

**F-4 UÇAKLARINDA YAKIT TÜKETİMİNİ
ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN 2^k DENEYLERİ VE
TAGUCHI YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ**

Şenol KASAP

Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İstatistik Anabilim Dalı

Ocak – 2006

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Şenol Kasap'ın “**F-4 Uçaklarında Yakıt Tüketimini Etkileyen Faktörlerin 2^k Deneyleri ve Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi**” başlıklı **İstatistik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 23 Aralık 2005 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Yard.Doç.Dr. Berna YAZICI
Üye	: Prof.Dr. Embiya AĞAOĞLU
Üye	: Yard.Doç.Dr. Nihal ERGİNEL

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

F-4 UÇAKLARINDA YAKIT TÜKETİMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN 2^k DENEYLERİ VE TAGUCHI YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

ŞENOL KASAP

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İstatistik Anabilim Dalı

Danışman: Yard.Doç.Dr.Berna YAZICI

2006, 78 sayfa

Bu tezde, günümüz kalite anlayışındaki ürün üretilmeden kalitenin sağlanması konusu üzerinde durulmuş, bunun için en etkili yöntemlerden biri olan deneysel tasarım yöntemi açıklanmıştır. Ardından deneysel tasarımın imalat sektöründe yaygın olarak kullanılmasını sağlayan Taguchi Yöntemi incelenmiştir.

Çalışmanın uygulama bölümünde, F-4 savaş uçaklarında yakıt tüketimini etkileyen faktörler belirlenmiştir. Bu amaçla, uçak motorlarına yakıt akışını sağlamakla görevli olan Ana Yakıt Kontrol (Main Fuel Controller) ünitesi 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı Yakıt Deneme Atölyesinde son test aşamasında incelenmiştir.

Yakıt akışına etkisi olduğu düşünülen beş faktör iki düzeyli ele alınarak Tam Faktöriyel Deney Tasarımı, Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımı ve Taguchi Yöntemiyle ayrı ayrı çözümlenerek, yakıt akışını (yakıt tüketimi) etkileyen faktörler belirlenmiş, ulaşılan sonuçlara göre iki yöntem birbiri ile kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deneysel Tasarım, Taguchi Yöntemleri, Çevrim Dışı Kalite Kontrol, Kesirli Faktöriyel Deney.

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DETERMINING THE FACTORS THAT EFFECT THE FUEL CONSUMPTION IN F-4 AIRCRAFTS BY 2^k EXPERIMENTS AND TAGUCHI METHOD

ŞENOL KASAP

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Department of Statistics**

Supervisor: Assist.Prof.Dr. Berna YAZICI

2006, 78 pages

In this thesis, the subject of assuring the quality before producing the product which is the recent quality concept has been mentioned and the experimental design method –one of the most effective methods- has been explained for this aim. Then The Taguchi Method which makes the experimental design widespread for manufacturing sector has been researched.

In the application part of the study, the factors which effects the fuel consumption in F-4 aircrafts were determined. For this aim the Main Fuel Control unit which supplies fuel to the engines was studied during its final test phase in 1st Air Supply and Maintenance Center Fuel Test Shop.

Five factors (with two levels) that may be effective on fuel consumption have been taken into account and effective ones determined using Full Factorial Experimental Design, Fractional Factorial Design and Taguchi Method separately. The two methods has been compared according to the obtained results.

**Keywords: Experimental Design, Taguchi Methods, Offline Quality Control,
Fractional Factorial Design.**

TEŞEKKÜR

Bu tezi yapmam sırasında beni yönlendiren ve bana yardımcı olan danışmanım Yard.Doç.Dr.Berna YAZICI'ya, deneylerin yapılmasında gayretlerini esirgemeyen 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı Yakıt Deneme Atölyesi personeline, arkadaşım Seyhani KOÇ'a ve ayrıca yaptıkları büyük yardımlardan dolayı Araştırma Görevlisi Çiğdem GİRİFTİNOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim.

Şenol KASAP

Ocak 2006

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KALİTE VE DENEY TASARIMI	4
2.1. Kalite Kavramı.....	4
2.1.1. Dünyada Kalite Kavramının Gelişimi.....	5
2.1.2. Kalite Anlayışındaki Son Gelişmeler.....	7
2.1.3. Kalite Maliyetleri.....	10
2.2. Deney Tasarımı.....	12
2.2.1. Tek Faktörlü Deneyler.....	14
2.2.2. Tam Faktöriyel Deneyler.....	14
2.2.3. Kesirli Faktöriyel Deneyler.....	16
3. TAGUCHI YÖNTEMİ	17
3.1. Taguchi Felsefesi.....	18
3.2. Taguchi Kalite Kontrol Sistemi.....	21
3.2.1. Çevrim İçi Kalite Kontrol.....	22
3.2.2. Çevrim Dışı Kalite Kontrol.....	23
3.2.2.1. Sistem Tasarımı.....	26
3.2.2.2. Parametre Tasarımı.....	26
3.2.2.3. Tolerans Tasarımı.....	27
3.3. Kayıp Fonksiyonu.....	29

İÇİNDEKİLER

3.4. Gürültü Etkenleri ve Sinyal Gürültü Oranı (S/G).....	33
3.5. Deneysel Tasarımla Kalite Geliştirme ve Ortogonal Diziler.....	36
3.5.1. Deneysel Tasarım.....	36
3.5.2. Ortogonal Diziler ve Bloklama.....	44
3.5.3. İki Düzeyli Tasarımlarda Varyans Analizi.....	48
3.5.4. Deneysel Tasarım Uygulama Adımları.....	50
4. UYGULAMA.....	55
4.1. Problemin Tanımlanması.....	56
4.2. Faktör ve Faktör Seviyelerinin Belirlenmesi.....	56
4.3. Çözümleme.....	60
4.4. Uygulama Sonucu.....	72
5. SONUÇ.....	75
KAYNAKLAR.....	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

3.1.	Kalite karakteristiklerinin hedef değerden sapması	19
3.2.	Taguchi'nin kalite kontrol sistemi	21
3.3.	Taguchi metodunun sistematığı	25
3.4.	Geleneksel kalite kontrol yaklaşımında kayıplar	29
3.5.	Taguchi yaklaşımında kayıplar	30
3.6.	Amaç fonksiyona göre Taguchi kayıp fonksiyonları	32
3.7.	Genel süreç modeli	37
3.8.	Etkileşim grafikleri	40
3.8.	Etkileşim grafikleri (devam)	41
3.9.	Deneyel tasarım prosedürü	50
4.1.	Gürültü faktörlerinin sebep sonuç diyagramında gösterilmesi	57
4.2.	Ana yakıt kontrol ünitesi revizyon akış şeması	58
4.3.	Tam faktöriyel deneye göre yakıt akışına etki eden faktör ve etkileşimler	65
4.4.	Tam faktöriyel deneye göre varyansa etki eden faktör ve etkileşimler	65
4.5.	$\frac{1}{2}$ Kesirli faktöriyel deney sonuçlarına göre etki ve etkileşimler	71
4.6.	BC Etkileşim grafiği	74

TABLULAR DİZİNİ

2.1.	Kalite alanında çalışma yapmış başlıca kişiler	10
2.2.	Kalite maliyet bileşenleri	11
3.1.	Taguchi kalite felsefesinin 7 noktada özetlenmesi	20
3.2.	Kalite mühendisliği bileşenleri ve içerikleri	24
3.3.	2^3 Faktöriyel tasarım için farklı gösterimler	43
3.4.	2^4 Faktöriyel deneysel tasarımın işaret hesaplama tablosu	44
3.5.	2^3 Faktöriyel tasarımın 4 deneylik 2 bloğa ayrılması	46
3.6.	2^3 Faktöriyel tasarımın 2 deneylik 4 bloğa ayrılması	47
3.7.	2^k Faktöriyeller için blok düzenlemesi	48
3.8.	Varyans analizi sonuç tablosu	49
4.1.	Faktörler ve düzeyleri	59
4.2.	Bazı CIT similatör değerleri için sıcaklıklar	59
4.3.	Tam faktöriyel tasarım için yapılan deney sonuçları	61
4.4.	Tam faktöriyel için hesaplanan varyans ve S/G oranları	62
4.5.	Faktör ve etkileşimler için hesaplanan etki değerleri	64
4.6.	Tam faktöriyel tasarıma göre varyans analizi sonuçları	68
4.7.	$\frac{1}{2}$ Kesirli faktöriyel deney tasarımı için yapılan deney sonuçları	69
4.8.	$\frac{1}{2}$ Kesirli faktöriyel deney tasarımı faktör ve etkileşimleri için eşdeşler ve etki değerleri	70
4.9.	$\frac{1}{2}$ Kesirli faktöriyel tasarıma göre varyans analizi sonuçları	72
4.10.	Her iki yöntemle yakıt akışını etkileyen faktörler	73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

CDP	: Kompresör çıkış tazyiki (PPH)
CIT	: Kompresör giriş sıcaklığı (inch)
I	: Etki değeri
IGV	: Hareketli kompresör paleleri
k	: Deney faktör sayısı
KFD	: Kesirli faktöriyel deney
KO	: Kareler ortalaması
KT	: Kareler toplamı
L(y)	: Taguchi kalite kayıp fonksiyonu
MFC	: Ana yakıt kontrol ünitesi
MSD	: Ortalama standart sapma
PLA	: Gaz kolu açısı
r	: Deney tekrar sayısı
RPM	: Motor devri (d/dak)
sd	: Serbestlik derecesi
TFD	: Tam faktöriyel deney

1. GİRİŞ

Sınırlı miktardaki veri kümesinden bir takım incelemeler sonunda çeşitli bilimsel yorumlar getirebilmek için kullanılan istatistik biliminin kullanım alanı, zaman ve maliyet açısından getirdiği avantajlar sayesinde giderek artmaktadır.

Geçmişte kalite dendiğinde aklımıza muayene kavramı gelmekteydi. Fakat kalite alanında gerçekleştirilen ilerlemeler ile muayene faaliyetleri, kalite kavramıyla birlikte anılmaktan çıkmış, son çare olarak başvurulabilecek, işletmeler açısından maliyetleri arttıracak ve arzulanmayan bir yöntem şekline dönüşmüştür.

1900'lü yılların başından itibaren ortaya konan kalite kavramlarının birçoğu istatistiksel temellere dayanmaktadır. Bu nedenle, günümüzde istatistik kalitenin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir.

Günümüzde giderek ağırlaşan rekabet koşulları, işletmelerin pazarda kalabilmeleri ve rekabet edilen diğer kuruluşların önüne geçebilmeleri için müşterilerin isteklerine ve ihtiyaçlarına uygun yeni ürünleri tasarlayıp geliştirmelerini zorunluluk haline getirmiştir. Bir kuruluşun rakipleriyle boy ölçüşebilmesi ancak ucuz ve kaliteli ürünler üretmesi ve satış sonrası hizmet ile mümkündür.

Modern kalite kontrolde sistemin amacı, tüketici tercihlerini karşılamak için ürünleri tasarlamak ve ürünü ekonomik olarak üretmektir. Modern kalite kontrol teknikleri bitmiş ürünler üzerine odaklanmayıp daha çok hatalı ürünlerin oluşmasını önlemeye yönelik çalışmaları içermektedir. Bu da, işletmelerin verimliliklerini arttırmak ve rekabet avantajlarını yükseltmeye yönelik olarak, kalitenin sadece üretim hattında değil, ürün ve süreç tasarım aşamalarında da doğru bir şekilde planlanması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Kalite kontrol yöntemleri, Taguchi yaklaşımlarının ışığı altında üretim içi (on line) ve üretim dışı (off line) olarak ikiye ayrılmaktadır. Üretim içi yöntemler, istatistiksel süreç kontrolü ve kontrol şemaları gibi üretim sırasında kullanılan yöntemleri içermektedir. Üretim dışı yöntemler ise, istatistiksel deney tasarımı ve güvenilirlik testleri gibi ürün ve süreç tasarım aşamasında kullanılan yöntemleri kapsamaktadır.

Üretim dışı yöntemler kullanılarak ürün üzerinde etkili faktörlerin ve süreçlerin belirlenmesi ve kontrol altında tutulması ile kalite ürün üretilmeden sağlanmış, işletmenin yatırım ve süreç tasarım maliyetlerinde de büyük ölçüde tasarruf edilmiş olur.

Üretim dışı kalite kontrol yöntemlerinden en etkilisi istatistiksel deney tasarımıdır. Fakat bu yöntemde teklif edilen istatistiksel deneyler, ürün parametre sayılarının artmasına bağlı olarak uygulanması zor, zaman alan ve maliyeti oldukça yükselttiğinden uygulanabilir olmamaktadır. Ancak Taguchi yaptığı çalışmalar sonucunda, çok az deneme ile optimum sonuçlar veren deney düzenleri geliştirmiştir.

Taguchi'nin önerdiği deney düzenleri faktör düzeylerini istatistiksel deney düzenlerindeki gibi teker teker değiştirmek yerine, eş zamanlı değiştirmeyi önermektedir. Bu yaklaşım, istatistiksel deney tasarımına yöntem açısından önemli bir yenilik getirmemesine rağmen, endüstri uygulamalarına yönelik yeni fikirler ortaya koymuş ve başarılı uygulamalar sergileyerek, deneysel tasarım yönteminin imalat sektöründe kabul görmesinde büyük katkılarda bulunmuştur.

Bu çalışmada, deneysel tasarım yöntemi ve Taguchi Metotlarından faydalanılarak F-4 savaş uçaklarının yakıt tüketimini etkileyen faktörler tespit edilecek, iki yöntem arasında fark olup olmadığı ortaya konulmaya çalışılacaktır. Bu amaçla F-4 uçak motorlarına yakıt akışı sağlayan Ana Yakıt Kontrol (Main Fuel Controller, MFC) ünitesi incelemeye alınmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, konuya giriş niteliğinde kalite kavramı ve günümüzde kalite kavramındaki yeni anlayışlar verilmiştir. Sonrasında deney tasarımı yöntemi ele alınmış ve deney tasarımına ait temel kavramlara kısaca değinilmiştir.

Üçüncü bölümde öncelikle Taguchi metodunun gelişimi, felsefesi üzerinde durulmuş, Taguchi'nin kalite kontrole bakış açısı, çevrim dışı kalite kontrol, kayıp fonksiyon, sinyal-gürültü oranı kavramları incelenmiş, ardından deneysel tasarım yöntemi ve Taguchi'nin geliştirdiği ortogonal diziler kavramının birlikte ele alındığı deneysel tasarım yöntemiyle ürün/süreç kalitesinin ne şekilde geliştirileceği anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, F-4 uçağı Ana Yakıt Kontrol ünitesinin uçak motoru üzerindeki işlevinden ve uçak yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin Ana Yakıt Kontrol ünitesi ile nasıl belirlendiğine ilişkin bilgiler verilmiştir. Sonrasında ünitenin revizyonu ardından yapılan ve uçuş şartlarının simüle edildiğı son test aşamasında tam faktöriyel deney tasarımı ve Taguchi deney tasarım yöntemi ayrı ayrı uygulanarak uçuş anında uçağın yakıt tüketimini etkileyen faktörler tespit edilmiş, bu iki yöntem arasında fark olup olmadığı incelenmiştir.

Beşinci ve son bölümde ise konuyla ilgili değerlendirmelerde bulunulmuş, iki yöntemin birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları yapılan analizlerden elde edilen sonuçların karşılaştırmasıyla ortaya konmuştur.

2. KALİTE ve DENEY TASARIMI

2.1. Kalite Kavramı

Kalite çok geniş, içerikli bir kavram olduğundan genel ve net bir tanım yapmak oldukça zordur. Ancak bakış açılarına göre pek çok tanımı yapılmaktadır. Kalite sözcüğü kullanım amacına göre değişik anlamlar ifade edebilir. Birçok insana göre kalite “pahalı”, “lüks”, “az bulunur”, “üstün nitelikte” ve benzeri kavramlarla eşanlamlıdır. Günümüzde, kalite kavramı, günlük konuşmalardaki dağınıklığından kurtarılmış, dar tanımlama kalıplarından çıkarılmış, esnek ve dinamik bir çerçeve içine yerleştirilmiştir. Bu özelliğiyle de kalite kavramı, stratejik bir yönetim aracı durumuna gelmiştir.

Kalite “bir mal veya hizmetin müşteri beklenti ve gereksinimlerini karşılayabilme yeteneğidir” diye de tarif edilebilir. Tüketicilerin beklentilerine bağlı olarak, kalite kavramı topluma, toplumun kültürel gelişimine, beğeni ve alışkanlıklarına göre değişen bir kavramdır. Amaç müşteri beğeni ve gereksinimlerini daha iyi yakalamak ve rakiplerinden daha iyi mal / hizmet üretmektir [1].

Kalite kavramı insanların ve sistemlerin "hata yapması" ve "mükemmele ulaşma isteği" gerçeğinden ortaya çıkmıştır. Kalite kelimesi 16. yüzyılda Latince’de nasıl oluştuğu anlamına gelen "Qualis" kelimesinden türemiş ve "Qualitas" kelimesiyle ifade edilmiştir bu kelimedenden türetilen kalite kavramı, bir ürünün yada hizmetin durumu, niteliği veya değeri anlamındadır.

Kalite kavramını genel olarak bir tanım altında toparlamak gerekirse; müşteri isteklerini önceden tahmin ederek, müşteri beklentilerinin ötesine geçmek, ürünün doğal yaşamı boyunca müşteriyi memnun etmektir. Günümüzde teknik ve ekonomik gelişmelerin üretimden tüketime kadar her aşamada meydana getirdiği değişimler, ürün kalitesinin önemini artırarak çok sayıda kalite sorununu da beraber getirmiş ve kalite kavramı birçok ürün tasarımcısını, mühendisi, girişimciyi, yöneticiyi, üreticiyi ve tüketiciyi ilgilendiren başlıca konu haline gelmiştir.

Son yıllardaki hızlı teknolojik ve iktisadi gelişmeler, kaliteye değişik boyutlar kazandırmıştır. Günümüzde kaliteyi, mühendislik olanaklarından çok tüketici gereksinimleri belirlemektedir.

2.1.1. Dünyada kalite kavramının gelişimi

Kalite kavramı aslında yeni bir kavram değildir. Kalite 1980'lerde Amerikalı otomobil üreticilerinin Japon arabalarının daha fazla sattığını anladıklarında başlamadı. 1942'de Amerika'nın 2. Dünya Savaşında, ordunun ihtiyaçlarını eksiksiz ve zamanında karşılamak çabasıyla da oluşmadı. Endüstriyel devrimin başlangıcında dahi çıkmadı. Gerçekte kalite, çok eski zamanlardan beri var olan bir olgudur.

Joseph M. Juran'ın "Kalite Yönetiminin Tarihi" adlı kitabı, M.Ö. 11-8. yüzyıllarda Eski Çin İmparatorluğundaki Zhou ve Qui Hanedanları zanaatkarlarının kaliteli üretim tekniklerini, İskandinav (Vikingler) gemi yapımcılarının kalite geliştirme tekniklerini, (M.Ö. 1000'li yıllardan M.S. 500'lü yıllara kadar) kalite kavramının, insanlığın daha iyiye ulaşma çabasının başladığı zamanlara kadar gittiğini açıklamaktadır. Eski Çin'de, yüksek dizayn, mimari, işçi eğitimi, maliyet kontrolü, denetim, ve bunun gibi tekniklerin kullanımının kalite kontrol adına tarihi bir başlangıç olduğu söylenebilir. Yine Eski Çin'de Tan Hanedanı zamanında tekstil ticareti için, Tekstil Bürosu adı altında, tam 25 adet çalışma grubu oluşturulmuştur. Eski Yunanların da tapınaklarını yaparken çok sıkı kalite kontrol tekniklerini uyguladıkları ve Hintlilerin M.Ö. 4.yüzyılda altın işleme için standartlar oluşturmalarının ve Romalıların M.Ö. 300 ve M.S. 300 yılları arasında, neredeyse dokundukları her şeyi standartlaştırmalarının da kaliteyle ilgisi olmadığını kimse savunamaz. M.S. 300'lerde Venedik limanında bir savaş gemisinin tamamen silahlarla donatılmasının standart olarak 30 dakikada gerçekleşmesini sağlamak da sistematik bir yaklaşımın sonucudur [2].

Kalite, her ne kadar insanlık tarihi boyunca insanlığın bir parçası olmuşsa da kavram olarak "kontrol" ile birlikte kullanılmaya başlanmıştır.

İlk zamanlar üretimde çalışan operatör tarafından hata ve hasar kontrolleri yapılmış ve "kalite" sağlanmaya çalışılmıştır. Zaman geçtikçe ve teknolojik gelişmeler yaşandıkça hatasız ve hasarsız üretim önem kazanmış, dolayısıyla ustabaşı "kalite kontrol" işlemini yapmaya başlamıştır.

İşletmeler, müşterilerine hatasız ürün verebilmek ve geleceğe yönelik olarak pazarlarını koruyup geliştirebilmek amacıyla hatalı ürünleri fabrika içinde tutmakla yükümlü olan "kalite kontrol" bölümleri oluşturmuşlardır.

Tarihin kalite kavramını şekillendirmesinde, özellikle endüstri devrimine kadar, sadece öznel yaklaşımların etkisi olmuştur. Endüstri devrimi ile beraber devam eden bu gelişimin ve kitle üretimin, kalitenin bundan sonraki gelişimine ve özellikle sistematik bir kalite kavramının oluşmasına katkıları büyüktür.

20. yüzyıl, önemli teknolojik gelişmelerin yaşandığı ve bunun yarattığı zenginlik ve refahın geniş toplum kesimlerine yayıldığı bir dönemi de başlatmıştır. Bu yüzyılın başında, endüstriyel sistemlere önemli yenilikler getirmiş olan Henry Ford, 1905 yılında Ford Motor şirketinde ilk kez montaj hattı uygulamasını başlatmış ve imalat ortamındaki karmaşık süreçleri niteliksiz işgücü tarafından yapılabilecek basit montaj operasyonlarına ayırmıştır. Ford'un modelinde kalite görevi montaj hattı sonunda mamullerin iyiler ve kötüler şeklinde ayırımını sağlayan muayene elemanlarına devredildiği bir "Muayene Şefliği" kadrosu oluşturulmuştur. Bu uygulamayla kaliteyi gözdardı etmenin yarattığı kalite kayıplarının önlenmesi amacıyla ürün kalitesinden üretim nezaretçilerinin sorumlu olması uygulamasına geçilmiştir. Nezaretçiler kalitesiz üretime neden olan işçilere yaptırım uygulayarak firma güvencesi sağlamaya çalışmışlardır [2].

Bu uygulamaya 1. Dünya Savaşı yıllarında son verildi. Özellikle savaş döneminde bozuk ürün yaşamsal bir önem taşımaktaydı. Patlamayan el bombası, dayanıksız zırh, sıkça bozulan araçlar ve personel kaybı giderek savaşın da kaybı anlamına gelmekteydi. Bu sakıncanın giderilmesi amacı ile nezaretçilerin kalite sorumluluğu devam etmekle birlikte, bir nihai kontrol uygulamasına geçildi. Bu uygulamada ürünler üretildikten sonra işletmeden çıkmadan önce son bir kontrolden geçirilmekte, hatalı bulunanların sevki kesinlikle durdurulmaktaydı.

Ancak tahmin edileceği gibi bu uygulama son derece pahalı bir yöntemdi. Reddedilen kusurlu ürünlerin oranı % 40-60 gibi yüksek oranlara erişerek maliyetlerde aşırı artışlara neden oluyordu. Bu dönemde pazarlamacılar “ucuz mal alacak kadar zengin değilim” sloganını kullanarak kalitesiz üretimin maliyetini tüketicilere ödetiyorlardı [2].

2.1.2. Kalite anlayışındaki son gelişmeler

1924 yılında Western Elektrik şirketinin Bell telefon laboratuvarlarında muayene mühendisliği bölümünü kurması günümüz kalite kontrolün temellerini oluşturmuştur. 1960’lı yıllardan itibaren istatistiksel tekniklerin özünde fazla değişiklik olmamakla birlikte kalite kontrole bakış açısı genişlemeye başlamıştır. Kalite anlayışındaki gelişmelere kısaca değinelim.

1924 yılında matematikçi Walter Shewhart seri üretim ortamında kalitenin ekonomik olarak kontrolünü sağlamak için İstatistiksel Kalite Kontrol uygulamaları üzerinde çalışmalar başlatmıştır. Böylelikle istatistiksel teknikler kullanılarak süreç kontrolü ile hatalar kaynağında önlenmeye, sorunlar yayılmadan durdurulmaya, birbirini besleyen bölümlerin birbirine hatalı ürün vermeleri önlenmeye çalışılmıştır.

İstatistiksel kalite kontrol girdi-süreç-çıkış kontrolünden meydana gelmektedir. Bunlardan süreç kontrolü için aşağıdaki istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır.

- Çeteleme diyagramı
- Frekans dağılımı
- Histogram
- Pareto diyagramı
- Serpilme diyagramı
- Neden-sonuç (kılçık) diyagramı
- Kontrol şemaları

Feigenbaum’un öncüsü olduğu Toplam Kalite Kontrolü anlayışı, kalite kontrolünün sadece üretimle ilgili birimleri değil tüm işletmeyi ilgilendiren bir fonksiyon oluşu esasına dayanmaktadır [3].

Feigenbaum, toplam kalite kontrolünü “tüketici isteklerini en ekonomik düzeyde karşılamak amacı ile işletme organizasyonu içindeki birimlerin kalitenin yaratılması, yaşatılması ve geliştirilmesi yolundaki çabalarını yaşatıp koordine eden sistem” olarak tanımlamaktadır [4].

Toplam Kalite Kontrolün yaygınlaşması ile birlikte sıfır kusur kavramı ortaya çıkmıştır. Burada, sıfır kusur gelişme ve ilerleme için ortaya konulan hedeftir ve ideal durumu yansıtır. Bir başka gelişme ise Kalite Çemberi kavramıdır. Kalite Çemberleri, çalışanların katılımı ile kalite kontrol teknikleri konusunda gerekli eğitimi vermek, kalite sorunlarını belirlemek ve çözmek üzere kurulan küçük ve etkin problem çözme gruplarıdır.

1970’li yıllarda makine operatörlerinden işletme yöneticilerine kadar bütün çalışanların kalite kontrol fonksiyonuna katılımlarının önemine işaret eden Ishikawa’nın firma çapında kalite kontrol, Feigenbaum’un da örgüt çapında kalite kontrol kavramı ile ifade ettiği yeni bir aşamaya girilmiştir. Ishikawa firma çapında kalite kontrolünü, kaliteli ürünü/hizmeti ekonomik olarak üreterek insanların hayat kalitesini geliştirirken elde edilen geliri de tüketiciler, çalışanlar ve üreticiler arasında bölüştüren bir sistem olarak tanımlamaktadır [5].

1980’li yıllarda ortaya çıkan Kalite Güvencesi, planlanan hedeflere uygun olarak üretimi kontrol ederek doğrulamanın yanı sıra, kalite işlevlerinin uygun olarak yerine getirileceğinin ve getirildiğinin belgelerle kanıtlanmasıdır.

Kalite Güvence Sistemi ise, Kalite Kontrol ve Kalite Güvence işlemlerinin yerine getirilebilmesi için gereken kalite yönetiminin idari ve teknik ilişkiler bütünüdür.

Kalite Kontrol ile Kalite Güvence kavramları arasında en önemli fark, birincisinin ürün üzerinde, ikincisinin ise üretim sistemi üzerinde odaklanmasıdır. Başka bir ifade ile fark, üründe kalite özellikleri ve sistemde kalite özelliklerinin sağlanması ile açıklanabilir [6].

Son yıllarda en sık duyduğumuz kavram olan Toplam Kalite Yönetimi ise bu kavramların hepsini içinde barındıran bir yapıya sahiptir. Toplam Kalite Yönetimi, kalitenin standartlara ve spesifikasyonlara uygunluk olarak yapılan geleneksel tanımının ötesinde bir anlam içerir. Buna göre kalite, kullanıcının yada müşterinin tatmin olma derecesi olup, bu da ürünün kullanıma uygunluğu ile

ilgilidir. Diğer bir deyişle, toplam kaliteye ulaşılp ulaşılmadığını müşteri belirler. Toplam kalite için toplam müşteri tatmini gerekir, bu da işletme organizasyonu içinde bölümler, birimler ve fonksiyonlar olarak tanımlanan içsel müşterilerle, işletme dışı alıcılar, müşteriler yada kullanıcılar olarak tanımlanan dışsal müşterilerin gereksinimlerinin tatminidir [6].

Bu yönetimde; kaliteyi oluşturan süreçlerin, tüm çalışanlar tarafından sürekli olarak geliştirilmesi bir felsefe olarak benimsenmekte ve yöntem olarak uygulanmaktadır. Sürekli süreç geliştirme olgusu Toplam Kalite Yönetiminin temel ilkesidir.

1980’li yılların ortalarında Motorola firması tarafından geliştirilen bir yöntem de “Altı Sigma Yöntemi”dir. Günümüzde iyileştirilebilecek her şey anlamına da gelen kalitenin, standartların ötesinde bir düşünce, bir çalışma metodolojisine dönüştürülmesi gerekmektedir. Kuruluşlar teknolojideki baş döndürücü gelişmeleri takip ederken bu teknolojilere sahip süreçlerde sürekli geliştirme ve iyileştirme anlayışı içerisinde yönetilmelidir.

Mükemmellik, değişimi benimseyerek sistemin yüksek performans düzeylerine geçmektir. Operasyonel mükemmelliğe ulaşmada süreç kalitesine odaklanmak gerekmektedir, bu amaçla süreçlerin ölçümü ve geliştirilmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu boyutta kurumlara rehberlik ederek yol gösterecek bir yönetim felsefesi olan Altı Sigma yaklaşımı kalite geliştirme metodlarında yeni isim olarak çok geniş bir alanda kurum stratejisi olarak kabul edilip kullanılmaktadır [5].

Altı Sigma yaklaşımı, kusur/hataların her milyon işlemde 3,4’e kadar indirilmesini diğer bir deyişle müşteri-kullanıcı beklentilerini/ihtiyaçlarını kusursuza yakın karşılamaya odaklanan bir yönetim felsefesidir.

Kalite alanında çalışma yapmış kişiler ve odaklandıkları felsefeler Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kalite alanında çalışma yapmış başlıca kişiler [2].

Guru	Tanım	Odak	Hakim fikir	Ülke
Deming	Müşteri odaklı	Süreç	Değişkenliği kontrol	Amerikalı
Juran	Müşteri odaklı	İnsanlar	Amaca/kullanıma uygunluk	Amerikalı
Feigenbaum	Müşteri odaklı	Süreç	Toplam kalite kontrol	Amerikalı
Ishikawa	Değer odaklı	İnsanlar	Müessese içi kalite kontrol ve kalite çemberleri	Japon
Taguchi	İkmal odaklı; topluma yarar	Süreç/ tasarım	Kalite kayıp fonksiyonu	Japon
Shingo	Değer odaklı	Süreç	Sıfır kalite kontrol	Japon
Crosby	İkmal odaklı	Performans	Uygunluk gereksinmesi/sıfır hata	Amerikalı
Peters	Müşteri odaklı	Performans	Kalite geliştirme süreci	Amerikalı
Moller	Değer odaklı	İnsanlar	Herkes için yönetim (12 altın kural)	Danimarkalı

Geçtiğimiz yüzyılda yaşanan endüstriyel gelişme sonucunda kalite alanında da yeni fikirler ortaya atılmıştır. Tablo 2.1’de görüldüğü gibi bu fikirler Toplam Kalite Yönetimi felsefesi altında ve genelde insan üzerine yoğunlaşmaktadır.

2.1.3. Kalite maliyetleri

Yapılan hataları düzeltmek ve yeniden doğru olarak yapmak için gereğinden fazla zaman ve para harcanmaktadır. Günümüz koşullarında ise, firmaların para ve zaman kaybetmeye tahammülleri yoktur.

Kalite maliyetleri; önleme maliyetleri, ölçme ve değerlendirme maliyetleri ve başarısızlık maliyetlerinin toplamı şeklinde ifade edilir [5]. Tablo 2.2’de kalite maliyet bileşenleri gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Kalite maliyet bileşenleri [1].

1. Önleme Maliyetleri	2. Ölçme ve Değerlendirme Maliyetleri
1.1. Pazarlama, müşteri kullanıcı algılaması 1.2. Ürün, servis, tasarım geliştirme Kalite iyileştirme faaliyetlerinin planlanması, ürün değerlendirme testlerinin tasarımı, servis değerlendirme testlerinin tasarımı 1.3. Satın alma Tedarikçilerin gözden geçirilmesi 1.4. İmalat sürecinin onaylanması Ölçme ve test ekipmanlarının tasarımı ve geliştirilmesi, operatör kalite eğitimleri 1.5. Kalite yönetimi Yönetici ücretleri, kalite iyileştirme çalışmaları	2.1. Satın alma Gelen malzemelerin muayene ve testleri, tedarikçi ürünlerinin değerlendirilmesi, malzeme kaynaklarının muayene ve kontrol programları 2.2. Operasyonlar (imalat veya hizmet) Operasyon muayene, test ve değerlendirmeleri, muayene ve testlerin ayarlanması, özel testler, süre kontrol ölçümleri, ölçüm ekipmanlarının alımı, bakım ve kalibrasyonu
3. İçsel Başarısızlık Maliyetleri	4. Dışsal Başarısızlık Maliyeti
3.1. Ürün veya hizmet tasarımındaki başarısızlıklar Tasarım düzeltme çalışmaları, tasarım değişiklikleri dolayısıyla oluşan yeniden işlemler ve fireler 3.2. Satın alma başarısızlıkları Satın alınmış malzemenin reddedilmesi veya değiştirilmesi, tedarikçi düzeltme faaliyetleri 3.3. Operasyon Başarısızlıkları Yeniden işleme ve hurdalar, yeniden muayene ve test işlemleri	4.1. Şikayetlerin incelenmesi ve müşteri/kullanıcı servisi 4.2. İade mallar 4.3. Garanti Yükümlülükleri 4.4. Sorumluluklar 4.5. Cezalar 4.6. Satış kayıpları

Yapılan araştırmalar neticesinde hataları önlemek için ayrılan bütçelerin, hatalı ürünleri düzeltmek için ayrılandan çok daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. Yapılan işlerin kaliteyi ön planda tutan bir sistem çerçevesinde yapılması tekrarları daha başından önleyeceğinden, hatalı üretim ve hizmet sonucu ortaya çıkacak yeniden yapma, hurdaya atma, müşteri şikayetleri gibi maliyetleri arttırıcı unsurlar kalite sistemi sayesinde en az düzeye indirilebilecektir [1].

Kalite maliyetlerinin belirlenip analiz edilmesiyle aşağıdaki yararlar sağlanabilir [3].

1. Kaliteye yönelik programların ve kontrol çalışmalarının etkinliğine ilişkin değerlendirmeler yapılması sağlanır.
2. Uygulanan program ve projelerde gerekli düzenlemeler yönlendirilir.
3. rnlerin gerçek maliyetlerinin belirlenmesi ve buna bağlı olarak fiyatlandırılması sağlanır.
4. Sorunların varlığı ve üzüm önceliklerinin belirlenmesi sağlanır.
5. Dış alımların daha sağlıklı yapılmasına katkıda bulunur.
6. Kaliteye yönelik çalışmaların işletme içinde düzenli bir biçimde dağılması sağlanır.
7. Muhasebe açısından, bütçelemenin daha duyarlı yapılmasına yardımcı olur.
8. Yöneticiler ile diğer personel arasında iyi ve anlaşılabilir bir iletişim kurulur.
9. ngrlen proje ve yatırımlara yönelik veriler oluşturulur.

Kalitenin arttırılması için çalışanlara ve işletmeye yatırım yapılması gerekmektedir. Bu tür yatırımların geri dönüş süresini hesaplamak g olduğundan dolayı firma sahipleri geçmişte, bunlara l yatırım gözüyle bakmaktaydılar. Fakat, düşük kaliteli üretim yapılmasından doğan kayıplar hesaplanmaya ve bu kayıpların toplam maliyetleri fark edilmeye başlandıkça, firma sahipleri ve yöneticiler kaliteli üretimin işletmeye diğer tasarruf tedbirlerinden daha fazla getirisi olduğunu anlayarak, kalite kavramına önem vermeye başladılar.

2.2. Deney Tasarımı

Deney genel anlamda bir veya daha fazla sayıda belirli bir konuda sınırlandırılmış soruları yanıtlamayı hedefleyen işlem şekli olarak tanımlanır.

Deney tasarımı, belirlenmiş bir tasarım matrisine göre süreç üzerinde etkili olması muhtemel süreç değişkenleri değerlerinin sistematik olarak değiştirilerek, bir deney veya bir takım sıralı deneylerin gerçekleştirilmesi yöntemidir [5].

Deney tasarımı 1920'lerde Sir Ronald Fisher tarafından tarım alanında araştırmalar yaparken bulunmuş ve geliştirilmiştir. Kısa sürede Amerika tarımında üretimin geliştirilmesi için yoğun biçimde kullanılmış ve Amerika'nın bu alanda dünyada lider duruma gelmesinde büyük katkısı olmuştur. Sonraları kimya ve ilaç endüstrisinde de kullanılmış olmasına rağmen, imalat sektöründe uygulamaları oldukça yenidir. Amerika'da imalat sektörünün bu yöntemi yeniden keşfetmesi 1980'den sonra Japon kalite kontrol uygulamalarının incelenmesinden sonra başlamıştır. Deney tasarımı Japonya'da Dr. Genichi Taguchi liderliğinde, imalat sektöründe kalitenin geliştirilmesi için çok etkin bir biçimde uygulanmıştır. Deney tasarımına yöntem açısından önemli bir yenilik getirmemesine rağmen; Taguchi, endüstri uygulamalarına yönelik yeni fikirler ortaya atarak ve başarılı uygulamalar sergileyerek deney tasarımı yönteminin imalat sektöründe kabul görmesinde büyük katkıda bulunmuştur [7].

Deney tasarımında amaç, herhangi bir konu üzerinde düşünülen problem ile ilgili en fazla sayıda bilgiyi mümkün olduğunca zaman, para ve deney malzemelerini en ekonomik şekilde kullanarak sağlamak ve kalite karakteristiğini etkileyen en önemli değişkenleri bulmaktır. Belirlenen hedeften olabilecek sapma, kalite kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle ürün; ürün ve süreç tasarımı sırasında en uygun şekilde tasarlanmalıdır. Bu iki aşamanın en önemli adımı şüphesiz parametre tasarımıdır. Parametre tasarımı aşamasında, kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktörlerin ürünün performansına olan etkilerini belirlemek için kullanılan en etkin yöntem istatistiksel deney tasarımı yöntemidir. Burada amaç, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerini, kontrol edilemeyen faktörlerin ürün üzerine olan etkilerini en aza indirecek şekilde süreci ayarlamaktır. Bu çeşit ürün yada süreç tasarımı ile, sağlam (robust) ürün elde edilir. Deney tasarımı, çevrim dışı kalite kontrolün en etkin aracıdır [8].

Deney tasarımı ile değişik koşullar altında elde edilen sonuçlar aşağıdakilere ulaşabilmek amacı ile değerlendirilir:

- Test edilen değişkenlerin içinde etkili olanların tanımlanması

- Belli bir aralıkta değişkenlerin çeşitli düzeylerinin etkilerinin ölçülmesi
- Sürecin mevcut durumda işleyişinin daha iyi anlaşılması
- Bir takım etkenlerin ve etkileşimlerin karşılaştırılması

Deney tasarımı yönteminin ürün ve süreç geliştirme çevriminin başlangıcında uygulanması aşağıdakiler gibi birçok fayda sağlar [9]:

- İyileştirilmiş süreç çıktıları
- Nominal veya hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılması
- Toplam geliştirme süresinin düşürülmesi
- Toplam maliyetin azaltılması

2.2.1. Tek faktörlü deneyler

Her bir faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisinin incelendiği deney türüdür. Seçilen faktörün performansa etkisinin olmadığı belirlenirse, başka bir faktör seçilerek denemelere devam edilir. Yapılan bu deneylerde ürün/süreç performansını etkileyebilecek birden fazla faktör olabilirse de, seçilen faktör dışında kalanların etkilerinin olmadığı kabul edilir [5].

Bu deney stratejisinde, herhangi iki yada daha fazla faktörün arasında olabilen etkileşimi ortaya çıkarmak mümkün değildir. Ayrıca, her bir faktörün ürün/süreç performansına olan etkisi araştırıldığından deney sayısı artacak ve dolayısıyla maliyetlerde bir yükselme söz konusu olacaktır.

2.2.2. Tam faktöriyel deneyler (TFD)

Tam faktöriyel deneyler, her bir faktörün her düzeyi için eşit sayıda gözlem değeri kullanılarak, faktörlerin diğer faktörlerden bağımsızca ürün performansına olan etkilerinin belirlendiği deney türüdür.

Bu deney stratejisi, bütün deney stratejilerini temsil etmektedir. Tek faktörlü deney yaklaşımından daha etkilidir. Tam faktöriyel deneyler faktörlerin birleştirilmiş etkilerinin araştırılmasını sağlar, kritik faktörleri tanımlar, çıktı üzerinde girdi ve değişkenlerin etkilerini belirlemede kullanılır [5].

Tam faktöriyel deneyler, ürün performansına etki eden faktör sayısının sınırlı (1-5 faktör) olduğu durumlarda kullanılan bir deney stratejisidir. Ürün performansına etki eden faktör sayısının çok olması (5'den çok faktör) durumunda ana faktörlerin yanı sıra sadece bazı faktörler arasındaki etkileşimleri dikkate alan deney stratejisi olan kesirli faktöriyel tasarım (fractional factorial design) kullanılmaktadır.

Tam faktöriyel deneylerde, faktörlerin tek başına ve birlikte ürün performansına olan etkilerini belirlemek için gerekli deney (kombinasyon) sayısı,

a: Faktörün düzey sayısı

ve

k : İlgilenilen faktör sayısı

olmak üzere,

a^k , a = 2,3,4 şeklinde belirlenir.

Ürün/süreç performansına etki eden faktörlere ilişkin düzey sayısının çok olması yapılacak deneyi maliyetli, zaman alıcı ve karmaşık hale getirmektedir. Her ne kadar bütün düzeylerin dikkate alınması gerekiyorsa da, faktörlere ilişkin düzey sayılarının belirlenmesinde birkaç yaklaşım söz konusu olmaktadır.

Birinci yaklaşıma göre, ürün/süreç hakkında sahip olunan bilgi ve/veya tecrübeye bağlı olarak performansa etkisi muhtemel düzeyler seçilerek deneyler yapılır. Endüstri uygulamalarında oldukça yoğun bir şekilde kullanılan böylesi bir tasarımda, seçilen düzeylerden kaynaklanan sabit etkiler (fixed effects) söz konusudur ve elde edilecek sonuçlar seçilen düzeyler için geçerlidir [8].

Bir başka yaklaşıma göre, faktörler için geçerli olan düzeyler, düzeylerin oluşturduğu bir örnek uzayından rassal olarak seçilir ve deneyler yapılır. Rassal etkilerin (random effects) söz konusu olduğu bu tasarımda rassal olarak seçilen düzeyler temelinde elde edilen sonuçların diğer düzeyler için de genelleştirilebileceği beklenmektedir. Sabit ve rassal etkilerin birlikte (mixed effects) göz önüne alındığı yaklaşım da söz konusu olmaktadır.

2.2.3. Kesirli faktöriyel deneyler

Gerek zaman ve gerekse malzeme, iş gücünden kaynaklanan yüksek maliyet nedeniyle tam faktöriyel deney yapmak ekonomik ve etkin olmayabilir. Bu durumda, faktörlerin ürün performansına olan etkilerini belirlemek amacıyla daha az deneyin yapıldığı deney stratejileri kullanılır. Bu tür deneylere Kesirli Faktöriyel Deneyler, (Factional Factorial Experiments) denir. Kesirli faktöriyel deneylerde (KFD) amaç işlem sayısını azaltmaktır. Faktörlerin sayısında değil, etkileşimlerde azaltma yapılmaktadır. Bu da incelenen faktörlerden ödün vermeden incelenen etkileşimlerin sayısı azaltılarak sağlanabilir [8].

Kesirli faktöriyel deney tasarımı mantığında yer alan etkileşim azaltma kavramından etkileşimleri göz ardı etmek anlaşılmalıdır. Zaten etkileşimlerin gözardı edilmesi demek, tek faktörlü deneylere geri dönmek anlamındadır. Kesirli faktöriyel deney tasarımında amaç, deneye katılması durumunda işlem miktarını çok sayıda arttıran, fakat gerçekte deney sonuçlarına katkısının çok az çıkacağı tespit edilen yüksek serbestlik derecesine sahip etkileşimleri deney düzenine yerleştirmemektir.

Kesirli faktöriyel deneylerde gerekli deney sayısı,

- a. Faktör düzey sayısı,
- k. İlgilenilen faktör sayısı olmak üzere,
 a^{k-p} , $a=2,3,4,.....$ şeklinde belirlenir.

Kesirli faktöriyel deneyler, $p=1$ için $1/2$ KFD, $p=2$ için $1/4$ KFD, $p=3$ için $1/8$ KFD olarak adlandırılır.

Kesirli faktöriyel deney tasarımında yapılması gerekli deney sayısının azaltılması, tam faktöriyel deney tasarımında söz konusu olan deneylerin bir kısmının yapılmaması anlamındadır. Bu ise bazı faktörler arasındaki etkileşimlerin belirlenememesine neden olmakta ve çalışmanın hassasiyetini düşürmektedir.

3. TAGUCHI YÖNTEMİ

Taguchi yöntemi, bu yöntemi geliştiren Dr. Genichi Taguchi'nin adını almıştır. Kalite teknolojisi ve bilimindeki gelişme sürecinin önemli kilometre taşlarından biri olan Taguchi Yöntemi, kalite tanımına değişik bir bakış açısı getirmiştir. Toplam Kalite Kontrolün uygulanmasını desteklemek amacıyla geliştirilmiş olan Taguchi metotları spesifik bir amaca ulaşmak için en iyi kalite karakteristiği değerlerini elde etmede deneysel tasarım tekniklerinin kullanıldığı bir yaklaşımdır. Kalite mühendisliği olarak da anılan bu yaklaşım, tasarım kalitesi ve kalite-maliyet konularını analiz etmektedir. Taguchi metotları deneysel tasarımın yalnız istatistiksel bir uygulaması olmayıp aynı zamanda istatistiksel deney tasarımını güçlü bir mühendislik aracına çevirmiştir [10].

Taguchi kalite ile ilgili çalışmalarına 1940'lı yıllarda başlamış ve çok önemli istatistiksel kavramlar ortaya atmıştır. Kalite alanında yapmış olduğu çalışmalar ile uluslararası bir danışman olarak benimsenmiştir. 2. Dünya savaşından sonra Japon telefon sisteminin uzun süreli kullanımına yapmış olduğu katkı belki en önemli çalışmalarından biridir. Projenin amacı A.B.D.'de Bell Laboratuvarlarında kullanılan telefon sisteminin aynısının Japonya'ya kurulmasıydı. Ancak Japon Nippon Telefon ve Telgraf Araştırma Merkezi, Bell Laboratuvarlarının ancak % 2'si kadardı. Bu nedenle projenin bitirilmesinin 20 yıl süreceği tahmin ediliyordu. Taguchi, proje süresini kısaltmak amacıyla, tüm araştırma personeli için metotların standardize edilmesini ve faktöriyel tasarımların kullanılmasını önerdi. Japon Nippon Telefon ve Telgraf Araştırma Merkezi tarafından kabul edilen öneri sayesinde proje 4 yılda bitirilmiş ve Taguchi böylece tanınmıştır [10].

1980'li yıllardan itibaren Taguchi'nin kalite ve kalite geliştirmeye ilişkin görüşleri Batı Endüstrisinde büyük ilgi çekmektedir. Bazen Taguchi'yi Japonya'nın kalite alanındaki başarılarının arkasındaki kişilerden biri olarak da görmektedirler. 1984 yılında da Ford Otomotiv Şirketi Taguchi metotlarının tartışıldığı bir dizi seminer ve konferans düzenlemiştir. Bu tarihten itibaren Taguchi metotlarına olan ilgi ve tartışmalar artmış ve bu konuyla ilgili birçok yeni fikirler makalelerle dergilerde yayınlanmıştır.

Geliştirdiği istatistiğe dayalı deneysel tasarım yöntemiyle Taguchi kalite kontrol alanında yeni bir yapı oluşturmuştur. Sonuçların araştırmacılar tarafından kolayca uygulanması için standart bir düzenleme geliştirmiştir. Önerilen parametre düzeni bir kalite geliştirme tekniğidir. Bu teknik üründeki değişimi azaltmak için etkili bir yaklaşım olarak tasarlanmıştır.

3.1. Taguchi Felsefesi

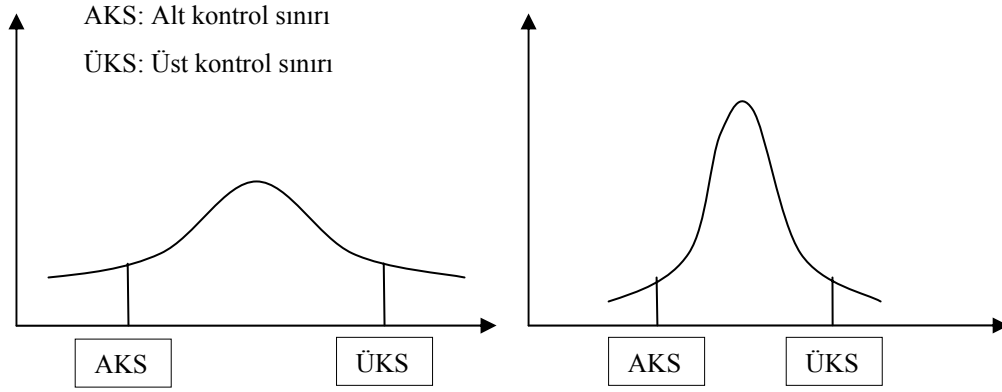
Taguchi'ye göre ürün kalitesi yada kalitesizliği ürünün müşteriye teslim edilmesinden sonra oluşan toplumsal kayıptır. Taguchi felsefesi ürün kaybını önlemeye yönelik çalışmalar doğrultusunda geliştirilmektedir. Ürün, üretim sürecinde karşılaşılabilecek kontrol edilemeyen çevresel etkenlerden etkilenmeyecek kadar sağlam olmalıdır.

Taguchi kalite kontrolü; üretim içi (on line) kalite kontrolü ve üretim dışı (off line) kalite kontrolü olarak ikiye ayırmıştır. Üretim dışı kalite kontrol, pazar araştırması ile ürün ve üretim sürecinin geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler ürüne doğrudan müdahaleler yerine, üretimin başlamasından önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarıdır. Üretim içi kalite kontrol ise ürünün imalatı sırasındaki ve imalat sonrası kalite faaliyetlerini kapsar. İstatistiksel süreç kontrolü ve çeşitli muayeneler, üretim içi kalite kontrol faaliyetlerindedir [7].

Kalitenin imalat aşamasından çok tasarım aşamasından sağlanabileceği gerçeğinin Taguchi tarafından ortaya atılması ile kalite anlayışında 1970'li yıllardan günümüze kadar bu alanda değişimler çok hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Kalite geliştirme faaliyetleri, bir ürünün yada sürecin tasarım aşamasında başlayıp üretim aşamasında devam eder. Taguchi, kalite kontrolün etkili olabilmesi için ürün kalitesinin izlenmesi ve değerlendirilmesinden çok, üretim dışı kalite kontrol metotları olarak adlandırılan ürün ve süreç tasarımı çalışmalarına ağırlık verilmesi gerektiğini belirtmiştir. Ona göre düşük kalite muayene, tarama veya ayıklama ile iyileştirilemez. Hiç bir muayene tekniği aracılığıyla üretilmiş bir ürünün kalitesi yeniden oluşturulup geliştirilemez, aksine gerçekleştirilen muayeneyle işletme için istenmeyen yeni durumlar oluşur.

Taguchi'ye göre kalite kavramları, önleme felsefesi üzerinde kurulmalı ve onun çevresinde geliştirilmelidir.

Taguchi'nin ikinci kavramı, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi kalite karakteristiklerinin hedeflenen değer etrafındaki değişkenlikleridir. Buna göre kalite kavramı belirli spesifikasyonlara uygunluktan çok, direkt olarak tasarım parametrelerinin hedef değerden sapması ile ilgilidir. Belirli spesifikasyonlar dahilinde ama kontrol sınırlarına çok yakın olan bir ürünün kullanımda müşteri istek ve beklentilerini karşılama derecesi belirli bir hedef değer etrafında küçük bir sapma ile üretimi gerçekleştirilen ürüne göre daha az olacaktır. Bununla birlikte kritik özellikler için bir hedef değer belirlenerek ve küçük sapmalarla bu hedef değeri karşılayan üretim süreci geliştirilerek ürünün kullanım ömrü iyileştirilebilecektir.



Şekil 3.1. Kalite karakteristiklerinin hedef değerden sapması

Üçüncü kavram, verilen bir tasarım parametresine dayanarak, ürünün yaşam döngüsündeki bütün kalite maliyetlerinin ölçülebileceğini ifade etmektedir. Bu kavrama göre, ürünün tüm kullanım süresi boyunca karşılaşılan yedek parça, tekrar işleme, muayene, geri dönüşler, garanti servisi harcamaları ve ürünün değiştirilmesinden kaynaklanan maliyetler verilen tasarım parametresinde oluşacak sapmalarla ilgilidir. Tasarım parametresinde oluşan sapmalardan doğan bu maliyetler hangi önemli etkilerin kontrol edilmesi gerektiğinin belirlenmesinde yardımcı olacaktır.

Taguchi'nin görüşüne göre kalite geliştirme süreklilik arz eden ve bunun için devamlı hedef değer çevresindeki değişkenliğin azaltılması gereken bir çalışmadır. Üzerinde çalışılan ürün, hedef değerden farklı ortalama değere sahip bir dağılım gösterebilir. Kalite geliştirmede birinci adım, olabildiğince ortalaması hedef değere yakın ana kütle dağılımı elde etmektir. Tablo 3.1'de Taguchi felsefesi özetlenmektedir.

Tablo 3.1. Taguchi Kalite Felsefesinin 7 Noktada Özetlenmesi [8]

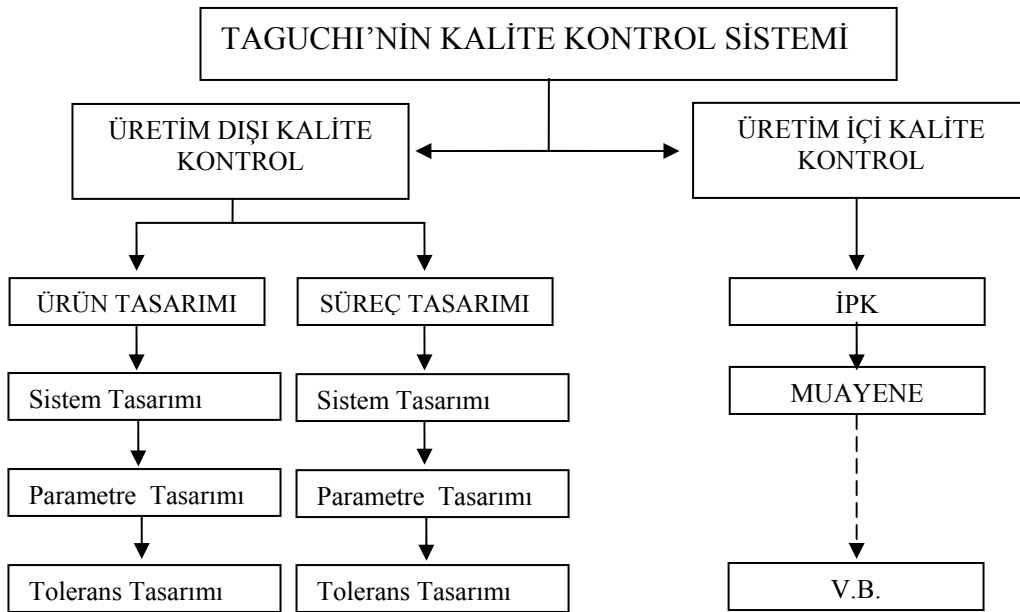
Yedi Noktada Taguchi'nin Kalite Felsefesi
1-Kalite eksikliği, ürünün son kullanıcıya teslim edilmesinden sonra oluşan toplam toplumsal kayıptır.
2-Bir işletmenin pazarda kalabilmesi için sürekli olarak kaliteyi geliştirip maliyeti azaltması gerekmektedir.
3-Kalite geliştirme programı sürekli olarak ürün performans karakteristiklerinin hedef değerlerinden olan sapmalarını azaltmayı amaçlamalıdır.
4-Ürün performansındaki değişimlere bağlı olarak oluşan müşteri kayıpları hedef değerden sapmaların karelerinin artışı ile orantılıdır.
5-Ürün kalitesi, büyük ölçüde ürün tasarımı ve üretim sürecince belirlenebilmektedir.
6-Sıklıkla tasarım parametreleri ile ürün karakteristikleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki söz konusudur.
7-Ürün karakteristiklerindeki değişimi azaltan parametre kombinasyonları tanımlamak amacıyla deneysel tasarım yaklaşımı kullanılabilir.

Kalite ile ilgilenen bir çok insan kalite problemlerinin ürün geliştirme aşamasında önlenmesi gerektiğini söylemiştir. Ama bu kişilerden çok azı kalite problemlerinin ürün geliştirme aşamasında nasıl önleneceğine ilişkin iyi düşünülmüş, güvenilir ve ürün tasarımı sırasında tekrar ürünü ve süreci gözden

geçirecek aktiviteleri içeren bir plan önermiştir. Taguchi yönteminde, kalitenin üretim sürecinin başlangıç aşamalarında sonuçlandırılmasına ilişkin tekniklerin ne şekilde uygulanacağını göstermesi Taguchi felsefesinin bu kadar fazla ilgi çekmesinin ana sebebidir [8].

3.2. Taguchi Kalite Kontrol Sistemi

Taguchi yaklaşımı sadece hedef değerlere ulaşmak için yapılan deneylerle ilgili değildir. Gerçekte Taguchi yöntemi kalite ile geniş anlamda ilgili olduğu gibi istatistik teknik ve araçları ile de ilgilidir. Kalite Mühendisliği olarak da anılan Taguchi felsefesinin kalite kontrolü üretim içi ve üretim dışı olmak üzere iki ana bölüme ayırdığını önceki bölümde belirtmiştik. Şekil 3.2’de bu şema üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Taguchi'nin Kalite Kontrol Sistemi [11]

Üretimde önceleri, sanayi toplumuna geçişin ilk zamanları olmasından dolayı sanayi ürünlerine büyük bir talep vardı. Dolayısıyla üretilen ürün kaliteli olup olmamasına bakılmaksızın pazarda müşteri bulabiliyordu. Böylece kalite

daima ikinci planda kalıyordu ayrıca çevrim dışı kalite kontrol teknikleri gelişmediğinden, kalite kontrol sadece üretim içi yöntemlerle sınırlı kalıyordu.

Günümüzde ise teknolojiye paralel olarak insan ihtiyaçları da gelişmiştir. İnsanlar artık aldıkları bir ürün yada hizmetin kaliteli olmasını, kendilerine maksimum faydayı sağlarken en az sorunla karşılaşmak istemektedirler. Bu da insan ihtiyaçlarının doğru tespit edilip ürünün ilk seferde hatasız üretilmesini sağlamakla gerçekleştirilebilir. Bu nedenle günümüzde kalite kontrol tekniklerinde ağırlık üretim dışı yöntemlere özellikle de kaliteye büyük katkısı olan istatistiksel deney düzenine kaymıştır.

Deney tasarımı, Taguchi'nin kalite sisteminde, üretim dışı kalite kontrol sistemi içinde ürün ve süreç tasarımı aşamalarında kullanılmaktadır [7].

3.2.1. Çevrim içi kalite kontrol

Çevrim içi kalite kontrol faaliyetleriyle üretim direkt olarak izlenmekte, kalitenin nereye gittiği ölçülmekte ve potansiyel problemlerin belirtileri tespit edilmektedir.

Üretim boyunca değişkenliğe sebep olan ve böylelikle ürün kalitesini etkileyen kaynakları genel olarak şu şekilde tanımlayabiliriz.

- Malzemeden (ham ve yardımcı malzeme) ve satın alınan ekipmandan kaynaklanan değişkenlikler,
- İş akışından, kullanılan teçhizat, makine arızalarından v.b. kaynaklananlar,
- Yöneticilerden ve personelden kaynaklananlar,
- Üretim sürecinden kaynaklanan değişkenlikler.

Çevrim içi kalite kontrolde, tüm bu değişkenlikleri azaltmak ve üretim karakteristiklerini hedef değerinde veya yakın bir aralıkta tutmak için üç ayrı yöntem kullanılmaktadır [12].

1. Sürecin Belirlenmesi ve Ayarlanması: Bu aynı zamanda süreç kontrolü olarak da bilinmektedir. Bu yöntemde, süreç için bir tolerans aralığı belirlenir. Sonuçlar bu tolerans aralığı içinde olduğu müddetçe üretim normal seyrinde devam ediyor şeklinde kabul edilir. Sonuçlar bu aralığın dışına çıktığıdaysa düzeltici tedbirler alınır. Bu yöntem için kontrol grafikleri kullanılmaktadır.

2. Tahmin ve Düzeltme: Bu yöntemde sayısal karakteristiklerin düzenli aralıklarla ölçü kontrolünden geçirilmesi ve bu karakteristiklerin ortalama değerinin hesaplanması şeklinde olur. Eğer hesaplanan değer hedef değerle uyumlu ise üretim normal seyrinde devam ediyor şeklinde değerlendirilir. Hesaplanan değer hedefle paralellik göstermiyorsa, düzeltme faktörleri yardımıyla değişkenlik azaltılmaya çalışılır. Bu metot geri beslemeli kontrol yöntemi olarak da isimlendirilir. Bu metot çoğunlukla sistem tasarımı ile ilgilidir.

3. Ölçme ve Faaliyet: Bu yöntem aynı zamanda muayene olarak isimlendirilir. Üretilen her bir mamulün ölçüsü spesifikasyonların dışında ise yeniden üretilir veya düzeltilir. Bu metot sadece mamulle ilgili, 1. ve 2. metotlar ise süreçle ilgilidir.

3.2.2. Çevrim dışı kalite kontrol

Çevrim dışı kalite kontrol müşteri istek ve ihtiyaçlarının doğru olarak tanımlanmasıyla başlayan ve bu ihtiyaç ve isteklere göre ürün tasarımının yapılması, bu tasarımın ekonomik olarak üretimi ve bu üretime uygun olacak şekilde tanımlanmış spesifikasyon, standart ve prosedürlerin hazırlanmasına kadar uzanan geniş bir çalışma alanını kapsar. Kalite kontrol; müşteri ihtiyaç ve beklentilerini karşılayan, imal edilebilir yeni bir ürün geliştirerek veya varolan ürünün üzerinde değişiklikler gerçekleştirerek ürün tasarım safhasını gerçekleştirmektedir. Süreç ve ürün tasarımı aşamasında, belirlenen spesifikasyonlara uygun bir şekilde üretim sürecini geliştirmek amaç edinilmiştir [12].

Çevrim dışı kalite kontrol metotları; ürünlerin kullanım ömrü, üretim ve geliştirme maliyetlerini azaltarak, üretilebilirlik ve ürün kalitesini iyileştirmede kullanılır. Tablo 3.2’de bu gösterilmektedir.

Tablo 3.2. Kalite mühendisliği bileşenleri ve içerikleri [12]

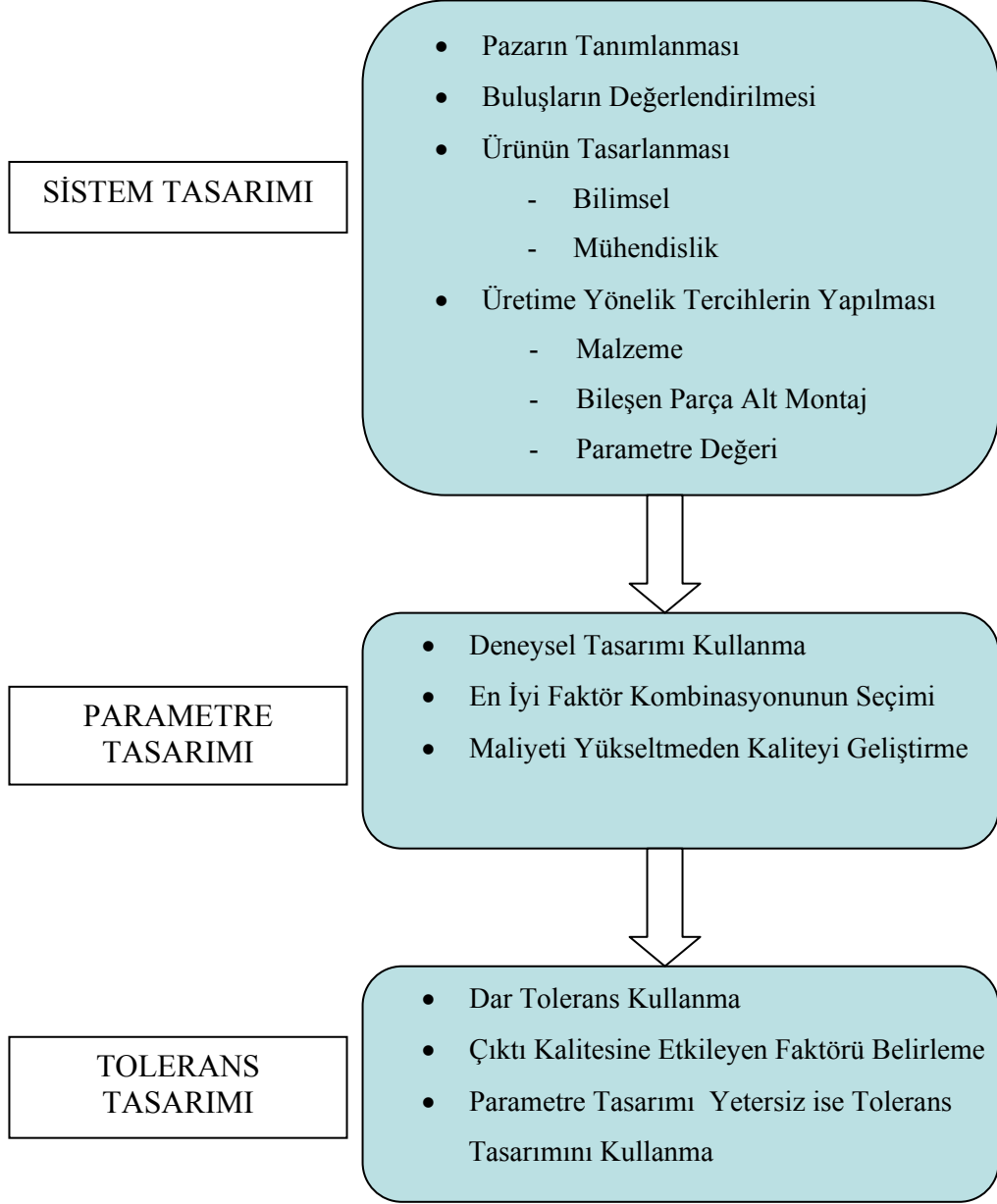
ÇEVİRİM DIŞI KALİTE KONTROL	<u>1.Aşama</u> Ürün Tasarımı	<u>Konular</u> 1. Müşteri ihtiyaç ve beklentilerinin belirlenmesi 2. Müşteri ihtiyaç ve beklentisini karşılayacak ve aynı zamanda sürekli ve ekonomik olarak imal edilebilecek ürünün tasarımı	<u>Kalite Aşamaları</u> 1. Sistem Tasarımı 2. Parametre Tasarımı 3. Tolerans Tasarımı
	<u>2.Aşama</u> Süreç Tasarımı	<u>Konu</u> İmalat için açık ve yeterli standart, spesifikasyon, yöntem, üretim araçlarının tasarımı	<u>Kalite Aşamaları</u> 1. Sistem Tasarımı 2. Parametre Tasarımı 3. Tolerans Tasarımı
ÇEVİRİM İÇİ KALİTE KONTROL	<u>1.Aşama</u> Üretim	<u>Konu</u> Ürünün, daha önce ürün tasarım ve süreç tasarım aşamalarında belirlenen standart ve spesifikasyonlara göre üretilmesi	<u>Kalite Aşamaları</u> 1. Süreç Teşhisi 2. Ayarlama 3. Muayene ve ıskartaya ayırma
	<u>2.Aşama</u> Müşteri İlişkileri	<u>Konu</u> Müşteriye servis hizmetinin verilmesi ve ürünün kullanımı sırasında çıkan problemlerle ilgili bilginin, ürün ve süreç tasarımının gelişmesi için kullanımı	<u>Kalite Aşamaları</u> 1. Tamir, değiştirme 2. Geri besleme bilgisi 3. Ürün, süreç spesifikasyon dizaynının değiştirilmesi

Çevrim dışı kalite kontrolde ürün tasarımı ve süreç tasarımı olmak üzere iki aşama bulunmaktadır. Ürün tasarımı aşamasında yeni bir ürün geliştirilir yada mevcut olan ürün üzerinde değişiklikler yapılır. Amaç müşteri tercihlerini isteklerini veya beklentilerini karşılayacak ürünün tasarlanmasıdır. Süreç tasarımı aşamasında ise, üretim ve süreç mühendisleri ürün tasarımı aşamasında geliştirilen özellikleri karşılayacak üretim süreçlerini geliştirmek amacıyla üretim akışını analiz ederek üretim sürecini uygun bir şekilde düzenlerler. Taguchi çevrim dışı kalite kontrolün her iki aşamasında da ürünün kalite güvenilirliğini sağlamaya yönelik 3 aşamalı bir yaklaşım getirmiştir [13].

- Sistem Tasarımı (fonksiyon belirleme)
- Parametre Tasarımı (hedef belirleme)
- Tolerans Tasarımı aşamalarıdır (tolerans belirleme)

Bu üç aşama da (Şekil 3.3) ürün kalitesini sağlamada önemli olmasına rağmen, Taguchi yaklaşımlarını ilk ortaya koyduğunda ürünün kalitesini iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapılabileceği aşamanın, hem ürün hem

de süreç tasarımı için parametre tasarımı aşaması olduğunu belirtmiş ve çalışmalarını bu alanda yoğunlaştırmıştır [8].



Şekil 3.3. Taguchi metodunun sistematığı

3.2.2.1. Sistem tasarımı

Sistem tasarımı aşaması Taguchi Metodunun ilk adımını oluşturmaktadır. Bu aşamada tasarımcı tarafından üründen beklenen fonksiyonların elde edilebilmesi için gerekli olan üretim teknolojileri tasarlanır ve ürün için en uygun olanı seçilir.

Fakat bu işlemler tam müşteri tatminini sağlayacak olan hedef değerden minimum sapma ile yapılmalıdır. Üretilmesi düşünülen ürünle ilgili olarak öncelikle mevcut pazarın tanımlanması, yeniliklerin değerlendirilmesi, bilimsel ve mühendislik bilgilerinin toplanması, malzeme ve ekipmanla ilgili gerekli tercihlerin yapılması bu aşamanın konusunu oluşturur. Ayrıca bu aşamada ürün ağacındaki parçaların, malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesinde gerekli olan karakteristiklere ilişkin bir takım kararlar verilir.

Herhangi bir ürün için sistem tasarımı süreç aşamasında da gerçekleştirilir. Süreç, ürünü etkileyebilecek faktörlere karşı minimum duyarlı hale getirilir. Amaç, ürünü en ideal kalitede ve mümkün olduğunca minimum maliyetle belirlenen tolerans limitleri dahilinde, üretebilecek bir üretim sistemini tasarlamaktır [12].

Sistem tasarımı yeni ürün ve süreç gelişiminin evrensel safhasıdır. Kavramlar önceki deneyimleri, bilimsel temelleri, mühendislik bilgileri, yeni gelişimleri ve bunların tümünün uygun kombinasyonlarını temel almaktadır. Sistem tasarımının arkasındaki strateji; yeni fikirler almak ve bunları çalışır hale getirmektir [11].

3.2.2.2. Parametre tasarımı

Taguchi Metodunun ikinci adımı olan parametre tasarımı hem ürün hem de süreç tasarımı için ürün kalitesini iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapıldığı aşamadır.

Ürün parametre tasarımı, ürün parametreleri, malzeme formülasyon değerleri, çeşitli boyutlar, yüzey örnekleri gibi kriterlerin optimal değerlerinin belirlenmesi anlamına gelmektedir.

Ürün parametre tasarımı ve süreç parametre tasarımında amaç, üründe ve süreçte, varyasyon (hedef değerden farklılık yani kalitesizlik) yaratan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin değerlerini optimal seçerek, ürün ve süreçteki varyasyonu en aza indirmektir. Taguchi bu amaçla gerçekleştirilen ürün ve süreç tasarımına sağlam (robust) tasarım demektedir. Burada belirtilen sağlam tasarım, kontrol edilemeyen nem, toz, ısı, gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımındaki farklı uygulamalara ve malzemedeki farklılıklara karşı duyarsız ürün ve süreç tasarımı anlamında kullanılmaktadır. Sağlam tasarımda, kalitesizlik yaratan ve kontrol edilemeyen bir faktörün etkisi, kontrol edilebilen başka faktörlerin ayarlanması sonucu azaltılmaktadır. Deney tasarımı bu amaçla kullanıldığı zaman, maliyeti arttırmadan kaliteyi geliştirmek mümkün olmaktadır [7].

Ürün ve süreç parametre tasarım aşamalarında, optimal değerlerinin belirlenmesi gereken birbiriyle ilişkili çok sayıda kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktör vardır. Bu faktörlerin, ürün ve ürünün performansına olan etkilerinin belirlenebilmesi için en etkin yöntem istatistiksel deney tasarımı yöntemidir. Deney tasarımı aracılığıyla bir çok faktörün ürün üzerindeki etkisini ekonomik olarak belirlemek ve varyasyon yaratan faktörlere karşı önlemleri tasarım aşamasında almak mümkün olmaktadır [7].

3.2.2.3. Tolerans tasarımı

Parametre tasarımında, tasarım parametreleri için gerekli olan hedef değerler ayarlanır. Üretim sırasında olabildiğince bu hedef değerlere ulaşılmaya çalışılır. Fakat üretim sürecinde her zaman bir değişim söz konusu olduğundan bir tolerans aralığı verilmesi gerekir. Tolerans tasarımı, parametre çalışmaları sonucu istenilen hedefe varılmadığı takdirde yapılacak süreç veya ürün parametreleri için en iyi toleransları belirleme çalışmalarını ifade etmektedir. Bu aşamada gözlenen değerlerden faydalanılarak ürünün hedef değerden sapma göstermesinin getirdiği kayıplar bulunur ve bu sapmalar azaltılır.

Sistem tasarımını tamamlayıp, sistemi oluşturan elemanların parametrelerinin optimal değerleri belirlendikten sonra oluşacak kalite kaybı

katlanılacak kalite maliyeti ile birlikte değerlendirilerek, her bir parametre (faktör) için tolerans elde edilir. Tolerans sınırları daraldıkça üretim maliyetleri artacağı için ürün de daha maliyetli olarak üretilir. Üretim maliyetlerindeki artışın nedeni üretim hattının daha sıkı kontrol edilmesi, daha dar toleransla çalışan teknolojik açıdan daha pahalı tezgahlara ihtiyaç duyulmasıdır. Aksi takdirde, tolerans sınırları genişledikçe, ürünün ilgilenilen fonksiyonunun hedef değerden sapmaları da büyüyecektir. Bunun sonucu olarak kalite kayıpları artacaktır. Tolerans tasarım adımında en ekonomik tolerans belirlenir. Belirlenen bu toleranslar ile hedef değerden kabul edilebilir sapmalara göre ürün maliyeti minimize edilmektedir.

Üretim sürecindeki değişimler olabildiğince azaltılsa bile amaç hala hedef değere ulaşmaktır. Ne yazık ki bazı durumlarda değişkenlik çok büyük olmakta ve değişkenliği düşürmek için toleransların küçültülmesi gerekmektedir. Tipik olarak her bir kontrol parametresinin yaklaşık olarak katkısını belirleyebilmek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmakta böylece tolerans daraltmada, gelişmiş malzeme kullanma durumunda veya diğer yüksek maliyetle kaliteyi geliştirmeye geçecek faktörler tanımlanmış olmaktadır. Üretici daha düşük malzeme özellikleri kullanarak bir üründen daha fazla kar elde etmek amacıyla ürün karakteristiklerinin tolerans limitlerinin uç noktalarına yaklaşılmasına izin vermemelidir. Tasarım parametreleri seçilirken toplam ürün maliyeti ile müşteri maliyetinin toplamı göz önüne alınmalıdır. Tolerans değerleri, ürün karakteristiklerinin hedef değerden olan sapmalarının oluşturduğu toplumsal kayıpla, ürün karakteristiklerinin tolerans dışına çıktığında üreticinin bunu düzeltmek amacıyla yaptığı harcamaları dengeleyecek bir biçimde seçilir. Toleransların uygun seçilmesi önemli bir ekonomik konu olması kadar önemli bir kalite konusudur [8].

Tolerans tasarımında üç tür kalite değişkeni vardır;

1. En büyük en iyi: Bu tip tolerans çalışmalarında kalite değişkeninin bir üst sınırı yoktur ve dolayısıyla hedef değer de yoktur. Ölçü büyüdükçe verimlilik de artacaktır.

2. En küçük en iyi: Bu tip toleranslar üretim sürecindeki hurda yüzdesi gibi amaç değerini sıfır olduğu toleranslardır. Tolerans azaldıkça sistemin verimliliği artacaktır.
3. Hedef değer en iyi: Sapmaların iki yönde de oluşabildiği tolerans tipidir.

Tolerans tasarımı kalite geliştirme sürecinin bir adımı olmasının yanında aynı zamanda bir kalite değerlendirme faaliyetidir. Bazı kaynaklar kaliteyi iki parça halinde ele alırlar. Bunlar;

- Kaliteyi nasıl geliştirelim ?
- Kaliteyi nasıl değerleyelim ?

Bu sorulardan ilki sistem ve parametre tasarımı ikincisi ise tolerans tasarımı ile yanıtlanabilmektedir. Taguchi felsefesinin tolerans tasarımı ile ilişkilendirdiği önemli bir kavramda kayıp fonksiyonudur [12].

3.3. Kayıp Fonksiyonu

Kalite maliyetini hesaplamadaki geleneksel yöntem, reddedilen ve yeniden işlenen parçaların sayısına dayanır. Şekil 3.4'de geleneksel kayıp fonksiyonu anlayışına göre alt ve üst sınırlar bir model parametresinin kabul edilebilir sınırlarını göstermektedirler. Belirlenmiş parametrelerin değerleri bu sınırlar arasında ise ürün normalde işlevsel olarak kabul edilir. Toplumsal bir kaybın meydana gelmesi beklenmez ve ürün tüketicilere ulaştırılır. Bununla birlikte, bu sınırların dışındaki bölgede işlevsel bozulma olacak ve ürün ya atılacak yada kurtarma işlemine tabi tutulacaktır. Geleneksel kalite kontrolün amacı ürünü bu sınırlar içerisinde tutarak üretim sürecini kontrol etmektir [10].

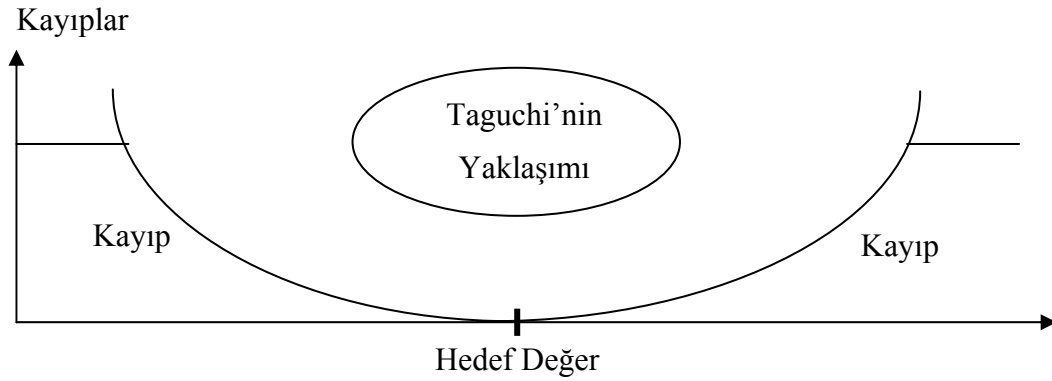


Şekil 3.4. Geleneksel kalite kontrol yaklaşımında kayıplar

Sadece tasarımcı ve imalatçıyı memnun eden ve Kale direği sendromu olarak tanımlanan bu yaklaşımda izin verilen toleranslarda imal edilen bir ürün yüksek kaliteye sahip olarak değerlendiriliyordu. Ürünün hedef değerden uzak olup olmadığına bakılmaksızın kalenin içine giren tüm ürünler hedef değerdeymiş gibi dikkate alınıyordu. Gerçekte ise, hedef değer çevresinde bulunan ürünler müşteri tatminini büyük ölçüde sağlarken alt ve üst kontrol sınırlarına yakın olarak üretilmiş olan ürünler müşteri istek ve ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalıyorlardı.

Geleneksel yaklaşımda müşterinin ihtiyaçları göz ardı edilmektedir. Üretilen bir ürün belirlenen spesifikasyonları karşılamakta ama spesifikasyonlar müşteri ihtiyaçlarını karşılayamamakta ise ürünün gerçekten kaliteli olduğu söylenemez. Müşteriler her zaman ürünün hedef değere yakın olmasını, üretici ise spesifikasyon limitleri içerisinde ürünün çeşitli değerler almasını tercih edecektir.

Taguchi'ye göre ise Şekil 3.4'de belirtildiği gibi alt ve üst tolerans limitleri belirlenemez. Geleneksel yaklaşımda kayıp ya tamdır yada sıfırdır. Taguchi'ye göre ise, model parametreleri en iyi değerden sapma gösterdikçe ürünün kalitesi bozulmaya başlayacaktır. Bu nedenle kaybın hedeften oluşan sapma ile ölçülmesi gerektiğini savunmaktadır. Eğer hedef değerden oluşan sapma sıfır ise kalite kaybının meydana gelmesi beklenmez. Hedef değerden sapma olduğu takdirde eğrinin altında kalan alan ise kaybı göstermektedir. Taguchi kayıp fonksiyonu Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Bu yöntemde kalite kontrol felsefesinin en önemli yönü, hedef değer etrafındaki sapmaları en aza indirmektir [10].



Şekil 3.5. Taguchi yaklaşımında kayıplar

Taguchi yaklaşımında ürünün müşteriye aktarılmasından sonra bazı kayıplar kaçınılmaz olmaktadır, bundan dolayı daha düşük kayıplar daha arzu edilir ürün anlamına gelmektedir. Alternatif ürün tasarımı ve üretim süreçlerini karşılaştırabilmek amacıyla bu kayıpların miktarının belirlenmesi önemli olmaktadır. Kayıpların miktarının hesaplanması ikinci dereceden bir kayıp fonksiyonu ile yapılmaktadır.

$$L(y) = k \cdot (y - m)^2 \quad (3.1)$$

Burada $L(y)$, kalite karakteristiği y , m de bu kalite karakteristiği için hedef değer olduğunda oluşan kalite kaybı olmaktadır, k değeri kalite kayıp katsayısıdır.

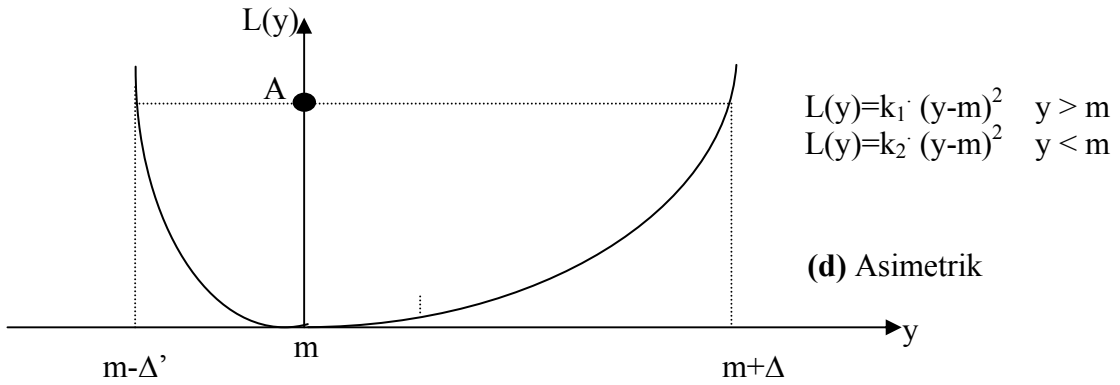
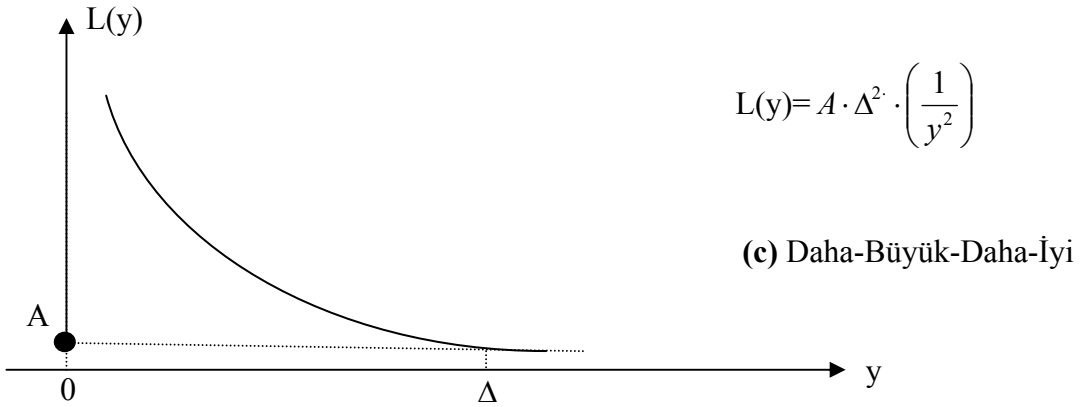
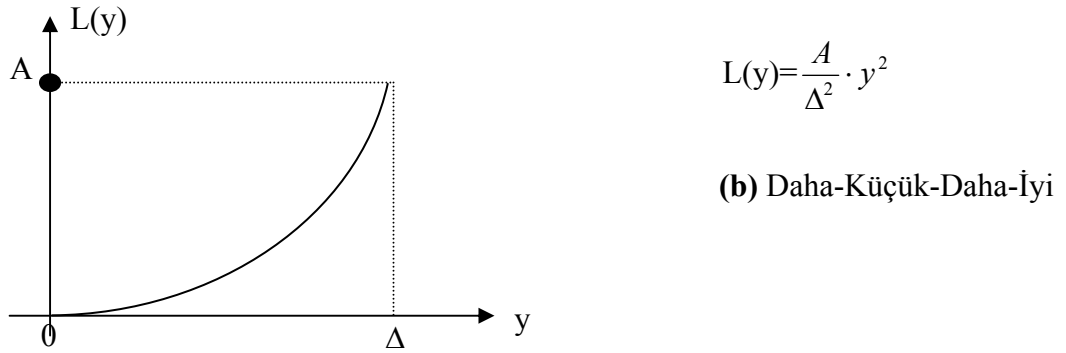
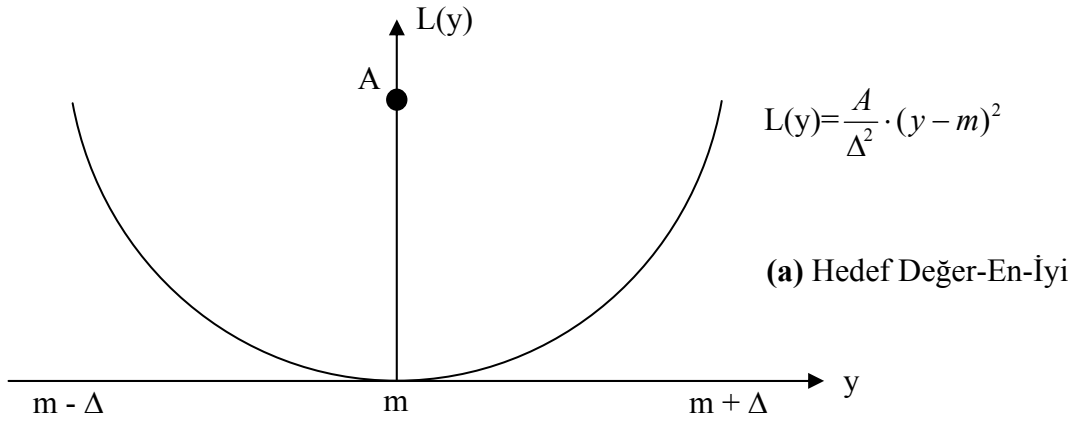
$y = m$ olduğunda formülden de görülebildiği gibi kayıp sıfır olmaktadır, bu durumda kayıp fonksiyonun eğimi de sıfır olmaktadır. y değeri m 'den uzaklaştığında ilk başlarda kayıp yavaş yavaş artmakta ama y değeri m 'den çok fazla uzaklaştığında diğer bir deyişle y ile m arasındaki sapma çok fazla arttığında kayıp miktarı daha fazla artmaktadır. Eğer $m + \Delta$ ile $m - \Delta$ de müşteri tolerans limitleri ise ve y değeri bu aralığın dışında ise ürün performansı memnuniyet verici olmamakta, ve eğer müşteriye bu ürünün tamiri veya değiştirilmesinin maliyeti A TL ise , o zaman [8];

$$k = A / \Delta^2 \quad (3.2)$$

ve

$$L(y) = \frac{A}{\Delta^2} \cdot (y - m)^2 \text{ dir.} \quad (3.3)$$

3.3 formülünde tanımlanan ve Şekil 3.6.(a)'da gösterilen kayıp fonksiyonuna Hedef Değer-En-İyisidir denilmektedir. Diğer durumlar ise bu formüle yapılacak küçük uyarlamalarla elde edilir. Daha-Küçük-Daha-İyi fonksiyonu ideal değer (m) sıfıra eşit olduğu durumları tanımlamakta ve. Şekil 3.6.(b)'de gösterilmektedir. Daha-Büyük-Daha-İyi fonksiyonu ise Şekil 3.6.(c)'de görüldüğü gibi $y=0$ 'ın en kötü olduğu durumdur. Son olarak da Şekil 3.6.(d)'de görüldüğü gibi asimetrik kayıp fonksiyonu vardır. Bu fonksiyonda ise hedef değer her iki yanında farklı k değerleri vardır.



Şekil 3.6. Amaç fonksiyona göre Taguchi kayıp fonksiyonları

Taguchi kayıp fonksiyonunu aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz:

- Bir ürünün kalite özellikleri hedefte olduğu zaman kayıp sıfır olmaktadır.
- Kalite kayıp fonksiyonu sürekli bir fonksiyondur ve hedef değerden sapmaları ölçmektedir.
- Kalite kaybı ürünün belirlenen başarımlarının özellikleriyle ilgilidir. Bu nedenle kaliteyi ürün içinde en iyi düzenleyerek kayıplar en aza indirilir.
- Müşteri memnuniyetsizliğinden oluşan kalite kayıpları sistemin genişliğine göre ölçülmelidir.
- Kalite kaybı maddi ve sosyal bir kayıptır.
- Kalite kaybının en aza indirilmesi rekabet edebilmenin ve bugünkü uluslararası iş ortamında ayakta kalmanın tek yoludur [10].

Kalite kayıp fonksiyonu iki kullanım amacına sahiptir. En önemli uygulaması; bir ürün yada süreç düzenini en iyilemekle meydana gelecek gelişmelerden sonra tahmini maliyet tasarruflarını hesaplamak, ikinci uygulaması ise, tolerans aralığının tüketici anlayışına dayandırılmasıyla ürünü kullanacak olan nihai üretici ve tüketici toleransını belirlemektir. Burada tüketici sürekli hedef değerde ürün isterken üretici ise sürekli tolerans sınırları içerisinde ürün üretmek istemektedir. Her iki grup da kendi açılarından olaya bakmaktadırlar. Halbuki kayıp fonksiyonu burada üretici ve tüketici için toplam toplumsal maliyeti değerlendirmekte, eğer hedef değerden sapmaları önlemenin maliyeti bu sapmalar dolayısıyla tüketicinin kaybından fazla olarsa bu önleme işlemini yapmanın ekonomik olmadığına, tersi durumda ise bu işlem toplam toplumsal maliyeti düşüreceği için bu sapmaların önlenmesi gerektiği görüşünü savunmaktadır. Böylelikle, kayıp fonksiyonu üretici yada tüketicinin toleransını saptamada ürünün kontrolü için sınır ayarlamasını tarafsız bir yolla sağlamaktadır [14].

3.4. Gürültü Etkenleri ve Sinyal Gürültü Oranı (S/G)

Taguchi ürün ve süreç üzerinde etkili olan etkenleri kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen etkenler olarak iki gruba ayırmış, ürün yada süreçlerin fonksiyonel özelliklerinde farklılık (varyasyon) yaratan ve kontrol edilemeyen etkenleri ise gürültü etkenleri olarak adlandırmıştır.

Kontrol edilebilen etkenler tasarım parametrelerimizdir. Bunlar, tasarımcı tarafından serbest bir şekilde belirlenebilmektedir. Tasarım faktörlerinin optimum düzeylerinin seçilmesi tasarımcının sorumluluğundadır.

Kontrol edilemeyen etkenler ise gürültü faktörleri dediğimiz, ürünün fonksiyonel karakteristiklerinde farklılık yaratan ve süreçte kontrol etmenin oldukça zor ve maliyetli olduğu etkenlerdir [15].

Gürültü etkenleri üç gruba ayrılmaktadır;

a. Dışsal Gürültü (external noise) : Isı, nem oranı, voltaj ve toz gibi kontrol edilemeyen çevresel koşullardaki değişikliklerdir.

b. İçsel Gürültü (internal noise) : Yıpranma, zaman ve kullanım sonucu oluşan ürün aşınması gibi değişikliklerdir.

c. Birimler Arası (parçalar arası) Gürültü (unit to unit noise): Aynı özelliklere göre imal edilmiş olunmasına rağmen, birimden birime görülen hammadde, üretim süreci yada farklı vardiyalardan kaynaklanan değişkenliklerdir.

Deney düzenlerindeki amaç kalite değişkeninin (Y) ortalama değerini en iyi noktaya getirmektir. Birçok uygulamada amaç aynı zamanda kalite değişkeni Y'nin varyansını en aza indirmektir. Bu konuya ilk eğilen kişi Taguchi olmuştur ve bu amaçla deney tasarımında başarı gücü (performans) olarak analizlerde kullanılmak üzere Sinyal-Gürültü (S/G) oranı olarak bilinen bir istatistik geliştirmiştir [15].

Taguchi, Sinyal-Gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio) kavramını elektrik mühendisliğinden alarak kalite mühendisliğine kendine has bir şekilde adapte etmiştir. Performans karakteristiğinin hem ortalama değerini hem de ortalama değer etrafındaki değişimini kontrol etmek için bu iki parametreyi birleştirecek bir performans ölçütünün elimizde olması bizim için önemli olmaktadır. Taguchi birçok durumda optimize edilecek amaç fonksiyonu olarak Sinyal-Gürültü oranını kullanmaktadır.

Sinyal-Gürültü oranı, kontrol edilen etkenler üzerinde gürültü etkenlerinin etkilerini ölçerek, kalite özelliğindeki değişimin duyarlılığını göstermektedir. S/G oranına göre, deney düzeninden en iyi koşul belirlenebilmektedir. Bu amaçla,

herhangi bir deney düzenindeki sonuçlardan en yüksek S/G oranı seçilmelidir. Taguchi'ye göre ürün düzeninde en yüksek S/G oranlı sonuçlar daima en küçük varyanslı ve en kaliteli ürünü belirleyecektir.

Taguchi, uygulamadaki problemleri, hedefin türüne göre üçe ayırmış ve her biri için farklı bir S/G oranı tanımlamıştır.

Hedef Değer-En-İyi tipi problemler için,

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \text{ ve } \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \quad (3.4)$$

olduğu durumda

$$S/G = 10 \cdot \lambda \log(\mu^2 / \sigma^2) = 10 \cdot \text{Log}(\text{Varyans veya varyansla ortalama}) \quad (3.5)$$

Burada n, her bir tasarım parametresi matrisi kombinasyonu için kullanılan harici gürültü gözleme kombinasyonlarının sayısıdır.

Daha-Küçük-Daha-İyi tipi problemler için,

$$S/G = -10 \cdot \lambda \log\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2\right) = -10 \cdot (\text{MSD}) \quad (3.6)$$

Bu durumda sinyal, $y = 0$ olmasını amaçlayan sabit bir değerdir. Burada MSD ortalama standart sapmayı ifade etmektedir.

Daha-Büyük-Daha-İyi tipi problemler için kalite performans karakteristikleri sürekli ve negatif değildirler, bu tip problemlerde y değerinin olabildiğince büyük olması istenir. S/G oranını bulmak için bu tip problemler Daha-Küçük-Daha-İyi tipi problemlere performans karakteristikleri göz önüne alınarak değiştirilmektedir.

$$S / G = -10 \cdot \lambda \log\left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) = -10 \cdot (\text{MSD}) \quad (3.7)$$

Tasarım parametrelerini ayarlamadaki stratejide ilk olarak çıktı değişkenliğini minimize etmek amacıyla kontrol faktörleri kullanılır, daha sonra sinyal faktörleri kullanılarak ortalama değer arzulanan hedef değere yaklaştırılır.

Kontrol yada sinyal faktörü olmadığı belirlenen tasarım parametreleri ise performansı etkilemedikleri sürece düşük maliyet ayarlarında tutulur. Taguchi metodu, çıktı değişkenliğinin etkisini minimize ederken aynı zamanda çıktı performansını ekonomik olarak maksimize etmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır.

3.5. Deneysel Tasarımla Kalite Geliştirme ve Ortogonal Diziler

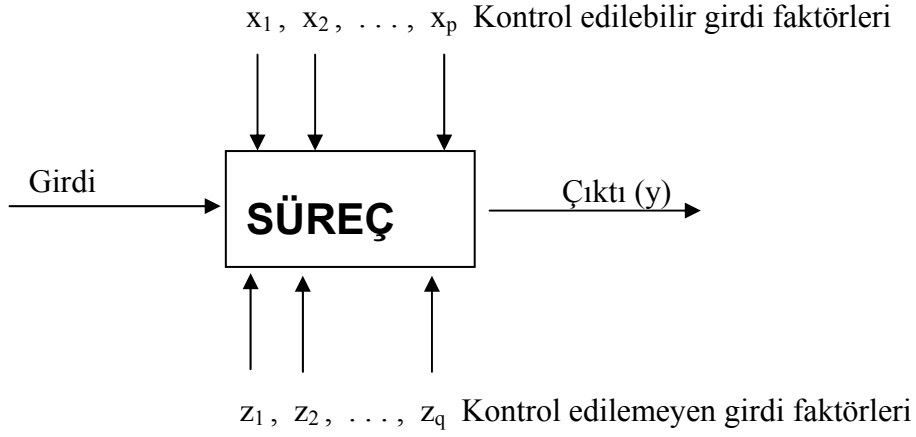
Problem önlemede, problem ortaya çıkmadan önlem alınabilmesine imkan tanıdığı için en iyi yöntem deneysel tasarım teknikleridir. Deneysel tasarım tekniklerini kullanarak üreticiler ürün ve süreç tasarımlarını üretim aşamasının ortasında veya sonunda yapmak yerine üretim aşamasının başında yapabilirler. Deneysel tasarım bu şekilde kullanıldığında kalite tasarımı olarak da isimlendirilmektedir.

Üretim aşamasında ürün kalitesiyle ilgili problemleri önlemek için deneysel tasarım teknikleri birçok farklı yoldan uygulanabilir; Tam Etkenli (Full Factorial) Deneysel Tasarım, Kesirli Etken (Fractional Factorial) Tasarım, Taguchi Metotları, Plackett-Burman Tasarımı, Cube Tasarımı, Box-Belinken Tasarımı vb. Bu teknikler arasında, Taguchi metotları diğerlerine göre daha fazla ilgi çekmiştir. Taguchi metotları kalite geliştirmede birçok başarılı Japon şirketinde 1950'lerden beri uygulanmaktadır. Önemli Amerikan işletmeleri de düşükleri kalite krizinden kurtulabilmek amacıyla bu teknikleri uygulamışlardır. Uyguladıkları bu teknikler sonunda birçok mühendis Taguchi yaklaşımının anlaşılmasındaki basitliği görmüş ve başarılı çalışmalar yapmıştır.

3.5.1. Deneysel tasarım

Deneysel tasarım, süreçteki girdi değişkenlerinde belirli değişiklikler gerçekleştirilerek çıktılarda bu girdi değişkenlerinin etkilerini belirlemek ve gözlemlemek için uygulanan deney düzenleridir. Süreç, Şekil 3.7'de görüldüğü

gibi; makine, metot ve insan kombinasyonlarının kullanılması ile girdi malzemelerinin ürüne dönüştürülmesidir [5].



Şekil 3.7. Genel Süreç Modeli

Son ürün bir veya birden fazla gözlenebilir kalite karakteristiği veya çıktı değişkenine sahiptir. Bazı süreç değişkenleri x_1, x_2, \dots, x_p şeklinde kontrol edilebilir, bazıları da z_1, z_2, \dots, z_q şeklinde kontrol edilemez (her ne kadar kontrol edilemez olsalar da belirli özelliklere göre gerçekleştirilen testlerde bu değişkenler kontrol edilebilmektedir).

Deneysel çalışmalar aşağıdakileri saptamak amacıyla gerçekleştirilmektedir;

- 1- y çıktısı üzerinde hangi değişkenlerin en etkili olduğunu belirlemede,
- 2- y çıktısının hedef değere olabildiğince yakın olabilmesi için x değişkenlerinin değerinin ne olacağını belirlemede,
- 3- y çıktısındaki değişkenliğin (varyansın) küçük olması için x değişkenlerinin değerlerinin ne olacağını belirlemede,
- 4- Kontrol edilemeyen z değişkenlerinin y çıktısı üzerindeki etkilerini minimize edebilmek için x değişkenlerinin alması gerektiği değerleri belirlemede.

Bu nedenle deneysel tasarım hem süreç geliştirmede, hem de süreçte mevcut olan hataları önlemede kullanılmaktadır. Böylece robust bir süreç elde

edilerek dış etkenlerden dolayı süreçte oluşacak değişkenliklere karşı sürecin duyarsız olması sağlanmaktadır.

Üretimde performans üzerine etkili olan parametreler birtakım deneysel çalışmalar yapılarak test edilirler. Deneysel Tasarım, yapılan bu testlerin en önemli parametreleri üzerine yoğunlaşır. Herhangi bir kritik kalite problemi yaratmayacak olan parametrelerin üzerine ise gitmeyerek en optimum deney sistemi oluşturulur. Bunun anlamı yüksek kalitede, müşteri tatminini en üst düzeyde yakalayacak olan ürünü daha az sayıda ama daha etkin bir deney sistemi ile üretmek ve bu sayede zaman ve maliyetten tasarruf etmektir.

Sürecin geliştirilmesi ve optimizasyonunda istatistiksel süreç kontrol metodu ve deneysel tasarım birbirleriyle ilişkilidir. Bir süreç, istatistiksel kontrol altında ise ve buna rağmen ürün üretilebilme becerisi düşük ise üretim becerisini artırmak için süreçteki değişkenliğin azaltılması gerekecektir. Değişkenliği azaltmada da deneysel tasarım istatistiksel süreç kontrolüne göre daha etkilidir. Gerçekte istatistiksel süreç kontrol tekniğinde, işlemler uygulandıktan sonra yapılan muayenelerle kusurlu parçalar tespit edilir. Sonuçlar istatistik metotlarla analiz edilip yorumlandıktan sonra hata kaynakları tanımlanır ve düzeltici kararlar alınır. Buna karşılık deneysel tasarım tekniğinde ise kusurlu parçaları doğuran nedenler üretim işlemleri uygulanmadan önce ürünün tasarım aşamasında elimine edilmektedir. Aynı zamanda istatistiksel süreç kontrol tekniği pasif istatistiksel metottur, yani bu metotta daha iyi ürün elde etmek ve süreçte yapılacak olan değişiklikleri tespit etmek için gerekli olan bilgileri sadece süreci gözlemleyerek elde ediyoruz. Eğer süreç kontrol altında ise pasif yaklaşım ile daha iyi ürün elde etmek için gerekli olan bilgilere ulaşmamız zordur. Diğer taraftan deneysel tasarım aktif istatistiksel bir metot olmasından dolayı girdilerde değişiklikler yaparak çıktılarda oluşacak değişiklikler gözlemlenir. Böylece, girdi değişkenlerinin optimum değerleri ve uygulanacak metodolojiyi saptamak mümkün olmaktadır [8].

Ayrıca deneysel tasarım metotları üretim sürecine istatistiksel süreç kontrolünün uygulanmasından daha yararlı olmaktadır. Varsayalım ki kontrol şemaları süreç verilerinin kontrol limitlerinin dışında olduğunu gösterebilir ve

süreçte birden fazla kontrol edilebilir girdi değişken mevcut olsun, bu girdi değişkenlerinden hangilerinin süreci etkilediğini bilmezsek süreci kontrol altında tutamayız. Deneysel tasarım işte bu önemli süreç değişkenlerini tanımlamada kullanılabilir.

Süreç geliştirmenin başlangıç aşamalarında istatistiksel deneysel tasarım tekniğinin kullanılması ile;

- 1- Kazançta artış,
- 2- Hedef değere olan sapmaların azaltılması ile hedef değere olan uygunluk derecesinde artış,
- 3- Ürün geliştirme zamanında azalma,
- 4- Genel olarak toplam maliyetlerde azalma,
- 5- Ürün güvenilirliğinde artış sağlanmakta,
- 6- Basit tasarım konfigürasyonlarının değerlendirilmesi ve kıyaslanması,
- 7- Alternatif girdi malzemelerinin değerlendirilmesi,
- 8- Performansı etkileyen önemli ürün tasarım parametrelerini belirlenmesi gibi mühendislik tasarımı uygulamaları yapılabilmektedir.

Mühendislik tasarımlarında deneysel tasarımın kullanılması ile yüksek kaliteli ürünler en iyi ve en tutarlı olacak şekilde üretilebilmektedir [8].

Tam Faktöriyel Tasarım;

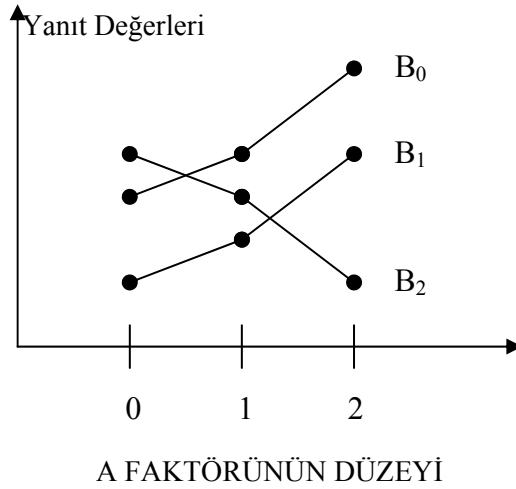
Tam faktöriyel tasarımda birçok faktör ve onların bazı ürün karakteristiklerine olan etkileri iki veya daha fazla düzeyde kontrol edilir. Deney planı, farklı faktörlerden oluşturulabilecek düzeylerin olası tüm kombinasyonlarında gözlem yapmayı kapsamaktadır. Faktör düzeylerinin her bir farklı kombinasyonu işlem kombinasyonu olarak adlandırılır. Faktörler mümkün olduğunca sabit tutulur ve her defasında bir faktörün değeri değiştirilerek deneyler hazırlanır [16].

Faktöriyel deneysel tasarımın analizinde, ana etkiler ve birbirini etkileyen etkiler olmak üzere iki önemli etkiden bahsedilir. Seçilen bir faktörün ana etkisi, her zaman faktörün değişik düzeylerindeki ortalama oluşum tepkisinin

fonksiyonlarıdır. Bir faktörün iki düzeyi olduğunda, tahmin edilen ana etki iki düzeydeki ortalama gözlemler arasındaki farktır. Yani ortalamalar diğer faktörlerin tüm düzeyleri üzerinden hesaplanır.

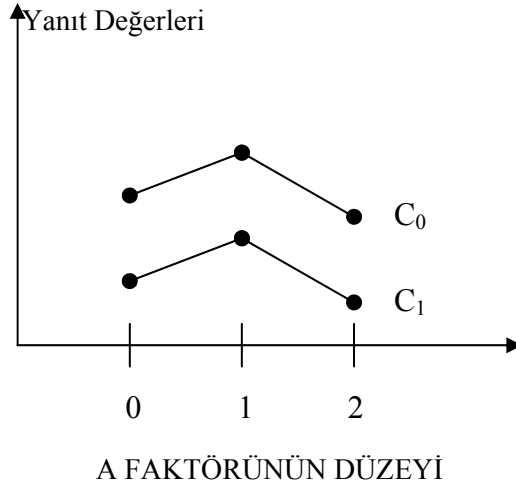
A faktörünün iki düzeyi arasında beklenen tepki farkı, B faktörünün değişik düzeylerinde sabit kalırsa (deneysel hata haricinde) A ve B arasında etkileşim yoktur denilir. Şekil 3.8’de tepkinin iki örneği verilmektedir. Birinci örnek etkileşimin varlığını, ikinci örnek ise etkileşimin yokluğunu göstermektedir. A ve B’nin faktörlerinin birlikte etkisi olan AB etkileşimi gibi etkileşimler ise ikinci sıra etki yada çift etki olarak adlandırılır.

Üç veya daha fazla faktörü olan faktöriyel deneylerde de etkileşimler tanımlanabilir. ABC etkileşimi C ile AB (veya eşdeğer anlamda B faktörü ile AC etkileşimi veya A ile BC etkileşimi) arasındaki etkileşimdir. ABC gibi üç faktörlü etkileşimler de üçüncü sıra etki olarak adlandırılır [17].



B’nin farklı düzeylerinde tepki olarak A’nın farklı düzeylerinin etkisi-etkileşimi vardır.

Şekil 3.8. Etkileşim grafikleri [17].



C'nin farklı düzeylerinde tepki olarak A'nın farklı düzeylerinin etkisi-etkileşimi yok.

Şekil 3.8. Etkileşim grafikleri (devam) [17]

2^k Faktöriyel Tasarım;

2^k faktöriyel deney tasarımları endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarımlar, deneylerin dikkatli bir şekilde organize edildiği ve eşit olarak dağıtıldığı yapılarda deney programındaki k faktörünün tek tek etkileşimi ve birbirini etkileyen etkilerinin ayrı tahminine izin verir [16].

İki düzeyinin her birinden k faktörleri olan faktöriyel deney 2^k faktöriyel deneyi olarak tanımlanır. Deney, 2^k faktörlerin düzeylerinin her bir kombinasyonundaki bir denemeyi içermektedir.

Bu deney düzeninde iki düzey olduğu için faktör ve etkileşimlerin hesaplamaları yapılırken ilgili faktör yada etkileşimin yüksek düzey olduğu deney sonuçlarının toplamından düşük düzey olduğu deney sonuçlarının toplamı çıkarılarak toplam deney sayısının yarısına bölünür. Elde edilen sonuç incelediğimiz faktör yada etkileşimin etkisini vermektedir.

Tüm faktörlerin ortalama etkisi ise, yapılan tüm deneylerin sonuçlarının deney sayısına bölünmesi ile bulunmaktadır [16].

I : etki değeri

Y: deney sonuçları

k : faktör sayısı

olmak üzere etki değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$I_{ort} = \frac{\sum Y_i}{2^k} \quad (3.8)$$

$$I_{faktör} = \frac{\sum Y_{faktör^+} - \sum Y_{faktör^-}}{2^{k-1}} \quad (3.9)$$

Deneyleri tek tek tanımlamak için Tablo 3.3'de gösterildiği gibi farklı işaretler kullanılmaktadır. Uygulamalardan birisi, her bir faktörü bir harf (veya rakamla) tanımlamak ve sonra artı (+) veya eksi (-) işaretiyle her bir faktörün iki düzeyini açıklamaktır. Genel olarak (-) işareti alt düzeyi, (+) işareti ise faktörlerin üst düzeyini göstermektedir. Sonuç olarak; A, B ve C olarak tanımlanan üç faktör olduğunda 2^3 faktöriyel tasarım gösteren sekiz deneme Tablo 3.3'de gösterilmektedir. (+,-) işaretleri “geometrik” olarak gösterilebilir, örneğin, 2^3 tasarımı için, sekiz (\pm, \pm, \pm) faktör ayarlaması küpün sekiz uç noktasının ($\pm 1, \pm 1, \pm 1$) koordinatlarını verir şekilde yorumlanabilir. Alternatif işaretler 0 ve 1 olabileceği gibi, Taguchi sayesinde Japonlar tarafından benimsenmiş olan 1 ve 2 de olabilir.

Tablo 3.3. 2^3 Faktöriyel tasarım için farklı gösterimler [17]

Deney Sırası	Geometrik Gösterim			Alternatif Gösterim			Japon Gösterim			Klasik Gösterim
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
1	-	-	-	0	0	0	1	1	1	1
2	+	-	-	1	0	0	2	1	1	a
3	-	+	-	0	1	0	1	2	1	b
4	+	+	-	1	1	0	2	2	1	ab
5	-	-	+	0	0	1	1	1	2	c
6	+	-	+	1	0	1	2	1	2	ac
7	-	+	+	0	1	1	1	2	2	bc
8	+	+	+	1	1	1	2	2	2	abc

2^k faktöriyel deney tasarımlarıyla tüm k ana etkilerini (ilk-sıra etkiler), tüm $k(k-1)/2!$ iki faktörlü etkileşimleri, tüm $k(k-1)(k-2)/3!$ üç-faktörlü etkileşimleri v.b. tahminleri elde edilebilmektedir. Dikkate değer diğer bir nokta ise tüm bu istatistikler birbirinden ayırıcıdır, yani her bir istatistiğin büyüklüğü ve işareti başka birisinin büyüklüğü ve işaretinden hiçbir şekilde etkilenmez. İncelemelerin tahmin edilen hangi etki ile ilgili olduğu sorusu her iki deneysel tasarımı (tasarım kolonu) oluşturan (+) ve (-) işaretlerin çarpılmasıyla tespit edilir. Tablo 3.4'de 2^4 faktöriyel tasarım için hesaplama tablosu verilmiştir.

Tablo 3.4. 2⁴ Faktöriyel deneysel tasarımın işaret hesaplama tablosu [17]

A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-
+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+
-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+
+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-
-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	+
+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

3.5.2. Ortogonal diziler ve bloklama

Ortogonal düzen ilk kez 1897’de Fransız matematikçi Jacques Hadamard tarafından matematiksel bir buluş olarak ortaya konmuştur. Ortogonal diziler temel olarak hangi denemede, hangi faktörün hangi düzeyinin kullanılacağını belirler [18].

Ortogonal düzenin en önemli özelliği, birçok faktörün minimum sayıda test ile değerlendirilmesini sağlaması ve klasik metotdan farklı olarak faktör kademelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı olarak değiştirme yapmayı önermesidir [19].

Tam faktöriyel çok etkenli deneyler verilen etkenlerin tüm olası etkilerinden oluşur. 7 etken içeren bir deneyde her bir etken 2 düzeyli ise bu

bileşimlerin toplam sayısı $2^7 = 128$ 'dir. Fakat bu deneylerin tümünü uygulamak genellikle çok zaman alan ekonomik olmayan ve zahmetli bir işlemdir. Bu nedenle yeterli bilgi edinebileceğimiz olası deneylerin bir kısmını uygulamak hem zaman hem de maliyet açısından çok daha etkin olabilir.

Bu yaklaşımlar zaman ve maliyette önemli tasarruflar sağlamasına rağmen sonuçların analizi ve deneylerin düzenlenmesinde matematiksel ilişkilere gereksinim duyarlar. Her tasarımcı farklı deney kombinasyonları uygulayabilir. Deney tasarımına Taguchi bu noktada katkı yapmakta ve kesirli faktöriyel deneyleri standartlaştırıp basit hale getirmektedir [10].

Taguchi çok etkenli deneyler için özel düzenekler kurarak kendine özgü yöntemler geliştirmiştir. Bu özel düzenler ortogonal (dik) diziler olarak bilinir. Ortogonal dizilerin kullanımı gerekli deneylerin en az sayısının belirlenmesine yardımcı olur.

Ortagonallık, bir faktör etkisinin başka faktör yada faktörlerle bağımsızca hesaplanabilmesidir. Ortogonal dizilerin ilk şartı dengeli deneyler olmalarıdır. Farklı deneme koşulları altında eşit sayıda örneklem birimleri içerirler.

Deneylerin düzenlenmesi geniş bir bilgi derlemesini gerektirir. Bu derleme süreçte etkili olacak etkenler, süreçteki tüm girdiler ve projede çalışacak insanlarla ilgilidir [10].

Deney yapan kişiler genellikle 2^k faktöriyelinde gerekli olan tüm deneyler için homojen bir deney çevresi belirlemekte zorlanmaktadır. 2^3 faktöriyelde gereken 8 denemeyi yapmak için deney yapanın 2 güne ihtiyacı olabilir. Sorun üç faktörün ana etkilerinin tahminini bozmamak için hergün yapılacak denemelerin seçilmesi, yani en iyi bloğun belirlenmesidir. Burada bloklama en az ilgili olan etkileşim tahmininin gözden çıkarılmasıyla, yani üç-faktörlü etkileşim ile uygulanır. İzlenecek prosedür, 2^3 faktöriyeli için Tablo 3.5'de gösterilmektedir. İlk önce 2^3 tasarımın artı ve eksi işaretleri yazılır. Sonra genellikle ABC etkileşimi tahmin etmek için kullanılan artı ve eksi kolonları oluşturulur ve üretici blok işaretlenir. Bunlar ilk bloğu oluşturan blok üretici kolonların artı işaretlerini taşıyarak uygulanır, ikinci blok ise eksi işaretlerini taşıyarak oluşturulur.

Tablo 3.5. 2^3 Faktöriyel Tasarımın 4 Deneysel Blokla Ayrılması.

			2^3 'ün 2 Bloğu						
			(+) Blok			(-) Blok			
A	B	C	ABC = Blok Üretimi	A	B	C	A	B	C
-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
+	-	-	+	-	+	-	+	+	-
-	+	-	+	-	-	+	+	-	+
+	+	-	-	+	+	+	-	+	+
-	-	+	+						
+	-	+	-						
-	+	+	-						
+	+	+	+						

Tasarımın her birinin dört bloğa bölünmesi durumunda ise Tablo 3.6 kullanılır ve AB, BC etkileşimlerinden ilgili artı ve eksi işaretlerine bakarak bloklar oluşturulur. Bu özel tasarımda tüm iki faktörlü etkileşimler bloklarla karıştırılır.

Bu nedenle, blok üreticileri dikkatli seçilmelidir. 2^3 , 2^4 , ve 2^5 tasarımları için bloklama düzenlemeleri Tablo 3.7'de gösterilmektedir [17].

Tablo 3.6. 2^3 Faktöriyel Tasarımın 2 Deneylik 4 Bloğa Ayrılması.

2^3			<i>Blok Üreticisi</i>	
A	B	C	AB	BC
-	-	-	+	+
+	-	-	-	+
-	+	-	-	-
+	+	-	+	-
-	-	+	+	-
+	-	+	-	-
-	+	+	-	+
+	+	+	+	+

(+ +) Blok	(- +) Blok	(+ -) Blok	(- -) Blok
AB(+) BC(+)	AB(-) BC(+)	AB(+) BC(-)	AB(-) BC(-)
ABC	ABC	ABC	ABC
- - -	+ - -	++ -	- + -
+++	- ++	-- +	+ - +

Tablo 3.7. 2^k Faktöriyeller İçin Blok Düzenlemesi [17].

<i>Faktör Sayısı</i>	<i>Blok Boyutu</i>	<i>Blok Üreticisi</i>	<i>Bloklardaki Tesir Etkileşimi</i>
3	4	ABC	ABC
	2	AB,BC	AB,BC,AC
4	8	ABCD	ABCD
	4	ABC,ACD	ABC,ACD,BD
	2	AB,BC,CD	Tüm 2 ve 4 Etkileşimler
5	16	ABCDE	ABCDE
	8	ABC,CDE	ABC,CDE
	4	ABC,BCD,CDE	ABC,BCD,CDE,AD,ABDE,BE,ACE
	2	AB,BC,CD,DE	Tüm 2 ve 4 Etkileşimler

3.5.3. İki düzeyli tasarımlarda varyans analizi

Deney sonuçlarının analizi varyans analizi (ANOVA) adı verilen istatistiksel teknikle irdelenir. Buna göre alınan kalite karakteristiklerine (y_1, y_2, \dots) göre analiz gerçekleştirilir. ANOVA tablosu düzenlenirken tüm ana etkiler ve araştırılmak istenilen etkileşimler sütun olarak alt alta yazılır. Bunların karşılıkları varyans ve F değerleri bulunur Tablo 3.8. Şayet bulunan F değeri istenilen hassasiyetteki (%99 veya %95) tablo F değerinden büyük ise etkileşimin ve etkinin var olduğu, küçük ise etkileşim veya etkinin az veya hiç olmadığı kabul

edilir. Bu çalışmalar bilgisayar ortamında kısa bir sürede yapılmakta olup, konu hakkında çeşitli istatistik programları mevcuttur [16].

Tablo 3.8. Varyans analizi sonuç tablosu

Değişimin kaynağı	Serbestlik derecesi (sd)	Kareler toplamı (KT)	Kareler ortalaması (KO)	F _{hesap}
Deneme (denemeler arası)	k-1	KT _{deneme}	KO _{deneme}	KO _{deneme} / KO _{hata}
Hata (denemeler içi)	N-k	KT _{hata}	KO _{hata}	
Genel	N-1	KT _{genel}		

Tablo 3.8'den de görüldüğü gibi F_{hesap} değerleri incelenen etkinin kareler toplamı yardımıyla bulunmaktadır.

$$\text{Kareler Toplamı} = KT_{\text{faktör}} = \left[\frac{(2^{(k-1)} * Etki_{\text{faktör}})^2}{r * 2^k} \right] \quad (3.10)$$

r: deneylerin tekrar sayısı

k: faktör sayısı

olmak üzere hesaplanır.

Hesaplanan KT'ı ilgili faktör yada etkileşimin sd'ne bölünerek KO bulunur. Bulunan bu KO hata kareler ortalamasına (KO_{hata}) bölünerek F_{hesap} değeri bulunur.

H_0 = Faktör etkili değildir.

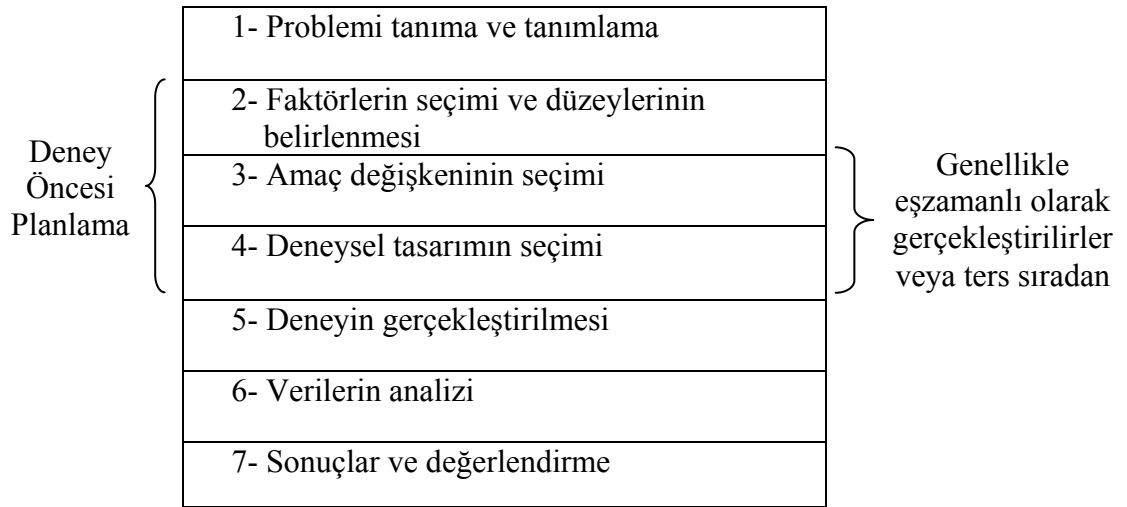
H_1 = Faktör etkilidir.

Yukarıdaki gösterildiği şekilde her bir faktör ve etkileşim için H_0 ve H_1 hipotezleri test edilerek deney düzeninde etkili olan faktör ve etkileşimler belirlenir.

Aynı şekilde ANOVA tablosu yerine grafik yöntemde sonuçların analizi de kullanılmaktadır. Burada olasılık grafiği kullanılmakta olup, bulunan sonuçların grafik üzerinde yerleştirilmesi sonucunda aynı hattan sapan değerler deneyde etkin bir rol oynamaktadır.

3.5.6. Deneysel tasarım uygulama adımları

Deneysel tasarım süreç geliştirme için önemli bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımı kullanabilmek için bu deney ile ilgili kişilerin hepsinin bu deneyin gerçekleştirilmesindeki amaç hakkında kesin bir fikre sahip olmaları gerekmektedir. Hangi faktörlerin inceleneceği, deneyin nasıl gerçekleştirileceği ve verilerin nasıl inceleneceğine dair adımlar Şekil 3.9’da gösterilmiştir [9].



Şekil 3.9. Deneysel tasarım prosedürü

Ana başlıklarla verilen prosedürün adımlarını kısaca açıklayalım;

1. Problemi tanıma ve tanımlama

Pratikte çoğunlukla bir problemi çözmek için deneysel tasarımın kullanılması gerektiğinin anlaşılması kolay değildir. Bu yüzden problemi açık ve kabul edilebilir bir şekilde tanımlamak zordur. Buna rağmen, problem ile ilgili

geliştirilebilecek fikirler ve deneyin spesifik amacının saptanması gerekmektedir. Problem ile ilgili deney amaçlarıyla problemin açık bir şekilde ifade edilmesi sürecin daha iyi anlaşılmasına ve çözümün daha gerçekçi bir şekilde elde edilmesinde yardım edecektir.

2. Faktörlerin seçimi ve düzeylerinin belirlenmesi

Deneyi gerçekleştiren kişi deneydeki değişken faktörleri, bu faktörlerin değişim göstereceği aralıkları ve deneyin gerçekleştirileceği düzeyleri seçmek zorundadır. Bu faktörler ile ilgili verileri saptayabilmek için sürecin iyi bilinmesi gereklidir. Bu süreç bilgileri genellikle pratik tecrübelerle teorik bilgilerin kombinasyonundan elde edilir. Deneyin ilk aşamalarında faktörlerin geçmiş deneylerden elde edilen bilgiler ışığında incelenmesi çok önemlidir. Amaç, faktörlerin gözlenmesi veya süreç karakterinin belirlenmesi ise faktör düzeylerinin düşük tutulması (çoğunlukla iki düzey kullanılmaktadır) genellikle tercih edilmektedir. Tasarım parametreleri belirlenirken dikkat edilmesi gereken nokta amacın ilgili isteği karşılayacak doğrudan çözümü bulmak değil, bu isteği etkileyecek veya çözüme götürebilecek boyutlar, malzeme, şekil gibi bir takım teknik parametrelerinin belirlenmesi olduğudur. Sonraki aşamada hedeflerin oluşturabilmesi için, bu parametrelerin mümkün olduğunca ölçülebilir olması gerekmektedir. Yukarıdaki deneysel tasarım prosedürü tablosunda da belirtildiği gibi ikinci ve üçüncü aşamalar genelde eşzamanlı olarak gerçekleştirilmekte veya üçüncü aşama daha önce uygulanmaktadır [8].

3. Amaç değişkeninin seçimi

Amaç değişkenlerinin seçiminde deneyi gerçekleştiren kişi bu değişkenlerin gerçekte çalışma yapılan süreç ile ilgili yararlı bilgi verdiğinden emin olmalıdır. Genellikle yapılan deneylerde standart sapması veya ortalaması (veya her ikisi birlikte) ölçülen değişkenler amaç değişkenleri olmaktadır. Deneylerde çok sayıda farklı amaç değişkeninin incelenmesi nadiren gerçekleştirilmektedir. Deney sonucunu doğru bir şekilde ölçme becerisi de önemli bir faktör olmaktadır. Eğer deney sonucunun doğru bir şekilde ölçülmesi zor ise bu durumda daha fazla sayıda faktörün deneye etkisi araştırılmalı veya örneklem büyüklüğü artırılmalıdır.

4. Deneysel Tasarımın seçimi

İlk üç aşama doğru bir şekilde gerçekleştirilmişse bu aşama bundan önceki aşamalara göre daha kolaydır. Tasarım seçiminde, örneklem büyüklüğü, deneyler için uygun deneme sırasının seçimi veya rassal sınırlamalar içerip içermediğine dikkat edilir. Deney sonucunda temel ve içsel etkileşimler bulunur.

5. Deneyin gerçekleştirilmesi

Deney gerçekleştirilirken her şeyin plana göre yapıldığından emin olmak için sürecin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi önemli olmaktadır. Bu aşamada oluşacak deney hataları deneyin genel geçerliliğine zarar vermektedir. En ince ayrıntıya kadar izlenecek planın belirlenmesi deneyin başarıya ulaşması için çok önemlidir.

6. Verilerin analizi

Verilerin analiz edilmesinde istatistiksel metotların kullanılması ile tahmini sonuçlar yerine objektif sonuçlar elde edilmiş olunur. Eğer deney doğru bir şekilde tasarlanırsa ve bu tasarıma uygun bir şekilde gerçekleştirilirse kompleks istatistiksel metotların uygulanmasına gerek kalmadan bir sonuca ulaşılabilir. Veri analizinde kullanılacak birçok bilgisayar yazılımını bulmak mümkündür. Veri analizinde varyans analizi metodu kullanılarak model doğruluğunun kontrol edilmesi de önemlidir.

7. Sonuçlar ve değerlendirme

Veriler analiz edildiğinde deney, pratik çözüm önerileri ile sonuçlar çıkarmamızda bize yardımcı olmalıdır. Bu aşamada genellikle grafiksel metotlar faydalı olmaktadır, özellikle sonuçların sunum aşamasında pratiklik sağlamaktadır.

İlk üç aşama genellikle deney öncesi planlama olarak adlandırılır. Bu adımların mümkün olduğunca düzgün bir şekilde gerçekleştirilmesi deneyin iyi bir şekilde sonuçlanması için önemli olmaktadır. Bu prosedürün uygulanması süresince gerçekleştirilen deneyler süreçte önemli rol oynamaktadır. Başarılı bir deneyi gerçekleştirmek için;

- Süreci etkileyen önemli faktörler hakkında gerekli bilgi,
- Bu faktörlerin değişim gösterdiği alan,
- Ortogonal dizilerde kullanılacak uygun test düzeyleri,
- Değişkenleri ölçmede kullanılacak düzgün bir ölçü birimi,

gibi verilere ihtiyaç vardır. Genellikle bu verilere ilişkin doğru cevapları deneyin başlangıç aşamalarında bilememekteyiz ancak süreci inceledikçe bu verileri elde etmekteyiz [8].

Deney sonuçlarını aşağıdaki verileri elde etmek için analiz etmekteyiz;

Ana Etki (Main Effect) : Analiz edilen sonuçlara bağlı olarak ölçülen performans değerlerini etkileyen faktörlerin etki trendlerini vermektedir. Burada, ortalama faktör etkileri hesaplanarak her bir faktörün performans değerini ne şekilde etkilediği belirlenir.

Varyans Analizi (ANOVA) : Bu analiz ile sonuçlardaki değişimi etkileyen faktörler ile faktör etkileşimleri hakkında bilgi sağlanmaktadır. Ayrıca varyans analizi ile faktör ve bu faktörlerin etkileşimlerinin göreceli anlamlılık dereceleri ile optimum koşullarda beklenen performans değerlerinin güven aralıklarının belirlenmesinde yardımcı olmaktadır.

Optimum Koşullar (Optimum Conditions) : Ana etki analizinin bir bölümünde hesaplanan faktör ortalamalarından yararlanarak ve kalite karakteristikleri dikkate alınarak optimum tasarım koşulları belirlenebilir. Genellikle optimum koşullarda elde edilecek performans değerini hesaplamak için lineer bir grafik modeli kullanılmaktadır.

Sonuçlar (Conclusions) : Özellikle sonuç kısmında;

- Önemli faktörler neler? (Önem derecesine göre sıralı)
- Bu faktörlerin performans üzerindeki etkileri nasıl olmaktadır?
- En iyi tasarım koşulu ne ve bu tasarım ile ne kadarlık bir iyileştirme söz konusudur?
- Hangi faktörlerin etkileşimleri performansı etkilemektedir?

- Hangi faktörler performansı etkilememektedir? (Toleransları elimine edilebilir)
- Hedef değerden sapma ne kadar azaltılabildi?

Sorularına cevap aranmaktadır. Fakat her deney düzeninin bu soruların tümüne cevap vermesi beklenmemelidir. İlgilenilen amaca uygun soruların cevaplarının bulunması yeterli olmaktadır.

4. UYGULAMA

Endüstride artan bir şekilde kullanılmakta olan Taguchi Metodu somut ve yüksek performans sağlayan sonuçlar elde etmiştir.

Yıllardır istenen ürün performansına ulaşmada, yüksek maliyetin gerektiğine inanan mühendisler ve diğer teknik elemanlar sistem tasarım aşamasından tolerans tasarım aşamasına geçmişlerdir. Bu iki aşama arasındaki kalite ve maliyetler açısından yüksek kazanç sağlayacakları, parametre tasarım safhasını kullanmamışlardır.

Uygulamamız, Taguchi Metodunun parametre tasarımı safhasındaki yöntemle F-4 savaş uçaklarındaki yakıt tüketimini etkileyen faktörleri tespit etmek olacaktır. Ayrıca, Taguchi'nin sinyal gürültü oranları kullanılarak hangi deney düzeninde en az değişkenlikle minimum yakıt tüketiminin oluştuğu saptanacak, deney sonuçlarındaki değişkenliğin hangi faktör yada etkileşimlerden kaynaklandığı belirlenecektir.

Bu amaçla, 1.Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığı Yakıt Deneme Atölyesinde yapılan deneylerle, F-4 savaş uçağında motorlara yakıt akışını sağlayan Ana Yakıt Kontrol (Main Fuel Controller, MFC) ünitesi son test aşamasında incelenmiştir.

1.Hava İkmal Bakım Merkez Komutanlığı, kuruluşu 1926 yılına dayanan Türkiye'de havacılığın temellerinin atıldığı kurumdur. Günümüzde revizyon ve imalatını yaptığı binlerce ürün ve parça sayesinde özellikle jet uçakları ve motorları konusunda Türk Hava Kuvvetlerinin vazgeçilmez bir parçası olmasının yanında, bölgesinin havacılık konusundaki en gelişmiş kuruluşudur. Kuruluş kabiliyetlerini sadece Türk Hava Kuvvetlerinin hizmetine sunmamakta, diğer kuvvetlere, Emniyet Genel Müdürlüğüne, müttefik ülkelerin hava kuvvetlerine, NATO'ya, özel sektördeki birçok kuruluşa da döner sermaye kapsamında işler yapmaktadır. İşler, toplam kalite yönetimi felsefesi altında, uluslararası kuruluşlarca sağlanmış olan kalite belgelerindeki belirlenmiş standartlara göre yapılmakta ve bu belgeler belirli periyotlarla bu kuruluşlar tarafından denetlenmektedir.

4.1. Problemin Tanımlanması

Havacılık sektörü günümüzün başta gelen sektörlerinden biri olmasına rağmen çok yüksek maliyetli bir sektördür. Ülkemizdeki kaynakları ekonomik olarak kullanmaya çalışan kurumlardan biri de Hava Kuvvetleri Komutanlığıdır. Bir savaş uçağının rutin bir görevde harcadığı yakıtın maliyeti küçük bir otomobilin fiyatına yakın değerlerdedir. Bu nedenle, uçaklarda yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Buradan yola çıkarak çalışmada, Türk Hava Kuvvetlerinin ana vurucu güçlerinden biri olan F-4 savaş uçakları ele alınmıştır. F-4 savaş uçakları General Electric firması tarafından üretilen iki adet J-79-17 motoruyla uçmaktadır. Bu motorlara yakıt akışını sağlayan ise Ana Yakıt Kontrol ünitesidir.

4.2. Faktör ve Faktör Düzeylerinin Belirlenmesi

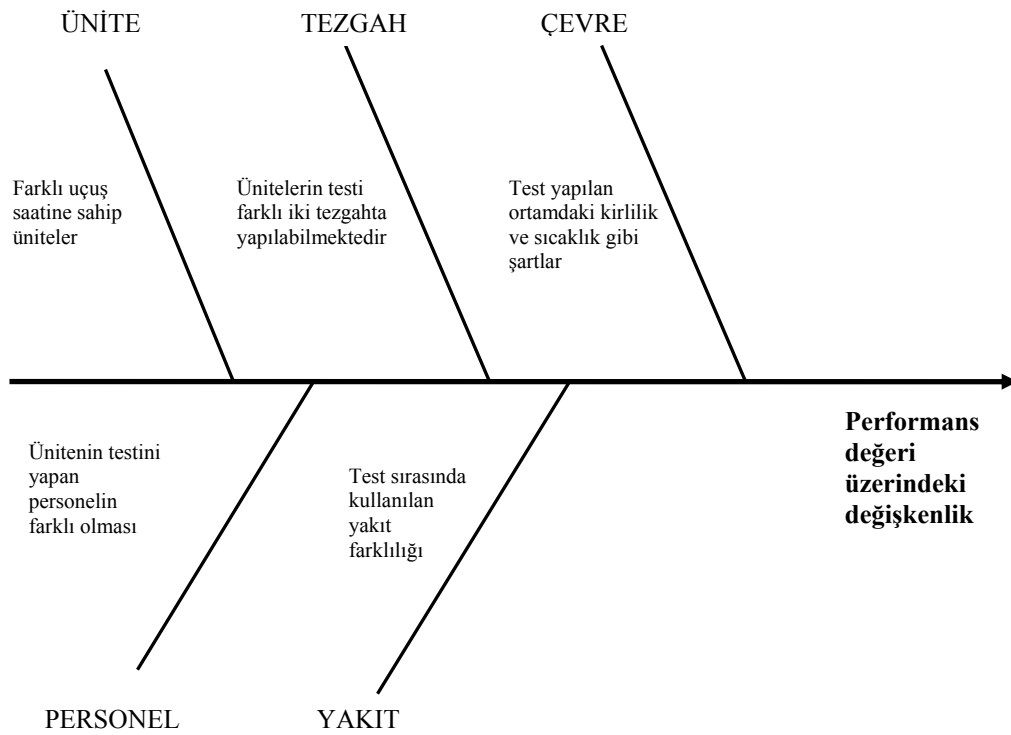
Ana Yakıt Kontrol ünitesi, hareketini motordan alan hidromekanik bir cihazdır. Ünite, uçağın gaz kolu pozisyonu (PLA), motor devri (RPM), kompresör giriş sıcaklığı (CIT) ve kompresör çıkış tazyiki (CDP) fonksiyonları altında ve hareketli kompresör palelerinin (IGV) durumuna göre motor yanma odalarına ölçülü olarak yakıt akışını sağlar.

Ana Yakıt Kontrol ünitesinin son test aşamasında çalışmasına etki eden beş ana faktör vardır. Bu faktörler;

- Gaz kolunun pozisyonu (açısı),
- Motor devri,
- Kompresör giriş sıcaklığı,
- Giriş akışı,
- Hava basıncı.

Ana yakıt kontrol ünitesinin çalışmasına etki eden bu faktörler, aynı zamanda uçuş sırasında uçağın yakıt tüketimini belirleyen faktörlerdir. Bu faktörler, imalatçı firma tarafından verilmiş olan ve ünitenin revizyon işlemlerinin açıklandığı teknik emirlerde belirtilmektedir.

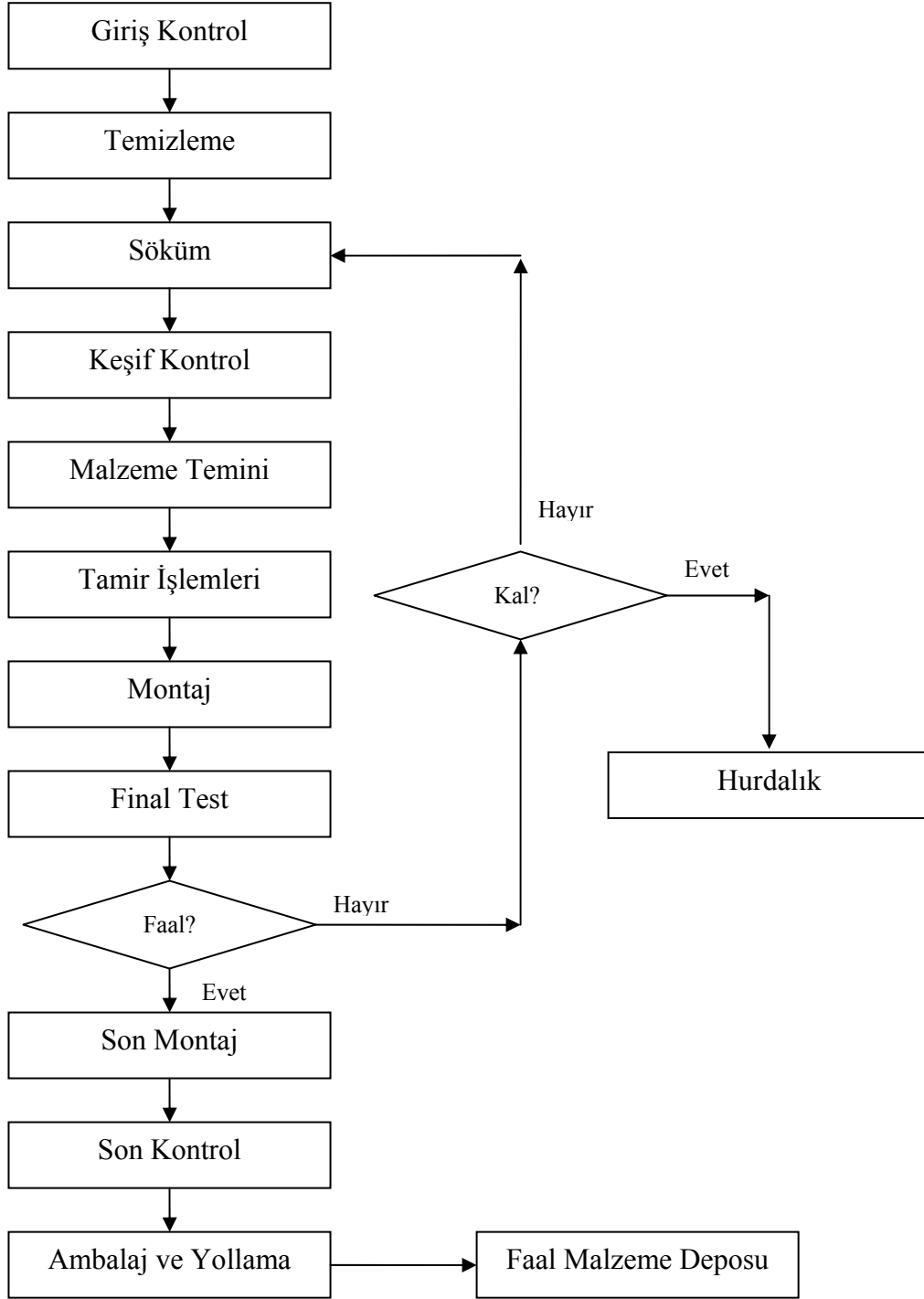
Uygulamamızda, personelden, kullanılan test yakıtından, vardiyalardan ve test yapılan tezgahın kaynaklanan gürültü faktörlerimiz bulunmaktadır. Çevresel etkenleri de düşünerek bu sayı artırılabilir. Fakat amacımız uçakta yakıt tüketimini etkileyen faktörleri tespit etmek olduğundan ve bu gürültü faktörlerini deneylerimize dahil etme imkanımız olmadığından uygulamada gürültü faktörleri göz önünde bulundurulmamıştır. Şekil 4.1’de bu faktörler sebep sonuç diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Gürültü faktörlerinin sebep sonuç diyagramında gösterilmesi

Ünite revizyondan sonra son test işlemine girmektedir. Test tezgahı uçuş sırasında uçağın karşılaştığı şartlardan daha zor şartları sağlayabilmekte ve ünite bu şartlara göre test edilmektedir. Eğer ünite, yapılan test işlemlerinin herhangi birinde belirtilen limitler dışında bir değer alırsa sökülme ve revizyon işlemi tekrar yapılmaktadır.

Ünitenin revizyon sırasındaki gördüğü işlemler Şekil 4.2'deki akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ana Yakıt Kontrol ünitesi revizyon akış şeması

Çalışmada, ünite üzerinde etkisi incelenecek faktörler tezgah üzerinde okunabilen değerleri ve uygulama kolaylığı nedeniyle 2 düzeyli olarak ele alınmıştır. Tablo 4.1’de faktörler ve düzeyleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Faktörler ve düzeyleri

		FAKTÖRLER				
		Kompresör giriş sıcaklığı (CIT)	Gaz kolu açısı (PLA)	Motor Devri (RPM)	Giriş Akışı	Hava Basıncı
DÜZEY	1	0,0605	40	1250	8000	100
	2	0,2960	100	3160	18000	150

Faktörlerin düzey değerleri, test tezgahındaki değerlerdir. Faktörlerden kompresör giriş sıcaklığı tezgahdaki CIT simülör değerine göre alındığı için anlaşılabilir. CIT simülör değerini aşağıdaki formül yardımıyla Kelvin cinsi sıcaklığa çevirebiliriz.

$$Sıcaklık(^{\circ}K) = CIT \text{ değeri} \times 742,34 + 210,89 \quad (4.1)$$

Konunun daha iyi anlaşılması açısından Tablo 4.2’de bazı CIT simülör değerleri için kompresör giriş sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 4.2. Bazı CIT simülör değerleri için sıcaklıklar

CIT SIMULATOR	Sıcaklık(°K)	Sıcaklık(°C)	Sıcaklık(°F)
0,0116	219,26	-53,89	-65,00
0,0239	228,49	-44,66	-48,39
0,0361	237,68	-35,47	-31,85
0,0483	246,87	-26,28	-15,30
0,0605	255,92	-17,23	0,99
0,0758	267,27	-5,88	21,42
0,0911	278,62	5,47	41,85
0,0972	283,15	10,00	50,00
0,1094	292,15	19,00	66,20
0,1216	301,21	28,06	82,51
0,1338	310,21	37,06	98,71
0,1583	328,09	54,94	130,89

4.3. Çözümleme

Tüm faktörlerin kullanıldığı deneysel tasarıma tam faktöriyel tasarım denir. Tam faktöriyel tasarım maliyetli bir yöntem olduğu için ancak küçük çaplı deneylerde yada sonuçların birebir alınmasının gerektiği deneylerde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, tam faktöriyel tasarım gereğince $2^5 = 32$ deney, her biri 4 tekrarlı olarak yapılmıştır. Deneylerin birbirine olan etkisini önlemek amacıyla standart deney sırası uygulanması yerine rassallaştırılmış bir sırada deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sırası, etki düzeyleri ve elde edilen gözlem değerleri Tablo 4.3'de görülmektedir. Ayrıca tablonun son kolonunda, deney düzeninde varyansı etkileyen etmenleri tespit etmek için deney serileri standart sapmasının logaritmik değerleri hesaplanmıştır. Tabloda etkenlerin düşük düzeyi için “-“ yüksek düzeyi için ise “+” işaretlerinin bulunduğu geometrik gösterim şekli kullanılmıştır. Tablodaki etkiler aşağıda listelenmiştir.

A : Kompresör giriş sıcaklığı,

B : Gaz kolu açısı,

C : Motor devri,

D : Giriş akışı,

E : Hava basıncı.

Elde edilen deney sonuçlarına dayanarak her bir deney düzeneği için toplam çıkış akışı, varyans ve sinyal gürültü oranı (yakıt tüketimi daha küçük daha iyi tipi problem olduğu için buna uygun sinyal-gürültü oranları) hesaplanmıştır. Tablo 4.4'de verilmiş sonuçlar incelenecek olursa Taguchi'nin sinyal gürültü oranının en az yakıt tüketimini doğru bir şekilde tespit ettiği görülmektedir. Varyans değerinin ise en küçük 3. değer olduğu, formülün farklı iki kritere en uygun çözümü sunduğu anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlara göre en az yakıt tüketiminin oluşacağı kombinasyon A (kompresör giriş sıcaklığı), B (gaz kolu açısı), C (motor devri)'nin yüksek, D (giriş akışı) ve E (hava basıncı)'nin ise düşük düzeyde olduğu kombinasyondur. Faktörler bu kombinasyona uygun şekilde olduğu takdirde uçağın yakıt tüketimi daha stabil (az değişken) ve minimum düzeyde olacaktır.

Tablo 4.3. Tam faktöriyel tasarım içim yapılan deney sonuçları

Test No	Test Sırası	A	B	C	D	E	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Çıkış Akışı Toplam	Log (Std. Sapma)
1	1	-	-	-	-	-	5.128	5.185	5.196	5.209	20.718	1,553
2	21	+	-	-	-	-	4.864	4.860	4.856	4.865	19.445	0,614
3	10	-	+	-	-	-	5.204	5.195	5.214	5.186	20.799	1,080
4	25	-	-	+	-	-	5.318	5.283	4.678	5.267	20.546	2,486
5	6	-	-	-	+	-	5.246	5.235	5.227	5.239	20.947	0,899
6	29	-	-	-	-	+	7.402	7.419	7.442	7.425	29.688	1,218
7	15	+	+	-	-	-	4.874	4.885	4.860	4.849	19.468	1,198
8	32	+	-	+	-	-	4.732	4.745	4.738	4.735	18.950	0,746
9	11	+	-	-	+	-	4.903	4.886	4.886	4.893	19.568	0,905
10	31	+	-	-	-	+	7.259	7.290	7.293	7.284	29.126	1,189
11	2	-	+	+	-	-	5.315	5.347	5.377	5.378	21.417	1,475
12	28	-	+	-	+	-	5.249	5.232	5.217	5.227	20.925	1,126
13	16	-	+	-	-	+	7.427	7.405	7.397	7.424	29.653	1,163
14	22	-	-	+	+	-	5.393	5.310	5.379	5.335	21.417	1,585
15	7	-	-	+	-	+	7.419	7.418	7.454	7.385	29.676	1,450
16	12	-	-	-	+	+	7.855	7.822	7.837	7.834	31.348	1,135
17	19	+	+	+	-	-	4.712	4.721	4.714	4.713	18.860	0,611
18	26	+	+	-	+	-	4.895	4.905	4.862	4.904	19.566	1,305
19	3	+	+	-	-	+	7.262	7.294	7.275	7.265	29.096	1,160
20	23	+	-	+	+	-	4.757	4.758	4.750	4.756	19.021	0,556
21	8	+	-	+	-	+	7.128	7.132	7.128	7.123	28.511	0,567
22	13	+	-	-	+	+	7.306	7.325	7.336	7.304	29.271	1,188
23	30	-	+	+	+	-	5.398	5.423	5.396	5.406	21.623	1,089
24	4	-	+	+	-	+	7.476	7.460	7.457	7.432	29.825	1,260
25	20	-	+	-	+	+	7.860	7.813	7.813	7.845	31.331	1,373
26	17	-	-	+	+	+	8.079	8.068	8.086	8.078	32.311	0,870
27	27	+	+	+	+	-	4.767	4.766	4.746	4.765	19.044	1,001
28	9	+	+	+	-	+	7.125	7.117	7.120	7.114	28.476	0,671
29	14	+	+	-	+	+	7.328	7.319	7.313	7.297	29.257	1,116
30	5	+	-	+	+	+	7.136	7.124	7.112	7.118	28.490	1,011
31	24	-	+	+	+	+	8.130	8.086	8.125	8.130	32.471	1,328
32	18	+	+	+	+	+	7.120	7.106	7.095	7.115	28.436	1,041

Tablo 4.4. Tam faktöriyel tasarım için hesaplanan varyans ve S/G oranları

A	B	C	D	E	Deneş 1	Deneş 2	Deneş 3	Deneş 4	Çıkış Akışı Toplam	Varyans	S/G
-	-	-	-	-	5.128	5.185	5.196	5.209	20.718	1.275,00	-74,29
+	-	-	-	-	4.864	4.860	4.856	4.865	19.445	16,92	-73,73
-	+	-	-	-	5.204	5.195	5.214	5.186	20.799	144,25	-74,32
-	-	+	-	-	5.318	5.283	4.678	5.267	20.546	93.885,67	-74,22
-	-	-	+	-	5.246	5.235	5.227	5.239	20.947	62,92	-74,38
-	-	-	-	+	7.402	7.419	7.442	7.425	29.688	272,67	-77,41
+	+	-	-	-	4.874	4.885	4.860	4.849	19.468	248,67	-73,75
+	-	+	-	-	4.732	4.745	4.738	4.735	18.950	31,00	-73,51
+	-	-	+	-	4.903	4.886	4.886	4.893	19.568	64,67	-73,79
+	-	-	-	+	7.259	7.290	7.293	7.284	29.126	239,00	-77,24
-	+	+	-	-	5.315	5.347	5.377	5.378	21.417	891,58	-74,57
-	+	-	+	-	5.249	5.232	5.217	5.227	20.925	178,92	-74,37
-	+	-	-	+	7.427	7.405	7.397	7.424	29.653	212,25	-77,40
-	-	+	+	-	5.393	5.310	5.379	5.335	21.417	1.480,92	-74,57
-	-	+	-	+	7.419	7.418	7.454	7.385	29.676	794,00	-77,41
-	-	-	+	+	7.855	7.822	7.837	7.834	31.348	186,00	-77,88
+	+	+	-	-	4.712	4.721	4.714	4.713	18.860	16,67	-73,47
+	+	-	+	-	4.895	4.905	4.862	4.904	19.566	407,00	-73,79
+	+	-	-	+	7.262	7.294	7.275	7.265	29.096	208,67	-77,24
+	-	+	+	-	4.757	4.758	4.750	4.756	19.021	12,92	-73,54
+	-	+	-	+	7.128	7.132	7.128	7.123	28.511	13,58	-77,06
+	-	-	+	+	7.306	7.325	7.336	7.304	29.271	237,58	-77,29
-	+	+	+	-	5.398	5.423	5.396	5.406	21.623	150,92	-74,66
-	+	+	-	+	7.476	7.460	7.457	7.432	29.825	330,92	-77,45
-	+	-	+	+	7.860	7.813	7.813	7.845	31.331	557,58	-77,88
-	-	+	+	+	8.079	8.068	8.086	8.078	32.311	54,92	-78,15
+	+	+	+	-	4.767	4.766	4.746	4.765	19.044	100,67	-73,55
+	+	+	-	+	7.125	7.117	7.120	7.114	28.476	22,00	-77,05
+	+	-	+	+	7.328	7.319	7.313	7.297	29.257	170,25	-77,28
+	-	+	+	+	7.136	7.124	7.112	7.118	28.490	105,00	-77,05
-	+	+	+	+	8.130	8.086	8.125	8.130	32.471	453,58	-78,19
+	+	+	+	+	7.120	7.106	7.095	7.115	28.436	120,67	-77,04

Tablo 4.5' de ise bu gözlem değerlerine göre her bir faktör ve etkileşimin yakıt akışına ve varyansa (değişkenliğe, yani kalitesizliğe) olan etkisi gösterilmektedir.

Etki değerleri, incelemek istediğimiz faktör sütun işareti ile toplam çıkış akışının bulunduğu sütun çarpımlarının toplanması ve bu toplamın deney sayısının yarısına bölünmesi ile elde edilir. Etkileşimlerin etkisi de aynı yöntemle belirlenir. Fakat etkileşimlere ait bir sütun olmadığı için, etkileşim sütununun işareti etkileşimi oluşturan faktör sütunların çarpılması ile bulunur. Diğer hesaplamalar aynı şekilde yapılır. Buradaki tek istisna ortalama etki hesabında olmaktadır. Ortalama etki hesaplanırken elimizdeki tüm toplam çıkış akışlarını toplayıp toplam deney sayısına bölerek sonucu buluruz.

Ayrıca ortalama etki (tüm faktörlerin düşük düzeyini ifade etmektedir) gibi en yüksek dereceden etkileşim olan ABCDE etkileşimi (tüm faktörlerin yüksek düzeyini ifade etmektedir) de toplam deney sayısına bölünür.

Etkiler (yakıt akışına olan);

$$I_{ort} = (20718 + 19445 + 20799 + 20546 + \dots + 28490 + 32471 + 28436) / 32 = 24977,50$$

$$I_A = (-20718 + 19445 - 20799 - 20546 - \dots + 28490 - 32471 + 28436) / 16 = -1881,88$$

.....

$$I_{ABCDE} = (-20718 + 19445 + 20799 + \dots - 28490 - 32471 + 28436) / 32 = -22,75$$

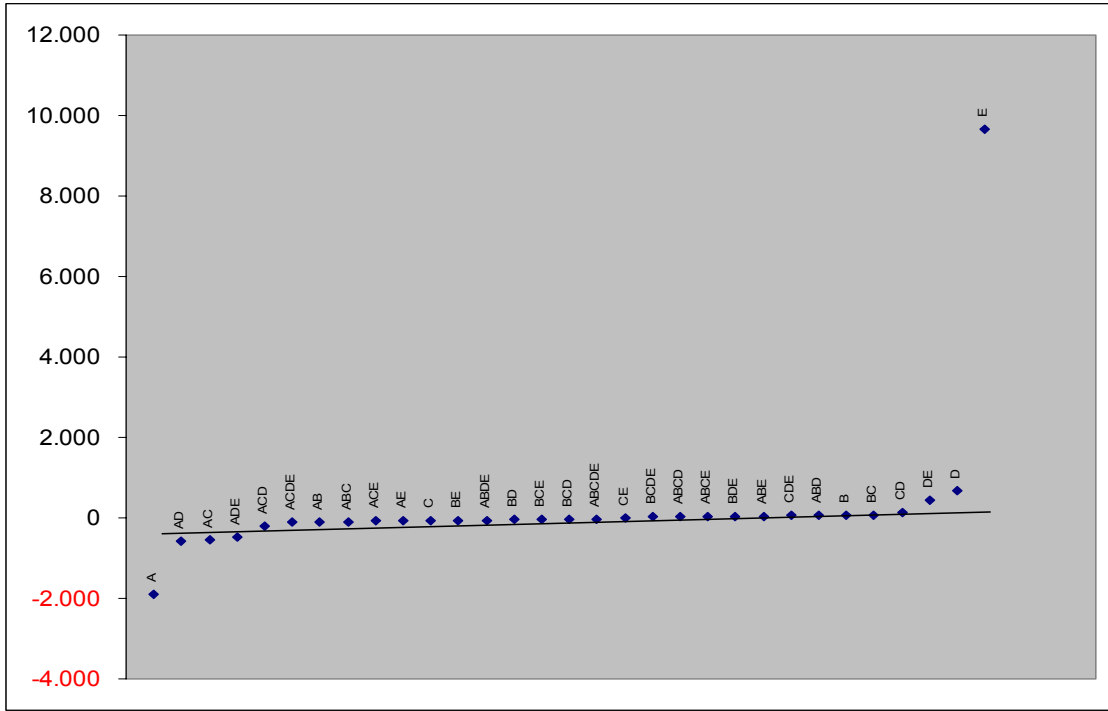
şeklinde hesaplanmaktadır.

Aynı şekilde Tablo 4.3'deki log(s) değerlerine göre her bir faktör ve etkileşimin varyans üzerindeki etkisi tespit edilir. Burada sadece formüldeki toplam çıkış akışı yazılan yerlere ilgili log(s) değerlerinin yazılması yeterli olmaktadır.

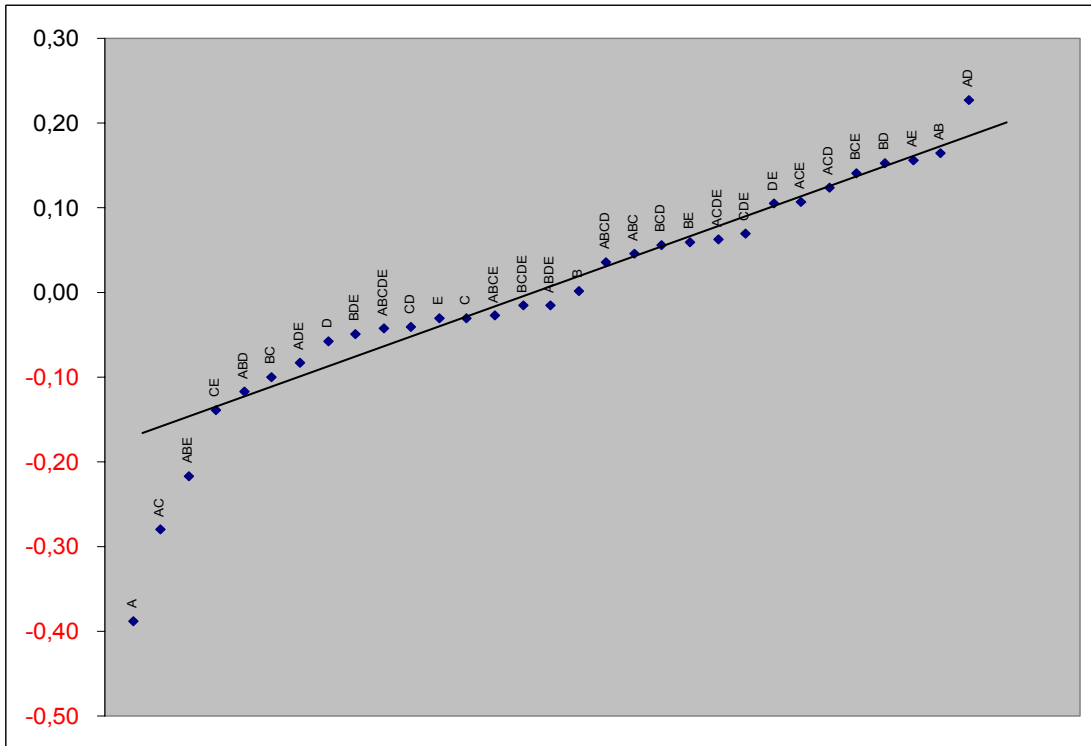
Tablo 4.5. Faktör ve etkileşimler için hesaplanan etki değerleri

Faktör / Etkileşim	Yakıt Akışına Etkisi	Varyans Üzerindeki Etkisi
Ortalama Etki	24.977,50	1,124
A	-1.881,88	-0,388
B	75,88	0,002
C	-70,75	-0,030
D	673,25	-0,057
E	9.665,75	-0,031
AB	-98,25	0,164
AC	-555,38	-0,279
AD	-583,13	0,228
AE	-73,13	0,156
BC	77,88	-0,101
BD	-40,88	0,152
BE	-60,38	0,059
CD	145,75	-0,041
CE	-1,00	-0,138
DE	434,75	0,105
ABC	-94,50	0,046
ABD	51,50	-0,117
ABE	49,50	-0,217
ACD	-187,38	0,124
ACE	-82,13	0,107
ADE	-463,63	-0,084
BCD	-29,13	0,057
BCE	-38,38	0,141
BDE	44,13	-0,049
CDE	51,25	0,069
ABCD	42,00	0,035
ABCE	43,75	-0,027
ABDE	-55,50	-0,015
ACDE	-101,38	0,063
BCDE	23,88	-0,016
ABCDE	-22,75	-0,042

Hesaplanan etki değerlerini grafik üzerine aktardığımızda yakıt akışını ve varyansı etkileyen faktörler hemen göze çarpmaktadır. Bunun için bulduğumuz etki değerleri ortalama etki değeri hariç tutularak en küçükten en büyüğe doğru sıralanır ve bu sırayla grafiğe aktarılır. Daha sonra oluşan noktaların ortasından geçecek şekilde bir doğru çizilir. Bu doğrudan sapma gösteren etki yada etkileşimler anlamlıdır denilir. Bu yöntemle göre yakıt akışını etkileyen faktör ve etkileşimler Şekil 4.3’de varyansı etkileyen faktör ve etkileşimler ise Şekil 4.4’de grafik üzerinde sunulmuştur.



Şekil 4.3. Tam faktöriyel deneye göre yakıt akışına etki eden faktör ve etkileşimler



Şekil 4.4. Tam faktöriyel deneye göre varyansa etki eden faktör ve etkileşimler

Şekil 4.3'den de anlaşıldığı gibi yakıt akışını en fazla etkileyen faktör E (hava basıncı), ikinci önemli faktör ise A (kompresör giriş sıcaklığı)'dır. Hava basıncı yakıt akışını arttırma yönünde etki gösterirken kompresör giriş sıcaklığı yakıt akışını azaltıcı bir etki göstermektedir.

Aynı şekilde Şekil 4.4'de ise varyansı etkileyen faktör ve etkileşimler görülmektedir. A faktörünün, AC ikili etkileşiminin ve ABE üçlü etkileşiminin varyansı azaltıcı, AD etkileşiminin ise varyansı arttırıcı bir etkisi vardır.

Grafik yöntemi görsel olarak en etkili faktörleri kolayca görmemizi sağlamasına rağmen istatistiksel olarak tam sonuçlara ulaşmamızı sağlayamaz. Tam sonuçlara ulaşmak için elde edilen deney sonuçlarının varyans analizi ile çözümlenmesi gerekmektedir. Varyans analizi, hesaplanması zaman alan ve zor bir yöntem olmasına rağmen, bilgisayarda çözüm sağlayan istatistik paket programlarıyla bu zorluk ortadan kaldırılmıştır.

Varyans analizi yöntemiyle çözüm varyansa etki eden faktörlerin belirlenmesi amacıyla değil, sadece yakıt akışını etkileyen faktör ve etkileşimlerin belirlenmesi amacıyla çözülmektedir.

Varyansa etki eden faktörlerin bu yöntemle çözülememesi, ilgili faktör ve etkileşimler için standart sapmaların logaritmalarının alınarak değerlerin birbirine yaklaştırılmasından ve varyans analizinin bu nedenle doğru sonuç vermeyecek olmasından kaynaklanmaktadır.

Varyans analizi çözümlerine başlamadan önce inceleyeceğimiz faktör ve etkileşimlerin etkili olup olmadığına dair hipotezlerimizi kurmamız gerekir.

H_0 = Faktör etkili değildir.

H_1 = Faktör etkilidir.

F_{hesap} değerleri incelenen faktör yada etkileşimin kareler toplamı yardımıyla bulunmaktadır.

$$\text{Kareler Toplamı} = KT_{faktör} = \left[\frac{(2^{(k-1)} * Etki_{faktör})^2}{r * 2^k} \right] \quad (4.2)$$

r: deneylerin tekrar sayısı

k: faktör sayısı

$$KT_A = \left[\frac{(2^{5-1} * (-1881,88))^2}{4 * 2^5} \right] = 7082907$$

şeklinde bulunur. Kareler ortalaması (KO) ise faktör serbestlik derecesinin KT'na bölünmesi ile hesaplanır. Son olarak etki KO'sı hata KO'sına bölünerek F_{hesap} değeri bulunur ve hipotezler test edilir.

A faktörü için F değeri 2201,641 olarak hesaplanmıştır. Tablo değeri $F_{0,05;1;96} = 3,93$ olduğundan $F_{hesap} > F_{tablo}$ koşulu desteklenmektedir. Sonuç olarak A faktörü % 95 güvenilirlikte yakıt akışını etkilemektedir.

Diğer faktör ve etkileşimler için de aynı yöntemle yakıt akışını etkileyip etkilemedikleri tespit edilir. Uygulamamızda, yapılan 128 deney sonucu SPSS 11.5 istatistik paket programıyla çözülmüş ve anlamlı etkiler ve etkileşimler tespit edilmiştir. Program sonuçları Tablo 4.6'da görülmektedir.

Tablo 4.6. Tam faktöriyel tasarıma göre varyans analizi sonuçları

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	197229436,000(a)	31	6362239,871	1977,629	,000
Intercept	4991004050,000	1	4991004050,000	1551396,471	,000
A	7082907,031	1	7082907,031	2201,641	,000
B	11514,031	1	11514,031	3,579	,062
C	10011,125	1	10011,125	3,112	,081
D	906531,125	1	906531,125	281,785	,000
E	186853446,125	1	186853446,125	58081,255	,000
A * B	19306,125	1	19306,125	6,001	,016
A * C	616882,781	1	616882,781	191,751	,000
B * C	12129,031	1	12129,031	3,770	,055
A * B * C	17860,500	1	17860,500	5,552	,020
A * D	680069,531	1	680069,531	211,392	,000
B * D	3341,531	1	3341,531	1,039	,311
A * B * D	5304,500	1	5304,500	1,649	,202
C * D	42486,125	1	42486,125	13,206	,000
A * C * D	70218,781	1	70218,781	21,827	,000
B * C * D	1696,531	1	1696,531	,527	,469
A * B * C * D	3528,000	1	3528,000	1,097	,298
A * E	10694,531	1	10694,531	3,324	,071
B * E	7290,281	1	7290,281	2,266	,136
A * B * E	4900,500	1	4900,500	1,523	,220
C * E	2,000	1	2,000	,001	,980
A * C * E	13489,031	1	13489,031	4,193	,043
B * C * E	2945,281	1	2945,281	,916	,341
A * B * C * E	3828,125	1	3828,125	1,190	,278
D * E	378015,125	1	378015,125	117,502	,000
A * D * E	429896,281	1	429896,281	133,628	,000
B * D * E	3894,031	1	3894,031	1,210	,274
A * B * D * E	6160,500	1	6160,500	1,915	,170
C * D * E	5253,125	1	5253,125	1,633	,204
A * C * D * E	20553,781	1	20553,781	6,389	,013
B * C * D * E	1140,031	1	1140,031	,354	,553
A * B * C * D * E	4140,500	1	4140,500	1,287	,259
Error	308842,000	96	3217,104		
Total	5188542328,000	128			
Corrected Total	197538278,000	127			

Varyans analizi sonuçlarına göre yüzde 95 güvenilirlikte, incelediğimiz 5 faktörden A (kompresör giriş sıcaklığı), D (giriş akışı) ve E (hava basıncı) yakıt akışını etkileyen faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ayrıca, bu ana faktörlere ek olarak ikili etkileşimlerden AB, AC, AD, CD ve DE etkileşimleri, üçlü etkileşimlerden ABC, ACD, ACE ve ADE etkileşimleri, dörtlü etkileşimlerden ise ACDE etkileşimi anlamlı olarak bulunmuştur.

Uygulamamızda, genelde rastlanmayan yüksek derecedeki etkileşimlerin bile etkili olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi felsefesindeki yüksek dereceden etkileşimlerin daha etkisiz olduğu ve deneylerin bir kısmının yapılarak, yani yüksek dereceden etkileşim etkilerinin ana faktör yada düşük düzeyli etkileşimlere dahil edilerek optimum sonuçlara ulaşılabileceği savını desteklememektedir.

Buna rağmen, Taguchi'nin ortogonal dizilerde belirttiği şekilde ABCDE etkileşimine göre deney düzenini 2 bloğa ayırarak çözümlene yapıldığında, ABCDE etkileşiminin + yada - bloğunun birini seçmemiz gerekecektir. Biz + bloğu aldığımızı varsayarsak elimizdeki deney sonuçları Tablo 4.7'deki gibi oluşacaktır.

Tablo 4.7. ½ Kesirli faktöriyel deney tasarımı için yapılan deney sonuçları

Test No	A	B	C	D	E	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4	Çıkış Akışı Toplam
2	+	-	-	-	-	4.864	4.860	4.856	4.865	19.445
3	-	+	-	-	-	5.204	5.195	5.214	5.186	20.799
4	-	-	+	-	-	5.318	5.283	4.678	5.267	20.546
5	-	-	-	+	-	5.246	5.235	5.227	5.239	20.947
6	-	-	-	-	+	7.402	7.419	7.442	7.425	29.688
17	+	+	+	-	-	4.712	4.721	4.714	4.713	18.860
18	+	+	-	+	-	4.895	4.905	4.862	4.904	19.566
19	+	+	-	-	+	7.262	7.294	7.275	7.265	29.096
20	+	-	+	+	-	4.757	4.758	4.750	4.756	19.021
21	+	-	+	-	+	7.128	7.132	7.128	7.123	28.511
22	+	-	-	+	+	7.306	7.325	7.336	7.304	29.271
23	-	+	+	+	-	5.398	5.423	5.396	5.406	21.623
24	-	+	+	-	+	7.476	7.460	7.457	7.432	29.825
25	-	+	-	+	+	7.860	7.813	7.813	7.845	31.331
26	-	-	+	+	+	8.079	8.068	8.086	8.078	32.311
32	+	+	+	+	+	7.120	7.106	7.095	7.115	28.436

Bu gözlem değerlerine göre her bir etki ve etkileşim için eşdeğer ve hesaplanmış etki değerleri Tablo 4.8' de verilmiştir.

Tablo 4.8. ½ Kesirli faktöriyel deney tasarımı faktör ve etkileşimleri için eşdeşler ve etki değerleri

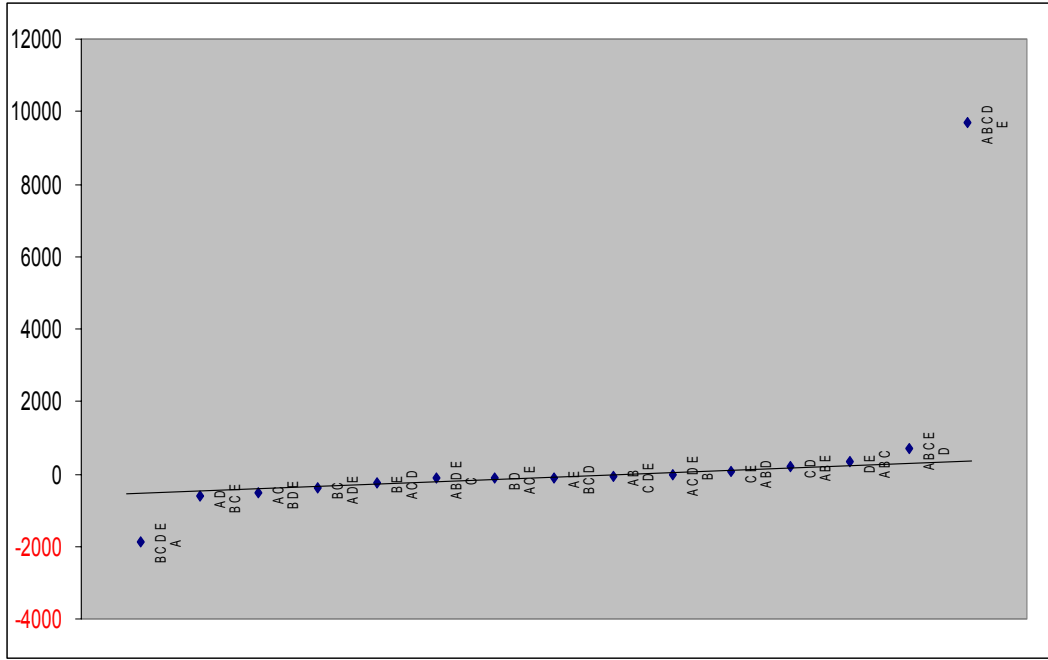
Faktör / Etkileşim	Eşdeş	Etki Değeri
A	BCDE	-1.858,00
B	ACDE	-25,50
C	ABDE	-126,25
D	ABCE	717,00
E	ABCD	9.707,75
ABC	DE	340,25
ABD	CE	50,50
ABE	CD	195,25
ACD	BE	-247,75
ACE	BD	-123,00
ADE	BC	-385,75
BCD	AE	-102,25
BCE	AD	-621,50
BDE	AC	-511,25
CDE	AB	-47,00
ABCDE	Ortalama Etki	24.954,75

Etki değerlerinin hesabı tam faktöriyel tasarımdaki formülle hesaplanmıştır. Burada elde edilen etki değerlerine, eşdeşlerin tam faktöriyel tasarımda hesaplanan etki değerleri yardımıyla da ulaşılabilir.

$$I_{A(kesirli)} = I_{A(tam)} + I_{BCDE(tam)} = -1881,88 + 23,88 = -1858$$

Aynı şekilde bulunan bu etki değerlerine göre KT hesaplanıp hangi faktör ve etkileşimlerin yakıt akışını etkilediği tespit edilir. Burada dikkat edilecek husus eşdeşler olmaktadır. Bloklamada elimizde ana faktörler, üçlü etkileşimler ve beşli etkileşim kalmıştı. Bunlardan beşli etkileşim ortalama etki ile eşdeş olduğu için ortalama etkinin etki değeriyle birleşmiş ikili etkileşimler üçlü etkileşimlerle birleşmiş, ana faktörler de dördü etkileşimlerle birleşmiştir.

Bulunan bu etki değerlerine göre grafik çözümü Şekil 4.5’de görülmektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında ana faktörler için hesaplanan etki değerlerinde büyük ölçüde bir değişiklik olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.5. ½ Kesirli faktöriyel deney sonuçlarına göre etki ve etkileşimler

SPSS 11.5 paket programında bulunan sonuçlar ise Tablo 4.9’da gösterilmektedir.

Tablodaki her bir faktör ve etkileşim için F_{hesap} değeri bulunduğunda;

Ana faktörlerden A, D ve E faktörlerinin, üçlü etkileşimlerden ise BDE, BCE, ADE, ACD, ABE ve ABC etkileşimlerinin yakıt akışını etkilediği görülmektedir.

Tablo 4.9. ½ Kesirli faktöriyel tasarıma göre varyans analizi sonuçları

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	99265310,250(a)	15	6617687,350	1097,303	,000
Intercept	2490958190,250	1	2490958190,250	413035,006	,000
A	3452164,000	1	3452164,000	572,416	,000
B	650,250	1	650,250	,108	,744
C	15939,062	1	15939,062	2,643	,111
D	514089,000	1	514089,000	85,243	,000
E	94240410,063	1	94240410,063	15626,352	,000
C * D * E	2209,000	1	2209,000	,366	,548
B * D * E	261376,563	1	261376,563	43,340	,000
B * C * E	386262,250	1	386262,250	64,048	,000
B * C * D	10455,063	1	10455,063	1,734	,194
A * D * E	148803,063	1	148803,063	24,674	,000
A * C * E	15129,000	1	15129,000	2,509	,120
A * C * D	61380,063	1	61380,063	10,178	,003
A * B * E	38122,563	1	38122,563	6,321	,015
A * B * D	2550,250	1	2550,250	,423	,519
A * B * C	115770,063	1	115770,063	19,196	,000
Error	289481,500	48	6030,865		
Total	2590512982,000	64			
Corrected Total	99554791,750	63			

4.4. Uygulama Sonucu

Elde edilen sonuçlara göre ½ kesirli deney yapmakla tam faktöriyel deneyde bulduğumuz bazı etkileri tespit edemedik. Bunun ana nedeni daha öncede belirttiğimiz gibi yüksek düzeyden etkileşimlerin bizim deney düzenimizde etkili olarak bulunması oldu. Bir diğer sebep ise tekrar sayısının yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.

Eşdeşleri de dikkate alarak değerlendirme yaptığımızda ise 3 adet etkileşimin (AB, ACE ve ACDE) etkili olarak bulunmadığı görülmektedir. ACDE ve ACE etkileşimlerinin anlamlı bulunmaması, veri kaybı nedeniyle yüksek dereceden etkileşimlerde zaten beklenen bir durumdur. AB etkileşimi ise, F değerinin F tablo değerine yakın olmasından dolayı kesirli deney tasarımında anlamlı bulunmamıştır.

Diğer faktör ve etkileşimlerde ise kendilerinin yada eşdeşlerinin anlamlı olarak tespit edildiği görülmektedir.

Her iki yöntemle yakıt akışını etkileyen faktörleri ve eşdeşlerini gösterdiğimizde açıkta kalan etkiler daha net görülecektir (Tablo 4.10).

Tablo 4.10. Her iki yöntemle yakıt akışını etkileyen faktörler

TAM FAKTÖRİYEL	½ KESİRLİ TASARIM	
ETKİLİ FAKTÖR	ETKİLİ FAKTÖR	EŞDEŞ
A	A	BCDE
D	D	ABCE
E	E	BCDE
AB		
AC	BDE	AC
AD	BCE	AD
CD	ABE	CD
DE		DE
ABC	ABC	
ACD	ACD	BE
ACE		
ADE	ADE	BC
ACDE		

Sonuç olarak her iki yöntemle de uçaklarda yakıt tüketimini etkileyen başlıca etken hava basıncı olarak karşımıza çıkmaktadır. Hava basıncının yüksek olduğu düşük irtifalarda uçuş yapmak uçağın yakıt tüketimini arttırıcı etkide bulunacaktır.

Kompresör giriş sıcaklığı ise motor çalışmasıyla ilgili bir kavramdır. Buradan motorun ısısının arttıkça yakıt tüketimini azaltıcı bir etkisi olacağını söyleyebilmekteyiz. Ayrıca motor ısısının yüksek olması yakıt tüketimindeki değişkenliği de azaltıcı bir etki göstermektedir.

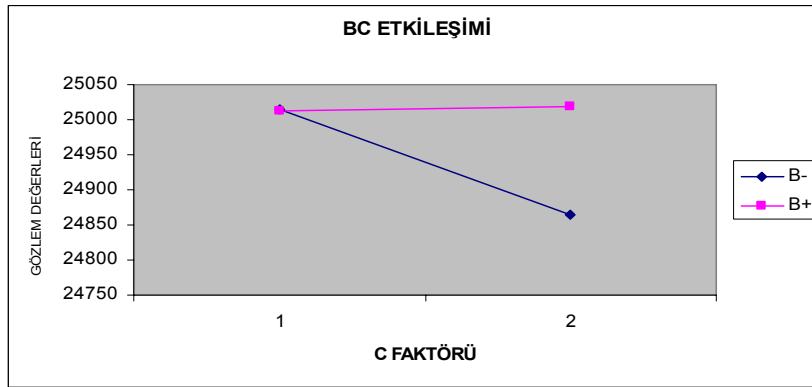
Yakıt tüketimindeki 3. etkili faktörümüz ise giriş akışıdır. Giriş akışını etkileyen ise uçağın depolarındaki yakıt miktarıdır. Depolar ne kadar dolu ise yakıt tüketimi de o ölçüde fazla olacaktır.

Ulaştığımız sonuçlar gerçek durumla paralellik göstermektedir. Uçakların yakıt tüketimlerinin en fazla olduğu zamanlar kalkış sırasında olmaktadır. Burada kalkış için harcanan enerjinin yanında, o anda irtifanın düşük olması, yani hava

basıncının yüksek oluşu, yakıt depolarının dolu olmasından kaynaklanan Ana Yakıt Kontrol ünitesine giren akışın yüksek olması ve uçak motorlarının yeni çalıştırılmasına bağlı olarak motor ısısının düşük oluşu kalkış sırasındaki yakıt tüketimini arttırmaktadır.

Elde edilen sonuçlara göre uçaklarda yakıt akışını azaltmak için kompresör giriş sıcaklığı (A faktörü) yüksek düzeyde tutulmalı, giriş akışı (D faktörü) ve hava basıncı (E faktörü) ise düşük düzeyde tutulmalıdır.

Diğer iki faktör ise yakıt akışına etkili olmamakla birlikte hangi seviyelerde tutacağımız belirlenmemiştir. Bu amaçla B ve C faktörünün seviyelerini belirlemek için BC etkileşiminin grafiğini çizdiğimizde Şekil 4.6'daki gibi olacaktır.



Şekil 4.6. BC Etkileşim Grafiği

Grafiğe baktığımızda B'nin düşük, C'nin ise yüksek düzeyinin seçilmesi uygun görülmektedir [9].

Buna göre, tam faktöriyel tasarım tablosuna baktığımızda A ve C yüksek düzeyde, B, D ve E düşük düzeydeyken oluşan yakıt akışı 18.950, varyans ise 31,00 olarak bulunmuştur.

Buna rağmen, Taguchi S/G oranının en yüksek olduğu A, B ve C faktörlerinin yüksek, D ve E faktörlerinin düşük olduğu deney düzeninde ise yakıt akışı 18.860, varyans ise 16,67 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre, Taguchi S/G oranı amaç fonksiyonu daha iyi sağlayan bir kombinasyondur.

5. SONUÇ

Endüstride zaman ve maliyet açısından bilimsel metotların kullanılması bir zorunluluktur. Deneysel tasarım metotları da, işletmelerin artan rekabet şartlarında pazar paylarını arttırabilmeleri ve etkin çalışabilmeleri için önemli bir rol oynamaktadır.

Taguchi yöntemi, üründe ve süreçte, varyasyon oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin değerlerini optimal seçerek, ürün ve süreçteki varyasyonu en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım yöntemidir. Bu yöntem; ürün kalitesinin gelişmesinde etkili olmasının yanı sıra, kalite geliştirmede çok daha az deneme ile aynı sonuçları alma imkanını sağlamaktadır.

Çalışmada, Taguchi yönteminin daha az deney sayısı ile tam faktöriyel tasarımdaki gerçek sonuçları bulması üzerinde durularak performansı etkileyen faktörler tespit edilmeye çalışılmış, Taguchi'nin sinyal gürültü oranı (S/G) daha küçük daha iyi formasyonunda kullanılarak yakıt akışının ve varyasyonunun minimum olduğu faktör kombinasyonu tespit edilmiştir. Ayrıca log(s) değerlerine göre A faktörünün varyansı düşürücü etkide bulunduğu saptanmıştır.

Uygulamamızda, 128 veri ile yapılan tam faktöriyel tasarım ve 64 veri ile yapılan Taguchi'nin L16 deney düzeni birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir. Sonuçların aynı olmaması incelenen ünitenin uçak motorlarında kullanılan hassas bir cihaz olması ve bu nedenle yüksek dereceden etkileşimlerin anlamlı çıkmasından kaynaklanmaktadır.

Çoğu endüstri uygulamalarında ise bu türden yüksek düzeyli etkileşimler anlamlı çıkmamaktadır.

Genel olarak bakacak olursak, tam faktöriyel deney tasarımı ve Taguchi L16 deney düzeni ana faktörler bazında aynı sonuçları vermiş, sinyal gürültü oranına göre yapılan çözümde de aynı sonuçlara ulaşılmış yakıt akışını motor sıcaklığının düşürücü, depoda bulunan yakıt miktarı ve irtifanın ise arttırıcı etkide bulunduğu tespit edilmiştir.

Analizler sonucunda, kompresör giriş sıcaklığı için 0,2960 inch CIT değeri, gaz kolu için 100 derece, motor devri için 3160 devir/dak, giriş akışı için

8000 PPH ve hava basıncı için 100 PSI en düşük yakıt akışını veren değerler olarak bulunmuştur. Bulunan sonuçlar pratikteki uçuş koşullarını değiştirmeyecek olsa da teorik olarak uçuş sırasındaki yakıt tüketimini etkileyen faktörler doğru olarak belirlenmiştir.

Taguchi tekniği getirdiği kolaylıkların yanında deney düzeneğinde seçilen ortogonal diziye bağlı olarak yüksek düzeyden olan etkileşimleri yada tüm etkileşimleri göz ardı edebilmektedir. Bu tekniğin en zayıf yönüdür. Bu gibi durumların önlenmesi açısından deneylerin başlangıç aşamasında konu üzerinde deneyimli çalışanların fikir ve görüşleri faktör, etkileşim ve düzeylerin belirlenmesi aşamasında çok yararlı olmaktadır.

Bu zayıf yönüne rağmen Taguchi yöntemi maliyet-etkinlik açısından değerlendirildiğinde oldukça faydalı bir yöntemdir. Özellikle faktör sayısının arttığı durumlarda tam faktöriyel tasarımın uygulanması imkansız olmaktadır. 15 faktörlü bir deney düzeninde tam faktöriyel tasarım yapılabilmesi için $2^{15} = 32768$ deneyin yapılması gerekecektir. Ayrıca bir de bu deneylerin tekrarlı yapıldığı düşünülecek olursa tam faktöriyel tasarımın imkansızlığı daha iyi anlaşılacaktır.

KAYNAKLAR

1. KOLARIK, W.J., *Creating Quality, Concepts, Systems, Strategies and Tools*, McGraw-Hill Inc., Industrial Engineering Series, Singapore (1995).
2. 1. HİBM kalite güvence başkanlığı makaleleri, [http-1:http:\\ www.1hibm.hvkk.tsk/GENEL/G_KGB/anasayfa2/Kalite%20kavramının%20gelişimi.htm](http://www.1hibm.hvkk.tsk/GENEL/G_KGB/anasayfa2/Kalite%20kavramının%20gelişimi.htm) (2005).
3. BURNAK, N., *Toplam Kalite Yönetimi-İstatistiksel Süreç Kontrolü*, O.G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi, TEKAM Yayın No: TS-97-008-NB, (1997).
4. FEIGENBAUM, A.V., *Total Quality Control*, McGraw-Hill Inc., New York, (1961).
5. ATAŞ, B., *Sürekli iyileştirmede altı sigma yaklaşımı*, Yüksek Lisans Tezi, O.G.Ü., F.B.E., Eskişehir, (2001).
6. 1.HİBM, *Toplam Kalite Kontrol*, Beyaz Kitap Dizisi, Eskişehir, (1993).
7. ŞİRVANCI, M., *Kalite İçin Deney Tasarımı-Taguchi Yaklaşımı*, Literatür Yayınları, İstanbul, (1997).
8. KOÇ, S., *Kritik ünitelerin performansını etkileyen faktörlerin deneysel tasarım yöntemi ile optimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, F.B.E., Adana, (2003).
9. MONTGOMERY, D.C., *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley&Sons Inc., Canada, (1997).
10. ROY, R.K., *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold, New York, (1990).
11. KELEŞ, Ö. ve TAPTIK, Y., *Kalite Savaşı*, Kalder Yayınları No:23, İstanbul, (1998).
12. ÜNAL, Y.A., *Şanzıman giriş mili imalatındaki proses parametrelerine taguchi metodunun uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, F.B.E., İstanbul, (2001).
13. PIGNATIOLLE, J.J. ve BURMAN, J.S., *Discussion on Off-Line Quality Control, Parameter Desing, the Taguchi Method by R.N. Kacker*, Journal of Quality Technology, **17**, 198-206, (1985).

KAYNAKLAR

14. MAGHSOODLOO, S., *The Exact Relation of Taguchi's Signal-to-Noise Ratio to His Quality Loss Function*, Journal of Quality Technology, **22 (1)**, 57-67, (1990).
15. ABRAHAM, B. ve MACKAY, J., *Variation Reduction and Designed Experiments*, International Statistical Review, **61 (1)**, 121-129, (1993).
16. ERBAŞ, S.O. ve OLMUŞ, H., *Deney Düzenleri ve İstatistik Analizleri*, Gazi Kitabevi, Ankara, (2005).
17. JURAN, J.M. ve GRYNA, F.M., *Quality Control Handbook*, McGraw-Hill Inc., New York, (1988).
18. ROSS, P.J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill Inc., Singapore, (1989).
19. KATZ, L.E. ve PHADKE, M.N., *Macro Quality with Micro Money, Quality Control, Robust Design and the Taguchi Method*, Wadsworth & Brook, California, (1989).