

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOLİTOGRAFI İŞLEMİNDE UV SERTLEŞTİRME
PARAMETRELERİNİN DENEY TASARIMI İLE
ENİYİLENMESİ

FATMA GÖZDE AYTEKİN

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOLİTOGRAFI İŞLEMİNDE UV SERTLEŞTİRME
PARAMETRELERİNİN DENEY TASARIMI İLE
ENİYİLENMESİ

FATMA GÖZDE AYTEKİN

Yrd.Doç.Dr. Kasım BAYNAL
Danışman, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Gülşen AYDIN KESKİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Semra BORAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 02.07.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Her geçen gün bilişim sistemlerine olan ihtiyacın giderek artması, bilişim ve bilgi güvenliği konularının da gün geçtikçe önem kazanmasına sebep olmuştur. Toplumlar bilgi güvenliği ve bilişim alanlarında teknolojik bağımsızlıklarını sağlamak adına çalışmalarını sürdürmektedirler. Bilgi güvenliği kapsamında milli güvenliğini arttırmak ve dışa bağımlılığını azaltmak için ülkeler, teknolojik ihtiyaçlarına yönelik yenilikçi ve milli çözümler geliştirmektedirler.

Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı (YİTAL), ileri yarıiletken üretim süreçleri geliştiren ve bu süreçlerle üretilmiş, Türkiye'nin kritik uygulamalarında kullanılan askeri standartlarda ürünleri içeren bir laboratuvardır. Bu çalışma ile tümdevre üretimi fotolitografi sürecinin UV sertleştirme adımında sıcaklık ve zaman ile ilgili parametrelerin aşınmaya karşı rezist direnci üzerindeki etkilerinin görülmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada deney tasarımı metodu uygulanarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel olarak analiz edilmesi ile süreç kalitesini arttıracak faktörlerin en uygun seviyelerinin bulunması hedeflenmektedir.

Çalışmam süresince her türlü yardım ve fedakârlığı sağlayan, bilgi, tecrübe ve anlayışı ile çalışmama ışık tutan Yrd. Doç. Dr. Kasım BAYNAL'a,

Bu özel alanda çalışmamı yapmam için YİTAL'in kapılarını bana açan Aziz Ulvi ÇALIŞKAN ve Sema İMRAHORİLYAS'a,

Uygulama aşamasında fikirlerini sunarak, teknik bilgisini ve yardımını esirgemeyen başta Zeliha ÖZDOĞAN olmak üzere tüm YİTAL çalışanlarına,

Yüksek lisans öğrenimim boyunca birlikte çalışmaktan, sabahlamaktan, ödev hazırlamaktan ve daha birçok anı paylaşmaktan keyif aldığım arkadaşım Hülya YÖRÜKOĞLU'na, değerli zamanını ayırarak çalışmama sağladığı katkılar için Nurhan ADA'ya, bugüne kadar gösterdiği sabır ve destek için Gökçe KARDAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı; benden maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen aileme ve yüksek lisansa başlama sebebim olan canım babama ithaf ederim.

Temmuz - 2014

Fatma Gözde AYTEKİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ	1
1. TUMDEVRE VE TUMDEVRE TEKNOLOJİSİNDE GELİŞİM	4
1.1. Tümdevre.....	4
1.2. Tümdevre Teknolojisinde Gelişim	5
1.3. Türkiye’de Yarıiletken Teknolojileri	9
1.4. Tümdevre Üretiminde Kullanılan Temel Süreç Adımları.....	10
1.5. Litografi.....	12
2. KALİTE VE TOPLAM KALİTE YÖNETİMİ	17
2.1. Kalite Kavramı	18
2.2. Kalitenin Tarihsel Gelişimi	19
2.3. Toplam Kalite Yönetimi.....	21
3. DENEY TASARIMI.....	25
3.1. Deney Tasarımının Tarihsel Gelişimi	25
3.2. Deney Tasarımı Yöntemi	28
3.3. Deney Tasarımı Sürecinde Kullanılan Genel Kavramlar	29
3.4. Deney Tasarımı İçin Temel Basamaklar	30
3.5. Tam Faktoriyel Deney Tasarımı.....	32
3.6. Kesirli Faktoriyel Deney Tasarımı	34
3.7. Taguchi Metodu	36
4. UYGULAMA	40
4.1. Uygulamaya Giriş.....	40
4.2. Modelin Tanımlanması ve Deneylerin Gerçeklenmesi	41
4.2.1. UV sertleştirme sürecinin tanımlanması	41
4.2.2. Yanıt değişkeninin belirlenmesi.....	42
4.2.3. Faktörlerin belirlenmesi	43
4.2.4. Faktör seviyelerinin belirlenmesi	44
4.2.5. Deney setinin seçimi ve deneylerin gerçekleştirilmesi.....	45
4.2.6. Tasarım matrisi ve deney sonuçları.....	47
4.3. Verilerin İstatistiksel Analizi	47
4.3.1. Varyans analizi (ANOVA)-1	48
4.3.2. Artıkların analizi	49
4.3.3. Varyans analizi (ANOVA)-2	50
4.3.4. Etkileşim grafiği.....	51
4.3.5. Pasta grafiği.....	52
4.3.6. Ana etkiler grafiği	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54

KAYNAKLAR	56
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	61
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Silisyum pul üzerinde tümdevrelerin şematik görünüşü.....	7
Şekil 1.2.	Tümdevre üretimi.....	8
Şekil 1.3.	Litografi işleminin gerçekleştirildiği sarı odadan görüntüler	9
Şekil 1.4.	Pul üzerinde büyültülmüş tasarım görüntüsü.....	11
Şekil 1.5.	Pul üzerinde büyültülmüş üretim görüntüsü	11
Şekil 1.6.	Litografi ve aşındırma süreç adımları	14
Şekil 1.7.	Fotolitografi ile Örneğin Transferi.....	15
Şekil 1.8.	Bir pn eklemi oluşturmak için uygulanan fotolitografik işlem dizisi	16
Şekil 1.9.	SiO ₂ üzerinde pencere oluşturma	16
Şekil 2.1.	PUKÖ yönetimi ve araçları.....	22
Şekil 3.1.	Kalite yöntemlerinin karşılaştırması	27
Şekil 3.2.	Bir sistem veya sürecin genel gösterimi	28
Şekil 4.1.	UV sertleştirme süreci	42
Şekil 4.2.	Fusion 200 PCU fotostabilizasyon sürecinin şematik gösterimi	46
Şekil 4.3.	Fusion 200 PCU fotostabilizasyon sürecinin yakın gösterimi	46
Şekil 4.4.	ANOVA sonuçları-1	48
Şekil 4.5.	Artık grafikleri	49
Şekil 4.6.	Normal olasılık grafiği.....	50
Şekil 4.7.	ANOVA sonuçları-2	51
Şekil 4.8.	Etkileşim grafiği	52
Şekil 4.9.	Pasta grafiği	52
Şekil 4.10.	Ana etkiler grafiği	53

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. Dünya çapında en iyi 20 yarıiletken tedarikçi sıralaması	5
Tablo 1.2. DRAM kırmıklarında bellek kapasitesi ve yıllara göre değişimi	6
Tablo 4.1. Faktör ve faktör seviyeleri	44
Tablo 4.2. Deney tasarım matrisi	47

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

°C	: Santigrat Derece
°C/sec	: Eğim
µm	: Mikrometre
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
B	: Bor
GaAs	: Galyum arsenik
Kbit	: Kilobit
P	: Fosfor
Si	: Silisyum
Si ₃ N ₄	: Silicon nitride
SiGe	: Silisyum germanyum
SiO ₂	: Silicon dioxide
Sn	: Saniye

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
Ar-Ge	: Araştırma ve Geliştirme
BJT	: Bipolar Junction Transistor (Çift Birleşim Yüzeyle Transistör)
CEO	: Chief Executive Officer (Yönetim Kurulu Başkanı)
CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor (Tamamlayıcı Metal Oksit Yarıiletken)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Depolanması)
DRAM	: Dynamic Random Access Memory (Dinamik Rastgele Erişimli Bellek)
HBT	: Heterojunction Bipolar Transistor (Karma Çift Birleşim Transistör)
HDTE	: Her Defada Tek Etken
IDC	: International Data Corporation (Uluslararası İnceleme ve Araştırma Kurumu)
IHS	: Global Information Company (Global Bilgi Şirketi)
İPK	: İstatistiksel Proses Kontrol
KOBİ	: Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler
LED	: Light Emitting Diode (Işıklı Diyot)
LPCVD	: Low Pressure CVD (Düşük Basıncılı Kimyasal Buhar Depolanması)
MOS	: Metal Oxide Semiconductor (Metal Oksit Yarıiletken)
NATO	: North Atlantic Treaty Organization (Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü)
NMOS	: N-Channel MOSFET (Çok Kanallı MOSFET)
OD	: Ortogonal Dizin
PCU	: Photo Conductor Unit (Foto İletken Birim)
PMOS	: P-Channel MOSFET (P Kanallı MOSFET)

PUKÖ	: Planla Uygula Kontrol Et Önlem Al
PVD	: Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Depolaması)
S/N	: Signal / Noise (Sinyal / Gürültü)
SPSS	: Statistical Package for The Social Sciences (Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi)
TKY	: Toplam Kalite Yönetimi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TWT	: Traveling Wave Tube (Seyyar Dalga Tüpü)
UV	: Ultraviyole (Mor Ötesi)
vb.	: ve benzeri
VLSI	: Very Large Scale Integration (Çok Büyük Çapta Tümleşim)
YİTAL	: Yarı İletken Teknolojileri Araştırma Laboratuvarı

FOTOLİTOGRAFI İŞLEMİNDE UV SERTLEŞTİRME PARAMETRELERİNİN DENEY TASARIMI İLE ENİYİLENMESİ

ÖZET

Deney tasarımı yaklaşımı, en uygun üretim faktörlerini belirlemek için kullanılan etkin bir istatistiksel metottur. Bir süreç ya da sistemin girdilerinde değişiklik yapılarak çıktıların gözlemlenmesi ve analiz edilmesini sağlamaktadır. Deney tasarımıdaki bu karşılıklı ilişkilerin analiz sonuçları üretim süreci kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir mühendislik aracı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tümdevre üretimi fotolitografi sürecinin; Ultraviyole (UV) sertleştirme adımı için aşınmaya karşı rezist direncini etkileyen farklı faktör ve faktör etkilerinin tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi ile sistematik olarak araştırılması sağlanmıştır. Deneysel sonuçların istatistiksel analizinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. İstatistiksel sonuçlar temel alınarak faktör ve faktör etkileşimleri sınıflandırılmış, UV sertleştirmesinde en yüksek rezist direncini sağlamaya yönelik Son Sıcaklık (°C), Eğim (°C/sn) ve Son Pişirme Süresi (sn) faktörlerinin en uygun seviye ve etkilerinin görülmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ANOVA, Deney Tasarımı, Fotolitografi, Tam Faktöriyel Deney Tasarımı, UV Sertleştirmesi.

UV HARDENING PARAMETERS OPTIMIZATION OF PHOTOLITHOGRAPHY PROCESS WITH DESIGN OF EXPERIMENT

ABSTRACT

The experimental design approach is an active statistical method which is using for determine the optimum production factors. We perform series of experiments on the process making changes in its inputs and analyze corresponding changes in the outputs. Results of analysis of these mutual relationships lead to improvement of process quality. Therefore experimental design is a critically important engineering tool for improvement of manufacturing process quality. In this paper, we systematically investigate different factors and their effects on the the resistance of the resist to etching using a full-factorial experimental design of the UV hardening which is a sub process step of photolithography in a semiconductor production. Analysis of Variance (ANOVA) has been used for statistically analyzing of the experimental results. Based on the statistical results; it is used to determine the significance of individual parameters, and interactions thereof, in achieving higher percentages of correct classification. The importance of this study is illustrated in the UV hardening process where appropriate Final Temperature (C°), Ramp Rate (C°/sec) and Post-bake Time (sec) can be chosen to achieve the best level and their impact of the resistance of the resist to etching.

Keywords: ANOVA, Design of Experiment, Photolithography, Full Factorial Experimental Design, UV Hardening.

GİRİŞ

Dünya elektronik sanayi pazarı 90'lı yılların başından bu yana giderek artmakta olan bir büyüme ile makine, otomobil gibi sanayi sektörlerini geride bırakarak dünyanın bir numaralı pazarı konumuna gelmiştir.

İçinde bulunduğumuz 21.yüzyılda ise dünyada elektronik sanayinin tartışılmaz önderliğini görmekteyiz. Elektronik sanayine öncelik veren bir politika izleyen ülkelerin, kısa sürede gelişmişlik düzeyinde büyük aşama kaydettiğine ilişkin pek çok örnek gösterilebilir. Son yıllarda hızla kalkınan Uzak Doğuda Kore, Tayvan ve Singapur, Avrupa'da ise Finlandiya ve İspanya'nın böyle bir politika izlediği görülmektedir. Bu durum elektronik sanayini özendirme ve yatırımlar ile sağlanmıştır. Bu politikaların temelini Ar-Ge'ye verilen önem ve destek oluşturmaktadır. Dünyanın girmekte olduğu bilgi teknolojileri çağının alt yapısını tümüyle elektronik sanayi ürünleri oluşturacaktır. Pazarı çok dinamik bir biçimde büyüyen bu alandaki gelişmeler olağanüstü hızlı, rekabet ise çok acımasız olacaktır [1].

Günümüzde elektronik, elektromanyetik, mikroelettronik, optik, sayısal işaret işleme ve yazılım teknolojilerinin biraraya gelerek her tür bilginin toplanıp, işlendiği, saklandığı, iletildiği ve erişilebildiği bilgi teknolojilerini edinebilen toplumlar hızla gelişmektedir. Bu toplumlar arasında bilgi teknolojilerinde Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) yapabilen, özgün ve inovatif ürünler geliştirebilen, bu ürünleri kullanarak kendilerini yeniden yapılandırabilen toplumlar ise bilgi toplumu olma özellikleri ile fark yaratacak ve içinde bulunduğunuz çağın baskın güçleri olacaklardır.

VII. Beş Yıllık Plan Çalışmaları kapsamında Elektronik Sanayii Özel İhtisas Komisyonu tarafından hazırlanan Elektronik Sanayii Raporu'nda, dünyanın girmekte olduğu bilgi teknolojileri çağı altyapısının tümü ile elektronik sanayii ürünlerinden oluşacağı belirtilmiştir. Herhangi bir teknoloji alanlarında rekabetçi olabilmek için ürün içindeki yerli katma değerin fikri mülkiyette olmasına önem verilmesi gerektiği,

Yerel katkı payını artırmaya yönelik katma değeri yüksek segmentlere yönelmenin hedeflenmesi vurgulanmıştır [2].

Yerel katkı payını artırmaya yönelik amaç doğrultusunda ülkemizde de çalışmalar sürdürülmektedir. T.C Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü tarafından 2012 yılında yayımlanan Türkiye Elektrik ve Elektronik Sektörü Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2012-2016'da Vizyon, Genel Amaç, Hedefler ve Eylemler bölümünde elektrik ve elektronik sektöründe yer alan alt sektörlerle ilişkin sorun alanları ve çözüme yönelik hedefler belirlenmiştir. Bu hedefler arasında donanım ve yazılımda yerli ürünlerin teşvik edilmesine yönelik faaliyetler özel sektör, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) ve üniversiteler arasındaki işbirliği artırılarak daha fazla ortak teknoloji ve araştırma projeleri ile eğitim çalışmaları yürütüleceği yer almıştır.

Elektronik sektöründe stratejik bileşenler olan; yarı iletkenler, yüksek teknoloji baskı devreleri, özel amaçlı entegre devreler, akıllı sistemler, nanoteknolojik ürünler, Light Emitting Diode (LED), LED display, lazerler, Traveling Wave Tube (TWT) 27 mikrodalga tüp, sensörler, Ferrite core özel kapasitörler ve özel dirençler gibi bileşenlerin üretilmesi ve bu konudaki yerli sanayicinin yapacağı Ar-Ge çalışmalarının teşvik edileceği belirtilmiştir. Ar-Ge Merkezleri uygulamasından Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler (KOBİ)'lerin de faydalanmasına yönelik mekanizmaların geliştirileceği açıklanmıştır. Özellikle temel sektör olan elektronik komponentler, bilhassa yarı iletkenlerin temel bileşenler olduğu ve bu ürünlerin sadece yerel gereksinim için değil, ülkenin milli gelirinin artırılması için dünya pazarlarına yönelik olarak da mutlaka üretilmesi gerektiği belirtilmiştir [3].

Elektronik sanayinin itici gücünü mikroelektronik endüstrisi oluşturmaktadır. 1980 li yılların başından itibaren ağırlıklı olarak silisyum tümdevre üretimine yönelen yarıiletken pazarı 1994 yılında 100 milyar doları aşmış olup, 1993 ve 1994 yıllarında ortalama artış %30 lar düzeyinde olmuştur. Yarıiletken pazarının %85'ini oluşturan tümdevre payının yakın gelecekte %90 lara ulaşması beklenmektedir [4].

İleri yarıiletken üretim süreçleri geliştiren ve bu süreçlerle üretilmiş, Türkiye'nin kritik uygulamalarında kullanılan askeri standartlarda ürünleri olan YİTAL, kağıt

üzerindeki bir tasarımı kılıflanmış ve test edilmiş bir tümdevreye milli olarak dönüştürmektedir [5].

Çalışma, yarıiletken üretim laboratuvarında yarıiletken üretiminin bir alt süreci olan fotolitografi süreci, UV sertleştirme adımının iyileştirilmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Yarıiletken üreticilerinin oldukça yoğun bir rekabet içinde oldukları yarıiletken teknolojisinin dünya ekonomisi üzerindeki etkisi firmalar açısından kalite, zaman ve maliyet konularını çok kritik hale getirmiştir. Bu çalışmada amaçlanan böyle bir süreçte deney tasarımı yönteminden yararlanarak aşındırmaya karşı rezist direncini arttırmak amacıyla UV sertleştirme için en uygun faktör ve faktör seviyelerin belirlenmesini sağlamaktır.

Bu çalışmanın birinci bölümünde tümdevre ve tümdevre teknolojisinin gelişimi hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde kalitenin tarihsel gelişimine değinilmiş ve üçüncü bölümde çalışmada kullanılacak deney tasarımı tekniği anlatılmıştır. Dördüncü bölümde uygulama anlatılmış olup, süreç parametleri ve seviyeler belirlenmiş, deneyler ve istatistiksel analizler yapılmıştır. Son bölümde analizlerden elde edilen sonuçlar açıklanmış ve öneriler sunulmuştur.

1. TÜMDEVRE VE TÜMDEVRE TEKNOLOJİSİNDE GELİŞİM

1.1. Tümdevre

Tümdevre (ya da yonga, kırmık, ip, mikroçip, tümleşik devre, entegre devre), yarıiletken maddeler ile tasarlanmış ince bir ya da birkaç yüzey üzerine yerleŐtirilmiş bir elektronik devredir. Küçük boyutu, hafifliği ve kullanım kolaylığı ile tümdevrelerin, günümüzün modern elektronik sektöründe bilgisayarlardan oyuncaklara kadar geniŐ bir kullanım alanına sahip olduğu ve çok önemli bir yer tuttuğu görülmektedir [6].

Tüm bu ileri teknoloji iŐlemleri gerçekleştiren makinelerin milyon dolarlık maliyetleri bulunmaktadır. Bu tip makinelerden yüzlercesini gerektiren, tam kapsamlı bir laboratuvarın maliyeti ise milyarlarca doları bulabilmektedir. Üreticilerin yaptıkları bu yatırımın karŐılıĐını fazlasıyla aldıkları görülmektedir. 2009 yılında, dünya çapında yapılan yarı iletken satıŐlarından elde edilen toplam gelirin 226 milyar \$ olduğu açıklanmıştır.

Piyasa araştırmaları ile tanınan International Data Corporation (IDC), yarıiletken endüstrisi için 2010 yılında yayımladığı raporunda yonga satıŐının 2014 yılında 344 milyar doları bulacağını öngörmüŐtür. Global bir bilgi şirketi olan Global Information Company (IHS) tarafından hazırlanan yarıiletken pazarı 2013 raporunda yonga üreticilerinin oldukça etin bir rekabet içerisinde oldukları görülmektedir. Tablo 1.1’de 2013 yılının en iyi yarıiletken tedarikçilerinin dünya sıralaması gösterilmiştir [7].

Tablo 1.1. Dünya çapında en iyi 20 yarıiletken tedarikçi sıralaması [7]

2012 Sıralaması	2013 Sıralaması	Şirket İsmi	2012 Geliri*	2013 Geliri*	Yüzdelik Değişimi	Toplam Yüzdesi	Kümülatif Yüzdesi
1	1	Intel	\$47,420	\$46,960	-1,00%	14,80%	14,80%
2	2	Samsung Electronics	\$31,264	\$33,456	7,00%	10,50%	25,30%
3	3	Qualcomm	\$13,177	\$17,341	31,60%	5,50%	30,80%
10	4	Micron Technology	\$6,772	\$14,168	109,20%	4,50%	35,20%
7	5	SK Hynix	\$8,970	\$13,335	48,70%	4,20%	39,40%
5	6	Toshiba	\$11,131	\$12,459	11,90%	3,90%	43,30%
4	7	Texas Instruments	\$12,035	\$11,379	-5,50%	3,60%	46,90%
9	8	Broadcom	\$7,843	\$8,121	3,50%	2,60%	49,50%
8	9	STMicroelectronics	\$8,493	\$8,076	-4,90%	2,50%	52,00%
6	10	Renesas Electronics Coporation	\$9,236	\$7,822	-15,30%	2,50%	54,50%
13	11	Infineon Technologies	\$4,821	\$5,096	5,70%	1,60%	56,10%
12	12	AMD (Advanced Micro Devices)	\$5,297	\$5,076	-4,20%	1,60%	57,70%
14	13	NXP	\$4,114	\$4,658	13,20%	1,50%	59,10%
18	14	MediaTek	\$3,357	\$4,434	32,10%	1,40%	60,50%
11	15	Sony	\$6,109	\$4,394	-28,10%	1,40%	61,90%
16	16	Freescale Semiconductor	\$3,740	\$3,958	5,80%	1,20%	63,10%
15	17	nVidia	\$3,826	\$3,612	-5,60%	1,10%	64,30%
19	18	Marvell Technology Group	\$3,168	\$3,281	3,60%	1,00%	65,30%
22	19	ON Semiconductor	\$2,869	\$2,270	-4,50%	0,90%	66,20%
23	20	Analog Devices	\$2,671	\$2,677	0,20%	0,80%	67,00%
		İlk 20 Şirket	\$196,313	\$213,043	8,50%	67,00%	
		Diğerleri	\$106,612	\$104,833	-1,70%	33,00%	
		Toplam Yarıiletken	\$302,925	\$317,876	4,90%	100,0%	

*Milyon \$

1.2. Tümdevre Teknolojisinde Gelişim

Tümdevre teknolojisi 60'lı yılların başında bipolar analog devrelerin üretimi ile başlamıştır. 1970'te yoğunluğu 1 Kbit olan P-Channel MOSFET (PMOS) teknolojisiyle üretilen bellekler INTEL tarafından piyasaya sürülmüştür. 1968 yılında Denard tarafından bulunan tek transistorlu Dynamic Random Access Memory (DRAM) hücre yapısının kullanıldığı 4K bit bellekler 1972 yılında aynı firma tarafından üretilmiş ve teknolojinin minimum boyutu 8 pm olarak gerçekleştirilmiştir. 1970'li yılların ortalarında başlayan teknoloji yarışı bir silisyum kırımı (chip) üzerinde en küçük boyutlu ve en yüksek yoğunluklu devrelerin oluşturulmasına yönelik olarak sürdürülmektedir [4].

DRAM'ların bellek kapasiteleri ve minimum desen boyutunun (NMOS yapısının kanal uzunluğu) yıllara göre gelişimi ve öngörülen gelişme süreci Tablo 1.2’de verilmektedir [8].

Tablo 1.2. DRAM kırmıklarında bellek kapasitesi ve yıllara göre değişimi [8]

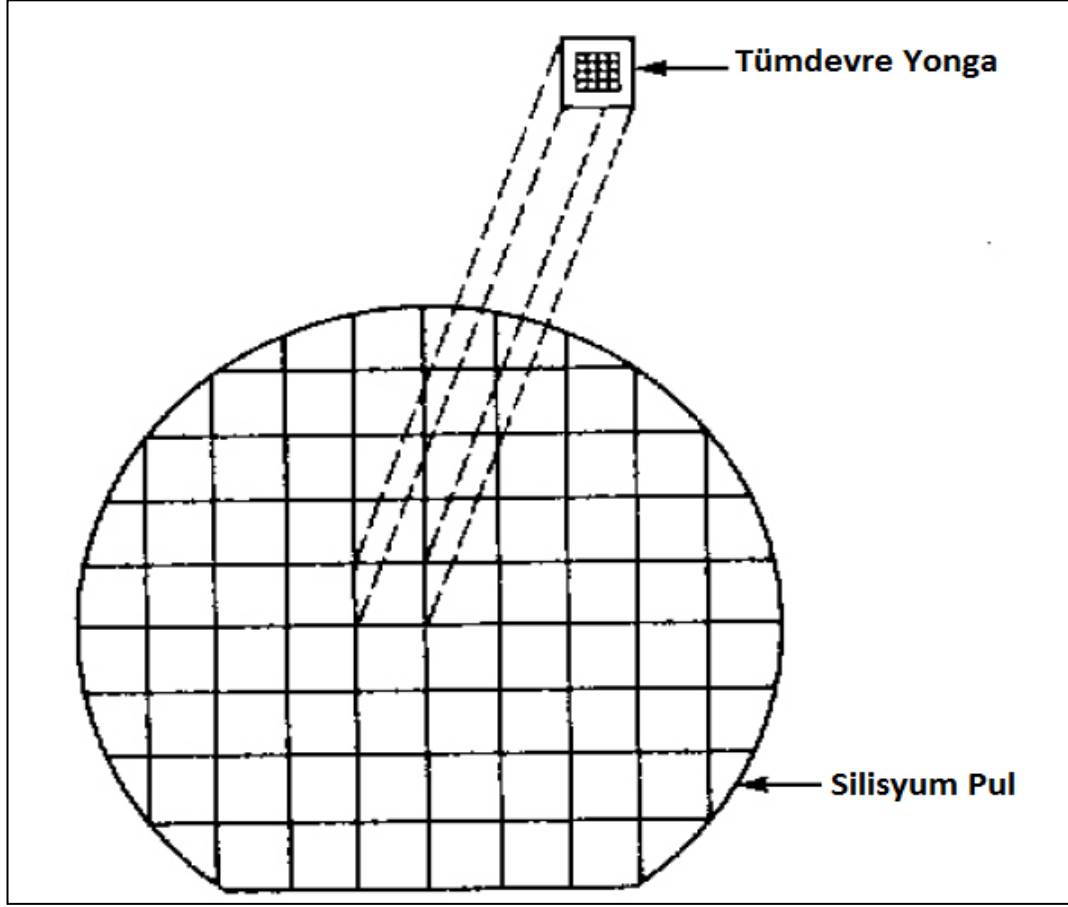
Yıl	1976	1980	1983	1986	1989	1992	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Bellek Kapasitesi	16 K	64 K	256 K	1 M	4 M	16 M	64 M	256 M	1 G	4 G	16 G	64 G
Min. Boyut (pm)	5	2	1,6	1,2	0,8	0,5	0,35	0,25	0,18	0,13	0,1	0,07

Tümdevreler temelde bipolar ve Metal Oxide Semiconductor (MOS) teknolojileri kullanılarak üretilirler. Bipolar teknoloji kullanılarak analog yapılar oluşturulur. Kazancı fazla gürültüsü az, hassasiyeti iyidir. MOS teknolojisi kullanılarak ise dijital yapılar oluşturulur. Kullanım ve yerleşim açısından daha elverişli ve ölçeklemesi daha basit olduğu için tercih edilir. Tümdevre üretiminde en temel eleman tranzistördür. Bipolar teknoloji ile npn, pnp, MOS teknoloji ile ise N kanallı MOS, P kanallı MOS tranzistörler oluşturulur. Very Large Scale Integration (VLSI) devrelerde eleman geometrisi oldukça önemlidir ve genellikle Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)’lardan oluşur [9].

CMOS teknolojisi, transistör başına düşük maliyetler sağladığı ve büyük miktarlarda tümdevre üretimine olanak verdiği için tercih edilmektedir. Bunun dışında, özellikle daha yüksek hızda ya da düşük gürültü ile çalışması istenen devrelerde Silisyum Germanyum (SiGe) Bipolar Junction Transistor (BJT) ya da Galyum Arsenik (GaAs) temelli teknolojiler de kullanılabilmektedir. Günümüzde tümleşik devre satışları dünya çapında 300 milyar Amerika Birleşik Devletleri Dolarına (ABD) yaklaşmıştır [6].

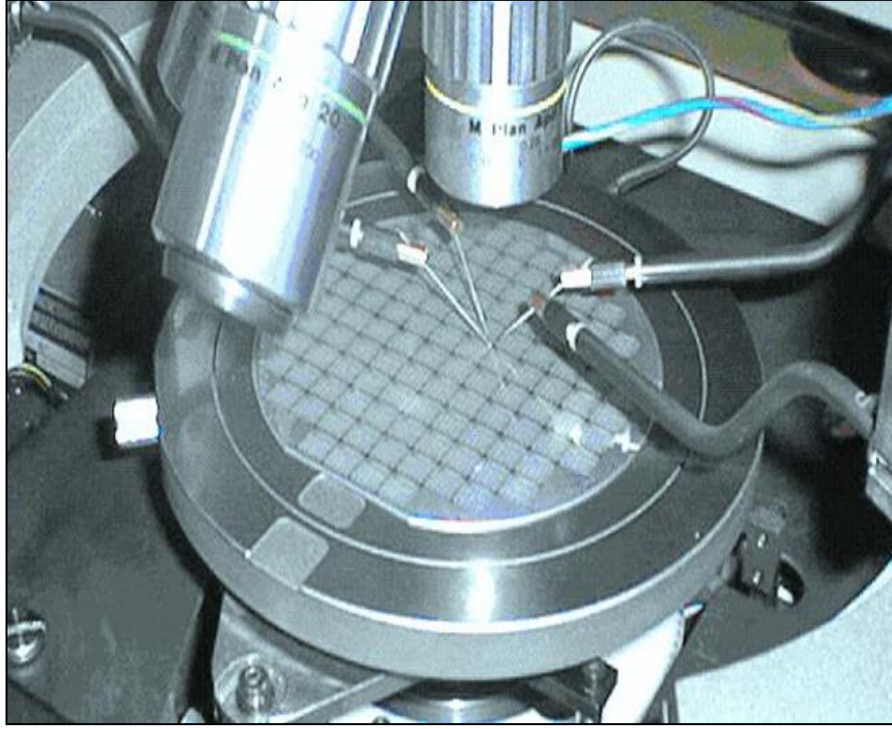
Tümleşik devrelerin ayrıık devrelere göre düşük üretim maliyeti ve başarım olmak üzere başlıca iki olumlu yanı sayılabilir. Üretim maliyetinin düşüklüğü,transistörlerin birer birer değil de tek defada, ışıklı taş baskı (fotolitografi) aracılığı ile basılmaları sayesinde gerçekleşmektedir. Başarımın yüksekliği ise bileşenlerin yakınlığı ve dolayısıyla daha az güç kullanımına bağlıdır [6].

İçinde çok sayıda kırmık içeren pulun şematik görüntüsü Şekil 1.1’de verilmiştir. Pul üzerinde her bir birim kırmık yonga (chip) olarak adlandırılmaktadır [9].



Şekil 1.1. Silisyum pul üzerinde tümdevrelerin şematik görünüşü

Tümdevre üretiminde ana malzeme silisyumdur. Doğada amorf olarak bolca bulunan silisyum uzun metalurjik işlemler sonucunda yarı iletken devre yapımına uygun hale getirilir. Silisyum kristali uzun parlak çubuklar halinde elde edilir. Bu çubuklar daha sonra ince pul (wafer) şeklinde kesilerek kullanım için hazır hale getirilir. Mikroelektronik teknolojisi; bir seri işlemler dizisi sonucunda çok sayıda tümdevre üretimini mümkün kılmaktadır. Bir pul üzerinde 100-200 adet tümdevre oluşturulabilir. Aynı anda 10 pulla çalışılırsa $100 \times 10 = 1000$ adet tümdevre üretilmiş olabilir [9]. Şekil 1.2’de bir pul üzerinde yer alan tümdevrelerin üretiminden bir kesit gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Tümdevre üretimi

Yarıiletken düzenlerin üretimi birçok tekniğin kullanıldığı, temiz odalarda gerçekleştirilen karmaşık bir teknolojidir. 1 ft³ içindeki 0,5 µm ve üstü çapa sahip parçacık (toz) miktarı “sınıf” olarak tanımlanır. Ortam koşullarına bağlı olarak değişse de, dış ortamda toz miktarı genellikle 200000 sınıfı kadardır. Örneğin bir yanardağ çevresinde bu oran çok daha yüksek değerlere çıkar. Üretimin gerçekleştiği temiz bir odanın sınıfı ise 10-1000 arasında değişmektedir [10].

Tümdevre üretiminde kullanılan silikon yonga plakaları (waferlar) çok düşük basınçlı odalarda yoğun mor ötesi ışıktaki işlenmektedirler. İçerisinde bulunan bu yüksek teknoloji makine özel tasarlanmış ve filtrelenmiş hava verilen temiz odalarda bulunmaktadır. Bu odalarda çalışan mühendisler özel kıyafetler giymek zorundadırlar.

Yonga üretimindeki deney tasarımı çalışmasının yapıldığı süreç litografi sürecidir. Litografi için kullanılan odanın ışıklandırmasında ışına duyarlı maskelerin mor ötesi ışıklardan etkilenmemesi için özel olarak mor ötesi ışınlarla karışmayan sarı ışık kullanılmaktadır. Şekil 1.3’te litografi işleminin gerçekleştirildiği sarı odadan görüntüler sunulmuştur.



Şekil 1.3. Litografi işleminin gerçekleştirildiği sarı odadan görüntüler

1.3. Türkiye’de Yarıiletken Teknolojileri

1980’li yılların başında, jonksiyon izolasyonlu bipolar devrelerin üretimi ve araştırılması amacıyla yönelik olarak Marmara Araştırma Merkezi içinde Yarıiletken Teknolojisi Araştırma Laboratuvarı kurulmuş ve ülkemizde ilk olarak bu laboratuvarda analog tümdevreler üretilmiştir. 1988 yılında "NATO Science for Stability Programme" tarafından desteklenen bir proje ile CMOS teknolojisine geçilmiştir. Proje TÜBİTAK, İstanbul Teknik Üniversitesi ve TELETAS işbirliği ile gerçekleştirilmiştir [4]. 1983 yılında 7 μm lineer bipolar üretim sürecinin denemeleri ile başlayan yolculuk, 1992 yılında 3 μm CMOS ve 1998 yılında 1,5 μm CMOS üretim sürecinin geliştirilmesi ile devam etmiştir [11].

Kurulma kararı 1980 yıllarında verilen YİTAL, ülkemizin ilk tümdevre (Integrated Circuit Microchip) üretim tesisi olarak hayata geçmiştir [11].

İlk kez 1999 yılında TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Enstitüsü (UEKAE)’de geliştirilen kriptoloji cihazlarının milli algoritma içeren kriptoloji tümdevreleri, YİTAL CMOS süreçleri ile tasarlanıp üretilmiştir. Bu tarihten itibaren Enstitü’nün kriptoloji tümdevreleri YİTAL’de tasarlanıp üretilmektedir [5].

2005’e gelindiğinde 0,7 μm CMOS teknolojisi kriptoloji tümdevresi üretimine başarıyla uygulanmıştır. 2007 yılında ise 0,25 μm CMOS teknolojisine uygun Akıllı Kart tümdevresi tasarımı başarı ile tamamlanmış ve örnek üretimi yurtdışında yaptırılmıştır [11].

Üretim süreçlerini özgün olarak geliştiren YİTAL bugünkü konumuna BIPOLAR teknolojisini, 3 μm ve 1,5 μm CMOS teknolojilerini geliştirerek ve düşük hacimde askeri standartta tümdevre üretimi gerçekleştirerek gelmiştir. [80]. Bugün ise YİTAL

sayısal tümdevre üretimine paralel olarak 0,35 μm SiGe HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) BİCMOS tümdevre tasarlayıp üretmek için gereken birikimi sağlamış bulunmaktadır [11].

YİTAL; tümdevre üretimi için gerekli olan tümdevre tasarımı, maske üretme, pul işleme (wafer processing), pul üzerinde test (wafer probing), kılıflama, devre testi ve yaşlandırma süreçlerinin tümünün gerçekleşmesi sağlayan altyapıya sahiptir. 800 m² temiz alana sahip olan YİTAL, Türkiye'nin yarıiletken teknolojilerinde tümdevre üretimi yapan tek laboratuvarıdır [5].

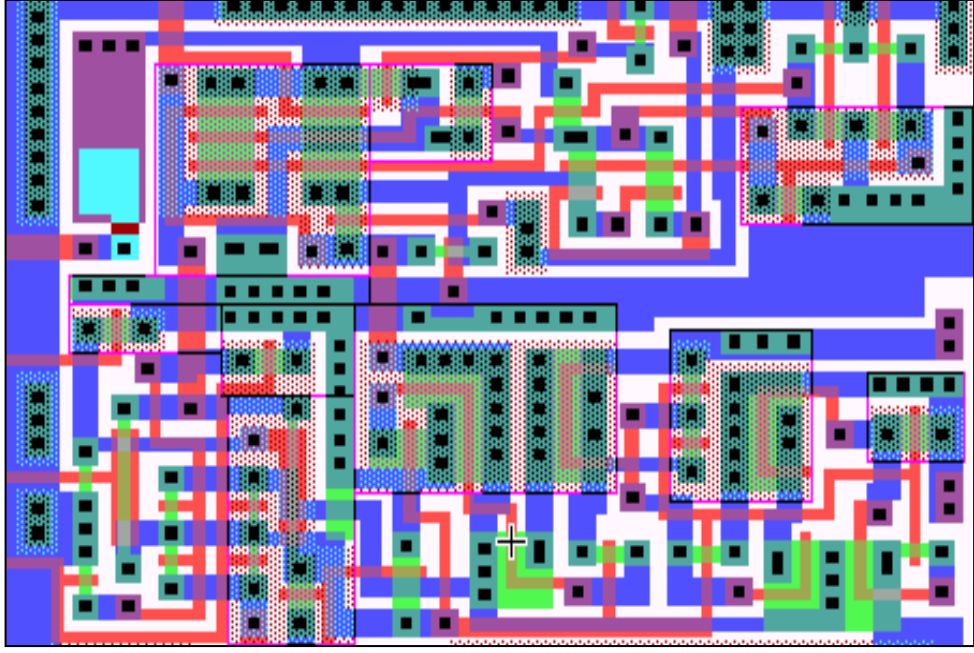
YİTAL'deki altyapı sayesinde Akıllı kart tabanlı elektronik kimlik doğrulama sistemi geliştirimi ve vatandaşlık kartı tasarımı projesinin temel adımlarından biri kimlik kartı olarak kullanılacak akıllı kartların ulusal olarak geliştirilmesidir. Proje çerçevesinde ulusal kimlik kartı olarak kullanılacak akıllı kart tümdevreleri tamamen özgün olarak UEKAE YİTAL tümdevre tasarım grubu tarafından tasarlanmış, yurtdışında üretilerek Bolu'daki pilot uygulama denenmiştir [12].

1.4. Tümdevre Üretiminde Kullanılan Temel Süreç Adımları

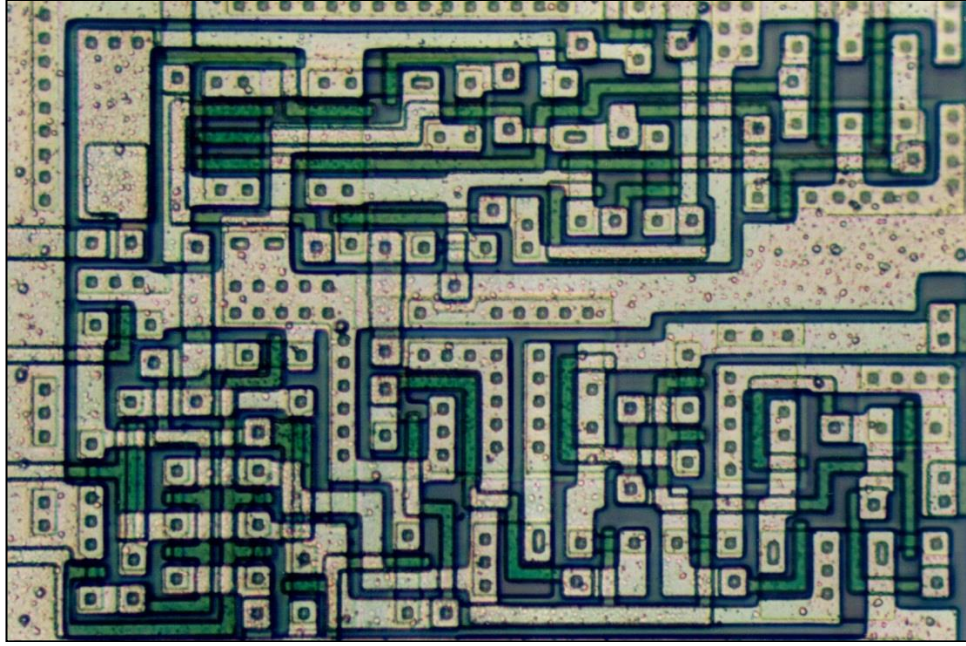
CMOS tümdevre üretim süreci fotolitografi, plazma destekli aşındırma, chemical vapor deposition (CVD) ya da low pressure CVD (LPCVD) yüksek sıcaklıkta oksitleme ve iyon ekme gibi tekniklerin belli bir sırada uygulandığı bir dizi işlemten oluşur [13].

Tümdevre üretimde tranzistorların elektriksel karakteristiklerini, sürecin tekrar edilebilirliğini ve güvenilirliğini belirleyen işlemlerden en önemlileri, MOS yapısı adı altında gruplananlardır [12].

Tümdevre teknolojisi tasarım ve üretim olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır [4]. Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'te tasarım programı ile çizilmiş serimin maske üretiminde kullanılacak olan farklı tabakalarının bir aradaki üretimde temel alınan tasarımı ve üretiminin pul üzerindeki büyütülmüş görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 1.4. Pul üzerinde büyültülmüş tasarım görüntüsü



Şekil 1.5. Pul üzerinde büyültülmüş üretim görüntüsü

Tasarım; teknoloji seçimine bağlı olarak (NMOS, BİPOLAR, CMOS, BİCMOS) mevcut devre elemanı ve devre bloklarına ait bilgisayar ortamında depolanmış verileri kullanarak, uygun yazılımlarla istenen devrenin; 1. tasarlanması, 2. devre simülasyonunun yapılması, 3. kırımcı üzerine yerleşim planlarının hazırlanması (layout), 4. bağlantı kapasite ve dirençlerini de kapsayan ikinci bir simülasyonun yapılması (post layout simulation) adımlarından oluşmaktadır [4].

Üretim ise yerleşim planlarına göre üretilmiş maskeler yardımıyla Si pul üzerine selektif ve ardışıl olarak uygulanan 1. oksitleme, 2. katkılama, 3. katman oluşturma, 4. katman aşındırma ve 5. litografi işlemlerinden oluşmaktadır [4].

1. Oksitleme; Si pulun oksijen veya su buharı ortamında yüksek sıcaklıkta doğrudan oksitlenmesidir [4]. Oksitleme işlemi silisyum üzerinde SiO_2 oluşturma işlemidir. Oksitleme ile silisyum üzerinde dielektrik ve yalıtkan filmler oluşturulur. Oluşturulan oksit katkı difüzyonuna karşı maske olarak, MOS yapılarda geçit oluşturmada, aktif bölgelerin pasivasyonunda, kapasite dielektriği oluşturmak için kullanılır [9].

2. Katkılama; Si taban malzemesinin iletkenlik değişimini sağlamak amacıyla, iyon ekme ve/veya difüzyon yöntemleri ile yabancı atomlarla (B, P, As) katkılanması olarak tanımlanmaktadır [4].

3. Katman oluşturma; Si pul üzerinde CVD veya PVD (Physical Vapor Deposition) yöntemleri ile istenen katmanların oluşturulması süreçlerini içermektedir. Si tümdevre teknolojisinde kullanılan temel katmanlar yalıtım, maskeleme ve pasivasyon amaçlı kullanılan SiO_2 ve Si_3N_4 katmanları, geçit malzemesi olarak kullanılan polisilisyum, kontak ve bağlantı iletkeni olarak kullanılan Al'dan oluşmaktadır [4].

4. Katman aşındırma; katmanların sıvı kimyasal malzemeler kullanılarak (ıslak aşındırma) veya plazma ortamında tutularak (kuru aşındırma) selektif olarak alt katmana kadar aşındırılması işlemini kapsamaktadır [4].

5. Litografi, yukarıda belirtilen bu süreçlerin selektif olarak gerçekleşmesi, diğer bir deyimle istenen desenlerin Si-pul yüzeyinde oluşturulması için kullanılan süreçtir [4].

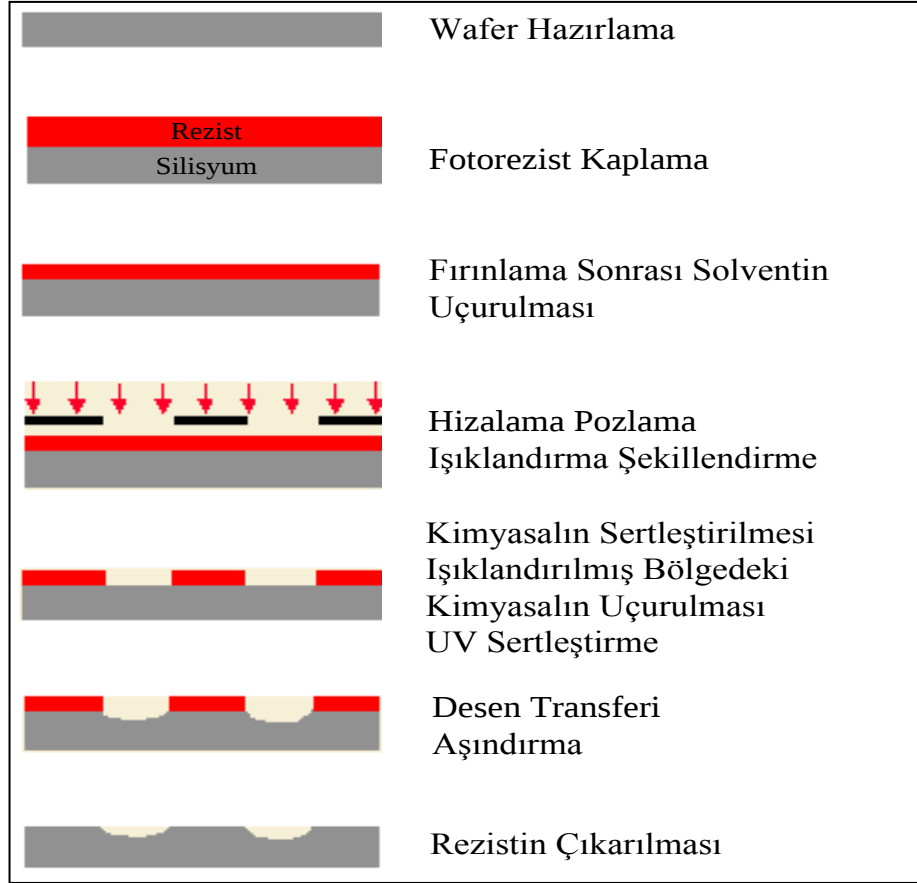
Üretim sürecinde kullanılan maske sayısı teknoloji seçimine bağlı olarak 6-18 arasında değişmektedir. Süreç adımlarının sayısı 400'lere kadar çıkmaktadır. Pul üzerinde oluşturulan tümdevreler test edildikten ve çalışmayanlar işaretlendikten sonra kesilir ve kılıflanır. Kılıflama sonrası tekrar test edilen tümdevreler piyasaya sürülür [4].

1.5. Litografi

Litografik işlem, hazırlanan devre desenlerinin Si pul üzerine aktarılmasını sağlar. Litografi işlemi için maske, ışın kaynağı ve uygun bir reziste ihtiyaç vardır.

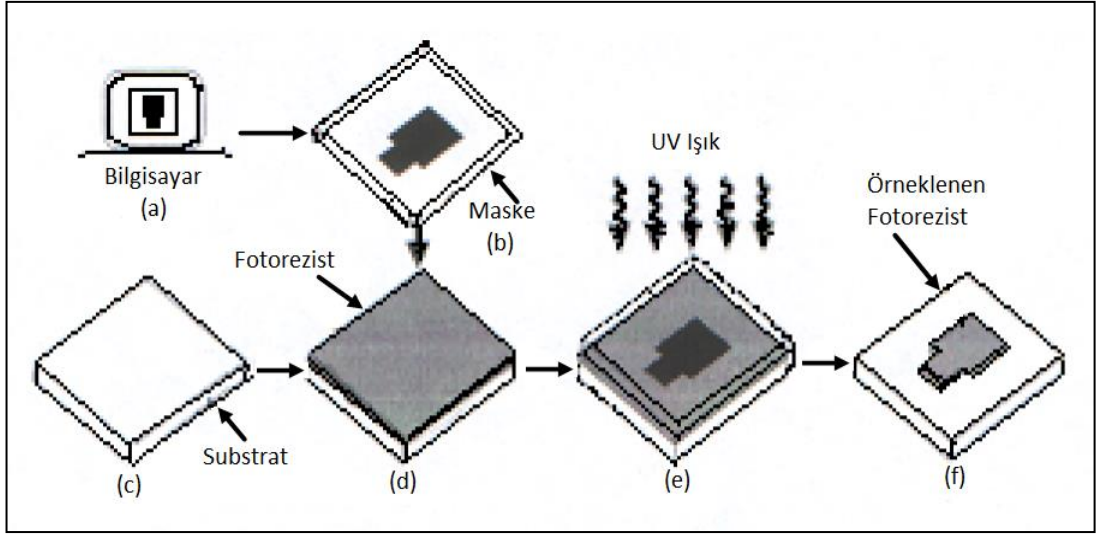
Tümdevre üretiminde litografik işlem için spiner ve mask aligned gibi cihazlardan yararlanılır. Işık kaynağı olarak UV ışınları, elektron bombardımanı, X ışınları gibi ışık kaynaklarından yararlanılır. Litografik işlem ışık kaynağı UV ise fotolitografi, elektron bombardımanı ise elektrolitografi gibi ışık kaynağının ismi ile anılır. Devre desenlerinin Si pul üzerine aktarımı maskelerden yararlanılarak yapılır. Maske; pul üzerine belli bir aşamada işlem yapılacak bölgenin diğerlerinden ayrılmasını sağlayan yapıdır. Rezist ışığa hassas bir kimyasal maddedir. Rezist kullanımı ile ışık gören ve görmeyen alanların çözünürlükleri değişeceği için maskedeki şekil pula aktarılır [9]. Si-pul fotorezistle kaplanır, adım hizalayıcı (stepper) ile öngörülen maske kullanılarak ışıklandırılır ve banyo edilerek rezist üzerinde istenilen desen oluşturulmuş olur [4].

Fotorezisti kaldırılacak alanlar saydam olan bir maske üzerinden aydınlatılır. Aydınlatma fotrezistin yapısını değiştirir. “Pozitif fotorezist” diye adlandırılan bu yapıda, film banyosu işlemiyle, aydınlatılan bölgeler çözülür. Negatif fotorezistte ise aydınlanan bölgeler polimerleşir ve aydınlanmayan bölgeler çözülür. Bu durumda istenen örüntünün negatifi bir maskede hazırlanır [10]. Şekil 1.6’da Litografi ve aşındırma süreç adımları ile fotoğrafı ile örneğin transferi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Litografi ve aşındırma süreç adımları

Fotolitografi tekniği ile yapılan tasarımın transferini anlatan gösterimin üstten bakışı Şekil 1.7’de verilmiştir. Bunun için bir bilgisayar programı ile çizilen tasarım (Şekil 1.7a)Şekil 1.7b’de görülen maske üzerine aktarılır. Maske cam levhadan yapılmıştır ve yüzeyinde istenilen şekli taşıyan ışıkla tanımlanabilir opak bir materyal (genellikle krom) yer alır. Maske hazırlandıktan sonra substrat (Şekil 1.7c) ışığa duyarlı organik bir polimerle kaplandığı zaman şekil aktarılması başlar (Şekil 1.7d). Substrat ile maske birleştirilir. UV ışık maske içinden ışığa duyarlı organik polimer üzerine gönderildiğinde (Şekil 1.7e) maskenin şeffaf kısımları altındaki ışığa duyarlı polimer çözünerek çözelti haline geçer. Bu kabartma şekil pozitif fotorezist olarak bilinir. (negatif fotorezistte şekil ters yönde oluşmaktadır). Levha ile maske ayrılarak çözelti ortamdan uzaklaştırılır (Şekil 1.7f). Şekil aktarılmasında uygulanan diğer bir yöntem ise “Soft litografi” dir [14,15].



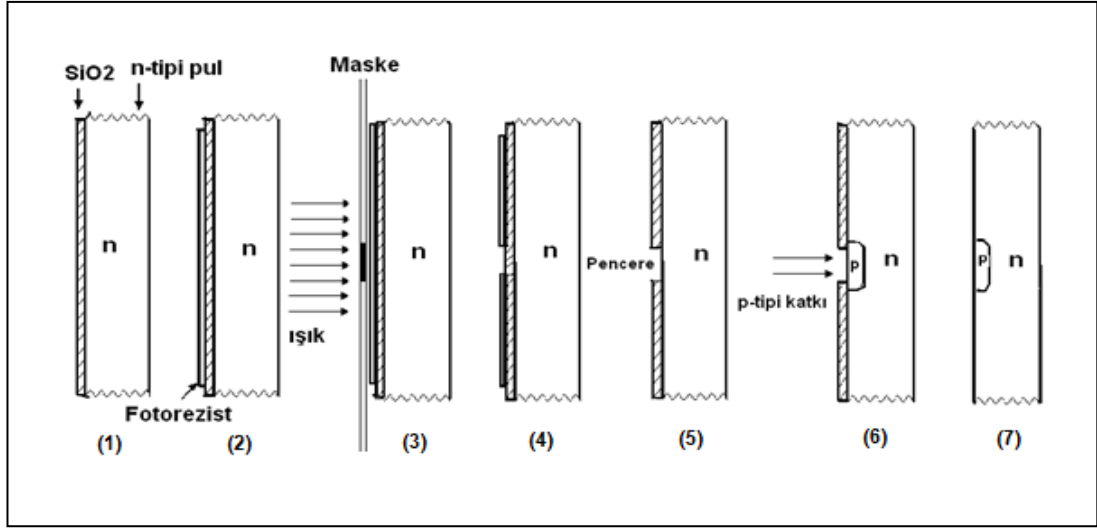
Şekil 1.7. Fotolitografi ile Örneğin Transferi

Bir bipolar veya MOS tranzistör oluşturmak için minimum 5-8 maske gerekmektedir. Her bölgenin maskesi ayrı hazırlanır. Her bir maske için litografik işlem uygulanır. Bir pn eklemi oluşturmak için uygulanan fotolitografik işlem

Şekil 1.8’de görülmektedir. Burada n-tipi bir pul üzerine p-tipi katkılama yapılacaktır [9].

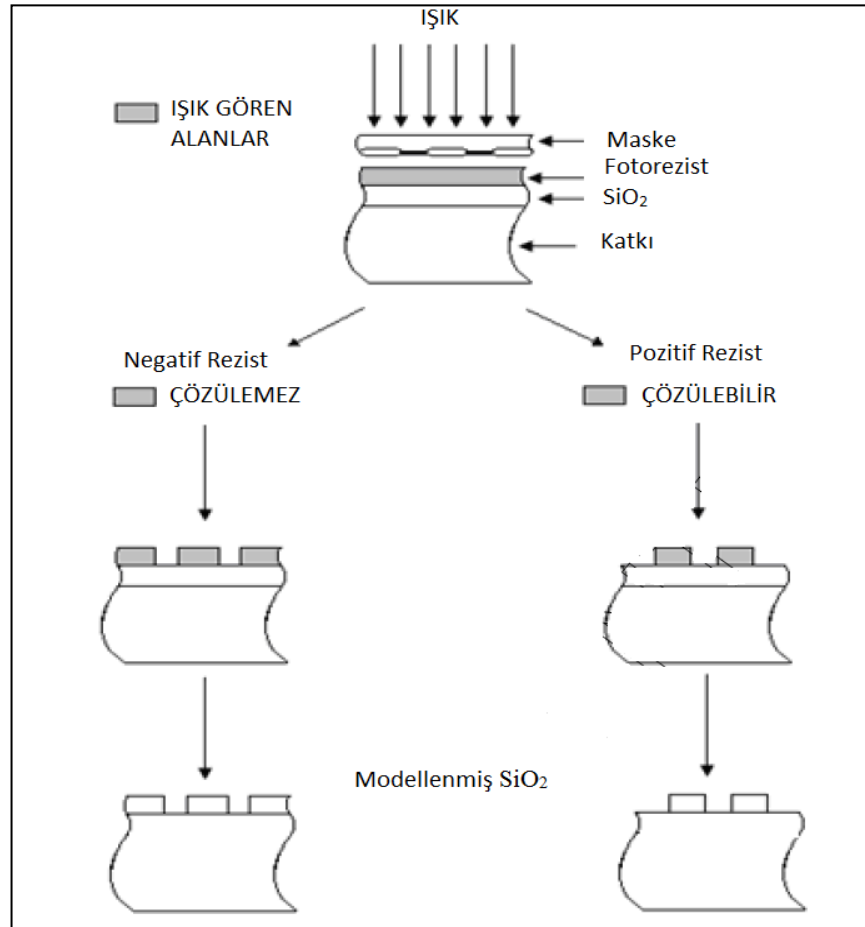
Şekil 1.8’de yapılan işlemler:

1. Oksit büyütme, n-tipi pul üzerine difüzyona maske olmak üzere 1000 Å civarında termal oksit büyütülür.
2. Fotorezist serme, fotorezist serilir.
3. Işıklandırma, maske uygulanarak mask aligner’de ışıklandırma işlemi yapılır.
4. Oksit soyma (Pencereyi oluşturma) uygun bir çözücü ile fotorezist üzerinde pencere açılır.
5. Fotorezist soyma oksit üzerinde pencere açılır.
6. Difüzyon (açılan pencereye) tanımlanan bölgeye difüzyon yapılır.
7. Oksit soyma(tüm yüzeyden) olarak yazılabilir. Difüzyon işleminden sonra silisyum dioksit soyulur. P-n jonksiyonu elde edilmiş olur.



Şekil 1.8. Bir pn eklemi oluşturmak için uygulanan fotolitografik işlem dizisi [9]

Bir pn eklemi oluşturmak için uygulanan fotolitografik işlem dizisinin negatif ve pozitif reziste uygulanmış gösterimi de Şekil 1.9'daki gibidir [9].



Şekil 1.9. SiO_2 üzerinde pencere oluşturma [9]

2. KALİTE VE TOPLAM KALİTE YÖNETİMİ

Mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ulaşılmak istenen başlıca hedef gerek tasarlanan sistemin, gerekse geliştirilmek istenen ürünün maksimum performansa sahip olmasıdır. En iyi sonuçların elde edileceği şartları ortaya koyabilmek için öncelikle performansı belirleyen özellik belirlenir ve bu özelliği etkileyen faktörler incelenir. Ardından bu faktörlerin performansı belirleyen özellik üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve en uygun kombinasyonunun bulunması için (kontrol edilemeyen faktörler de gözetilerek) deneyler yapılır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen performans göstergesi değerlendirilerek en iyi şartlar tespit edilir. Bu yaklaşım çerçevesinde yapılan deneyler sisteme sorulan soru, deney sonuçları da sistemin verdiği cevap olarak algılanabilir. Kritik olan nokta ise doğru cevabı alabilmek için doğru sorunun sorulmasının gerekliliğidir [16].

Soru sorma tekniği, her faktörü teker teker ele almak ve her faktörün sistem üzerindeki etkilerini ayrı ayrı tespit etmektir. Ancak böyle bir yaklaşımda faktörler arasındaki etkileşimler gözardı etmemek gerekmektedir. Böyle bir durumda bir faktörün etkisinin değerlendirilmesi sırasında diğer faktörlerin bulundukları seviyelerin sonuçlar üzerinde yarattığı etki yanıltıcı olacaktır. Bundan farklı bir yaklaşımla mümkün olan tüm kombinasyonların denenmesi ise yüksek maliyet ve zaman kaybına yol açacaktır, genelde uygulanması tercih edilmeyen bir durumdur.

Tüm bunların yanı sıra sadece gerekli deneyleri gerçekleştirmek ve sonuçları değerlendirmek değil, ayrıca sonuçların analizinde uygun istatistiksel yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Çünkü doğal olarak gerçekleştirilecek her deney bir belirsizlik ve hata payı içerecektir. Endüstriyel şartlar göz önüne alındığında hem bu deneyleri ekonomik şartlar ve zamansal kısıntıları gözeterek en verimli şekilde gerçekleştirebilmek, hem de sonuçları doğru yorumlayabilmek için (kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek ve optimizasyonu gerçekleştirebilmek için) deney tasarımı yöntemlerinin uygulaması son derece verimli bir yaklaşımdır. Ayrıca kalite ve verimliliği artırmak amacıyla

uygulanan tüm diğer yöntem ve metotları destekleyici, yönlendirici rolü vardır. Bu modern yaklaşım çerçevesinde deney tasarımı metodu en iyileme problemlerinin çözümünde başarılı bir metot olarak ortaya çıkmaktadır.

Deney tasarımı teknikleri sadece istatistiksel bir yaklaşım değil, tüm araştırma-geliştirme faaliyetlerinde kullanılabilecek, kaliteyi artıran, maliyetleri düşüren, sonuçların güvenilirliğini sağlamlaştıran, tüm diğer kalite tekniklerini destekleyen ve tamamlayan tekniklerdir. Uygulamada getirdikleri avantajlar performans ve kalitenin artırılması, kaynakların verimli kullanılması, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin hızlandırılması ürünün ve/veya sürecin kalite özelliklerini belirleyen değerlerin kontrol edilemeyen veya edilmesi zor/maliyetli faktörlere karşı daha az duyarlı olması şeklinde sıralanabilir [17].

Bu bölümde kalite kavramı ile anlatıma başlanarak; genel bir bilgilendirme yapmak amacı ile kalitenin tarihsel gelişimine değinilecek, toplam kalite yönetimi yaklaşımı ile anlatım sonlandırılacaktır.

2.1. Kalite Kavramı

Kalite kavramı; zaman içinde gelişerek sadece müşteri memnuniyetini sağlamak ile sınırlı kalmayıp; paydaşların da beklentilerini dikkate alarak sürekli iyileştirme esası ile karşılamaya yönelmiştir. Paydaşların dahil olması ile kalite, basit tanımı ile müşteri memnuniyetini sağlamanın ötesinde sürekli iyileştirmeyi öngören ve çalışanların motivasyonunu arttırmayı teşvik eden bir yapıya dönüşmüştür. Bu yeni tanım; kalitenin çevre ve iş güvenliği kavramları ile bütünlük içerisinde hareket etmesi gerektiği sonucunu doğurmuştur [18].

Kalite, herhangi bir mamulün niteliklerinin, bu mamulü alan veya kullanan kişinin ihtiyaçlarını karşılayabilme derecesi olarak da tanımlanmaktadır. Kişi, aldığı veya kullandığı malın niteliklerinden memnun kalıyorsa, o mamul o kişiye göre kalitelidir.

Modern kalite kontrol müşteri odaklıdır. Ürünler müşteri ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanır, üretilir ve sevk edilirler. Kalite geliştirme süreci üst yönetimin sorumluluğunda yapılır. Kalite için sorumlulukları herkesin alması önemlidir. Kusurları önlemeye odaklanılır [19]. Üzerinde hem fikir olunan genel bir tanım

bulunmamakla birlikte uzmanlarının görüşleriyle kalite kavramı farklı biçimlerde tanımlanmıştır.

2.2. Kalitenin Tarihsel Gelişimi

Sahip olduğu kaynakları fayda yaratmak için kullanmak isteyen insanoğlu meydana getirdiği ürüne olan talebin ürünün niteliğiyle yani kalitesiyle ilişkili olduğunu fark etmiş ve yaptığı işlerde göz önünde bulundurmıştır. Kalite, o tarihlerde adı konmasa da geçmişi Hammurabi Kanunlarına dayanan köklü bir kavramdır. Sanayi devriminden sonra ise rekabet üstünlüğünü sağlama vb. sebeplerden dolayı üretimle ilişkili olarak Kalite Kontrol Kavramı ortaya çıkmıştır. İşletmeler kalite kontrol laboratuvarları oluşturarak üretim sırasında çıkan hatalı ürünlerin müşteriye ulaşmasını engellemeyi amaçlayan girişimlerde bulunmuşlardır.

20. yüzyıla gelindiğinde sadece kalite kontrol çalışmalarının hedeflenen verimliliğe ulaşmadaki yetersizliği anlaşılmıştır. Kalite Güvence terimini ilk olarak kullanan George Edwards, kalitenin yönetimin sorumluluğunda olduğu görüşünü ortaya atmıştır. İyi kalitenin iyi şeyler düşünülerek ve şansa bağlı olarak elde edilemeyeceği; kalitenin işletmenin bütün organizasyonel bölümlerinin (tasarım, mühendislik, teknik ve kalite planlama, üretim yerleşimi, standartlar, işçilik ve personel vb.) planlı ve birbirine bağlı çalışmaları ile oluştuğu yaklaşımını geliştirmiştir. Aslen matematikçi olan Walter Shewhart da İstatistiksel Kalite Kontrol kavramını gündeme getirerek kalite kontrol çalışmalarında istatistiki uygulamalar geliştirmiştir [20].

II. Dünya Savaşı, kalite teknolojisinin gelişmesini hızlandırmış ve üretilen ürünlerin kalitesinin iyileştirilmesi gereksinimi kalite kontrol konusundaki çalışmaların artmasına ve daha çok bilgi paylaşımına yol açmıştır. Ancak savaş sonrasında kalite kontrol çalışmalarının önemini yitirmeye başladığı görülmüştür. Buna karşılık Japon is adamları savaş sonrası ülkelerini yeniden imar etmek ve dış pazarlara girebilmek amacıyla ABD'deki kalite uzmanlarını ülkelere davet ederek bir kalkınma hareketi başlatmışlardır. 1951 yılında Armand V. Feigenbaum'un "Toplam Kalite Kontrol" kitabını yayınlamasıyla kalite kontrol, tasarımdan satışa kadar işletmenin tüm sahalarına yayılmıştır. Böylelikle kalite ayıklayıcı ve düzeltici olma boyutundan, önleyici ve geliştirici olma boyutuna taşınmıştır [20].

İlk çıkış noktalarında üretimle sınırlı kalan kalite yönetimi çalışmaları zaman içerisinde dahili kontroller ve çalışanların aktif katılımlarıyla, beklenin aksine maliyeti de düşürecek bir şekilde sürekli bir gelişim sağlamaktadır. Motivasyondaki ve toplam kalite kontrolü gibi kavramlarla çalışanların bilinç düzeyi seviyesinin yükselmesi zaman içerisinde maliyetlerde düşüşe ve verimlilik artışına sebep olmuştur. Ancak klasik yaklaşımdan farklı olarak çalışanlar ve yöneticilerden beklenen rolde önemli bir değişim gerektiği anlaşılmıştır. Yeni anlayışta, sorumluluklarını eksiksiz olarak yerine getiren ancak bunun yanında yaptığı işin daha verimli yapılması, iş süreçlerinin geliştirilmesi konusunda sürekli düşünen ve belirlenmiş çeşitli sistematik katılım yöntemleri ile bu düşüncelerini ve becerilerini sisteme katan yeni bir çalışan davranışı sergilenmesi gerekirken, yöneticilerin de çalışanları teşvik edici, katılımı sağlayıcı, inisiyatif kullanmayı sorumluluk almayı ve yenilikler yaratmayı teşvik eden bir insan kaynakları planlama sistemi kurması önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu bahsedilen ihtiyaçlar Toplam Kalite Yönetimi ve Altı Sigma gibi kavramların geliştirilmesine öncülük etmiştir.

Toplam Kalite Yönetimi (TKY) mükemmelliği, yani "sıfır hata" düzeyinde bir ideali hedefleyen bir yönetim felsefesidir. Bu hedefin ulaşılamazlığı, TKY'nin sürekli gelişmeyi sağlayan sonsuz bir yolculuk olmasının nedenidir [21].

TKY “sürekli iyileştirme”yi esas almaktadır. Tüm süreçlerin analizi, “nasıl daha iyi olabilir? Nasıl daha hızlı olabilir?” diye sorgulanması ve devamlı iyileştirme çabası içinde olunması gerekir. Bunun için ekip çalışmasına, çalışanların önerilerine, kıyaslamalara ve ölçümlere ihtiyaç bulunmaktadır.

Altı Sigma metodolojisinde hedef milyonda 3.4 hataya ulaşmakla birlikte, süreç iyileştirmesi için gerekli çalışmaların yerine getirilmesidir. Altı Sigma, kalite yönetimi ve hedef teorisi arasındaki ilişki üzerine çalışmak için ideal bir durum oluşturmaktadır. Altı Sigma araç ve yöntemlerini kullanmak işletme takımlarının hedeflerine ulaşmasında etkin bir yapı sağlamaktadır [22].

Günümüzün imha edici rekabet ortamında hayatlarını devam ettiren işletmeler, avantajlı olabilmek için Toplam Kalite Yönetimi'nin temel düşüncesini ve müşteri odaklı prensiplerini benimsemişlerdir. Artık işletmeleri yönlendiren müşteri istekleri kavramı, kalite, maliyet ve hızın ötesinde, çevre unsurları ile iş sağlığı ve güvenliği

prebsiblerini de kapsamaktadır. Bu kavramların önemi her geçen gün artmakta; çevre dostu teknoloji ve yaklaşımları olan, çalışanlarının sağlığını ve güvenliğini de ön plana çıkaran işletmeler, ulusal ve uluslararası düzeylerde de rekabet avantajı kazanmaktadır [18]. Toplam Kalite Yönetimi anlayışıyla birlikte kalite sistemleri üst bir düzeye ulaşmıştır.

2.3. Toplam Kalite Yönetimi

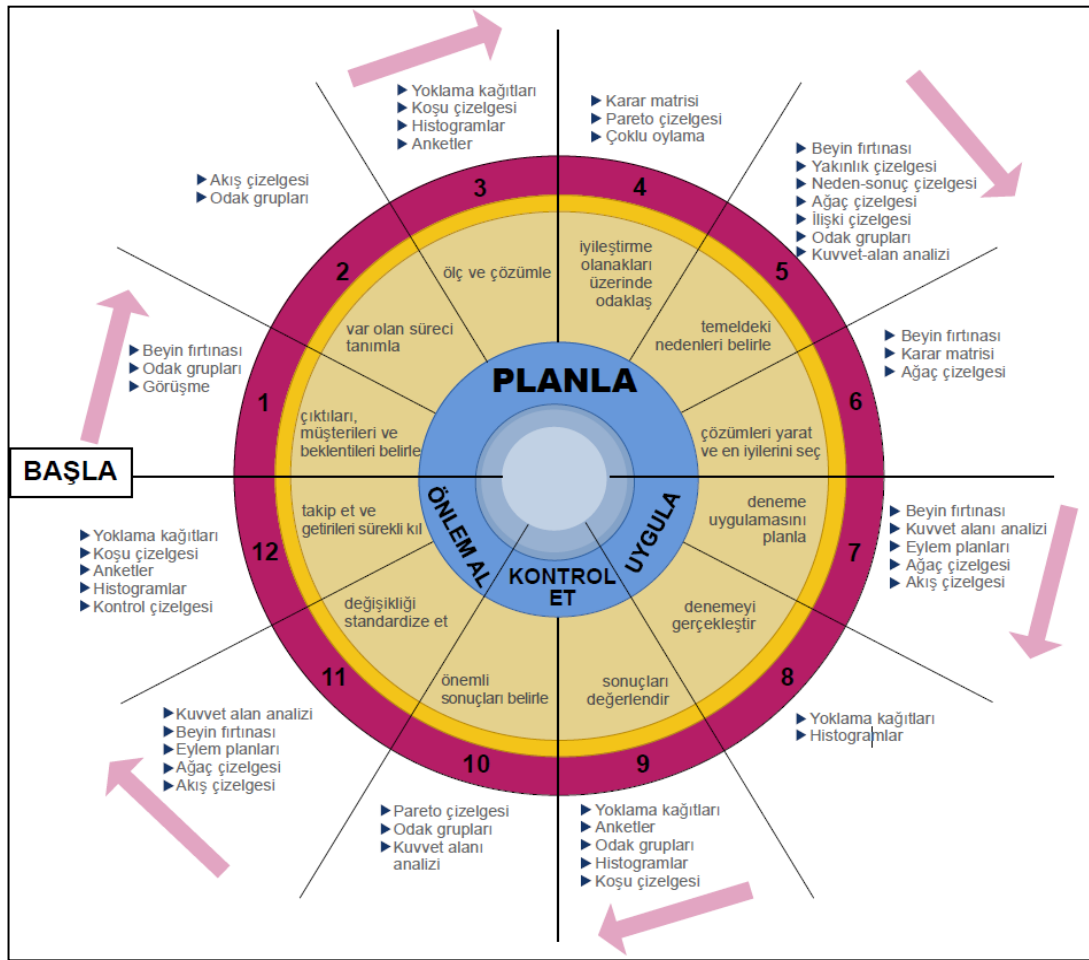
Günümüzde bitmiş ürünün/hizmetin kalitesi yerine kurumların yönetim sistemlerinin kalitesinin değerlendirilmesi ağırlık kazanmıştır. Buaradaki temel varsayım, geçerli (standartlara uygun) bir yönetim sistemine sahip kurumların, müşterilerine sunduğu ürünün veya hizmetlerin de belirli bir düzeyde (kalitede) olacağıdır. Mal veya hizmet talebinde bulunacak müşterilerin değerlendirmelerine temel oluşturmak ve yardımcı olmak amacıyla yönetim sistemi standartları oluşturulmuştur. Müşteriler bu standartlarda belirtilen yönetim sistemlerine sahip kurumların kişisel, anlık ve rastgele kararlarla yönetilen işletmeler olmadığını; bunların tüm süreçlerini Planla Uygula Kontrol Et Önlem Al (PUKÖ)” ilkesine göre yapılandığını bilerek ürün veya hizmet taleplerinin belirli bir kalite güvence düzeyinden sağlanacağından emin olurlar. Kurumsal bir yönetim sisteminin başarılı olarak işletimi ve sürdürülebilirliği açısından “Toplam Kalite Yönetimi” felsefesinin temel ilkelerine uygun davranmak önemlidir [23].

Bir işin gerçekleştirilmesi için söz konusu çevrimin birçok defa tekrarlanması gerekebilir. Ancak yapılan her işte bu aşamaların aynen izlemesi gerekmez. Bazı aşamalar birleştirilir, bazıları da iş başarılıncaya kadar birçok kez tekrarlanabilir.

Japon’ların Deming’in öncülüğünde başlattıkları kalite seferberliğinde başarıya ulaşmalarında en önemli faktör ilk olarak batılıların geliştirdiği kalite anlayışını çok iyi özümseyerek kendi yaşam kültürleriyle sentezlemeleri olmuştur. 1970’li yıllarda Amerikan Şirketlerinin dış rekabette Japonların gerisinde kalması, onları kalite anlayışlarını yeniden gözden geçirmeye zorlamıştır. Böylelikle kalite yeniden dünyanın gündemine oturmuştur. Kalite serüvenine Deming, Juran gibi batılı bilim adamlarının öncülüğünde başlayan Japonya bugün, Ishikawa ve Taguchi gibi kalite guru’larıyla tüm dünyaya kalite danışmanlığı yapar hale gelmiştir [20].

Japon sanayisinin iş dünyasına kazandırdığı bu yeni felsefe tüm çalışanların bilgi, yetenek ve zekalarını ortaya koymasına gerektiğini savunur. Yönetim kendi bireysel ya da sınıfsal engellerinden bağımsız, tüm iş gücünün firma hizmetine bilinçli bağlılığıdır. Sürekli iyileştirmeyi merkezine alan bu yaklaşım “Kaizen Felsefesi” olarak adlandırılır. Kaizen çalışmaları TKY’nin en temel faaliyetidir.

Şekil 2.1’de PUKÖ çevriminin dört temel aşaması, her aşamada yapılması gereken iş adımları ve iş adımlarında kullanılabilecek sorun çözme yöntemleri gösterilerek verilmiştir [24].



Şekil 2.1. PUKÖ yönetimi ve araçları [24]

Sürekli değişkenlik gösteren rekabet ortamında geleceği görebilmek, buna göre yenilik yapabilmek ve yaratıcılığını en üst seviyede tutabilmek çok büyük önem taşımaktadır. Değişen düzene kısa sürede ayak uydurabilen ve en önemlisi bilgiyi elinde tutabilen işletmeler en iyi yerlerde olacaktır. Değişkenlik gösteren rekabet

ortamında Toplam Kalite Yönetimi'nin önemi daha çok kavranmakta ve TKY' ne yönelmeler hız kazanmaktadır.

TKY, tüketici isteklerini en ekonomik düzeyde karşılamak amacı ile işletme organizasyonu içindeki çeşitli ünitelerin kalitenin yaratılması, yaşatılması ve geliştirilmesi yolundaki çabalarını birleştirip koordine eden etkili sistem şeklinde tanımlanabilir [25].

TKY'nin ilkeleri;

1. Üst yönetimin liderliği
2. Müşteri odaklılık
3. Firma elemanlarının eğitimi
4. Takım çalışması
5. Sürekli geliştirme ve iyileştirme'dir.

Yukarıdaki öğelerden ilk dördü beşincisi için gereklidir [26]. TKY Felsefesi bir dizi ilkeler ve yöntemler yumağıdır. Bu felsefenin özünde şunlar bulunabilir;

1. Hataları önlemek, onları sonradan bulup düzeltmekten daha kolaydır, ucuzdur ve güvencelidir.
2. Normal ile anormali, doğal olanla olmayanı ayırmak için istatistiğe ihtiyaç vardır.
3. Her çalışanın fikrinden yararlanmak, sadece bir kısım kişilerin fikrinden yararlanmaktan daha başarılı sonuçlar doğurur.
4. İyi yönlendirilirse, grup çalışmaları işleri daha çabuk geliştirir.
5. İşletmenin başarısı için müşterilerin tercihlerini gözetmek gerekir.
6. Kaliteli bir yönetim, kaliteli insanlarla mümkündür.
7. Kaliteyi güvence altına almak bir sistem meselesidir.
8. İşlerin planlı yapılması, plansız yapılmasına yeğlenir.
9. Hedef birliği sağlanırsa, sonuca daha kısa sürede ve daha emin bir şekilde varılabilir.
10. Tüketicie kaliteli bir hizmet verebilmek için işletmenin içindeki birimlerin ve bireylerin de birbirlerine kaliteli bir hizmet verebilmeleri şarttır.
11. Satın alınan mal ve hizmetlerin kaliteli olmasında tedarikçilerin işletme kalite standartlarında çalışması önemlidir.

Modern kalite anlayışı; işletmelerde kaliteyi hataları ayıklamanın ötesine götürmüş, rekabet üstünlüğünü kaliteyi kontrol eden işletmelerden alarak, kaliteyi geliştirmeyi hedefleyen işletmelere vermiştir. İş dünyasında başarıyı yakalayan firmalarsa yine belirli kalite kontrol düzeyinde hatasız üretimi gerçekleştiren firmalar değil, kaliteyi benimsemiş, adeta yaşam biçimi haline getirmiş firmalar olmaktadır. Bu başarıyı yakalamış firmalardan birinin, Hewlett–Packard’ın Chief Executive Officer (CEO)’su John E. Young’un deyişiyle “Kaliteyi sağlamanın yolu hatalı ürünleri tespit eden ve müşteriye ulaşmadan önce kalitesizliği gideren güçlü bir kalite güvence ekibine sahip olmaktan değil, sürekli iyileştirmeyi firmanın kültürün bir parçası haline getirmeyi başarmaktan geçer” [20].

Bir istatistiksel yöntem olan deney tasarımı tekniği de son yıllarda kalite felsefesi paralelinde ürün ve üretim süreçlerinin tasarımı aşamalarında ve değişkenliği arttıran faktörlerin kontrol altına alınması amacıyla etkin bir biçimde uygulanmaktadır [26]. Yapılan bu çalışmalar ışığında üretim sırasında meydana gelen hatalar kontrol altına alınarak nedenleri araştırılır aynı zamanda da hataların tekrarlanmasını önlemek açısından gerekli düzeltmeler yapılır. Süreç iyileştirmesi aşamasında önemli mühendislik araçlarından biri olan deney tasarımı ile verim artmakta, değişkenlik azalmakta, hedef değere daha yakın uygunluk sağlanmakta, gelişim süresi ve toplam maliyet azalmaktadır [27].

3. DENEY TASARIMI

3.1. Deney Tasarımının Tarihsel Gelişimi

Deney tasarımı tekniği Regresyon Analizi temeline dayanır. Regresyon Analizi, sebep (bağımsız girdi değişkeni) ve sonuç (bağımlı çıktı değişkeni) arasında net bir matematiksel ilişkinin varlığını tespit etmek için kullanılır.

Bu durum bağımsız ve bağımlı değişkenlerin sayılabilir olduğu durumlarda geçerlidir. Değişkenlerin sayılabilir olmadığı zaman ilişkiyi regresyon analizi ile ifade etmek mümkün değildir [28].

Araştırmacının amacı sebep ve sonuç arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade etmekten ziyade ilişkinin varlığını araştırmak olduğunda, deney tasarımı teknikleri kullanılır [29].

Deney tasarımı, ilk defa 1920'li yıllarda İngiliz istatistikçisi A. Ronald FISHER tarafından tarım ürünlerinin verimli üretilmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Fisher, ürünlerin verimine katkıda bulunan gübrelerin tespitinde bu yöntemden yararlanmıştır. Fisher, ürün yetiştirilecek toprağı verimliliği aynı derecede olan birkaç bloğa ayırmış ve her bir ürün çeşidini rasgele bu bloklarda yetiştirmiştir. Fisher'in blok kurması ve bloklara rasgele yerleştirme yapması, deney tasarımına temel teşkil etmiştir ve faktöriyel analiz kavramının doğmasına sebep olmuştur [16]. Fisher ayrıca, deney verilerinin analizi için bugün klasik sayılan “Varyans Analizi” yöntemini de geliştirmiştir.

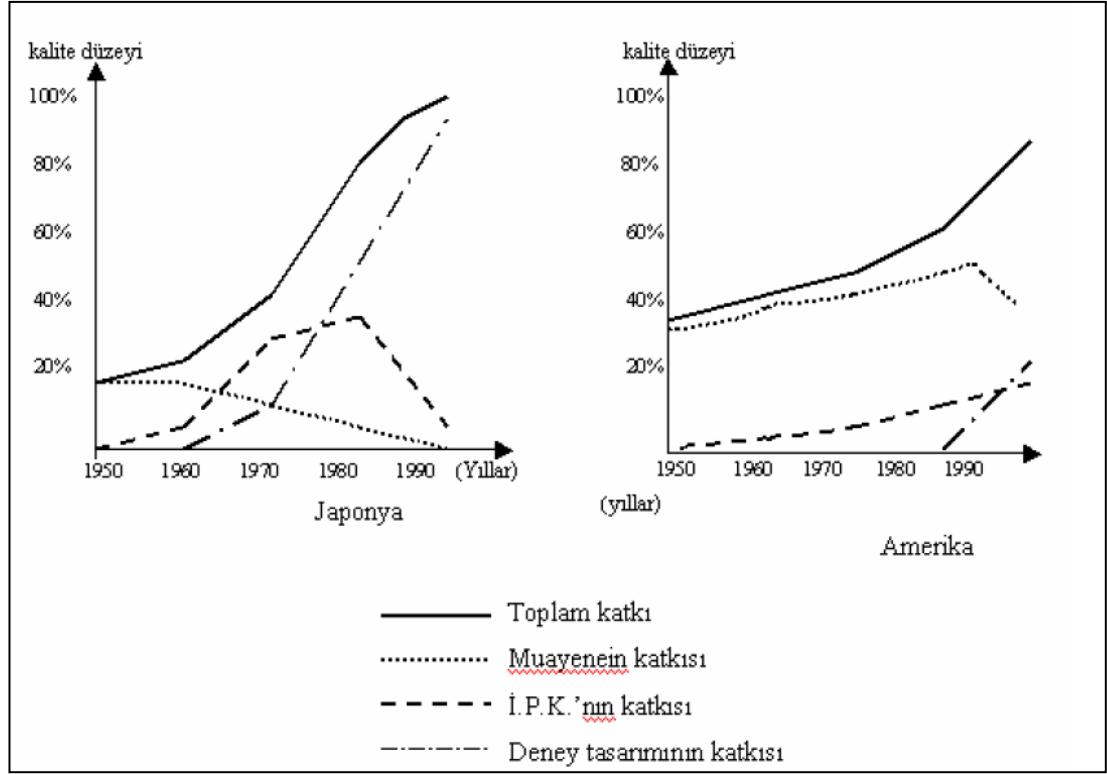
Varyans analizi, test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistik temelli bir metottur. Deneysel tasarım temelde varyans analizine dayanmaktadır. Bu metot 1930'lu yıllarda Fisher tarafından geliştirildiği için isminin baş harfinden dolayı F testi de denmektedir [30]. Yöntem, kısa bir süre içinde, Amerika'da tarım alanında, çeşitli gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama düzeylerinin çeşitli ürünlere olan

etkilerini belirlemek üzere uygulanmıştır. Bu yöntem tarım sektöründe üretimin geliştirilmesine büyük katkı sağlamıştır.

Deney tasarımının teknolojik çalışmalarda kullanılmaya başlandığı 1950'li yıllara kadar, kullanımı ve gelişimi çok hızlı olmamıştır.

Deney tasarımı, daha sonra kimya ve ilaç sektörlerinde de uygulanmış olmasına rağmen, imalat sektöründeki uygulamaları 1970'lere kadar son derece kısıtlı kalmıştır [26]. W. Edwards Deming'in Japonya'da, kalite ve verimliliği geliştirme felsefesi ve yöntemleri üzerine verdiği konferanslardan sonra, bu teknikler Japon istatistikçileri tarafından hayata geçirilmiştir. Böylece düşük maliyette ve yüksek kalitede ürün geliştirmeye yardımcı deney tasarımı yöntemleri geliştirilmiştir. İlk olarak Fisher'in uyguladığı deney tasarımlarından sonra Taguchi de bu olguya kendi yaklaşımlarını katmıştır.

Motorola firmasının kalite grubundan K. Bhote, kalitenin gelişimine katkısı olan üç istatistiki yöntemi, 1950 - 1990 dönemi için ABD ve Japonya'da karşılaştırmıştır. Kaliteyi sağlama amacıyla olan bu üç yöntem; muayene, İPK (İstatistiksel Proses Kontrol) ve deney tasarımı yöntemleridir. Şekil 3.1 bu üç yöntemin bir karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 3.1'de görüleceği üzere, Japonya'da kalite gelişmesine en büyük katkıyı, 1970'den sonra deney tasarımı tekniği sağlamıştır. Kaliteyi sağlamada, 1960'lardan beri Japonya'da başarı ile kullanılan deney tasarımı tekniklerinin ABD'de kullanılmaya başlaması, 1980'lerin başında Taguchi'nin Amerika'da verdiği seminerlerden sonra olmuştur Amerika'da imalat sektörü 1980'lerin başında, deney tasarımını Japon kalitesinin nedenlerini araştırırken yeniden keşfetmiştir. Deney tasarımı, o tarihlerde Japonya'da Profesör Genichi Taguchi önderliğinde yoğun ve etkili olarak uygulanmıştır. Taguchi deney tasarımına kurumsal yenilikler getirmemiştir. Ancak üretimdeki uygulamalarda yenilikler yapmış ve başarılı uygulamalarla yöntemin imalat sektöründe kabul görmesini sağlamıştır [26].



Şekil 3.1. Kalite yöntemlerinin karşılaştırması [26]

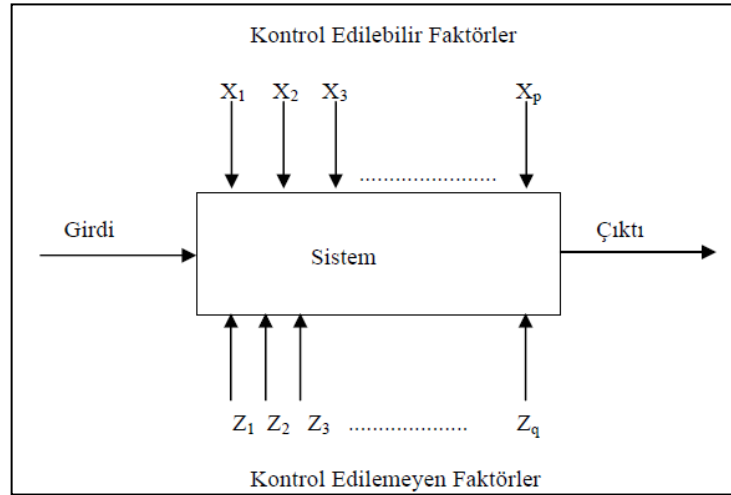
Deney tasarımı tekniklerinin özellikle imalat endüstrisinde son yıllarda çok yaygın olarak kullanılmasının en önemli sebeplerinden bir tanesi de, Dr. Genichi Taguchi'nin geliştirmiş olduğu Taguchi yöntemi olmuştur. Bugün dünyanın hemen hemen her ülkesinde deney tasarımı eğitimleri verilmekte ve yöntem üretimde uygulanmaktadır [26].

Literatürde deney tasarımı kullanmış son yıllara ait çeşitli makaleler yer almaktadır. Dejaegher ve diğerleri, kromatografi deneme yöntemlerinin yeteneğinde hangi faktörlerin daha fazla etkiye sahip olduğunu belirlemek için deney tasarımı yaklaşımını kullanarak araştırmışlardır [31]. Baloul ve diğerlerinin çalışmalarında bükme işlemi sırasında araçlar tarafından parçaya uygulanan kuvveti en küçüklemek ve maksimum gerilimi en küçüklemek için deney tasarımına dayanan cevap yüzeyi yöntemi kullanılmıştır [32]. Dixon ve diğerlerinin tıbbi cihaz üretimi sürecinde deney tasarımı kullanmışlardır [33]. Cappetti ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, kazalarda yaya güvenliğine yönelik analiz yapılmış ve araç-yaya çarpışma etkisinin benzetimi yapılarak zorluklar belirlenmiştir [34]. Rojas ve diğerlerinin çalışmalarında dinamik sistem tanımlı min-max sağlam (robust) deney tasarımı fikrini geliştirmişlerdir [35].

3.2. Deney Tasarımı Yöntemi

Deney tasarımı, sürecin ilgilenilen kalite karakteristiğine etki eden kontrol edilebilir değişkenlerin değerlerini sistematik olarak değiştirerek süreç performansını etkileyecek değişken değerlerini belirlemede kullanılan bir tekniktir [16]. Deney Tasarımı, bir süreçteki girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasıyla cevap değişkeni üzerindeki değişkenliğin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması olarak tanımlanabilir [29]. Deney tasarımı, deneyle verilerin toplanma biçimini anlatan planlar kümesidir. Bir deney için tasarımda; problemin genel amacının, incelenecek girdi değişkenlerinin ve düzeylerinin, deneyin tepkisinin, deneyin nasıl yapılacağının ifadesinin ve uygun analiz yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir [36].

Deney tasarımı, süreç eniyilenmesinde, süreç değişkenlerinin tanımlanmasında ve süreçteki değişkenliğin azaltılmasında çok önemlidir. Şekil 3.2’de bir sistemin veya sürecin genel modeli gösterilmiştir. Süreç değişkenlerinden $X_1, X_2, \dots, X_p$ kontrol edilebilir değişkenler ve $Z_1, Z_2, \dots, Z_q$ kontrol edilemeyen değişkenler olarak adlandırılır [37].



Şekil 3.2. Bir sistem veya sürecin genel gösterimi [37]

Deney tasarımı teknikleri, yeni bir süreç geliştirmede ve performans artırma amacıyla mevcut süreci düzeltmede çok önemli bir rol oynamaktadır. Burada amaç, sağlam (robust) bir süreç geliştirmektir. Bunun anlamı, değişkenliğin kaynağı olan,

kontrol edilemeyen değişkenlerin ($Z_1, Z_2, \dots, Z_q$) etkisinin en az olduğu süreci geliştirmek demektir [16].

İşletmelerde bir sorunun kaynağını bulmak için sorunun olduğu durumlar, girdiler değiştirilerek yakalanmaya çalışılmakta ve deneyler sırasında girdilerin değişik durumları, çıktı üzerindeki etkisi incelenmektedir [38]. Bu yöntemin ürün veya süreç geliştirme çevriminde uygulanması aşağıdaki maddelerde verildiği gibi faydalar sağlamaktadır [39];

1. Test edilen değişikliklerin içinde etkili olanların tamamlanması,
2. Belli bir aralıkta değişkenlerin çeşitli seviyelerinin etkilerinin lmlenmesi,
3. Sürecin mevcut durumda işleyişinin daha iyi anlaşılması,
4. Bir takım etkenlerin ve etkileşimlerin karşılaştırılması.
5. İyileştirilmiş süreç ıktıları,
6. Nominal veya hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılması,
7. Toplam geliştirme süresinin düşürülmesi,
8. Toplam maliyetin azaltılması.

3.3. Deney Tasarımı Sürecinde Kullanılan Genel Kavramlar

Deney düzenlenirken incelenen değişkene (olay, durum) etki eden faktörlerin (faktör değişkenler, etmenler) evrendeki etki düzeylerini doğru saptamak gerekir. Deney içinde bu değişkenlerin farklı gruplarda ya da farklı zamanlarda hangi seviyelerde kontrol altına alınacağı, hangisinin etkisinin sabit tutulacağı doğru olarak belirlenmelidir. Değişik deneme türlerinde ve farklı faktör sayısı ve seviyelerinde hangi tür bir uygulama yapmak gerektiği deneme planlaması ve deney tasarımları kuralları göz önüne alınarak kararlaştırılır [30].

Deneyde kullanılan faktörlerin sayısı 'k', yapılan gözlem sayısı 'n', tekrar sayısı 'r' harfleriyle simgelenmektedir. Faktörler ve kalite değişkenleri alfabenin büyük harfleriyle gösterilmektedir. 2k ve 3k faktöriyel tasarımları mevcuttur [40].

Deney tasarımı sürecinde kullanılan genel kavramlar aşağıdaki gibi tanımlanabilir [20].

Kalite (Response) Değişkeni: Deney tasarımı yapılarak tanınmak istenen ve üzerindeki farklı etkilerin araştırıldığı değişkendir. Response değişkeni süreçte iyileştirmeye tabi tutulacak değişkendir. Kalite değişkeni, çelik yay üretimi için çatlak yay yüzdesi, seramik imalatında seramik ürünlerin şekil bozukluğu, talaşlı imalatla üretilen parçanın yüzey pürüzlülüğü gibi farklı değişkenler olabilir.

Faktör: Tasarlanan deneyde kalite değişkeni üzerinde etkisi bulunan, kontrol edilebilir ya da kontrol dışı değişkenler faktör olarak adlandırılır. Faktör, sıcaklık değişkeni, süre gibi ölçülebilir (kantitatif) değişkenler olabileceği gibi, farklı tezgâhların, farklı operatörlerin etkileri gibi kalitatif değişkenler de olabilir.

Seviye: Kalite değişkeni üzerinde etkili olan faktörlerin deneyde alacakları farklı değerler faktör seviyeleri olarak adlandırılır. Örneğin; seramik fırınındaki sıcaklık faktörünün 30°C ve 40°C olmak üzere iki farklı seviyesi ele alınabilir.

3.4. Deney Tasarımı İçin Temel Basamaklar

Deney tasarımı çalışmaları, toplam kalite yönetimi çerçevesi içinde yapılmalıdır. Uygulamasında takip edilmesi gereken basamaklar aşağıda verilmiştir [20].

1. Kalite probleminin tanımlanması: Öncelikle deney sırasında, çıktı olarak incelenecek ve ürünün kalite özelliklerini temsil eden kalite değişkeni veya değişkenlerini tanımlamak gerekir. Kalite değişkenlerinin ölçülebilir (sayısal ya da nicel) olması gerekir. Ürünün boya ve yüzey parlaklığı gibi kozmetik ya da nitel özelliklerini temsil eden değişkenler için, birkaç kişilik bir jüri oluşturarak ürünün puanlanması önerilir.

2. Kalite değişken(ler)ini etkilemesi muhtemel tüm faktörlerin listesinin çıkarılması: Bu listenin tam ve doğru olarak oluşturulabilmesi için ürüne ve sürece ilişkin bir akış çizelgesi hazırlanması, ilgili kişi ve bölümlerin görüşlerinin alınması çok yararlı olur. Ayrıca belirlenen faktörlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin net olarak görülebilmesi ve sınıflandırılabilmesi için bir balık kılçığı çizelgesi oluşturulabilir.

3. Belirlenen faktörlerden hangilerinin deneyde incelenebileceğine karar verilmesi: Deneyin içereceği faktörlerin kontrol edilebilir, yani değerleri değiştirilebilir olması gerekir. Ayrıca deneye dahil edilmeyen faktörlerin neden dahil edilmediklerinin de belirtilmesi gerekir.

4. Deneyde incelenecek faktörlerin hangilerinin arasında etkileşimlerin olası olduğuna ve deneyde inceleneceğine karar verilmesi.
5. Deneye dahil edilen faktör ve incelenecek faktör sayısına bakarak, L8 ve L16 gibi bir tasarım matrisi seçilmesi.
6. Her faktör için seviye değerlerinin belirlenmesi: Alt ve üst düzey arası aralık çok küçük olursa, faktörün etkisi görülmeyebilir. Aralık çok büyük olursa, faktör deneye hakim duruma gelir ve diğer faktörlerinin etkilerinin saptanması güçleşebilir. Ayrıca deneye dahil edilmeyen faktörlerin değerlerinin deney sırasında sabit kalmasına dikkat edilmelidir.
7. Faktörlerin tasarım matrisi kolonlarına atanması.
8. Tasarım matrisini kullanarak uygulanacak faktör seviye kombinasyonlarının belirlenmesi.
9. Rassallaştırma yaparak deneyin uygulama sırasının tespit edilmesi.
10. Deneyin uygulama planının yapılması (personel seçimi, zaman, ölçme yöntemi vb.) ve faktör seviye kombinasyonlarını uygulama grubuna verilmesi.
11. Deneyin uygulanması ve kalite değişkeni Y'nin değerlerinin alınması.
12. Hesap tablolarının doldurularak etki değerlerinin hesaplanması.
13. Normal olasılık grafiğini oluşturarak hangi etkilerin istatistiksel olarak önemli olduğuna karar verilmesi.
14. Varsa önemli etkileşimler için ayrı grafikler çizilerek yorumlanması.
15. Önemli etki ve etkileşimlere bağlı olarak, en iyi ürün kalitesi ve faktör düzeylerinin belirlenmesi. Kalite değişkeni Y'nin beklenen değerinin hesaplanması.
16. Belirlenen düzeylerde deneyler yaparak sonuçların doğrulanması.

Bu adımların izlenmesi sonucunda süreç veya ürün için en iyi performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneyde ele alınan faktörlerin kalite değeri üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve en uygun deney parametreleri sonucunda elde edilebilecek kalite değeri öngörülebilecektir.

İstatistiksel olmayan deney tasarım yöntemleri kullanıldığında varyasyon ve regresyon analizi sonuçları bazen etkin süreci ya da işlemi belirlemeyebilir. Örneğin bir regresyon analizi bir işlemin sonucu etkileyecek sıcaklığın etkisini tam olarak belirlemeyebilir. Bundan dolayı bir araştırmacı işlemin sonucunu iyileştirmek için bir sıcaklık ayarlaması yapmaz. İşlem sırasında sıcaklığın normal dalgalanmasından

dolayı sapmalar meydana gelebilir. Bu dalgalanma istatistiksel olarak bulunabilecek büyüklükte değildir. Bu tür kısıtlar ve hatalar istatistiksel deney tasarımı yöntemi ile giderilir [41]. Deneysel çalışmalarda, parametrelerin en az deney ile sonuç değişken üzerine etkilerinin incelenmesi ve en uygun koşulların belirlenmesi amacıyla deneysel tasarım teknikleri kullanılmaktadır. Bağımlı değişkeni etkilediği düşünülen bağımsız değişkenler farklı seviyelerde ele alınarak etkileşim incelenmektedir. İyi bir deney tasarımı, temel ilkelere bağlı bir şekilde basit, esnek, sağlam ve uydurulan modelin uygunluğunu denetleyen kontrollere sahip olmalıdır. Deneysel tasarım yöntemleri kullanılarak en az işle en fazla bilgi edinme amaçlanmaktadır ve aşağıda listelendiği üzere çok çeşitli yöntemler uygulanmaktadır [42].

1. Her Defada Tek Etken (HDTE),
2. Eşleştirilmiş Karşılaştırma
3. Tam Faktöriyel
4. Kısmi Faktöriyel
5. Latin Kareler
6. Graceo-Latin Kareler
7. Box-Behnken
8. Plackett-Burman
9. Taguchi

Deney tasarımında klasik yöntemlerin yetersizliği istatistiksel deney tasarım yöntemleri ile giderilmiştir. İstatistiksel deney tasarımında yaygın olarak kullanılan tam faktöriyel, kesirli faktöriyel ve Taguchi Metodu olmak üzere farklı yöntemlerden detaylı olarak bahsedilecektir.

3.5. Tam Faktöriyel Deney Tasarımı

Endüstriyel uygulamalar, ekonomik ve zaman kısıtları dikkate alınarak en iyi uygulama şartlarının sağlanması ile en verimli düzeyin elde edileceği kombinasyonları gerektirir. Bu uygulamalarda, sürece etki eden faktörlerin bazıları kontrol edilebilirken bazıları edilemez [30].

Deney tasarımı süreç çıktısının en iyi seviyesinin tespitinde süreci etkileyen faktörlerden kritik olanları ve bunların süreç çıktısına olan etkilerini tespit eder.

Deneyisel çalışmalar da birden çok faktörün farklı seviyelerde ele alınarak etkilerinin incelenemediği tasarımlardır. En az iki veya daha fazla faktör ve bu faktörlere ait en az iki veya daha fazla seviyelerin bulunduğu deneylerde seviyelerin birbirleri ile çarpımları ile oluşan kombinasyondur.

Bilimsel olarak deney tasarımı 3 temel prensibe sahiptir. Bunlar; deney tekrarı, deneyin sırasının rastgele yapılması ve deneyin bloklanmasıdır [43]. Tam faktoriyel deney tasarımında rastsal tam bloklamalar kullanılır. Bloklamanın temel amacı bilinmeyen ve kontrol edilemeyen hataların deneyi etkilemesini önlemesidir. Eğer bu temel prensipler yerine getirilmezse deneyde bilinmedik hataların ortaya çıkması muhtemeldir. Deney esnasında oluşabilecek hatalardan ve sapmalardan sakınmak için iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar deneylerin rastgele yapılması ve geriye dönük detayların incelenerek gerekli düzeltmelerin yapılmasıdır [44].

Deney tasarımı yaparken her bir deney için tekrar sayısının fazla olması, değişkenler arasındaki ilişkiyi tespit etmek için daha belirgin sonuçlar vermekte, güven aralığı daraltılmakta ve buna bağlı olarak da aralık kestiriminin kesinliği artmaktadır. Fakat deney koşulları kaynak temini, maliyet, dışa bağımlılık gibi nedenlerle sınırlanabilmektedir [30].

Deney tasarımı sisteme yaklaşımda bulunurken istatistiksel yaklaşımları kullanır. Böylece faktörlerin çıktı üzerindeki etkilerini belirlemek ve varyasyon yaratan faktörlere karşı önlemler almak, tasarım aşamasında gerçekleştirilmiş olunur [45].

Deney tasarım ve analiz aşamalarında istatistik yaklaşımını kullanabilmek için, üzerinde çalışılacak konunun açıkça ifade edilmesi ve anlaşılması, verilerin toplanma şekli ve bu verilerin nasıl analiz edileceğinin belirlenmesi gerekmektedir [30].

Tam faktoriyel deneylerin analizinde varyans analizi ve regresyon analizi kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile bir parametrenin deney üzerindeki etkisi hesaplanabilir. Varyasyon ve regresyon analizi teknikleri işlem sırasınca bir değişiklik yapmadan farklılıkların kaynağının belirlenmesine yardımcı olur [41].

Deney tasarımında istatistiksel analizin en önemli safhası varyans analizi tablosunun oluşturulmasıdır. Varyans analizi tablosunda yer alan istatistikleri teorik olarak

hesaplamak zordur; bunun için de çaba gerektirir. Ayrıca günümüzde bu hesaplamaları yapan modülü barındıran Statistical Package for The Social Sciences (SPSS), MINITAB vb. gibi yazılımlar geliştirilmiştir. Varyans analizi hesaplamaları genellikle bu yazılımlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir [30].

Tam faktöriyel deney tasarımı; çok boyutlu bir yöntem olması, fonksiyonların lineerliğinin araştırılması ve faktörlerin karşılıklı etkileşimlerinin bağımlı değişkene olan etkisinin bulunarak sistem üzerinde ekonomik yönden değerlendirme yapma olanağı sağlaması yönünden avantajlı bir tasarım yöntemidir. Bu sayede süreç maliyetinin azaltılması, kalitenin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca tam faktöriyel tasarımda yüksek seviyeli etkileşimler istenmediği durumlarda ise sadece düşük seviye etkileşimler ve temel etkiler incelenmek istendiğinde, daha az sayıda deney yapılmak istendiğinde kesirli faktöriyel tasarımlar da kullanılabilir [37].

3.6. Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımı

Deney maliyetleri ve süresi tam faktörlü deneylerin yapılmasını birçok durumda zorlaştırmaktadır. Deney süresinin ve bütçesinin kısıtlı olduğu durumlarda, tam faktörlü deneylerin sayısı, başarıyı fazla etkilemeden azaltılması gerekebilir.

Tam faktöriyel deney tasarımında faktörlerin bütün seviyelerinin kombinasyonları tek-tek denendiğinden deney maliyetini arttırmakta ve çok zaman almaktadır. Yani tam faktöriyel deney tasarımında maksimum zaman ve maliyet söz konusudur. Tasarım yaparken deneyden elde edilecek veriler ile harcanan maliyet ve zaman arasındaki bağıntı çok önemlidir [46].

Kesirli deneyleri kullanmaktaki amaç ikili ve/veya daha yüksek derecedeki etkileşimlerin ihmal edilebileceği durumlarda deney sayısını azaltmak suretiyle deneylerin maliyetini düşürmek ve süresini kısaltmaktır [47].

Kesirli Faktöriyel tasarımlarında, deney sayısını 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 gibi orantılarla azaltmak mümkündür. Deney sayısını faktör sayısından bir eksikine kadar indirmek mümkündür. Fakat bu tarz deneyler, aşırı doymuş deney olarak adlandırılmaktadır [26].

Kesirli deneyler çok etkenli deneyler için gereken gözlem sayısının belli bir kesrini içerir. Örneğin, 7 faktörlü, 128 gözlem gerektiren bir deney, kesirli deney olarak tasarlanırsa, 1/2 kesir için $n=64$, 1/4 kesir için $n=32$, 1/8 için $n=16$ ve 1/16 için $n=8$ gözlem gerektirir. Bu kesirli deneylerin her birinde $n-1$ kadar etki hesap edilebilir. Bir deneyin büyüklüğünü ve o deneyden ne kadar sonuç elde edilebileceğini belirlemek üzere Serbestlik Derecesi (SD) kavramı kullanılmaktadır.

Bir deneyin serbestlik derecesi deneme sayısının 1 eksiği kadardır, yani deneme sayısının 1 eksiği kadar kıyaslama yapılabilir ve veri elde edilebilir deneyin serbestlik derecesi Denklem (3.1) deki gibi [47];

$$SD_{\text{Deney}} = \text{Deneme sayısı} - 1 \quad (3.1)$$

şeklinde olacaktır.

Bir faktörün etki derecesini belirlemek için gerekli serbestlik derecesi ise o faktörün denenen düzey sayısının 1 eksiği kadardır Denklem (3.2) deki gibi;

$$SD_{\text{Faktör}} = k - 1 \quad (3.2)$$

şeklinde olacaktır.

Faktör etkileri için toplam serbestlik derecesi ise Denklem (3.3) deki gibi;

$$SD_{\text{Toplam}} = n \times SD_{\text{Faktör}} \quad (3.3)$$

şeklinde olacaktır.

Serbestlik derecesi kavramından anlaşıldığı üzere, bir deneydeki faktörlerin etkilerini belirlemek için SD_{Toplam} kadar mukayese yapmak yeterlidir. Örneğin 2 düzeyli 7 faktörlü bir deney çok etkenli şekilde yapılırsa $(2^7) = 128$ deney gerçekleştirilecektir. Burada deneyin serbestlik derecesi $128-1=127$ iken faktör etkileri için toplam serbestlik derecesi; $SD_{\text{Toplam}} = 7 \times (2-1) = 7$ 'dir. Yani faktör etkilerini belirlemek için 7 kıyaslama (8 deney) yeterli iken 128 deney yapılmaktadır. Geri kalan 120 deney 2'li ve diğer çoklu etkileşimlerin incelenmesi için yapılmaktadır. Oysa imalat uygulamalarının birçoğunda 2'den fazla faktörün etkileşimlerinin gereksiz olduğu gözlenmektedir [47].

3.7. Taguchi Metodu

Üretim endüstrisinin önemli gelişmelerinden biri de, modern çevrim dışı (off-line) kalite kontrol tekniklerinin ürün veya süreç mühendisliğinde uygulanması ile ilgilidir. Bu kalite tekniklerinin birçoğu W. E. Deming tarafından şekillendirilmiştir. Profesör Genichi Taguchi felsefesini bunların üzerine bina etmiştir. Deming'in esas başarısı işletmeleri, kalite geliştirmede, üretim sürecinin istatistiksel olarak kontrol edilmesi gerektiğine inandırmak olmuştur. Taguchi, biraz daha geriye gitmiş ve kalitenin üretimden önce tasarım aşamasında sağlanacağını söylemiştir [48].

Taguchi'ye göre kalite; ürün müşteriye gönderildikten sonra toplumda meydana getirdiği kayıpla ölçülür [49]. Bu kayıp, müşteri memnuniyetsizliğini ve işletmelerin itibar kayıplarını kapsar. Bu tanım geleneksel tanımdan büyük ölçüde farklıdır. Geleneksel tanım, üretici odaklıdır ve kalite maliyeti olarak hurda, garanti, servis ve yeniden işleme maliyetlerini içerir. Taguchi'nin tanımında, müşteri üretim sürecinin en önemli parçasıdır. Ürünün veya servisin kalitesi; müşterilerin memnuniyetine ve böylece itibar kazanılmasına ve pazar payının artmasına sebep olacaktır.

Kaliteyi iyileştirmek değişkenliğin azaltılmasından geçmektedir. Kalite için harcanacak emekler, sıfır sapma ve sıfır bozulma için yapılmalıdır. Başta Shewart ve Deming olmak üzere bütün kalite uzmanları değişkenlik konusuna değinmişlerdir. Taguchi, bir ürünün reddedilmesinin en önemli sebebinin ürün spesifikasyonlarındaki değişkenlik olduğunu gözlemlemiş ve ürünün tasarım aşamasında belirlenmiş hedef değerinde üretilmesi gerektiğini söylemiştir. Taguchi, değişkenliğin kaynağı olan faktörleri; kontrol edilebilir ve kontrol edilemez değişkenler (gürültü faktörleri) olarak ikiye ayırmıştır. Kontrol edilebilir değişkenler, ürün üzerindeki etkisinin kolaylıkla ayarlanabildiği değişkenlerdir [50]. Bu tür değişkenlere malzeme, üretim yöntemi, makine vb. örnek verilebilir. Kontrol edilemeyen değişkenler ise, ürün üzerindeki etkilerinin ayarlanması ya çok güç ve pahalı ya da mümkün olmayan değişkenlerdir. Bu değişkenlere çevre ısısı, nem, makinelerin zamanla eskimesi vb. örnekler verilebilir. Taguchi'nin amacı, üründe değişkenlik meydana getiren bu faktörlerden kontrol edilebilir olanların değerlerini en iyi seçerek, kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisinin minimum olduğu üretim sürecini sağlamaktır.

Taguchi, ortogonal dizin (OD) kullanarak klasik deney tasarımı basitleştirmiştir. Taguchi'nin varyans indirgemedede sinyal/gürültü (S/N) oranlarını kullanması deney tasarımında bir ilktir. Taguchi Yöntemi, pekçok çalışmada iyi sonuçlar vermesine rağmen, zayıf olduğu yönler de bazı istatistikçiler tarafından eleştirilmiştir [51].

Taguchi'nin üründeki değişkenliği azaltma yaklaşımı iki aşamalı bir süreçtir:

1. Ürünü en iyi usul, teknoloji ve tekniklerle üretmek (hedeften sapmayı minimum yapmak için)
2. Bütün ürünleri aynı şekilde üretmek (ürünler arasındaki değişkenliği azaltmak için)

Taguchi, daha küçük daha iyi ve daha büyük daha iyi durumlar için beklenen kalite kaybının dolaysız olarak en küçüklenmesini önermektedir. Nominal en iyi durumu için Taguchi, iki aşamalı, yani S/N oranını en büyükleme ve sonra ortalamayı hedef değere ayarlamak, bir eniyileme (optimizasyon) prosedürü önermektedir [52].

Taguchi'ye göre, ürün veya üretim sürecinin tasarımı, ürün kalitesinde ve maliyetinde büyük bir etkiye sahiptir. Taguchi kalitenin tasarım aşamasında sağlanması gerektiğini, muayene veya istatistiksel kalite kontrol teknikleri ile kaybolan kalitenin geri getirilemeyeceğini, hatta çok iyi olmayan bir tasarımın dahi bu tekniklere göre kaliteyi iyileştirmede daha önemli olduğunu vurgulamaktadır [53].

Taguchi, kaliteyi sağlamak için yapılan faaliyetleri iki bölüme ayırmaktadır:

1. On – Line Kalite Kontrol
2. Off – Line Kalite Kontrol

Off-Line Kalite Kontrol: Ürün üretilmeden önce yapılan kalite geliştirme çalışmalarıdır. Pazar araştırması ile başlar ve ürün ve süreç geliştirme ile devam eder.

On-Line Kalite Kontrol: Ürünün üretimi aşamasında ve üretim sonrasındaki kalite faaliyetlerini kapsar.

Taguchi, off–line kalite kontrolü, kalite sağlama aşaması olarak, üç adım halinde, Sistem Tasarımı, Parametre Tasarımı ve Tolerans Tasarımı olarak tanımlamaktadır [54].

Sistem Tasarımı, ürünün arzu edilen ve gerekli fonksiyonlarını yerine getiren bir prototipin geliştirildiği aşamadır ve Taguchi off-line kalite stratejisinin ilk aşamasıdır. Sistem tasarımının esas amacı; ürünü belirlenmiş tolerans sınırları içerisinde ve en düşük maliyetle üretmeyi sağlayacak üretim sürecini geliştirmektir. Gerekli malzeme, ekipman ve üretim teknolojisinin belirlendiği aşamadır.

Parametre Tasarımı, Taguchi metodunun en önemli aşamasıdır. Ürün kalitesini etkileyen faktörlerin belirlendiği ve bu faktörlerin ürüne olan etkisinin en az kılınmaya çalışıldığı bir tasarımı gerçekleştirme aşamasıdır. Taguchi bunu sağlamak için, istatistiksel deney tasarımı yöntemlerini kullanır.

Tolerans Tasarımı, parametre tasarımı yetersiz kalmış ise başvurulacak aşamadır. Taguchi toleranslarla çalışmayı sevmemekle beraber hepten de ret edememektedir. Tolerans tasarımı aşaması kalite geliştirme değil kalite değerlendirme aşamasıdır. Taguchi dar toleranslarla çalışılması gerektiğini söylemektedir.

Ürün veya süreç tasarımının, kalite geliştirme açısından en önemli aşamaları, parametre tasarımı aşamasıdır. Bu aşamada, ürün performansını etkileyen faktörleri ve performans üzerindeki etkilerini belirlemek için deney tasarımı yöntemi kullanılır. Amaç, ürün kalitesi üzerindeki etkin faktörlerin etkisini kontrol altına almaktır. Buna Sağlam Tasarım (robust tasarım) denmektedir [55].

Sağlam tasarım, ürün üretilebilirliği ve yaşamı için önemli bir tekniktir. Japonya’da ve ABD’de kullanılmasıyla; tasarımcılardan, üreticilerden, istatistikçilerden ve kalite uzmanlarından büyük bir ilgi görmüş ve dikkatleri üzerine çekmiştir. Taguchi’nin, metodu Amerikan endüstrisinin birçok önemli kuruluşuna (Ford Motor, AT&T, Xerox) tanıtılmasından sonra, ürün üretiminde ve üretim süreci tasarımında önemli ölçüde bir kalite iyileşmesinin olduğu görülmüştür [56].

Sağlam Tasarımın bu başarısından dolayı metodu anlamak için birçok araştırma ve örnek çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların birçoğu, ürün kalitesinin iyileşmesi ve maliyetlerin azalması neticesini vermiştir. Örneğin Phadke, süreç değişkenliğinin dörtte bir ve süreç zamanının %50 azaldığını söylemektedirler [56].

Sağlam tasarım, Taguchi metodunun Parametre tasarımı ve Tolerans tasarımı adımlarını kapsar. Sistem tasarımı, geleneksel araştırma ve geliştirme faaliyetlerinden oluşmaktadır.

Taguchi, üründe ve süreçte, değişkenlik (hedef değerden farklılık, yani kalitesizlik) yaratan kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin değerlerini en uygun seçerek, ürün veya süreçteki değişkenliği en aza indirmek gerektiğini söylemektedir. Sağlam tasarım ifadesindeki sağlam kelimesi, kontrol edilemeyen faktörlere, örneğin; nem, toz, ısı gibi çevre koşullarına, müşteri kullanımındaki farklı uygulamalara ve malzemedeki farklılıklara karşı duyarsız, yani onlardan etkilenmeyen, ürün ve süreç anlamında kullanılmaktadır [57].

4. UYGULAMA

4.1. Uygulamaya Giriş

Yarıiletken üretimi, teknolojinin; ilerleme hızı ve dünya ekonomisi üzerindeki etkisi nedeni ile en önemli ve en hızlı gelişen endüstrilerinden biridir [58]. Çalışma yarıiletken üretim laboratuvarında yarıiletken üretiminin bir alt süreci olan fotolitografi süreci, UV sertleştirme adımının iyileştirilmesi üzerine gerçekleştirildi.

Deney tasarımı yöntemi sürecin iyileştirilmesi için istatistiksel bir araç olarak kullanılmıştır. Deneysel tasarım yöntemleri ilk olarak Fisher tarafından geliştirilmiştir [59]. Deney tasarımı, üründe ve süreçte değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktör seviyelerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir istatistiksel metottur.

Çalışma kapsamında tümdevre üretimi fotolitografi sürecinin; UV sertleştirme adımı tanımlanmış, değişkenliğin ve eğilimin görülebilmesi için mevcut durum incelenmiş, süreç üzerinde etkisi olan faktör ve seviyeleri belirlenmiş, tam faktöriyel deney seti düzenlenerek verilerin istatistiksel olarak analiz edilmesi ile faktör ve faktör seviyelerinin aşınmaya karşı rezist direnci üzerindeki etkilerinin görülmesi sağlanmıştır. Süreçte kalitenin arttırılmasını sağlamak üzere, rezist kalınlığındaki değişim miktarını en küçükleyen faktörlerin en uygun seviyeleri belirlenerek, istatistiksel analizlerle elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

UV sertleştirme teorisinin farklı parametreleri için çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir [60]. En iyi UV Sertleştirme reçetesine ulaşmak adına süreç kararlılığını ve pul desenini etkileyen birçok parametre ele alınmıştır [61]. Bu çalışmada şimdiye kadar yapılmış uygulamalardan farklı olarak UV sertleştirme sürecindeki sıcaklık ve zaman ile ilgili parametreler birlikte optimize edilmiş ve

etkilerinin aşındırma direnci açısından tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi uygulanarak istatistiksel olarak gösterilmesi sağlanmıştır.

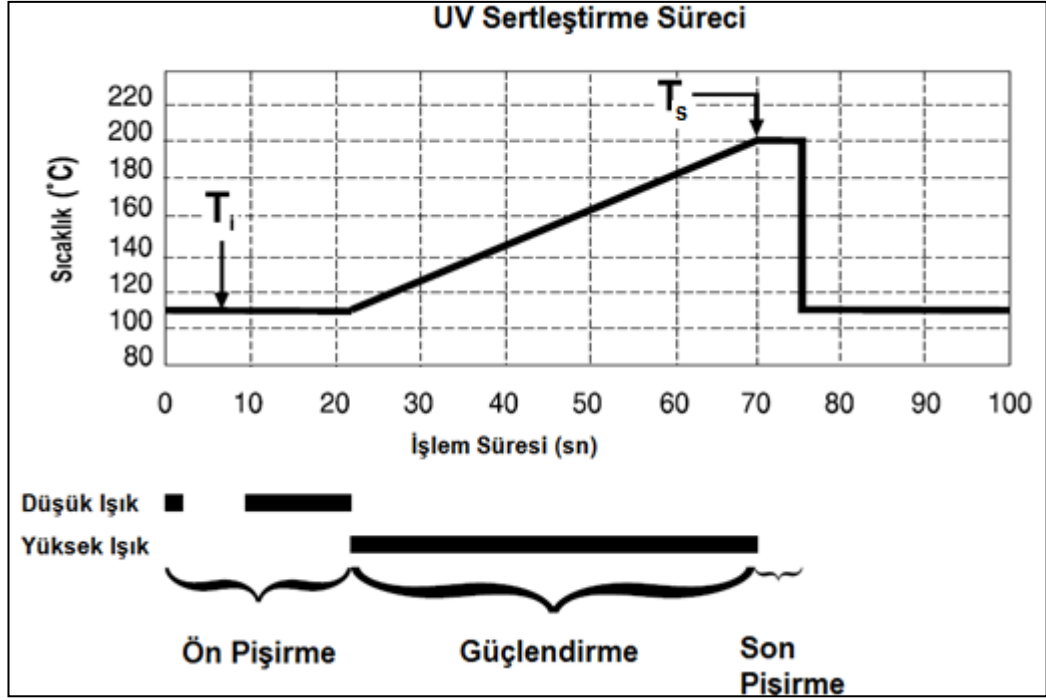
4.2. Modelin Tanımlanması ve Deneylerin Gerçeklenmesi

J.C. Matthews tek ve çok katmanlı pozitif fotorezist üzerindeki kararlılığa odaklanmış [62, 63] ve 1985 yılında ilk olarak fotorezist malzemelerinin sertleştirilmesi ve kararlılığına yönelik UV sertleştirme tekniğini bulmuştur [64].

Yarı iletken üretimi termal işlemlerden oluşan bir dizi adımı içermektedir. Fotolitografi işlemi fotorezist desen deformasyonunu önlemede oldukça etkilidir. Bu aşamada fotolitografi işleminden; fiziksel sağlamlık, ısıl dayanıklılık, kimyasal dayanıklılık, iyi yapışkanlık, pürüzsüzlük, desen transferinin iyi yapılması vb. beklenen önemli özelliklerden bazılarıdır. UV sertleştirme tekniği beklenen özellikleri sağlamak üzere bu termal işlemlerin yol açtığı genişleme, büzülme, yüzey üzerinde deformasyon gibi pul üzerindeki negatif etkileri minimize etme özelliğine sahiptir [61].

4.2.1. UV sertleştirme sürecinin tanımlanması

UV sertleştirme süreci; Ön Pişirme (Pre-Bake), Güçlendirme (Ramp Up) ve Son Pişirme (Post-Bake) olmak üzere üç evreden oluşmaktadır. Şekil 4.1’de UV sertleştirme süreci şematik olarak gösterilmiştir [65].



Şekil 4.1. UV sertleştirme süreci [65]

Rezistin UV'ye maruz kalmadan önce uygun ortamın sağlanması için ön pişirme evresine gerek vardır. Ön pişirme evresinde rezistin başlangıç sıcaklığına getirilmesi (T_i) ve bu sıcaklıkta muhafaza edilmesi sağlanmaktadır.

İkinci evre olan güçlendirme evresinde işlem süresi boyunca plaka istenen son sıcaklığa (T_s) yükseltilmektedir. Yükselme Eğimi-Sıcaklık Zaman Eğrisi (Ramp-Rate) ($^{\circ}\text{C}/\text{sn}$) saniyede arttırılan derece ile kontrol edilmektedir. Pul güçlendirme periyodu boyunca yüksek yoğunluklu UV enerjisine maruz kalmaktadır.

UV sertleştirme sürecinin son evresi son pişirmedir. Son pişirme periyodu boyunca plaka, uzun bir süre yüksek ısıda kalmaktadır [61].

4.2.2. Yanıt değişkeninin belirlenmesi

Rezist kalınlığının fazla olması aşınmaya karşı rezist direncinin yüksekliği ve rezist profili kararlılığı anlamına gelmektedir.

Rezist kalınlığındaki değişim miktarını hesaplamak için, UV sertleştirme sonrasında ve Poli/Oksit Aşındırma (UV sertleştirme sürecinden sonra uygulanan aşındırma süreci) sonrasında rezist kalınlığı ölçülmüştür. Yapılan analizler ve incelemeler

sonucunda pulların üzerine kaplanan rezist kalınlığındaki değişimin rezist direncini etkilediği görülmüştür.

Bu doğrultuda pulların üzerine kaplanan rezist kalınlığındaki değişim miktarının minimum olması aşındırmaya karşı rezist direncini arttıracığından sürecin performans çıktısı olarak hedeflenmiştir.

4.2.3. Faktörlerin belirlenmesi

Sürecin ilk evresi olan ön pişirme evresini etkileyen faktörler; başlangıç sıcaklığı ve ön pişirme süresidir. Yapılan literatür araştırmaları doğrultusunda sabit faktör olarak başlangıç sıcaklığının 110 °C, ön pişirme süresinin 10 sn uygulanması kararlaştırılmıştır. İkinci evre olan güçlendirme evresinde faktörler; Yükselme Eğimi (°C/sn) ve Son Sıcaklık (°C) olarak belirlenmiştir. Yükselme Eğimi Süresi (Yüksek güçte UV ışıklandırma süresi) dolaylı parametre olup, yükselme eğimi, son sıcaklık ve başlangıç sıcaklığının bir fonksiyonudur. Üçüncü ve son evre olan son pişirme evresinde ayarlanan Son Pişirme Süresi (sn) en iyileme için araştırılması gereken parametredir.

Süreç parametreleri yukarıda bahsedildiği şekilde kararlaştırılmıştır. Bu parametreler haricinde süreci etkileyen ve bu çalışmada sabit parametre olarak belirlenen diğer parametreler lamba tipi ve UV enerji seviyesidir. H-mod, H ve D mod lamba tipleri arasından dalga boyu açısından en uygun olan H-mod lamba seçilmiştir. Lamba seçiminin yanısıra ışık yoğunluk seviyesi de bir diğer parametredir. Ön pişirme evresinde düşük seviye, güçlendirme evresinde ise yüksek seviyeli olmak üzere iki seviyeli UV enerjisi kullanılmıştır. Rezistin kimyası ve kalınlığı çapraz bağlanma derecesinde etkili diğer parametrelerdendir fakat denemeler sırasında aynı tip rezist kullanılmış ve başlangıç kalınlığı olarak aynı kalınlıkta rezist serilmesi/kaplanması sağlanmıştır. Rezist tipi olarak denemelerde I-line fotorezist kullanılmıştır [61].

Deneye dahil edilmeyen faktör değerlerinin deney sırasında sabit kalmasına dikkat edilmiştir.

Bahsedilenler doğrultusunda kontrol faktörleri; Yükselme Eğimi (°C/sn), Son Sıcaklık (°C) ve Son Pişirme Süresi (sn) olarak belirlenmiştir.

4.2.4. Faktör seviyelerinin belirlenmesi

Her faktör için seviye değerlerini belirlerken dikkat edilmesi gereken bazı konular vardır. Alt ve üst düzey arası aralığın çok küçük olması durumunda faktörün etkisi görülmeyebilir. Aralık çok büyük olursa, faktör deneye hakim duruma gelebilir ve diğer faktörlerinin etkilerinin saptanması güçleşebilir. Çalışmada faktör seviyelerini belirlerken uygun seviye aralıklarının seçilmesine dikkat edilmiştir.

Deneylerde UV sertleştirme Poli/Oksit Aşındırma için uygulanacağından rezist kalınlığı 1 µm seçilmiştir. Bu durumda Yükselme Eğimi için; 1°C/sn ve 1,5°C/sn seviyeleri ayarlanabilmektedir [65].

Son sıcaklık parametresi için fotorezist tipi ve kalınlığı önemli faktörlerdendir. Yapılan deneylerde son sıcaklığın yükseltilmesi ile rezist direncinin de arttığı görülmüştür. Bu sebeple sıcaklığın 130°C'nin altına düşmemesi gerektiği saptanmıştır. Ancak son sıcaklığın 170°C'nin üzerine çıkarılması pulun yüksek dereceli UV'ye maruz kalmasını gerektirdiğinden fotorezist üzerinde yüksek sıcaklık ve UV etkileri nedeni ile buruşma meydana gelmemesi için son sıcaklık faktörünün maksimum 170°C'ye çıkarılabileceği kararlaştırılmıştır.

Bu durumda Son Sıcaklık faktör seviyeleri 130°C, 150°C, 170°C olarak belirlenmiştir.

Son pişirme süresinin uygulanmaması ya da 10 sn boyunca uygulanmasının performans parametreleri üzerindeki etkileri görülmek istendiğinden son pişirme süresi parametresi iki seviyeli olarak belirlenmiştir. Tablo 4.1'de belirlenen faktör ve faktör seviyeleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Faktör ve faktör seviyeleri

Faktör	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Yükselme Eğimi	°C/sn	1,0	1,5	
Son Sıcaklık	°C	130	150	170
Son Pişirme Süresi	sn	0	10	

En uygun faktör ve faktör seviyelerinin belirlenmesinde rezist kalınlığı, pul'un yüzey tabakası, kritik ölçülerin boyutu, maruz kalma süresince retikül üzerindeki açık alan büyüklüğü gibi birçok değişken dikkate alınmıştır.

4.2.5. Deney setinin seçimi ve deneylerin gerçekleştirilmesi

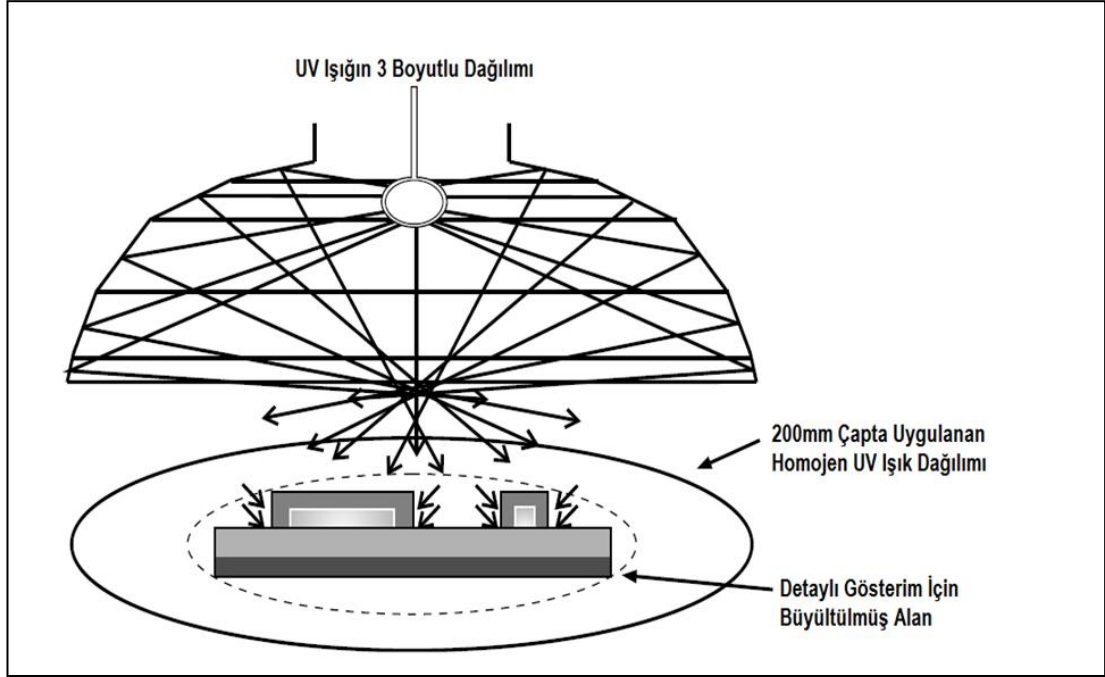
Faktöriyel tasarım; bir sistemin eniyilenmesini sağlamak üzere süreci etkileyen faktörlerin ürün üzerindeki etkileri ve faktör seviyelerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır [66].

Tasarımda hangi deney düzeneğinin kullanılacağı; faktör sayısına, incelenmek istenen etkileşim sayısına, faktörlerin seviyelerine, deneysel kararlılık ve maliyet sınırlarına bağlıdır.

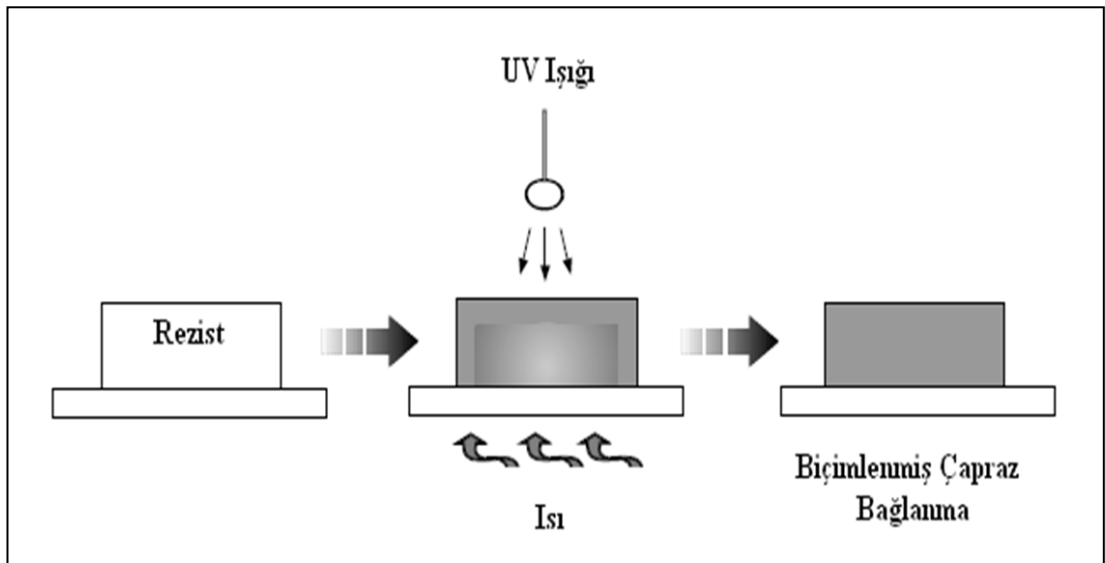
Tam faktörlü deney tasarımı yöntemi; deneysel sonucu etkileyebilecek faktörlerin ve tüm faktör etkileşimleri incelenmek istendiğinde kullanılan bir yaklaşımdır. Faktör ve düzey sayılarının çok yüksek olması halinde çok etkenli deneylerin yapılması uzun ve maliyetli bir süreçtir. Tasarımda yüksek seviyeli etkileşimler istenmediği durumlarda ya da sadece düşük seviye etkileşimler ve temel etkiler incelenmek istendiğinde daha az sayıda deney yapılması tercih edilerek kesirli faktöriyel tasarımlar da kullanılabilir. Çalışmada tüm faktör ve faktör seviyelerinin sürece etkisi görülmek istendiğinden genel tam faktöriyel deney tasarımı tekniğinin uygulanması kararlaştırılmıştır. Ancak ölçümlerin fotolitografi sürecinde UV sertleştirme işlemi sonrası ve aşındırma işlemi sonrasında ara işlem adımlarında alınmasının süreci durdurması ve alınan ölçümler sırasında pul üzerinde deformasyon vb. istenmeyen durumlar meydana geldiğinden deneyleri yapmak oldukça maliyetli olmaktadır. Bu sebeple kurulan deney düzeneğinde tek tekrarlı deney yapılmıştır.

Yapılan deneylerde Fujifilm Oir-38 A9 Pozitif Fotorezist kullanılmıştır. Aşınma testleri rezist kaplanan desensiz silikon pullar üzerinde yapılmıştır. Aşınma öncesi ve aşınma sonrası süreçlerde rezist kalınlıkları Nanometrics Nanospec 6100 ile ölçülmüştür.

Otomatik olarak pullar yaklaşık 1 μm rezist kaplanmıştır. UV sertleştirmesinde Fusion System's 200 PCU (Photo Conductor Unit) fotostabilizer [67]. UV Sertleştirme aracı kullanılmıştır. Bu aracın lamba sistemi yüksek güçtedir. Pul yüzeyinde düzgün ve yaygın UV radyasyonu sağlamak için UV mikrodalga kaynağı ve yansıtıcı optikler içermektedir [63]. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de Fusion 200 PCU Fotostabilizasyon sürecinin şematik gösterimi verilmiştir [65].



Şekil 4.2. Fusion 200 PCU fotostabilizasyon sürecinin şematik gösterimi [65]



Şekil 4.3. Fusion 200 PCU fotostabilizasyon sürecinin yakın gösterimi [65]

4.2.6. Tasarım matrisi ve deney sonuçları

Deneyler doğru tasarlanmış ve doğru yapılmış ise verilerin analizi için bilinen iyi istatistiksel yöntemler vardır ve analizler için kullanılmak üzere çok çeşitli yazılım araçları geliştirilmiştir [68]. Bu çalışmada da deney tasarımının yapılması ve deney tasarımı uygulaması için uygun ortam ve koşulların sağlanmıştır. Belirlenen faktör ve faktör seviyeleri doğrultusunda tüm deney kombinasyonlarının denenmesi amacı ile MINITAB programı; Deney Tasarımı_Genel Tam Faktöriyel Tasarım ile deney düzeneği oluşturulmuştur [69].

Oluşturulmuş tasarım matrisi ve tam faktöriyel deney düzeneğinde deney kombinasyonlarına göre elde edilen pul üzerindeki rezist aşınma miktarının (Angstrom) aşındırma öncesi ve aşındırma sonrasındaki değişim sonuçları Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Deney tasarım matrisi

Rassal Sıra	Standart Sıra	Blok	Son Pişirme Süresi (sn)	Yükselme Eğimi (°C/sn)	Son Sıcaklık (°C)	Aşınma Öncesi (Angstrom)	Aşınma Sonrası (Angstrom)	Rezist Aşınma Miktarı (Angstrom)
2	1	1	0	1	150	9203	8211	992
3	2	1	0	1	170	8941	8050	891
1	3	1	0	1	130	9102	8180	922
9	4	1	10	1	170	8911	8148	763
12	5	1	10	1,5	170	8980	8260	720
5	6	1	0	1,5	150	9153	8263	890
8	7	1	10	1	150	8896	8102	794
4	8	1	0	1,5	130	8992	8124	868
6	9	1	0	1,5	170	9092	8249	843
7	10	1	10	1	130	8965	8144	821
11	11	1	10	1,5	150	8869	8094	775
10	12	1	10	1,5	130	8979	8140	839

4.3. Verilerin İstatiksel Analizi

Gerçekleştirilen deney sonuçlarından elde edilen veriler; MINITAB programı ile ANOVA_Genel Doğrusal Model kullanılarak cevap değişkeninin yani rezist aşınma miktarının aldığı değerlerin analizi yapılmıştır.

Analiz sonuçları alt bölümlerde ayrıntılı olarak gösterilmiş ve yorumlanmıştır.

4.3.1. Varyans analizi (ANOVA)-1

İşlem parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının testi için modele tüm faktör ve etkileşimler dahil edilerek varyans analizi yapılmıştır. Fisher tarafından; istatistiksel olarak tasarım parametrelerinin kalite karakteristiği üzerindeki etkilerinin görülmesinde F testi adı verilen araç kullanılmıştır [59]. F değerinin dörtten büyük olması ($F > 4$); tasarım parametresinin kalite karakteristiği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Rezist direnci için yapılan ve tüm faktör ve faktör etkileşimlerinin modele dahil edildiği %90 güven düzeyindeki Varyans Analizi sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Analizi sonuçlarındaki F ve P istatistiklerine bakıldığında %90 güven seviyesi için faktör etkileşimlerinde P-değerleri $> 0,10$ olduğundan faktör etkileşimlerinde cevap değişkeni üzerinde istatistiksel açıdan anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür. Kalite karakteristiği üzerinde, etkileşimler güçlü bir etkiye sahip değildir.

Genel Doğrusal Model					
Faktör Bilgisi					
Faktör	Seviye	Değerler			
Son Pişirme Süresi	2	0; 10			
Yükselme Eğimi	2	1,0; 1,5			
Son Sıcaklık	3	130; 150; 170			
Varyans Analizi					
Değişkenlik Kaynağı	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F-Değeri	P-Değeri
Son Pişirme Süresi	1	40136,3	40136,3	90,08	0,011
Yükselme Eğimi	1	5125,3	5125,3	11,50	0,077
Son Sıcaklık	2	9087,2	4543,6	10,20	0,089
Son Pişirme Süresi*Yükselme Eğimi	1	2133,3	2133,3	4,79	0,160
Son Pişirme Süresi*Son Sıcaklık	2	4331,2	2165,6	4,86	0,171
Yükselme Eğimi*Son Sıcaklık	2	929,2	464,6	1,04	0,490
Hata	2	891,2	445,6		
Toplam	11	62633,7			

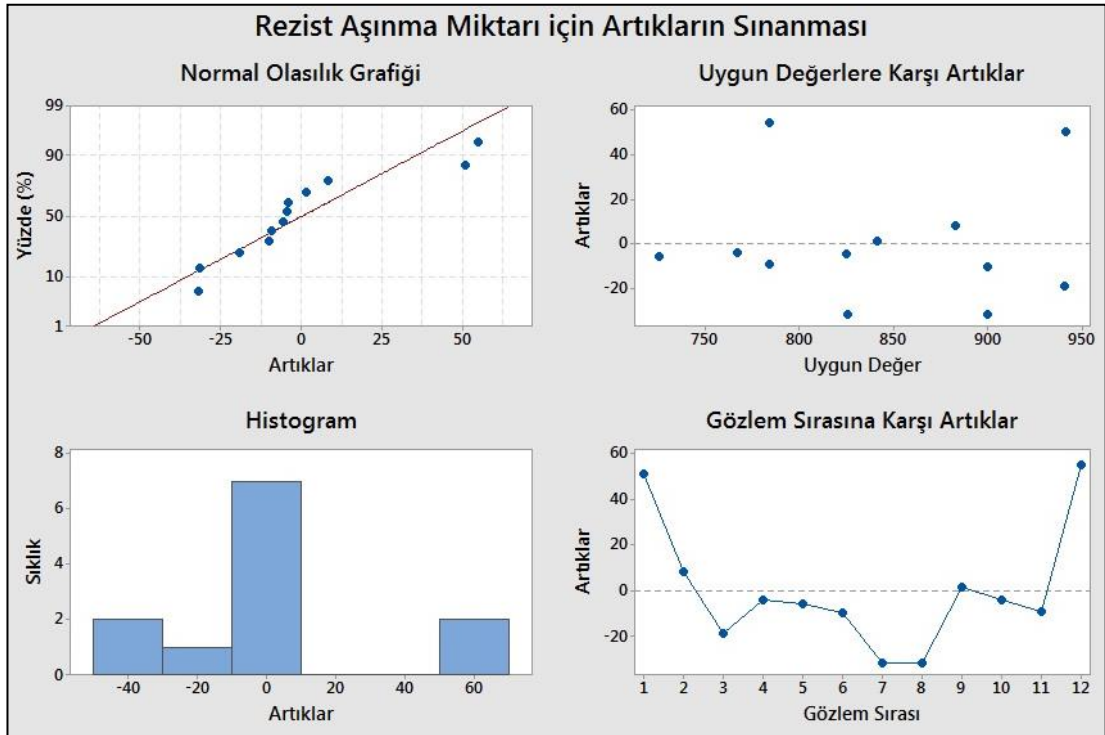
Şekil 4.4. ANOVA sonuçları-1

Model; etkileşimler çıkarılarak tasarım parametrelerinin cevap değişkeni üzerindeki etkilerinin görülmesi amacı ile tekrar analiz edilmiştir.

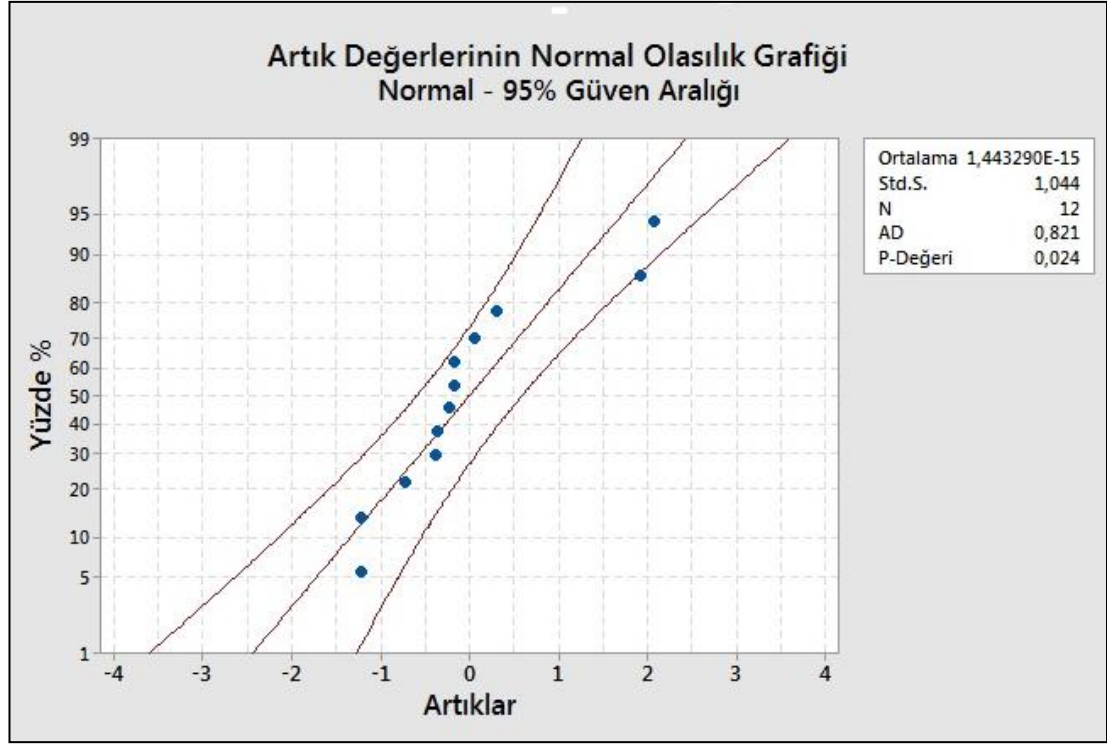
4.3.2. Artıkların analizi

Öncelikli olarak modelin yeterliliğinin ve temel deney tasarımı varsayımlarının kontrolü için artık (residual) grafikleri incelenmiştir. Temel deney tasarımı varsayımlarında; artık grafiğindeki artıkların normale yakın olması, grafiklerde rassal olmayan desenlerin olmaması beklenmektedir.

Modelin tahmin edilen sonuçları ile gerçekleşen değerler arasındaki farkın “artık (residual)” dağılımı normal olmalıdır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da yer alan normal olasılık çizelgelerinde artıkların %95 güven aralığında normal dağıldığı görülmüştür. Artıkların zaman çizelgesine bakıldığında bağımsızlık varsayımları ya da sabit varyansın sağlandığı, ayrıca belirgin bir desenin ortada olmadığı görülmüştür ki elde edilen tüm bu sonuçlar ile varsayımların doğruluğu kanıtlanmıştır. Gözlem ortalamaları bağımsız ve normal olarak dağıldığından, bu durum ayrıca rassallaştırma ve uygun örnek büyüklüğü kullanıldığını da göstermektedir.



Şekil 4.5. Artık grafikleri



Şekil 4.6. Normal olasılık grafiği

4.3.3. Varyans analizi (ANOVA)-2

Parametre etkileşimleri çıkarılarak tekrar analiz edilen rezist aşınma miktarı verileri için Şekil 4.7’de ANOVA sonuçları gösterilmiştir. Elde edilen ANOVA tablosuna göre; kurulan modelde birden fazla girdi değişkeni olduğundan R-Sq (adj) değerleri dikkate alınmış ve modelin rezist direncini %79,21 oranında açıkladığı görülmektedir.

Modeldeki faktörlerin %90 güven seviyesi için p-değerleri<0,10 olduğundan seçilen üç faktörün de cevap değişkeni üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğu görülmektedir.

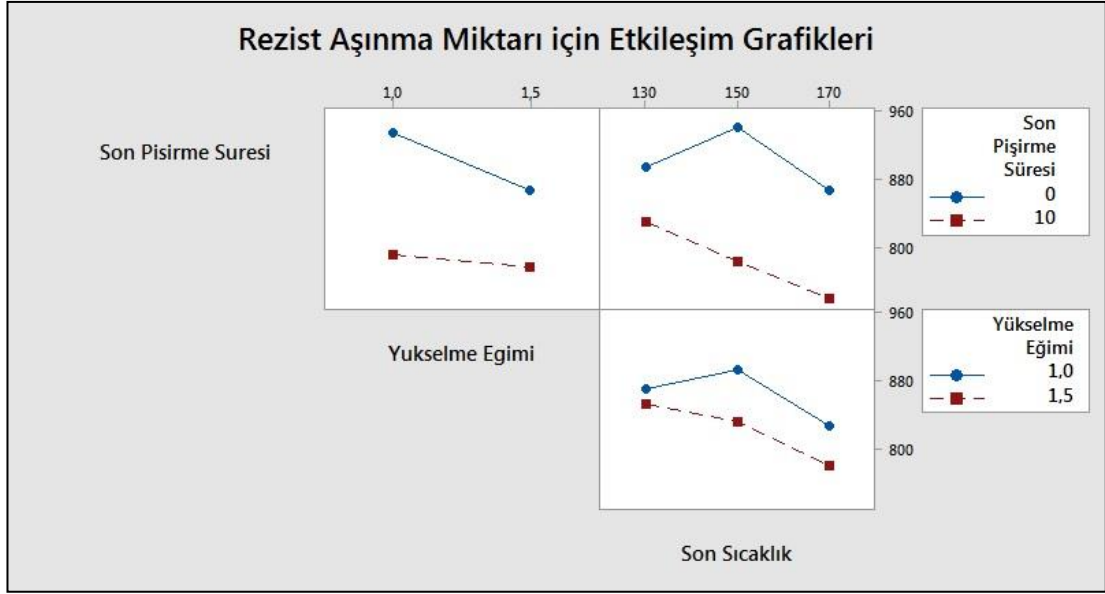
Genel Doğrusal Model					
Faktör Bilgisi					
Faktör	Seviye	Değerler			
Son Pişirme Süresi	2	0; 10			
Yükselme Eğimi	2	1,0; 1,5			
Son Sıcaklık	3	130; 150; 170			
Varyans Analizi					
Değişkenlik Kaynağı	Serbestlik Değeri (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F-Değeri	P-Değeri
Son Pişirme Süresi	1	40136	40136	33,91	0,001
Yükselme Eğimi	1	5125	5125	4,33	0,076
Son Sıcaklık	2	9087	4544	3,84	0,075
Hata	7	8285	1184		
Toplam	11	62634			
Model Özeti					
St.Sap.	R²	R² (düzeltilmiş)			
34,4027	86,77%	79,21%			

Şekil 4.7. ANOVA sonuçları-2

4.3.4. Etkileşim grafiği

Etkileşim, bir faktörün (A), performans karakteristiği üzerindeki etkisinin diğer bir faktöre (B) bağlı olduğu durumlardır. (A faktörünün etkisinin B Faktörünün durumuna bağlı olarak değişmesi gibi.) Bu durum AxB şeklinde gösterilir.

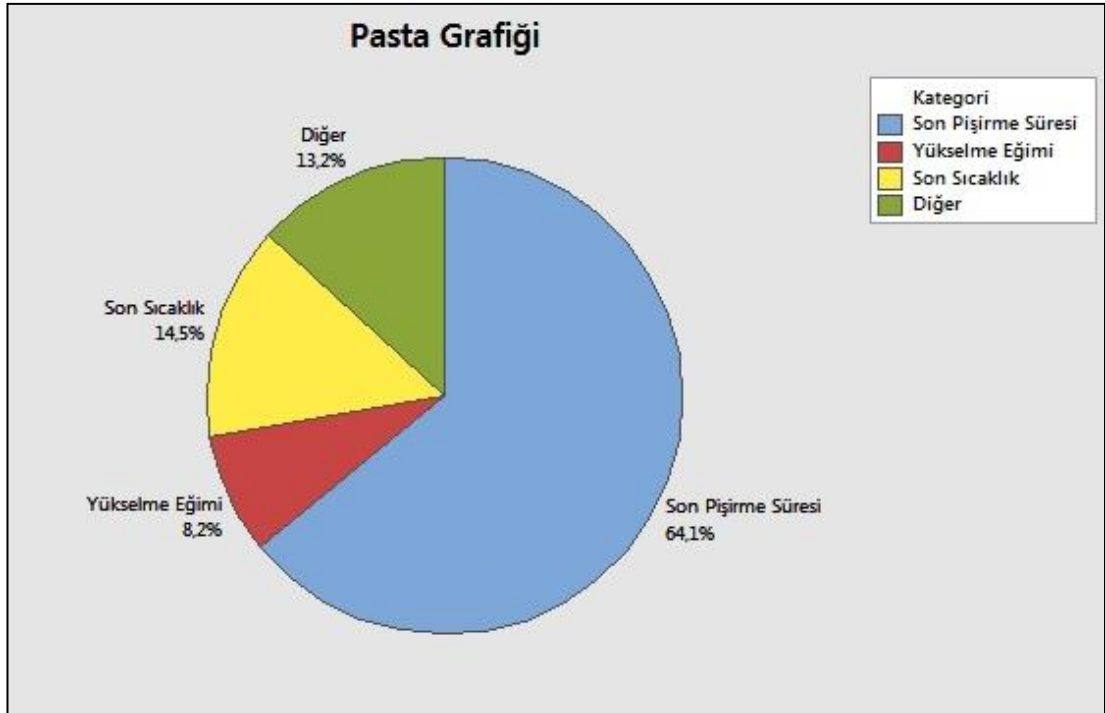
Seçilen faktörlerin birbiri ile etkileşimleri olmadığı diğer bir ifade ile ortak faktör etkilerinin bulunmadığı görülmektedir. Şekil 4.8’de istatistiksel analiz sonuçlarından elde edilen etkileşim grafiklerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Etkileşim grafiği

4.3.5. Pasta grafiği

“Rezist Direnci” üzerindeki değişkenliğin ne kadarının, hangi ana etki ve etkileşimden kaynaklandığını Şekil 4.9’da yer alan düzeltilmiş kareler toplamına (Adj SS) göre Pasta Grafiği göstermektedir.



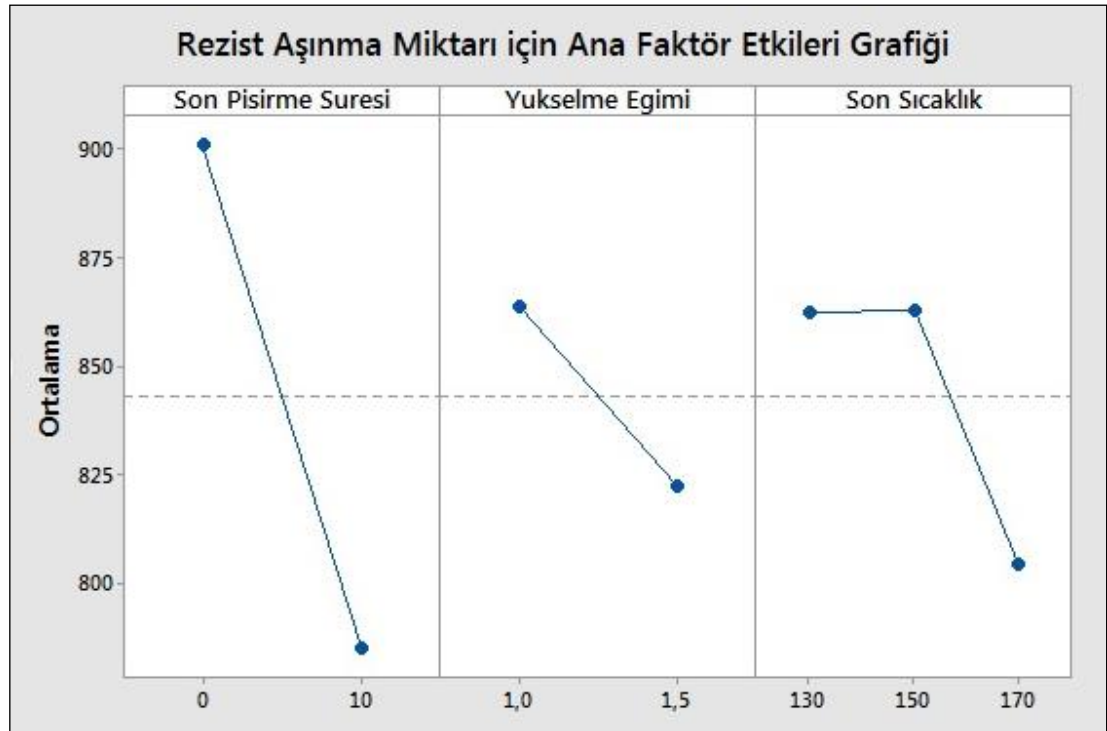
Şekil 4.9. Pasta grafiği

Pasta Grafiği incelendiğinde; değişkenlik üzerindeki en etkili faktörün %64,1’lik bir oranla “Son Pişirme Süresi” olduğu, “Yükselme Eğimi”nin süreç üzerinde sadece %8,2 oranında etkisi olduğu görülmüştür.

4.3.6. Ana etkiler grafiği

Faktör ve faktör seviyelerinin etki büyüklüklerinin anlaşılmasını en hızlı ve görsel olarak ana etkiler grafiğinde görmek mümkün olmaktadır.

Şekil 4.10’da yer alan Ana Etkiler Grafiği sonuçlarına göre rezist aşınma miktarını en küçükleyen faktörlerin en uygun seviyeleri; Yükselme Eğimi 1,5, Son Sıcaklık 170, Son Pişirme Süresi 10 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. Ana etkiler grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tam faktöriyel deney tasarımı tekniği seçilen faktör ve faktör seviyelerinin rezist direnci üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak karşılaştırılması için uygulanmıştır.

İstatistiksel analiz sonuçları; son pişirme süresi, yükselme eğimi ve son sıcaklık faktörlerinin %90 güven aralığında model üzerinde etkili olduklarını göstermiştir. Varyans analizinde, seçilen faktörlerin modeli yaklaşık %80 oranında açıklayabildiği görülmüştür. UV Sertleştirme sürecindeki son pişirme adımının 10 sn boyunca uygulanması rezist direncini arttırmıştır. Pasta grafiği, son pişirme süresinin tek başına rezist direnci üzerinde %64,1'lik bir oranda en etkili faktör olduğunu göstermiştir. Etkileşim grafiklerinden faktörlerin birbiri ile etkileşimlerinin yok denecek kadar az olduğu anlaşılmaktadır. Ana faktör etkileri grafiklerinde rezist aşınma miktarını en küçükleyen faktör seviyelerinin; Yükselme Eğimi 1,5, Son Sıcaklık 170, Son Pişirme Süresi 10 olarak belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışma fotolitografi sürecinde sertleştirme işlemi için alternatif bir yöntem olarak uygulanan sıcak plakada sertleştirme yöntemine göre UV ile sertleştirme yönteminin belirlenen faktör ve seviyelerinde daha yüksek dirençli rezist oluşturduğu gözlemlenmiştir. UV sertleştirmesinde son pişirme süresinin uygulanabilir olması ve bu faktörün yapılan deney sonuçlarında rezist direnci üzerinde oldukça etkili bir faktör olarak görülmesinin sıcak plakada sertleştirmeye göre UV sertleştirmesinin avantajı olarak görülmektedir.

Bu çalışma sıcaklık ve zaman ile ilişkili faktörlerin bir arada eniyilemesi ve etkilerinin incelenmesi yönünden UV sertleştirme süreci ile ilgili yapılan diğer çalışmalardan farklılık yaratmıştır.

Sıcaklık ve zaman ile ilişkili faktörlerin aşındırmaya karşı rezist direncini nasıl etkilediği deney tasarımı yöntemi istatistiksel analiz sonuçları göstermiştir. Elde edilen sonuçların; Türkiye’de tek yarıiletken üretimi yapan laboratuvarı verimliliği

arttırmada uygulanabilir olması bu çok özel bir alanda yapılan çalışmanın etkinliğini göstermektedir.

UV sertleştirme süreci üzerinde geliştirilen bu yaklaşım ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda genel tam faktöriyel deney tasarım metodunun UV sertleştirme süreci eniyilenmesi için sistematik ve etkili bir yöntem olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Taylan T., Elektronik Sanayi, *T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı İhracatı Geliştirme Etüd Merkezi*, SITC: 751-776, 50-60, 2006.
- [2] Elektronik Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, *Devlet Planlama Teşkilatı*, DPT: 2559-ÖİK: 575, 30-40, 2001.
- [3] Türkiye Elektrik ve Elektronik Sektörü Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2012-2016, *T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Genel Müdürlüğü*, SBEP-1216, 32-40, 2012.
- [4] Ataman A., Mikroelektronikteki gelişmeler ve YİTAL'de geliştirilen 3 µm CMOS prosesi, *Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, Bursa, Türkiye, 11-17 Eylül, 1995.
- [5] <http://bilgem.tubitak.gov.tr/tr/urunler/yital-yari-iletken-teknolojileri-arastirma-laboratuvarı> (Ziyaret tarihi: 04 Nisan 2014).
- [6] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Mikro%C3%A7ip> (Ziyaret tarihi: 05 Ocak 2014).
- [7] <http://itersnews.com/?p=60451> (Ziyaret tarihi: 12 Aralık 2013).
- [8] Garcia M. L., Introduction to Technology Roadmapping: The Semiconductor Industry Association's Technology Roadmapping Process, *Sandia National Laboratories*, SAND97-0666 UC-900, 10-24, 1997.
- [9] <http://320volt.com/turkce-vlsi-tasarim-notlari-tumdevre-tasarim-ilkeleri/> (Ziyaret tarihi: 12 Mart 2014).
- [10] Nurdan T. C., Silisyum Fotodiyotlar, *UEKAE Dergisi*, 2010, 3, 66-81.
- [11] Sermet S., Tüyen E., Koç Ç., TÜBİTAK UEKAE'nin başarı yolculuğu, *UEKAE Dergisi*, 2009, 1, 9-19.
- [12] Yaman Ö., Ulusal akıllı kart tümdevresi, *UEKAE Dergisi*, 2010, 4, 26-33.
- [13] Çalışkan A. U., Özelçi Y., TÜBİTAK MAM YİTAL 3µm CMOS Tümdevre Üretim Süreci Optimizasyonunda İzlenen Farklı Yaklaşımların İrdelenmesi, *Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi*, Bursa, Türkiye, 11-17 Eylül 1995.
- [14] He. Q., Liu. Z., Xiao. P., He. N., Lu. Z., Angular evaluation to quantify planar distortions of PDMS stamps in soft lithography, *Mater. Chem. Physics*, 2004, 83, 60-65.
- [15] Rogers J. A., Nuzzo R .G., Recent progress in soft lithography, *Materials Today*, 2005, 8, 50-56.

- [16] Montgomery D. C., *Design and analysis of experiments*, 6th ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2005.
- [17] Gülle Y., Kocabaş M., Gıda sektöründe gramaj sapmalarının deney tasarımı yöntemi ile azaltılması, *Anadolu Üniversitesi Proje Fuarı 2009*, Eskişehir, Türkiye, 14 Mayıs 2009.
- [18] Baynal K., Günümüz işletmelerinde yönetim sistemleri ve bütünleşik yönetim sisteminin gerekliliği ve rekabet açısından önemi, *VII Endüstri İşletme Mühendisliği Kurultayı*, Sakarya, Türkiye, 20-21 Kasım 2009.
- [19] Lochner R. H., Matar J. E., *Designing for quality; an introduction to the best of Taguchi and western methods of statistical experimental design*, 1st ed., Chapman and Hall, London, 1990.
- [20] Durmaz S., Taguchi metodunun kauçuğun vulkanizasyon prosesine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2008, 216048.
- [21] Baynal K., Metin M., Aksoy R., Taşıt üzerinde kullanılan hava yönlendiricilerinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisinin çoklu regresyon analizi ve deney tasarımı yöntemi ile incelenmesi, *YA/EM 2009 Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği 29. Ulusal Kongresi*, Ankara, Türkiye, 22-24 Haziran 2009.
- [22] Linderman K., Schroeder R. G., Choo A. S., Six Sigma: The role of goals in improvement teams, *Journal of Operations Management*, 2006, **24**, 779-790.
- [23] Ersin S., Kurumsal yönetim sistemlerine giriş, *UEKAE Dergisi*, 2010, **1**, 78-81.
- [24] Kılıç B., Kalite çemberleri ve sorun çözme yöntemleri, *BİLGEM Dergisi*, 2011, **3**, 59-71.
- [25] Kobu B., *Üretim yönetimi*, 10. Baskı, Avcıol Basım, İstanbul 1999.
- [26] Şirvancı M., *Kalite için deney tasarımı: Taguchi yaklaşımı*, 2. Baskı, Literatür Yayınevi, İstanbul, 1997.
- [27] Montgomery D. C., *Introduction to statistical quality control*, 4th ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2001.
- [28] Sower V. E., Savoie M. J., Renick S., *An introduction to quality management and engineering*, 1st ed., Prentice Hall Inc., New Jersey, 1999.
- [29] Besterfield D. H., Besterfield C., Besterfield G. H., Besterfield M., *Total Quality Management*, 1st ed., Prentice Hall Inc., New Jersey, 1995.
- [30] Baynal K., Altuğ G. S., Ünal İ., Ortodontik tellerin korozyon davranışının klasik deney tasarım yöntemi ile belirlenmesi, *Mühendis ve Makina Dergisi*, 2012, **629**, 48-54.

- [31] Dejaegher B., Jimidar M., Smet M. D., Cockaerts P., Smeyers V. J., Heyden Y. V., Improving method capability of a drug substance HPLC assay, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2006, **42**, 155-170.
- [32] Bahloul R., Mkaddem A., Santo D. and Potiron A., Sheet metal bending optimisation using response surface method, numerical simulation and design of experiments, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, **48**, 991-1003.
- [33] Dixon D., Eatock J., Meenan B. J., Morgan M., Application of design of experiment (doe) techniques to process validation in medical device manufacture, *Journal of Validation Technology*, 2006, **12**, 92-100.
- [34] Cappetti N., Donnarumma A., Naddeo A., Russo L., Design of Experiment about foam CF45 for pedestrian safety in car design, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **175**, 77-82.
- [35] Rojas C. R., Welsh J. S., Goodwin G. C., Feuer A., Robust Optimal Experiment Design For System Identification, *Automatica*, 2007, **43**, 993-1008.
- [36] Gürsakal N., *Altı Sigma Müşteri Odaklı Yönetim*, , 2. Baskı, Nobel Yayın, Ankara, 2006.
- [37] Lunani M., Nair V. N., Wasserman G. S., Graphical methods for robust design with dynamic characteristics, *Journal of Quality Technology*, 1997, **29**, 327-338.
- [38] Kiriş Ş., Anagün A. S., Yüzügüllü N., bir kalite karakteristiğinin deney tasarımı ile iyileştirilmesi, *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 27. Ulusal Konferansı*, İzmir, 2-4 Temmuz 2007.
- [39] JIJU A., Teaching advanced statistical techniques to industrial engineers and business managers, *Journal of Engineering Design*, 1998, **9**, 89-100.
- [40] Hicks C. R., *Deney düzenlemede istatistiksel yöntemler*, 2. Baskı., Gazi Kitabevi, Ankara, 2009.
- [41] Breyfogle F. W., *Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods*, 2nd ed., John Wiley and Sons Inc., New York, 2003.
- [42] <http://www.gyte.edu.tr/Dersler/103/CMB523/cmb523-7a.ppt> (Ziyaret tarihi 20 Nisan 2014).
- [43] Hinkelmann K., Kempthorne O., *Design and analysis of experiments*, 2nd ed., A John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2005.
- [44] Cox D. R., Reid N., *The theory of the design of experiments*, 1st ed., Chapman & Hall/CRC Pres, London, 2000.
- [45] Preston, T. R., Design and analysis of experiments, *Tropical Animal Feeding: A Manual for Research Workers*, 1995, **126**, 155-180.

- [46] Gökçe B., Taşgetiren S., Kalite için deney tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2009, **6**, 71-83.
- [47] Şirvancı M, *Kalite için deney tasarımı: Taguchi yaklaşımı*, 3. Baskı, Literatür Yayınları, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [48] Taguchi G., *System of Experimental Design*, 1st ed., ASI Press, Dearborn, 1991.
- [49] Bryne D. M., Taguchi S., *The taguchi approach to parameter design*, 1st ed., ASQC Quality Congress Transactions, Anaheim, CA, 1986.
- [50] Taguchi G., Wu Y. I., *Introduction to off-line quality control*, 1st ed., Central Japan Quality Control Association, Nagaya , 1979.
- [51] Baynal K., Aksu B., Shainin deney tasarımı ile çıktı değişkenliğinin azaltılması ve bir uygulama, *YA/EM 2008 Yöneylem Araştırması Endüstri Mühendisliği 28. Ulusal Kongresi*, Ankara, Türkiye, 30 Haziran - 2 Temmuz 2008.
- [52] Baynal K., Çok yanıtli kalite karakteristiklerinin eşzamanli eniyilemesinde taguchi yöntemi ve otomotiv endüstrisinde bir uygulama, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 2005, **16**, 2-18.
- [53] Bendell A., Introduction to taguchi methodology, *Elsevier Applied Science*, 1988, **48**, 1-14.
- [54] Ross P. J., *Taguchi techniques for quality engineering: Loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*, 2nd ed., McGraw Hill, Newyork, 1996.
- [55] Unal R., Dean E. B., Taguchi approach to design optimization for quality and cost: An overview, *Langley Research Center*, CASI-20040121019, 1-10, 1990.
- [56] Tsui K. L., An overview of taguchi method and newly developed statistical methods for robust design, *IIE Transactions*, DOI: 10.1080/07408179208964244.
- [57] Connor A. M., Parameter sizing for fluid power circuits using taguchi methods, *Journal of Engineering Design*, DOI: 10.1080/095448299261263
- [58] Chao Qi, Sivakumar A. I., Gershwin S. B., Fellow, Impact of production control and system factors in semiconductor wafer fabrication, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, DOI: 10.1109/TSM.2008.2001214.
- [59] Fisher R. A., *Statistical methods for research workers*, 5th ed., Oliver and Boyd, Edinburgh, 1934.
- [60] Krisa W. L., Shaw S. Y., Slater S., Insalaco L., DUV resist etch selectivity improvements using UV stabilization, *Microelectronic Engineering*, DOI: 10.1016/S0167-9317(96)00081-0.

- [61] Yılmaz Z., Pak M., Imrahoriyas S., Ersoy A., UV stabilization of i-line photoresist and arc layer, *IMAPS 2012 45th International Symposium on Microelectronics*, California, USA, 9-13 September 2012.
- [62] Matthews J.C., Willmott J. I., Stabilization of single layer and multilayer resist patterns to aluminum etching environments, *SPIE 0470, Optical Microlithography III: Technology for the Next Decade*, DOI: 10.1117/12.941915.
- [63] Matthews J.C., Ury M. G., Birch A. D., Lashman M. A., Microlithography techniques using a microwave powered deep uv source, *SPIE 0394, Optical Microlithography II: Technology for the 1980s*, DOI: 10.1117/12.935136.
- [64] Matthews J. C., Hardening of photoresist, *Fusion Semiconductor Systems*, US 4548688, 1985.
- [65] Fusion Semiconductor Systems, *User's guide to the UV/BakeTM process*, 1st ed., 7600 Standish Place Rockville, Maryland, 1993.
- [66] Ferreira A. C., Korn G. A., Ferreira L. C., Multivariate optimization in preconcentration procedure for manganese determination in seawater samples by FAAS, *Microchim. Acta*, DOI: 10.1007/s00604-004-0206-6.
- [67] Insalaco L. J., Krishnamurthy V. N., Sturtevant J. L., Mitchener J. C., UV pretreatments for improved etching of organic antireflective coating (ARC) layer, *SPIE 2438, Advances in Resist Technology and Processing XII*, DOI: 10.1117/12.210379.
- [68] Mach P., Barto S., Design and technology in electronic packaging (SIITME), *IEEE 16th International Symposium*, Ankara, Türkiye, 23-26 September 2010.
- [69] Aytekin F. G., Baynal K., Özdoğan Z., UV hardening parameters optimization of photolithography process with design of experiment, *The XIV th International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics*, Saraybosna, Bosna Hersek, 24-28 May 2013.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Aytekın F. G.**, Baynal K., Özdoğan Z., UV hardening parameters optimization of photolithography process with design of experiment, *The XIV th International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics*, Saraybosna, Bosna Hersek, 24-28 May 2013.
- [2] **Aytekın F. G.**, Yörükoğlu H., Akman G., Kısıtlar Teorisi Yaklaşımı İle Kurumsal Bilgi Teknolojileri Yönetimi Talep Sistemlerinin İyileştirilmesi, *Yönetim ve Ekonomi Bilimleri Konferansı*, Kuşadası, Türkiye, 06-07 Ekim 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Fatma Gözde AYTEKİN 1984 yılında Edirne’de doğdu. 2003 yılında girdiği Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’nden 2008 yılında mezun oldu. Ocak 2012’de Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitime başladı. Ağustos 2009’dan beri TÜBİTAK BİLGEM’de çalışma hayatını sürdürmektedir.