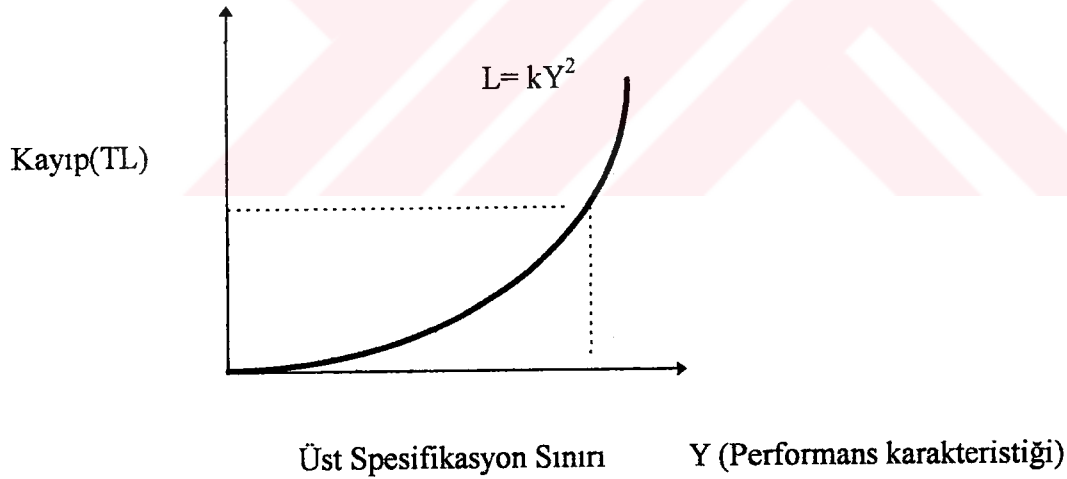
Şekil 9. Daha Büyük Daha İyi Karakteristiği için Kayıp Fonksiyonu



Kaynak: Philip J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, (USA: McGraw-Hill Book Co., 1988), s.19.

En küçük en iyi karakteristiği için de kayıp fonksiyonunun grafiği Şekil 10'daki gibidir:

Şekil 10. Daha Küçük Daha İyi Karakteristiği için Kayıp Fonksiyonu



Kaynak: Philip J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, (USA: McGraw-Hill Book Co., 1988), s.19.

Japonya'nın insan kaynağı dışında kıt kaynakları olan bir ülke olarak tek çıkış noktası malzemeleri ithal edip, onları üretim süreçlerinden geçirip değer katarak diğer

ülkelere satmasıdır. Kıt kaynaklar çeşitli üretim süreçlerinden geçirilerek ürün haline getirilirken, verimliliğe büyük önem verilmekte ve üretim süreçlerinde en az kaybın oluşması sağlanmaktadır. Taguchi kayıp fonksiyonu da bu temele dayanmaktadır.

2.2. Performans Değişkenliği

Rekabetin arttığı günümüz pazarlarında işletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri için sürekli kalite geliştirme ve maliyet azaltma yöntemlerini kullanmaları büyük önem kazanmaktadır. Bir işletme hem kaliteli hem de ucuz mal üretirken, aynı zamanda ulaşılmak istenilen kârı da elde etmelidir. İşletmenin müşteri istek ve gereksinimlerini karşılama oranı firmanın pazar payı ile doğru orantılıdır. İşletme, müşteri istek ve gereksinimlerini sağlayan ürün sayısını arttırdıkça, buna bağlı olarak pazar payı da artacaktır. Bu durum pazardaki tüm işletmeler için geçerlidir. Bu nedenle, sürekli kalite geliştirme ve maliyet azaltma işletmelerin temel stratejilerinden biri olmaktadır.

Sürekli kalite geliştirme programları, ürün performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmalarını sürekli azaltmak için çaba gösterirler. Bir ürünün performans karakteristiği tanımlanmadan ve ölçülmeden, söz konusu ürünün kalitesi geliştirilemez. Ayrıca, kalite geliştirmede performans karakteristiklerinin ideal değerleri hakkında bilgi sahibi olunmalıdır. Sürekli kalite geliştirme programlarının amacı ürünün performans karakteristiklerinin istenilen hedef değerden sapmasını en aza indirmek olmalıdır¹⁵.

¹⁵ Kackar, a.g.m., s.23.

Tüm ürünlerin bir çok performans karakteristikleri vardır, ancak bunların hepsinin geliştirilmesi yerine, önemli olanlarının geliştirilmesi büyük tasarruf ve kolaylık sağlar. İyi kaliteli bir ürün bütün hayatı boyunca değişik koşullarda hedef değere yakın performans gösterir. Değişik hava koşullarında net görüntü vermeyen bir televizyon için iyi kaliteli denilemez. Bir performans karakteristiğinin hedef değerinden sapmasına performans sapması ya da değişkenliği denir. Performans değişkenliği ne kadar az olursa, kalite o kadar yüksek olur.

Performans karakteristikleri sürekli ölçekde ölçüldüğü zaman performans değişkenliği daha etkili değerlendirilebilir, çünkü bu ölçekle kalitedeki küçük sapmalar bile saptanabilir. Bu nedenle sürekli ölçekde ölçülebilen bir ürünün performans karakteristiklerinin tanımlanması önemlidir.

Tüm performans karakteristikleri performans karakteristiğinin doğası gereği ya da bazı sınırlamalardan dolayı sürekli ölçekde ölçülemez. Bazı performans karakteristikleri subjektif değerlendirme gerektirir. Sürekli ölçekden sonra kullanılabilecek en iyi ölçek sıralayıcı (zayıf, orta, iyi, çok iyi, gibi) ölçektir (ordered categorical). Sıralayıcı ölçek, sürekli ölçüme göre kalitedeki küçük değişiklikleri saptamada etkili olmasa da, iyi ya da kötü gibi ikili ölçüme göre daha etkilidir.

2.3. Değişkenlik ve Varyans Analizi

Ürün ya da üretim süreci geliştirmenin amacı, müşteri gereksinim ve beklentilerine göre ürün ya da üretim süreci performans karakteristiklerini

geliştirmektir. Deney yapmanın amacı da ürün ya da üretim süreci değişkenliğinin kontrol edilmesi ve azaltılmasıdır, daha sonra ürün ya da üretim süreci performansını hangi faktörlerin etkilediği kararı verilmelidir. Ürün karakteristiğinin ortalaması uygun olarak ayarlanarak ve değişkenlikler azaltılarak, ürün ya da üretim süreci kayıpları en aza indirilebilir¹⁶.

Değişkenlik kalite ile ilgili tartışmaların büyük bir bölümünde yer aldığı için varyans analizi (analysis of variance) (VARAN), deneysel verilerin değerlendirilmesinde ve gerekli kararların verilmesinde kullanılacak istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntem 1930’larda Sir Ronald Fisher tarafından tarımsal deneylerin sonuçlarını değerlendirmede kullanılmıştır. VARAN test edilen bir grup içindeki ortalama performans farklılıklarını saptamak için kullanılan istatistiksel bir karar aracıdır. VARAN önemli ve önemsiz faktörlerin ayırt edilmesinde teknik personele yardımcı olur¹⁷. VARAN için kurulan modellerde gruplar arasındaki farklılık bağımsız değişkenleri, grupların karşılaştırıldığı ölçüler de bağımlı değişkenleri temsil eder. Parametre tasarımında kullanılan VARAN performansa katkısı olan etkili faktörlerin bulunarak doğru performans kestiriminin yapılmasına yardımcı olur.

2.3.1. Tek Faktör Varyans Analizi

VARAN’ın uygulanmasında toplanan verilerin gerçek ya da hayali olması matematiksel işlemlerde farklılığa neden olmaz. Varyans analizi toplam değişimi sayılabilir kaynaklara bölen matematiksel bir tekniktir; toplam değişim uygun

¹⁶ Ross, a.g.e., s.23.

¹⁷ Fowlkes, Creveling, a.g.e., s.313.

parçalarına ayrılır. Tek faktör varyans analizi bir ürün ya da süreç performansında kontrol edilen bir faktörün etkisini göz önüne almaktadır. Bir çok deneyde, daha küçük daha iyi durumu hariç, ortalama değişimin pratik bir değeri yoktur ve hesaplamalara alınmaz. En küçük en iyi durumunda ortalama değişimi, ortalamanın sıfırdan ne kadar uzak olduğunu ve parametrelerin ortalamaı sıfıra indirmekte ne kadar başarılı olduğunun ölçüsüdür.

Varyans analizi hesaplamalarında toplam değişim şu şekilde ayrıştırılabilir¹⁸:

1. Her bir faktör düzeyinde gözlemlerin ortalamasının değişimi,
2. Her bir faktör düzeyinde her bir gözlemin değişimi.

Matematiksel formülasyonların anlaşılabilmesi açısından açıklanması gerekli semboller şunlardır:

y_i = i' inci gözlem, veri

n = toplam gözlem sayısı

A_i = A_i düzeyindeki gözlemlerin toplamı

$\bar{A}_i$ = A_i düzeyindeki gözlemlerin ortalaması

T = tüm gözlemlerin toplamı

$\bar{T}$ = Tüm gözlemlerin ortalaması

n_{A_i} = A_i düzeyindeki gözlem sayısı

SS_T = Toplam kareler toplamı (toplam değişim)

SS_E = Hata kareler toplamı (gözlemlerin ortalamaıdan farklarının kareler toplamı)

SS_A = Düzeylerarası kareler toplamı

¹⁸ Ross, a.g.e., s.31.

$k_A = A$ faktörünün düzey sayısı

VARAN' ın bir özelliğine göre toplam kareler toplamı bilinen parçalarının kareler toplamına eşittir. Bu durumda,

$$SS_T = SS_A + SS_E$$

olur.

Tek faktör varyans analizinde toplam kareler toplamının formülasyonu(toplam değişim)

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{T})^2$$

şeklindedir.

Matematiksel olarak açılımı

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 \right] - \frac{T^2}{n}$$

şeklindedir.

A faktöründen kaynaklanan değişim

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{n}$$

şeklindedir.

Hatadan kaynaklanan değişim de

$$SS_E = \sum_{j=1}^{k_A} \sum_{i=1}^{n_{A_j}} (y_i - \bar{A}_j)^2$$

şeklini alır.

Varyans analizi hesaplamasında göz önüne alınması gerekli basamaklardan bir tanesi de serbestlik derecesidir. Serbestlik derecesi genel olarak, toplanan verilerden bir sonuç çıkarmak için gerekenden fazla olmadan yapılması gerekli karşılaştırma sayısıdır. Bu tanım deney tasarımı kapsamında ele alınırsa, daha iyi düzeyin belirlenmesi için faktör ya da etkileşim düzeyleri arasında yapılması gerekli karşılaştırma sayısına, dönüşür¹⁹. Sekiz gözlem yapılanca, verilerdeki değişmeyi bulmak için yedi bağımsız karşılaştırma yapılabilir. Yani, toplam serbestlik derecesi toplam gözlem sayısının bir eksiğidir. 1 no'lu nokta 2 ile, 2 no'lu nokta 3 ile karşılaştırılarak devam edilir. 1 no'lu noktanın 3 no'lu nokta ile karşılaştırılması bağımsız değildir, çünkü bu karşılaştırma 1 ile 2'nin ve 2 ile 3'ün karşılaştırmalarına bağlıdır.

Kareler toplamına benzer olarak serbestlik derecesi için de toplama yapılabilir.

v = serbestlik derecesi

v_T = toplam serbestlik derecesi

v_m = ortalamanın serbestlik derecesi (her zaman 1)

v_E = hata serbestlik derecesi

olmak üzere bir faktör varyans analizi için toplam serbestlik derecesi

$$v_T = n - 1$$

ya da

$$v_T = v_A + v_E$$

şeklindedir.

Ayrıca, A faktörü için serbestlik derecesi

$$v_A = k_A - 1$$

¹⁹ Glen S. Peace, **Taguchi Methods: A Hands-on Approach to Quality Engineering**, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1993), s.131.

ve hata için de serbestlik derecesi

$$V_E = V_T - V_A$$

şeklını alır.

2.3.2. İki Faktör Varyans Analizi

İki faktör varyans analizinde iki faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisi araştırılır. Başka bir deyişle, iki değişkenin deneydeki etkisi araştırılır. İki düzeyli iki faktör A ve B olarak tanımlanırsa, olası dört kombinasyon şunlardır: A_1B_1 , A_1B_2 , A_2B_1 , A_2B_2 .

İki faktör varyans analizinde toplam değişim

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E$$

şeklinde oluşturulabilir.

(AB) A ve B parametrelerinin etkileşimini göstermektedir. Tüm kareler toplamı, A faktörünün, B faktörünün, etkileşimlerinin ve hatanın kareler toplamına eşittir.

İki faktör varyans analizinde de toplam değişim ile A ve B faktörleri için değişim formülasyonları tek faktör varyans analizindeki ile aynıdır. İki faktör varyans analizinde fazladan (AB) etkileşiminden kaynaklanan değişim de vardır.

$(AB)_i$ = A ve B faktörlerinin i' inci kombinasyonundaki verilerin toplamı

c = faktörlerin olası kombinasyon sayısı

olmak üzere

A ve B faktörlerinin etkileşiminden kaynaklanan değişim

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^c \left(\frac{(AB)_i^2}{n_{ABi}} \right) - \frac{T^2}{n} - SS_A - SS_B$$

şeklinde formüle edilebilir²⁰.

A ve B faktörleri için serbestlik derecesi hesaplamaları tek faktör varyans analizi ile aynı olmak üzere toplam serbestlik derecesi

$$v_T = v_A + v_B + v_{AB} + v_E$$

(AB) etkileşimi için serbestlik derecesi de

$$v_{AB} = (v_A)(v_B)$$

şeklindedir.

2.3.3. Üç Faktör Varyans Analizi

Üç faktör varyans analizinde iki faktör varyans analizine benzer olarak üç faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisi araştırılır. Üç faktör varyans analizinde de test işlemleri bağımlı değişkene ilişkin toplam kareler toplamının parçalara ayrılması temeline dayanır. Toplam değişimin formülü

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} + SS_E$$

şeklindedir.

A, B ve C faktörlerinden kaynaklanan değişkenlik ile A ve B, A ve C ya da B ve C faktörlerinin etkileşiminden kaynaklanan değişim formülleri iki faktör varyans analizi formülleri ile aynıdır.

²⁰ Ross, a.g.e., s.51.

İki faktör varyans analizi formüllerinden farklı olarak, A, B ve C faktörlerinin etkileşiminden kaynaklanan değişimin formülü de

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^c \left(\frac{(ABC)_i^2}{n(ABC)_i} \right) - \frac{T^2}{n} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

şeklindedir.

A, B, C faktörleri ve onların etkileşimleri için toplam serbestlik derecesi

$$v_T = v_A + v_B + v_C + v_{AB} + v_{AC} + v_{BC} + v_{ABC}$$

şeklindedir.

Üç faktörün beraber etkileşimi ve hata için serbestlik derecesi dışında serbestlik derecesi formülleri iki faktör varyans analizi ile aynıdır.

Üç faktörün etkileşimi için serbestlik derecesi

$$v_{ABC} = (v_A) (v_B) (v_C)$$

ve hata için serbestlik derecesi

$$v_E = v_T - v_A - v_B - v_C - v_{AB} - v_{AC} - v_{BC} - v_{ABC}$$

şeklindedir.

2.4. F Testi ve Katkı Yüzdelерinin Belirlenmesi

F testi, istatistiksel olarak, yapılan tahminlerin belirli anlam düzeylerinde önemli bir farka sahip olup olmadığına karar vermede yardımcı olan bir araçtır. F testi basit olarak örneklem varyanslarının oranıdır²¹.

²¹ James T. McClave ve P. George Benson, **Statistics for Business and Economics**, (Fifth Edition. USA: Dellen Pub. Co., 1991), s.412.

S_{y1}^2 birinci örneklemin ve S_{y2}^2 ikinci örneklemin varyansı olmak üzere

$$F = \frac{S_{y1}^2}{S_{y2}^2}$$

şeklindedir.

Bu oran yeterince büyük olunca, belirli bir anlam düzeyinde iki örneklem varyansının eşit olmadığı kabul edilir. Belirli anlam düzeylerinde istenen F oranlarının listesi EK 1.'deki F tablosunda bulunmaktadır.

Herhangi bir faktör için F oranı belirlenmesinde kullanılan kuramsal değer F_{α, v_1, v_2} şeklindedir.

α = risk

v_1 = pay için serbestlik derecesi

v_2 = payda için serbestlik derecesi

olmak üzere F dağılımından hareketle $P (F \geq F_{\alpha v_1 v_2}) = \alpha$

şeklinde yazılır.

F oranının miktarı faktör etkisinin büyüklüğünü her zaman yansıtmamaktadır. Ortalamalar arasında çok fazla bir fark yok iken, hata varyansının faktör varyansına göre çok küçük olmasından dolayı F oranı çok yüksek olabilir.

F tablo değerinden büyük F oranına sahip faktörler ana kütle ortalama değerini etkilerler, fakat F tablo değerinden küçük F oranına sahip faktörler ana kütle ortalama değerini etkilemezler.

Kalite mühendisliğinin temel amacı kârı arttırmaktır. Kalitesi artan bir ürünün rekabet edebileceği bir fiyatla pazara sürülmesi, pazarda büyük bir pay alınmasında anahtardır. Bir ürün için aynı kalite düzeyinin iki farklı yol ile elde edildiği varsayılın. Birinci yol, toplam değişkenlik üzerinde büyük etkisi olan tek bir pahalı parçanın değiştirilmesidir. Bu yol maliyeti artırır. İkinci yol, toplam değişkenlik üzerinde orta etkisi olan pahalı olmayan birden çok parçanın değiştirilmesidir. Bu, maliyetin düşük olmasını sağlar.

Eğer kalitenin artırılmasında ikinci yol tercih edilirse, faktörleri ve etkilerini belirlemek için hipotez testinin kullanılması uygun değildir, çünkü hipotez testi sadece çok etkili faktörleri belirler, orta etkilileri belirlemez. Fakat, orta etkili faktörlerin geliştirilmesi maliyetleri fazla arttırmaz. Faktör etkileri için sayısal değerlendirmeye gerek vardır. Bu nedenle, Taguchi yönteminde faktörleri ve etkilerini belirlemek için varyans analizi kullanıldığı zaman, bir faktörün etkisi hipotez testi yerine yüzde katkı ile hesaplanır.

Varyans analizi tablolarında faktörler için yüzde katkılarına bakılması sonucunda orta etkili parametreler belirlenir. Ayrıca, ürünün bir parçasının geliştirilmesi sonucunda kalitede sağlanan iyileşmenin neden olduğu tahmini tasarruf, yüzde katkı ile hesaplanabilir. Böylece, bir ürün parçasını geliştirmenin maliyeti ile bunun sağlayacağı tasarruf karşılaştırılarak, ekonomik olmayan ürün parçaları değiştirilmez²².

²² Paul K.H.Lin, Lawrence P. Sullivan ve Genichi Taguchi, "Using Taguchi Methods in Quality Engineering," *Quality Progress*, V.23, No.9: 55-59, (Sep. 1990), s.58.

Bir deneyde önemli faktör ve/ya da etkileşimlerinden meydana gelen toplam değişim katkı yüzdesi ile yansıtılır. Katkı yüzdesi bir faktör ya da etkileşimin değişkenliği azaltmak için göreceli gücünü gösterir. Eğer faktör ya da etkileşimin düzeyi kesin olarak kontrol edilebilirse, bu durumda toplam değişkenlik katkı yüzdesinde gösterilen miktar kadar azaltılabilir.

Varyans analizi ile ilgili bölümde belirtilmemesine rağmen faktör ya da etkileşimlerin neden olduğu varyansın bir kısmı da hatadan kaynaklanmaktadır. Bu durumu faktör A için gösteren formül

V'_A sadece A faktörünün neden olması beklenen varyans ve

V_E hatanın neden olması beklenen varyans

olmak üzere

$$V_A = V'_A + V_E$$

şeklindedir.

A faktörünün katkı yüzdesi, P

$$SS'_A = SS_A - (V_E)(v_A)$$

olmak üzere

$$P = (SS'_A / SS_T) * 100$$

formülü ile hesaplanır.

Yukarıdaki formüllerde örnek olarak A faktörünün kullanıldığına dikkat edilmelidir.

Hatadan dolayı faktör ya da etkileşimin kareler toplamının bir kısmı çıkarıldığı için kareler toplamını bozmamak için çıkarılan bu kısım hata kareler toplamına

eklenmelidir. Tüm katkı yüzdelерinin toplamı % 100 olmalıdır. Hatanın katkı yüzdesi deneyin doğruluğunun bir göstergesidir. Eğer hata katkı yüzdesi % 15 ya da daha düşük ise deneyde önemli herhangi bir faktör unutulmamış demektir. Aksi takdirde, bazı önemli faktörler deneye katılmamış, koşullar yeteri kadar kontrol edilememiş ya da ölçüm hatası var anlamına gelir²³.

Varyans analizi tablosunda faktör ve etkileşimlerin toplam değişkenliğe etkilerinin bulunmasında F değeri yerine yüzde katkı değerlerinin dikkate alınması gereklidir. Bir deneyde çok düzeyli ve iki düzeyli faktörler karıştırıldığı zaman F değerine göre açıklamalara dikkat edilmelidir. F oranının miktarı etkinin miktarını göstermez. İstatistiksel olarak, F oranı faktör etkisinin varlığını gösterir. İstatistiksel olarak önemli faktörlerin çizimindeki eğim faktör etkisinin miktarını gösterir, yüksek eğim yüksek faktör etkisi demektir. Temel olarak, F oranı hangi faktör ya da etkileşimlerin çiziminin yapılması gerektiğini gösterir²⁴.

Bir faktörün kareler toplamı, toplam kareler toplamının % 4'ünden az ise o faktör küçük kabul edilir ve küçük kabul edilen bu faktörün kareler toplamı hata kareler toplamı ile toplanarak birleştirilir. Seçilen bu faktörün katkısının göz ardı edilerek, diğer faktörlerin katkısının yeniden ayarlanması işlemine birleştirme (pooling) denir. Bu işlemde, aynı zamanda, serbestlik derecesi de hata serbestlik derecesine eklenir. Bir faktör istenilen anlam düzeyine göre yapılan F testinde hata terimine karşı önemsiz bulunursa, bu faktörün birleştirilmesi önerilir. Taguchi'ye göre küçük kabul edilen

²³ Ross, a.g.e., s.116.

²⁴ Ross, a.g.e., s.105.

faktörlerin birleştirilmesi, hata serbestlik derecesi toplam serbestlik derecesinin yaklaşık yarısı oluncaya kadar devam etmelidir²⁵.

Birleştirmenin amacı hata varyansının daha doğru tahminini elde etmektir. Hata serbestlik derecesinin olmadığı başka bir deyişle hata varyansının tahminin yapılamadığı durumlarda, hazırlanan dizinin bütün kolonlarına atama yapıldığı ve denemelerin tekrarı olmadığı zaman, en küçük kareler toplamına sahip faktörün ondan sonraki en küçük faktörle birleştirilmesi yolu ile hata kareler toplamı oluşturularak, kareler toplamı büyük faktörler için F testi yapılması tek yoldur. Eğer önemli F oranı bulunmazsa, önemli F oranı bulununcaya kadar birleştirmeye devam edilir. Bu stratejiye yukarı birleştirme (pooling up) denir²⁶. Taguchi'nin bu stratejiyi önermesinin nedeni, bu stratejinin etkili faktörlerin gözden kaçırılması hatasını engellemesidir.

Taguchi'nin görüşüne göre, kısıtlı olanaklı endüstri deneylerinde, hata varyansı hakkında bilgi elde etmek için fazladan denemelerin yapılması deneylerin verimliliği açısından kuşkuludur. Önemsiz faktörlerin hata varyansı ile birleştirilerek deney içi hataların tahmininin yapılması, fazladan deney yapılmasından çok daha uygun bir yöntemdir.

2.5. Tam Faktöriyel Diziler

Performansın birden fazla faktöre bağlı olduğu ürün ve üretim süreci kalitesinin geliştirilmesinde Taguchi yöntemi uygulanabilir. Deney ve geliştirme stratejisinin

²⁵ Ranjit K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*, (USA, Van Nostrand Reinhold, 1990), s. 124.

²⁶ Roy, a.g.e., s. 136.

hazırlanmasında en basit yol belirlenen düzeylerinde faktörlerin olası tüm kombinasyonlarının denenmesidir. Belirli sayıdaki faktörler için tüm olası kombinasyonların belirlenmesine tam faktöriyel tasarım denir²⁷. Bu tasarımda kullanılan diziye de tam faktöriyel dizi denir. Endüstriyel deneylerin büyük bir bölümü çok sayıda faktörden oluştuğu için, tam faktöriyel tasarım çok sayıda deneyin yapılmasını gerektirir. Örneğin, iki düzeyli yedi faktörden oluşan bir deneyin olası toplam kombinasyon sayısı $128 (2^7)$ 'dir.

Genel olarak, p düzeyli k faktör ve q düzeyli m faktörden oluşan bir deneyde, tam faktöriyel tasarım için gerekli olan deney sayısı $p^k q^m$ 'dir²⁸.

Tam faktöriyel deney tasarımları ancak, araştırılacak faktör sayısı ve bunların düzeyleri az sayıda ise, uygulanabilirliği vardır. Aksi durumda, tam faktöriyel dizilerin büyüklüğü nedeni ile çok fazla zaman ve maliyet gerektirdiklerinden uygulanabilirliği kısıtlanır.

2.6. Kesirli Faktöriyel Diziler

Çok sayıda faktörün bulunduğu tasarımlarda tam faktöriyel deneylerin uygulama zorlukları kesirli faktöriyel deneylerin kullanımını arttırmıştır. Kesirli faktöriyel deneyler adından da anlaşılacağı gibi, deney sayısını azaltmak için olası tüm kombinasyonların içinden sadece küçük bir grubu seçer. Kesirli faktöriyel diziler çok kullanılmasına rağmen, bunların tam faktöriyel diziler içinden seçiminde izlenilen genel

²⁷ Roy, a.g.e., s. 41.

²⁸ Logothetis, a.g.e., s. 107

bir yol yoktur. Kesirli faktöriyel deneyler ile faktörlerin ve bazı etkileşimlerin etkisi belirlenmeye çalışılır. Kesirli faktöriyel diziler zaman ve maliyet kısıtlarının önemli etken olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Taguchi yönteminde kesirli faktöriyel diziler olan ortogonal diziler kullanılmaktadır. Taguchi yönteminde kullanılan ortogonal diziler deneyde kullanılan faktörlerin sayısına ve düzeylerine göre belirlenmiştir. Uygulamada deney için uygun olan ortogonal dizi bu dizilerin içinden seçilmektedir.

2.7. Ortogonal Diziler

Ortogonal dizilerden söz etmeden önce ortogonallığın ne anlama geldiğini belirtmekte fayda vardır. Matematikte, aynı düzlemdeki A ve B vektörlerinin ortogonal olması, iki vektörün dik açı ile birleştiğini belirtir. Başka bir ifade ile, B vektörünün A vektörüne izdüşümü ya da tam tersi sıfıra eşittir. Bu durumda iki vektör birbirinden bağımsızdır²⁹.

Deneysel matris kapsamında ortogonal, istatistiksel açıdan bağımsız olmak demektir. Tipik bir ortogonal dizide bütün kolonlardaki düzeyler eşit sayıda bulunur. İstatistiksel bağımsızlık ile ilişkili olarak bu denge fikri daha da ileri giderek basit olarak her kolonda düzeylerin eşit sayıda olması anlamına gelir.

Taguchi yöntemiyle yapılan deney tasarımı temel, ortogonal dizilerdir. Taguchi yönteminde tam faktöriyel ve kesirli faktöriyel gibi klasik tasarım çeşitleri

²⁹Genichi Taguchi, Yu-In Wu ve Y. Yokoyama, **Taguchi Methods: Design of Experiments**, (USA: ASI Press, 1993), s.262.

kullanılabilmesine rağmen, ortogonal diziler Taguchi deney tekniği ile gelenekselleşerek birleşmiştir. Ortogonal diziler, elde edilen az miktardaki veri ile anlamlı ve onaylanabilir sonuçlara ulaşmada, çok verimlidir. Aynı zamanda, ortogonal dizilerin kullanıldığı deney tasarımları anlaşılır ve izlenecek yolları da kolaydır. Taguchi, ortogonal dizileri sadece bir faktörün çalışmadaki ortalama sonucu ne kadar etkilediğini hesaplamak için değil, aynı zamanda ortalama sonuçtaki değişkenliği ya da sapmayı hesaplamak için de kullanmıştır. Ayrıca, ana etkenler denilen kontrol faktörlerini ve onların etkileşimlerini çizimle göstermek için doğrusal grafiği geliştirmiştir. Bunun sonucunda kontrol faktörleri ve onların etkileşimleri ayrıştırılabilmektedir³⁰.

Ortogonallığın kolonlar arasında ayrılması deneysel sonuçların yeniden yaratılabilmesindedir. Çünkü her kolon birbirine ortogonaldır ve eğer belirli bir faktörün bir düzeyindeki sonuçları ile diğer bir düzeyindeki sonuçları çok farklı ise bu durum, faktörün bir düzeyden diğerine değiştirilmesinin ölçülen performans karakteristiği üzerinde çok fazla etkisi olmasından dolayıdır. Etkili faktörün her bir düzeyi için diğer faktörlerin düzeyleride eşit sayıda olduğu için, diğer faktörlerin etkisi yok edilmektedir. Böylece, belirli bir faktörün etkisi doğru tahmin edilebilmektedir, çünkü tahmin edilen etki diğer faktörlerin etkisini içermemektedir.

Ortogonal dizilerin diğer bir avantajı da maliyetleridir. Ortogonal dizilerin tasarımı bütün faktör kombinasyonlarının test edilmesine gerek bırakmaz. Onüç tane üç düzeyli faktörün olduğu tam faktöriyel bir çalışmada toplam 1594323 (3^{13}) deney

³⁰ Genichi Taguchi ve Don Clausing, "Robust Quality", *Harvard Business Review*, 65-75, (Jan.Feb. 1990), s.72.

gerekmektedir. Daha fazla faktör ve düzey sayısı deney sayısını arttıracaktır. Halbuki, 27 deneyli bir ortogonal dizi ile de aynı önemli bilgilere sahip olunabilir. Bu nedenle, maliyetten kazancın yanında zamandan da kazanç vardır³¹.

Tam faktöriyel ile tüm etkileşimler üzerinde çalışılmasına rağmen bu durum ortogonal diziler için söz konusu değildir. Ortogonal dizilerde tüm etkileşimlerle çalışmak olası olmadığı için potansiyel olarak önemli olan etkileşimler planlama safhasında göz önüne alınarak, ortogonal dizilere katılır.

Genel olarak, ortogonal diziler faktörler arasında en az etkileşimin olduğu durumlarda daha iyi sonuç vermektedir³². Taguchi, deneylerin tasarlanmasında faktörlere önem verilmesini önermiştir. Geçmiş teknik tecrübelerden faydalanarak olası en az etkileşime neden olan faktörler kullanılmalıdır. L_{12} , L_{18} , L_{36} ve L_{54} ortogonal dizileri, tüm kolonlara az ya da çok etkileşimleri benzer şekilde dağıtan özel tasarlanmış bir grup diziye örnektir³³.

Ortogonal dizilerin anlaşılmasını kolaylaştırmak için, her bir ortogonal diziye açıklayan standart sembollerin anlaşılması önemlidir.

A : Yapılan deney sayısını,

B : Her kolondaki faktörlerin düzey sayısını,

C : Ortogonal dizideki kolon sayısını başka bir ifade ile toplam faktör ve etkileşim sayısını göstermek üzere her bir dizi

³¹ Peace, a.g.e., s.117.

³² Roy, a.g.e., s.42.

³³ Logothetis, a.g.e., s.124.

$L_A (B^C)$

şeklinde gösterilebilir³⁴.

Ortogonal dizilerin hepsinde B sembolü tek olmayabilir. Örneğin, $L_{54} (2^1 * 3^{25})$ ortogonal dizisinde 54 deney yapıldığını, 26 (25+1) faktör ve etkileşim olduğunu ve bu 26 faktörün 1 tanesinin 2 düzeyli, 25 tanesinin 3 düzeyli olduğunu göstermektedir. Kolonlardaki düzeyler, sayılarına bağlı olarak, 1, 2, 3... gibi gösterilebileceği gibi 0 ve X ya da + ve - ya da L, M, H gibi semboller de kullanılabilir.

Ortogonal diziler değişik düzeylerde bulunabilmektedir. EK 2'de değişik düzeylerde ortogonal diziler görülmektedir. Ulaşılmak istenen amaçların büyük çoğunluğu için iki ya da üç düzeyli ortogonal diziler yeterlidir. Ancak burada önemli olan amaç olduğu için, ona bağlı olarak ortogonal diziyi oluşturacak olan kolonlar (faktör ya da etkileşim) değişik düzeylerde olabilir.

2.7.1. L_2^n Serisi Ortogonal Diziler

Bütün kolonları iki düzeyli olan dizilere 2^n ortogonal dizileri denir. En fazla kullanılan diziler $L_4 (2^3)$, $L_8 (2^7)$, $L_{12} (2^{11})$ ve $L_{16} (2^{15})$ ' dir.

$L_4 (2^3)$ ortogonal dizisi basit olarak iki faktör ve bir etkileşimden oluşan tam faktöriyel bir dizidir. Teknik araştırmalar sonucunda etkileşim az bulunursa, onun yerine üçüncü bir faktör yerleştirilebilir.

³⁴ Peace, a.g.e., s.118.

$L_8 (2^7)$ ortogonal dizisi faktörlerle birlikte etkileşimleri araştırmaya uygun esnek bir dizidir. Yedi faktör ve etkileşime kadar kombinasyonlar bir dizide birleştirilebilir.

$L_{12} (2^{11})$, etkileşim etkilerinin bütün kolonlara yayıldığı tek ortogonal dizidir. Bu nitelik faktör ve etkileşim etkilerinin çakışma olasılığını azaltır. Diğer taraftan, bütün etkileşimler bu dizide birleştirilemezler. Eğer bu dizi tasarım için uygun ise ve etkileşimlerin birleştirilmesi istenirse, etkileşimlerin $L_{16} (2^{15})$ dizisinde birleştirilmesi daha uygun olur.

$L_{16} (2^{15})$ ve $L_{32} (2^{31})$ daha büyük diziler olduğu için faktörlerle (ana etkiler) birlikte etkileşimlere de büyük esneklik sağlamaktadır.

2.7.2. L_3^n Serisi Ortogonal Diziler

Kolonlarında üç düzey olan dizilere 3^n ortogonal dizileri denmektedir. En fazla kullanılan 3^n dizileri $L_9 (3^4)$, $L_{18} (2^1 * 3^7)$ ve $L_{27} (3^{13})$ ' dir. Daha büyük diziler olmasına rağmen, bunlarda deney sayısı arttığı için uygulama zorlukları vardır.

$L_9 (3^4)$ iki faktör ve bir etkileşim ya da dört faktöre kadar araştırma yapmak için tasarlanmış basit bir ortogonal dizidir.

$L_{18} (2^1 * 3^7)$ bir çok yönden tekdir. Birincisi, ilk kolon iki düzeyli iken, diğer yedi kolon üç düzeylidir. İkinci olarak, bu dizi, etkileşimlerin etkisinin kolonlar arasında eşit dağılması yönünden $L_{12} (2^{11})$ dizisi ile, birinci ve ikinci kolonların ilişkisi dışında, aynıdır. Son olarakta, birinci kolon ile ikinci kolon arasında özel bir ilişki vardır. Bu iki kolonun konumu nedeniyle, birinci ve ikinci kolondaki faktörler arasındaki etkileşim başka bir kolonu feda etmeden araştırılabilir.

$L_{27} (3^{13})$ dizisi 3^n Ortogonal dizilerinin en klasik olanıdır ve onüç kolonun tamamında üç düzeylidir. Diziye birçok etkileşim eklenebilmesine rağmen, etkileşim sayısı arttıkça daha az faktör araştırılır.

2.8. Ortogonal Dizilerin Serbestlik Derecesi ile İlişkisi

Deney amacı ve ona bağlı stratejilere göre ortogonal dizi seçimi deney tasarımının ana konularından biridir. Birçok dizi içinden hem verimliliği olumlu etkileyecek hem de en az maliyetli olacak olası en küçük ortogonal dizinin seçimi zordur. Tüm bu şartların sağlanması serbestlik derecesinin hesaplanmasıyla ilişkilidir.

Faktörler üzerine çalışmada serbestlik derecesi miktarının önemli bir konu olduğunun anlaşılması, deney tasarımında ortogonal dizilerin seçiminde önemlidir. Her ortogonal dizinin kendi yapısına göre belirli bir serbestlik derecesi vardır. Ne kadar serbestlik derecesine gerek olduğu bilinirse, yeterli sayıda karşılaştırma ya da serbestlik derecesi sağlayacak uygun bir dizi seçilebilir.

Bir ortogonal dizinin serbestlik derecesi onun her kolonunun düzeyi ile ilgilidir. Eğer bir kolon iki düzeyli ise, buraya iki düzeyli faktör koyulabilir, üç düzeyli ise üç düzeyli faktör yerleştirilebilir.

Ortogonal bir dizinin toplam serbestlik derecesini hesaplamanın daha önceki bölümden başka bir yolu daha vardır.

$L_A (B^C)$ ortogonal dizisinin toplam serbestlik derecesi

Her kolonun serbestlik derecesi $\times$ Kolon sayısı $= (B - 1) \times C$

şeklinde hesaplanabilir³⁵.

$L_8 (2^7)$ için serbestlik derecesi $= (2 - 1) \times 7 = 7$ 'dir.

Genel olarak faktörlerin bir dizinin kolonlarına yerleştirilmesinde yapılan basitçe, aynı düzeydeki faktör ve kolonun eşlenmesidir. Fakat etkileşimler için aynı durum her zaman olası değildir. Üç düzeyli faktörlerin olduğu bir dizide her kolonda iki serbestlik derecesi vardır. İki faktörün arasındaki etkileşimi diziye yerleştirmek için dört serbestlik derecesine $[(3 - 1) \times (3 - 1)]$ gerek vardır. Dizide iki serbestlik derecesi olduğu için, iki serbestlik derecesine sahip iki kolon $(2 \text{ serbestlik derecesi} \times 2 \text{ kolon} = 4 \text{ serbestlik derecesi})$ kullanılacaktır. $L_9 (3^4)$ ya da $L_{27} (3^{13})$ ortogonal dizilerine de etkileşim yerleştirilmesi iki kolonu içine alır ve bu dizilerdeki iki faktör azaltılır.

³⁵ Fowlkes, Creveling, a.g.e., s.137.

2.9. Doğrusal Grafikler

Faktörler arasındaki etkileşimin ortogonal bir dizi içindeki uygun kolonlara rastgele dağıtılması yanlış ve eksik sonuçların elde edilmesine yol açar. Bu tip deney tasarım hatalarını engellemek için, Taguchi, etkileşimlerin uygun kolonlara yerleştirilmesine yardımcı olacak, bir sistem geliştirmiştir³⁶. Faktörlerin aralarındaki ilişkileri ve bunların etkileşimleri grafiksel olarak gösterilebilirse, deney tasarımı yapan kişi faktörleri ve etkileşimlerini karıştırmadan sistematik olarak kolonlara yerleştirebilir. Bu grafiksel gösterime doğrusal grafikler denir³⁷.

Doğrusal grafikler birbirine doğru parçaları ile bağlanan noktalar ya da yuvarlaklardan meydana gelir. Doğrusal grafik içindeki her nokta ya da yuvarlak bir faktörün yerleştirilebileceği bir kolonu göstermektedir. Noktaları birbirine bağlayan doğru parçaları her iki uçtaki faktörlerin (noktaların) etkileşimlerini temsil etmektedir. Doğru parçası üzerindeki sayı ise etkileşimin dizi içindeki yerleştirilmesi gerekli olan kolon sayısını gösterir. Ortogonal dizinin büyüklüğüne bağlı olarak, doğrusal grafikler basitten karışığa kadar değişiklikler gösterir. Ayrıca, ortogonal dizinin büyüklüğüne bağlı olarak, birden çok doğrusal grafik çizimi söz konusu olabilir. Büyük ölçekli ortogonal diziler için diğer bir özellik ise bu diziyi temsil eden doğrusal grafiğe birden çok sayıda numaralandırma yapılabilmesidir. Başka bir deyişle, aynı grafiksel şekle sahip birden çok doğrusal grafikte, kolonlar ve etkileşimleri değişik nokta ve doğru parçalarında olabilir. Aynı şekle sahip değişik doğrusal grafiklerin olması esneklik

³⁶ "Madhav S. Phadke, "Quality Engineering Using Design of Experiments," *Proceedings of The American Statistical Association*, 11-20, (1982), s.14" Khosrow Dehnad, *Quality Control, Robust Design, and The Taguchi Method* (USA: Wadsworth and Brooks/Cole, 1989), s.34' deki alıntı.

³⁷ Peace, a.g.e., s.138.

sağladığı için en verimli deneyin tasarlanmasına yardımcı olur. Tüm bu anlatılanların daha iyi anlaşılması için EK 3'deki bazı ortogonal dizilerin standart doğrusal grafiklerine bakmakta fayda vardır.

2.9.1. Faktörlerin Doğrusal Grafiğe Atanması

Bir deneyin tasarlanması en kolay şu basamaklar izlenerek yapılabilir³⁸:

1. **Ortogonal Dizinin Seçilmesi:** Bu basamak ilk önce faktörler ve etkileşimleri üzerinde çalışmak için gerekli olan toplam serbestlik derecesinin hesaplanmasını ister. Daha sonra, hesaplanan serbestlik derecesi ortogonal dizilerin serbestlik dereceleri ile karşılaştırılır ve en az istenen kadar serbestlik derecesine sahip olan en küçük dizi seçilir.
2. **İstenen Doğrusal Grafiğin Çizilmesi:** Tanımlanan faktörlere ve etkileşimlere göre doğrusal grafik oluşturulur. Nokta ya da yuvarlaklar kullanılarak faktörler temsil edilir ve bunlar birleştirilerek deneyde olması planlanan etkileşimler gösterilir.
3. **İstenen Grafiğin Standart Doğrusal Bir Grafik ile Eşlenmesi:** EK 3'deki standart doğrusal grafikler kullanılarak ikinci basamakta çizilen grafik diğer grafiklerle karşılaştırılır. Standart doğrusal grafikler içinden çizilene en yakın olanı seçilir.
4. **İstenen Doğrusal Grafiğin Yeniden Çizilmesi:** Önceden çizilen grafik Basamak 3'de seçilen standart doğrusal grafiğe şekli benzetilerek yeniden çizilir.
5. **Faktörlerin ve Etkileşimlerin Atanması:** Her faktör ve etkileşim nokta ya da doğru parçasında işaretlenir. Eğer bir doğru parçasının etkileşimi temsil etmesi istenmiyorsa, bu doğru parçası bir faktörün atanması için kullanılabilir.

³⁸ Peace, a.g.e., s.156.

6. Standart Doğrusal Grafik için Alternatif Numaralandırmaların Karşılaştırılması

(Eğer varsa): Seçilen ortogonal dizinin birden çok aynı şekle sahip doğrusal grafikleri varsa, daha pahalı ve değiştirmesi zor faktörlerin atanabileceği potansiyel kolonlar karşılaştırılır. Önceden seçtiğiniz doğrusal grafikten daha verimli olanı bulunursa, doğrusal grafik yeni olanı ile değiştirilir ve noktalar ve doğru parçaları yeniden numaralandırılır.

2.9.2. Standart Doğrusal Grafiklerin Değiştirilmesi

Her zaman, deneye uygun çizilen doğrusal grafik için standart bir doğrusal grafik bulunmayabilir. Bazı özel durumlarda, bir sonraki büyük dizi seçilmek durumunda kalınabilir. Genellikle, standart doğrusal grafiklerde yapılan değişikliklerle, deneysel matrisin büyüklüğünü arttırmadan, faktör ve etkileşimler uygun kolonlara atanabilir.

Seçilen standart doğrusal grafikte değişiklik yapılması, etkileşimlerin atanması için seçilen kolonların yeniden yerleştirilmesini gerektirir. ‘İki Kolon Arasındaki Etkileşimler’ adlı özel tablolar, dizideki olası her faktör atamalarının birleştirilerek bir etkileşim atanması durumunda, uygun kolonun bulunması amacıyla geliştirilmiştir. Bu referans tablosu, karışıklığı engeller ve faktörlerin ve etkileşimlerin etkilerinin bozulmamasını garanti ederken aynı zamanda, tasarım çabalarını basitleştirir. İki kolon arasındaki etkileşimler tabloları EK 4’ de bulunmaktadır. Bu tablolara bakıldığı zaman şekil olarak üçgen oldukları ve her kolon ve satırın ortogonal dizideki faktöre atanan bir kolonu temsil ettiği görülmektedir. Her faktörün matrisdeki kolon numarasının kesiştiği

yerdeki numara, bu faktörlerin etkileşiminin atanacağı uygun yeri gösterir. Örneğin, A faktörü 3 numaralı kolona ve B faktörü 9 numaralı kolona atanmışsa, AB etkileşiminin atanacağı yer bu ikisinin kesiştiği 10 numaralı kolondur. Üç düzeyli iki faktör etkileşiminin atanacağı kolona bakıldığı zaman iki kolon sayısı görülür. Bunun nedeni etkileşimin ($2 \times 2 = 4$) dört serbestlik derecesinde olmasıdır.

Standart grafiklerin gerektiğinde değiştirilmesinde yeni bir yol öğrenildikten sonra faktörlerin ve etkileşimlerinin ortogonal bir diziye atanması basamakları yeniden şu şekli alır³⁹:

1. Ortogonal dizinin seçilmesi

A. Toplam serbestlik derecesinin hesaplanması

B. En uygun ortogonal dizi için serbestlik derecesinin hesaplanması

C. İstenilen serbestlik derecesini içeren en küçük dizinin seçilmesi

2. İstenilen doğrusal grafiğin çizilmesi

3. Çizilen grafiğe en uygun standart doğrusal bir grafiğin bulunması

4. İstenilen doğrusal grafiğin standart doğrusal grafiğe uygun olarak yeniden çizilmesi

5. Faktör ve etkileşimlerin atanması

Eğer bütün etkileşimler uygun şekilde atanabiliyorsa 8 numaralı basamağa git.

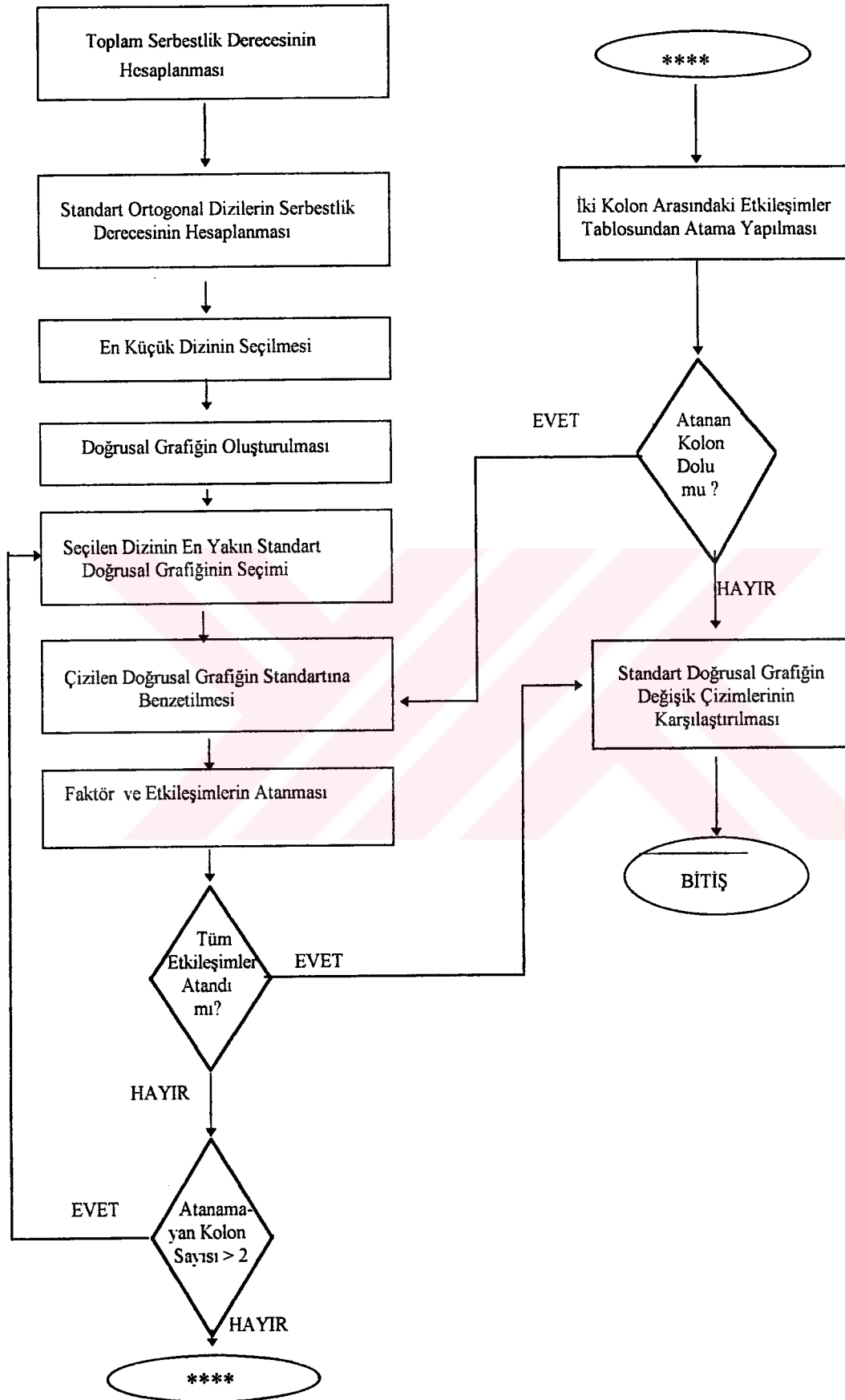
6. Atanamayan etkileşim(ler) için belirlenen kolon(lar) ‘ İki Kolon Arasındaki Etkileşimler’ tablosundan bulunur.

7a. Eğer atama yapılan kolon dolu değil ise etkileşim kolona atanır.

7b. Eğer atama yapılan kolon dolu ise, istenilen grafik yeniden çizilerek bir ya da daha fazla faktör değişik kolonlara atanır. Basamak 6’ya geri dönülür.

³⁹ Peace, a.g.e., s.157.

Şekil 11. Faktörlerin ve Etkileşimlerin Ortogonal Bir Diziye Atanması



8. Orjinal standart doğrusal grafiğe dayanarak değişik çizimleri karşılaştır (Eğer varsa).

Yukarıda izlenecek basamaklara ek olarak faktör ve etkileşimlerin atanmasında, ikiden daha fazla etkileşimin atanması yapılamazsa, büyük olasılıkla yanlış doğrusal grafik seçilmiştir. Seçilen doğrusal grafik değiştirilmeli ve atamalar yeniden yapılmalıdır. Yukarıda söz edilen basamakların daha iyi izlenebilmesi için Şekil 11'deki akış şeması çizilmiştir.

2.10. Çok Düzeyli Ortogonal Diziler

Gerçek hayatta, faktörler her zaman sadece iki ya da üç düzeyli olmayabilir. Değişik düzeylere sahip faktörlerin aynı deney içinde kullanılması gerekebilir. Dört , sekiz ya da dokuz düzeyli faktörlerin deney için tasarımı istenebilir. Bu durumda, değişik düzey sayılarına sahip faktörler için özel tasarım teknikleri kullanılmaktadır⁴⁰.

2.10.1. İki Düzeyli Ortogonal Dizilerden İkinci Katları Düzeyli

Ortogonal Dizilerin Oluşturulması

Dört düzeyli bir faktörün gerekli olduğu deneyde, iki düzeyli dizilerden kolaylıkla faydalanılır. Dört düzeyli bir faktör için üç serbestlik derecesi gereklidir. İki düzeyli ortogonal dizinin her bir kolonu bir serbestlik derecesine sahip olduğuna göre dört düzeyli bir faktör için üç kolonun birleştirilmesi gereklidir⁴¹.

⁴⁰ Logothetis, a.g.e., s.124.

⁴¹ Ross, a.g.e., s.102.

$L_8 (2^7)$ ortogonal dizisine dört düzeyli bir faktör yerleştirilmek istendiği varsayılırsa, birleştirilecek üç kolonun belirlenmesinde doğrusal grafik kullanılır. Doğrusal grafik üzerinden iki nokta ve bu iki noktayı birleştiren çizgi doğrusu seçilir. 1 ve 2 no'lu kolonların olası her kombinasyonu dört (2^2) düzeyin kolona yerleştirilmesinde kullanılır. Bu durum, matematiksel olarak (Düzyay Sayısı)^{kolon sayısı} şeklinde ifade edilir. $L_8 (2^7)$ ortogonal dizisinin doğrusal grafiğinden 1,2 ve 3 no'lu kolonlar birleştirmek için seçilir. Oluşturulan $L_8 (4 * 2^4)$ ortogonal dizisi bir adet dört düzeyli ve dört adet iki düzeyli faktörden meydana gelir. Dört düzeyli bir faktör ve iki düzeyli dört faktörden meydana gelen başka kombinasyonlar da L_8 ortogonal dizisinde oluşturulabilir. 1, 2 ve 3 no'lu kolonlar yerine, 1, 4 ve 5 no'lu kolonlar kullanılabilir. Dikkat edilmesi gereken konu, iki kolon seçilirken bu kolonların etkileşim kolonlarının da dahil edilmesidir.

Sekiz düzeyli bir faktörün gerekli olduğu durumda ise, yedi serbestlik derecesine ve yedi adet iki düzeyli kolona gereksinim vardır. Sekiz düzeyli faktörün oluşturulmasında kullanılan yöntem de dört düzeyli faktörünki ile benzerdir. Sekiz düzeyin yeni kolona yerleştirilmesinde öyle üç kolon seçilmelidir ki, bu üç kolonun herbiri diğer ikisi ile etkileşimde olmamalıdır.

$L_{16} (2^{15})$ ortogonal dizisinde 1,2 ve 4 no'lu kolonlar seçilirse, bunların birbiri ile etkileşimleri olan 3, 5, 6 ve 7 no'lu kolonlar diziden çıkarılır. Bu üç kolonun her olası kombinasyonu (2^3) sekiz değişik düzeyin yerleştirilmesini sağlar. Sonuçta, sekiz düzeyli bir kolon ve iki düzeyli sekiz kolondan meydana gelen $L_{16} (8 * 2^8)$ ortogonal dizisi

oluşur. Ayrıca, yukarıdaki yöntem uygulanarak $L_{16} (2^{15})$ ortogonal dizisinden beş 4 düzeyli kolondan oluşan $L_{16} (4^5)$ ortogonal dizisi oluşturulabilir.

2.10.2. Üç Düzeyli Ortogonal Dizilerden Üçün Katları Düzeyli

Ortogonal Dizilerin Oluşturulması

Bir önceki kısımda izlenen yolun benzeri izlenerek, üç düzeyli ortogonal dizilerden çok düzeyli kolonlar oluşturulabilir. Yeni kolonun düzeyi üçün katları olduğu sürece, oluşturulan dizi ortogonaldır. n düzeyli bir kolonun oluşturulması için $n-1$ serbestlik derecesine gereksinim olduğuna göre, üç düzeyli bir ortogonal dizide $(n-1) / 2$ kolona (her biri iki serbestlik derecesinde) gerek vardır⁴².

Üç düzeyli ortogonal bir dizide dokuz düzeyli bir kolon (faktör) oluşturabilmek için iki düzeyli dizide olduğu gibi iki kolona ve onların etkileşimlerine gerek vardır. $L_{27} (3^{13})$ ortogonal dizisini ele alırsak, dokuz düzeyli bir kolon için bu diziden 1 ve 2 no'lu kolonları ve onların etkileşimleri 3 ve 4 no'lu kolonlar da diziden alınır. Yeni kolonun dokuz düzeyli (3^2) 1 ve 2 no'lu kolonların kombinasyonlarına karşılık gelir.

2.10.3. Değişik Düzeydeki Faktörlerden Ortogonal Bir Dizin

Oluşturulması

L_3^n serisi ortogonal dizinin bir deneyde kullanılmasında, tüm faktörlerin üç düzeyli ya da üçün katları düzeyli olması gerekir. Ancak bu durum her zaman olası

⁴² Logothetis, Wynn, a.g.e., s.126.

değildir. Kimi faktörler ürün ya da sürecin gereği olarak iki düzeyli olarak sınırlandırılabilir. L_3^n serisi ortogonal bir diziye iki düzeyli bir faktör yerleştirilmesi gerektiği zaman, hakkında daha fazla bilgi elde edilmek istenen düzey tekrar edilir⁴³. Başka bir deyişle, bu kolonun düzey sayısı azaltılır (Dummy Treatment). Bir faktörün düzey sayısı azaltılınca, bu düzey yerine tekrar edilen düzeye üssü(') işareti koyulur. Böylece, üç düzey gibi görünen kolona gerçekte iki düzey yerleştirilir ve dizinin dengesi bozulmaz. Sonuçların analizinde de tekrarlanan düzeyler birleştirilerek, diğer düzeylerle karşılaştırılır.

Önceki iki kısımda söz edilen, değişik düzeydeki bir faktörün ortogonal diziye eklenmesi durumlarından hiç birine uygun olmayan faktörler için de bu yöntem kullanılır. Altı ya da yedi düzeyli bir faktör iki düzeyli ortogonal bir diziye yerleştirilmek istenirse, bu faktöre ayrılan kolon ancak sekiz düzeyli olur. Sekiz düzeyli kolon L_{16} ya da L_{32} ortogonal dizisinde deney tasarımının dengesini bozmadan oluşturulabilir.

Ancak, bu yöntemde ilk olarak, en yakın çok düzeyli dizi oluşturma olasılığının göz önüne alınması nedeni ile, faktörün düzeyine uygun olan $L_{16} (2^{15})$ ortogonal dizisi seçilir. Seçilen bu dizi faktörün düzeyine göre çok düzeyli dizi durumuna getirilir ($L_{16} (8 * 2^8)$). Faktörün istenilen düzey sayısından fazla olan boş düzeyler ($8-6 = 2$), daha fazla bilgi elde etmek istenilen diğer düzeylerle tekrar edilir. Tekrar edilmek istenilen düzeyler 1 ve 2 no'lu düzeyler ise kolonda 7 ve 8 no'lu düzeyleri gösteren bu sayıların

⁴³ Barker, a.g.e., s.166.

yerine sırasıyla 1' ve 2' sayıları yerleştirilir. Böylece, ortogonal dizinin dengesi bozulmadan altı düzeyli faktör kolona yerleştirilir.

Serbestlik derecesi küçük ölçekli ortogonal bir dizi için yeterli gelmesine rağmen faktör sayısı yeterli gelmeyen dizilerde bir sonraki büyük ortogonal dizinin kullanılması deney sayısını arttırması nedeni ile çok maliyetli ve zor ise iki ya da daha fazla faktör tek bir kolonda birleştirilerek küçük ölçekli ortogonal dizi kullanılabilir⁴⁴ (Combination Design). Burada tek koşul birleştirilen faktörlerin toplam serbestlik derecesi ile kullanılan kolonun serbestlik derecesinin eşit olmasıdır. Faktör sayısını ve deney sayısını azaltması nedeni ile bu yöntem kontrol edilebilen faktör matrisinden daha çok gürültü faktör matrisinde kullanılmaktadır. Birleştirme yöntemin kontrol edilebilen faktör matrisinde kullanılmak istenmemesinin en büyük nedeni birleştirilen faktörlerin birbirlerine karşı dengelerini kaybetmesi ve birleştirilen faktörlerin birbirleriyle etkileşimi hakkında bilgi elde edilememesidir.

İki düzeyli iki faktör A ve B ($2(2-1) = 2$) üç düzeyli bir kolona ($3-1 = 2$) yerleştirilmek istenirse, bunların birleşim kombinasyonları şunlardır: A_1B_1 , A_2B_1 , A_1B_2 , A_2B_2 . Bunların içinden üç tanesi rasgele seçilerek birleştirme şu şekilde yapılabilir:

$$A_1B_1 = (AB)_1$$

$$A_2B_1 = (AB)_2$$

$$A_1B_2 = (AB)_3$$

⁴⁴ Kwok-Leung Tsui, "An Overview of Taguchi Method and Newly Developed Statistical Methods for Robust Design," *IIE Transactions*, V.24, No.5: 44-57, (Nov.1992), s.45.

Görüldüğü gibi kombinasyonların sadece üçü kullanılmaktadır ve kolonun dengesi bozulmaktadır. Tüm bu nedenlerle, zorunlu olmadığı sürece faktörlerin birleştirilmesi yöntemine başvurulmaz.

3. TAGUCHİ YÖNTEMİ YAKLAŞIMI VE UYGULAMASINDA TEMEL BASAMAKLAR

3.1. Ürün ve Üretim Süreci Tasarımına Taguchi Yaklaşımı

Taguchi' nin başarısı şu üç temel görüşünde yatmaktadır: Ekonomik olarak yüksek kaliteye ulaşmak, hedef değerlerden az sapmak ve fonksiyonel performansda süreklilik sağlamak. Taguchi yönteminin ana amacı kaliteyi artırırken aynı zamanda maliyeti azaltmaktır. Başka bir deyişle, kalite geliştirme faaliyetleri içinde yer alan maliyetleri azaltmaktır. Kalite maliyetinin içine deneyler, reddedilenler, muayeneler, yeniden yapılan işlemler, garanti sonucu gereken servis ve kalitesiz ürünlerin neden olduğu pazar kayıpları da girmektedir⁴⁵.

Ürün ve üretim sürecine ilişkin tüm spesifikasyon faktörlerinin ideal değerleri ve bu değerlerin etrafındaki toleransları ile birlikte verilmesi gerekir. Endüstrideki yaygın uygulama olan ürün spesifikasyonlarının tolerans aralığının verilmesi hatalı sonuçlara neden olabilmektedir. Ürün faktörlerinin tolerans aralığına çok yakın olmasından dolayı ürün performansı düşük olabilmektedir.

⁴⁵Logothetis, a.g.e., s. 242.

Ürün ya da üretim süreci performansının en iyi olabilmesi için tüm faktörlerin ideal değerde olması gerekmektedir. Ürün ve üretim sürecine ilişkin ideal değerlere uygunluğu sağlama çalışmaları sürekli kalite geliştirmenin itici gücünü oluşturmaktadır⁴⁶.

Taguchi ürün ya da üretim süreci tasarımını üç aşamalı bir program olarak görmüştür⁴⁷:

1. Sistem tasarımı
2. Parametre tasarımı
3. Tolerans tasarımı

3.1.1. Sistem Tasarımı

Sistem tasarımı müşteriye yeni ya da geliştirilmiş ürünleri sunmak için yeni kavram, fikir ve yöntemlerin geliştirildiği aşamadır. Yeni kavram ve fikirler geçmiş tecrübeler, bilimsel bilgilere, keşiflere ya da her üçüne birden dayanabilir. Sistem tasarımının temelindeki strateji yeni fikir ve kavramların ele alınarak gerçek hayatta kullanılabilir duruma dönüştürülmesidir. Sert rekabetin yaşandığı bir pazarda hayatta kalmanın bir yolu da teknoloji kullanımında lider olmaktır. Bu nedenle bu aşamada prototip tasarımına ilişkin bilimsel ve mühendislik bilgileri uygulanır. Ürün ya da sürecin prototip modelinde faktörlerin tanımı yapılır ve uygulamaya yönelik düzey

⁴⁶ Peşkircioğlu, a.g.m., s.86.

⁴⁷ Genichi Taguchi ve Yu-In Wu, *Introduction to Off-Line Quality Control*, (Japan: Central Japan Quality Control Association, 1979), s.29.

değerleri belirlenir. Ayrıca, faktörün ve düzeylerinin tanımları yapılırken müşteri gereksinimleri ile üretim sürecinin çevresel faktörleri de dikkate alınır⁴⁸.

3.1.2. Parametre Tasarımı

Taguchi parametre tasarımının özü, ürün ya da üretim süreci performans değişkenliğini azaltmak için ürün ya da üretim süreci faktörlerinin doğrusal olmayan etkilerinin kullanılmasında yatmaktadır. Parametre tasarım aşaması ürün ya da üretim sürecinin sürekliliğini geliştirmek için önemlidir. Parametre tasarımı ile performansın bozulmasına neden olan faktörlerin kontrol altına alınması yerine bu faktörlerdeki değişimlerden en az etkilenecek olan ürün ve üretim süreci tasarımları elde edilmeye çalışılmaktadır. Böylece tasarım, değişime neden olan faktörlerdeki değişkenliklerden en az etkilenecek ve performansın bozulmasının önüne geçilirken maliyet de en aza indirilecektir.

İstatistiksel planlanan deneyler ürün ve üretim sürecindeki değişimi en aza indirecek olan faktörlerin belirlenmesinde kullanılabilir. Taguchi, ürün ve üretim sürecine ilişkin performans karakteristiklerini etkileyen değişkenleri gürültü kaynakları ve kontrol faktörleri adı altında iki grupta toplamıştır. Parametre tasarımı da bu değişkenlerin gruplandırılmasına dayanmaktadır⁴⁹.

⁴⁸ Lochner, Matar, **a.g.e.**, s.16.

⁴⁹ Raghu N. Kacker, "Off-line Quality Control, Parameter Design and Taguchi Method," **Journal of Quality Technology**, V.17: 176-209, (Oct. 1985), s.183.

3.1.2.1. Gürültü kaynakları

Gürültü kaynakları performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına neden olan tüm değişkenlerdir. Gürültü kaynakları üzerinde üreticinin doğrudan etkisi yoktur ve bunlar müşterinin çevresine ve kullanımına bağlı olarak değişiklik gösterir. Taguchi, Şekil 12' de görüldüğü gibi, gürültü kaynaklarını genel olarak

1. Dış gürültü (Outer noise)
2. İç gürültü (Inner noise)
3. Ürünler arası gürültü (Between product noise)⁵⁰.

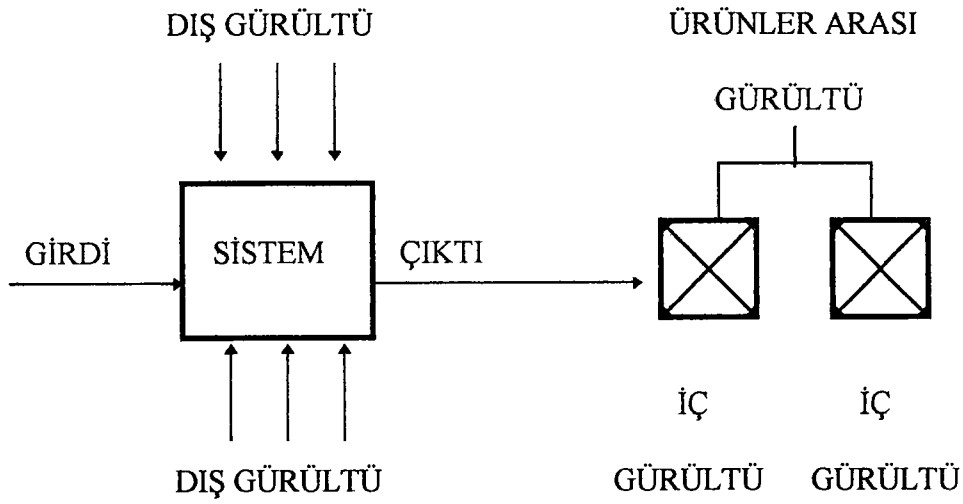
şeklinde üç gruba ayırır.

Dış gürültü, ürünün kendisi dışında performansını etkileyen değişkenlerdir. Başka bir deyişle, değişime neden olan dış güçlerdir. Buna örnek olarak, sıcaklık, nem, toz ve titreşim gibi çevre değişkenlerindeki değişimler verilebilir. Ayrıca, bir işin farklı çalışanlar tarafından yapılması da dış gürültü olarak kabul edilebilir.

İç gürültü, ürünün gerçek karakteristiklerinin nominal değerinden sapmasıdır. İç gürültünün neden olduğu değişimler, aslında ürünü oluşturan elemanların neden olduğu değişimlerdir. Ürünü oluşturan malzemenin bozulmaya eğilimli olması bir iç gürültüdür. İç gürültüye en büyük örnek olarak ürünü oluşturan parçaların bozulmaları verilebilir.

⁵⁰ Peace, a.g.e., s.76.

Şekil 12. Gürültü Kaynakları



Kaynak: Glen S. Peace, *Taguchi Methods: A Hands-on Approach to Quality Engineering*, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1993), s.131.

Bazı durumlarda, dış gürültü de gerçek ürün karakteristiklerinin nominal değerinden değişimini arttırarak, ürün performansını dolaylı yoldan etkileyebilir. Örneğin, yüksek ısı ve nem de ürünün çabuk bozulmasına neden olabilir ve iç gürültünün kaynağıdır. Eğer bir ürünün performansı iç gürültüye duyarsız (robust) ise, iç gürültünün düzeyini arttırarak performansı etkileyen dış gürültüye de duyarsızdır.

Üretimi tamamlanmış iki ürün arasındaki farklara **ürünler arası gürültü** denir ve genellikle üretim hatasından kaynaklanmaktadır. Üretimin yapıldığı yer, üretim tarihi ve ürünün üretim sırası, ürünler arası gürültüye bir kaç örnek olarak verilebilir.

Fiziki sınırlamalar ve bilgi yetersizliğinden dolayı tüm gürültü kaynakları parametre tasarım deneylerinde dahil edilemez. Gürültü faktörleri parametre tasarım deneylerine dahil edilen gürültü kaynaklarıdır. Gürültü faktörleri bir ürünün

performansını etkileyen sapma kaynaklarını temsil etmelidir. İç ve dış gürültü faktörlerinin etkisi kontrol faktörlerinin değeriyle değişebildiği için parametre tasarımı yapılabilir.

Gürültü faktörlerinin varlığının bilinmesi ve bu faktörlerin çeşitlerinin ürün kalite karakteristiği üzerine etkilerinin anlaşılması, parametre tasarımında bunların etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalara yardımcı olur. Gürültü faktörlerinden kurtulmak olası ya da uygulanabilir değildir, ancak ürün ya da süreç bu gürültü faktörlerine duyarsız duruma getirilebilir. Bu duruma Taguchi duyarsızlık (robustness) demektedir.

3.1.2.2. Kontrol faktörleri

Kontrol faktörleri, nominal değerleri sorumlu mühendis tarafından seçilen ürün ya da süreç parametreleridir. Kontrol faktörleri, teknik çalışmalar ile nominal kombinasyonların oluşturulduğu ürün ya da sürecin tasarım spesifikasyonlarını tanımlayan faktörlerdir.

Değerleri kolaylıkla değiştirilebilen kontrol faktörleri iç ve dış gürültü faktörlerinin etkisini değiştirebilmekte ve bu nedenle **kontrol edilebilen faktörler** adını da almaktadır⁵¹. Kontrol faktörleri birden fazla değer alabilmekte ve bunlara da **düzey** adı verilmektedir. Parametre tasarımında, kontrol edilebilen faktörlerin değerleri tanımlanarak, gürültü faktörlerinin neden olduğu performans değişkenliği azaltılmaya

⁵¹ Ramon V. Leon, Anne C. Shoemaker ve Kwok-Leung Tsui, "Discussion," *Technometrics*, V. 35, No.1: 21-24 (Feb. 1993), s.23.

çalışılırken, aynı zamanda performans değeri hedefte tutulmaya çalışılmaktadır. Diğer bir ifadeyle, gürültü faktörlerine karşı duyarsız kontrol faktör düzeyleri belirlenmeye çalışılır⁵².

Bazı kontrol faktörleri performans değerinin değişkenliğini etkilerken, bazı kontrol faktörleri de performans değerinin sadece ortalamasını etkiler ve bu faktörlere **düzeltilme faktörü** adı verilir. Ayrıca, ne performans değerinin değişkenliğini ne de ortalamasını etkileyen faktöre **nötr (etkisiz) faktör** denir. Bu faktörler kontrol edilebilen faktörler içinde fazla dikkate alınmamasına rağmen, en ekonomik düzeylerinde tutulması maliyetlerin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bu faktörler hakkında bilgi elde edilmesi önemlidir.

Taguchi yaklaşımı, yoğunluğu değişkenlik üzerine verir. Amaç, düzeltme faktörünün uygun ayarlaması ile istenilen ortalama performansı sağlarken, kontrol faktöründe değişiklik yaparak, değişkenliği azaltmaktır. Başka bir deyişle, Taguchi parametre tasarımının amacı ürün ya da sürecin gürültü faktörlerine karşı duyarsızlığını sağlamaktır

3.1.2.3. Parametre tasarım deneyinin genel modeli

Parametre tasarım deneyinin genel modeli Şekil 13’de gösterilmektedir. Bu fonksiyonda kontrol faktörlerinin, θ , değişik değerleri için gürültü faktörleri, w , bir çıktı oluşturur. Çıktının transfer fonksiyonu $f (w, \theta)$ ile belirlenir. Gürültü

⁵² Raghu N. Kacker ve Anne C. Shoemaker, “Robust Design: A Cost-Effective Method for Improving Manufacturing Processes,” *AT&T Technical Journal*, V.65, No.2: 51-68, (1986), s.53.

kaynaklarının rassal olduğu kabul edildiği için çıktı da rassal olacaktır. Çıktının değeri ideal kabul edilen hedef değer t' den farklı olursa bir kayıp söz konusudur.

Parametre tasarımının amacı, hedef değerden sapmanın sonucunda ortaya çıkan ortalama kaybı enazlayan kontrol faktör değerlerinin bulunmasıdır. L kayıp fonksiyonu ve gürültü faktörünün beklenen değeri E olmak üzere, ortalama kayıp

$$R(\theta) = E [L(Y, t)]$$

şeklindedir.

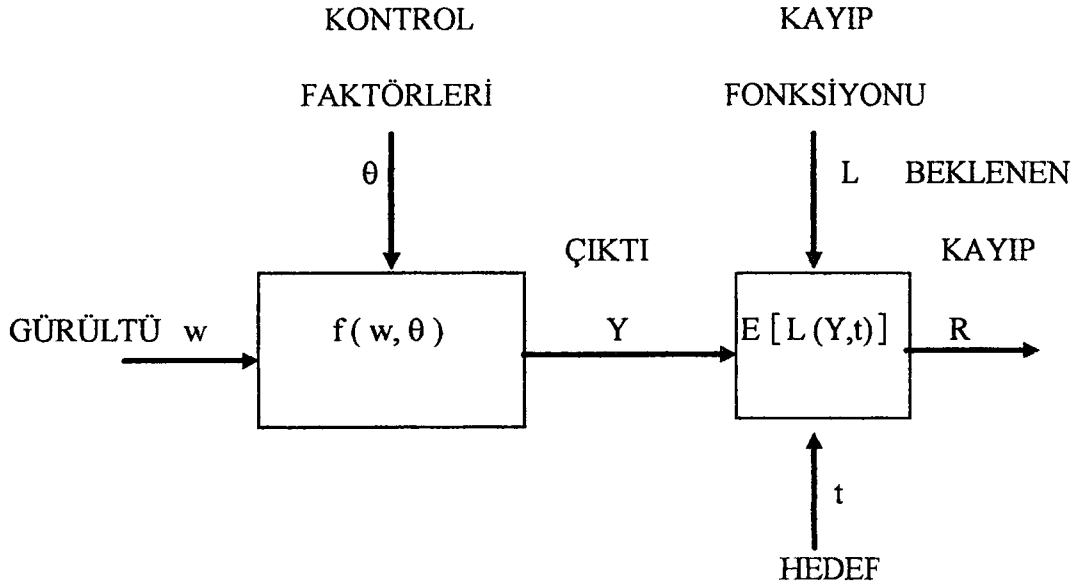
Taguchi hedef sabit olduğu için bu modele **statik parametre tasarım modeli** adını vermiştir⁵³.

Şekil 13'deki parametre tasarım deneyinin genel modelinde gürültü ile birlikte işaret faktörü s 'de girdiye, yani transfer fonksiyonuna, eklenirse bu model dinamik parametre tasarım modeli adını alır, çünkü çıktı ve hedefin bağlı olduğu işaret faktörü sabit değildir. Ayrıca, işaret faktörü ve değeri, deneyi tasarlayanlar tarafından belirlenir⁵⁴. Örneğin, tartı gibi bir ölçüm aleti dinamik bir sistemdir, çünkü ağırlık okuma olan çıktısı işaret faktörüne, tartılan kişinin gerçek ağırlığına, bağlıdır. Ağırlık okumak da sıcaklık gibi bir gürültü faktöründen etkilenir.

⁵³ Ramon V. Leon, Anne C. Shoemaker, Raghu N. Kacker, "Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios," *Technometrics*, V.29, No.3: 253-265, (Aug. 1987), s.256.

⁵⁴ S.D. McCaskey, K.L. Tsui, "Analysis of Dynamic Robust Design Experiments", *International Journal of Production Research*, V.35, No.6:1561-1574, (May 1997), s.1562.

Şekil 13. Parametre Tasarım Deneyinin Genel Modeli



Kaynak: Ramon V. Leon, Anne C. Shoemaker, Raghu N. Kacker, "Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios," *Technometrics*, V.29, No.3: 253-265, (Aug.1987), s.256.

3.1.2.4. Parametre tasarım deneyinin oluşturulması

Taguchi parametre tasarım deneyi iki bölümden oluşmaktadır: tasarım matrisi ve gürültü matrisi. Taguchi bu bölümlerden birincisine iç dizi (inner array), diğerine ise dış dizi (outer array) adını vermiştir.⁵⁵

Tasarım matrisi, kontrol faktörlerinin test değerlerini belirler. Matrisin kolonları kontrol faktörlerini ve her satırı belirli bir ürün ya da süreç tasarım kombinasyonunu temsil eder. Her satır aynı zamanda değişik kontrol faktörlerinin oluşturduğu kombinasyonun bir testidir.

⁵⁵ Logothetis, a.g.e., s.246

Taguchi, kontrol faktörlerinden oluşan tasarım matrisinin kurulması için ortogonal dizileri tavsiye eder. Ortogonal diziler kontrol faktörlerinin çok değişik değerler almasına olanak sağlar. Taguchi her kontrol faktörü için üç ya da daha fazla test değerinin olması gerektiğini söyler. Üç ya da daha fazla test değeri kontrol faktörlerinin performans karakteristiği üzerindeki doğrusal olmayan ilişkisini gösterir⁵⁶.

Gürültü matrisi, gürültü faktörlerinin test düzeylerini belirlerken, matrisin her kolonu gürültü faktörlerini ve her satırı da gürültü faktör düzeylerinin değişik kombinasyonlarını temsil etmektedir.

Taguchi, gürültü matrisinin kurulmasında da, tasarım matrisinde olduğu gibi, ortogonal dizileri tavsiye eder. Gürültü matrisi rasgele değil, özel seçilmiş gürültü faktörlerinden oluşur. Eğer gürültü faktörünün düzeyi tarafsız olarak seçilirse, ortogonal dizi gürültü uzayını istenilen şekilde kapsayamaz.

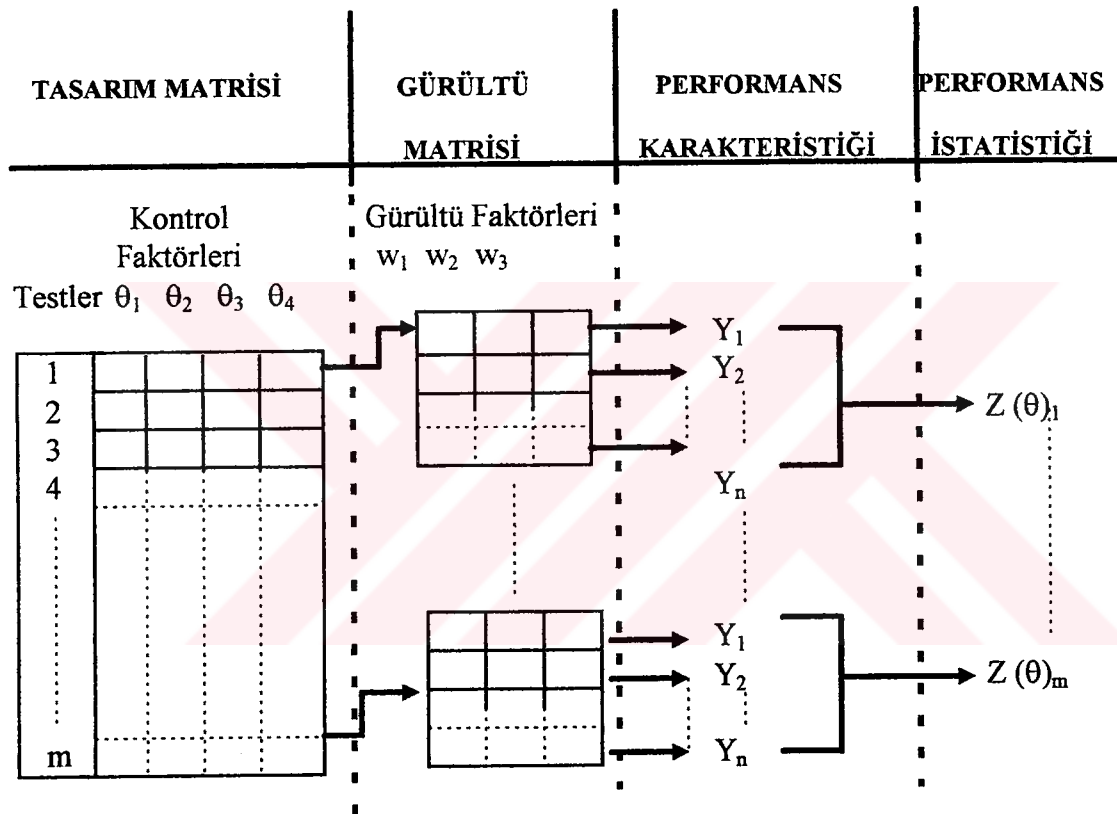
Tam parametre tasarım deneyi, Şekil 14’de görüldüğü gibi kontrol ve gürültü faktörlerinin oluşturduğu kombinasyonlardan meydana gelmektedir.

Eğer tasarım matrisi m satır ve gürültü matrisi n satır ise, birleşik parametre tasarım matrisindeki toplam satır sayısı $m \times n$ ’ dir. m satırlı tasarım parametre matrisinin her bir satırı için gürültü faktör matrisinin n satırı kadar ya da daha fazla ürün performansı hakkında gözlem yapılır. Seçilen gürültü faktör düzeylerine ve gürültü faktör matrisine göre, bu gözlemler, gürültü faktörlerinin bütün olası düzeylerinin

⁵⁶ Kackar, R. N., a.g.m., Oct. 1985, s.195.

performans karakteristiği üzerine etkilerini gösterir. Tasarım matrisindeki her test sonucunda performans karakteristiği hakkında elde edilen gözlem sonuçları performans istatistiği denilen kriterin hesaplanmasında kullanılır. Tasarım matrisindeki m test ile ilgili m performans istatistiği, beklenen kaybı en aza indirmek için kontrol faktörlerinin tahmininde kullanılır.

Şekil 14. Parametre Tasarım Deneyi



Kaynak: Raghu N. Kacker, "Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary," **Quality Progress**, V.19, No.12: 21-29, (Dec. 1986), s.24.

Parametre tasarım deneyleri iki yoldan biri ile yapılabilir: fiziksel deneyler ve bilgisayar ile benzetim. $Y = f(\theta, w)$ fonksiyonu sayısal olarak değerlendirilebildiği zaman bu deneyler bilgisayar yardımı ile yapılabilir. Bu fonksiyonda performans karakteristiği Y , kontrol faktörü θ ve gürültü faktörü w ile ilişkilendirilir.

Fiziksel deneyler uygulandığı zaman, Şekil 14'deki gibi bir deney yapılması deneyin yapısına bağlı olarak bazı durumlarda olanaksız ya da yüksek maliyetli olabilir. Bu durumlarda Taguchi iki ya da üç düzeyli faktörlerin kullanıldığı kısmi faktöriyel deneylerin kullanımını tavsiye etmiştir⁵⁷. Bilinen bütün faktöriyel ve kısmi faktöriyel deneyler ortogonal dizilerdir.

3.1.2.5. Performans istatistiği

Performans istatistiği, gürültü faktörlerinin performans karakteristikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Performans istatistiğinin belirlenen değeri kontrol faktörlerinin daha iyi değerlerinin bulunmasına yardımcı olmaktadır. Etkili bir performans istatistiği, ürün, kayıp fonksiyonu ve performans karakteristiği dağılımı hakkındaki önceden bilinen teknik bilgilerden yararlanır.

Parametre tasarım deneyinde $\theta = (\theta_1 , \theta_2 , \dots, \theta_k)$ kontrol faktörlerini ve $w = (w_1 , w_2 , \dots, w_l)$ gürültü faktörlerini temsil etsin. Performans karakteristiği Y 'nin θ ve w 'nin fonksiyonu ($Y = f(\theta, w)$) olduğu varsayalım. Kontrol faktörü (θ) Y dağılımının parametresidir ve her bir θ değeri için gürültü faktörleri bu dağılımı yaratır.

Performans ölçüsü, θ 'nın fonksiyonudur ve θ öyle seçilir ki, olası teknik ayarlamalarla performans ölçüsünün en büyüklenmesi, beklenen kaybı en aza indirir. Böylece, performans ölçüsü kontrol faktörlerinin değişik değerlerinin karşılaştırılmasında kriter olarak kullanılmaktadır. Etkili bir performans ölçüsü, ürün

⁵⁷ Kackar, R.N., a.g.m., s.28.

hakkındaki teknik bilgilerden ve kayıp fonksiyonundan yararlanır. Beklenen kaybın kendisi performans ölçüsüdür, fakat bazı durumlarda, teknik bilgilerden yeterince faydalanmadığı için, performans ölçüsü gerekli olandan çok karmaşıktır. Değişik mühendislik tasarımları değişik performans ölçülerinin kullanılmasına neden olur. Performans ölçüsü, θ 'nın fonksiyonu olmasına rağmen, genelde fonksiyon kesin olarak bilinmez ve bu nedenle tahmini yapılır. Amaç da tahmini yapılan bu kriterin en iyilenmesidir. Performans ölçüsünün istatistiksel tahmini için **performans istatistiği** terimi kullanılır. Taguchi, performans istatistiği yerine **ışaret gürültü oranı** (Signal-to-Noise Ratio) terimini kullanır⁵⁸.

İşaret gürültü oranı genel olarak S / N ya da $Z (\theta)$ ile gösterilmektedir. Gürültü faktörlerine karşı duyarsızlığı sağlamada ölçüm aracı olarak kullanılan işaret gürültü oranı parametre tasarımının temel taşlarından biridir. İşaret gürültü oranı analizi ile bütün sonuçlarda hem ortalama hem de değişkenlik hesaplamalara katılmaktadır. Böylece, bu analiz bir çok analizin aksine iki boyutlu olmaktadır.

Sürekli, negatif olmayan ve sabit bir hedefi olan (statik) performans karakteristiği Y için, Taguchi, kayıp fonksiyonunun aşağıdaki üç durumuna göre üç işaret gürültü oranı tanımlamıştır: **daha küçük daha iyi, daha büyük daha iyi ve belirli bir hedef değeri en iyi**. Bu çalışmada dinamik performans karakteristiklerinden söz edilmeyecektir⁵⁹.

⁵⁸ Kackar, a.g.m., s.27.

⁵⁹ Bu konuda daha geniş bilgi için bkz. Glen S. Peace, **Taguchi Methods: A Hands on Approach to Quality Engineering**, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1993), s.338-360.

Performans karakteristiği Y'nin birden çok değerini $y_1, y_2, \dots, y_n$ 'nin temsil ettiğini varsayalım. Buna bağlı olarak Taguchi işaret gürültü oranları,

Daha küçük daha iyi için;

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

Daha büyük daha iyi için;

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

Belirli bir hedef değer en iyi için;

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i$$

ve

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum (y_i - \bar{y})^2$$

olmak üzere

$$S / N = 10 \log \left(\frac{-2}{\frac{\bar{y}}{s^2}} \right)$$

şeklinde tanımlanmaktadır⁶⁰.

Performans karakteristiği için ikili ayırım geçerli ise; geçer-geçmez, iyi-kötü gibi, iyi ürünlerin oranı p olmak üzere

$$S / N = 10 \log (p / (1 - p))$$

formülü kullanılmaktadır..

⁶⁰ Sung H. Park ve Gongxu Zhang, "A new Method of Analysis for Parameter Design in Quality Engineering," *Total Quality Management*, V.6, No.1:13-19, (1995), s.15.

Taguchi endüstriyel ürün ve üretim süreçlerinin tasarımında istatistiksel planlanmış deneylerin uygulanmasını önermiştir. Ürün ya da üretim süreci geliştirmede istatistiksel planlanmış deneylerin kullanımı yeni olmamakla birlikte, Taguchi, üretim öncesi kalite kontrolü için bu deneylerin faaliyet alanını tanıtmıştır. Taguchi istatistiksel planlanmış deneyleri en az aşağıdaki dört amaç için kullanmıştır:

1. Gürültü kaynaklarının performans karakteristiği üzerindeki etkilerinin en az olduğu kontrol faktörlerinin değerlerini tanımlamak için.
2. Kaliteden ödün vermeden maliyeti azaltan kontrol faktörleri değerlerini tanımlamak için.
3. Performans karakteristiğinin ortalama değeri üzerinde çok etkisi olan, fakat değişkenliği üzerine etkisi olmayan kontrol faktörlerini tanımlamak için. Bu faktörler ortalama değeri düzeltmek için kullanılabilir.
4. Performans karakteristiği üzerinde herhangi bir etkisi olmayan kontrol faktörlerini tanımlamak için. Bu faktörlerin toleransları genişletilebilir.

3.1.2.6. Parametre tasarım yöntemi

Ortalamayı ve değişkenliği etkileyen kontrol faktörleri belirlendikten sonra, kontrol faktörleri aşağıdaki dört sınıfa ayrılabilir⁶¹:

Sınıf 1: Hem ortalamayı hem de değişkenliği etkileyen faktörler

Sınıf 2: Sadece değişkenliği etkileyen faktörler

Sınıf 3: Sadece ortalamayı etkileyen faktörler

Sınıf 4: Ne ortalamayı ne de değişkenliği etkileyen faktörler.

⁶¹Ross, a.g.e., s.175.

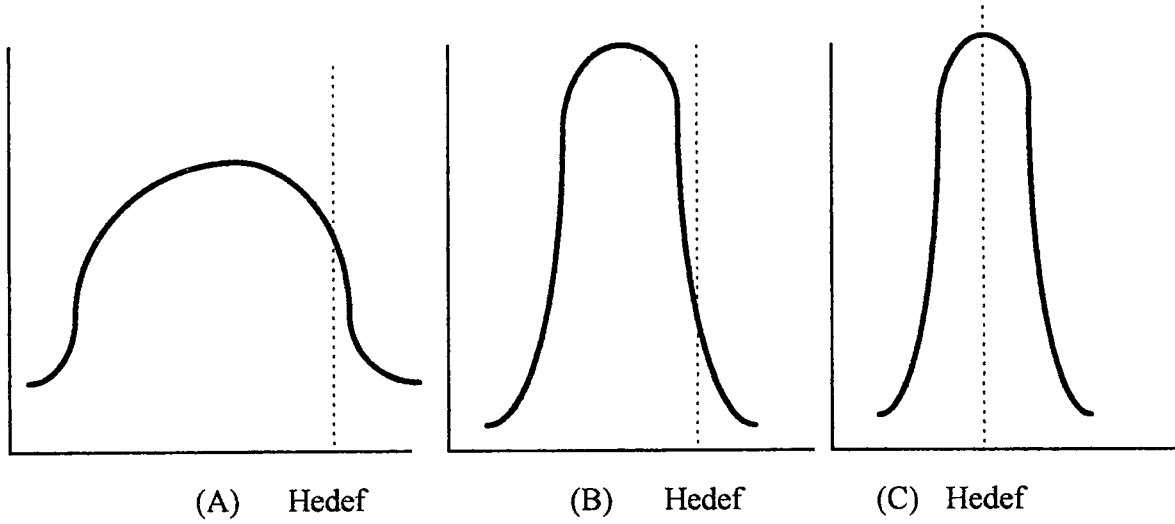
Parametre tasarımının temelinde, değişkenliği azaltmak için Sınıf 1 ve Sınıf 2 kontrol faktörlerinin uygun düzeylerinin seçilmesi ve ortalamayı hedef değere göre ayarlamak için de Sınıf 3 kontrol faktörlerinin uygun düzeylerinin seçilmesi gereklidir. Sınıf 4 kontrol faktörlerinin hiç bir etkisi olmadığı için en ekonomik düzeylerinde seçilebilir⁶². Temel parametre tasarım yaklaşımında bütün kontrol faktörleri değişik seviyelerde hareket ettirilir, ancak bir tanesi diğer kontrol faktörlerini değişkenliğe karşı duyarsız yapmak için performans karakteristiğinin fazla etkilenmediği değere yöneltilir. Kalan faktör(ler) ortalama performans karakteristiğini elde etmek için doğrusal (düzeltme) faktörler olmalıdır.

Toplam değişkenliği azaltmak için yapılan deneylerde kontrol faktörleri iç dizilere, gürültülerde dış dizilere atanır. Kurulan bu deneye göre toplam değişkenlik, gürültü ve kontrol faktörleri arasındaki ilişkiler analiz edilir. Analizde işaret gürültü oranı kullanılır.

Tek performans karakteristiği ve belirli bir hedef değere en iyi durumunda, işaret gürültü oranının en büyük olduğu ve ortalamayı hedefte tutan en iyi kontrol faktör düzeylerinin bulunduğu iki aşamadan oluşan bir yöntem uygulanabilir. Şekil 15 bu yöntemi göstermektedir.

⁶² M.S. Phadke ve diğerleri, "Off-Line Quality Control in Integrated Circuit Fabrication Using Experimental Design," **The Bell System Technical Journal**, V.62, No.5:1273-1308, (1983), s.1285.

Şekil 15. Belirli Bir Hedef Değer En İyi için Parametre Tasarım Yöntemi



Kaynak: Glen S. Peace, *Taguchi Methods: A Hands on Approach to Quality Engineering*, (USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1993), s.313.

Şekil 15.A'da ilk olarak, değişkenlik azaltılır. İlk basamak, ürün ya da üretim süreci performansının geliştirilmesidir. Hangi kontrol faktörlerinin üründen ürüne sürekliliği etkilediğinin ve değişkenlik üzerinde etkisi olduğunun bilinmesi, değişkenliğin azaltılmasında yol göstericidir. Bu nedenle, işaret gürültü oranı üzerine etkisi olan kontrol faktörleri belirlenir. İşaret gürültü oranı üzerine etkisi olan faktörler, aynı zamanda üretim süreci değişkenliğini de kontrol ederler. Ayrıca, değişkenlikte etkili olan faktörler üzerinde yoğunlaşılması, hangi kontrol faktör değerlerinde ya da düzeylerinde daha az değişkenliğin olduğunu ve gürültüden en az etkilenildiğini bulmaya yardımcı olur. Her bir kontrol faktörü için en iyi düzey olan işaret gürültü oranının en büyük olduğu düzey seçilir. Böylece, tüm işaret gürültü oranı en büyüklenir.

Şekil 15.B'de performans karakteristiğinin değişkenliği azaltıldıktan sonra, ortalaması ayarlanır. Değişkenlik üzerinde çok az ya da hiç etkisi olmayan, ancak

performans karakteristiğinin ortalaması üzerinde etkisi olan bir faktör seçilir. Seçilen faktör(ler) düzeltme faktörleridir ve ideal olarak işaret gürültü oranı üzerinde çok az ya da hiç etkisi yoktur. Hiçbiri üzerine etkisi olmayan faktörlerin de düzeyleri seçildikten sonra performans karakteristiğinin hedefte olmasını sağlayacak düzeltme faktörünün düzeyi seçilir. Değişkenliği azaltmak için en iyi değerler bulunduğu için ortalamayı hedef değere yaklaştırırken dağılımın genişletilmemesine dikkat edilmelidir⁶³. Tüm bu yapılanların sonucunda Şekil 15.C elde edilir.

Daha küçük daha iyi ve daha büyük daha iyi durumlarında yukarıdaki birinci aşamanın uygulanması yeterli olur⁶⁴.

Tek performans karakteristiği yerine iki ya da daha fazla performans karakteristiğinin söz konusu olduğu durumlarda eğer performans karakteristikleri belirli bir faktör için değişik düzeyler öneriyorsa, bu karışıklık konuyla ilgili mühendisler tarafından ödünleşme yolu ile çözülmeye çalışılır. Bu durumda sezgiler ve tecrübe de önemli rol oynar⁶⁵.

3.1.3. Tolerans Tasarımı

Tolerans tasarımı aşamasında, parametre tasarımı ile elde edilen nominal kontrol faktör birleşim değerlerinin kabul edilebilir değişkenlik aralığı belirlenir. Parametre tasarımı maliyeti yüksek ürün parçaları olmadan istenilen performansa

⁶³ Peace, a.g.e., s.314.

⁶⁴ Lin, Sullivan, Taguchi, a.g.m., s.58.

⁶⁵ Phadke ve diğerleri, a.g.m., s.1286.

ulaşamıyorsa, bu durumda tolerans tasarımı kullanılmaktadır. Tolerans tasarımıyla, performans üzerinde değişkenliğinin olumsuz etkisi olan kontrol faktörlerinin toleransı daraltılır⁶⁶. Dar toleransların imalat maliyetini yükseltmesi, geniş toleranslarında performans değişkenliğini arttırması nedeni ile, tolerans tasarımında bu ikisi arasında en iyi buluşma noktasının belirlenmesi sorunu vardır. En iyi buluşma noktasının belirlenmesi tüketicilerin kaliteyi ucuza satın alma istekleri ile üreticilerin kaliteyi ucuza üretme istekleri arasındaki en iyileme probleminin çözümüne benzemektedir⁶⁷.

Tolerans tasarımıdaki esas ustalık ürün parçası ya da faktör varyansının ilgilenilen performans karakteristik varyansı ile ilişkisini kurmaktır. Ürün parçası ya da faktör varyansının belirli bir maliyetle azaltılması (kalite geliştirilmesi), performans karakteristiği varyansında belirli bir azalmaya neden olur, dolayısıyla, kayıp fonksiyon değerinin azalmasına neden olur. Başka bir anlatımla, performans değişkenliği nedeni ile müşterilerin kaybı ile artan üretim maliyetleri arasında bir ödünleşme söz konusudur⁶⁸.

A'dan F'ye kadar olan kontrol faktörlerinin varyansı ile toplam varyans arasındaki ilişki

$$S^2_T = S^2_A + S^2_B + + S^2_F + S^2_E$$

formülü ile gösterilsin. Burada gösterilen varyans, faktör varyansı ile faktörün gerçek olmayan varyansının neden olduğu performans karakteristiğinin varyansıdır. Bir faktör

⁶⁶ Reşit Ünal, Douglas O. Stanley, C. Russ Joyner, "Propulsion System Design Optimization Using the Taguchi Method," **IEEE Transactions on Engineering Management**, V.40, No.3: 315-322, (Aug. 1993), s.316.

⁶⁷ Peşkircioğlu, **a.g.m.**, s.87.

⁶⁸ Nozer D. Singpurwalla, "A Bayesian Perspective on Taguchi's Approach to Quality Engineering and Tolerance Design," **IEE Transactions**, V.24, No.5:18-31, (Nov. 1992), s.25.

varyansının performans karakteristiği varyansına etkisi göz önüne alınırsa, yukarıdaki denklemde çok etkili kontrol faktörlerinin varyansın büyük kısmını, az etkili kontrol faktörlerinin varyansın az kısmını oluşturduğu görülür⁶⁹.

Kayıp fonksiyonu ilgili kaybı hesaplarken toplam varyans değerini kullanır. Tolerans tasarımı etkisi az kontrol faktörü üzerinde yapılırsa, toplam varyans çok değişmez ve kayıp fonksiyonu bu kontrol faktörü için tolerans tasarımı gerçekleştirilebilir. Toplam varyansa katkısı fazla olan kontrol faktörlerinin tolerans tasarımında seçilmesi, yaklaşımın daha etkili kullanımını sağlar.

3.2. Taguchi Yönteminin Diğer Klasik Deney Tasarım Yöntemleri ile Karşılaştırılması

Taguchi yönteminin uygulaması uygun istatistiksel tasarım ve analiz yöntemlerinin kullanılmasına dayanır. Diğer yöntemlerle anlaşmazlık en çok bu “uygun” kelimesinin anlamında çıkmaktadır. Bununla birlikte, Taguchi yöntemi bir çok yönden ne yeni ne de radikal bir yöntemdir. Diğer istatistiksel yöntemlerle Taguchi yöntemi arasında farklar olduğu gibi benzerlikler de vardır. Örneğin, Taguchi, bir çok kontrol faktörünün aynı anda etkisini araştırmanın duyarlı yolu olarak çok değişkenli istatistiksel tasarım yönteminin kullanımını savunmuştur. Her defasında tek bir değişkenin değiştirilip diğerlerinin sabit tutulduğu deneyleri verimsiz bularak kabul etmemiştir. Bu durum diğer istatistikçiler tarafından da yıllardır savunulan bir konudur.

⁶⁹ Ross, a.g.e., s.202.

Klasik yöntemlerde performans karakteristiğinin sadece ortalaması ile ilgilenilir ve sadece ortalama hedef değere getirilmeye çalışılır. Taguchi yönteminde ise işaret gürültü oranı kullanılarak hem ortalama hem de değişkenlik en iyi değere getirilmektedir. Taguchi yönteminde ortogonal diziler kullanılarak diğer klasik yöntemlere göre (tam faktöriyel ya da kesirli faktöriyel diziler) çok daha az deney ile daha fazla bilgi elde edilebilmektedir. Ayrıca, Taguchi yönteminde gürültü faktör matrisi kullanılarak, dış etkenlerin kontrol edilmesi yerine, dış etkenlerden etkilenmeyen kontrol faktörleri değerlerinin bulunabilmektedir. Klasik yöntemde ise duyarlılık analizi, varyans parça analizi gibi yöntemler kullanılmaktadır⁷⁰.

Taguchi yöntemi diğer klasik deney tasarım yöntemlerine göre uygulama yönünden daha basit ve anlaşılırdır. İstatistik uzmanı ya da uzman olmayan kişiler için de Taguchi yönteminde izlenecek yollar açıktır. Taguchi yöntemi diğer bir avantajı da laboratuvar ortamında elde edilen en iyi kontrol faktörleri kombinasyonunun üretim ortamında da aynı başarılı sonucu vermesidir.

Son olarak, Taguchi yönteminin uygulamasında odak noktası müşteridir. Müşterinin istediği kalite aranan kalitedir ve bu kaliteden kaynaklanan değişkenlikler sadece müşteri için değil, esas işletme ve toplum için büyük kayıptır. Hedef değerdeki her bir birim değişkenliğin bir bedeli vardır. Bu nedenle deney tasarımında değişkenliğin en aza indirilmesi temel hedeflerden biridir. Buna ulaşırken maliyetlerde gözardı edilmemelidir.

⁷⁰ Gunter, a.g.m., s.51.

3.3. Taguchi Yönteminin Uygulamasında Temel Basamaklar

Taguchi yöntemi bugün dünyada, kimyadan elektroniğe, biyolojiden bilişim teknolojilerine kadar bir çok alanda kaliteyi geliştirmek ve maliyetleri azaltmak amacıyla uygulanmaktadır. Taguchi yöntemi, ucuz ürün parçaları kullanılmasına rağmen ürün karakteristikleri dış etkenlerden etkilenmeyen kontrol faktör düzeylerinin belirlenmesinde, güçlü ve maliyet etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Taguchi yönteminin uygulanmasında başarılı olmak için sistematik bir yaklaşım gereklidir. Yöntemin uygulanması esnasında, yapılacak işlerin sırasının değişmesi ya da hiç yapılmaması gibi hatalar uygulama sonuçlarını olumsuz yönde etkileyerek yanlış değerlendirmelerin yapılmasına neden olabilir. Hatalı uygulamaların engellenebilmesi için herkesin anlayarak izleyebileceği şekilde temel basamakların belirlenmesine gereksinim vardır. Taguchi yönteminin uygulanmasında temel basamaklar belirlenir ve belirlenen basamaklar izlenerek uygulama yapılırsa, hem kolaylık sağlanır hem de daha başarılı olunur. Kullanım alanı ister ürün, ister üretim süreci olsun izlenecek basamaklar aynıdır⁷¹. Taguchi yönteminin uygulanmasında başarılı olmak için izlenmesi gereken temel basamaklar aşağıda sırasıyla ayrıntılı olarak incelenmiştir.

3.3.1. Çalışma Ekibinin Kurulması

Deney varolan bir ürünün (üretim sürecinin) kalitesini geliştirmek için yapılmak istenirse, seçilen ürün (üretim süreci) hakkında her türlü bilgi elde edilmelidir. Seçilen

⁷¹ Nimetullah Burnak, Cafer Çelik, "Kalite Geliştirmede Taguchi Yöntemlerinin Rolü ve Bir Uygulama," Endüstri Mühendisliği, Cilt:5, Sayı:5: 9-20, (1994), s.18.

ürün hakkında bilgi elde etmek için hurda, yeniden işleme, garanti ve yeniden işleme maliyetleri ile en önemli olarak müşteri şikayetleri ve pazarlama bölümünün önerileri göz önüne alınmalıdır. Yeni bir ürünün (üretim sürecinin) geliştirilmesi söz konusu olduğunda pazarlama bölümünden alınan bilgiler (müşteri istek ve gereksinimleri) çerçevesinde çalışmalara başlanır.

Çalışmanın yapılacağı ürün (üretim süreci) belirlendikten sonra deneyi yürütecek ekip oluşturulur. Çalışmanın başarılı olmasındaki önemli koşullardan biri de deney ekibinin çalışmanın en başında kurulmasıdır⁷². Yönetimin bu çalışmaya desteği sadece gerekli malzemeyi sağlamak değil, aynı zamanda, yeterli süreyi de vermesi açısından önemlidir. Çalışmanın yapıldığı işletmedeki tüm ilgili personele bilgi verici rapor gönderilerek herkesin yapılacak toplantılara katılımı sağlanabilir. Bu raporlarda maliyetlerde planlanan azalmalardan söz edilmesi katılımı arttıracaktır. Üst yönetimin bu çalışmayı desteklediğini göstermesi çalışmanın sürekliliği açısından önemlidir.

Çalışma ekibinden en az bir kişi Taguchi yöntemi ile ilgili yeterli bilgi ve deneyime sahip olmalıdır. Taguchi yöntemi uzmanı, bir istatistik uzmanı ya da bir deney tasarımcısı bu kişi olabilir. Bunun dışında, ürün hakkında teknik bilgiye sahip olanlar (mühendisler, ustabaşları gibi), bir pazarlama uzmanı, üretimden sorumlu mühendis, kaliteden sorumlu mühendis, tasarım mühendisi, bir istatistik uzmanı ve bu kişilerin yönlendirmesiyle deneyi yapacak olan işçi(ler) çalışma ekibini oluşturabilirler. Deney yapılacak ürünün yeni bir ürün ya da varolan bir ürün olmasına göre çalışma ekibini oluşturanlarda değişiklikler yapılabilir.

⁷² Jeff Knowlton ve Ren Keppinger, "The Experimentation Process," *Quality Progress*, V.26, No.2: 43-47, (Feb. 1993), s.43.

3.3.2. Amaçların Belirlenmesi

Çalışma ekibi tarafından amaçların belirlenmesinden önce ürün (üretim süreci) hakkında temel bilgiye sahip olmak etkili bir deney planlaması için esastır. Bu temel bilginin bir kısmı çalışma ekibinin toplantılarda bilgilerini diğer ekip elemanları ile paylaşımları sonucunda elde edilebilir. Bu tip toplantılarda verimsiz ve amaçsız tartışmaları engellemek için etkili bir araç olan beyin fırtınası yöntemi kullanılabilir⁷³. Beyin fırtınası yöntemi alternatif çalışma amaçları listesinin oluşturulmasında çok yardımcı olabilir. Çalışma ekibi bu listeden en uygun olanını seçer. Ekip içindeki toplantılarda rahat bir atmosfer yaratarak tüm elemanların katılımı sağlanır, böylece elemanların düşünce boyutları genişletilebilir. Genelde, birden fazla beyin fırtınası toplantısı yapılması önerilir, çünkü kişiler her toplantıda değişik fikirler ile gelebilir. Diğer dikkat edilmesi gereken bir konuda, kişilerin fikirlerini kötü ya da mantıksız gibi sıfatlarla nitelendirmeden herkesin fikrini rahat bir şekilde anlatabilmesini sağlamaktır. Bu durum toplantıların verimini arttırabilir ve etkili amaç(lar) belirlenebilir.

Ürün (üretim süreci) hakkında beyin fırtınası toplantılarında yeterli bilgi elde edilemezse çalışma amacının belirlenmesi zorlaşır. Bu durumda ürün hakkında daha fazla bilgi elde etmek için Pareto şeması, akış şeması, neden sonuç şeması gibi araçlar kullanılabilir⁷⁴. Yeterli bilgi elde edildikten sonra çalışma amaç(lar)ı tüm ekibin katılımı ile belirlenebilir. Amaç belirlenirken dikkat edilmesi gereken diğer bir noktada bir deney ile tüm problemlerin çözülmeye çalışılmamasıdır. Ulaşılabilecek bir hedef

⁷³ Knowlton, Keppinger, a.g.m., s.44.

⁷⁴ Peace, a.g.e., s:24.

üzerinde odaklanarak, aşama aşama amacın büyütülmesi, başarısızlığa engel olur. Böylece, çalışmanın başlamadan bitmesi ve hayal kırıklığı yaratması önlenir.

3.3.3. Performans Karakteristiklerinin ve Ölçüm Sistemlerinin Belirlenmesi

Çalışma ekibi tarafından amaç(lar)ın belirlenmesinden sonra başarının ölçülebilmesi için anlamlı performans karakteristik(ler)inin ve ölçüm sistemlerinin belirlenmesi gereklidir. Performans karakteristiklerinin belirlenmesi deney sonuçlarını etkileyebildiği için üzerinde önemle durulmalıdır. Uygun bir performans karakteristiği ve ölçüm sistemi seçilirken bir çok konu göz önüne alınmalıdır. Bunlar içinde önemli olanları belirlenen performans karakteristiğinin açık ve ölçülebilir olması, müşteri isteklerini göz önüne alması, maliyeti çok arttırmaması, ölçüm biriminin anlaşılır olması, ölçümlerin yapılacağı koşulların uygunluğu ve çevre koşulları ve ölçüm yapılacak alet ve araçların var olmasıdır.

Birden fazla performans karakteristiğine sahip üründe (üretim sürecinde), çalışmanın amacı ile kolay ölçülebilir olması esas göz önüne alınarak seçim yapılmalıdır. Çalışma ekibinin etkili kordinasyonu ve yanlış anlamaları engellemek için performans karakteristik(ler)i ve ölçüm sistemleri tüm ekibin katılımıyla belirlenmeli, tüm sorular cevaplandırılmalı ve değişiklikler tüm ekip elemanlarına anında gerekçeleriyle bildirilmelidir. Ölçümü olanaksız ya da çok maliyetli olan performans karakteristikleri seçiminden kaçınılmalıdır. Amacından uzak seçilen performans

karakteristiklerinin ve ölçüm sistemlerinin yapılan tüm çalışmanın başarısızlığına neden olabileceği unutulmamalıdır.

Belirlenen performans karakteristiğinin toplanabilme özelliğine sahip olması da önemlidir. Başka bir deyişle, performans karakteristiğini etkileyen kontrol faktörlerinin etkileme miktarları teker teker belirlenerek toplandığı zaman, performans karakteristiğinin toplam etkilenmesine eşit olmalıdır.

3.3.4. Performans Karakteristiklerini Etkileyen Faktörlerin

Belirlenmesi ve Sınıflandırılması

Performans karakteristiklerini etkileyen faktörlerin belirlenmesinde en etkili yollardan biri çalışma ekibinin kendi arasında beyin fırtınası toplantıları yapmasıdır. Beyin fırtınası toplantıları ile performans karakteristiklerini etkileyebilecek faktörlerin listesi çıkarılır. Faktör listesinin geliştirilmesinde beyin fırtınası toplantılarından başka Pareto şeması, akış şeması, neden sonuç şeması gibi ürün (üretim süreci) hakkında bilgi veren araçlardan da faydalanabilir.

Faktör listesi hazırlandıktan sonra önerilen tüm faktörler gözden geçirilerek, önemli olan faktörler çalışmaya dahil edilirken bir kısmıda sonraya bırakılır. Önemli olduğuna inanılan faktörler hakkında tüm ekip elemanları fikirlerini söylerler ve bunlar için oylama yapılır. Aldıkları oylara göre tüm faktörler sıralandırılır. Sıralamaya itirazı olanlar, nedenleriyle beraber fikirlerini diğer elemanlarla tartışır ve oylama yinelenir.

Tüm ekip elemanlarının onayı alınan faktörler performans karakteristiklerini etkileyen faktörler olarak kabul edilir.

Faktör listesindeki faktörlerden kontrol edilebilen ya da kontrol edilmesi istenilen faktörler kontrol faktörü olarak adlandırılır. Teknik nedenlerden ya da yüksek maliyetinden dolayı kontrol edilemeyen ya da edilmesi istenmeyen faktörlere gürültü faktörü denir. Bu özelliklerine göre, faktörler iki gruba ayrılır; kontrol faktörü ve gürültü faktörü.

3.3.5. Kontrol Faktörlerinin ve Gürültü Faktörlerinin Düzeylerinin Belirlenmesi

Kontrol faktörlerinin en uygun sayıda düzeylerinin belirlenmesinde deney amaçları ve faktörün tam olarak anlaşılmış olması önem kazanmaktadır. En iyi hammadde seçiminde ancak bu hammaddeyi sağlayan firma sayısı kadar düzey sayısı belirlenebilir. Deneyin amacı bazı kontrol faktörlerinin en iyi değerini belirlemekten daha çok etkisini belirlemek amacıyla ise, bu faktörün alt ve üst uç noktadaki iki değerinin kullanılması yeterlidir. Kontrol faktörünün üç düzeyde değerinin belirlenmesi deneyin büyümesine ve maliyetlerin artmasına neden olmasına rağmen, elde edilen bilgi açısından önemlidir. Kontrol faktörünün en iyi değerlerine daha kolay ulaşılır. Bazı kontrol faktörlerinin birbirinden farklı dört ya da daha fazla alternatif değeri olursa, en iyi değerin bulunması için üçten fazla düzeyin belirlenmesi gerekir.

Her bir kontrol faktörü için düzey sayısının belirlenmesi kadar düzeylerin arasındaki uzaklıkta önemlidir. Düzeyler arasındaki fark performans karakteristiğinde fark yaratacak kadar geniş olmalıdır, aksi durumda performansı etkileyen bir kontrol faktörü önemsiz sayılarak tasarım dışında tutulabilir. Ayrıca, tasarım parametre düzeylerinin belirlenmesinde fiziksel sınırlamalara dikkat edilmelidir. Düzey değerinin biri çok düşük diğeri de çok yüksek tutulursa, ürünün kalitesiz olması kaçınılmazdır. Bu durumda, hammadde ve zaman boşa harcanırken çok az bilgi elde edilmiş olur.

Daha önceden belirtildiği gibi Taguchi her bir kontrol faktörü için üç ya da daha fazla test değeri önermiştir. Üç ya da daha fazla test değeri kontrol faktörlerinin performans karakteristiği üzerindeki asıl etkilerinin doğrusal olmayan ilişkisini gösterir. Test değerleri birbirinden çok farklı seçilerek, faktör uzayında tasarım matrisinin geniş bir yer kaplaması sağlanır.

Gürültü faktörü test değerlerinin belirlenmesinin amacı, gürültü faktörlerinin değişkenliğini taklit ederek, bu değişkenliklerde kontrol faktörlerinin duyarsızlığını sağlamaktır. Başka bir deyişle, performans karakteristiklerinde en az değişikliğin olduğu en geniş gürültü faktör değişkenlik aralığı bulunmak istenir. Bu nedenle, gürültü faktörünün alt ve üst sınır noktaları, kontrol faktörlerinin duyarsızlığını sağlamada, en fazla kullanılan aralıktır. Tüm potansiyel gürültü faktörlerini deneye dahil etmek hem fiziksel hem de maliyet açısından olası olmadığı için en fazla etkili olduğuna inanılanlar kullanılarak en kötü koşullar sağlanır. Bu kötü koşullarda duyarsızlık sağlarsa, diğer koşullarda daha kolay sağlanır.

Önemli gürültü faktörlerini deneyden hariç tutmadan test sayısını azaltabilmek için gürültü faktörleri birleştirilebilir. Gürültü faktörlerinin en iyi ve en kötü kombinasyon koşullarında iki düzey belirlenerek deneyler yapılır. Eğer duyarsızlık sağlanırsa, bu iki düzeyin arasında da kontrol faktörleri gürültü faktörlerine karşı duyarsız olur.

Taguchi prensiplerine göre gürültü faktörlerinin test düzeylerinin seçilişi şu şekilde olmalıdır⁷⁵: Gürültü faktörü w_i 'nin dağılımının ortalama değeri ve standart sapması sırasıyla M_i ve s_i olduğu varsayılın. Eğer w_i 'nin performans karakteristiği Y üzerinde doğrusal etkisi olduğu varsayılırsa, o zaman iki test düzeyi

$$(M_i - s_i) \text{ ve } (M_i + s_i)$$

şeklinde olmalıdır.

Eğer w_i 'nin performans karakteristiği Y üzerinde doğrusal olmayan etkisi olduğu varsayılırsa, üç test düzeyi

$$(M_i - \sqrt{\frac{3}{2}} S_i), M_i, (M_i + \sqrt{\frac{3}{2}} S_i)$$

şeklinde olmalıdır.

Bu test düzeylerinin seçilmesi görüldüğü gibi gürültü faktörlerinin yaklaşık olarak simetrik dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Eğer gürültü faktörlerinin dağılımı bilinmiyorsa ya da daha kötüsü deneysel amaçlarla yaklaşık olarak benzetimi

⁷⁵ Kackar, R.N., 1985, a.g.m., s.203.

olası değil ise, Taguchi bütün testlerin rasgele seçilerek belirli sayıda tekrarının yapılmasını önermiştir⁷⁶.

3.3.6. Potansiyel Etkileşimlerin Belirlenmesi

İki ya da daha fazla kontrol faktörü biraraya getirildiğinde performans karakteristiği üzerindeki etkileri tek tek etkilerinden farklı olursa, bu kontrol faktörleri arasında etkileşimden söz edilir. Deneyin hazırlanmasında ve kontrol faktörlerinin seçiminde etkileşim çok önemlidir. Varolan güçlü bir etkileşimin yok sayılması deney sonuçlarının tamamen yanlış olmasına neden olur. Bu nedenle, etkileşimler deney planlanmasının temel parçalarından biridir.

Taguchi'ye göre, etkileşimli faktörlerin çok bulunduğu deney verileri analizi verimli değildir. Bu nedenle, deney tasarımı için etkileşimin olmadığı ya da ihmal edildiği kontrol faktörleri belirlenmeli ve bu verilerin performans karakteristiğini açıklama gücünü değerlendirmek için katkıları hesaplanmalı ve doğrulama deneyleri yapılmalıdır. Eğer bu koşullarda başarılı olunamazsa, Taguchi, toplanabilme(additivity) özelliğine sahip performans karakteristiğinin seçilmesini ya da kontrol faktörü ile düzeyi arasındaki ilişkinin düzenlenmesini, önermiştir⁷⁷. Bu durumda, kontrol faktörleri arasındaki etkileşim azalarak önemini kaybeder ve çalışmaya dahil edilmezler. Bütün etkileşimlerin deneye dahil edilmesi yerine, performans karakteristiğinin özenli tanımlanması harcanan zamanın ve maliyetin azalmasına neden olacaktır. Performans karakteristiğinin tanımlanmasında ya da etkileşimsiz kontrol faktörlerinin

⁷⁶ Logothetis, Wynn, a.g.e., s.247.

⁷⁷ Taguchi, Wu, a.g.e., s.55.

bulunmasında, yeterli tecrübe ve uzmanlık olmadığı zaman, potansiyel etkileşimlerin çalışmaya dahil edilmesinde fayda vardır. Aksi durumda, doğrulama deneyi, olması gereken bir etkileşimin eklenmemesinden dolayı, başarısızlıkla sonuçlanır ve çalışma yeniden yapılmak zorunda kalır.

3.3.7. Uygun Ortogonal Dizilerin Seçilerek Atamaların Yapılması

Çalışmada kullanılacak faktörler, düzeyleri ve etkileşimleri belirlendikten sonra yapılması gerekli olan bu kontrol faktörlerinin ve gürültü faktörlerinin uygun ortogonal dizilere atanmasıdır. Uygun ortogonal dizinin seçiminde dikkat edilmesi gerekli iki konu vardır⁷⁸:

1. Kontrol faktörlerinin ve etkileşimlerinin sayısı
2. Kontrol faktörlerinin düzey sayısı

Bu iki konu tüm deney için gerekli olan toplam serbestlik derecesinin hesaplanmasına yardımcı olur. Değişkenlik ve varyans analizi bölümünden anımsanacağı gibi bir kontrol faktörünün serbestlik derecesi düzey sayısının bir eksiğidir ve toplam serbestlik derecesi toplam test sayısının bir eksiğidir. Uygun ortogonal dizi seçilirken dikkat edilmesi gereken önemli bir eşitsizlik vardır. Seçilen ortogonal dizideki serbestlik derecesi deney için gerekli serbestlik derecesine eşit ya da daha fazla olmalıdır. Kontrol faktörlerinin düzey sayısına göre EK 2' deki dizilerden uygun olanı seçilir. Kontrol faktörlerinin düzey sayısının eşit olmaması durumunda değişik düzeydeki faktörlerden ortogonal bir dizinin oluşturulması bölümündeki yöntem

⁷⁸ Ross, a.g.e., s.74.

göz önüne alınır. Kontrol faktörleri ve etkileşimlerinin seçilen uygun ortogonal diziye atanmasında izlenen yol ayrıntılı şekilde doğrusal grafikler, faktörlerin doğrusal grafiğe atanması ve standart doğrusal grafiklerin değiştirilmesi adlı bölümlerde açıklanmıştır. Gürültü faktörleri de deneye dahil edilmek istenirse gürültü matriside tasarım matrisine benzer olarak ortogonal dizilerden oluşturulur ve gürültü faktörleri matrise rasgele atanır.

Tasarım matrisi ve gürültü matrisi, parametre tasarım deneyinin oluşturulması bölümünde Şekil 14' de görüldüğü gibi birleştirilir. Yapılması gerekli deney sayısı, zaman ve maliyet açısından araştırılarak kabul edilir ya da edilmez. Eğer edilmezse, Taguchi yönteminin uygulamasında temel basamaklardan performans karakteristiklerini etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve sınıflandırılması basamağına geri dönülür.

3.3.8. Taguchi Kayıp Fonksiyonu ve Performans İstatistiklerinin Belirlenmesi

Çalışmanın amacına göre performans karakteristiği ve bu performans karakteristiğine göre de Taguchi kayıp fonksiyonu ve performans istatistiği belirlenir. Performans karakteristiğinin özelliği (belirli bir hedef değer en iyi, daha büyük daha iyi, daha küçük daha iyi) Taguchi kayıp fonksiyonunun ve performans istatistiğinin seçimini yönlendirir. Taguchi, performans istatistiği olarak işaret gürültü oranlarını kullanmaktadır. Taguchi kayıp fonksiyonu ve işaret gürültü oranları hakkındaki açıklamalar ve formüller sırasıyla Taguchi kayıp fonksiyonu ve performans istatistiği adlı bölümlerde yer almaktadır. Bu bölümlerde Taguchi kayıp fonksiyonunun ve işaret

gürültü oranlarının seçimi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Performans karakteristiklerinin birden çok olması birbirinden farklı kayıp fonksiyonu ve işaret gürültü oranı seçimini gerektirebilir. Bu durumda, izlenen yolda herhangi bir değişiklik söz konusu değildir. Önemli olan performans istatistiklerinin doğru seçilmesidir. Aksi durumda, deney verileri yanlış olur. Buna bağlı olarak da, yanlış kontrol faktörleri seçilerek, çalışmanın başarısız olmasına yol açılır.

3.3.9. Deneyin Hazırlanması

Deneyin planlanmasına ve tasarımına gösterilen özen deneyin yapılmasına da gösterilmelidir. Deneyin gerçekleştirilmesi için süreç ve deney donanımı, hammadde ve deneye katılan ekip yerinde deneyin başlamasında ve tamamlanmasında hazır olmalıdır. Deneyde uygun malzeme ve donanım kullanılmalıdır. Aksi takdirde, deneyin bütünlüğü tehlikeye girebilir. Deneyde kullanılan malzeme ve donanım elde hazır ise sadece kontrol edilir, ama değil ise, tedarik sürelerine göre deneyden önce siparişi verilerek, hazırlanır. Deney amaçlarına uygun malzeme ve donanımın kullanıldığının kontrolü çalışma ekibi tarafından yapılır. İş yapan ve denetleyen elemanlarda deneyden önce hazır olmalı ve bu elemanların deneyin hazırlanması ile ilgili önerileri dikkate alınmalıdır, çünkü bu elemanlar deneyi en iyi bilen kişileridir. Deney yapılmasında son olarak uygun süreç, donanım ve ölçüm aletleri kurularak işe başlanması için program yapılır. İlgili programın tamamlanmasından sonra deney programlandığı şekilde yapılmaya hazırdır. Hazırlanan bu programa göre son kontroller yapılır ve gözden kaçan eksikler varsa deney başlamadan önce tedarik edilir. Böylece, hammadde partileri arasındaki farklılıklar önlenerek, deneyin yanlış sonuçlar vermesi önlenir.

3.3.10. Deneylerin Yapılması ve Kontrol Faktörlerinin En İyi Değerlerinin Bulunması

Parametre tasarım deneyinin oluşturulması bölümünde ifade edildiği gibi parametre tasarım deneyleri iki şekilde yapılabilir; **Fiziksel deneyler ve bilgisayar ile benzetim**⁷⁹.

İster fiziksel deneyler , ister bilgisayar ile benzetim yolu seçilsin izlenen yol hemen hemen benzerdir. Seçilen kontrol faktörleri ve gürültü faktörleri kombinasyonları tek tek deneye alınarak değerlendirilir ve sonuçları kaydedilir. Etkileşimler kontrol faktörlerinin düzeylerine bağlı oldukları için deneyin yapılması sırasında kontrol edilemezler. Bu nedenle, her deneyin yapılmasında test stratejisini gösteren belgelerde sadece kontrol faktörleri bulunur.

Değişik düzeylerde kontrol faktörleri kombinasyonundan oluşan her bir test, deney sırasında değişerek sonuçları etkileyen ve daha önceden bilinmeyen ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı korunabilmesi için, rassallaştırılır. Rassallaştırma birçok şekilde yapılabilmesine rağmen en çok şu üç yöntem kullanılmaktadır:

1. Tam rassallaştırma
2. Basit tekrarlama
3. Bloklar içinde tam rassallaştırma

⁷⁹ R.J. Mayer ve P.C. Benjamin, "Using the Taguchi Paradigm for Manufacturing System Design Using Simulation Experiments," **Computers and Industrial Engineering**, V.22, No.2:195-209, (1992), s.196.

Tüm seçeneklerin eşit seçilme hakkına sahip olmasına tam rassallaştırma denir. Deneylerin yapılma sırası rassal numara tablosu, rassal numara yaratıcısı ya da çekilişle belirlenir. Tam rassallaştırmada da çeşitli stratejiler uygulanabilir. Her deneyin birden çok tekrarı varsa, bütün deneyler bir defa yapıldıktan sonra ikinci tekrarlar rassal olarak seçilebilir, ya da tüm deneyler tekrar sıralarına dikkat edilmeden seçilebilir.

Basit tekrarlama tüm deneyler eşit seçilme hakkına sahip, fakat seçildikten sonra bu deneyle ilgili tüm tekrarlar yapılmaktadır. Herbir deneyin kurulması ve değiştirilmesi zor ve çok maliyetli ise bu yöntem önerilir.

Herhangi bir kontrol faktörünün kurulması ve değiştirilmesi çok zor ya da maliyetli iken diğerlerinin ise, kolay ve ucuz ise bloklar içinde tam rassallaştırma yapılır. Kurulması ve değiştirilmesi zor kontrol faktörünün düzey sayısına göre deney bloklara ayrılır. Bu faktörün her bir düzeyine bağlı deneyler rassal olarak seçilir. Bu kontrol faktörünün ilk düzeyindeki deneyler tamamlandıktan sonra diğer düzeyindeki deneyler rassal olarak seçilir. Bu şekilde tüm deneyler bloklar halinde tamamlanır.

Pratik olarak, deneyin ortogonallığını korumak için her bir deneyin en az bir defa test edilmesi gerekir. Her deneyin birden fazla test edilmesi deneyin duyarlılığını artırarak ana kütle ortalamasındaki küçük değişkenliklerin belirlenmesine yardımcı olur. Yapılan deneyler çok maliyetli ve zor ise her bir deneyin tek testi yeterlidir, ancak deneyler kolay ve ucuz ise birden çok test yapılması deneyin güvenilirliğini artırması açısından önemlidir.

Deneyde kullanılan faktörlerin her bir kombinasyonu için elde edilen verilerin ortalaması, varyansı, performans istatistikleri bulunur. Değişkenlik ve varyans analizi bölümünde gösterildiği gibi hesaplamalar yapılarak her bir faktörün performans karakteristiği üzerindeki etkileri belirlenir. Ayrıca incelemeye değer kontrol faktörlerinin belirlenmesinde F testi ve katkı yüzdesi kullanılabilir.

Performans istatistiği ve faktör grafikleri en iyi faktör düzeylerinin bulunmasında temel araçlardır. Her bir faktörün düzeyleri için işaret gürültü oranı değerleri hesaplanır ve en yüksek değere sahip düzey seçilir⁸⁰. Bu işlem tüm faktörler için tekrarlanarak en iyi faktör kombinasyonu oluşturulur. Grafikler, faktör etkilerinin ve varsa etkileşimlerinin etkisini görsel olarak belirlenmede kullanılabilir. Faktör düzeyleri arasındaki farkların ve etkileşimlerin belirlenmesinde daha kolay olması nedeni ile faktör grafikleri tercih edilir.

Performans istatistiğinin özelliğine (belirli bir hedef değer en iyi, daha büyük daha iyi, daha küçük daha iyi) göre kullanılan eniyileme sürecinde farklı olur. Tüm süreçlerin ortak yönü, performans istatistiğini enbüyükleyen kontrol faktör düzeylerinin en iyi ürün ya da üretim süreci faktör düzeyleri olarak belirlenebilmesidir.

En iyi kontrol faktör düzeyleri farklı performans karakteristikleri için farklı sonuçlar vererek çelişkiye neden olabilir. Bu çelişkiyi azaltabilmek için kontrol faktörlerinin her düzeydeki değerleri, performans istatistikleri, performans

⁸⁰ Genichi Taguchi, Y. Yokoyama, Y. Wu, **Taguchi Methods: Design of Experiments**, (USA: American Supplier Institute, 1993), s.63.

karakteristikleri, maliyetler ve işlemin zorluğu gibi ölçüler göz önüne alınarak bir tablo oluşturulur. Bu tablodaki değerlere göre ödünleşme yapılarak son genel bir değerlendirme yapılır ve faktörlerin en iyi değerleri seçilir.

Kontrol faktörlerinin en iyi değerleri bulunduğundan sonra bu değerler ile tahmini ortalama performans değeri belirlenir. Böylece, gerçek deney yapılmadan önce performansın alabileceği ortalama değer hakkında bilgi elde edilebilir. Ortalama performans değerini bulmak için μ denklemi kullanılır. Bu denklem, kontrol faktörlerinin belirlenen en iyi değerlerinde ortalama performansın bir tahminidir ve performans karakteristiğinin toplanabilme özelliğine dayanmaktadır. Denklem,

$\mu = \text{Tüm deneylerin ortalaması}(\bar{T}) + \sum (\text{en iyi kontrol faktörü değerinin ortalaması} - \bar{T})$ şeklindedir⁸¹.

İki kontrol faktörünün etkisinin araştırıldığı bir deneyde $\bar{A}_2$ ve $\bar{B}_3$ en iyi kontrol faktörü değerlerinin ortalaması olmak üzere performans ortalaması,

$$\mu = \bar{T} + (\bar{A}_2 - \bar{T}) + (\bar{B}_3 - \bar{T}) \text{ ya da } \mu = \bar{A}_2 + \bar{B}_3 - \bar{T}$$

şeklinde tahmin edilir.

Tahmini ortalama performans değerinin bulunmasında kontrol faktörlerinin sayısı fazla değil ise tümü kullanılabilir. Tahmini ortalama performans değerinin bulunmasında diğer bir yol ise ortalama veriler üzerinden varyans analizi yapılarak F testi değeri ikiden büyük olan kontrol faktörlerinin ya da F testine göre belirli anlam düzeyinde etkili olan kontrol faktörlerinin kullanılmasıdır⁸². Ayrıca, çok fazla kontrol

⁸¹ Ross, a.g.e., s.118.

⁸² Taguchi, Konishi, Wu, a.g.e., s.72.

faktörünün olduğu durumlarda da daha etkili olduğu bilinen kontrol faktörlerinin yaklaşık yarısı tahmini ortalama performans değerinin bulunmasında kullanılabilir.

Performans karakteristiklerine bağlı olarak deney verilerinin yüzdelerle olması durumunda, performans karakteristiklerinin özelliklerinden biri olan toplanabilirlik bozulmaktadır. Yüzde ile yapılan hesaplamalarda (özellikle sıfır ve yüze yakın yüzdelerde) toplanabilmenin zayıf olması, veri analizi sonuçlarının yanlış yorumlanmasına ya da mantıksız sonuçların çıkmasına neden olmaktadır. Buna engel olmak için Taguchi **Omega dönüşümünü** önermiştir⁸³. Omega dönüşümü yüzdeleri daha iyi toplanabilme özelliğine sahip duruma dönüştürmektedir. Omega dönüşümünde, EK 5.'deki Omega tablosu ya da formül yardımı ile yüzde veriler desibel(db) değerine dönüştürülür. Dönüştürülen değerler ile ortalama performansı tahmin etmek için μ denklemi kullanılır. Elde edilen desibel değeri omega tablosu ya da formül yardımı ile tekrar yüzde değerine dönüştürülür. Böylece, verilerin yüzde olmasından kaynaklanan dezavantajlar ortadan kalkar.

Omega dönüşüm formülü de p kontrol faktörlerin ilgili yüzde değeri olmak üzere,

$$\Omega = -10 \log \left(\frac{1}{p} - 1 \right)$$

şeklindedir.

Var olduğu bilinen bir ürün ya da üretim süreci problemi üzerine yapılan deneylerde deneysel verinin değişkenliği daha önceden gözlenen değişkenliğin en az %

⁸³ Logothetis, Wynn, a.g.e., s.194.

75 'ini kapsamalıdır. Aksi durum doğru kontrol faktörleri ve düzeylerinin belirlenmediğinin, ya da önemsiz görülerek deney dışı bırakılan bir kontrol faktörünün değişkenliğin kaynağı olduğunun göstergesidir. Bu kontrol faktörleri ile değişkenlik azaltılamayacağı için kontrol faktörleri ve düzeylerinin belirlenmesi ile ilgili basamağa geri dönülür. Ancak, her zaman değişkenlik aralığının %75 'den fazlasını kapsaması da tüm önemli kontrol faktörlerinin deneye dahil edildiğini garanti etmez. Bu durum kontrol faktörleri ve düzeylerinin belirlenmesi bölümünün önemini bir kat daha arttırmaktadır.

3.3.11. Doğrulama Deneyinin Yapılması

Doğrulama deneyi önceki deneylerin sonunda elde edilen sonuçların onaylanmasında son basamaktır. Deneyin tasarlanmasında ve yapılmasında kullanılan analizin ve varsayımların doğruluğunu göstermede doğrulama deneyi önemli bir araçtır. Bu deney, seçilen kontrol faktörleri ve düzeylerinde ürün ya da üretim sürecinin belirli bir şekilde hareket etmesini sağlayacağını onaylamak için kullanılır.

Deneylerin yapılmasında ortogonal dizilerin kullanılması nedeni ile en iyi kontrol faktör düzeylerini içeren deney çalışma süresince hiç denenmemiş olabilir. Bu nedenle, belirlenen düzeylerin gerçekten en iyi değerler olup olmadığını kontrol etmek için doğrulama deneyleri yapılır. Doğrulama deneyleri sonunda hesaplanan performans istatistikleri bir önceki bölümde hesaplanan performans istatistikleri ile karşılaştırılarak kontrol edilir.

Bir önceki bölümde tahmini yapılan ortalama performans nokta tahminidir. Bu, istatistiksel olarak, gerçek performans ortalamasının yüzde elli şans ile μ değerinden büyük olacağını ya da yüzde elli şans ile küçük olacağını gösterir. Doğrulama deneyleri ortalaması tahmini performans ortalaması ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırmalarda doğrulama deneyleri ortalamasının belirli anlam düzeyinde belirli bir güven aralığına düşmesi beklenir. Tahmini performans ortalaması güven aralığını α anlam düzeyinde belirlemek için;

N: Toplam deney sayısı,

r: Doğrulama deneyi tekrar sayısı,

V_e : Hata varyansı,

v_e : Hata serbestlik derecesi,

$F(\alpha, 1, v_e)$: α yanılgi düzeyi ve serbestlik derecesine göre belirlenen F tablosu değeri

$n_{etk} = N / 1 + (\mu$ 'nün tahmininde kullanılan kontrol faktörlerinin serbestlik derecesi toplamı)

olmak üzere

$$GA = \mu \pm \sqrt{F(\alpha, 1, v_e) V_e [(1/n_{etk}) + (1/r)]}$$

formülü kullanılır⁸⁴.

Doğrulama deneyleri sonuçları belirlenen performans ortalamaları güven aralığı sınırları içine düşerse, belirlenen kontrol faktörleri ve düzeyleri doğru seçildiği ve deneylerin başından itibaren yapılan tüm varsayımların doğru olduğu kararına varılır. Aksi durumda, nedenlerini araştırarak gerekli önlemleri almak için, performans karakteristiklerinin ve ölçüm sistemlerinin belirlenmesi ve performans

⁸⁴ Roy, a.g.e., s.116.

karakteristiklerini etkileyen faktörlerin belirlenmesi ve sınıflandırılması bölümleri, yeniden gözden geçirilir. Bu durumun nedenleri arasında ölçüm ya da hesaplama hataları, önemli kontrol faktörlerinin deney dışında tutulması ya da yanlış performans karakteristikleri seçimi olabilir. Seçilen kontrol faktörleri arasında etkileşimin olmadığı varsayımı da yanlış olabilir. Kontrol faktörleri arasında etkileşimin varlığı yeniden araştırılmalıdır. Tüm bu nedenlerin araştırılması sonucunda hata ya da hatalar bulunarak gerekli düzenlemeler yapılır.

En iyi kontrol faktörleri değerleri ile elde edilen sonuçlar, başlangıç tasarımı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında sağlanan gelişme yeterli bulunuyorsa, çalışma tamamlanmış olur. Sağlanan gelişme yeterli bulunmuyorsa, tolerans tasarımı ile geliştirme yapılır. Tolerans tasarımında kısaca, performans karakteristiği üzerinde en fazla etkiye sahip kontrol faktörlerinin varyansları, ek bir maliyet ile, gelişme yeterli oluncaya kadar azaltılır.

Tüm bu çalışmalar yapıldıktan sonra çalışmanın maliyeti ve kalitedeki gelişmenin tüm avantajları çalışma ekibince değerlendirilerek, gerekli bölümlere rapor edilir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT YÖNTEMİNE LABORATUVAR ORTAMINDA UYGULANMASI

1. TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT YÖNTEMİNE UYGULANMASI

Bir Japon mühendisi olan Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş olan ve kendi adı ile anılan Taguchi yöntemi, 1940'lı yıllarda başlatmış olduğu kalite kontrolunda istatistiksel uygulamalarla ilgili çalışmaların ürünü olmuştur. Japonya'da bu yöntemin uygulanması sonucunda elde edilen başarılar, yöntemin kullanım alanını genişletmiştir. 1980'li yıllarda Taguchi yöntemi ile tanışan Batı endüstrisi, uygulamada elde ettiği büyük başarılardan sonra endüstrinin hemen her dalında bu yöntemi yoğun şekilde uygulamaya başlamıştır.

1980'li yılların sonlarında Taguchi yöntemi ile tanışan Türkiye'de teorik ya da uygulamalı çalışmalar çok azdır. Bu nedenle, uygulama alanı da çok dar olmuştur. Bu çalışmada, termik santral bacalarından çıkan ve çevre kirliliğine neden olan kükürtdioksit gazının giderilmesinde yeni bir yöntem olan sitrat yöntemi, uygulama için seçilmiştir.

Uygulama için bu yöntemin seçilmesinin nedenlerinden birisi kükürtdioksit gazının çevreye verdiği büyük zarardır. Linyitlerin düşük kaliteli olması sonucu kükürtdioksit gazının hava kalitesine olumsuz etkisinin azaltılması için, deşarj edilen kirleticilerin atmosfere salınmadan önce kontrol sistemlerinin uygulanması çok önemlidir. Ülkemizdeki elektrik üretiminin yaklaşık % 60'ı termik santrallardan karşılanmaktadır. Türkiye'de linyitle çalışan termik santralların üretim ve yakıt özelliklerine Tablo 2' de bakıldığı zaman linyitlerimizin kükürt ve kül içeriklerinin yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Bu nedenle, büyük miktarda linyit kömürü kullanan termik santralların kirletici emisyonları da yüksek olmakta ve çevreye verdikleri zarar da emisyon miktarlarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır.

Kükürtdioksitin atmosfere verilmesini önlemek amacıyla pek çok teknoloji geliştirilmiştir. Kükürtdioksit emisyonları yakıt yakılmadan önce ya da yanma sırasında önlenebileceği gibi, yanma sonrasında adsorplayıcı katı yüzeyde tutularak ya da sıvı çözeltilerde absorplanarak fiziksel ya da kimyasal olarak giderilebilmektedir¹.

¹ Süleyman Kaytakoğlu ve diğerleri, "Fosil Yakıt Kullanımından Kaynaklanan Kükürtdioksit Gazı Emisyonunu Giderici Yöntemlerin ve İlgili Parametrelerin Araştırılması ve Giderme Yöntemlerinin Karşılaştırılması." A.Ü. Araştırma Fonu Projesi, Sonuç Raporu (Eskişehir. 1997), s.21.

Buradan da anlaşılacağı gibi ülkemizde enerji gereksiniminin büyük bir bölümünü karşılayan termik santrallerde kullanılan, yüksek kükürt, kül ve rutubet içeriği olan düşük kaliteli linyit kömürlerinin ısınma ve sanayi amaçlı kullanımı sırasında, önemli çevre sorunları ve ciddi boyutlarda hava kirliliği problemleri yaşanmaktadır.

Tablo 2. Türkiye'de Linyitle Çalışan Santrallerin Üretim ve Yakıt Özellikleri

Santral	Kurulu Güç (MW)	Kömür Tüketimi (ton/saat)	Isıl Değer (kcal/kg)	Kül %	Nem %	Kükürt %
Yatağan	210	230	2100	20.5	36	2.7
Afşin Elbist.	344	800	1050	15.3	57.7	1.4
Yeniköy	210	280	1800	35	34	2
Seyitömer123	150	200	1800	35	34	2
Seyitömer 4	150	266	1700	40	35	2
Soma A	22	44	3582	24.6	25.2	0.71
Soma B 1-2	165	166	2200	30	27	0.98
Soma B 3-4	165	166	2200	32	21	1.5
Soma B 5-6	165	272.5	1550	40.5	20.8	1.5
Tunçbilek 1-2	35	30	3650	33	22	2
Tunçbilek 3	65	50	3900	25	23	2
Tunçbilek 4-5	150	175	2000	42.4	23	1.17
Çayırhan	150	127.3	2800	29.9	27.5	4.65
Kangal	150	277	1300	22	50	2
Orhaneli	210	200	2560	23.8	34	1.9

Kaynak: Taner Ercan, "Termik Santraller ve Çevre Sorunları," *Enerji Dünyası*, 21-25, (Eylül 1996), s.22.

Tüm bu yöntemlerin dışında dünyada uygulanan bir diğer kükürtdioksit giderim yöntemi de rejeneratif yöntemlerdir. Bu gibi yöntemlerde kükürtdioksit giderimi yapıldıktan sonra kullanılan kimyasallar geri kazanılır ve son ürün olarak pazarlanabilen ürünler elde edilebilir. Bu yöntemler ekonomikliği açısından günümüzde diğer kükürtdioksit giderim yöntemlerine göre üstünlük göstermekte ve daha çok tercih edilmektedir. Rejeneratif yöntemlerde çözelti olarak genelde sitrat, fosfat ve tetraethyleneglykol-dimethylether kullanılmaktadır. Ancak özelliklerinden dolayı rejeneratif bir yöntem olan sitrat yöntemi ile kükürtdioksit oldukça yüksek verimlerde giderilebilmektedir².

Kükürtdioksit giderici sitrat yöntemi ile ilgili kaynaklar araştırıldığında bu yöntemin en iyilenmesine ilişkin bir çalışmanın yapılmadığı ortaya çıkmıştır. Çalışmalar literatürdeki bilgilere dayanarak yapılan deneylerden oluşmaktadır. Bu deneylerde de yöntemin en iyilenmesi söz konusu değildir. Türkiye'de kükürt oranı yüksek az kalorili linyit kullanan termik santrallarda ortaya çıkan kükürtdioksit gazını giderici bir sistemin olmayışı çalışmanın önemini daha da arttırmaktadır.

Yukarıda söz edilen nedenlere bağlı olarak, kükürtdioksit giderici yöntem olarak düşük maliyetli ve yüksek absorplama yeteneğine sahip sitrat yönteminin en iyilenmesinde Taguchi yönteminin uygulanmasının yararlı olacağı düşünülmüştür. Ancak, uygulama sitrat yönteminin uygulandığı gerçek bir tesis olmaması nedeni ile laboratuvar ortamında yapılmıştır. Tüm deney düzeneği gerçeğine benzetilerek hazırlanmıştır ve elde edilen bulgular bu laboratuvar ortamı için geçerlidir.

² Olav Erga, "A New Regenerable Process for the Recovery of SO₂ Removal," **Chemical Engineering Technology**, V.11: 402-407, (1988), s.403.

2. SEÇİLEN ÜRETİM SÜRECİ SİTRAT YÖNTEMİ VE DENEY DÜZENİĞİNİN VE MALZEMENİN HAZIRLANMASI

2.1. Seçilen Üretim Süreci Sitrat Yöntemi

ABD Maden bürosu tarafından geliştirilen sitrat yönteminde, baca gazlarındaki kükürtdioksit, sodyum sitratın sulu çözeltisi ile % 99'a ulaşan verimlerle absorplanmaktadır. Baca gazı, yüksek etkinlikteki partikül tutma cihazından geçtikten sonra içerdiği uçucu kül, kükürtdioksit ve klorürlerin giderilmesi için üzerine su püskürtülerek ön yıkamadan geçirilir ve su buharı ile doyurulur. Daha sonra bu baca gazı içerdiği kükürtdioksitin tutulabilmesi için hem zehirsiz hemde biyolojik olarak ayrışabilen bir madde olan sodyum sitrat çözeltisiyle yıkanır. Sitrat burada, yıkama ünitesinin pH'ını 3.5-5 arasında tutmak için pH tamponu görevini görmektedir. Yıkama sıvısındaki hidrojen iyonlarının sitrat iyonlarını nötralleme yeteneği absorplama reaksiyonlarına yardım etmektedir.

Absorban çözeltinin rejenerasyonu sonucunda derişik kükürtdioksitin ve sülfirik asitin ya da elementel kükürdün elde edilebildiği pek çok yöntem önerilmiştir. Yöntemde, kükürtdioksitce zengin absorban çözelti rejenerasyon amacıyla H_2S 'ce zengin gaz akımıyla bir rejenerasyon reaktöründe zıt akımla karşılaştırılmaktadır. Rejenerasyon reaksiyon basamakları oldukça karmaşık olmasına rağmen temelde sıvı

fazda 50 derece sıcaklıkta oluşan bir reaksiyondur. Burada son ürün olarak elementel kükürt elde edilir ve yöntemin katı sorunu olmaması en büyük avantajıdır.

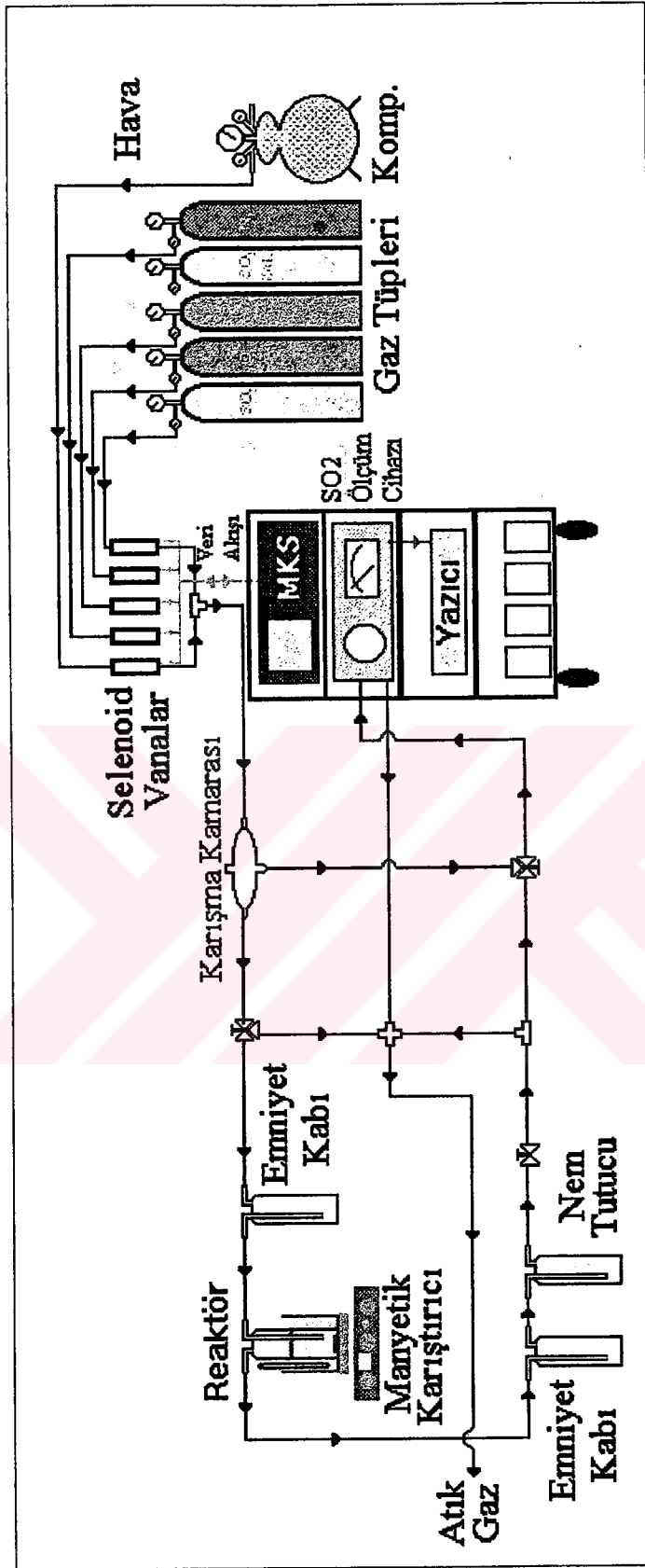
2.2. Deney Düzenekinin ve Malzemenin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında, sıcaklık, gaz akış hızları, çözelti karıştırma hızları, gaz temas şekli ile çözelti derişimlerinin, belirli bir gaz derişimindeki kükürtdioksiti absorplama kapasitesine olan etkileri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda Şekil 16'da gösterilen deney düzenekği Anadolu Üniversitesi Anadolu Teknoloji Araştırma Parkı Kimya Mühendisliğı laboratuvarında hazırlanmıştır.

Absorpsiyon ortamı olarak küçük ölçekli kabarcıklı bir kolon olan gaz yıkama şişesi kullanılmıştır. Gaz yıkama şişesi, iyi bilinmeyen kütle aktarım arayüzeyi ve kütle aktarım katsayıları nedeniyle model reaktör olarak kabul edilmemekle birlikte, absorpsiyon ortamlarının belirlenmesi, ayrıca sıcaklık, karıştırma hızı, çözelti derişimleri, akım hızları ve gaz temas şekli gibi faktörlerin etkisinin araştırılması amacıyla kullanılmaktadır.

Deneylerde kullanılan ve kükürtdioksit içeren model baca gazı, % 100 kükürtdioksit içeren çelik tüpten çekilen kükürtdioksitin, hava kompresöründen alınan ve taşıyıcı gaz olarak kullanılan hava ile bir karıştırma kamarasında 6000ppm(parts per million) değerine seyreltilmesiyle laboratuvarında hazırlanmıştır. Bu gazın kükürtdioksit içeriğı bir cihazla sürekli olarak belirlenmiştir.

Şekil 16. Deney düzeneği



Kaynak: Süleyman Kaytaköğlu ve diğerleri, "Fosil Yakıt Kullanımından Kaynaklanan SO_2 Emisyonunu Giderici Yöntemlerin ve İlgili Parametrelerin Araştırılması ve Giderme Yöntemlerinin Karşılaştırılması," Anadolu Üniversitesi Araştırma Fonu Projesi, Eskişehir, 1997, s.46.

Bu sistemde, kükürtdioksit içeren model baca gazını gerçek bir baca gazına benzetmek gerektiğinde hava yanında basınçlı tüplerden alınan oksijen, azot ve karbondioksit de kullanılabilir. Taşıyıcı gazın su buharı ile doyurulması, içi su dolu termostatlı bir kolondan taşıyıcı gazın geçirilmesi ile gerçekleştirilebildiği gibi bu amaçla bir su buharı jeneratörü de kullanılabilir. Model gazın absorpsiyonunda daha önceden söz edildiği gibi sitrat çözeltileri kullanılmıştır.

Bu çalışmada kükürtdioksit içeren model baca gazından kükürtdioksitin absorpsiyonu, 0.25 litre hacminde sodyum sitratın sulu çözeltileriyle doldurulmuş ve bir manyetik karıştırıcı ile 200, 500, 800 devir/dakika hızla karıştırılmakta olan 0.5 litre hacimli yıkama şişesinden sözkonusu model gazın 1.5, 3.0 ve 5.0 standart litre/ dakika hızında üç değişik şekilde geçirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Burada model baca gazı, 4 kanallı MKS marka gaz hazırlama cihazı kullanılarak % 100 kükürtdioksit içeren çelik tüpten 1 atm basınç ve 25 derece sıcaklık şartlarında çekilen saf kükürtdioksitin 6-8 atm basınç aralığında çalışan ve 100 litre hacimli bir kompresörden 1 atm basınç, 25 derece sıcaklık ve 1.5, 3.0 ve 5.0 Slt/dak. akış hızlarında temin edilen hava içerisinde 6000ppm kükürtdioksit içerecek şekilde seyreltilmesi ile hazırlanmıştır.

Sistemden gelen gazların homojen bir şekilde karışmasını sağlamak için karışma kamarası kullanılmaktadır. Hazırlanan deney düzeneğinde iki adet emniyet kabı bulunmaktadır. Sistemden ya da kullanıcıdan kaynaklanabilecek herhangi bir vakum (basınç düşüşü) problemi ile karşılaşılması durumunda reaktörde bulunan çözeltinin

ölçüm cihazlarına doğru akmasını engellemek için reaktörün önüne bir emniyet kabı konulmaktadır. İkinci emniyet kabı soğutucu görevini görmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerde çözeltide buharlaşma meydana gelmektedir. Çözelti kaybını engellemek için yüksek sıcaklıklarda buharlaşan çözelti emniyet kabında soğuk ortamda yoğuşturularak tekrar reaktöre geri gönderilir. Yoğuşturulamayan buharın ölçüm cihazlarına gitmesini engellemek amacıyla içinde nem tutucu bir kimyasal maddenin bulunduğu bir kap kullanılmaktadır. Bu kabın içindeki nem tutucu kimyasal madde ise kalsiyum klorürdür.

Bu çalışma kapsamında yürütülen deneylerin tamamında, kükürtdioksit derişimleri daha güvenilir ve süratli sonuç vermesi nedeniyle gaz fazı ölçümleri ile belirlenmiştir. Bu amaçla kükürtdioksit / hava karışımlarındaki kükürtdioksit derişimleri çalışma prensibi kısaca bir kükürtdioksit ölçüm cihazıyla sürekli olarak belirlenmiştir. Ölçülen bu değerler kağıt hareket hızının istenildiği gibi ayarlanabildiği bir yazıcıda sürekli olarak kaydedilmiştir. Kükürtdioksit ölçüm cihazında, kızıl ötesi ışın, dağıtılmadan eşit yoğunluktaki iki ışın demetine ayrıldıktan sonra içerisinde referans gazın ve derişimi tesbit edilecek gazın bulunduğu küvetlerden geçer ve bir dedektöre gelir. Kızıl ötesi ışın, bu küvetlerden geçişi sırasındaki absorpsiyonu nedeniyle farklı yoğunlukta dedektöre gelir ve burada farklı ısınmadan dolayı dedektör ile dengeleyici küvet arasında bir basınç farkı oluşur. Bu basınç farkını dengeleyici nitelikte oluşturulan elektrik akımı ölçüm değeri olarak kaydedilir.

Hazırlanan deneyin çalışmasını normal şartlar altında kısaca özetlemek gerekirse istenilen derişimdeki kükürtdioksit gazı reaktöre verildikten sonra bir kısmı

sitrat çözeltisi tarafından absorplanmakta, absorplanamayan kısmı ise kükürtdioksit ölçüm cihazına geri gönderilerek, ölçülmektedir. Derişimi ölçüldükten sonra bu gaz, atık gaz olarak dışarıya verilmektedir.

3.TAGUCHİ YÖNTEMİNİN KÜKÜRTDİOKSİT GİDERİCİ SİTRAT

YÖNTEMİNE UYGULANMASINDA İZLENEN TEMEL BASAMAKLAR

Taguchi yönteminin uygulanmasında izlenen temel basamaklar ürün ya da süreç geliştirilmesine göre değişiklik göstermemektedir. Önemli olan konu Taguchi yönteminde izlenen basamakların uygulanmasında hata yapılmamasıdır. Uygulama sırasında oluşabilecek olan sorunların bir çözüme ulaştırılmasının bu temel basamaklar içinde yer alması da önemlidir.

Taguchi yönteminin kükürtdioksit giderici sitrat yöntemine uygulanmasında izlenen temel basamaklarda bir kısım sorunlarla karşılaşılmasıdır. Bu sorunların bir kısmı geliştirilen sürecin yapısı gereği, bir kısmı ise uygulanan yöntemden kaynaklanmış ve bu sorunlara çözüm yolları bulunmuştur. Uygulamanın tamamında izlenen yaklaşım, önceki bölümde yer alan ""Taguchi Yönteminin Uygulanmasında Temel Basamaklar" adlı bölümde yer alan yaklaşımın aynısıdır.

3.1. Çalışma Ekibinin Kurulması

Sitrat yöntemi dünyada termik santrallardan kükürtdioksit emisyonlarının gideriminde son yıllarda kullanılmaya başlanan rejeneratif bir yöntemdir. Bu yöntemde

kükürtdioksit gazı sodyum sitratın sulu çözeltileriyle giderilmekte ve kükürtdioksitce doymun çözeltili, çeşitli yöntemlerle rejenere edilmektedir. Bu rejenerasyon sonucunda hem sitrat çözeltilisi geri kazanılmakta, hem de rejenerasyon ürünü olarak elde edilen elementel kükürt, kükürtdioksit ve sülfirik asit sanayinin çeşitli kollarında pazarlanabilir bir ürün olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada sorun kullanımı yeni olan bu sürecin eniyilenmesidir. Sürecin en iyilenmesi de belirlenen kontrol faktörlerinin en iyi değerlerinin bulunması anlamına gelmektedir.

Yapılan bu çalışma kapsamında Anadolu Üniversitesi Anadolu Teknoloji Araştırma Parkı bünyesinde bulunan ve hava kirliliği giderimi ve kontrolü konularında çalışan bir Kimya mühendisi ve iki uzman öğretim üyesi ile bir Endüstri Mühendisi, bu ekibi oluşturmaktadır.

3.2. Amaçların Belirlenmesi

Oluşturulan bu ekip çeşitli zamanlarda biraraya gelerek deneyler için gerekli bilgilerin üretilmesi ve amaçların belirlenmesi için beyin fırtınası oturumları yapmış ve ayrıca bu konudaki literatür bilgilerinden yararlanılmıştır. Bu ekibin üzerinde çalışılan süreç hakkındaki tecrübeleri sayesinde oturumlarda kısa sürede yeterli bilgiye ulaşılmıştır. Yeterli bilgiye ulaşıldığına karar verildikten sonra bu bilgiler ışığında görev bölümü yapılmıştır.

Özellikle kıt kaynaklara sahip ülkemizde, sayıları yirmiye yaklaşan linyitle çalışan termik santraller içinde sadece Çayırhan-Ankara'da bulunan termik santralda hem partikül hem de kükürtdioksit giderme sisteminin olduğu ve bunun dış kaynaklı olduğu düşünülürse, bu konuda bilimsel ve teknik yönden ne kadar eksik ve dışarıya bağlı olduğumuz ortaya çıkmaktadır. Yine son günlerde, artan hava kirliliği ve çevreci baskılar nedeniyle diğer termik santraller içinde partikül ve özellikle maliyeti milyarlarca doları bulacak kükürtdioksit giderici sistemlerin satın alınacağı ihalelerin yapılması düşünülmektedir.

Tüm bu nedenlerden dolayı, çalışmanın amacı termik santrallarda kükürtdioksit giderimine yönelik yeni bir yöntem olan sitrat yöntemini önerirken, bu yöntemin eniyilenmesinde Taguchi yöntemini uygulayarak, yetkililere en iyi ve doğru sonucu verecek kontrol faktörleri değerlerini sunarak yardımcı olmaktır.

3.3. Performans Karakteristiklerinin ve Ölçüm Sistemlerinin Belirlenmesi

Enerji kaynağı olarak linyitlerin kullanıldığı termik santrallarda yanma sonucunda oluşan kükürtdioksit gazının gideriminde sitrat yöntemi uygulandığı zaman, dikkat edilmesi gereken ilk konu, sitrat çözeltisinin kükürtdioksit gazını uzun süre yüksek verimlerde tutması ve sitrat çözeltisinin kükürtdioksit tarafından geç doygunluğa ulaşmasını sağlamaktır. Sitrat çözeltisinin kükürtdioksit gazı ile doygunluğa ulaşma süresinin incelenmesi genel sistem karakteristiğini ortaya koymakta önemlidir, çünkü ele alınan sistemde meydana gelen kimyasal reaksiyonların sisteme olan etkisinin bilinmesi, sonuçların değerlendirilmesi açısından gereklidir. Ayrıca, bu yöntemin

uygulanmasında olanaklar çerçevesinde olası en düşük maliyetin elde edilmesi de yöntemin uygulanabilirliği açısından önemlidir.

Özetle, ilgilenilen performans karakteristikleri olarak aşağıdakiler belirlenmiştir:

1. Sitrat çözeltisinin kükürtdioksit gazı ile doygunluğa ulaşma süresinin enbüyüklenmesi,
2. Sitrat çözeltisinin kükürtdioksit gazını % 95 ve üzeri verimlerde tutma süresinin enbüyüklenmesi,
3. Maliyetlerin enküçüklenmesi.

Belirlenen performans karakteristiklerinin ölçümünde kükürtdioksit ölçüm cihazı, kağıt hareket hızı istenildiği gibi ayarlanabilen kükürtdioksit ölçüm cihazına bağlı yazıcı, manyetik karıştırıcı ve hassas tartım aleti gerekmektedir. Ölçüm için gereken bu aletler laboratuvarında bulunduğundan dolayı, aletlerin temini ile ilgili herhangi bir problem söz konusu değildir.

3.4. Performans Karakteristiklerini Etkileyen Faktörlerinin Belirlenmesi ve Sınıflandırılması

Performans karakteristiklerini etkileyen faktörlerin belirlenmesinde en etkili yollardan biri olan beyin fırtınası oturumları yapılmıştır. Bu oturumların sonucunda performans karakteristiklerini etkileyen faktörler aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

1. Reaktördeki çözelti sıcaklığı (° C)
2. Kükürtdioksit gazının akış hızı (standart litre / dakika)
3. Kükürtdioksit gazının temas şekli

4. Sitrat çözeltisi karıştırma hızı (devir / dakika)
5. Sitrat çözeltisi derişimi (M) (Molar)
6. Kükürtdioksit gazının derişimi (ppm) (parts per million)
7. Sitrat çözelti hacmi (Litre)
8. Kullanılan reaktör çeşidi (Dreschell, dolgulu kolon, akışkan yatak)

Performans karakteristiğini etkileyen bu faktörlerden ilk beşinin hem en etkili hem de kontrollerinin deney sırasında kolay olduğuna inanıldığı için kontrol faktörü olarak kabul edilmiştir. Geriye kalan son üç faktör ise gürültü faktörü olarak kabul edilmiştir. Böylelikle, faktörler kontrol faktörleri ve gürültü faktörleri olarak iki sınıfa ayrılmıştır.

Belirlenen kontrol faktörleri çalışmanın çok genişlemesine neden olmayacağı için bu faktörlerin azaltılmasına yönelik hazırlık deneyleri yapılmamıştır.

3.5. Kontrol Faktörlerinin ve Gürültü Faktörlerinin Düzeylerinin Belirlenmesi

Performans karakteristiklerini etkileyen kontrol faktörlerinin belirlendiği beyin fırtınası oturumlarının devamında kontrol faktörlerinin düzeyleri Tablo 3'deki gibi belirlenmiştir. Kontrol faktörlerinin düzeylerinin belirlenmesinde hem performans karakteristiklerine etkilerinin en iyi şekilde belirlenmesine hem de uygulanabilir olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca, kontrol faktörlerinin düzeyleri belirlenirken daha önce yapılmış deneylerden ve literatürden de yararlanılmıştır. Kükürtdioksit gazının

temas şeklinin etkisini belirlemek için iki düzey yeterli görülmüştür. Sitrata çözeltisinin içine olanaklar çerçevesinde doğrudan ya da filtreden geçirilerek gaz verilmiştir. Diğer kontrol faktörleri için, eğer varsa, doğrusal olmayan ilişkilerin de ortaya çıkması için üç düzey belirlenmiştir. Düzey sayısının daha fazla artırılması deney sayısını artırırken, hem maliyetleri arttırmakta, hem de deneylerin yapılmasını zorlaştırmaktadır. Kontrol faktörlerinin bu düzeylerinde belirlenmesinde eldeki kaynakların bu düzeyler için yeterli olması da etkili olmuştur.

Deneyler sırasında gürültü faktörleri için bir dizi oluşturmak çok zor ve maliyetli olduğu için gürültü faktörleri dizisi oluşturmak yerine, her deneyin iki tekrarının yapılmasına karar verilmiştir.

Tablo 3. Kontrol Faktörleri ve Düzeyleri

	KONTROL FAKTÖRLERİ	DÜZEYLER		
		1	2	3
A	Gaz Teması	Filtreli	Doğrudan	-----
B	Çözelti Sıcaklığı (° C)	35	50	65
C	Gaz Akış Hızı (sl/dak.)	1.5	3.0	5.0
D	Karıştırma Hızı (dev./ dak.)	200	500	800
E	Çözelti Derişimi (M)	0.10	0.25	0.50

3.6. Potansiyel Etkileşimlerin Belirlenmesi

Performans karakteristiklerini etkileyen kontrol faktörlerinin belirlendiği beyin fırtınası oturumlarında etkileşimli faktörlerin seçilmemesine dikkat edilmiştir. Ayrıca, seçilen kontrol faktörlerinin daha önceki deneylere, literatür bilgilerine ve tecrübelerine dayanarak etkileşimli olmadığına karar verilmiştir.

3.7. Uygun Ortogonal Dizilerin Seçilerek Atamaların Yapılması

Çalışmada kullanılacak kontrol faktörleri ve düzeyleri belirlendikten sonra bu kontrol faktörlerinin uygun ortogonal diziye atanması gerekmektedir. Uygun ortogonal diziyi belirlemek için ilk gerekli olan her bir kontrol faktörünün serbestlik derecesinin hesaplanmasıdır. Kontrol faktörünün serbestlik derecesi düzey sayısının bir eksigidir. O halde, seçilecek ortogonal dizide olması gerekli en az serbestlik derecesi

	<u>Düzy Sayısı</u>	<u>Serbestlik Derecesi</u>
Kontrol Faktörü A	2	$(2-1) = 1$
Kontrol Faktörü B	3	$(3-1) = 2$
Kontrol Faktörü C	3	$(3-1) = 2$
Kontrol Faktörü D	3	$(3-1) = 2$
Kontrol Faktörü E	<u>3</u>	<u>$(3-1) = 2$</u>
<u>TOPLAM</u>	<u>14</u>	<u>9</u>

şeklinde hesaplanır.

Bu durumda seçilecek ortogonal dizinin serbestlik derecesinin 9 ya da daha fazla olması gerekmektedir. Ayrıca seçilen bu ortogonal dizi 1 iki düzeyli ve 4 üç düzeyli kontrol faktörlerini atamaya uygun olmalıdır. Tüm bu şartlara en uygun ortogonal dizi EK 2'deki standart ortogonal dizilerden $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ dizisidir. Seçilen dizi için serbestlik derecesi 17'dir. Bu serbestlik derecesinde istenilen serbestlik derecesi için yeterlidir.

Seçilen bu ortogonal diziye 1 iki düzeyli ve 7 üç düzeyli kontrol faktörü atanarak, incelenebilir. Bu çalışmada 1 iki düzeyli ve 4 üç düzeyli kontrol faktörü olduğu için üç kolon boş bırakılarak hata kestiriminde kullanılmıştır.

Ataması yapılan 1 iki düzeyli ve 4 üç düzeyli kontrol faktörünün arasında etkileşim olmaması da $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ dizisinin seçiminde etkili olmuştur. $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ dizisi özel tasarlanmış dizilerden birisidir. Bu dizi aralarında etkileşimin olmadığı kontrol faktörlerinin incelenmesinde kullanılan bir dizidir. Sadece iki düzeyli 1 no'lu kolon ile üç düzeyli 2 no'lu kolon arasındaki etkileşim üzerinde çalışılabilir. Bu iki kolon arasındaki etkileşimin etkileri de dizideki herhangi bir kolonu feda etmeden, herbir faktör kombinasyonunun ortalama sonucunun koyulduğu 2×5 matrisi ile incelenebilir. Diğer üç düzeyli kolonlar arasındaki etkileşimlerin etkisi tüm üç düzeyli kolonlara eşit miktarda dağıtılmıştır. Bu nedenle, üç düzeyli kolonlar arasındaki etkileşimler incelenemez. Bu dizinin kolonlarına göre toplam serbestlik derecesi hesaplanacak olursa 15 olduğu görülür. Geriye kalan serbestlik derecesi ($17-15=2$) bu etkileşim için kullanılmaktadır. Çalışmada bu iki kolon arasında etkileşim söz konusu olmadığı için geriye kalan iki serbestlik derecesi de hata kestiriminde kullanılmıştır.

$L_{18} (2^1 \times 3^7)$ dizisi 1 ve 2 no'lu kolonların dışında etkileşimin incelenemediği özel bir dizi olduğu için standart doğrusal grafiği de aşağıdaki gibidir:

Şekil 17. $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ Dizisinin Standart Doğrusal Grafiği



Yapılan çalışmada kontrol faktörleri arasında etkileşim söz konusu olmadığı için iki düzeyli A faktörü 1 no'lu kolona üç düzeyli B, C, D, E kontrol faktörleride sırasıyla 2, 3, 4, 5 no'lu kolonlara atanmıştır. Geriye kalan 6, 7 ve 8 no'lu kolonlar da daha önce belirtildiği gibi hata kestirimi için kullanılmıştır. Bu durumda standart doğrusal grafiğin dönüştürülmesi gibi bir durum söz konusu olmamıştır. Standart doğrusal grafik son üç kolonun hata kestirimine ayrılması dışında aynı şekilde kullanılmıştır.

Yukarıda belirtildiği gibi, gürültü faktörlerinin etkisini incelemek için gürültü faktörü için bir dizi oluşturup çalışmaya katmak yerine herbir deney kombinasyonu için 2 tekrar yapılması uygun görülmüştür.

3.8. Taguchi Kayıp Fonksiyonu ve Performans İstatistiklerinin Belirlenmesi

Üzerinde çalışılan performans karakteristikleri sürekli bir ölçekle ölçülebilmektedir. Performans karakteristiklerinin özelliğine göre Taguchi kayıp fonksiyonu ve buna bağlı olarak performans istatistikleri belirlenmiştir. Daha önceden

belirtildiği gibi Taguchi, performans istatistiği olarak işaret-gürültü oranlarını önermiştir. Bu çalışmada da performans istatistiklerine göre işaret-gürültü oranları belirlenmiştir. İlgilenilen performans karakteristiklerinden birincisi sitrat çözeltisinin doygunluğa ulaşma süresinin enbüyüklenmesi olduğundan daha büyük daha iyi durumu söz konusudur. Daha büyük daha iyi durumu için Taguchi kayıp fonksiyonu $L = k (1 / y^2)$ şeklindedir. Buna bağlı olarak kullanılan işaret gürültü oranı şu şekilde oluşmuştur:

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

Diğer performans karakteristiği olan sitrat çözeltisinin kükürtdioksit gazını % 95 ve üzeri verimlerde tutma süresinin enbüyüklenmesi için de daha büyük daha iyi durumuna uygun Taguchi kayıp fonksiyonu ve işaret gürültü oranı seçilmiştir. Seçilen Taguchi kayıp fonksiyonu ve işaret gürültü oranı birinci performans karakteristiği için seçilen ile aynı olmuştur.

3.9. Deneyin Hazırlanması

Deneyleri yapmaya başlamadan önce deneyde çıkabilecek zorlukları engellemek için deney hazırlığının yapılması çok önemlidir. Hazırlıkların yeterli şekilde yapılmaması hem deneylerin aksamasına hem de yanlış sonuçların çıkmasına neden olabilir.

Deneyin yapılması için deney donanımı, hammadde ve deneyi yapacak olan ekip hazırlanmıştır. Deney bütünlüğünün bozulmaması için gerekli olan kükürtdioksit ve

sitrik asit yeteri derecede sağlanmıştır. Deneylerin yapılması sırasında kolaylıkla kırılabilir ya da bozulabilecek olan cam boruların, cam muslukların, emniyet kablalarının, plastik boruların ve cam fanusların yedekleri tedarik edilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazları (termostat, kükürdioksit ölçüm cihazı, karıştırıcı) tekrar kontrol edilmiştir. Deneyi yapan tüm ekip toplanarak deney düzeneğini ve malzemeleri son defa kontrol ettikten sonra deneylerin yapılmaya başlanmasına karar verilmiştir.

3.10. Deneylerin Yapılması ve Kontrol Faktörlerinin En İyi Değerlerini Bulunması

$L_{18} (2^1 \times 3^7)$ ortogonal dizisinin kolonlarına belirlenen kontrol faktörleri atandıktan sonra yapılacak deneylerin sırası elde edilmiştir. Ancak değişik düzeylerde kontrol faktörleri kombinasyonundan oluşan her bir deney sırası, deney sırasında değişerek sonuçları olumsuz şekilde etkileyen ve daha önceden bilinmeyen ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı korunabilmesi için, rassallaştırılmıştır. Rassallaştırmada basit tekrarlama yöntemi kullanılmıştır. Sıralama çekilişle belirlendikten sonra her deney iki defa tekrarlanmıştır.

Her deney yapıldıktan sonra ilgilenilen performans karakteristikleri ile ilgili ölçümler belirli alanlara kaydedilmiştir. Böylelikle, her deney yapılmadan önce yapılacak değişiklikler azaltılmış ve maliyetten ve zamandan tasarruf edilmiştir. $L_{18} (2^1 \times 3^7)$ ortogonal dizisinin kolonlarına kontrol faktörlerinin atanmış şekli ve bu kontrol faktörlerinden oluşan kombinasyonun rassallaştırılmış deney sırası Tablo 4' de bulunmaktadır.

Tablo 4. Rassallaştırılmış Deney Sıraları ve Kontrol Faktörleri Kombinasyonu

Den. No	Rassallaştırılmış Deney Sırası	Faktör A	Faktör B	Faktör C	Faktör D	Faktör E	Hata
1	15	Filtreli	35	1.5	200	0.10	111
2	16	Filtreli	35	3.0	500	0.25	222
3	10	Filtreli	35	5.0	800	0.50	333
4	17	Filtreli	50	1.5	200	0.25	233
5	2	Filtreli	50	3.0	500	0.50	311
6	13	Filtreli	50	5.0	800	0.10	122
7	8	Filtreli	65	1.5	500	0.10	323
8	7	Filtreli	65	3.0	800	0.25	131
9	5	Filtreli	65	5.0	200	0.50	212
10	3	Doğrudan	35	1.5	800	0.50	221
11	6	Doğrudan	35	3.0	200	0.10	332
12	9	Doğrudan	35	5.0	500	0.25	113
13	14	Doğrudan	50	1.5	500	0.50	132
14	12	Doğrudan	50	3.0	800	0.10	213
15	18	Doğrudan	50	5.0	200	0.25	321
16	11	Doğrudan	65	1.5	800	0.25	312
17	4	Doğrudan	65	3.0	200	0.50	123
18	1	Doğrudan	65	5.0	500	0.10	231

Tablo 5. Deney Sonuçları ve İşaret Gürültü Oranları

Deney No	Sitrat Çöz. Doyma Süresi (dak)				Sitrat Çöz. %95 Verimle Tutma Süresi(dak)			
	1	2	Ortalama	S / N	1	2	Ortalama	S / N
1	176	183	179.50	45.08	80	84	82.00	38.27
2	210	186	198.00	45.89	70	69	69.50	36.84
3	234	246	240.00	47.60	64	66	65.00	36.26
4	318	310	314.00	49.94	114	132	123.00	41.73
5	312	315	313.50	49.92	114	84	99.00	39.61
6	50	58	54.00	34.58	11	13	12.00	21.49
7	144	154	149.00	43.45	36	42	39.00	31.74
8	158	153	155.50	43.83	26	24	25.00	27.94
9	148	152	150.00	43.52	21	24	22.50	26.99
10	624	636	630.00	55.99	264	252	258.00	48.23
11	90	93	91.50	39.22	36	39	37.50	31.46
12	118	130	124.00	41.84	40	30	35.00	30.61
13	528	534	531.00	54.50	160	175	167.50	44.45
14	76	88	82.00	38.21	28	31	29.50	29.36
15	100	103	101.50	40.13	24	24	24.00	27.60
16	280	276	278.00	48.88	92	96	94.00	39.46
17	220	228	224.00	47.00	60	75	67.50	36.42
18	84	90	87.00	38.77	24	20	22.00	26.74

Tüm rassallaştırılan deneyler yapıldıktan ve performans karakteristikleri ile ilgili ölçümler kaydedildikten sonra basit aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır. Performans

karakteristiklerine ilişkin performans istatistiklerinin (işaret-gürültü oranı, S/N) hesaplanmasında da "Taguchi Kayıp Fonksiyonu ve Performans İstatistiklerinin Belirlenmesi" basamağındaki formül kullanılmıştır. Tüm bu hesaplamalar iki performans karakteristiği için ayrı ayrı yapılmış ve Tablo 5' de verilmiştir.

Her performans karakteristiğinin kontrol faktörleri varyans analizi için IBM uyumlu PC ortamında çalışan WinRobust Lite paket programı kullanılmıştır. Deney verileri paket programa verildikten sonra elde edilen varyans analizi sonuçları her performans karakteristiği için ayrı olarak Tablo 6 ve Tablo 7' de verilmiştir. Her iki tabloda da, istenilen anlam düzeyinde F testine göre hata terimine karşı önemsiz bulunan faktörler birleştirilmiştir. Genel olarak, birleştirmelerde F değeri birden küçük olursa, faktörün önemsiz olduğuna, F değeri iki civarında olursa orta etkisinin olduğuna ve F değeri dörtten büyük olursa faktörün etkisinin kuvvetli olduğuna dikkat edilmiştir.

Tablo 6 'da Gaz temas şekli, çözelti sıcaklığı ve karıştırma hızı kontrol faktörleri önemsiz bulunarak ($F < 4$) birleştirilmiştir. Tablo 7' de ise sadece gaz temas şekli ve karıştırma hızı kontrol faktörleri önemsiz bulunarak birleştirilmiştir. F testinden sonra etkili olan kontrol faktörlerinin performans karakteristiğine olan yüzde katkıları hesaplanmıştır.

Her iki performans karakteristiği için varyans analizi tablolarına bakıldığı zaman C (gaz akış hızı) ve E (çözelti derişimi) kontrol faktörlerinin etkili olduğu, ayrıca performans karakteristiği çözeltinin kükürtdioksit gazını yüksek verimlerde tutma süresi için B (çözeltinin sıcaklığı) kontrol faktörünün de etkili olduğu ve tüm bu kontrol

faktörlerinin incelenmesinin faydalı olduğu görülmektedir. Diğer kontrol faktörleri olan gaz temas şekli ve karıştırma hızı performans karakteristikleri üzerinde etkili olmadıkları için incelenmeye değer değildir, fakat maliyet söz konusu olunca bu kontrol faktörleri de dikkate alınmalıdır.

Tablo 6. Performans İstatistiği Çözeltinin Doygunluğa Ulaşma Süresi İçin Varyans Analizi

DEĞİŞKENLİK KAYNAĞI	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Katkı Yüzdesi
Gaz Teması (A)	0.03	1	0.03		
Çözelti Sıcaklığı (B)	9.77	2	4.88		
Gaz Akış Hızı (C)	227.36	2	113.68	50.1**	40.56
Karıştırma Hızı (D)	7.54	2	3.77		
Çözelti Derişimi (E)	292.53	2	146.26	64.4**	52.42
HATA	12.16	8	1.52		
Birleştirilmiş HATA	(29.50)	(13)	(2.27)		(7.02)
TOPLAM	549.39	17	32.32		100.00

** % 1 Anlam Düzeyinde Etkili Olan Kontrol Faktörleri $F_{(0.01, 2, 13)} = 6.70$

Faktör grafikleri de en iyi faktör düzeylerinin belirlenmesinde, performans istatistiği gibi, temel araçlardan biri olması nedeni ile kullanılmıştır. Faktör grafikleri ile herbir kontrol faktörünün performans istatistiklerine olan etkileri görsel olarak ortaya konulmuştur.

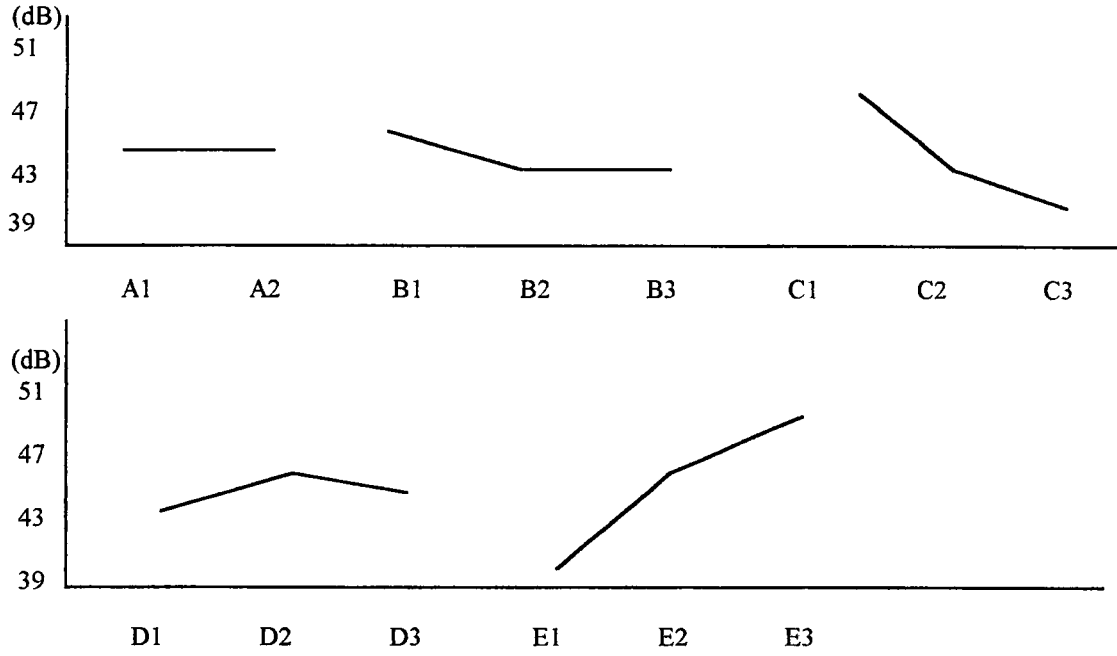
Tablo 7. Performans İstatistiği Çözeltilinin Kükürtdioksit Gazını Yüksek Verimlerde Tutma Süresi İçin Varyans Analizi

DEĞİŞKENLİK KAYNAĞI	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Katkı Yüzdesi
Gaz Teması (A)	10.09	1	10.09		
Çözelti Sıcaklığı (B)	87.50	2	43.75	13.9**	9.94
Gaz Akış Hızı (C)	461.55	2	230.77	73.26**	55.72
Karıştırma Hızı (D)	6.10	2	3.05		
Çözelti Derişimi (E)	233.30	2	116.65	37.0**	27.79
HATA	18.42	8	2.30		
Birleştirilmiş HATA	(34.61)	(11)	(3.15)		(6.55)
TOPLAM	816.96	17	48.06		100.00

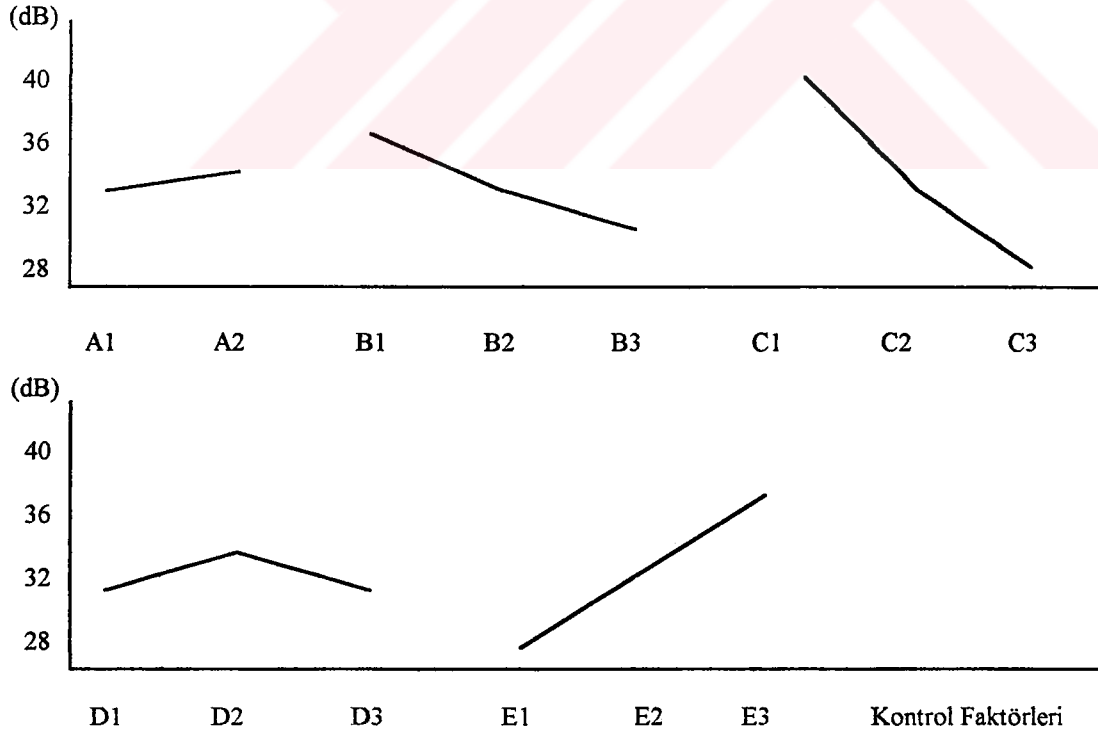
** % 1 Anlam Düzeyinde Etkili Olan Kontrol Faktörleri $F_{(0.01, 2, 11)} = 7.21$

Şekil 18 kontrol faktörlerinin performans istatistiği çözeltinin doygunluğa ulaşma süresi üzerine etkilerini, Şekil 19 ise kontrol faktörlerinin performans istatistiği çözeltinin kükürtdioksit gazını yüksek verimlerde tutma süresi üzerine etkilerini göstermek için çizilmiştir. Şekil 18 ve Şekil 19 'daki grafiklere bakıldığı zaman varyans analizi tablolarında incelemeye değer bulunan kontrol faktörlerinin performans karakteristikleri üzerinde etkili oldukları görülmektedir.

Şekil 18. Kontrol Faktörlerinin Performans İstatistiği Çözeltinin Doygunluğa Ulaşma Süresi Üzerindeki Etkileri



Şekil 19. Kontrol Faktörlerinin Performans İstatistiği Çözeltinin Kükürtdioksit Gazını Yüksek Verimlerde Tutma Süresi Üzerindeki Etkileri



İncelemeye değer bulunan C ve E kontrol faktörleri grafiklerde de her iki performans karakteristikleri için en etkili faktörler olarak görülmüştür. B kontrol faktörü de ikinci performans karakteristiği üzerinde diğer bir etkili faktör olarak görülmüştür. Ayrıca, performans istatistiğinin özelliğine bağlı olarak her kontrol faktörünün grafiğindeki tepe noktası(en büyük işaret gürültü oranı değeri) en iyi düzeyini göstermektedir.

Varyans analizi tabloları ve faktör grafikleri beraber değerlendirmeye alındığı zaman performans istatistiği çözeltinin doygunluğa ulaşma süresinin enbüyüklenmesi için en iyi kontrol faktörleri kombinasyonu $A_2 B_1 C_1 D_2 E_3$ şeklinde belirlenmiştir. Bunun anlamı, gaz teması doğrudan, çözelti sıcaklığı 35°C , gaz akış hızı 1.5slm, karıştırma hızı 500dev/dak ve çözelti derişimi 0.5 M olduğu zaman söz konusu performans istatistiği en büyük değerine ulaşacak anlamına gelmektedir. Diğer performans karakteristiği olan çözeltinin kükürtdioksit gazını yüksek verimlerde tutma süresinin enbüyüklenmesi için de en iyi kontrol faktörleri kombinasyonu birinci performans karakteristiği ile aynı $A_2 B_1 C_1 D_2 E_3$ şeklinde oluşmuştur. Bu durum, değerlendirmeyi kolaylaştırmasına rağmen dikkat edilmesi gereken diğer bir konuda maliyetlerdir. Son değerlendirmeye yardımcı olması amacı ile tüm kontrol faktörlerinin her bir düzeyi için hem performans istatistiklerinin hem de maliyetlerin katıldığı Tablo 8 oluşturulmuştur. Deneylerin laboratuvar ortamında yapılmasından dolayı maliyetler hakkında kesin rakamlar vermek olanaksızdır. Ancak, çalışma ekibinin görüşleri sonucunda hangi kontrol faktörlerinin daha maliyetli olabileceği belirlenmiştir. Gaz teması incelendiği zaman, gazın çözelti içine doğrudan verilmesinin özel bir filtre kullanılmasından daha az maliyetli olacağı açıktır. Filtre kullanılması bir maliyet

oluşturmaktadır. Çözelti sıcaklığı termik santrallarda normal şartlarda çok yüksektir. Çünkü, termik santrallarda yakıt olarak linyit kullanılmakta ve sıcaklık artmaktadır. Çözelti sıcaklığını azaltmak için özel soğutucular kullanılması gerekmekte ve belirli bir maliyeti vardır. Bu nedenle, çözelti sıcaklığının az olması daha maliyetlidir. Gaz akış hızının azaltılabilmesi için özel depolama sistemi gereklidir. Özel depolama sistemi kurmanın da belirli bir maliyeti olur. Karıştırma hızı arttıkça kullanılan enerji de artar, böylece maliyet de artar. Çözelti derişimini arttırmak için daha fazla kimyasal madde kullanılmalıdır. Kullanılan kimyasal madde miktarı arttıkça maliyet de artar.

Her iki performans karakteristiğinin değerlerini enbüyükleyen en iyi kontrol faktörleri kombinasyonun aynı olması nedeni ile burada ödünleşme söz konusu değildir. Ancak, maliyetler de göz önüne alınınca ödünleşme nedeni ile kontrol faktörleri kombinasyonunda bir değişiklik olmuştur. Buna göre, performans karakteristiklerini enbüyükleyen en iyi kontrol faktörleri kombinasyonu $A_2 B_1 C_1 D_1 E_3$ olarak belirlenmiştir. Karıştırma hızı etkili bir kontrol faktörü olmadığı için maliyetin en az olduğu karıştırma hızı seçilmiştir. Burada maliyetin en az olduğu karıştırma hızı 200 dev/dak ile birinci düzeydir (D_1). Deneyleri yapılan kontrol faktörleri kombinasyonları Tablo 4' de incelendiği zaman belirlenen en iyi kontrol faktörü kombinasyonunun bulunmadığı görülmüştür.

Belirlenen en iyi kontrol faktör düzeyleri için deney yapılmamış olmasına rağmen tahmini ortalama performans değeri belirlenebilir. Böylece, gerçek deney yapılmadan önce performansların alacağı değer hakkında bilgi elde edilebilmektedir.

Tablo 8. Kontrol Faktör Düzeylerinin Performans İstatistikleri ve Maliyetleri

Kontrol Faktörleri	Düzy	Maliyet	Çözeltilin Doygunluğa Ulaşma Süresi (dak.)		Çözeltilin Kükürtdioksiti Yüksek Verimlerde Tutma Süresi (dak.)	
			Ortalama	S/N	Ortalama	S/N
Gaz Teması, A	Filtreli	Çok	194.83	44.87	59.67	33.43
	Doğrudan	Az	238.78	44.95	81.67	34.93
Çözelti Sıcaklığı, B	35	Çok	243.83	45.93	91.17	36.94
	50	↑	232.67	44.55	75.83	34.04
	65	Az	173.92	44.24	45.00	31.55
Gaz Akış Hızı, C	1.5	Çok	346.92	49.64	127.25	40.65
	3.0	↑	177.42	44.01	54.67	33.61
	5.0	Az	126.08	41.07	30.08	28.28
Karıştırma Hızı, D	200	Az	176.75	44.15	59.42	33.75
	500	↓	233.75	45.73	72.00	35.00
	800	Çok	239.92	44.85	80.58	33.79
Çözelti Derişimi, E	0.10	Az	107.17	39.88	37.00	29.84
	0.25	↓	195.17	45.08	61.75	34.03
	0.50	Çok	348.08	49.75	113.25	38.66

Ortalama performans değerini bulmak için "Deneylerin Yapılması ve Kontrol Faktörlerinin En İyi Değerlerinin Bulunması" başlığı altındaki μ denklemi kullanılmıştır. μ denkleminde kullanılan kontrol faktörleri, EK 6 ve EK 7 'deki varyans analizi tablolarında belirli anlam düzeylerinde etkili olan kontrol faktörleridir.

Bu kontrol faktörlerinin en iyi düzeylerinin ortalama performans değerleri Tablo 8' den alınarak μ denkleminde yerine koyulmuştur. En iyi kontrol faktörleri

kombinasyonunun $A_2 B_1 C_1 D_1 E_3$ olduğu hatırlanacak olursa, çözeltinin doygunluğa ulaşma süresi için ortalama performans değeri gözlemlerin genel ortalaması 216.81 olmak üzere şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\mu = 238.78 + 243.83 + 346.92 + 176.75 + 348.08 - 4 * 216.81$$

$$\mu = 487.12 \text{ dak.}$$

Çözeltinin kükürtdioksit gazını yüksek verimlerde tutma süresi için de ortalama performans değeri benzer şekilde hesaplanmıştır:

$$\mu = 81.67 + 91.17 + 127.25 + 113.25 - 3 * 70.67$$

$$\mu = 201.33 \text{ dak.}$$

μ denklemi yardımı ile bulunan bu ortalama performans değerleri birer nokta değerleridir. Belirlenen en iyi kontrol faktörleri düzeyleri ile performans karakteristikleri için ortalama değer tahmini yapılmıştır.

3.11. Doğrulama Deneyinin Yapılması

μ denklemi ile bulunan ortalama performans değerlerinin nokta değerleri olması nedeni ile doğrulama deneylerinin sonuçlarının anlamlı olup olmadıklarını belirlemek için güven aralıkları oluşturulmalıdır. Güven aralıklarının oluşturulmasında " Taguchi Yönteminin Uygulanmasında Temel Basamaklar " 3.3.11 alt başlığında gösterilen formül kullanılmıştır. Aşağıda güven aralıklarının hesaplanmasında EK 6 ve EK 7' deki varyans analizi tabloları kullanılmıştır.

$$GA = \mu \pm \sqrt{F(\alpha, 1, v_e) V_e \left[(1/n_{etk}) + (1/r) \right]}$$

Belirlenen performans ortalamalarının % 95 ve % 99 anlam düzeyindeki güven aralıkları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Performans istatistiği çözeltinin doygunluğa ulaşma süresi için % 95 anlam düzeyinde güven aralığı:

$$GA = 487.12 \pm \sqrt{F(0.05, 1, 26) 2147.5 \left[(1/5) + (1/2) \right]}$$

$$GA = 487.12 \pm 79.74$$

% 99 güven aralığında ise

$$GA = 487.12 \pm 107.73$$

olarak hesaplanmıştır.

Performans istatistiği çözeltinin kükürtdioksit gazını yüksek verimlerde tutma süresi için % 95 anlam düzeyinde güven aralığı:

$$GA = 201.33 \pm \sqrt{F(0.05, 1, 26) 595.7 \left[(4/25) + (1/2) \right]}$$

$$GA = 201.33 \pm 40.78$$

% 99 güven aralığında ise

$$GA = 201.33 \pm 55.09$$

olarak hesaplanmıştır. Tüm bu hesaplama sonuçları Tablo 9' da özetlenmiştir.

Tablo 9. Performans Karakteristiklerinin % 95 ve % 99 Güven Aralığındaki Değerleri

Performans Karakteristiği	Beklenen en iyi performans değeri	%95 Güven Aralığı	% 99 Güven Aralığı
Çözeltinin Doygunluğa Ulaşma Süresi (dak.)	487.12	407.38 - 566.86	379.39 - 594.85
Çözeltinin Kükürtdioksit Gazını Yüksek Verimlerde Tutma Süresi (dak.)	201.33	160.55 - 242.11	146.24 - 256.42

Tablo 9' da elde edilen değerlerin doğruluğunu test etmek amacı ile doğrulama deneyleri yapılmıştır. Belirlenen en iyi faktör düzeyleri kombinasyonu iki kere tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 10' da verilmiştir. Elde edilen deney sonuçları Tablo 9' da belirlenen güven aralıkları içinde olduğu için % 99 güven aralığında belirlenen kontrol faktör düzeyleri doğrulanmıştır. Başka bir anlatımla, belirlenen kontrol faktörleri düzeylerinde performans karakteristikleri beklenen değerleri almıştır. Deneylerin sonucunda belirlenen kontrol faktörleri düzeylerine göre performans karakteristiklerinin aldığı değerler deney ekibi tarafından tecrübeler ve literatür bilgilerine göre yeterli bulunmuş ve tolerans tasarımı yapılmasına gerek duyulmamıştır.

Böylece, deneylerin sonucunda belirlenen kontrol faktörleri ve düzeylerinin doğru seçildiği ve deneylerin başından itibaren yapılan varsayımların doğru olduğu kararına varılmıştır. Çalışma sonucunda, sitrat yöntemi için gürültü faktörlerine karşı duyarsız kontrol faktörlerinin ve düzeylerinin değerleri belirlenmiştir.

Tablo 10. Doğrulama Deneyi Sonuçları

Performans Karakteristiği	Deney No		Ortalama Değer	S / N
	1	2		
Çözeltinin Doygunluğa Ulaşma Süresi (dak.)	490	532	511	54.15
Çözeltinin Kükürtdioksit Gazını Yüksek Verimlerde Tutma Süresi (dak.)	185	203	194	45.73

Doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar, varsayımları doğrulaması yanında, Taguchi yönteminin gücünü de göstermektedir. Taguchi yönteminin önerdiği istatistiksel yöntemler hangi kontrol faktörlerinin ne kadar etkili olduğunu ve hangi değerleri alması gerektiğini göstermesi açısından çok önemlidir. Sitrat yönteminde, etkili kontrol faktörlerinin değerlerine dikkat edilerek uygulama yapılmalı ve etkisiz kontrol faktörleri ile de uygulamaya esneklik sağlanmalıdır. Ayrıca, deneylerin sonucunda ileride kullanılabilecek çok yararlı bilgiler elde edilmiştir. Laboratuvar çalışmalarının sonunda, Taguchi yöntemi ile elde edilen sonuçlar bu laboratuvar şartları altında geçerlidir. Kükürtdioksit gideriminde yeni bir yöntem olan sitrat yönteminin Taguchi yöntemi ile eniyilenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar pilot bir tesis kurularak ya da bir termik santralin küçük bir bölümünde uygulanarak daha da verimli ve gerçekçi duruma getirilebilir.

SONUÇ

Rekabetin yoğun olduğu günümüz pazarlarında işletmeler rakiplerine karşı üstünlük sağlamak için kendilerini sürekli yenilemek zorundadır. Şu an ki durumunu yeterli görerek kendini sürekli yenilemeyen işletmeler rakiplerinin gerisinde kalarak zor duruma düşerler. Sektörlerinde lider durumda bulunan işletmelerin başarılarının temelinde müşteri istek ve gereksinimlerini karşılayabilmeleri bulunmaktadır. Tüm müşterilerin genel isteği kaliteli ve aynı zamanda ucuz ürün elde etmektir. Bu durumda işletmelerin de temel amacı müşteriye istediği kalitedeki ürünü, istediği zamanda, istediği yerde, en az maliyetle sunmak olmalıdır. Başka bir deyişle, işletmenin odak noktası müşteri olmalıdır.

Müşteriler için kaliteli ve en az maliyetli ürünün en iyi ürün olması müşteri odaklı işletmeleri bunu başarmaya yöneltmiştir. İşletmelerin büyük bir kısmı üründe kaliteyi arttırmak amacı ile üretim aşamasında kalite kontroluna yönelmekte ve kontrol tabloları ve pareto şeması gibi araçları kullanmaktadır. Ancak, kaliteyi arttırmaya yönelik bu çalışmalar başarılı gözükse de müşteri isteklerini yeterince karşılayamadığı için işletmelerin rakiplerine üstünlük sağlamasında çok başarılı olamamıştır.

Ürün ve üretim süreçlerinde Japonlar, Genichi Taguchi'nin katkılarıyla kalite yöntemlerini üretim süreci tasarımının içinde kullanmaktadırlar. Taguchi yöntemi ile ürün ya da üretim sürecinin spesifikasyonları belirlenmekte, bu spesifikasyonlara göre tasarım geliştirilmekte ve ürün ya da üretim sürecinin bu spesifikasyonlara göre üretilmesine yardımcı olunmaktadır.

Taguchi için ürünün hedef değerindeki her türlü değişkenliğin toplumsal bir kayba neden olması nedeni ile değişkenlik büyük önem taşımaktadır. Taguchi bu durumu açıklamak için kalite kayıp fonksiyonunu tanımlamıştır. Bu fonksiyon hedef değerden uzaklaştıkça ekonomik kaybın büyüklüğünü göstermesi ve kaliteyi arttırmak ya da kaybı azaltmak için ürün ve üretim süreç özelliklerini hedef değerlerine yakın tutulması açısından önemlidir. Taguchi kayıp fonksiyonu hem müşterinin ürünün her parçasında istediği kalite devamlılığını hem de işletmenin düşük maliyetli üretim yapma isteğini karşılar. Müşterinin gereksinim ve isteklerine cevap vermeyen üründen meydana gelen toplumsal kayıp üretim süreci maliyetleri ve ürün kullanımında karşılaşılan tamir, iş kaybı gibi maliyetleri kapsar.

Uygun bir kalite geliştirme programının temel amacı ürün performansının hedef değerdeki değişkenliğinin en aza indirilmesi olmalıdır. Hedef değerden ne kadar az uzaklaşırsa, kalite o oranda iyi olur ve aynı zamanda müşterinin kaybı da o oranda azalır. Değişkenlik genel olarak özel nedenlerden ya da sistemden kaynaklanmaktadır. Özel nedenler, üretim aşamasında yapılacak düzeltici çalışmalarla önlenabilir. Ancak, sistemden kaynaklanan değişkenlikler tasarım aşamasında önlenabilir ve Taguchi

yöntemi ile geliştirilen tasarımlar sistemden kaynaklanan değişkenlik miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylece, hem kalite gelişmekte, hem de tasarruf sağlanmaktadır.

Ürünlerin performansını değerlendirmede kullanılan bir çok performans karakteristiği vardır, ancak bunların hepsinin geliştirilmesi yerine önemli olanlarının seçilerek geliştirilmesi hem kolaylık hem de tasarruf sağlar. Ürün ya da üretim süreci performansını hangi faktörlerin ne kadar etkilediğinin belirlenmesi yapılacak geliştirmenin hem etkili hem de az maliyetli olmasını sağlar.

Taguchi yöntemi ile ürün ya da üretim süreci performansının en iyi değerini belirlemek için üç aşamalı bir program olan ürün ya da üretim süreci tasarımı kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır. Taguchi yönteminin özü olan parametre tasarımı ile ürün ya da üretim süreci performansının bozulmasına neden olan faktörlerin kontrol altına alınması yerine bu faktörlerdeki değişimlerden en az etkilenecek olan ürün ya da üretim süreci tasarımları elde edilmeye çalışılmaktadır. Başka bir deyişle, performansı etkileyen gürültü faktörlerinden en az etkilenecek olan kontrol faktörleri düzeyleri belirlenmeye çalışılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, parametre tasarımında müşteri gereksinim ve isteklerini ön planda tutan, sürekli geliştirmeye yönelik Taguchi yönteminin uygulanabilirliği incelenmiştir. Taguchi yönteminin uygulaması için linyitle çalışan termik santrallarda oluşan kükürtdioksit gazının gideriminde yeni bir yöntem olan sitrat yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yönteminin uygulamasında izlenecek sistematik yol

belirlenmiştir. Belirlenen bu sistematik yol Taguchi yönteminin sitrat yönteminde uygulanmasını kolaylaştırırken aynı zamanda, maliyet ve zaman tasarrufu sağlamıştır. Yöntemin uygulanmasında izlenen yol kılavuzluk yaparak gereksiz bilgilerle zaman kaybını önlemiştir.

Kükürtdioksit giderici sitrat yönteminin Taguchi yöntemi ile uygulanması laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında çalışma başlamadan önce gerekli olan tüm ekip toplanarak, çalışmanın amacı belirlenmiş ve yöntemin uygulanma şekli anlatılmıştır. Yöntemin uygulanmasında sistematik bir yolun belirlenmesi ekip elemanlarının yöntemi anlamasını kolaylaştırmıştır.

Kontrol faktörlerinin, gürültü faktörlerinin, bu faktörlerin düzeylerinin, performans karakteristiklerinin, kayıp fonksiyonlarının ve performans istatistiklerinin belirlenmesi parametre tasarımının başarısında çok önemlidir. Bunların belirlenmesinde yapılan yanlışlık tüm deney çalışmalarının yanlış olmasına, dolayısıyla sonuçların yanlış ya da eksik olmasına neden olmaktadır. Sitrat yönteminin uygulanmasında kontrol faktörleri ve düzeylerine göre yapılacak deneylerin kombinasyonları belirlenmiştir. Uygulamada kullanılan beş kontrol faktörünün dördü 3 düzeyli biri 2 düzeylidir. En iyi kombinasyonu bulmak için deneylerin tamamının yapılması durumunda 162 deney yapılması gerekmektedir. Ancak, Taguchi yöntemi ile sadece 18 deney iki defa tekrar edilerek en iyi kontrol faktörleri düzeyleri bulunmuştur. Böylelikle, hem zamandan, hem de maliyetten büyük tasarruf elde edilmiştir. Deneylerin sonunda elde edilen sonuçlar iki tane doğrulama deneyi yapılarak test edilmiştir. Doğrulama deneyleri

belirlenen kontrol faktörleri düzeylerinin ve yapılan tüm varsayımların doğruluğunu kanıtlamıştır.

Deneylerin sonunda elde edilen sonuçlar çalışma ekibi tarafından yeterli bulunmuştur. Performans karakteristikleri üzerinde etkili kontrol faktörleri ve düzeyleri literatürdeki bilgilerle karşılaştırıldığı zaman, elde edilen sonuçların doğruluğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, bu çalışma ile hangi kontrol faktörlerinin ne kadar etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda bazı faktörlerin etkisi araştırılmakta ve bunlar genelde teker teker denenmiştir. Bazı durumlarda ikili ya da üçlü faktör etkileri beraber araştırılmıştır. Oysa, yapılan çalışmada etkili olduğuna inanılan tüm faktörler beraber denenmiş ve deney sonuçlarına göre kontrol faktörlerinin en iyi değerleri bulunmuştur.

Sitrat yöntemi henüz ülkemizde denenmemiş bir yöntemdir. Ülkemizde sadece kireç kullanılarak kükürtdioksit gazının giderimi bir tesisde yapılmakta ancak yöntemin sonucunda ortaya çıkan kükürtlü kireç çok miktarlarda olduğu ve kullanılamadığı için çevreye zarar vermekte ve kirletmektedir. Elde edilen kontrol faktörü düzeylerinde, sitrat yöntemi kükürtdioksit gazını en az %95 oranında filtre edinceye kadar kullanılmaktadır. Bu değerden sonra rejenerasyona geçilmektedir. Sitrat yöntemi rejeneratif bir yöntem olduğu için yöntemin sonucunda elde edilen kükürtlü sitrat rejenerasyondan geçmekte ve elde edilen kükürt elementi satılabilmekte, sitrat ise yeniden kullanılabilir. Böylece, hem çevre kirlenmemekte hem de maliyetler düşmektedir.

Sitrat yöntemi ülkemizde henüz uygulanmaması nedeni ile Taguchi yöntemi ile laboratuvar ortamında elde edilen sonuçlar bir tesiste denenememektedir. Ancak, Taguchi yöntemi ile laboratuvar ortamlarında elde edilen sonuçların gerçeğine yakın sonuçlar vermesi nedeni ile uygulandığı takdirde başarılı olunacağına inanılmaktadır.

Laboratuvar çalışmalarının sonucunda elde edilen sonuçların daha detaylı incelenebilmesi amacı ile performans karakteristiğini en fazla etkileyen üç tane kontrol faktörü kullanılarak tam faktöriyel deneyler yapılabilir. Ekip biraraya gelerek beyin fırtınası toplantıları ile en etkili kontrol faktörlerinin düzey sayısındaki artışı ve eklenecek yeni kontrol faktörlerini belirleyebilir. Olanaklar ölçüsünde bu kontrol faktörlerinin düzey sayıları arttırılarak tam faktöriyel deneyler yapılabilirse, kontrol faktörlerinin değerleri daha da gerçeğine yakın elde edilebilir. Ayrıca, en etkili üç kontrol faktörünün yanına beyin fırtınası toplantıları sonucunda belirlenen kontrol faktörleri eklenerek yeniden Taguchi yöntemi ile deneyler yapılabilir. Böylece, deney sonuçlarının daha duyarlı ve gerçekçi hale gelmesi sağlanabilir.

EKLER

	<u>Sayfa</u>
EK1. F Tabloları.....	170
EK2. Değişik Düzeylerde Ortogonal Diziler.....	172
EK 3. Bazı Ortogonal Dizilerin Standart Doğrusal Grafikleri.....	182
EK 4. İki Kolon Arasındaki Etkileşimler Tabloları.....	188
EK 5. Omega Tablosu.....	193
EK 6. Çözeltilerin Doygunluğa Ulaşma Süresi Ortalama Verileri Üzerine Varyans Analizi.....	197
EK 7. Çözeltilerin Kükürtdioksiti Yüksek Verimlerde Tutma Süresi Ortalama Verileri Üzerine Varyans Analizi.....	197

EK 1. F Tablosu

 $F_{0.05; v_1; v_2}$ v_1 : Pay için serbestlik derecesi v_2 : Payda için serbestlik derecesi

	v_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4
3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98
11	4.84	2.98	3.50	3.36	3.20	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35
21	4.32	3.47	3.07	2.82	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32
22	4.30	3.44	3.05	2.84	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08
42	4.07	3.22	2.83	2.59	2.44	2.32	2.24	2.16	2.11	2.06
44	4.06	3.21	2.82	2.58	2.43	2.31	2.23	2.16	2.10	2.05
46	4.05	3.20	2.81	2.57	2.42	2.30	2.22	2.15	2.09	2.04
48	4.04	3.19	2.80	2.57	2.41	2.29	2.21	2.14	2.08	2.03
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03
55	4.02	3.16	2.77	2.54	2.38	2.27	2.18	2.11	2.06	2.01
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99
65	3.99	3.14	2.75	2.51	2.36	2.24	2.15	2.08	2.03	1.98
70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97
80	3.96	3.11	2.73	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93
125	3.92	3.07	2.68	2.44	2.29	2.17	2.08	2.01	1.96	1.91
150	3.90	3.08	2.66	2.43	2.27	2.16	2.07	2.00	1.94	1.89
200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88
300	3.87	3.03	2.63	2.40	2.24	2.13	2.04	1.97	1.91	1.86
500	3.86	3.01	2.62	2.39	2.23	2.12	2.03	1.96	1.90	1.85
1000	3.85	3.00	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83

$F_{0.01; v_1; v_2}$ v_1 : pay için serbestlik derecesi v_2 : payda için serbestlik derecesi v_1 v_2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	405	500	540	563	576	596	598	598	602	606
2	93.5	99.0	99.3	99.3	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4
3	34.1	30.8	20.5	28.7	28.2	27.9	27.7	27.5	27.3	27.2
4	21.2	18.0	16.7	16.0	15.5	15.2	15.0	14.8	14.7	14.5
5	16.8	13.2	12.1	11.4	11.0	10.7	10.5	10.3	10.2	10.1
6	13.7	10.9	9.78	9.15	8.75	8.47	8.28	8.10	7.98	7.87
7	12.2	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.94	6.72	6.62
8	11.3	8.65	7.89	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81
9	10.6	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26
10	10.0	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.30	4.30
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10
14	8.86	6.51	5.58	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94
15	8.68	6.26	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80
16	8.53	6.22	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69
17	8.60	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59
18	8.20	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.68	3.52	3.43
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26
23	7.86	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09
27	7.66	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00
30	7.56	5.39	4.51	4.03	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98
32	7.50	5.34	4.46	3.97	3.65	3.43	3.26	3.13	3.02	2.93
34	7.44	5.29	4.42	3.93	3.61	3.39	3.23	3.09	2.96	2.89
36	7.40	5.25	4.36	3.89	3.57	3.35	3.18	3.05	2.95	2.86
38	7.35	5.21	4.34	3.86	3.54	3.32	3.15	3.02	2.92	2.83
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.80	2.80
42	7.28	5.15	4.29	3.80	3.49	3.27	3.10	2.97	2.86	2.78
44	7.25	5.12	4.26	3.78	3.47	3.24	3.08	2.95	2.84	2.75
46	7.22	5.10	4.24	3.76	3.44	3.22	3.06	2.93	2.82	2.73
48	7.19	5.08	4.22	3.74	3.43	3.20	3.04	2.91	2.80	2.72
50	7.17	5.06	4.20	3.72	3.41	3.19	3.02	2.89	2.79	2.70
55	7.12	5.01	4.16	3.68	3.37	3.15	2.98	2.85	2.75	2.66
60	7.08	4.98	4.12	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63
65	7.04	4.95	4.10	3.62	3.31	3.09	2.93	2.80	2.69	2.61
70	7.01	4.92	4.08	3.60	3.29	3.07	2.91	2.78	2.67	2.59
80	6.98	4.88	4.04	3.56	3.26	3.04	2.87	2.74	2.64	2.55
90	6.93	4.85	4.01	3.54	3.23	3.01	2.84	2.72	2.61	2.52
100	6.90	4.83	3.96	3.51	3.21	2.99	2.82	2.69	2.59	2.50
125	6.84	4.78	3.94	3.47	3.17	2.95	2.79	2.66	2.55	2.47
150	6.81	4.75	3.92	3.45	3.14	2.92	2.76	2.63	2.53	2.44
200	6.76	4.71	3.88	3.41	3.11	2.89	2.73	2.60	2.50	2.41
300	6.72	4.68	3.85	3.38	3.08	2.86	2.70	2.57	2.47	2.36
500	6.69	4.65	3.82	3.36	3.05	2.84	2.68	2.55	2.44	2.36
1000	6.66	4.63	3.80	3.34	3.04	2.82	2.66	2.53	2.43	2.34
∞	6.66	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32

EK 2. Değişik Düzeylerde Ortogonal Diziler

$L_4 (2^3)$			
No.	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

$L_8 (2^7)$							
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

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

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

		$L_{32}(2^{11})$																															
No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3		1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	
4		1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	
5		1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	
6		1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	
7		1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	
8		1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	
9		1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	
10		1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	
11		1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	
12		1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	
13		1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	
14		1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	
15		1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	
16		1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	
17		2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
18		2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
19		2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	
20		2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	
21		2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	
22		2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	
23		2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	
24		2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	
25		2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	
26		2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	
27		2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	
28		2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	
29		2	2	1	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	
30		2	2	1	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	
31		2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	
32		2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	

$L_9 (3^4)$				
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

$L_{18} (2^1 \times 3^7)$							
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

L ₂₇ (3 ¹³)													
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

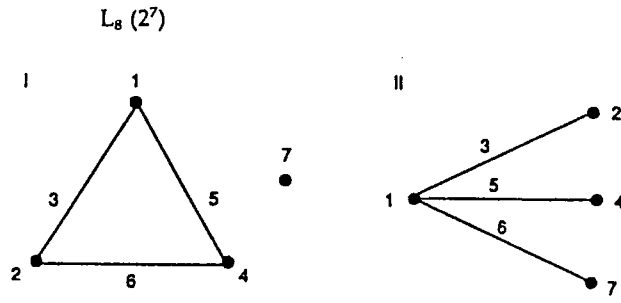
$L_{16} (4^5)$					
No.	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

$L_{32} (2^1 \times 4^9)$					
No.	1 2	3 4	5 6	7 8	9 10
1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1
2	1 1	2 2	2 2	2 2	2 2
3	1 1	3 3	3 3	3 3	3 3
4	1 1	4 4	4 4	4 4	4 4
5	1 2	1 1	2 2	3 3	4 4
6	1 2	2 2	1 1	4 4	3 3
7	1 2	3 3	4 4	1 1	2 2
8	1 2	4 4	3 3	2 2	1 1
9	1 3	1 2	3 4	1 2	3 4
10	1 3	2 1	4 3	2 1	4 3
11	1 3	3 4	1 2	3 4	1 2
12	1 3	4 3	2 1	4 3	2 1
13	1 4	1 2	4 3	3 4	2 1
14	1 4	2 1	3 4	4 3	1 2
15	1 4	3 4	2 1	1 2	4 3
16	1 4	4 3	1 2	2 1	3 4
17	2 1	1 4	1 4	2 3	2 3
18	2 1	2 3	2 3	1 4	1 4
19	2 1	3 2	3 2	4 1	4 1
20	2 1	4 1	4 1	3 2	3 2
21	2 2	1 4	2 3	4 1	3 2
22	2 2	2 3	1 4	3 2	4 1
23	2 2	3 2	4 1	2 3	1 4
24	2 2	4 1	3 2	1 4	2 3
25	2 3	1 3	3 1	2 4	4 2
26	2 3	2 4	4 2	1 3	3 1
27	2 3	3 1	1 3	4 2	2 4
28	2 3	4 2	2 4	3 1	1 3
29	2 4	1 3	4 2	4 2	1 3
30	2 4	2 4	3 1	3 1	2 4
31	2 4	3 1	2 4	2 4	3 1
32	2 4	4 2	1 3	1 3	4 2

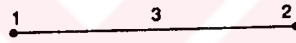
No.	L ₂₅ (5°)					
	1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	5	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	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

No.	$L_{51} (2^1 \times 5^{11})$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	1	2	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
7	1	2	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1
8	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2
9	1	2	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3
10	1	2	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4
11	1	3	1	3	5	2	4	4	1	3	5	2
12	1	3	2	4	1	3	5	5	2	4	1	3
13	1	3	3	5	2	4	1	1	3	5	2	4
14	1	3	4	1	3	5	2	2	4	1	3	5
15	1	3	5	2	4	1	3	3	5	2	4	1
16	1	4	1	4	2	5	3	5	3	1	4	2
17	1	4	2	5	3	1	4	1	4	2	5	3
18	1	4	3	1	4	2	5	2	5	3	1	4
19	1	4	4	2	5	3	1	3	1	4	2	5
20	1	4	5	3	1	4	2	4	2	5	3	1
21	1	5	1	5	4	3	2	4	3	2	1	5
22	1	5	2	1	5	4	3	5	4	3	2	1
23	1	5	3	2	1	5	4	1	5	4	3	2
24	1	5	4	3	2	1	5	2	1	5	4	3
25	1	5	5	4	3	2	1	3	2	1	5	4
26	2	1	1	1	4	5	4	3	2	5	2	3
27	2	1	2	2	5	1	5	4	3	1	3	4
28	2	1	3	3	1	2	1	5	4	2	4	5
29	2	1	4	4	2	3	2	1	5	3	5	1
30	2	1	5	5	3	4	3	2	1	4	1	2
31	2	2	1	2	1	3	3	2	4	5	5	4
32	2	2	2	3	2	4	4	3	5	1	1	5
33	2	2	3	4	3	5	5	4	1	2	2	1
34	2	2	4	5	4	1	1	5	2	3	3	2
35	2	2	5	1	5	2	2	1	3	4	4	3
36	2	3	1	3	3	1	2	5	5	4	2	4
37	2	3	2	4	4	2	3	1	1	5	3	5
38	2	3	3	5	5	3	4	2	2	1	4	1
39	2	3	4	1	1	4	5	3	3	2	5	2
40	2	3	5	2	2	5	1	4	4	3	1	3
41	2	4	1	4	5	4	1	2	5	2	3	3
42	2	4	2	5	1	5	2	3	1	3	4	4
43	2	4	3	1	2	1	3	4	2	4	5	5
44	2	4	4	2	3	2	4	5	3	5	1	1
45	2	4	5	3	4	3	5	1	4	1	2	2
46	2	5	1	5	2	2	5	3	4	4	3	1
47	2	5	2	1	3	3	1	4	5	5	4	2
48	2	5	3	2	4	4	2	5	1	1	5	3
49	2	5	4	3	5	5	3	1	2	2	1	4
50	2	5	5	4	1	1	4	2	3	3	2	5

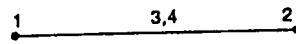
EK 3. Bazı Ortogonal Dizilerin Standart Doğrusal Grafiği



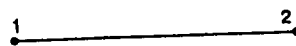
$L_4 (2^3)$

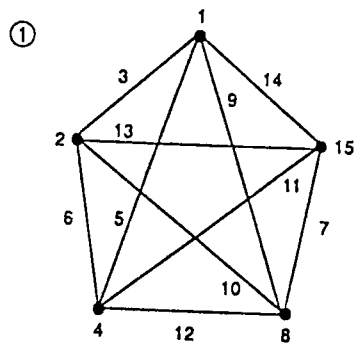


$L_9 (3^4)$

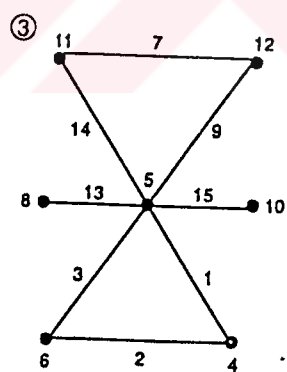
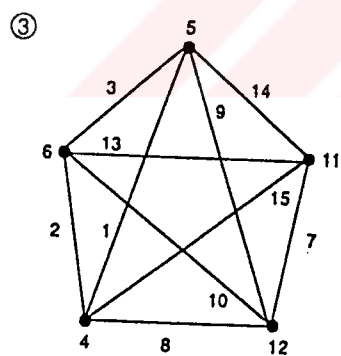
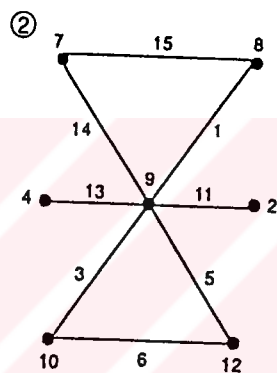
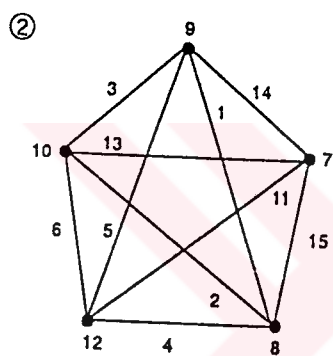
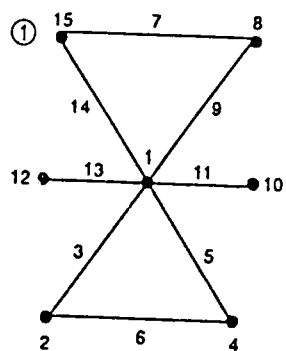


$L_{18} (2^1 \times 3^7)$



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


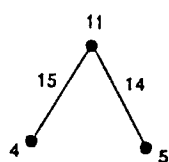
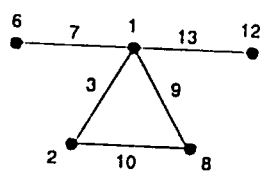
II



$L_{16}(2^{14})$

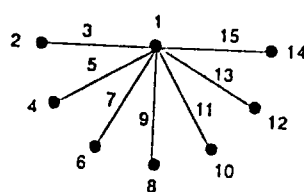
III

①

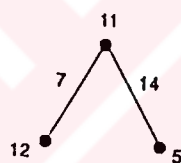
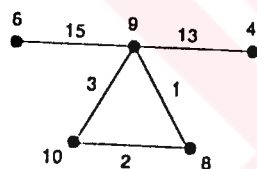


IV

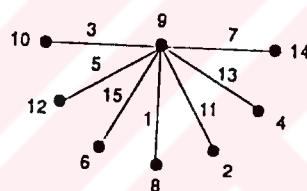
①



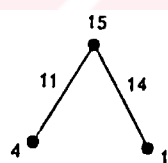
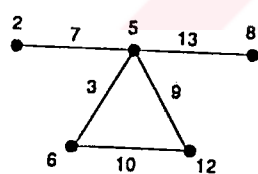
②



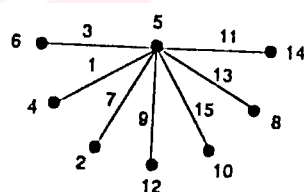
②



③



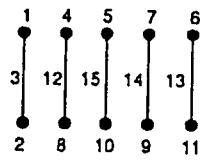
③



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

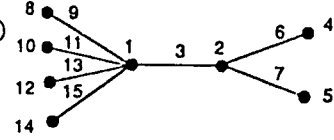
V

①

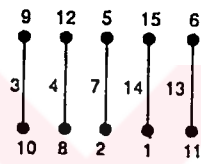


VI

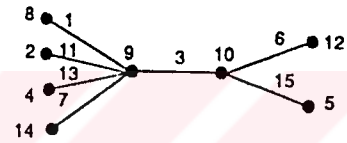
①



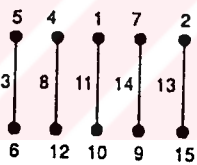
②



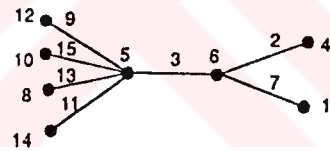
②

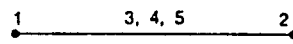
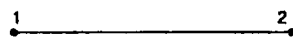
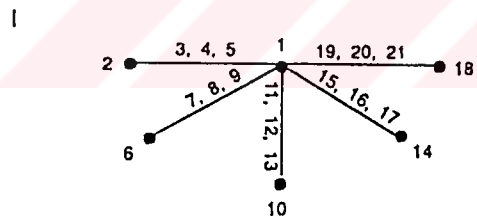


③

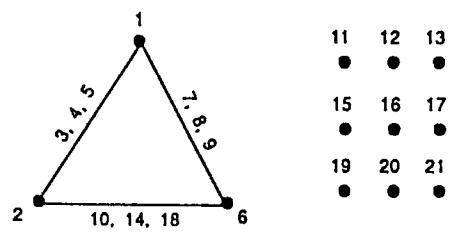


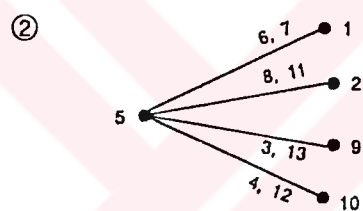
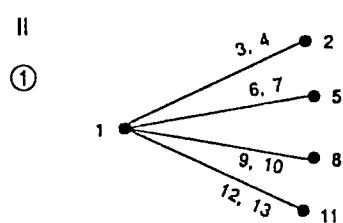
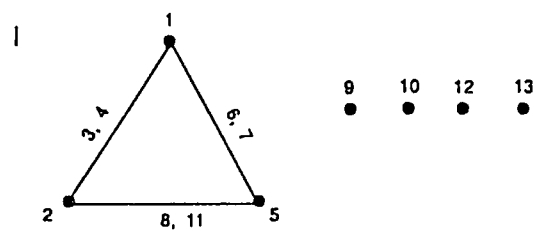
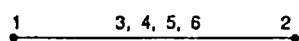
③



$L_{16}(4^1)$

 $L_{32}(2^1 \times 4^9)$

 $L_{64}(4^{21})$


II



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

 $L_{25}(5^6)$

 $L_{50}(2^1 \times 5^{11})$


$L_{21}(2^{25})$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	
(1)	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14	17	16	19	18	21	20	23	22	25	24	27	26	29	28	31	30	33	32	35	34	37	36	39	38	41	40	43	42	45	44	47	46	49	48	51	50	53	52	55	54	57	56	59	60	61	62	63		
(2)	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13	16	17	18	19	22	23	20	21	26	27	24	25	30	29	34	33	38	37	42	41	46	47	44	45	50	51	48	49	54	55	52	53	58	59	56	57	62	63	60	61	62	63								
(3)	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12	19	18	17	16	23	22	21	20	27	26	25	24	31	30	29	28	35	34	33	32	39	38	37	36	43	42	41	40	47	46	45	44	51	50	49	48	55	54	53	52	59	58	57	56	63	62	61	60			
(4)	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11	20	21	22	23	16	17	18	19	28	29	30	31	24	25	26	27	36	37	38	39	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63										
(5)	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10	21	20	23	22	17	16	19	18	28	29	30	31	24	25	26	27	36	37	38	39	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63											
(6)	1	14	15	12	13	10	11	8	9	22	23	20	21	18	19	16	17	30	31	28	29	26	27	24	25	32	33	36	37	34	35	32	33	46	47	44	45	42	43	40	41	54	55	52	53	50	51	48	49	56	57	54	55	52	53								
(7)	15	14	13	12	11	10	9	8	23	22	21	20	19	18	17	16	31	30	29	28	27	26	25	24	33	32	31	30	29	28	37	36	35	34	43	42	41	40	49	48	47	46	55	54	53	52	51	50	49	48	57	56	55	54									
(8)	1	2	3	4	5	6	7	24	25	26	27	28	29	30	31	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	34	33	32	31	30	29	38	37	36	35	44	43	42	41	50	49	48	47	56	55	54	53	52	51	50	49	48	57	56									
(9)	3	2	5	4	7	6	25	24	27	26	29	28	31	30	23	22	25	24	33	32	31	30	29	28	37	36	35	34	43	42	41	40	49	48	47	46	55	54	53	52	51	50	49	48	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48									
(10)	1	6	7	4	5	26	27	24	25	30	31	28	29	18	19	16	17	22	23	20	21	22	23	24	25	34	33	32	31	30	29	38	37	36	35	44	43	42	41	50	49	48	47	56	55	54	53	52	51	50	49	48											
(11)	7	6	5	4	27	26	25	24	31	30	29	28	19	18	17	16	23	22	21	20	21	22	23	24	25	34	33	32	31	30	29	38	37	36	35	44	43	42	41	50	49	48	47	56	55	54	53	52	51	50	49	48											
(12)	1	2	3	28	29	30	31	24	25	26	27	20	21	22	23	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	34	33	32	31	30	29	38	37	36	35	44	43	42	41	50	49	48	47	56	55	54	53	52	51	50	49	48											
(13)	3	2	29	28	31	30	25	24	27	26	21	20	23	22	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	34	33	32	31	30	29	38	37	36	35	44	43	42	41	50	49	48	47	56	55	54	53	52	51	50	49	48												
(14)	1	30	31	28	29	26	27	24	25	22	23	20	21	18	19	16	17	22	23	20	21	22	23	24	25	34	33	32	31	30	29	38	37	36	35	44	43	42	41	50	49	48	47	56	55	54	53	52	51	50	49	48											
(15)	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1												
(16)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
(17)	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14	17	16	19	18	21	20	23	22	25	24	27	26	29	28	31	30	33	32	35	34	37	36	39	38	41	40	43	42	45	44	47	46	49	48	51	50	53	52	55	54	57	56	59	60	61	62	63		
(18)	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13	16	17	18	19	22	23	20	21	26	27	24	25	30	29	34	33	38	37	42	41	46	47	44	45	50	51	48	49	54	55	52	53	58	59	56	57	62	63	60	61	62	63								
(19)	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12	19	18	17	16	23	22	21	20	27	26	25	24	31	30	29	28	35	34	33	32	39	38	37	36	43	42	41	40	47	46	45	44	51	50	49	48	55	54	53	52	59	58	57	56	63	62	61	60			
(20)	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11	20	21	22	23	16	17	18	19	28	29	30	31	24	25	26	27	36	37	38	39	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63										
(21)	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10	21	20	23	22	17	16	19	18	28	29	30	31	24	25	26	27	36	37	38	39	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63											
(22)	1	14	15	12	13	10	11	8	9	22	23	20	21	18	19	16	17	30	31	28	29	26	27	24	25	32	33	36	37	34	35	32	33	46	47	44	45	42	43	40	41	54	55	52	53	50	51	48	49	56	57	54	55	52	53								
(23)	15	14	13	12	11	10	9	8	23	22	21	20	19	18	17	16	31	30	29	28	27	26	25	24	33	32	31	30	29	28	37	36	35	34	43	42	41	40	49	48	47	46	55	54	53	52	51	50	49	48	57	56	55	54									
(24)	1	2	3	4	5	6	7	24	25	26	27	28	29	30	31	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	34	33	32	31	30	29	38	37	36	35	44	43	42	41	50	49	48	47	56	55	54	53	52	51	50	49	48											
(25)	3	2	5	4	7	6	25	24	27	26	29	28	31	30	23	22	25	24	33	32	31	30	29	28	37	36	35	34	43	42	41	40	49	48	47	46	55	54	53	52	51	50	49	48	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48									
(26)	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13	16	17	18	19	22	23	20	21	26	27	24	25	30	29	34	33	38	37	42	41	46	47	44	45	50	51	48	49	54	55	52	53	58	59	56	57	62	63	60	61	62	63								
(27)	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12	19	18	17	16	23	22	21	20	27	26	25	24	31	30	29	28	35	34	33	32	39	38	37	36	43	42	41	40	47	46	45	44	51	50	49	48	55	54	53	52	59	58	57	56	63	62	61	60			
(28)	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11	20	21	22	23	16	17	18	19	28	29	30	31	24	25	26	27	36	37	38	39	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63										
(29)	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10	21	20	23	22	17	16	19	18	28	29	30	31	24	25	26	27	36	37	38	39	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63											
(30)	1	14	15	12	13	10	11	8	9	22	23	20	21	18	19	16	17	30	31	28	29	26	27	24	25	32	33	36	37	34	35	32	33	46	47	44	45	42	43	40	41	54	55	52	53	50	51	48	49	56	57	54	55	52	53								
(31)	15	14	13	12	11	10	9	8	23	22	21	20	19	18	17	16	31	30	29	28	27	26																																									

EK 5. Omega Tablosu

P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB
0.0	∞*	5.0	-12.787	10.0	-9.541	15.0	-7.532	20.0	-6.020	25.0	-4.770
0.1	-29.995	5.1	-12.696	10.1	-9.493	15.1	-7.498	20.1	-5.993	25.1	-4.747
0.2	-26.980	5.2	-12.607	10.2	-9.446	15.2	-7.465	20.2	-5.966	25.2	-4.724
0.3	-25.215	5.3	-12.520	10.3	-9.399	15.3	-7.431	20.3	-5.939	25.3	-4.701
0.4	-23.961	5.4	-12.434	10.4	-9.352	15.4	-7.397	20.4	-5.912	25.4	-4.678
0.5	-22.988	5.5	-12.350	10.5	-9.305	15.5	-7.364	20.5	-5.885	25.5	-4.655
0.6	-22.191	5.6	-12.267	10.6	-9.259	15.6	-7.331	20.6	-5.859	25.6	-4.632
0.7	-21.518	5.7	-12.185	10.7	-9.214	15.7	-7.298	20.7	-5.832	25.7	-4.610
0.8	-20.933	5.8	-12.105	10.8	-9.168	15.8	-7.266	20.8	-5.806	25.8	-4.587
0.9	-20.417	5.9	-12.026	10.9	-9.124	15.9	-7.233	20.9	-5.779	25.9	-4.564
1.0	-19.955	6.0	-11.949	11.0	-9.079	16.0	-7.201	21.0	-5.753	26.0	-4.542
1.1	-19.537	6.1	-11.872	11.1	-9.035	16.1	-7.168	21.1	-5.727	26.1	-4.519
1.2	-19.155	6.2	-11.797	11.2	-8.991	16.2	-7.136	21.2	-5.701	26.2	-4.497
1.3	-18.803	6.3	-11.723	11.3	-8.947	16.3	-7.104	21.3	-5.675	26.3	-4.474
1.4	-18.476	6.4	-11.650	11.4	-8.904	16.4	-7.073	21.4	-5.649	26.4	-4.452
1.5	-18.172	6.5	-11.578	11.5	-8.861	16.5	-7.041	21.5	-5.623	26.5	-4.429
1.6	-17.888	6.6	-11.507	11.6	-8.819	16.6	-7.010	21.6	-5.598	26.6	-4.407
1.7	-17.620	6.7	-11.437	11.7	-8.777	16.7	-6.978	21.7	-5.572	26.7	-4.385
1.8	-17.367	6.8	-11.368	11.8	-8.735	16.8	-6.947	21.8	-5.547	26.8	-4.363
1.9	-17.128	6.9	-11.300	11.9	-8.693	16.9	-6.916	21.9	-5.521	26.9	-4.341
2.0	-16.901	7.0	-11.233	12.0	-8.652	17.0	-6.885	22.0	-5.496	27.0	-4.319
2.1	-16.685	7.1	-11.167	12.1	-8.611	17.1	-6.855	22.1	-5.470	27.1	-4.297
2.2	-16.478	7.2	-11.101	12.2	-8.570	17.2	-6.824	22.2	-5.445	27.2	-4.275
2.3	-16.281	7.3	-11.037	12.3	-8.530	17.3	-6.794	22.3	-5.420	27.3	-4.253
2.4	-16.091	7.4	-10.973	12.4	-8.490	17.4	-6.763	22.4	-5.395	27.4	-4.231
2.5	-15.910	7.5	-10.910	12.5	-8.450	17.5	-6.733	22.5	-5.370	27.5	-4.209
2.6	-15.735	7.6	-10.848	12.6	-8.410	17.6	-6.703	22.6	-5.345	27.6	-4.187
2.7	-15.566	7.7	-10.786	12.7	-8.371	17.7	-6.673	22.7	-5.321	27.7	-4.166
2.8	-15.404	7.8	-10.725	12.8	-8.332	17.8	-6.644	22.8	-5.296	27.8	-4.144
2.9	-15.247	7.9	-10.665	12.9	-8.293	17.9	-6.614	22.9	-5.271	27.9	-4.122
3.0	-15.096	8.0	-10.606	13.0	-8.255	18.0	-6.584	23.0	-5.247	28.0	-4.101
3.1	-14.949	8.1	-10.547	13.1	-8.216	18.1	-6.555	23.1	-5.222	28.1	-4.079
3.2	-14.806	8.2	-10.489	13.2	-8.178	18.2	-6.526	23.2	-5.198	28.2	-4.058
3.3	-14.668	8.3	-10.432	13.3	-8.141	18.3	-6.497	23.3	-5.173	28.3	-4.036
3.4	-14.534	8.4	-10.375	13.4	-8.103	18.4	-6.468	23.4	-5.149	28.4	-4.015
3.5	-14.404	8.5	-10.319	13.5	-8.066	18.5	-6.439	23.5	-5.125	28.5	-3.994
3.6	-14.277	8.6	-10.263	13.6	-8.029	18.6	-6.410	23.6	-5.101	28.6	-3.972
3.7	-14.153	8.7	-10.209	13.7	-7.992	18.7	-6.381	23.7	-5.077	28.7	-3.951
3.8	-14.033	8.8	-10.154	13.8	-7.955	18.8	-6.353	23.8	-5.053	28.8	-3.930
3.9	-13.916	8.9	-10.100	13.9	-7.919	18.9	-6.325	23.9	-5.029	28.9	-3.909
4.0	-13.801	9.0	-10.047	14.0	-7.883	19.0	-6.296	24.0	-5.005	29.0	-3.888
4.1	-13.689	9.1	-9.994	14.1	-7.847	19.1	-6.268	24.1	-4.981	29.1	-3.867
4.2	-13.580	9.2	-9.942	14.2	-7.811	19.2	-6.240	24.2	-4.958	29.2	-3.846
4.3	-13.473	9.3	-9.890	14.3	-7.775	19.3	-6.212	24.3	-4.934	29.3	-3.825
4.4	-13.369	9.4	-9.839	14.4	-7.740	19.4	-6.184	24.4	-4.910	29.4	-3.804
4.5	-13.267	9.5	-9.788	14.5	-7.705	19.5	-6.157	24.5	-4.887	29.5	-3.783
4.6	-13.167	9.6	-9.738	14.6	-7.670	19.6	-6.129	24.6	-4.863	29.6	-3.762
4.7	-13.069	9.7	-9.688	14.7	-7.635	19.7	-6.101	24.7	-4.840	29.7	-3.741
4.8	-12.973	9.8	-9.639	14.8	-7.601	19.8	-6.074	24.8	-4.817	29.8	-3.720
4.9	-12.879	9.9	-9.590	14.9	-7.566	19.9	-6.047	24.9	-4.793	29.9	-3.699

Omega Tablosu

P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB
30.0	-3.679	35.0	-2.687	40.0	-1.760	45.0	-0.871	50.0	0.000	55.0	0.872
30.1	-3.658	35.1	-2.668	40.1	-1.742	45.1	-0.853	50.1	0.017	55.1	0.889
30.2	-3.637	35.2	-2.649	40.2	-1.724	45.2	-0.835	50.2	0.035	55.2	0.907
30.3	-3.617	35.3	-2.630	40.3	-1.706	45.3	-0.818	50.3	0.052	55.3	0.924
30.4	-3.596	35.4	-2.611	40.4	-1.688	45.4	-0.800	50.4	0.069	55.4	0.942
30.5	-3.576	35.5	-2.592	40.5	-1.670	45.5	-0.783	50.5	0.087	55.5	0.959
30.6	-3.555	35.6	-2.573	40.6	-1.652	45.6	-0.765	50.6	0.104	55.6	0.977
30.7	-3.535	35.7	-2.554	40.7	-1.634	45.7	-0.748	50.7	0.122	55.7	0.995
30.8	-3.515	35.8	-2.536	40.8	-1.616	45.8	-0.730	50.8	0.139	55.8	1.012
30.9	-3.494	35.9	-2.517	40.9	-1.598	45.9	-0.713	50.9	0.156	55.9	1.030
31.0	-3.474	36.0	-2.498	41.0	-1.580	46.0	-0.695	51.0	0.174	56.0	1.047
31.1	-3.454	36.1	-2.479	41.1	-1.562	46.1	-0.678	51.1	0.191	56.1	1.065
31.2	-3.433	36.2	-2.460	41.2	-1.544	46.2	-0.660	51.2	0.209	56.2	1.083
31.3	-3.413	36.3	-2.441	41.3	-1.526	46.3	-0.643	51.3	0.226	56.3	1.100
31.4	-3.393	36.4	-2.423	41.4	-1.508	46.4	-0.625	51.4	0.243	56.4	1.118
31.5	-3.373	36.5	-2.404	41.5	-1.490	46.5	-0.608	51.5	0.261	56.5	1.136
31.6	-3.353	36.6	-2.385	41.6	-1.472	46.6	-0.591	51.6	0.278	56.6	1.153
31.7	-3.333	36.7	-2.366	41.7	-1.454	46.7	-0.573	51.7	0.295	56.7	1.171
31.8	-3.313	36.8	-2.348	41.8	-1.436	46.8	-0.556	51.8	0.313	56.8	1.189
31.9	-3.293	36.9	-2.329	41.9	-1.419	46.9	-0.538	51.9	0.330	56.9	1.206
32.0	-3.273	37.0	-2.310	42.0	-1.401	47.0	-0.521	52.0	0.348	57.0	1.224
32.1	-3.253	37.1	-2.292	42.1	-1.383	47.1	-0.503	52.1	0.365	57.1	1.242
32.2	-3.233	37.2	-2.273	42.2	-1.365	47.2	-0.486	52.2	0.382	57.2	1.260
32.3	-3.213	37.3	-2.255	42.3	-1.347	47.3	-0.468	52.3	0.400	57.3	1.277
32.4	-3.193	37.4	-2.236	42.4	-1.330	47.4	-0.451	52.4	0.417	57.4	1.295
32.5	-3.173	37.5	-2.217	42.5	-1.312	47.5	-0.434	52.5	0.435	57.5	1.313
32.6	-3.153	37.6	-2.199	42.6	-1.294	47.6	-0.416	52.6	0.452	57.6	1.331
32.7	-3.134	37.7	-2.180	42.7	-1.276	47.7	-0.399	52.7	0.469	57.7	1.348
32.8	-3.114	37.8	-2.162	42.8	-1.259	47.8	-0.381	52.8	0.487	57.8	1.366
32.9	-3.094	37.9	-2.144	42.9	-1.241	47.9	-0.364	52.9	0.504	57.9	1.384
33.0	-3.075	38.0	-2.125	43.0	-1.223	48.0	-0.347	53.0	0.522	58.0	1.402
33.1	-3.055	38.1	-2.107	43.1	-1.205	48.1	-0.329	53.1	0.539	58.1	1.420
33.2	-3.035	38.2	-2.088	43.2	-1.188	48.2	-0.312	53.2	0.557	58.2	1.437
33.3	-3.016	38.3	-2.070	43.3	-1.170	48.3	-0.294	53.3	0.574	58.3	1.455
33.4	-2.996	38.4	-2.051	43.4	-1.152	48.4	-0.277	53.4	0.592	58.4	1.473
33.5	-2.977	38.5	-2.033	43.5	-1.135	48.5	-0.260	53.5	0.609	58.5	1.491
33.6	-2.957	38.6	-2.015	43.6	-1.117	48.6	-0.242	53.6	0.626	58.6	1.509
33.7	-2.938	38.7	-1.996	43.7	-1.099	48.7	-0.225	53.7	0.644	58.7	1.527
33.8	-2.918	38.8	-1.978	43.8	-1.082	48.8	-0.208	53.8	0.661	58.8	1.545
33.9	-2.899	38.9	-1.960	43.9	-1.064	48.9	-0.190	53.9	0.679	58.9	1.563
34.0	-2.880	39.0	-1.942	44.0	-1.046	49.0	-0.173	54.0	0.696	59.0	1.581
34.1	-2.860	39.1	-1.923	44.1	-1.029	49.1	-0.155	54.1	0.714	59.1	1.599
34.2	-2.841	39.2	-1.905	44.2	-1.011	49.2	-0.138	54.2	0.731	59.2	1.617
34.3	-2.822	39.3	-1.887	44.3	-0.994	49.3	-0.121	54.3	0.749	59.3	1.635
34.4	-2.802	39.4	-1.869	44.4	-0.976	49.4	-0.103	54.4	0.766	59.4	1.653
34.5	-2.783	39.5	-1.851	44.5	-0.958	49.5	-0.086	54.5	0.784	59.5	1.671
34.6	-2.764	39.6	-1.832	44.6	-0.941	49.6	-0.068	54.6	0.801	59.6	1.689
34.7	-2.745	39.7	-1.814	44.7	-0.923	49.7	-0.051	54.7	0.819	59.7	1.707
34.8	-2.726	39.8	-1.796	44.8	-0.906	49.8	-0.034	54.8	0.836	59.8	1.725
34.9	-2.707	39.9	-1.778	44.9	-0.888	49.9	-0.016	54.9	0.854	59.9	1.743

Omega Tablosu

P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB
60.0	1.761	65.0	2.688	70.0	3.680	75.0	4.771	80.0	6.021	85.0	7.533
60.1	1.779	65.1	2.708	70.1	3.700	75.1	4.794	80.1	6.048	85.1	7.567
60.2	1.797	65.2	2.727	70.2	3.721	75.2	4.818	80.2	6.075	85.2	7.602
60.3	1.815	65.3	2.746	70.3	3.742	75.3	4.841	80.3	6.102	85.3	7.636
60.4	1.833	65.4	2.765	70.4	3.763	75.4	4.864	80.4	6.130	85.4	7.671
60.5	1.852	65.5	2.784	70.5	3.784	75.5	4.888	80.5	6.158	85.5	7.706
60.6	1.870	65.6	2.803	70.6	3.805	75.6	4.911	80.6	6.185	85.6	7.741
60.7	1.888	65.7	2.823	70.7	3.826	75.7	4.935	80.7	6.213	85.7	7.776
60.8	1.906	65.8	2.842	70.8	3.847	75.8	4.959	80.8	6.241	85.8	7.812
60.9	1.924	65.9	2.861	70.9	3.868	75.9	4.982	80.9	6.269	85.9	7.848
61.0	1.943	66.0	2.881	71.0	3.889	76.0	5.006	81.0	6.297	86.0	7.884
61.1	1.961	66.1	2.900	71.1	3.910	76.1	5.030	81.1	6.326	86.1	7.920
61.2	1.979	66.2	2.919	71.2	3.931	76.2	5.054	81.2	6.354	86.2	7.956
61.3	1.997	66.3	2.939	71.3	3.952	76.3	5.078	81.3	6.382	86.3	7.993
61.4	2.016	66.4	2.958	71.4	3.973	76.4	5.102	81.4	6.411	86.4	8.030
61.5	2.034	66.5	2.978	71.5	3.995	76.5	5.126	81.5	6.440	86.5	8.067
61.6	2.052	66.6	2.997	71.6	4.016	76.6	5.150	81.6	6.469	86.6	8.104
61.7	2.071	66.7	3.017	71.7	4.037	76.7	5.174	81.7	6.498	86.7	8.142
61.8	3.089	66.8	3.036	71.8	4.059	76.8	5.199	81.8	6.527	86.8	8.179
61.9	2.108	66.9	3.056	71.9	4.080	76.9	5.223	81.9	6.556	86.9	8.217
62.0	2.126	67.0	3.076	72.0	4.102	77.0	5.248	82.0	6.585	87.0	8.256
62.1	2.145	67.1	3.095	72.1	4.123	77.1	5.272	82.1	6.615	87.1	8.294
62.2	2.163	67.2	3.115	72.2	4.145	77.2	5.297	82.2	6.645	87.2	8.333
62.3	2.181	67.3	3.135	72.3	4.167	77.3	5.322	82.3	6.674	87.3	8.372
62.4	2.200	67.4	3.154	72.4	4.188	77.4	5.346	82.4	6.704	87.4	8.411
62.5	2.218	67.5	3.174	72.5	4.210	77.5	5.371	82.5	6.734	87.5	8.451
62.6	2.237	67.6	3.194	72.6	4.232	77.6	5.396	82.6	6.764	87.6	8.491
62.7	2.256	67.7	3.214	72.7	4.254	77.7	5.421	82.7	6.795	87.7	8.531
62.8	2.274	67.8	3.234	72.8	4.276	77.8	5.446	82.8	6.825	87.8	8.571
62.9	2.293	67.9	3.254	72.9	4.298	77.9	5.471	82.9	6.856	87.9	8.612
63.0	2.311	68.0	3.274	73.0	4.320	78.0	5.497	83.0	6.886	88.0	8.653
63.1	2.330	68.1	3.294	73.1	4.342	78.1	5.522	83.1	6.917	88.1	8.694
63.2	2.349	68.2	3.314	73.2	4.364	78.2	5.548	83.2	6.948	88.2	8.736
63.3	2.367	68.3	3.334	73.3	4.386	78.3	5.573	83.3	6.979	88.3	8.778
63.4	2.386	68.4	3.354	73.4	4.408	78.4	5.599	83.4	7.011	88.4	8.820
63.5	2.405	68.5	3.374	73.5	4.430	78.5	5.624	83.5	7.042	88.5	8.862
63.6	2.424	68.6	3.394	73.6	4.453	78.6	5.650	83.6	7.074	88.6	8.905
63.7	2.442	68.7	3.414	73.7	4.475	78.7	5.676	83.7	7.105	88.7	8.948
63.8	2.461	68.8	3.434	73.8	4.498	78.8	5.702	83.8	7.137	88.8	8.992
63.9	2.480	68.9	3.455	73.9	4.520	78.9	5.728	83.9	7.169	88.9	9.036
64.0	2.499	69.0	3.475	74.0	4.543	79.0	5.754	84.0	7.202	89.0	9.080
64.1	2.518	69.1	3.495	74.1	4.565	79.1	5.780	84.1	7.234	89.1	9.125
64.2	2.537	69.2	3.516	74.2	4.588	79.2	5.807	84.2	7.267	89.2	9.169
64.3	2.555	69.3	3.536	74.3	4.611	79.3	5.833	84.3	7.299	89.3	9.215
64.4	2.574	69.4	3.556	74.4	4.633	79.4	5.860	84.4	7.332	89.4	9.260
64.5	2.593	69.5	3.577	74.5	4.656	79.5	5.886	84.5	7.365	89.5	9.306
64.6	2.612	69.6	3.597	74.6	4.679	79.6	5.913	84.6	7.398	89.6	9.353
64.7	2.631	69.7	3.618	74.7	4.702	79.7	5.940	84.7	7.432	89.7	9.400
64.8	2.650	69.8	3.638	74.8	4.725	79.8	5.967	84.8	7.466	89.8	9.447
64.9	2.669	69.9	3.659	74.9	4.748	79.9	5.994	84.9	7.499	89.9	9.494

Omega Tablosu

P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB	P (%)	dB
90.0	9.542	92.0	10.607	94.0	11.950	96.0	13.802	98.0	16.902	100.0	∞
90.1	9.591	92.1	10.666	94.1	12.027	96.1	13.917	98.1	17.129		
90.2	9.640	92.2	10.726	94.2	12.106	96.2	14.034	98.2	17.368		
90.3	9.689	92.3	10.787	94.3	12.186	96.3	14.154	98.3	17.621		
90.4	9.739	92.4	10.849	94.4	12.268	96.4	14.278	98.4	17.889		
90.5	9.789	92.5	10.911	94.5	12.351	96.5	14.405	98.5	18.173		
90.6	9.840	92.6	10.974	94.6	12.435	96.6	14.535	98.6	18.477		
90.7	9.891	92.7	11.038	94.7	12.521	96.7	14.669	98.7	18.804		
90.8	9.943	92.8	11.102	94.8	12.608	96.8	14.807	98.8	19.156		
90.9	9.995	92.9	11.168	94.9	12.697	96.9	14.950	98.9	19.538		
91.0	10.048	93.0	11.234	95.0	12.788	97.0	15.097	99.0	19.956		
91.1	10.101	93.1	11.301	95.1	12.880	97.1	15.248	99.1	20.418		
91.2	10.155	93.2	11.369	95.2	12.974	97.2	15.405	99.2	20.934		
91.3	10.210	93.3	11.438	95.3	13.070	97.3	15.567	99.3	21.519		
91.4	10.264	93.4	11.508	95.4	13.168	97.4	15.736	99.4	22.192		
91.5	10.320	93.5	11.579	95.5	13.268	97.5	15.911	99.5	22.989		
91.6	10.376	93.6	11.651	95.6	13.370	97.6	16.092	99.6	23.962		
91.7	10.433	93.7	11.724	95.7	13.474	97.7	16.282	99.7	25.216		
91.8	10.490	93.8	11.798	95.8	13.581	97.8	16.479	99.8	26.981		
91.9	10.548	93.9	11.873	95.9	13.690	97.9	16.686	99.9	29.996		

EK 6. Çözeltinin Doygunluğa Ulaşma Süresi Ortalama Verileri Üzerine Varyans Analizi

DEĞİŞKENLİK KAYNAĞI	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Gaz Kabarcık Büyüklüğü (A)	17380	1	17380	8.09**
Çözelti Sıcaklığı (B)	33858.3	2	16929.15	7.88**
Gaz Akış Hızı (C)	320530.9	2	160265.45	74.62**
Karıştırma Hızı (D)	29108.3	2	14554.15	6.77**
Çözelti Derişimi (E)	356673.3	2	178336.65	83.04**
HATA	55834.8	26	2147.49	
TOPLAM	816.96	17	48.06	

** % 1 Anlam Düzeyinde Etkili Olan Kontrol Faktörleri $F_{(00.1, 2, 26)} = 5.53$

EK 7. Çözeltinin Kükürtdioksiti Yüksek Verimlerde Tutma Süresi Ortalama Verileri Üzerine Varyans Analizi

DEĞİŞKENLİK KAYNAĞI	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F
Gaz Kabarcık Büyüklüğü (A)	43.56	1	4356	7.31
Çözelti Sıcaklığı (B)	13268.6	2	6634.3	11.14**
Gaz Akış Hızı (C)	61256.2	2	30628.1	51.42**
Karıştırma Hızı (D)	2720.2	2	1360.1	2.28
Çözelti Derişimi (E)	36315.6	2	18157.8	30.48**
HATA	15487.4	26	595.7	
TOPLAM	133404	35	3811.5	

** % 1 Anlam Düzeyinde Etkili Olan Kontrol Faktörleri $F_{(00.1, 2, 26)} = 5.53$

KAYNAKÇA

KİTAPLAR

- Bedeian, Arthur G. **Management**. Third Edition. USA: The Dryden Press, 1993.
- Bendell, A, J. Disney and W.A. Pridmore. **Taguchi Methods: Application In World Industry**. USA: Short Run Press Ltd., 1989.
- Crosby, Philip B. **Quality is Free**. USA: Mc Graw- Hill Pub. Co., 1979.
- Del Mer , Donald and George Sheldon. **Introduction to Quality Control**. USA: West Publishig Company, 1988.
- Deming, Edwards W. **Out of Crisis**. Cambridge, MA: MIT Center for Advanced Engineering Studies, 1986
- Denhad, Khosrow. **Quality Control, Robust Design, and The Taguchi Method**. USA: Wadsworth and Brooks/Cole, 1989.
- Devor, Richard E., Tsong H. Chang and John W. Sutherland. **Statistical Quality Design and Control: Contemporary Concepts and Methods**. USA: Macmillan Pub. Co., 1992.
- Esin, Alp, Macit Karabay ve Yüksel Kılıçaslan. **Kalite Sistemine Hazırlık ve TS-ISO 9000**. Ankara: KOSGEB, 1993.
- Evans, James R. **Applied Production and Operations Management**. USA: West Pub. Co., 1993
- Evans, James R. and William M. Lindsay. **The Management and Control of Quality**. USA: West Pub. Co., 1989.
- Fowlkes, William Y. and Clyde M. Creveling. **Engineering Methods for Robust Product Design: Using Taguchi Methods in Technology and Product Development**. USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1995.
- Garrity, M. Susan. **Basic Qulity Improvement**. USA: Prentice-Hall International, Inc., 1993
- Grant, Eugene L. and Richard S. Leavenworth. **Statistical Quality Control**. Seventh Edition. USA: Mc Graw-Hill Co. Inc., 1996.
- Juran, J.M. and Frank M. Gryna, Jr. **Quality Planning and Analysis From Product Development Through Use**. Second Edition. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., 1982.

- **Juran's Quality Control Handbook**. Fourth Edition. USA: Mc Graw-Hill Book Company, 1980.
- Kavrakoğlu, İbrahim. **Kalite: Kalite Güvencesi ve ISO 9000**. İkinci Basım. İstanbul: KalDer Yayınları, 1996.
- Kaytakoğlu, Süleyman ve Diğerleri. “ Fosil Yakıt Kullanımından Kaynaklanan Kükürdioksit Gazı Emisyonunu Giderici Yöntemlerin ve İlgili Parametrelerin Araştırılması ve Giderme Yöntemlerinin Karşılaştırılması,” **A.Ü. Araştırma Fonu Projesi Sonuç Raporu**, Eskişehir 1997.
- Kolarik, William J. **Creating Quality Concepts, Systems, Strategies, and Tools**. Singapore: Mc Graw-Hill, Inc., 1995.
- Lochner, Robert H. and Josep E. Matar. **Designing For Quality: An Introduction to The Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Experimental Design**. USA: Chapman and Hall, 1990.
- Logothetis, N. and H. P. Wynn. **Quality Through Design**. Oxford: Clarendon Press, 1989.
- McClave, James T. and P. George Benson. **Statistics for Business and Economics**. Fifth Edition. USA: Dellen Pub. Co., 1991.
- Montgomery, Douglas C. **Introduction to Statistical Quality Control**. Third Edition. USA: John Wiley and Sons, Inc., 1996.
- Peace, Glen S. **Taguchi Methods: A Hands-on Approach to Quality Engineering**. USA: Addison-Wesley Pub. Co., 1993.
- Rao, Ashok ve Diğerleri. **Total Quality Management: A Cross Functional Perspective**. USA: John Wiley and Sons, 1996.
- Ross, Phillip J. **Taguchi Techniques for Quality Engineering**. USA: Mc Graw Hill, 1988.
- Roy, Ranjit K. **A Primer on The Taguchi Method**. USA: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- Ryan, Thomas P. **Statistical Methods for Quality Improvement**. USA: Wiley Series, 1989.
- Shetty, Y.K. and V.M. Beuhler. **Productivity and Quality Through Science and Technology**. New York: Quorum Books, 1988.
- Stevenson, William J. **Production/ Operations Management**. Fifth Edition. USA: Irwin, 1996.

Taguchi, Genichi, Seiso Konishi and Yu-In Wu. **Taguchi Methods: Research and Development**. USA: ASI Press, 1992.

Taguchi, Genichi and Yu-In Wu. **Introduction to Off-Line Quality Control**. Japan: Central Japan Quality Control Association, 1979

Taguchi, Genichi, Yu-In Wu and Y. Yokoyama. **Taguchi Methods: Design of Experiments**. USA: ASI Press, 1993.

Wheeler, Donald J. and David S. Chambers. **Understanding Statistical Process Control**. Second Edition. Tennessee, USA: SPC Press, 1992.

MAKALELER

Ackerman, R.B., Plsek, P.E., and G.J. "Quality Tools: Meeting The Needs of Tomorrow's Industry ," **Quality Progress**. October 1986.

Alankuş, Orhan ve Bengisu, Murat. "Yeni Üründe Kalite," **5. Ulusal Kalite Kongresine Sunulan Bildiri**. İstanbul: 13-14 Kasım 1996.

Ashley, Steven. "Applying Taguchi's Quality Engineering to Technology Development ," **Mechanical Engineering**. July 1982.

Barker, Thomas B. "Quality Engineering By Design: Taguchi's Philosophy," **Quality Progress**, Vol.19, No. 12: 32-42, December 1986.

Box, E.P. George and Soren Bisgaard. "The Scientific Context of Quality Improvement ," **Quality Progress**. June 1987.

Burnak, Nimetullah ve Cafer Çelik. "Potansiyel Verimlilik Arttırma Aracı Olarak Kalite Geliştirme," **Verimlilik Dergisi**.

----- "Kalite Geliştirmede Taguchi Yöntemlerinin Rolü ve Bir Uygulama," **Endüstri Mühendisliği**, C. 5, S. 5: 9-20, 1994.

Cheng, T. C. E. "Quality Control: Changing with The Times," **International Journal of Quality and Reliability Management**. Vol. 7, No. 36-46, 1990.

Denton, D. Keith. "Enhance Competitiveness and Customer Satisfaction: Here's One Approach ," **Industrial Engineering**. May 1990.

Erga, Olav. "A New Regenerable for The Recovery of SO2 Removel," **Chemical Engineering Technology**. Vol. 11: 402-407, 1988.

- Gunter, Berton. "A Perspective on The Taguchi Methods," **Quality Progress**. Vol.20, No. 6: 44-52, June 1987.
- Holcomb, M. Collins. "Customer Service Measurement: A Methodology For Increasing Customer Value Through Utilization of The Taguchi Strategy," **Journal of Business Logistic**. Vol.15, No.1, 1994.
- Jeang, A. "An Approach of Tolerance Design for Quality Improvement and Cost Reduction," **International Journal of Production Research**, Vol. 35, No. 5: 1193-1211, May 1997.
- Kackar, Raghu N. "Taguchi's Quality Philosophy: Analysis and Commentary," **Quality Progress**. Vol. 19, No. 12:21-29, December 1986.
- "Off-Line Quality Control, Parameter Design and The Taguchi Method," **Journal of Quality Technology**. October 17, 1995.
- Kackar, Raghu N. and Anne C. Shoemaker. "Robust Design: A Cost-Effective Method for Improving Manufacturing Processes," **AT&T Technical Journal**. Vol.65, No.2:51-68, 1986.
- Knowlton, J. and Ren Keppinger. "The Experimentation Process," **Quality Progress**. Vol. 26, No. 2: 43-47, February 1993.
- Leon, Ramon V., Anne C. Shoemaker and Raghu N. Kackar. "Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios," **Technometrics**. Vol.29, No.3: 253-265, August 1987.
- Leon, Ramon V., Anne C. Shoemaker and Kwok-Leung Tsui. "Discussion," **Technometrics**. Vol.35, N1: 21-24, February 1993.
- Lin, Paul K. H., Lawrence P. Sullivan and Genichi Taguchi. "Using Taguchi Methods in Quality Engineering," **Quality Progress**. Vol.23, No.9: 55-59, September 1990.
- Maghsoodloo, Saeed. "The Exact Relation of Taguchi's Signal -to-Noise Ratio to His Quality Loss Function," **Journal of Technology**. Vol.22, No.1, January 1990.
- Mayer, R. J. and P. C. Benjamin. "Using The Taguchi Paradigm for Manufacturing System Design Using Simulation Experiments," **Computers and Industrial Engineering**, Vol. 22, No. 2: 195-209, 1992.
- McCaskey, S. D., and K. I. Tsui. "Analysis of Dynamic Robust Design Experiments," **International Journal of Production Research**. Vol.35, No. 6: 1561-1574, May 1997.

- Nayebpour, Mohamad R. and William H. Woodall. "An Analysis of Taguchi's On-Line Quality- Monitoring Procedures for Attributes," **Technometrics**, Vol. 35, No. 1: 53-60, February 1993.
- Noori, Hamid. The Taguchi Methods: Achieving Design And Output Quality," **The Academy of Management Executive**. Vol. 3, No.4, 1989.
- Park, Sung H. and Gongxu Zhang. "A New Method of Analysis for Parameter Design in Quality Engineering," **Total Quality Management**. Vol.6, No.1:13-19, 1995.
- Peşkircioğlu, Nurettin. "Toplam Kalite Güvenilirliği Programlarının Entegre Bir Parçası Olarak Taguchi Yöntemi," **Verimlilik Dergisi**. Vol. 65, No. 92, 1990.
- Phadke, M. S. ve Diğerleri. "Off-Line Quality in Integrated Circuit Fabrication Using Experimental Design," **The Bell System Technical Journal**. Vol. 62, No.5:1273-1308, 1983.
- Roslund, Jerry L. "Evaluating Management Objectives With The Quality Loss Function," **Quality Progress**. August 1989.
- Ross, Phillip J. "The Role of Taguchi Methods and Design of Experiments in QFD," **Quality Progress**. June 1988.
- Singpurwalla, Nozer D. "A Bayesian Perspective on Taguchi's to Quality Engineering and Tolerance Design," **IIE Transactions**, Vol.24, No.5: 18-31, November 1992.
- Sriraman, Vedaraman, Phadna Tosirisuk and Hsing Wei Chu. "Object-Oriented Databases For Quality Function Deployment and Taguchi Methods," **Computers Industrial Engineering**. Vol. 19, No. 1-4, 1990.
- Sullivan, Lawrence P. "The Power of Taguchi Methods," **Quality Progress**, Vol. 20, No. 6: 76-79, 1987
- Taguchi, Genichi and Don Clausing. "Robust Quality," **Harvard Business Review**. 65-75, Jan-Feb, 1990.
- Tong , Lee-Ing and Chao- Ton Su. "Robust Design For The Nominal- The- Best Performance Characteristic," **International Journal of Industrial Engineering**, Vol. 3, No.3, 1996.
- Tribus, Myron and Geza Szonyi. "An Alternative View of The Taguchi Approach," **Quality Progress**. May 1989.
- Tsai, Jin-Shy. "Optimization of Carbon Fibre Production Using The Taguchi Method," **Journal of Materials Science**. 30, 1995.

Tsui, Kwok-Leung. "An Overview of Taguchi Method and Newly Developed Statistical Methods for Robust Design," **IIE Transactions**, Vol.24, No.5: 44-57, November 1992.

Ünal, Reşit, Douglas O. Stanley, C. Russ Joyner. "Propulsion System Design Optimization Using The Taguchi Method," **IEEE Transactions on Engineering Management**. Vol. 40, No.3: 315-322, August 1993.

