

**T.C.
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İŞLETME ANABİLİM DALI
ÜRETİM YÖNETİMİ VE ENDÜSTRİ İŞLETMECİLİĞİ PROGRAMI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YALIN ALTI SİGMA YAKLAŞIMININ TAGUCHI
YÖNTEMİYLE DESTEKLENMESİ VE BİR UYGULAMA**

Umut İLBEYLİ

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mert TOPOYAN**

İZMİR-2021

TEZ ONAY SAYFASI



YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yalın Altı Sigma Yaklaşımının Taguchi Yöntemiyle Desteklenmesi ve Bir Uygulama” adlı çalışmanın, tarafımdan, akademik kurallara ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

06/07/2021
Umut İLBEYLİ

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi
Yalın Altı Sigma Yaklaşımının Taguchi Yöntemiyle Desteklenmesi ve Bir
Uygulama
Umut İLBEYLİ

Dokuz Eylül Üniversitesi
Sosyal Bilimler Enstitüsü
İşletme Anabilim Dalı
Üretim Yönetimi ve Endüstri İşletmeciliği Programı

Üretim sistemlerinin yönetilmesinde başarılmak istenen temel amaçlardan ikisi istenen kalite düzeyinin ve düşük maliyetlerin sağlanmasıdır. Şirketler bu doğrultuda pek çok yönetim yaklaşımını ve uygulamayı bünyelerinde hayata geçirmektedir. Bu yaklaşım ve uygulamalar arasında öne çıkanlardan ikisi yalın üretim ve altı sigma olup, birçok durumda birlikte uygulanmalarını kapsayan yalın altı sigma kavramı ile karşılaşılmaktadır. Bu uygulamalar sürekli iyileştirme ve israfın ortadan kaldırılması yolları ile kalite artışı ve maliyet tasarrufları sağlamaktadır.

Diğer yandan bir sistemin iyileştirilebileceği düzeyi sınırlayan önemli bir unsur da sistemin tasarımı olmaktadır. Bu doğrultuda sistem tasarımlarının kayıpları ve özellikle de değişkenliği azaltabilecek şekilde yapılması önem kazanmaktadır. Bu noktada sağlam tasarım kavramı ve bu sağlam tasarımlara ulaşılmasında bir araç olarak kullanılabilecek Taguchi yöntemi öne çıkmaktadır.

Uygulamada birbirinden ayrı ya da birbirinin ardılı olarak kullanılan bu yaklaşımların bir arada kullanılmasının daha etkili iyileştirme sonuçları ortaya koyabileceği fikrinden yola çıkılmış ve bu çalışmada bu yaklaşımların bir arada kullanılmasına yönelik dört aşamalı bir metodoloji önerilerek uygulama ile desteklenmeye çalışılmıştır.

Jant üretimi yapan bir şirkette gerçekleştirilen uygulama sonucunda, seçilen iyileştirme projesinin kapsadığı kalite özelliklerinde 1,35, 2,7 ve 4,92 sigma kalite kazanımları gözlemlenmiştir. Ortaya koyulan metodolojinin üretim sistemlerinin iyileştirilmesinde etkili olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yalın Üretim, Altı Sigma, Sağlam Tasarım, Taguchi Yöntemi

ABSTRACT
Master's Thesis
Supporting Lean Six Sigma with Taguchi Method and an Application
Umut İLBEYLİ

Dokuz Eylül University
Institute of Social Sciences
Department of Business Administration
Production Management and Industrial Management Program

Obtaining desired quality level and low costs are two main objectives in managing production systems. Companies practices various management approaches and applications in order to achieve these objectives. Lean manufacturing and six sigma are two prominent concepts among these approaches and practices, that are widely applied as a combined system of lean six sigma. These applications provide quality improvement and cost reductions through continuous improvements and the elimination of waste.

On the other hand, one of the main factors restricting the improvement level of a system is the system design. Hence, it is important to design the systems in order to reduce losses and, especially, variations. Herein, robust design and Taguchi approach, which is a tool that can be used to obtain robust designs, outshine.

Starting with the idea that simultaneous application of these approaches, which are applied separately or sequentially in practice, can provide more effective improvements, this study aims to suggest a four stages methodology for simultaneous application of these approaches and to support the suggested methodology with and application.

Applications carried out in a rim production facility resulted in 1,35, 2,7, and 4,92 sigma quality improvements in quality characteristics involved in the selected improvement projects. It is considered that the suggested methodology can be used effectively in improving production systems.

Keywords: Lean Production, Six Sigma, Robust Design, Taguchi Method

YALIN ALTI SİGMA YAKLAŞIMININ TAGUCHİ YÖNTEMİYLE DESTEKLENMESİ VE BİR UYGULAMA

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	ii
YEMİN METNİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	ix
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi

GİRİŞ	1
-------	---

BİRİNCİ BÖLÜM YALIN ALTI SİGMA

1.1	ÜRETİM SİSTEMLERİNİN GELİŞİMİ	3
1.2	YALIN ÜRETİM KAVRAMI	6
1.2.1	Yalın Üretimin Kökeni	7
1.2.2	Yalın Üretimde Temel Değerler ve Kavramlar	9
1.2.3	Çağdaş Yalın Üretim Anlayışının Gelişimi	14
1.2.4	Yalın Uygulamanın Bileşenleri	16
1.2.4.1	Değeri Tanımlamak	17
1.2.4.2	Değer Akışını Belirlemek	18
1.2.4.3	Sürekli Akışı Sağlamak	19
1.2.4.4	Çekme Sistemi	19
1.2.4.5	Mükemmellik Arayışı	20
1.2.5	Yalın Üretimi Destekleyen Yaklaşımlar	21
1.3	ALTI SİGMA KAVRAMI	23
1.3.1	Altı Sigma Yaklaşımının Farkı	26
1.3.2	Altı Sigma Uygulama Aşamaları	27
1.3.3	Altı Sigmada Roller ve Sorumluluklar	29
1.3.4	Altı Sigma İçin Tasarım	30

1.4	YALIN ALTI SİGMA	32
-----	------------------	----

İKİNCİ BÖLÜM

TAGUCHI YAKLAŞIMI

2.1	ÜRETİMDE KALİTE KAVRAMI	39
2.2	KALİTE VE DEĞİŞKENLİK	41
2.3	SAĞLAM TASARIM – TAGUCHI YÖNTEMİ	42
2.3.1	Taguchi'nin Kalite Yaklaşımı	43
2.3.2	Deney Tasarımı	46
2.3.3	Taguchi'nin Yöntemi ve Katkıları	50
2.3.3.1	Sistem Tasarımı	51
2.3.3.2	Parametre Tasarımı	52
2.3.3.3	Tolerans Tasarımı	61
2.4	MEVCUT LİTERATÜR VE UYGULAMALAR ÜZERİNDEN TAGUCHI YÖNTEMİ	62
2.5	YALIN ÇEVRELERDE TAGUCHI YÖNTEMİ	65

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

YALIN ALTI SİGMA YAKLAŞIMI VE TAGUCHİ YÖNTEMİNİN BİRLİKTE KULLANILMASINA YÖNELİK METODOLOJİ

3.1	İYİLEŞTİRME PROJELERİNİN SEÇİMİ	70
3.2	PROJE TAKIMININ VE DENEY FAKTÖRLERİNİN BELİRLENMESİ	73
3.3	ÖLÇÜM GÜVENİLİRLİĞİNİN VE DEĞİŞKENLİĞİN ANALİZİ	74
3.4	TAGUCHI DENEY TASARIMI VE KONTROLÜ	76

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

YALIN ALTI SİGMA YAKLAŞIMININ TAGUCHİ YÖNTEMİYLE DESTEKLENMESİNE YÖNELİK BİR UYGULAMA

4.1	İŞLETMENİN TANITIMI	89
4.2	UYGULAMANIN AMACI, KAPSAMI VE YÖNTEMİ	90
4.3	UYGULAMANIN KISITLARI	91
4.4	UYGULAMA AŞAMALARI	92

4.4.1	Projenin Seçimi	92
4.4.2	Proje Takımının ve Deney Faktörlerinin Belirlenmesi	96
4.4.3	Deneyin Yürütülmesi ve Taguchi Analizi	102
4.4.4	Deney Sonuçlarının Kontrolü ve Uygulamaya Geçirilmesi	111
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME		120
KAYNAKÇA		125



KISALTMALAR

A.B.D.	Amerika Birleşik Devletleri
ANOVA	Varyans Analizi (Analysis of Variance)
CI	Güven Aralığı (Confidence Interval)
DMAIC	Tanımla, Ölç, Analiz et, İyileştir, Kontrol et (Define, Measure, Analyze, Improve, Control)
FIFO	İlk Giren İlk Çıkar (First In First Out)
h_i	Kaldıraç İstatistiği
IDOV	Tanımlama, Tasarlama, En iyileştirme, Onay (Identify, Design, Optimise, Validate)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
mm^2	milimetrekare
N	Newton
OFAT	Tek Seferde Tek Faktör (One Factor at a Time)
PI	Tahmin Aralığı (Prediction Interval)
r	Korelasyon Katsayısı
R&R	Tekrarlanabilirlik ve Üretilebilirlik (Repeatability & Reproducibility)
R^2	Determinasyon Katsayısı
RSE	Artık Standart Hata (Residual Standard Error)
S/N	Sinyal Gürültü Oranı (Signal Noise Ratio)
SE	Standart Hata (Standard Error)
TRIZ	Yaratıcı Problem Çözme Teorisi (Theory for Inventive Problem Solving)
VIF	Varyans Enflasyon Faktörü (Variance Inflation Factor)
μ	Süreç Ortalaması
σ	Standart Sapma
σ_m^2	Ölçüm Sisteminden Kaynaklanan Varyans
σ_T^2	Toplam Varyans
σ_x^2	Ölçüm Karakteristiğindeki Varyans

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1: Altı sigma uygulamalarında roller ve sorumluluklar	s. 30
Tablo 2: Bir deney tasarımında S/N oranı ve varyans analizi karşılaştırması	s. 60
Tablo 3: Amaç programlama modeli ile faktör seviye tespiti	s. 61
Tablo 4: Model 8498 uzama testleri	s. 94
Tablo 5: Model 8498 toleranslar	s. 94
Tablo 6: Faktörlerin deneyde kullanım durumlarına göre ayrılması	s. 100
Tablo 7: Müdahale edilebilir faktörlerin önem derecelerine göre ağırlıklı oylaması	s. 101
Tablo 8: L16 ortogonal dizi üzerinden deneyin yürütüleceği faktör seviye kombinasyonları	s. 103
Tablo 9: Kontrol faktörlerinin ikişer seviyelerinde dizilişleri	s. 104
Tablo 10: Deney sonuçları	105
Tablo 11: Feder çekme dayanımı için Taguchi analizi sonuçları	s. 106
Tablo 12: Feder boyca uzama oranı için Taguchi analizi sonuçları	s. 106
Tablo 13: Göbek akma dayanımı için Taguchi analizi sonuçları	s. 106
Tablo 14: Faktörlerin kritik kalite karakteristiklerine göre ideal seviyeleri	s. 110
Tablo 15: Kontrolü sağlanarak uygulamaya geçirilecek optimum faktör seviyeleri	s. 111
Tablo 16: Çıktı kalite değerleri için regresyon denklemleri	s. 113
Tablo 17: Doğrusal regresyon çoklu yanıt tahmini analizi	s. 116
Tablo 18: Kontrol deneylerinin sonuçları	s. 118

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1: Temel Üretim Sistemi	s. 5
Şekil 2: Yalın üretimde değer sağlamanın boyutları	s. 17
Şekil 3: Üretimde normal dağılım	s. 24
Şekil 4: Sigma seviyelerine göre hata oranları	s. 25
Şekil 5: Yalın altı sigma anlayışının gelişimi	s. 32
Şekil 6: Yalın altı sigma anlayışının tarihsel gelişimi	s. 33
Şekil 7: Yalın altı sigma anlayışında sık kullanılan araç ve yöntemler	s. 35
Şekil 8: Yalın ve altı sigma yaklaşımlarının güçlü yanları	s. 36
Şekil 9: Geleneksel kalite yaklaşımında kayıp ve kabuller	s. 45
Şekil 10: Taguchi kalite kayıp yaklaşımı	s. 46
Şekil 11: Bilimsel çalışmalarda mantık ve istatistik	s. 47
Şekil 12: Faktörsel Tasarım	s. 48
Şekil 13: Kontrol faktörü seçimine göre gürültünün etkisi ve çıktı hassaslığı	s. 51
Şekil 14: İkişer seviyeli yedi faktör için deney tasarımları karşılaştırması	s. 54
Şekil 15: Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu	s. 55
Şekil 16: Gürültü faktörlerinin dış diziler olarak atanması	s. 56
Şekil 17: L8 doğrusal grafiği örneği	s. 57
Şekil 18: L27 üçgensel tablo örneği	s. 57
Şekil 19: L9 dizisinde faktör seviyelerinin sinyal gürültü oranlarının ve rütbelerin bulunması	s. 59
Şekil 20: Sistemdeki varyasyonun sınıflandırılması ve ölçümü	s. 75
Şekil 21: Örneklem ve popülasyon regresyon çizgileri	s. 80
Şekil 22: Deney tasarımında yüksek salınımlı gürültü faktörlerine karşı regresyon kullanımı	s. 88
Şekil 23: Üretimde karşılaşılan problemlerin yaklaşık oranı ve ilgili sorumlular	s. 90
Şekil 24: Döküm modellerin uzama testi ortalama, dağılım ve hedef değerleri	s. 95
Şekil 25: Süreçten alınan altı farklı numune grubunun kritik göstergelerdeki performansı	s. 95
Şekil 26: Jant kalıbının parçaları	s. 97
Şekil 27: Jant üzerinde feder ve göbek bölgeleri	s. 98
Şekil 28: Deneyin olası girdi faktörleri için balık kılçığı diyagramı	s. 99
Şekil 29: Kontrol faktörlerinin belirlenmesinde Pareto analizi	s. 101
Şekil 30: Feder çekme dayanımı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri	s. 107

Şekil 31: Feder uzama oranı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri	s. 108
Şekil 32: Göbek akma dayanımı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri	s. 109
Şekil 33: Çoklu regresyon etkileşim grafikleri	s. 114
Şekil 34: Çoklu yanıt analizi optimizasyon grafiği	s. 116



GİRİŞ

Ekonomik anlamda ülkeler arası sınırların kaybolması, ticaretin giderek küreselleşmesi ve dolayısıyla rekabetin artan önemi çağdaş işletmecilik anlayışındaki değişim ve gelişimleri takip etmeyi gerektirmektedir. Küreselleşmenin, lojistik ve iletişim teknolojilerindeki gelişmelerin ticaretin önündeki engelleri ve ulaştırma problemlerini ortadan kaldırmasıyla üretim alanındaki rekabet uluslararası bir boyut kazanmakta ve verimli bir üretimin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Ayrıca üretimin ilk zamanlarındaki ihtiyaçları karşılama görevinden arzulara yönelmesi, artan çeşitlilik ve kısalan raf ömürleri bu durumu desteklemektedir.

Bu değişimlere karşılık vermeye yönelik olarak, üretim sistemlerine yönelik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Başta üretim maliyetlerinin kontrol edilmesi nedeniyle ortaya çıkan yalın yaklaşımlar, ilerleyen zamanlarda işletmelerin genelinde tüm faaliyetleri bünyesine alan önemli yönetim düşünceleri haline evrilmiştir. Buna ek olarak, öncelikle ürün kalitesi odağında başlayan kalite uygulamaları da gelişerek işletmelerin tüm yanlarını içine alan geniş çaplı yaklaşımlar haline gelmiş ve çeşitlenmiştir. Bunun içerisinde sistemin hatasız iş yapma potansiyelinin artırılmasına ya da diğer yönden bakılırsa hatalı iş yapma ihtimalinin azaltılmasına yönelik iyileştirmeler de önem kazanmış ve bu doğrultuda altı sigma yaklaşımı ortaya çıkmış ve geliştirilmiştir.

Karmaşık işletme sistemlerinde uygulanan çok sayıda çağdaş yaklaşımın birbirlerini tamamlayan bir şekilde ve uyum içerisinde ele alınması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda yalın ve altı sigma yaklaşımları bir çatı altında ele alınmakta ve yalın altı sigma adını almaktadır.

Sistemde yapılan iyileştirmelerin yanı sıra kalitenin bir başka unsuru da sistemin baştan kalite özelliklerini doğru sağlayacak şekilde oluşturulmasıdır. Bu yolda kullanılabilecek önemli yaklaşımlardan biri de deneysel tasarım yaklaşımı olmaktadır. Özellikle Taguchi'nin yaklaşımı, gerekli deney sayısı ve maliyeti önemli ölçüde azaltmasıyla büyük yarar getirebilecek yöntemlerden biri olarak öne çıkmakta ve geniş potansiyel barındırmaktadır.

Gerek iyileştirme projeleri ile gerekse tasarım faaliyetleri ile üretim sistemlerinin her boyutunun kalite ve maliyetler açısından daha iyi bir performans sergilemesi, işletmelerin genel başarısı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, bu çalışmada yalın altı sigma ile Taguchi'nin deneysel tasarım

yaklaşımlarının birlikte nasıl kullanılabileceğine dair bir bakış açısı geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde yalın ve altı sigma yaklaşımları ile birlikte ikisinin bir arada uyumlu bir şekilde uygulanmasını içeren yalın altı sigma yaklaşımı ele alınmıştır. İkinci bölümde Taguchi yaklaşımının genel ilkeleri açıklanmış ve yalın yaklaşımla bağlantıları kurulmuştur. Üçüncü bölümde bu çalışmanın da amacını oluşturan yalın altı sigma ve Taguchi yaklaşımlarının birlikte uygulanmasına yönelik metodoloji tanımlanmış ve dördüncü bölümde bu metodoloji kullanılarak otomobil jantı üreten bir işletmede uygulama yapılmıştır.

Sonuç olarak yalın altı sigma ve Taguchi yaklaşımlarının bir arada, üretim sistemlerinin genel performansı üzerinde olumlu katkı yapacak şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

YALIN ALTI SİGMA

Sanayisi gelişmiş, iyi örgütlenmiş, uzmanlaşmış ve otomasyona dayalı üretim sistemlerine sahip olan ülkelerin ekonomik olarak gelişmiş ülkeler oldukları ilk bakışta göze çarpmaktadır. Buna karşılık insan ve hayvan gücüyle işleyen, zanaate dayalı ve nispeten küçük üretim sistemlerine sahip ülkelerin az gelişmiş yahut gelişmekte olan ülkeler oldukları söylenebilir. Elbette ki bir ülkenin gelişmesinde çok sayıda faktör etkilidir; ancak üretimi geliştirmek, yani verimliliğini ve etkinliğini artırmak bunların başında gelmektedir.

Herhangi bir ülkenin doğal kaynakları genellikle sabittir ve sürekli bir önceki döneme göre artış gösteremez ancak verimlilik artışı aynı kaynakla daha fazla ürün ve hizmet üretmek anlamına gelir ki bu da doğrudan milli gelirde bir artışa işaret eder. Verimliliğin artmasıyla aynı kaynakla yapılan üretim arttığı gibi maliyetler de düşer. Talep sabitken arzın düşük maliyetle artması fiyatların da düşmesine neden olacaktır. Düşük fiyatlar tüketiciye yansıdığı anda talep artar, bu durum da tekrar üretimi ve Ar-Ge'ye verilen önemi artırır. Bu bağlamda, sağlanan bir birimlik verimlilik artışının, ülkenin ekonomik durumuna göre iki ila on birimlik bir enflasyon düşüşüne sebep olduğu araştırmalarla ortaya konmuştur. Verimliliği yükselterek sağlanacak gelişmelerin enflasyonla mücadelede en etkili yol olduğu belirtilmektedir (Uğur, 2003: 13-14). Verimlilik artışına bağlı olarak milli gelir, girdi faktörlerinden daha hızlı artar ve bu kazançların katkıları oranında gelirlere dağıtılması durumunda yaşam standartlarında doğrudan bir artış gözlemlenir. Buna karşılık aynı ürünü arz eden ülkelere kıyasla ülke verimliliğinde bir düşme yaşanır, maliyetlerdeki artış rekabet açısından dezavantaj yaratır. Ülke endüstrisi satışlarında kardan zarar edilir ve milli gelir düşer (Prokopenko, 1992: 8). Bu açılarından bakıldığında bir ülkeye yapılabilecek en büyük iyiliklerden biri, eğitimini geliştirip bilim ve teknolojiye ilerleme sağlanmasının yanında, üretimini geliştirmek olacaktır.

1.1 ÜRETİM SİSTEMLERİNİN GELİŞİMİ

En genel tanımıyla üretim doğada var olan maddelerin insanların ihtiyaçlarını karşılayacak ürün ve hizmetlere dönüştürülmesidir. Emek (işgücü), sermaye (makine, araç, doğal kaynak, vb.), yöntem (teknoloji) ve bilgi gibi girdilerin; imalat, montaj ve işleme gibi dönüşüm süreçlerinden geçerek mamul ve hizmet çıktıları oluşturmalarıdır.

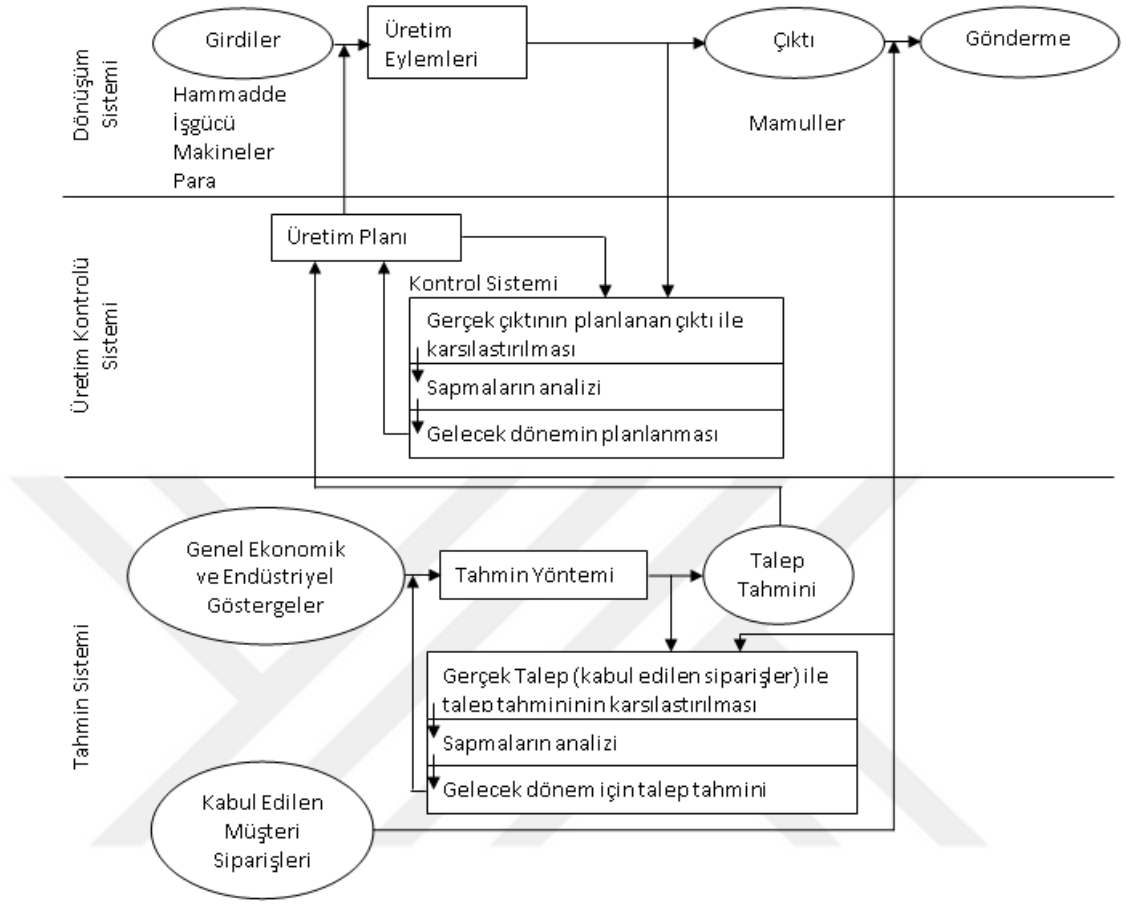
Üretim faaliyetlerinde kilit nokta girdilere bir değer katılması ve ekonomik açıdan bir fayda yaratılmasıdır. Ekonomistlerin bakış açısından üretim; toprak, işçilik ve sermaye faktörlerinin birleşimiyle bir değer yaratma iken mühendis bakış açısı ile üretim; bir fiziksel varlık üzerinde onun değerini artıracak bir değişiklik yapma ve onu kullanılabilir hale getirmektir (Kobu, 2013: 33-34).

Türkçe'deki üretim sözcüğü, uluslararası literatürdeki iki farklı sözcüğü karşılamakta, istihsal (*production*) ve imalat (*manufacturing*) sözcüklerinin her ikisinin yerine de kullanılmaktadır. Petrol, şeker, plastik gibi maddelerin analitik ve sentetik yöntemlerle üretilmesi yahut hizmet üretimi istihsal örneğiyken araba, beyaz eşya gibi ürünlerin fabrikasyon üretimle üretilmesi imalat örneğidir. İmalat için makineleşme, modülerlik ve montaj gibi teknolojik koşullar önemli bir yer teşkil ederken buna karşılık istihsal için iklim ve toprak şartları gibi organik koşullar nispeten daha ön plandadır. Bu bağlamda Bellgran ve Safsten (2010: 3) duruma hiyerarşik olarak yaklaşıp imalatı, gerektiğinde içinde istihsal da içerek şekilde, istihsala göre daha üstün bir süreç olarak tanımlamıştır.

Üretim/işlemler ile kastedilen ise tedarikçilerden müşterilere kadar uzanan değer zinciri boyunca yapılan tüm faaliyetleri içeren bir dönüşüm sürecidir. Üretim/işlemler yönetimi; üretimi gerçekleştirmek için gerekli kaynakların planlanmasını, koordine edilmesini ve kontrolünü gerçekleştiren işletme fonksiyonudur. İşletmenin elinde bulunan malzeme, makine ve insan gücü kaynaklarının; belirli miktarlardaki ürünün istenilen kalitede, istenilen zamanda ve en düşük maliyetle üretimini sağlayacak biçimde bir araya getirilerek kullanılmasıyla ilgili işlemlerdir (Yüksel, 2017: 1). Üretim/işlemler yönetiminin amacı, girdilerle çıktılar arasında süreçlerle yaratılan bu değer farkının en büyük hale getirilmesi; gerekli zaman kısıtlarına uyularak kalite ve fiyatlarla müşterileri tatmin ederek talep sürekliliğinin sağlanmasıdır.

Üretim sistemleri alt sistemler ve paralel sistemlerden oluşur. Üretim kontrol sistemleri, envanter kontrol sistemleri, kalite kontrol sistemleri gibi sistemler alt sistemler olarak; süreç ve yönetici arasındaki haberleşmeyi sağlayan araçlar, raporlar, yönergeler ve bunların hazırlanmasında uyulacak kurallar paralel sistemler olarak kabul edilir. Şekil 1 birbiriyle etkileşimli alt sistemleri gösteren tipik bir temel üretim sistemi şemasıdır (Şahin, 1977: 11).

Şekil 1: Temel Üretim Sistemi



Kaynak: Şahin, 1977: 11

Geleneksel üretim yönetimi görüşünün hakim olduğu dönemdeki anlayışa göre kalite ve maliyet, miktar ve esneklik tamamen çelişmekteydi. Ayrıca tek tek her işlem etkin bir biçimde yapılabilirse süreç olarak tanımlanan eylemler topluluğunun daha etkin olacağı ve bu süreç etkinlik doyumuna ulaştığında yaratılan ekonomik değer maksimize edilmiş olacağı kabul edilmekteydi (Starr, 1972: 146-147). Çağdaş üretim döneminde bir süredir bütüncül sistem yaklaşımlarından yararlanılmaktadır. Günümüzde üretim sistemlerine içinde değer yaratılan eylemleri barındıran genel bir çatı olarak bakılmaktadır ve bu durum üretim yönetimine geniş bir bakış açısı kazandırmıştır.

Üretimde bütünsel sistem bakışının öncülüğünü yapan şirketlerin yakaladıkları çok büyük başarılar diğerleri için örnek teşkil etmiş ve çağdaş üretim anlayışını şekillendirmiştir. Krafcik (1988: 42-43) yaptığı çalışmada; üretkenlik, kalite ve esnekliğin ülke-bölge performansı yahut teknoloji seviyesinden ziyade şirket kültürü

ve uygulanan üretim felsefesine bağlı olduğu sonucuna ulaşmıştır. Özellikle yalın üretim felsefesini benimseyenlerin kalite ve üretkenlikteki başarılarını esneklik ve ürün çeşitliliğinden feragat etmeden yakaladıklarını fark etmiştir. Yapılan nispeten güncel bir diğer çalışmada Dahlgaard-Park ve diğerleri (2013), çağdaş anlamdaki kalite yönetiminin son 25 yılını ve bu süre zarfında yapılan akademik çalışmaları derleyerek önemli bulgular elde etmişlerdir. Buna göre toplam kalite yönetimi konusunda yazılan makaleler zirve yaptığı 1995 yılından beri düşüş gösterirken yalın üretim, Toyota Üretim Sistemi, kurumsal kaynak planlaması, iş mükemmelliği, iş standartlaştırma ve altı sigma kalite görüşü üzerine yapılan çalışmalar artış trendini korumaktadır.

1.2 YALIN ÜRETİM KAVRAMI

Yalın Üretim, ürün ve hizmet yaratma sürecini israflardan arındırıp sadeleştirerek sunulan değeri mükemmelleştirmek ve bu yolla firma karlılığını arttırmak amacını taşıyan kavram, sistem ve teknikler bütünüdür (Kulaç, 2003: 1). Yalın üretimin ana stratejisi hızı artırıp, akış süresini azaltarak kalite, maliyet, teslimat performansını aynı anda iyileştirmektir. Yalın üretim, müşteri ihtiyaçları doğrultusunda, malzeme ve bilgiyi dönüştüren veya şekillendiren ve katma değer oluşturan faaliyet ile zaman ve kaynak kullanan ancak ürün üstüne müşteri ihtiyaçları doğrultusunda değer ilave etmeyen ve katma değer oluşturmeyen faaliyeti ayırt etmeye yarar. Sıfır hatalı, tam zamanında, küçük partiler halinde, yüksek çeşitlilikte üretim yapılması öngörülür (Tikici ve diğerleri, 2006: 22).

Yalın üretim felsefesinin içinden doğduğu Toyota Motor Şirketi 20. yüzyılın ortalarından itibaren art arda 50 yıldan fazla bir süre boyunca karlı olmuş ve dünyanın en büyük motorlu araç üreticisi seviyesine yükselmiştir. Böylesine tutarlı bir karlılık, önemli işten çıkarmalar ve yoğun işe alımlarla dönemsel karlar ve zararların bir norm olarak kabul edildiği küresel otomobil endüstrisinin ilk sıralarında yer alan şirketler arasında görülmemiş bir durumdur. Toyota kalite, üretkenlik, araç başına maliyet, araç başına kar, araç satışları, araçların ikinci el değeri, yenilik, yeni model sürümleri, çeviklik ve esneklik gibi akla gelen her ölçütte uzun bir süre boyunca çitayı sürekli olarak yükseltmeyi başarmış ve lider konumda kalmıştır. Dünyada herhangi bir endüstrideki hiçbir şirketin bu denli kendi alanında tutarlı bir operasyonel mükemmellik seviyesine ulaşmadığı kabul edilmektedir (Convis ve Liker, 2012: 35-37). Haliyle bu sansasyonel başarı, tüm dikkatleri üzerine toplamıştır. Her sektörden birçok kurum ve kuruluş Toyota'nın araçlarını ve felsefesini uygulamaya çalışmış,

akademi dünyasında en çok araştırılan ve üzerine yazı yazılan şirket olmuştur. Kavramsal yahut pratik, işleyen birçok yöntem ve araçtan söz edilebilecek olmakla birlikte bunlar işin sonuçları tarafına yakındır. Söz konusu yükselişi şirketin kökeninde ve kuruluşundan beri benimsediği bazı temel değerlerinde aramaya başlamakta fayda vardır.

1.2.1 Yalın Üretimin Kökeni

Toyota'nın kökenleri mevcut küresel piyasadaki ününe kıyasla oldukça mütevazidir. 1896 yılında Sakichi Toyoda kendi dokuma tezgahını icat etmiş ve getirdiği yenilikle mekiğin ileri geri hareketinde otomasyon sağlamıştır. Daha sonra buharlı motor teknolojisinden yararlanarak ve çelik konstrüksiyona geçerek bu otomasyonu geliştirmiş ve gereken el işçiliğinin büyük bir kısmını ortadan kaldırmıştır. Bu tezgahı elde edilen gelir Toyota Motor Şirketi'nin başlangıç sermayesi olmuştur. Bu yeni buluş şaşırtıcı hızlara ulaşmıştı, ancak herhangi bir zamanda ip koptuğunda bu hızın bir anlamı kalmıyor ve çalışmanın kalanı boşa gidiyordu. Bu durum karşısında Sakichi Toyoda bir ip koptuğu zaman tezgahı otomatik olarak durduran ve böylece hurdalardan kaynaklanan israfı önleyen bir araç geliştirdiğinde önemli bir fikir ortaya koymuş oldu. Bu iş yapış şekliyle, henüz ortada yokken gelecekteki şirketinin çok temel bir ilkesi şekillenmeye başlamıştı; bir problem olduğunda anında durmak ve hataların bir sonraki aşamaya geçmemesi için standart dışı durumları hızlıca belirlemek. Ayrıca Sakichi, başarının anlık bir deha parlamasından ziyade çok çalışma, deneme yanılma, sabır ve ellerini kirletme yoluyla geldiğine; bir işi geliştirmenin yolunun öncelikle mevcut durumu birinci elden tecrübe etmek ve içselleştirmek olduğuna inanıyordu. Söz konusu fikirler daha sonra şirketin temel ilkelerinde *gembaya* (olayların gerçekleştiği esas yere) gitmek, *genchi gembutsu* (git ve gör) ve öğrenmenin *Shu Ha Ri* (çırak kalfa usta) çevrimi olarak yansıma bulmuştur (Convis ve Liker, 2012: 91).

Sakichi Toyoda, yeni gelişen otomotiv endüstrisine teknoloji geliştirmesi için kurduğu Toyota Motor Şirketi'nin başına oğlu Kiichiro Toyoda'yı getirmiştir. Dönemin koşullarıyla çok ciddi kaynak kısıtları altında çalışan Kiichiro Toyoda'nın iş alanında kalabilmek için bütün gereksiz girdileri ve hareketleri ortadan kaldırması gerekmiştir. Böylece şirketin henüz ilk yıllarında tam zamanında üretimin kilit kavramının şekillenmesine katkıda bulunmuştur; bütün iş süreçlerinde israfı ortadan kaldırmak. Çağın ve coğrafyanın şartları, parça ve malzemeleri yalnızca gerektiği zaman ve

ihtiyaç duyulduğu kadar hazır edilmesini zorunlu kılıyordu. Söz konusu şartlara çok başarılı bir uyum gösteren Kiichiro Toyoda'nın sezgileri sayesinde bu zorlu şartlarda çalışma alışkanlığı şirket kültürünün içinde gelişmiştir. Bu sayede Toyota, İkinci Dünya Savaşı'nda artan kamyon ve araç talebinden yararlanabilmiş ve Japonya'da ticari araçların önemli bir üreticisi konumuna gelmiştir. Kiichiro Toyoda daha sonra otomobil üretimini araştırmak, öğrendiklerini geliştirmek ve ilk kez kendi benzinli motorlarını geliştirmek için Amerika ve Avrupa'ya seyahatler düzenlemiştir. Nihayetinde Toyota Motor Şirketi'nin dünya liderliğine giden yolu yalnızca birkaç on yıllık bir süre içinde çizilmiştir (Liker ve Ogden, 2008).

Şüphesiz ki içinde bulunulan bölgenin düşünce sisteminin ve kültürel yapısının; başlangıçta kurucuların anlayışları üzerinde, akabinde buna bağlı olarak şirketin bünyesinde şekillenen bazı temel yaklaşım ve ilkeler üzerinde büyük etkisi olmuştur. Uzakdoğu kültürünün ayrılmaz bir parçası olan Konfüçyus öğretilerinin içinde yer alan daha büyük bir bütüne hizmet edebilmek için bireyin kendini yetiştirmesi, mükemmele ulaşamayacağını bilmesine rağmen mükemmellik için çaba gösterilmesi, sürekli öğrenmeye açık olunması, kendisini geliştirmiş insanlara derin bir saygı duyulması ve bireyin yalnızca kendisini değil başkalarını da geliştirme sorumluluğu olması gibi ilkelerin Toyota tarzıyla arasındaki benzerlikler bu bağlamda dikkat çekicidir (Berthrong ve Berthrong, 2000). Örneğin Toyota'nın Gerçek Kuzey olarak ifade ettiği asıl hedefleri, israftan üretim süreçlerinden uzun vadeli kurum hedeflerine kadar her şeyin ideal olduğu bir durumu işaret eder. Bütün israfın ortadan asla kaldırılamayacağı ve mükemmel kaliteye ulaşamayacağını kabulünden yola çıkan bir anlayışla sürekli olarak mevcut durum ve ideal durum arası boşluklar, daha iyiye gidiş ve gelişme imkanları aranır.

İçinde bulunulan kültürün bir parçası olarak kurucularından çalışanlarının hayat tarzına ve şirketin en derin kılcallarına kadar işlemiş olan bu mirası, şirketin başarısının kaynağı olarak gözükmektedir. Elde ettiği muazzam üretim başarılarından sonra Toyota, en büyük rakipleri de dahil olmak üzere birçok firma ve kuruluşu üretim sistemlerini birinci elden gözlemlemeleri ve incelemeleri için fabrikalarına davet etmiş, ancak bunların birçoğu bu sistemi uygulamada başarısız olmuştur. Çünkü genellikle teknik ve metodolojik yaklaşımlar incelenmiş; bunun kaynağı olarak sistemini yürüten asıl motorun üretimin her kademesindeki gerçek işleri gerçekleştiren, ölçütleri ve şirket değerlerini içselleştiren ve sahiplenen insanlar olduğu anlaşılmamıştır. Oysa Toyota her zaman lider yetiştirmeye ve insan kaynaklarına vurgu yapmıştır. Dönemin batıdaki hakim üretim paradigmasına göre yönetimler belirli kurallar ve kontrol

sistemleriyle işçilerin çıktısını en fazla hale getirmeye çalışırken, sendikalar da belirli politikalarla yönetimin gücünü sınırlandırmaya çalışmaktadır. Bu kopukluğun aksine aynı takımın oyuncularını olan işgücü ve yönetimin ilişkileri; güven çerçevesinde olmalı ve ortak değerlerle ortak hedeflere doğru işbirliğine dayanmalıdır (Convis ve Liker, 2012: 47).

1.2.2 Yalın Üretimde Temel Değerler ve Kavramlar

Yalın üretim yaklaşımının içerisinde yer alan beş temel değer mücadele ruhu, kaizen zihniyeti, genchi genbutsu, ekip çalışması ve saygıdır. Bunlar, hedeflere götüren yolda temel teşkil ettiklerinden gerçek kuzey değerleri olarak da bilinirler. Bu değerler ilk defa 2001 yılında yazılı hale getirilip şirket içinde yayınlanmıştır. Toyota Japonya'dayken bunları yazma ihtiyacı duyulmamıştır. Çünkü çalışanların, bölgenin kültüründen beslenen bu değerlere temel bir yatkınlığı olduğu gibi, ayrıca şirket içinde ilerlerken aldıkları koçluk ve rehberlikle bu değerleri köklü bir şekilde içselleştirip sahiplenmeleri sağlanmıştır. Bu sağlam temellerin ve benzer değerlerin her bir çalışana aşılmasıyla oluşan eş güdümlenme ve hizalama sonucunda başarının geldiği kabul edilmiştir. Dünya çapında genişleyip başka kültürlerde çalışmak zorunda kalındığında bu değerleri net bir şekilde ortaya koyma gereği doğmuştur (Convis ve Liker, 2012: 70).

İlk temel değer olan mücadele ruhu tüm gelişmelerin ateşleyici gücü olan temel bir içgüdüdür ve aslında tüm insanların içinde vardır yahut uyandırılabilir. Şirketin kurulduğu ilk günlerden itibaren mücadele ruhu etkili olmuştur. O zamanlardan beri şirket; liderlerinden sadece mevcut rolünde başarılı olmasını değil, aynı zamanda enerji ve coşkuyla cüretkar vizyonları başarmak adına sürekli olarak zorluklarla da uğraşmasını bekler. Bu ruh, liderlerin ardı ardına büyük mücadeleleri üstlenmeleri ve her adımda kendilerini geliştirmeleri için vazgeçilmez olması bağlamında, sürekli gelişmenin yakıtı ve ayrılmaz bir parçası olarak görülür. Bu bağlamda mücadele ruhunun çalışanları canlandıran ve mükemmellik hedefiyle birleştiren temel bir değer olduğu öne sürülebilir (Liker, 2004).

Diğer bir temel değer olan kaizen zihniyeti, Toyota'nın büyük katkılarıyla günümüzde oldukça meşhur bir kavram haline gelmiştir. Kelime anlamı olarak daha iyiye doğru değişim anlamına gelmektedir. Düşüncenin temelinde hiçbir şeyin mükemmel olmaması ve her şeyin iyileştirilebileceği fikri yatar. Buna göre üretimde bir sürecin kaç sefer iyileştirildiğinden bağımsız olarak mükemmel yalın duruma

ulaşamayacağı insanlara hatırlatılmalıdır. Üretim hattındaki her adım israflarla doludur; bugün için mükemmele yakın gözükseler dahi gelecekte değişen koşulların ve entropinin etkisiyle daha fazla israf yavaşça sürece geri girecektir. Bu bağlamda ürünlerin tasarlanma şeklinden satılma şekline, servis parçalarının depolanma ve sevkiyat şeklinden ekiplerin performansına kadar tüm boyutlar sürekli olarak iyileştirme olanakları barındırır. Bu açıdan bakıldığında kaizen belirli bir zamanda uygulanacak bir projeden ziyade sürekli olarak korunması gereken bir zihniyet yapısıdır (Convis ve Liker, 2012: 71-72).

Genchi genbutsu kavramı olanları derinlemesine anlayabilmek için gidip yerinde görme gerekliliğini ifade eder. Aynı kökten gelen gembu kavramı olayların gerçekteştiği esas yer anlamına gelir. 2009 yılında başkan olduktan kısa bir süre sonra yaptığı konuşmada Akio Toyoda'nın gembaya yakın olmaya ant içmesi durumun önemini vurgular niteliktedir. Hiçbir sürecin mükemmel olmadığı kabulü her zaman problemlerin olacağına işarettir ve bu problemlerin gerçekten anlaşılabileceği tek yer gembadır. Ürünlerin birinci elden nasıl tasarlandığı, üretildiği, kullanıldığı ve ne tür problemlerle karşılaşıldığı ancak genchi genbutsu yoluyla anlaşılabilir. Bu bağlamda değer bir gitme ve görme eyleminden çok karar alma süreçlerindeki liderlik felsefesi bakımından daha anlamlıdır. Yöneticiler ve çalışanlar sorumlulukları altındaki her şey hakkında birinci elden kişisel bilgiye sahip olmalıdır. Aksi takdirde problemlerin kök nedenini bulmak ve gerçeklere dayalı bir çözüm geliştirmek imkansızdır. Kavram bir anlamda kuruluşun değer yaratan temel işlerine duyulan derin saygıyı yansıtmaktadır (Convis ve Liker, 2012: 72-73).

Bir diğer önemli temel kavram ekip çalışmasıdır. Üretime beraber işleyen parçaların oluşturduğu bir bütün ve sistem görüşü çerçevesinde bakıldığında ekip çalışmasının önemi görünürde birçoğları tarafından kabul edilir ve vurgulanır. Ancak kurumsal bir kültürle desteklenip uygun bir felsefe ve teşvik sistemleri kurulmadığı zaman, yüzeyden bir miktar derine inildiğinde insanların çabalarının bireysele doğru kaydığı gözlemlenir. Yalın üretim felsefesinde bireysel başarının iyi bir ekip içinde meydana gelebileceği ve ekiplerin her bir kişisel gelişimden fayda göreçeği görüşü çok yönlü olarak desteklenir ve yaşatılır. Bu derin inanış ekip çalışmasına odaklı terfi sürecine ve performans hedefli teşviklerin içine ilave edilmelidir (Convis ve Liker, 2012: 73).

Temel değerler içinde birçoğ açıdan en asil olarak kabul göreni ve ana yol gösterici olarak benimseneni saygı kavramıdır. Olayın en başında olası en iyi ürünleri ve hizmetleri sunma arzusu, insana ve topluma duyulan derin bir saygıdan

kaynaklanır. Bu durum müşterilere, çalışanlara ve iş ortaklarına kadar genişler. Kendi varlığına saygı duymak kendini ve çevreni sürekli geliştirmeyi gerektirir. İşin yapılış şekline ve değer katan süreçlere duyulan saygı olaylara birinci elden hakim olmayı beraberinde getirir. Çalışanlara ve fikirlerine duyulan saygı neticesinde onlara çeşitli sorumluluklar yüklenir, her bir çalışanın kendi süreçleri üzerinde derinlemesine fikir sahibi olması ve iyileştirmeye katkıda bulunması beklenir (Liker ve Ogden, 2008).

Bu kök temeller üzerine bina edilmiş yalın üretim felsefesini anlamakta faydalı olacak bazı temel kavramlardan da ayrıca söz etmekte fayda vardır. Örneğin bir işte ustalaşmak için öğrenmenin Shu Ha Ri çevriminden geçilmesi gerektiğinden bahsedilir. Shu aşamasında öğrenci görevleri hassas standartlar altında belirli kurallara uyarak defalarca yerine getirir ve içselleştirerek temelleri öğrenmesi sağlanır. Ha aşamasında öğrenci nispeten özgürlük kazanmış olup kuralları daha yaratıcı bir biçimde uygulayabilse de temelde hala standart formu takip etmelidir. Ri aşamasında kurallar ve davranışlar artık içselleştirilmiştir ve bilinçli olarak düşünülmezler. Faaliyetler doğal olarak yapılır ve kişi artık kendi anlayışını geliştirip öğrendiğini iyileştirme konumundadır. Shu ve Ha aşamalarına tekabül eden standartlaştırılmış bir iş, gelişime çita teşkil etmesi açısından önemlidir ve çok iyi anlaşılmalıdır, ancak esas başarı Ri aşamasında aranmaktadır. Yine bir başka terim olan Jidoka yalın felsefede önemli bir yer tutar. Bir problem oluştuğunda işin derhal durdurulmasını ifade eder. Jidoka problemlerin erken teşhis edilmesini sağlar. Hatalı uygulamaların yaygınlaşarak son ürüne kadar uzanmasını engelleyip, hataların kök nedenlerini ortadan kaldırarak kaliteyi süreçte yaratan iyileştirmelerin yapılmasına rehberlik eder. Diğer bir kavram Heijunka ürün karmasının ve üretim hacminin dengeli biçimde zamana dağıtılmasını ifade eder. Düzgün olmayan müşteri talebini düzgün ve tahmin edilebilir yapıya dönüştürerek diğer yalın teknikleri ile akışın istikrarlı bir yapıda olmasını sağlar. Poka-Yoke kavramı hata önleme ve ayıklama anlamına gelir. Bir diğer kavram olan Hoshin Kanri hizalama anlamına gelir. Şirket stratejilerini orta yönetimin planları ve üretimdeki eylemlerle hizalayıp uyumlulaştırmak anlamı taşır. Sistemdeki hedefler sonuçlarla başlar, bunlar aşağı doğru seviye seviye daha spesifik planlara ayrılır ve ilerlemeyi izlemek için ölçütlerin belirlenmesiyle hedefler ve araçlar birleştirilmiş olur. Japonca kart anlamına gelen Kanban, çekme sisteminin işlemesi için önceki istasyonlara iş emrini gönderen bir yöntemi ifade eder. Yamazumi iş adımlarının birbirleri ile düzgün ve dengeli bir şekilde sıralanarak iş yükünün görselleştirilmiş bir şekilde paylaşımını ifade eder. Yokoten kavramı ise bilginin tüm organizasyon boyunca yatay olarak paylaşılmasını ifade eder. Burada önemli nokta

bir yerdeki başarılı bir uygulamayı başka bir yere uyarlarken aynen kopyalanmaması, mevcut koşullar altında yeniden değerlendirilmesinin sağlanmasıdır. Son olarak muda, mura ve muri kavramlarından bahsetmek gerekirse; muda israf, mura dengesiz iş yükü ve muri aşırı yükleme anlamı taşır. Yalın üretimde katma değer yaratmayan ve müşteriye fayda sağlamayan her türlü işlem israf olarak nitelenir. Bu açıdan bakıldığında mura ve murinin mudaya yol açtığı kabul edilir (Convis ve Liker, 2012).

Yalın üretimde en fazla karşısında durulan konu israf kavramıdır. Müşteriye değer katmayan tüm faaliyetler israf olarak görülür ve tüm süreçler olabildiğince bunlardan arındırılmalıdır. Yedi temel başlık altında sınıflandırılmış olan bu israflar aşırı üretim, bekleme, taşıma, uygunsuz yahut aşırı işlemler, gereksiz envanter yahut stok, gereksiz hareketler ve hatalar (kusurlar) olarak belirlenmiştir (Hines ve Rich, 1997: 47).

Aşırı üretim adından da anlaşılacağı üzere gerekenden fazla mal üretmeyi ifade eder. En ciddi atık ve israf türü olarak kabul edilir; çünkü hammadde, işlenmekte olan yarı mamuller ve bitmiş ürünler gibi malların sorunsuz akışında önemli kesintilere neden olarak ciddi verimlilik ve iletişim sorunlarına yol açar. Üretimin üzerindeki baskının artması sonucu kaynakların verimsiz kullanımı, depolama nedeniyle işlevsel performansın bozulması gibi kalite sorunlarına yol açabileceği gibi aynı zamanda işletme sermayesini de bağlar. Yalın anlayışın ana kavramlarından biri olan çekme düşüncesinin temel amacı söz konusu aşırı üretimin önüne geçmektir (Liker, 2004).

Bekleme malzemelerin, ekipmanların, çalışanların yahut süreçteki bir başka işlemin hazır olması için gereken süreyi ifade eder. Zaman etkisiz kullanıldığında bekleme israfı oluşur ve bu durum son ürünlere ek maliyet getirir. Ne zaman parçalar bir yerden bir yere taşınmıyorsa yahut işlenmiyorsa bekleme israfı söz konusudur. Bu durum ilk bakışta aşırı üretimden kaçınmayla çelişiyor gibi görünebilir, ancak hedef ikisini beraber ortadan kaldırmaktır. Ürün bazında düşünüldüğünde, ideal durumda bir birimlik ürünün olası satışından bir takt zamanı (net üretim süresi) önce hammaddeleri tedarik etmek yeterli olacaktır ve amaç buna yaklaşmaya çalışmaktır. İşçiler bazında bakıldığında boş zamanlar eğitimler, bakım faaliyetleri ve kaizen çalışmalarıyla faydalı hale getirilebilir. Üretim seviyelendirme yöntemi olan heijunka üretimde beklemeyi en aza indirmek için kullanılmaktadır (Hines ve Rich, 1997: 48).

Gereksiz taşıma bir süreç içindeki malzeme ya da ekipmanın bir yerden başka bir yere taşınmasını, yarı mamul ya da mamullerin stoklara girip çıkmasını ifade eder. Son ürüne değer katmayacak şekilde ek zaman ve işçilik tükettiği gibi malzemede aşınma veya bozulmaya yol açabilir. Uç bir noktadan bakıldığında fabrika içindeki

herhangi bir hareket ya da taşıma israf olarak nitelenebilir, ancak yine de tamamen ortadan kaldırmaya değil en aza indirilmeye çalışılır. Kanban gibi yöntemler parçaları yalnızca gerektiğinde çağırarak gereksiz taşımaların önüne geçmek için kullanılır (Hines ve Rich, 1997: 48)

Aşırı işlemler yahut uygunsuz işlemler, doğru kalitede ürünlere ulaşmak için gereksiz veya uygunsuz adımlar atmayı ifade eder. Bu, genellikle basit prosedürler mevcutken aşırı karmaşık çözümler arandığında olur. Bu durum gereksiz taşıma ve bekleme gibi diğer atık türlerinin yanında zaman kaybına da yol açacağı gibi çalışanların süreçleri kavrayıp sahiplenmelerinin de önüne geçer (Hines ve Rich, 1997: 48).

Gereksiz envanter aşırı üretimden yahut üretimdeki bir bileşenin taşıma veya işleme yavaşlığından birikebilir. Yarı mamul veya mamul stokları üretimde genelde tampon görevi görürler de gerçek problemlerin ortaya çıkmalarını engellemeleri açısından yalın üretimde olabildiğince tercih edilmezler. Teslimat sürelerini artırdıkları gibi iletişim üzerinde olumsuz etkileri olduğu görülmüştür. Ayrıca depolama maliyetlerini artırıp esnekliği ve çevikliği azalttıkları gibi işletme sermayesini de bağlayarak rekabet edebilirlik üzerinde olumsuz sonuçları olur. Yalın üretim anlayışına göre stok seviyeleri mümkün olduğunca düşürülüp sorunların su yüzüne çıkarılması ve kök nedenlerinin irdelenmesi gerekir (Hines ve Rich, 1997: 48).

Gereksiz hareketler eğilme, esneme, uzanma gibi gerekli ergonomik iş yapış şeklinin dışında, işçiler tarafından gerçekleştirilen ve ürüne değer katmayan eylemlerdir. Genellikle verimsiz bir iş yeri yerleşmesi ve çalışma düzeninden kaynaklanırlar. Çalışanlar için yorucu olmalarının bir sonucu olarak genellikle üretkenlik ve kalite problemlerine yol açarlar (Hines ve Rich, 1997: 48). Çeşitli kaizen faaliyetleri ve iş etütleriyle yahut yokoten yaklaşımıyla bir işin yapılış şekli sürekli geliştirilmeye ve elde olan en iyi yöntemler spesifik süreçlere uyarlanmaya çalışılır.

Son olarak hatalar yahut kusurlu parçaların üretimi belki de anlaşılması en rahat israf bileşenidir. Denetimleri, onarımları ya da yeniden işlenmeleri neredeyse tüm israf bileşenlerini içerecek şekilde para ve zaman kaybına neden olur. Yalın anlayışta hatalı üretimlere, süreçlerdeki kusurları ve olası iyileştirme alanlarını ortaya koymaları açısından bir geri bildirim ve fırsat gözüyle bakılır. Sonuç olarak bu hataların, devrimsel değişimler yahut ani sıçramalardan ziyade, adım adım birikimli bir şekilde iyileştirilmesiyle içselleştirilebileceği ve sistemin özüne işleyebileceği kabul edilir (Hines ve Rich, 1997: 48).

Bahsedilen tüm ilke, değer ve kavramları anlamak; yalın felsefenin önem verdiği noktaları fark etmekte ve uygulamalarının işleyişini kavramakta faydalı olacaktır.

1.2.3 Çağdaş Yalın Üretim Anlayışının Gelişimi

Yalın üretim düşüncesi ve eşdeğeri olarak görülen Toyota Üretim Sistemi ilkeleri bugün bilinen formuna kavuşana dek; içinden çıktığı kültüre, kök değerlerine ve felsefesine sadık kalacak şekilde çok çeşitli araştırma ve katkılarla geliştirilmiştir. Çağdaş literatürde geldiği noktada genel bir tanımlamayla; sadece bir fabrika içindeki faaliyetlerden değil, değer zincirinin tüm faaliyetlerinden atıkları ve katma değer yaratmayan faaliyetleri kaldırarak müşterilere değer yaratmaya çalışan sosyo-teknik bir sistem olarak görülmektedir (Campbell-Allen ve diğerleri, 2014: 4333).

Çağdaş anlamda Toyota Üretim Sistemi'nin yönetici Taiichi Ohno (1912-1990) ve endüstri mühendisi Shigeo Shingo (1909-1990) öncülüğünde kurulduğu kabul edilir. Ohno üretimin yalınlaştırılması için tüm süreçlerin arındırılması gereken atık ve israfları yedi temel başlık altında toplayarak ve Shingo, Taylor'ın bilimsel yönetim ilkelerinden de etkilenmesiyle üretkenlik ve verimlilik sağlayacak her türlü düşünceye açık fikirlilikle yaklaşp Batıda yaşanan gelişmeleri de işin içine katarak kendilerinden sonraki çalışmalara yön tayin etmişlerdir (Hines ve Rich, 1997: 46-47). Sistemin doğrultusu başından itibaren yalınlaştırmak üzerine çizilmiş olsa da isim babası, elliden fazla lider otomotiv fabrikasını gezerek yaptığı araştırma sonucu 1988'de yayınladığı makalede Toyota'nın çok ciddi başarısını ve farkını lean (yalın) kelimesiyle ortaya koyan MIT (Massachusetts Institute of Technology) araştırmacısı ve Rekabetçi Üretim Araştırmaları firması kurucusu John F. Krafcik (1988: 41) olmuştur. James P. Womack, Daniel Roos ve Daniel T. Jones tarafından 1990 yılında yayınlanan ve yalın yöntemlerin tanımlandığı "Dünyayı Değiştiren Makine" kitabının ardından gelen birkaç yılda konuya duyulan ilgi ve üzerine yapılan araştırma sayısı ciddi bir artış göstermiştir. Yoğun ilgi üzerine Womack ve Jones (1996), yayınladıkları "Yalın Düşünce" adlı kitapla değerleri ve tanımlamaları genişletip ana hatlarıyla bir yalın üretim taslağı çizerek, yalını uygulamaya koyan büyük şirket örnekleriyle beraber, ay bazında bir yalına geçiş reçetesi sunmuşlardır. Takip eden yıllarda Koskela (2000: 87-93), tarihsel süreç içinde süregelen hakim üretim anlayışlarını incelemiş; geleneksel olarak girdilerin çıktılara dönüştüğü "dönüşüm" anlayışından, önce bekleme-taşıma-kontrollerdeki varyasyonları da içerecek bir "akış" anlayışına, sonra

müşteri talepleri doğrultusunda yaratılan “değer” anlayışına doğru bir yönelme belirlemiştir. Dönüşüm-akış-değer üretim teorisini ortaya atarak ciddi verimlilik artışı olanakları barındırdığını savunmuş ve yalın ilkeleri buna göre yeniden düzenleyerek katkıda bulunmuştur. Aynı zamanlarda Rother ve Shook (2000: 96) daha önce tanımladıkları değer akışı kavramı üzerinden sundukları değer akış haritalama yöntemi ile israf olan zamanlarla takt zamanını, değer katanlarla katmayan faaliyetleri ayırmak için kullanılan pratik ve görsel bir aracı Toyota içinden literatüre sunmuşlardır. Hopp ve Spearman (2004: 141-146) “çekme” ve “yalın” kavramlarının literatüre iyiden iyiye girdikçe moda kavramlar olma ihtimallerine karşın, bunlara eleştirel bir tutumla yaklaşp anlaşılır ve net tanımlamalarla kullanışlı olabileceklerini yeniden ortaya koymuşlar, yalın üretimi kısaca tampon stok değişkenliğinin maliyetini en aza indirme olarak tanımlamışlardır. Ikovenko (2004: 158) yalın araçların kullanışlılığını ve faydalarını bir uygulama üzerinden yeniden değerlendirmiş, yalın ilkeleri uygulamada yardımcı olacak yaratıcı problem çözme teorisi (Theory for Inventive Problem Solving Rusça kısaltmasıyla TRIZ) anlamına gelen bir aracı tanıtmıştır. Pasqualini ve Zawislak (2005: 117-123) yalın felsefenin ve değer akışının yapı sektörüne uygulanmasında dört aşamalı bir süreç tarif etmişlerdir. Liker ve Morgan (2006: 6-12) yalın düşüncenin insanları, süreçleri ve teknolojiyi etkili bir şekilde entegre eden gerçek bir sistem yaklaşımı olduğunu; örgüt genelinde değişim ve öğrenme için sürekli, kapsamlı ve koordineli bir çaba olarak benimsenmesi gereken bir yaklaşım olduğunu ileri sürmektedir. Haitao ve diğerleri (2009: 783-789) veri toplama yöntemleri, değer akışı seçimi ve mevcut durum analizi yoluyla, yapı inşa süreçlerinde sabit bir üretim akışı yaratmak amacıyla yalın modele özel değişiklikler önermişlerdir. Pettersen (2009: 128-136) yalını çevreleyen söylem üzerine eleştirel bir bakış açısı sunarak yalın üretim ve yönetim modellerinin uygulanmasının tartışılmasına girdi sağlayıp üretimin ilkeleri ve uygulamalarına dair dönemindeki endişeleri değerlendirmiştir. Moyano-Fuentes ve Sacristán-Díaz (2012) yalın üretimin dünyadaki yankılarını ve endüstri sektörleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Arlbjørn ve Freytag (2013) yalın üretim üzerine bir literatür araştırması yapıp 154 birimlik bir örneklem büyüklüğüyle çeşitli sektörlerde verimlilik üzerine etkilerini incelemiştir. Marodin ve Saurin (2013) tarafından gerçekleştirilen ve yine 154 örnekten oluşan bir başka literatür taramasında, örgütler tarafından yalın teknikler kullanılsa da yalın israf türünü belirlemede eksiklik olduğu ortaya çıkmış ve gelecek çalışmalar için fırsatlar öne sürülmüştür.

Görüldüğü üzere yalın üretim üzerine üretilen mevcut düşüncelerin çoğu, Toyota'daki üretim sisteminin verimliliğini ve etkililiğini inceleyen araştırmacıların çalışmalarından gelişmiştir. Aralarında Ohno, Krafcik, Liker gibi doğrudan Toyota tedrisatından gelenler olduğu gibi, çoğunluğu konuya ilgi duyup dışardan araştırmaya yönelenler oluşturmaktadır. Ancak araştıranların neredeyse tamamı yalın üretim yöntemlerini çok faydalı bulmuş ve yayılması gerekliliğine inanmıştır.

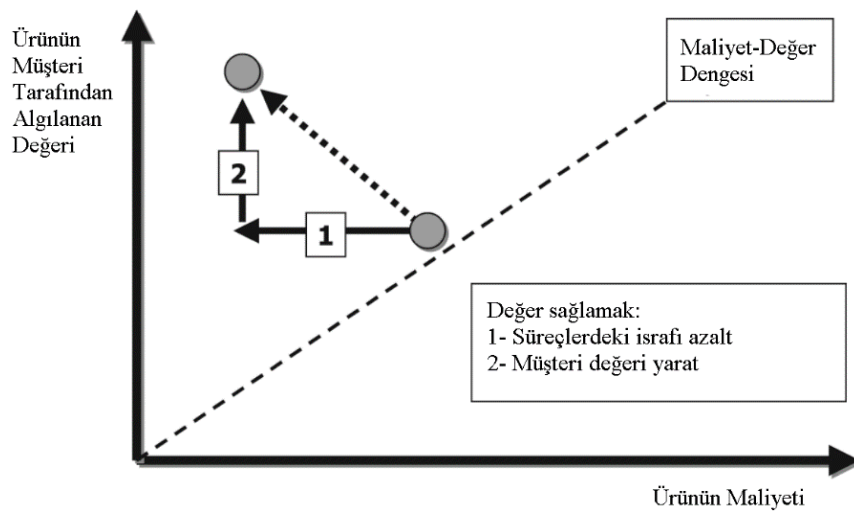
1.2.4 Yalın Uygulamanın Bileşenleri

Dilin getirdiği en büyük kısıtlamalar bazı farklı kelimelerin aynı anlamlara gelmesi, bazı kelimelerin birden fazla anlamının olması ve bazı kelimelerin anlamının zaman içinde değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır (Shah ve Ward, 2007: 785). Tarih boyunca yaşanan sözlü anlaşmazlıkların en büyük sebeplerinden birinin aynı kelimelere farklı anlamlar yüklemek olduğu kabul edilmektedir. Ortak olarak üzerinde uzlaşılabilir net tanımlar ortaya koymanın gerekliliği, kesin ve açık olmayan konseptleri tekrar tekrar sorgulamamak ve karşılıklı öğrenebilmek adına, birikimli ilerleme ve anlayış gelişimi için vazgeçilmezdir. Yapılan birçok uygulama ve çalışmaya bu açıdan yaklaşıldığında yalın üretimin de kavramsal olarak anlaşılması ve uygulanmasının önündeki en büyük engel olarak, çağın mevcut üretim jargonundaki anlamı yerleşmiş bazı kelimelerin (tıpkı israf ve değer kavramlarının müşteri odaklı olarak yeniden tanımlanması gibi) yalın anlayış içinde değer yaratacak şekilde yeniden tanımlanmış olması göze çarpmaktadır. Yalın üretimin başarılı uygulamaları gerek mevcut literatürde gerek üretim pratiğinde üstün performansla ve rekabet avantajıyla özdeşleşmiş, 21. yüzyılın standart üretim şekli olarak kabul edilmiştir (Shah ve Ward, 2007: 785). Hal böyle olunca, otantik durumların spesifik koşullarından ayrı olarak, bazı önemli kavramlarını olduğu kadar yöntemini ve uygulama adımlarını da net bir biçimde ortaya koyma gereği doğmuştur. Yalın anlayışın uygulanmasının bileşenleri beş temel ilkeyle açıklanır. Bunlar değeri tanımlamak, değer akışını belirlemek, sürekli akışı sağlamak, çekme sistemini uygulamak ve mükemmelliğin peşinde olmak olarak belirtilir (Womack ve Jones, 1996).

1.2.4.1 Değeri Tanımlamak

Ekonomideki yaygın bir anlayışa göre müşteri değeri; müşterinin ürün veya hizmeti edinme ve kullanmanın algılanan faydalarının toplamından (ürün veya hizmetin müşteri tarafından algılanan değeri) bu faydaları yaratmanın maliyeti çıkarılarak bulunur (Parasuraman, 1997: 155). Yalın anlayışa göre bir ürünün değeri, üretim süreçlerinin karmaşıklığından ve üreten uzman yahut mühendislerin yargılarından bağımsız olarak yalnızca nihai müşteri tarafından tanımlanabilir. Değer müşterinin uğrunda ödeme yapmaya gönüllü olacağı şeylerdir. Müşterileri ve onların gözünde değerin nasıl yaratılıp geliştirileceğini belirlemek yalın düşünce sisteminin ilk ilkesi ve başlangıç noktası olarak kabul edilir. Müşteriler beklentilerini karşılayan ürünleri mümkün olan en düşük maliyetle elde ettiklerinde bir değer yaratılmış ve sağlanmış olur. Bu bağlamda yalın süreçlerin tüm atık ve israfları eleyip verimli olma çabaları değer kavramı olmadan anlamsızdır ve beraber ele alınmaları gerekir. Zira müşteriler için değer ifade edebilecek üstün performans, sağlamlık ve dayanıklılık gibi süreçlerin etkenliğini ifade eden kalite boyutlarından bağımsız olarak, verimlilikleri de üretimin genel amacı ve üretkenlik doğrultusunda bir anlam ifade etmeyecektir. Bu anlayışa göre Hines ve diğerleri (2004: 997), değer yaratmanın iki boyutunu süreçlerin değer yaratmayan israflardan arındırılması ve ürünlere çok az yahut sıfır maliyetle değer oluşturacak özellikler eklenmesi olarak birbirinden ayırmışlardır. Şekil 2’de bu iki boyut gösterilmektedir.

Şekil 2: Yalın üretimde değer sağlamanın boyutları



Kaynak: Hines ve diğerleri, 2004: 997

Buna göre maliyet-değer denge çizgisi bir referans teşkil eder. Örneğin çizgiye yakın olan noktanın çizgi üzerinde olduğu kabul edilirse, bu nokta sıfır müşteri değerini temsil eder. Çünkü müşterinin algılanan ürün değeri ürünün maliyetine eşittir. Amaç bu çizginin daima üzerinde olmak ve mümkün olduğunca grafiğin sol-üst bölgesinde kalmaktır. Bunun için çizilen yol da sırasıyla 1 ve 2 numaralı süreçlerdir. Öyle ki yalın bir kuruluş 1 numaralı süreçlerle sağlayacağı maliyet ve zaman tasarrufuyla 2 numaralı süreçleri gerçekleştirip üstün ürünler yaratabilir.

1.2.4.2 Değer Akışını Belirlemek

Değer akışı bir ürünü meydana getirmek, ona değer katmak ve bunu müşteriye ulaştırmak için gereken tüm eylemleri ve bilgi akışlarını kapsar. Hammaddenin tedarikinden nihai ürünün sevkiyatına kadar olan tüm aşamalara bütünsel bir sistem anlayışı içinde bakmayı gerektirir ve büyük boyutlarda israf içerdiği kabul edilir. Değer akışının sağlanması için gereken faaliyetler üç başlık altında incelenir. İlki bekleme, sayma, sıralama, tamir gibi değer yaratmayan ve kaçınılabilir faaliyetlerdir. Bunlar bütünüyle israf olarak görülüp tamamen elenmeleri için çalışılır. İkincisi kalıp bağlama, bakım, ayar, nakliye gibi müşteri açısından değer yaratmayan, fakat gerekli aktivitelerdir. Değer yaratmamaları bağlamında israf olarak görülebilecek olsalar dahi mevcut teknolojiler, yöntemler ve üretim varlıkları ile elenmeleri genellikle mümkün olmamakla beraber nispeten köklü değişiklikler ve stratejik yatırımlarla azaltılabilirler. Son olarak müşteri talepleri doğrultusunda dönüşümü sağlayan boyama, işleme, dokuma, montaj gibi asıl işin yapıldığı faaliyetler değer katan faaliyetler olarak görülür (Hines ve Rich, 1997: 47).

Bahsedilen faaliyetlerin akıştaki yerlerini ve ayrımlarını daha iyi inceleyebilmek adına değer akış haritaları ortaya konmuştur. Bu görselleştirme yöntemiyle mevcut durumdaki süreçler ve birbirleriyle bağlantıları sade bir şekilde akış üzerinden gösterilir. Böylece değer katmayan faaliyetlerin tespit edilmesi ve süreçlerdeki yerlerinin belirlenmesi kolaylaştırılıp atıkların giderilmesine ya da en azından azaltılmasına yardımcı olunur. Belirlenen israfların değer akışında bir rolü olmadığından ideal değer akış haritasında da olmamalıdır ve mevcut durumla ideal durum arasındaki boşluğu doldurmak için yapılması gereken iyileştirmelere yol gösterirler.

1.2.4.3 Sürekli Akışı Sağlamak

Değer tanımlanıp israflar buna göre ayrıştırıldıktan sonra sistemde kalanlar değer yaratan faaliyetlerdir ve bunların sürekli akışının sağlanması gerekir. Üretimin farklı bölüm ve süreçlerinin spesifik performanslarına, yerel optimumlara değil; uyum halinde nasıl çalışacaklarına ve toplam performansı nasıl etkileyeceklerine odaklanılarak aşırı üretim ve bekleme gibi pek çok israf, sürekli akışın sağlanmasıyla ortadan kaldırılabilir. Bu doğrultuda departmanlar arası engeller ortadan kaldırılmalı ve etkili bir iletişim modeli kurulmalıdır. Darboğazlar analiz edilmeli ve sistem bunlara göre yeniden düzenlenmeli, gerektiğinde faaliyetler akış faydası doğrultusunda yeniden tasarlanmalı ve gerekirse iş gücü takviyesiyle akış kesintisiz olarak sağlanmalıdır. Bu yolla hatalar, hurdalar, aşırı üretim, bekleme ve gereksiz taşıma gibi israflar en aza indirilerek üretimin en yalın hali başarılmaya çalışılmalıdır. Sürekli akış uygulandığında ürün geliştirme, sipariş alma, fiziksel üretim işleri çok kısa sürede tamamlanabilir hale gelecektir. Bu sayede müşterinin gerçekten istediği şeyleri tam istediği zamanda tasarlayabilme, planlayabilme ve üretebilme imkanı doğduğundan; satış tahmini yapmak, karmaşık planlama yazılımları kullanmak, stokta kalan ürünleri itmek için kampanyalar düzenlemek zorunlulukları ortadan kalkarak istenen şeylerin daha iyi üretilmesine odaklanılabilecektir (Kulaç, 2003).

1.2.4.4 Çekme Sistemi

Yalın düşüncede değer müşteri tarafından kaynağından çekilmesi öngörülür. Çekme sistemi son aşamada yer alan müşteri istemediği önceki aşamalarda herhangi bir üretim yahut akış olmaması anlamına gelir. Üretim nihai müşterinin yaptığı taleple tersten başlar, ürün müşteriye ulaşana kadar geçen tüm aşamalar geriye doğru izlenip her aşama bir öncekine talebini iletir ve gereken malzemeyi çeker. Böylece stoklara gerek kalmaz, istenmeyen üretimin yol açtığı hurda ve fireler engellenir, her tezgah için çizelgeleme yapmak gerekmez, sürecin baş tarafına doğru talep dalgalanmaları oluşumu engellenir, tüm ürünlerin her türlü kombinasyonda üretilmesi mümkün olur ve talepteki değişimlere anında uyum sağlanır. Müşteriler beklentilerinin zamanında karşılanacağından emin oldukları ve stokta kalmış ürünleri elden çıkarmak için kampanyalar gerekmediği için fiyat dalgalanmaları yaşanmaması sonucu talep de istikrar kazanır (Kulaç, 2003). Özellikle talep kararlılığında ve ürün sunma sıklığının düşük olduğu istikrarlı durumlarda çekme sisteminin geleneksel itme tarzı üretime

nazaran üstün avantajlar sağladığı araştırmalarla da gösterilmiştir (Richardson ve Malone, 2012: 32).

1.2.4.5 Mükemmellik Arayışı

Yalın düşüncede asla ulaşılamayacağı kabulünden yola çıkan bir fikirle sürekli bir mükemmellik arayışı vardır. İdeale tanım gereği pratikte ulaşılamaz ve gerçek hayatta tüm süreçler içinde bir miktar israf barındırır. Süreçler mevcut durumda olabildiğince ideale yakın gözükseler de her zaman gelişime açıktırlar ve değişen koşullara göre üzerlerine çalışılması gerekir. Yalın üretimde bu anlayışın en önemli destekçisi şeffaflıktır. Akış dere üzerinde giden bir kayığa, hatalar ve üretimin önündeki engeller derenin dibindeki kayalara ve stoklar da su seviyesine benzetilir. Su seviyesi, yani stoklar arttıkça kayığın akışını destekleyecek yönde engelleri gizleyebilirler, ancak bu durum bir yerden sonra sel gibi bir felaketle sonuçlanabilir. Asıl gereken engelleri gizlemek değil önce ortaya çıkarıp sonra ortadan kaldırmaktır. Yalın üretimde çok kısıtlı stoklar nedeniyle ortaya çıkan bu engellerin üstü örtülmez, kök nedenleri araştırılıp bir daha olmaması için çalışılır. Bu açıklığın bir sonucu olarak problemler ve geri bildirimler herkesin görebileceği şekilde ortadadır, bu da değer yaratma ve iyileştirme olanakları babında katılımcı bir ortam oluşturması açısından faydalıdır. Sistem sürekli akış halinde olduğundan ve stok seviyesi azaltıldığından, bir problem oluştuğunda kısa sürede giderilemezse tüm sistem duracağı için genelde örgütlerin bütün birimlerinde acil müdahale sorumluluğu vardır. Bu bakımdan yalın üretimde mükemmele doğru olan yolculuk hayati ve zorunludur denilebilir (Convis ve Liker, 2012: 55; Womack ve Jones, 1996: 2).

Bahsedilen bu beş temel ilke ve bileşene daha sonra Womack ve Jones (2005) altıncı olarak yalın tüketimi eklemişlerdir. Buna göre değer akışı müşterinin ürünü kullanımını da içerecek şekilde geliştirilir. Satın alma durumu müşteri için her şeyden, izole anlık bir işlemden ziyade tıpkı üretim gibi bir süreçtir. Örneğin bir ürün satın alınacağı düşünüldüğünde amaç tek başına o ürünü satın alma tecrübesini yaşamak değildir. Önce bir ihtiyaç doğmuştur, buna göre bir araştırma yapılır, ürün edinilir, kurulur, kullanılır, gerektiğinde geliştirilir ve nihayetinde elden çıkarılır. Bunların tamamı tüketicinin gözünden bir maliyettir ve genellikle bütünüyle müşteriye bırakılmaktadır. Ancak üretici ve müşterinin toplam faydası ve ortak değer doğrultusunda ilişkilerinin doğası değiştirilerek işbirliği içinde geliştirilebilir süreçlerdir. Ayrıca ürünler toplu üretilse de müşteriler tarafından tekil olarak kullanıldığından

süreçlerdeki verimlilik başarısı ve yalınlık kullanım tecrübesine doğrudan yansımaz. Dolayısıyla yalın tüketim de kaliteyi diğer boyutları üzerinden tasarımda inşa etmenin önemini vurgular.

1.2.5 Yalın Üretimi Destekleyen Yaklaşımlar

Geçmişten günümüze yapılan pek çok çalışma göstermektedir ki en başarılı ve geçerli üretim yaklaşımlarının beraber kullanılması, tek başına kullanıldıklarındaki zayıflıklarını gidermesi açısından oldukça faydalı sonuçlar ortaya koymaktadır (Bhuiyan ve Baghel, 2005: 762-765). Bu kapsamda yalın düşüncenin ayrılmaz bir parçası olsa da altına sıkışamayacak kadar geniş bir kavram olan sürekli gelişimle beraber, altı sigma ve sağlam tasarım yaklaşımları da destekleyici yaklaşımlar olarak değerlendirilebilir.

1980'lerin sonuna doğru evrensel ölçekte yeni bir kalite anlayışı, üretimde çoğunlukla doğunun başarısından ve yöntemlerinden kaynak alan bir ilhamın Batıdaki yansımaları olarak toplam kalite yönetimi anlayışı adı altında kendini göstermiştir. Buna göre tüm çalışanların süreçleri sahiplenerek alanlarında sorumluluk üstlenmeleriyle ve aktif olarak katıldıkları sürekli iyileştirmelerle müşteri memnuniyetinin artırılması hedeflenir (Dahlggaard ve Dahlggaard-Park, 2006: 266-267). Bu yeni yönetim anlayışının getirdiği ticari başarıyla birçok şirket özelinde kabul görmesinin bir sonucu olarak atık-hurda azaltma ve üretkenliği artırma gibi sürekli gelişim uygulamaları giderek yaygınlaşmıştır.

Sürekli gelişim anlayışı zaman içinde en önemli yönetim prensiplerinden biri haline gelmiş, iş hayatında ve akademik çevrelerde birçok tanımlaması yapılmıştır. Anderson ve Rungtusanatham (1994), üretimde kalite anlayışının Batıdaki öncüsü kabul edilen Deming'in yönetim metodunun da altında yatan düşünce olduğuna işaret ederek sürekli iyileştirme anlayışını, kuruluşların ürün ve süreçlerinde aşamalı ve yenilikçi iyileştirmeler yapma eğilimi olarak tanımlamışlardır. Bessant ve diğerleri (1994) sürekli iyileştirmeyi, şirket çapında odaklanmış ve birikimli olarak artan sürekli bir inovasyon yaklaşımı olarak görmüşlerdir. Bhuiyan ve Baghel (2005) sürekli iyileşmeyi, bir kuruluşun tüm sistem ve süreçlerinde atıkların azaltılmasını hedefleyen sürekli bir kültür yapısı olarak nitelemektedir.

Görüldüğü üzere sürekli iyileştirmeyle ilgili tanımlar benzer bir mantığa hizmet etmektedir. Kastedilen, kapsayıcı bir tanımlamayla, yönetimden işçilere kadar tüm çalışanlar tarafından şirket genelinde bir katılımı atıkları azaltıp kaliteyi artırmak için

atılan küçük ama sık adımların ve yeniliklerin birikmesiyle, bütüncül açıdan bakıldığında toplam performans üzerinde olumlu etkileri gözlenebilen gelişmelerdir. Ürün ve hizmet üreten kuruluşlardan kamu kuruluşları ve kar amacı gütmeyen kuruluşlara kadar pek çok ortamda geçerli olacak bir kalite iyileştirme önerisi olarak evrensel çapta kabul görmektedir.

Yalın felsefede kaizen kavramıyla ifade edilen sürekli gelişim düşüncesinin belkemiğini oluşturur ve devamlı desteklenir. Sürekli gelişim kültürünü oturtmuş kurumların ulaştıkları sonuçlar, yalının başarılı uygulamalarında elde edilen kazanımlarla paralellik göstermektedir. Bunlardan en çok göze çarpanları geçiş ve kurulum sürelerindeki azalma, atık ve kusurların azalması, bekleme ve gecikmelerin en aza inmesi ve arızaların en düşük seviyelere inmesidir. Yalın üretimle ilişkilendirilen tekli dakikalarda kalıp değiştirme, toplam üretken bakım, 5S, kanban, poka yoke, iş standartlaştırma ve değer akış haritası gibi pek çok araç ve teknik de sürekli gelişimi doğrudan desteklemektedir. Benzer şekilde yalının uygulanmasının önündeki engeller sürekli gelişimin de en büyük engelleyicisi konumundadır. Zayıf planlama ve yönetim kayıtsızlığı, iş gücünün direnci ve eğitim eksikliği, ölçüm sistemleri ve bilginin eksikliği, uygunsuz performans kriterleri ve ödül sistemleri, kısa vadeli bakış ve hızlı bir yatırımın geri dönüşü beklentisi, güven motivasyon ve liderlik eksikliği bunların arasında sayılabilir. Ayrıca spesifik teknik ve araçlardan daha kapsayıcı olacak şekilde sürekli iyileştirmeye üç temel ilke üzerinden bakmakta fayda vardır. İlki süreç odaklılıktır, rakamlar işin sonucudur ve öncelikle sebeplere ve süreçlere odaklanılmalıdır. İkincisi standartları geliştirmek ve sürdürmektir. Kalıcı iyileştirmeler yalnızca, yenilikler devam eden bir çabayla birleştirilirse sağlanabilir ve standart performans seviyelerine dönüştürülebilir. Sonuncusu ve belki de en önemlisi insan odaklılıktır. Herkes sorumlulukları kapsamında iyileştirme süreçlerine dahil edilmeli ve kendilerini geliştirmeleri sağlanmalıdır (Singh ve Singh, 2013: 78). Sonuç olarak yalın üretim ve sürekli gelişim, operasyonel açıdan yinelemeli bir döngüyü izleyen adımlarla ve stratejik açıdan uzun vadeli bir süreç olarak ele alınmalarıyla başarılı olmaktadır. Sürekli gelişim yalın düşüncesinin temel unsuru olarak itici güçüdür ve en önemli hedeflerindendir. Bu bağlamda şekillenen araç ve teknikleriyle sağladığı elverişli ortam sayesinde sürekli gelişimin uygulamadaki en başarılı sonuçları da yalın çevrelerde alınan sonuçlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Altı sigma yaklaşımı ise yalın üretimden ayrı olarak gelişmiş olmasına karşın yalın uygulamalarının içerisinde yoğun bir şekilde yer alarak yalın altı sigma yaklaşımına evrilmiştir. Bu bağlamda bu iki kavramın bağlantısını daha sağlıklı

kurabilmek adına altı sigma ve yalın altı sigma başlıkları izleyen kısımlarda ele alınmaktadır. Ayrıca bir diğer önemli destekleyici yaklaşım olan sağlam tasarım da bu çalışmanın ikinci bölümünde ele alınmıştır.

1.3 ALTI SİGMA KAVRAMI

Altı sigma kalite anlayışı 1980'lerin ortasında istatistiksel temelli bir yöntem olarak süreç performanslarını geliştirme amaçlı Motorola bünyesinde geliştirilmiştir. Daha sonra 1990'ların ortasında AlliedSignal ve General Electric başta olmak üzere birçok kurumda başarılı bir şekilde uygulanmasının sonucunda milyonlarca dolar tasarruf sağlamış ve dikkatleri üzerine çekmiştir. Günümüzde de en yaygın bilinen ve kullanılan kalite yaklaşımlarından biridir (Snee, 2004: 4-5).

Üretimde yakalanan samsasyonel başarısı ve ürün uyumluluğu seviyelerinden sonra literatürde üzerine pek çok çalışma yapılmış ve farklı açılardan ele alınmıştır. Schroeder ve diğerleri (2008) altı sigmayı; felsefesi, yöntemleri ve araçları gibi alt bileşenlerini de içerek şekilde olgun bir kalite sistemi olarak değerlendirmiştir. Snee (2004) altı sigmayı metodolojik bir yaklaşım olarak görmüş, tarihsel bir perspektif üzerinden ele alarak yöntemi üzerinden incelemiştir. Dasgupta (2003), Jenab ve diğerleri (2017) için altı sigma daha ziyade kalite karakteristiklerine dayanan bir performans ölçütüdür. Anthony (2004) için ise altı sigma bu sayılanların tamamı olarak iş görebilmektedir. Genel olarak üzerinde uzlaşıldığı üzere altı sigma yaklaşımı üretim süreçlerindeki varyasyonu anlayıp azaltarak çok ciddi iyileştirmeler sağlamaktadır ve bu bağlamda üretimde istatistiksel düşünce uygulamalarının çok önemli ve faydalı bir bileşeni haline gelmiştir.

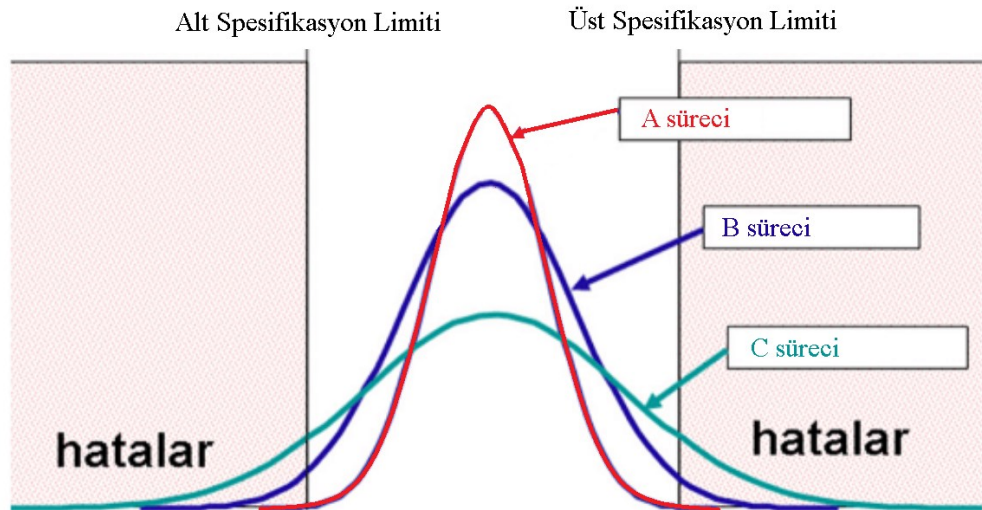
Altı sigma süreç çıktılarındaki hata oranlarından yola çıkıp süreçlerdeki kusurları ortadan kaldırmaya odaklanan ve bu kusurlar üzerinden süreçlerdeki değişkenliği azaltarak üretim zamanını düşürüp üretkenlik artışı amaçlayan bir kalite geliştirme yaklaşımıdır. Sigma ismi literatürde standart sapma yerine kullanılan Yunan alfabesinin σ harfinden gelmektedir.

Günlük hayattaki gerçek girdilerinin yanında rastlantısal faktörlerden de etkilenen pek çok süreç gibi, üretim süreçlerinin de çıktılarının normal dağıldığı kabul edilir. Bu süreçlerin sonucunda ürünlerin, yapılan işlem doğrultusunda hedeflenen bir ürün karakteristiğine ulaşması beklenir. Üründen ürüne değişmekle beraber bu hedef özellik boyut, ağırlık, esneklik, sağlamlık, tat, renk, pH derecesi yahut iletkenlik derecesi gibi pek çok şey olabilir. Ancak pratikte tam olarak 3 santimetrelilik bir çizgi

çizmek imkansızdır denilebilir; yalnızca cetvelimiz yeterince hassas değildir yahut büyütecimiz yeterince büyütüyordur. Dolayısıyla üretimde, fonksiyonel açıdan problem yaratmayacak kabul edilebilir sınırlar belirlenir ki bunlara alt ve üst spesifikasyon sınırları, hedef değerle farklarına da toleranslar denir. Sınırlar dahilinde üretilen ürünler başarılı, dışında kalanlar hatalı kabul edilir. Şekil 3'te farklı süreçlere ilişkin hedef özelliklerin dağılımı örneklendirilmiştir.

Normal dağılımın şekli iki karakteristiğiyle tamamen ifade edilebilir. Bunlardan ilki olan süreç ortalaması eğrinin tepe noktasıdır ve en çok gözlenen değeri ifade eder. İkincisi olan standart sapma veri değerlerinin yayılımının bir ölçüsüdür ve arttıkça eğri enine genişler.

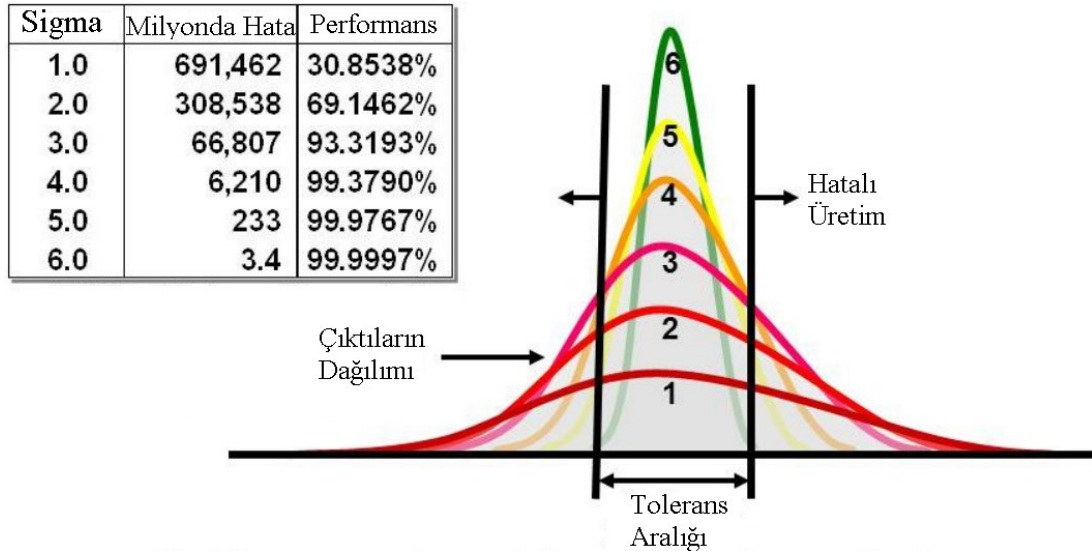
Şekil 3: Üretimde normal dağılım



Şekil 3'te süreç çizgilerinin altında kalan uzunluklar yatay olarak denk geldikleri özellik değerindeki üretim miktarını simgeler. Buna göre standart sapması yüksek olan C süreci enine daha çok yayılım göstermiş, pek çok özellik değerinde üretim gözlenmiş ve birçoğu gerekli özellik sınırının dışında kalıp hatalı üretim olmuştur. B sürecine geçildiğinde sapma azalarak şekil enine daralmış, gözlenen özellik değerleri toplamda hedef değere yaklaşma göstermiş ve hatalar ciddi oranda azalmıştır. Son olarak A sürecine gelindiğinde üretimin çoğu hedef değere çok yakın bir aralıkta gerçekleşmiş, altında kalan alanın neredeyse tümünün gerekli sınırlar içinde kalmasıyla kusursuza yakın bir üretim gerçekleştirilmiştir.

Üretim süreçlerinde bu hedef özellik değerleri ve toleranslar ürünlerin beklenen fonksiyonu yerine getirebilmeleri için gereken dışsal dayatmalardır. Çoğunlukla üretici tarafından değiştirilip ayarlanamazlar ve belli standartları karşılamaları gerekir, kısacası genellikle sabittirler. Dolayısıyla üretimin istenilen sınırlarda kalması ve olabildiğince az hatayla yapılabilmesi için üretim eğrisinin yayılımının azalarak daralması, yani standart sapmasının azaltılması gerekir. İşte altı sigma anlayışı bir süreç performans ölçütü olarak bu noktadan yola çıkarak bir kalite kıstası belirler. Buna göre altı sigma standardını karşılayan bir sürecin çıktılarının standart sapması, alt ve üst her bir spesifikasyon limitiyle hedef değer arasındaki farkın yani toleransın altıda biri olmalıdır. Başka bir deyişle sürecin üst ya da alt spesifikasyon limiti, hedef değerden altı standart sapma uzaklıkta olmalıdır. Bu standart üretilen her bir milyon parçadan yalnızca 3,4'ünün hatalı olması anlamına gelir (Shahin ve Alinavaz, 2008: 324). Örneğin performans seviyesi üç sigmaya düştüğünde bu rakam, kabul edilebilir hata oranı, bir milyon parçada 66807 parçaya yükselir. Bu oran, eğrilerin tolerans sınırları dışında altında kalan alanının, toplam altında kalan alanına oranıdır. Şekil 4, eğrilerin altında kalan alanları ilerlemeyi kıyaslaması açısından temsili olarak gösterirken sigma performans seviyelerindeki kabul edilebilir hata ve başarılı üretim oranlarını belirtmektedir (Snee, 2004: 8).

Şekil 4: Sigma seviyelerine göre hata oranları



Kaynak: Snee, 2004: 8

Altı sigma seviyesi birçok sektörde dünya standardında birinci sınıf bir süreç performansına ve bir hedef noktasına işaret eder. Günümüzde başarılı sayılanlar dahil olmak üzere birçok üretim sürecinin ortalaması 3-4 sigma aralığındadır (Bircan ve Köse, 2012: 108). Elbette altı sigma yaklaşımı tüm alanlarda nihai bir hedef olmaktan ziyade bir anlayışı temsil etmektedir. Örneğin havayolu güvenliği gibi bazı sektörlerde daha bile yüksek süreç güvenlikleri gerekebilirken, bazı sektörler için daha düşük bir güvenlik ve performans seviyesi kabul edilebilir olmaktadır. Uygun performans seviyesine, bu performansı sağlamanın maliyeti ve getirileri karşılaştırılarak çalışılan alana göre karar verilmelidir (Snee, 2004: 8).

1.3.1 Altı Sigma Yaklaşımının Farkı

Altı sigma yaklaşımı tanımları, aşamaları ve sonuçları bakımından oldukça açık ve net bir yaklaşımdır. Bazı diğer kalite yaklaşımları kullanım özelliklerine uygunluğa yahut atıklara vurgu yaparken, altı sigma doğrudan süreçlerdeki ve çıktılardaki değişkenliklere odaklanmaktadır. Bir üretim sisteminde en fazla katkıyı hangi süreçte vereceği, dolayısıyla ilk hangi sürece uygulanacağını kestirmek nispeten rahat ve ölçülebilirdir. Çok farklı çevrelerde uygulanabildiği gibi ve en iyi sonucu uzun vadede vermekle beraber, kısa vadedeki getirileri de pek çok kalite yaklaşımına oranla nispeten başarılı sonuçlar vermektedir. Yapılan bir araştırmaya göre altı sigma uygulama girişimleri proje başına ortalama 175000 dolardan fazla ve siyah kuşak altı sigma uygulayıcısı başına yıllık ortalama 1 milyon dolara kadar getiri sağlamaktadır (Snee, 2004: 8-9).

Öncelikle altı sigma yaklaşımının adında bile net bir hedef vardır. Mükemmellik somutlaştırılmış ve ismi konmuştur. Bu durum proje bazındaki çalışmalara da yansır, projenin amaçları ve hedeflenen sonuçlar üzerinde net bir odaklanma oluşturur. Sonuçlarındaki olası etki ve kazanımları net bir şekilde tanımlanmadan altı sigma çalışmalarının başlaması dahi onaylanmamaktadır (Snee, 2004: 9). Altı sigma çalışmaları alanında yetkin kişilerden oluşan güçlü bir liderlikle, bu güçlü liderlik de söz konusu sonuç odaklı yaklaşımla desteklenir. Kendi hiyerarşik yapısı içinde proje ekibindeki kişilerin görev ve sorumlulukları çok net bir biçimde belirliken gerekli eğitimlerle yetkinliklerinin ve altyapılarının da sağlam olması sağlanır.

Altı sigma yaklaşımı, insanları ve süreç elemanlarını bir amaç doğrultusunda bütünleştirebilecek şekilde etkili yöntemlere ve bir hayli kullanışlı araçlara sahiptir. Ekip çalışması, kültürel değişim, süreç sahiplenme, müşteri odaklılık gibi bazı insana

dair yaklaşımlarla istatistiksel süreç kontrolleri, deney tasarımları, regresyon analizleri, müşterinin sesi çalışmaları gibi bazı araçları uygulama aşamaları altında ahenk içinde birleştirir. Bu araçlar ayrı ayrı da pek çok farklı yaklaşım altında kullanılsa ve faydaları ispatlanmış olsa dahi altı sigma altında hizalandıklarındaki uyumları ve toplama etkileri, diğer süreçlerdekine nazaran daha fazla olmaktadır (Snee, 2004: 9). Ayrıca DMAIC yöntemi altı sigma kalite yaklaşımının icadı olmasa da göreceli olmakla birlikte en iyi uygulandığı sistemin altı sigma olduğu söylenebilir. Son olarak hayattaki en gerçek yol göstericinin bilim olduğu düşünüldüğünde; üretimdeki bilimsel yöntemle en yakın yolu izlemesi, istatistiksel düşünceyi ve araçları kullanması, doğrudan deney ve gözlemlere dayanan aksiyonlar üretmesi açısından altı sigma yöntemi oldukça kıymetlidir ve öne çıkmaktadır.

1.3.2 Altı Sigma Uygulama Aşamaları

Altı sigma yaklaşımı temelinde, kontrol dışı değişkenliğin ortadan kaldırılması yahut olabildiğince azaltılması amacıyla; geçmişten günümüze ortaya koyulan emeğin, deneyim ve birikimlerin istatistiksel düşünce ve araçlarla birlikte kullanılmasıyla varyasyonların kök nedenlerine yönelik sistematik bir mücadeledir. Felsefesinin ve kavramsal boyutunun kurum kültürü üzerindeki etkilerinin önemi, çalışmalarla ayrılmaz bir bütün olup yadsınamayacak olmakla birlikte; pratikteki en temel iki yansıması ölçüm tabanlı süreçlerin geliştirilmesi ve sapmaların azaltılması konulu altı sigma geliştirme projelerinin uygulanmasıdır. Bunu da aşamalarının ayrımları net ve tanımları açık bir yöntem üzerinden yapar. Hatta bu kadar kabul görüp yayılmasındaki en önemli faktörlerden biri olarak istatistiksel tekniklerinin kolay takip edilebilir olması ve iyi yapılandırılmış duru bir metodoloji sunması gösterilmektedir. Altı sigma yaklaşımının yöntemi DMAIC kısaltmasıyla tarif edilen adımları takip eder. Bunlar tanımlama (define), ölçme (measure), analiz (analyze), geliştirme (improve) ve kontrol (control) aşamalarıdır (Arthur, 2001: 17).

Bu aşamalardan ilki olan tanımlama aşamasında öncelikle işletmenin amacı ve kritik başarı kriterleri dikkate alınarak çalışılacak projeler doğru bir şekilde belirlenmeli ve bu projelerde çalışacak olan personel seçilmelidir. Proje durum rapor formu hazırlanıp hedefler ve süreler belirlenerek projenin gerektirdiği; tedarikçilerden, müşterilerden ve süreçten de temsilcilerin olduğu proje personeli seçilir. Daha sonra çalışacak takım ve proje liderinin bir araya gelmesiyle kritik müşteri istekleri doğrultusunda yaratılacak fayda, proje amaç ve hedefleri, alanı ve sınırları, proje

personelinin rolleri ve sorumlulukları, süreç haritası ve performans kriterleri amaçlar doğrultusunda çeşitli tanımlama yöntemleri ile belirlenmelidir. Proje ve iletişim planları, sebep sonuç diyagramları, müşterinin sesi (voice of customer) analizi gibi araçlar bu aşamada kullanışlı olmaktadır (Avunduk, 2019: 637).

İkinci aşama olan ölçme aşamasında gelişme için bir basamak teşkil edip fırsatları ortaya koyması amacıyla mevcut performans değerlendirilir. Öncelikle mevcut sürecin değer akış haritası oluşturulur; tüm girdiler çıktılar ve değişkenler belirlenir. Veri analiz yöntemi belirlenir ve buna göre süreçlerin analizi için gereken kalite, hız, performans ve maliyet gibi konulardaki veriler toplanır. Ölçüm işleminin herhangi bir manipülasyon içermediği, veri kalitesi ve kabul edilebilirliği kontrol edilmelidir. Bu aşama mevcut performansın belirlenmesi ve gelişime temel teşkil etmesi açısından kritiktir (Avunduk, 2019: 637-638).

Üçüncü aşama olan analiz aşamasının amacı en iyi ürünü veya hizmeti sunabilmek için gerekli olan kritik faktörleri belirlemek ve kök neden analizleri ile hataların ve varyasyonların sebeplerini bulmaktır. Sebebe sonuç diyagramı gibi araçlar ile hata türü ve etki analizine yardımcı olacak problemi oluşturan sürecin çıktıları ile girdilerinin bir listesi hazırlanıp, sebep sonuç ilişkisi incelenir. İstatistiksel veri analizlerinin yoğun olarak kullanıldığı analiz aşamasında mevcut durum ile istenen ya da hedeflenen performans düzeyi arasındaki farkın nasıl ortadan kaldırılacağı araştırılır. Tanımlama ve ölçme aşamalarında belirlenen girdilerin sonuç üzerindeki etkisi uygun istatistik araçları ile analiz edilir. Girdi faktörlerinin azaltılması ve sonuç üzerinde etkisi en yüksek girdilerin belirlenmesi yahut etki sırasına göre sıralanması sık karşılaşılan önemli bir adımdır (Avunduk, 2019: 638). Bu konuda sebep sonuç diyagramları, Pareto analizleri, hipotez testleri, korelasyon hesapları, kontrol grafikleri ve çoklu regresyon analizleri oldukça kullanışlı araçlardır.

Sonraki adım olan iyileştirme aşamasında, problemi yaratan unsurların ortadan kaldırılmasına yönelik çözümler geliştirilir ve uygulama planları belirlenir. Hedeflenen çıktı değerlerine ulaşmak için hangi girdiler üzerine ne şekilde odaklanılması gerektiğinin bilgisi analiz aşamasından alınarak iyileştirme çalışmaları buna göre yürütülür. Ayrıca alternatif çözüm yolları geliştirilerek deneme uygulamalarla hedeflenen gelişim farklı yollardan da elde edilmeye çalışılır. İyileştirme aşaması sonucunda en iyi çözüm belirlenir, risk analizi yapılarak uygulamaya alınır (Akarslan, 2004: 55; Avunduk, 2019: 639).

Kontrol aşaması yapılan iyileştirmenin ve değişikliklerin etkisinin kontrol edildiği aşamadır. Geliştirilen çözüm yöntemi ve uygulaması başarılı olduğu takdirde

doğrulanıp bu iyileştirmenin sürekliliği; güncel ve sürekli eğitimlerle olabildiğince insan hatasının önüne geçerek, kontrol metotları güncellenerek, süreçteki değişkenliğin mevcut ve gelecekteki nedenlerini ortadan kaldırarak ve geliştirilen yeni sürecin istatistiksel kontrol altında tutulması ile sağlanır. İyileştirilen süreç belli bir süre sonunda kararlı hale geldiğinde sürece ilişkin hedeflenen sonuçlar kayıt altına alınır ve eğer proje başında belirlenen hedeflerden uzaklaşmışsa düzeltici faaliyet olarak DMAIC döngüsü tekrar başlatılır (Avunduk, 2019: 639).

Bahsedilen aşamaların tamamında müşteri odaklılık, proaktif yaklaşım, işbirliği ve istatistiksel düşünce esastır. Altı sigma anlayışı standardı çok yüksek bir noktaya koymaktadır ve ulaşılsa dahi sürdürülebilmesi için akla gelebilecek tüm süreçlerde ve bazılarında tekrar tekrar söz konusu adımlar döngüsel ve sistematik olarak yinelenmelidir. En yararlı sonuçlar bir kurum kültürü olarak alışkanlık haline geldiğinde uzun vadede alınmıştır (Ergün, 2003: 39-42).

1.3.3 Altı Sigmada Roller ve Sorumluluklar

Altı sigma yaklaşımının başarısındaki en önemli faktörlerden biri projelerde görev alacak ekip üyelerinin görev ve sorumluluklarının iyi tanımlanmış olmasıdır. Dünya çapında son derece kıymetli ve nispeten pahalı eğitimlerle kişiler altı sigma uygulamalarında yetkinliklerine göre hiyerarşik unvanlar alırlar. Şampiyon, kurumun misyonu, vizyonu ve değerleri doğrultusundaki hedeflerini destekleyen ve bunları bir altı sigma yerleştirme stratejisiyle bağdaştıran kişidir. Eksiklikleri tespit edip uygulanacak projeleri ve kaynak ihtiyaçlarını belirleyerek olası engelleri ortadan kaldırırlar. Takımlara danışmanlık ve koçluk yapıp odaklanmayı sağlarlar. Uzman siyah kuşak, siyah ve yeşil kuşakları eğitip stratejik yönetimde rol alır. Siyah kuşak projelerde problem çözümlerine yol gösterir. Yeşil kuşak veri toplanması ve analiz kısımlarında siyah kuşaklara yardımcı olur. Kimi kaynaklarda sarı kuşaktan da bahsedilir ki bunlar sürece katkıdan çok gözlem yoluyla öğrenme aşamasındadır. Tablo 1'de bahsedilen rollerin bazı sorumlulukları gösterilmektedir. (Harry ve Schroeder, 2000: 198-199)

Tablo 1: Altı sigma uygulamalarında roller ve sorumluluklar

Şampiyon	Uzman Kara Kuşak	Kara Kuşak	Yeşil Kuşak
Şirketin Altı Sigma vizyonunu oluşturmak	Kara Kuşakların eğitimine ve sertifikalandırılmasına yardımcı olmak	Proje engellerini belirlemek	Günlük işlerin yanında, Yeşil Kuşak fonksiyonlarını yerine getirmek
Altı Sigma uygulama yolunu tanımlamak	Şampiyonlarla işbirliği kurmak	Projenin gerçekleştirilmesinde ekipleri yönlendirmek ve yönetmek	Kara Kuşakların projelerine katılarak, sorumluluklarını yerine getirmek
Stratejileri uygulamak için eğitim planı geliştirmek	Örgütün birçok seviyesindeki personeline eğitim vermek	Liderlere gelişmeleri rapor etmek	Projelerin uygulanmasında Altı Sigma metodlarını öğrenmek
Etkisi yüksek olacak projeleri belirlemek	Proje tanımlamasına yardımcı olmak	Gerektiğinde şampiyonlardan yardım talep etmek	Projelerin tamamlanmasından sonra da Altı Sigma metod ve araçlarının öğrenimini sürdürme
İstatistiksel düşünce sistemini geliştirmek	Proje çalışmalarında Kara Kuşakları desteklemek	Uygulamada kullanılacak en etkin araçları belirlemek	
Kara Kuşakları denetlemek	Gerekli olduğunda teknik danışmanlık verebilmek üzere proje incelemelerine katılmak		

Kaynak: Harry ve Schroeder, 2000: 198-199

1.3.4 Altı Sigma İçin Tasarım

Altı sigma yaklaşımı ve uygulamaları çok başarılı sonuçlar verse de bir noktada doyuma ulaşp kitlenebilir ve süreçle ilgili dış kısıtların sınırına dayanılmasıyla geliştirmeler ilerletilemez hale gelir. Bu engellemelerin en yaygın olanlarından biri ürün ve süreçlerin tasarımından kaynaklanan kısıtlamalardır. Genellikle bazı temel tasarım ilkelerine uyulmadığında ortaya çıkan bu sorunlar zafiyet olarak görülürler ve ilerleyen aşamalara taşınmaları fazlasıyla maliyetli olabilir (El-Haik ve Yang, 2008: 50-52).

Tasarımda bu tarz zayıflıklardan mümkün olduğunca kaçınmak için iki temel tasarım aksiyomu tanımlanmıştır. İlki olan bağımsızlık aksiyomu ayrı fonksiyonların

birbirini olumlu yahut olumsuz şekilde etkilememesini ve fonksiyonel ihtiyaçların bağımsızlığını ifade eder. İkincisi bilgi aksiyomu ise tasarım alternatiflerinden mümkün olan en az bilgi içeriğine sahip olanın en iyi tasarım olduğuna işaret ederek yalınlığa vurgu yapar (Çelik ve diğerleri, 2020: 34-35). Örneğin tasarımda bağımsızlık aksiyomuna uyulmadığında kullanımda fonksiyonel zayıflıklar ve karışıklıklar gözlemlenir.

Altı sigma için tasarım fikri altı sigma uygulamalarına destek olarak tasarım kaynaklı zafiyetlerin etkilerini en aza indirmek için geliştirilmiştir. Yapılan araştırmalara göre altı sigma yaklaşımını benimsemiş, hatta başarıyla uygulayan kurumlar bile mevcut tasarımlarıyla ancak beş sigma seviyesine kadar çıkabilmektedir ve altı sigma seviyesine ulaşabilmek için ürün ve süreçlerini alt sigma için tasarım yöntemleriyle yeniden tasarlamaları gerekmektedir (Harry ve Schroeder, 2000). Faydalı araştırmalar ve istatistiksel araçlarla kalite, henüz prototip dahi oluşturulmadan hesaplanıp geliştirilmeye çalışılır. Altı sigma için tasarım, odağına müşteriye alıp olası tasarım zafiyetlerini öngörerek deneme yanılmadan ziyade ilk seferde doğru tasarım amacındadır. Ürünün sunum süreci içinde; fikir aşamasında kavramsal araçlar, ürün geliştirme aşamasında kavramsal ve istatistiksel araçlar, imalat aşamasında ise istatistiksel araçlar ağır basmaktadır. Erken tasarım aşamasındaki veri eksikliği, standart altı sigma araçlarının çoğunu kullanışsız kılmaktadır. Bu sebeple kalite fonksiyonlarının göçerimi, deney tasarımları ve müşterinin sesi analizi gibi araçlardan yararlanılır. Aşamaları da bu amaç ve araçlara uygun olacak şekilde tanımlama (identify), tasarlama (design), en iyileştirme (optimise) ve doğrulama (validate) olarak IDOV kısaltmasıyla yeniden düzenlenmiştir (El-Haik ve Yang, 2008: 54). Bu anlayışla ele alınan bir tasarım sürecinde ürünün pazarlanmasından teslimatına kadar pek çok boyutu tasarım açısından ele alınır. Yaratıcı fikirlerle süreçler bütünsel olarak yeniden değerlendirilip olası problemler ve gereksiz işlemler elimine edilerek, ürün en kullanışlı ve yalın formuna getirilmeye çalışılır.

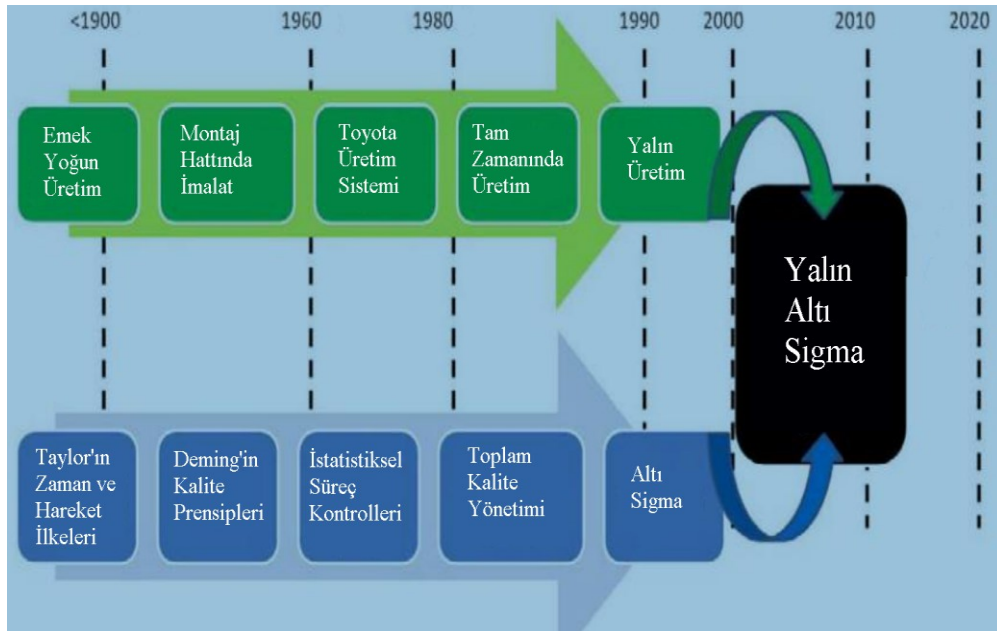
Bu tür bir yaklaşımın uygulanmasında deneysel tasarımın kullanılmasından sağlanacak faydalar, bu çalışmanın ana fikrinin oluşmasını sağlamıştır. Buna bağlı olarak çalışmanın ilerleyen bölümlerinde altı sigma temelli yaklaşımları uygulamada deneysel tasarımla, özellikle de Taguchi yöntemiyle bağlayacak bir metodoloji ele alınmıştır.

1.4 YALIN ALTI SİGMA

Altı sigma yaklaşımında görünürde hedefler değişkenliği azaltmak, kusurları azaltmak, üretkenliği artırmak ve müşteri memnuniyetini arttırmak olarak ortaya konsa da bunların tamamı, neredeyse tüm üretim süreçlerinin genel amacı ve esas hedefi olan karlılığa götüren yollar gibi görünmektedir. Breyfogle (2003) uzun yıllar süren çalışma, gözlem ve tecrübelerinin sonucunda altı sigma süreçlerinde, tipik bir yatırımın geri dönüşü beklentisiyle, tahmini karlılığın proje seçiminde çoğunlukla belirleyici karar faktörü olduğunu belirtmektedir. Projelerin başarıları getirileri, karlılık ve sağladıkları kazanç üzerinden değerlendirilirken buna götüren ve hedef olarak belirtilen yukardaki yollardan geçmek için bazı ortamlar daha elverişli olmakta; bazı çevrelerde çalışmalar çok daha kolay, kazançlı ve verimli yürütülmektedir. Bu ortamların başında uyumları ve oluşturdukları sinerji bakımından, henüz beraber uygulanmalarının nispeten kısa bir geçmişi olsa da yalın üretim sistemleri gelmektedir.

Dahlgaard ve Dahlgaard-Park (2006: 263-264) söz konusu iki yaklaşımın da köklerini aynı yerden, Japon kalite yönetimi ilkelerinden aldığını belirtmektedir. Şekil 5'te yalın ve altı sigma anlayışlarının tarihsel gelişiminin yalın altı sigmaya dönüşümü gösterilmektedir.

Şekil 5: Yalın altı sigma anlayışının gelişimi



Kaynak: Jawalekar ve diğerleri, 2016: 1753

Yöntemleri ve yaklaşımlar değişse de iş geliştirme fikri çok uzun zamandır süregelen bir çabadır. Ancak bugün anlaşılan anlamında temellerinin bilimsel yönetim üzerine çığır açan çalışmalarıyla Taylor (1911) tarafından atıldığı ve yaklaşık bir asırlık süredir modern anlamda geliştiği kabul edilir. Bu süre zarfında iş geliştirme yaklaşımları genellikle devrimsel bir etkiyle ani sıçramalardan ziyade; bir öncekinin etkili yönlerinden ilham alarak, faydalı yöntemlerin üzerine koyarak evrimsel bir süreç içinde, küçük adımlarla ve birikimli olarak ilerlemiştir (Snee, 2010: 9-12). Yalın altı sigma anlayışı da bu gelenen ilerlemede en son seviyelerden biri olarak kabul edilir.

Yalın üretim ve altı sigma yaklaşımlarının ayrı ayrı uygulanmalarının nispeten daha uzun bir geçmişi olsa da iyileştirme hızı, paydaş değeri yaratma, müşteri memnuniyeti, maliyet, üretim hızı ve kalite gibi alanlarda yalın altı sigma anlayışının yarattığı düzeyde bir başarıyı tek başlarına yaratamamaktadırlar (Bhuiyan ve Baghel, 2005: 765-769). Yalın düşünce her türlü atık ve israfı elemeye çalışırken altı sigma değişkenliği azaltmaya çalışır. İkisinin birleşiminin getirdiği sinerjiyle, atıklar elendikçe değişkenliklerin tespit edilmesi kolaylaşır. İki ayrı düşüncenin özelinde irdelenen öncelikler ve hedefler, hangi süreç adımlarının ilk olarak değerlendirileceği, hangi sırayla ve ne kapsamda uygulanacakları; maliyet, kalite ve teslim süreleri bağlamında yeniden ele alınmıştır.

Yalın anlayış mevcut durumdan gelecektekine doğru üretimi yeniden konumlandırırken süreçleri ve akışı haritalandırarak potansiyel gelişim olanaklarını belirlemeye çalışır. Buna göre atıklar ortadan kaldırılır, gerekirse toplam kapasitenin tam zamanında üretimi takt zamanına göre karşılayabileceği şekilde yatırımlar yapılır ve süreçler değiştirilir. Ancak hızlı değişimler ve sıçramalar yerleşik süreç kontrollerini ve ürün uygunlukları sınırlarını zorlayabilmektedir. Altı sigma uygulamaları ise genellikle kronik problemler üzerinde adım adım sağladığı gelişmeleri DMAIC sürecinin kontrol aşamasında değerlendirerek sorunun kök nedenlerinin bir daha oluşmaması için çalışsa da tüm sistem üzerinde hızlı ve büyük çaplı bir gelişimle sonuçlanmaz. Yani kısaca altı sigma tek başına tüm işlem hacmini geliştirmek, sermaye kullanımını dağıtmak yahut hedefleri hizalamak gibi bütünsel süreçler için yeteri kadar hızlı ve gerekli iyileştirmeleri yapamazken; yalın da tek başına süreçleri kontrol altında tutma, istatistiksel araçlar ve kontrollerle net çıkarımlar yapma gibi bölgesel konularda altı sigma kadar etkili değildir (Shahin ve Alinavaz, 2008: 330-333). Bu bağlamda yalın altı sigma anlayışına göre; en iyi potansiyel gelecek durum ile süreçlerdeki istikrar ve karallılık arasında bir denge kurulmalıdır. Bu dengenin odağı

talep tam zamanında karşılanırken süreçlerin ideal durumunda olmaları üzerine yoğunlaşır.

Uygulama aşamaları, potansiyel ve kararlılık ödünleşmesinden kurulan bu denge üzerinde, iki yaklaşımın benzerliklerini ve güçlü yanlarının avantajlarını kullanarak yeniden şekillendirilebilir. İlk olarak müşteri odaklılık, iki yaklaşımda da ortak olup projelerin tanımlama aşamasında mevcut durumlar uzun vadeli stratejilerle örtüşecek şekilde belirlenen potansiyellerine göre geliştirilirken, kritik karar faktörü olmalıdır. Uzun vadeli hedeflere götürecek potansiyel projeler belirlenir; karar matrisleri üzerinden maliyet, kazanç, müşteri değeri, zorluk gibi faktörlerin durumsal koşullar altında ağırlıklandırılmasıyla iyileştirmeler ve amaçlar bölgeselleştirilir. Ölçme aşamasında müşteri bakış açısından belirlenen değer ve bunun dışında kalan israflar potansiyel açısından; süreçteki değişkenlik ve toplanan veri kararlılık açısından değerlendirilerek mevcut sürecin dengesi ele alınır. Analiz aşamasına gelindiğinde değişkenlik sebepleri olan kök nedenler kararlılık açısından incelenirken, değer akış haritalamayla gidilen potansiyel durumdaki olası yansımaları benzerlikler yoluyla kestirilmeye ve oluşmadan engellenmeye çalışılır. Deney tasarımları ve regresyon analizleri bu aşamada faydalı olacaktır. Geliştirme aşamasında atıklar ve israflar ortadan kaldırıldıkça süreçlerin duru ve görünür olmasıyla değişkenlikleri yaratan problemlerin kök nedenleri daha rahat görülebilecek ve eş zamanlı olarak eleenebileceklerdir. Bu durum da değer akışını rahatlatıp çekme sistemini mümkün kılacaktır. Son olarak kontrol aşamasında yapılan iyileştirmeler standartlaştırılıp daha geniş bir tabana uygulanmadan önce yapılan iyileştirmenin boyutları ölçülür ve gerekirse süreç yeniden başlatılır. Tüm bu süreçlerde iki anlayışın da yaklaşım ve araçlarından olabildiğince yararlanılmalıdır. Şekil 7’de, yalın ve altı sigma içerisinde en sık kullanılan araçlardan bazıları gösterilmektedir.

Şekil 7: Yalın altı sigma anlayışında sık kullanılan araç ve yöntemler

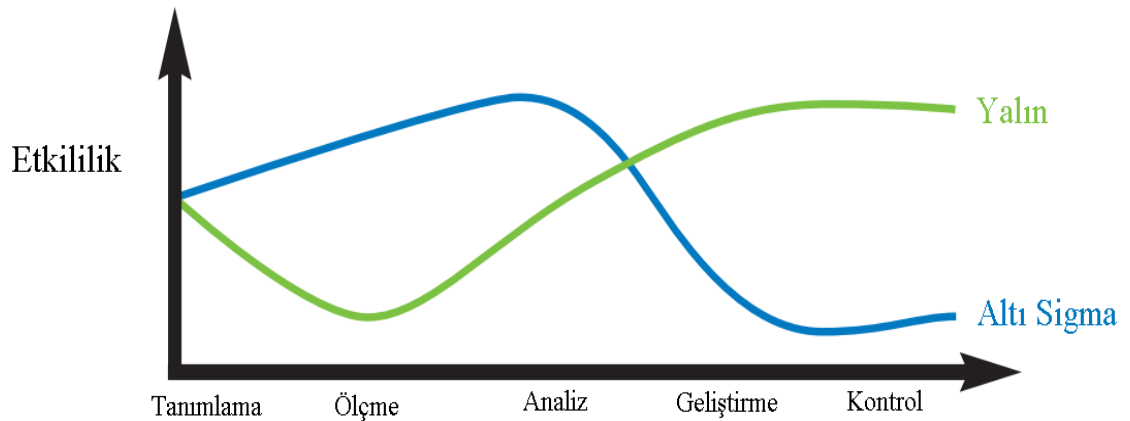


Kaynak: Salah ve diğerleri, 2010: 251

Bevan ve diğerleri (2006) farklı bir yalın altı sigma uygulama yaklaşımı önermektedir. İlk aşama olan anlama ve yeniden çerçeveleme aşamasında; Pareto grafikleri, balık kılçığı diyagramı, mülakatlar, beş neden sorusu (neden sorusu probleme beş kez yöneltildiğinde kök sebeplere ulaşılacağı kabul edilir), müşterinin sesi analizi ve değer akış haritalama gibi araçlarla; işin gerçekleştiği yere gidilip gerçekleştiren kişilerle süreç ve problem derinlemesine irdelenir. İkincisi olan kavramlar geliştirme aşamasında; katılımlı beyin fırtınaları, benzeşme-yakınlık diyagramları, altı şapkalı düşünme tekniği gibi araçlarla; sürecin tüm boyutları olası tüm öneriler üzerinden ele alınır ve çok kaynaklı olarak yoğun bir şekilde fikir yürütülür. Üçüncü aşama deneme ve öğrenme aşamasıdır. Süreç yeniden tasarımı, deney tasarımı, kaizen, kanban, hızlı prototipleme ve 5S gibi araçlarla mevcut fikirler denenip geliştirilir. Son aşama olan yayılımı tasarlama aşamasında ilkeler ve prosedürler, dengeli puan kartları, standardizasyon, iletişim ve eğitim planlarıyla anlamlı ölçütler kurallaştırılır, faydalı araç ve fikirlerin yayılımı sağlanır.

Çalışmalarının sonucunda Bevan ve diğerleri (2006: 13) iki yaklaşımın birbirlerini tamamlamada etkili ve sinerji oluşturan yaklaşımlar olduğunu belirtmektedir. Şekil 8'de bu iki yaklaşımın, DMAIC süreci içerisinde birbirlerinin eksik yönlerini nasıl tamamladıkları ifade edilmektedir. Yalın üretimdeki değer en büyüklenmesi anlayışı, altı sigmanın karar vermede veriye dayalı yöntemleriyle desteklenmektedir. Değişkenliğin en aza indirilmesiyle tüm süreçlerin iyileştirilmesi tüm yalın ölçütlerde olumlu katkı vermektedir.

Şekil 8: Yalın ve altı sigma yaklaşımlarının güçlü yanları



Kaynak: Bevan ve diğerleri, 2006: 13

Zhang ve diğerleri (2012) yalın altı sigmayı, 66 tanesi vaka analizlerine dayanan ve 50 tanesi teorik tabanlı 116 akademik makale üzerinden ülke, departman, yıl ve sektör bazında ele almışlardır. Henüz üzerinde nispeten yeni çalışılmaya başlanmış olmasına rağmen üretim ve hizmet sektöründe birçok farklı alanda ve küçükten büyüğe her ölçüde; bir yaklaşımın diğerlerinin sınırlarını ortadan kaldırdığını ve bütünsel bağlamda gelişme sağladıklarını belirtmişlerdir. Göreceli olarak güncel bir çalışmada Jarial ve diğerleri (2019) 247 makale üzerinden çok benzer bir çalışma yürütmüş; yalın altı sigmanın en fazla imalat ve sağlık endüstrisinde kullanıldığını, tekstil ve gıda sektörleri başta olmak üzere ulaşım, telekomünikasyon, enerji ve elektronik sektörlerinde yeteri kadar çalışma olmamasına binaen olası gelişim olanaklarını işaret etmişlerdir.

Barton ve diğerleri (2008) küçük ve orta boyutlu örgütlerde yalın altı sigmanın uygulanmasını bir vaka çalışması üzerinden ele almış; daha önce benzerini altı sigma için yaptıkları çalışmanın bir uzantısı olarak süreç çıktılarını kalite, maliyet ve verimlilik bağlamında önceden tahmin edip açıklayan bir yalın altı sigma yaklaşımı geliştirip uygulamışlardır. Bu model kritik kalite problemlerini yalın ve altı sigma yaklaşımlarını birleştirerek çözerken, maliyet ve uygulanabilirlik mazeretlerine karşın merkezine deney tasarımı olarak makul ve detaylı bir yöntem sunmaktadır. Buna göre tipik yalın ve altı sigma süreçlerinin çıktılarından yararlanarak deney tasarımına bir hedef belirlenir. Deneyin gerekli dikey dizileri ve aralarındaki ilişkiler tanımlanıp deneyin yürütülmesiyle faktör verileri ve etkileşimleri elde edilir. Daha sonra temel etkiler ve etkileşimler üzerinde varyans analizi uygulanarak istatistiksel önemleri tespit edilir. Son olarak buradan elde edilen sonuçlar öngörülenlerle doğrulanmaya çalışılır. Sonuçlar hedeflenen performans gerekliliklerine yeterince yakın değilse yalın altı sigma süreçlerinin başına, tanımlama aşamasına kadar geri dönlür. Çalışmada ayrıca yalın altı sigma yaklaşımının sürekli gelişme kültürüne katkı yaptığı gibi, yeni ürünler bağlamında altı sigma için tasarım yaklaşımının da reaktiften proaktifte doğru bir anlayış kazandırdığı belirtilmiştir. En nihayetinde ele alınan ürünlerin öngörülen ve optimum değerleri üzerine yapılan çalışmada %99 kalite kazanımı sağlanmıştır.

Bahsedilen tüm bu çalışmaların yanında Hoerl ve Gardner (2010) yalın altı sigmayı henüz yeni bir şey önermemesi; var olan yalın ve altı sigma teknik ve araçlarının mantıklı bir seçiminden oluşması üzerinden eleştirmişlerdir. Yalnızca birikimli inovasyona odaklanmanın yıkıcı sonuçlar doğurabileceğini Amerikan sağlık sistemi örneği üzerinden değerlendirip daha bütünsel ve kapsayıcı bir geliştirme

sistemi olma yolunda farklı rutin problem çözme ve radikal gelişim anlayışlarıyla birleştirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir.

Yalın altı sigma uygulamaları her ne kadar üretim sistemlerinde önemli kazanımlar sağlasa da sistem tasarımlarının belirli bir iyileşme seviyesinin ötesine geçilmesine izin vermemesi genel bir sorun olarak görülmektedir. Bu nedenle sistem tasarımlarının iyileştirilmesi önemlidir. Çalışmanın ikinci bölümünde tasarım aşamasında istenilen özelliklerin elde edilmesine yönelik geliştirilmiş olan Taguchi yaklaşımı ele alınmıştır.



İKİNCİ BÖLÜM

TAGUCHI YAKLAŞIMI

Üretim sistemlerinin her boyutunda kalitenin sağlanması önemli bir gerekliliktir. Bu doğrultuda kalitenin iyileştirilmesi kavramı çağdaş kalite yaklaşımının merkezinde yer almaktadır. Ancak bir sistem ancak sistem tasarımının izin verdiği ölçüde iyileştirilebilir. Bu nedenle daha tasarım aşamasında sistemi olası en iyi performansta tasarlamak ihtiyacı öne çıkmaktadır. Taguchi yaklaşımı, bu doğrultuda kalite literatüründe önerilmiş başlıca yöntemlerden biri olup, bu bölümde bu yaklaşım ele alınmaktadır.

2.1 ÜRETİMDE KALİTE KAVRAMI

Kalite kavramı tarih boyunca üzerine düşünülmüş ve değişik şekillerde tanımlanmış bir kavramdır. Etimolojik açıdan baktığımızda kökeni Latince'deki “ne türden” yahut “nasıl oluştuğu” anlamlarına gelen qualis köküne dayanmaktadır. Buradan kavramın, objenin özüne yöneldiği kadar, meydana getiren süreçle de ilgilendiği anlaşılabılır. Geçmişten günümüze süregelen evrensel ve mutlak bir kalite tanımı bulmak güçtür, zira çağın gereklilikleri ve mevcut durumların koşullarına göre pek çok tanım yapılmıştır (Reeves ve Bednar, 1994: 419).

Kalite hakkındaki bilinen ilk tartışmalar Sokrates, Platon, Aristoteles ve diğer Antik Yunan filozoflara kadar dayanmaktadır. Söz konusu zamanda anlamı bağlamla şekillenmekle beraber ideal, mükemmel anlamlarıyla kullanılmıştır. 1700'lerde ticaretin yayılması ve ürünlerin daha geniş kitlelere hitap etme ihtiyacıyla mükemmellik anlamı pratik sonuçları açısından sorgulanmaya başlamış ve fiyatla kıyaslı bir değer anlamı kazanmıştır. 19. yüzyıla gelindiğinde kavram, sanayi devrimiyle çok ciddi şekilde artan kitlesel üretimlerin de etkisiyle, iyiden iyiye asgari koşullara uygunluk anlamına doğru kayma göstermiştir. 1900'lere gelindiğinde seri üretim ve montaj hatlarının da gelişimiyle çağın üretim anlayışına paralel şekilde kavram, parçaların birbiri yerine kullanılabilmesi üzerinden standarda yakın bir anlam kazanmıştır. Daha sonra istatistiksel yöntemlerin üretim çevrelerinde yaygınlaşmasıyla kalite anlayışı günümüze doğru gelindikçe, yalnızca son üründen ziyade üretim süreçlerini de içine alacak ve sayısal olarak ölçümleri yapılabilecek şekilde genişlemiştir (Reeves ve Bednar, 1994: 435). Amerikan Kalite Kontrol Derneği'nin kalite tanımı; “bir mal ya da hizmetin belirli bir gereksinimi karşılayabilme

yeteneklerini ortaya koyan karakteristiklerin tümü, kalitedir” şeklindedir. Japon Sanayi Standartları Komitesi’ne göre ise kalite; ürün ya da hizmeti ekonomik bir yoldan üreten ve tüketicinin isteklerine cevap veren bir üretim sistemidir (Kackar, 1985: 177).

Birçok kaynağa göre kalite, bir ürün veya hizmetin önceden belirlenen veya oluşabilecek ihtiyaçları karşılayabilme becerisine dayanan özelliklerin toplamıdır (Russell ve Miles, 1998: 14). Bu kavramsal anlayış faydalı bir başlangıç noktası olabilmekle birlikte, günümüz koşulları açısından daha kapsamlı ve kullanışlı bir çerçeve oluşturmakta fayda vardır. Bunun için de kalitenin boyutlarından bahsetmek gerekir.

Müşterinin kim olduğundan ya da hangi nitelikte olduğundan bağımsız olarak, rekabet eden ürün ve hizmetler arasında en önemli müşteri karar faktörlerinin başında kalite gelmektedir. Bu karar bağlamında en etkili sekiz temel boyuttan söz edilebilir. Bunlar performans, güvenilirlik, dayanıklılık, hizmete elverişlilik, estetik, özellikler, algılanan kalite ve standartlara uygunluktur (Garvin, 1987; Montgomery, 2009: 4-5).

Kısaca değinmek gerekirse performans boyutu ürünün amaçladığı işi ne kadar yerine getirdiğiyle ilgilidir. Güvenilirlik boyutu ürünün bozulma sıklığıyla ilgilidir. Dayanıklılık ürünün fonksiyonel kaldığı yaşam ömrüyle orantılıdır. Hizmette elverişlilik ürünün bakım ve onarılmaya elverişliliğini ifade eder. Estetik ürünün nasıl görüldüğü ve duylara nasıl hitap ettiğiyle ilgilidir. Özellikler boyutu ürünün neler yapabildiğiyle yani fonksiyon sayısı ile alakalıdır. Algılanan kalite ürünün yahut markanın imajıyla veya süregelen şöhretiyle açıklanır. Son olarak standartlara uygunluk boyutu üründen bekleneni tam olarak vermesini ifade eder (Garvin, 1987: 102-107; Montgomery, 2009: 6). Tüm bu açılardan bakıldığında kalite; müşteri beklentileri merkezde olacak şekilde değişkenlikle ters orantılı olarak sağlam, stabil bir kullanıma uygunluk ve tercih edilme derecesi olarak değerlendirilebilir.

Bahsedilen kalite boyutlarını ve kullanıma uygunluğu oluşturan süreçlerin iki temel yönü vardır. Bunlar tasarım kalitesi ve uyum kalitesidir. Herhangi bir ürünün yaratılması iki temel aşamayı içerir. Bunlar entelektüel yaratım ve fiziksel yaratım süreçleridir. Entelektüel yaratım sırasında ürün zihinde canlandırılır ve tasarımı yapılır. Daha sonra ürün buna uygun şekilde fiziksel olarak üretilir. Tasarım kalitesi entelektüel yaratım süreciyle ilgilidir. Müşteriye sunulması gereken kalite bu aşamada planlanır ve mutlaka müşteri gereksinimleri dikkate alınmalıdır. Aksi takdirde fiziksel yaratım sürecinde çok iyi bir uyum ve başarı sağlansa bile arzulanan kalite yansıtılamayacaktır. Uyum kalitesi ise ürünün fiziksel olarak üretildiği süreçlerle ilgilidir. Tasarım tarafından ortaya konan hedef ve toleranslara ne derecede

uyulduğuyla ölçölür. Seçilen üretim yöntemlerinden, işgücünün eğitiminden, süreç kontrollerinden, teftiş faaliyetlerinden ve iş gücünün motivasyonundan etkilenir (Meirovich, 2006: 208-211). Bu bağlamda bakıldığında kalite üretiminin ilk yönü olan tasarım kalitesi, çeşitli araştırmalarla müşteri talepleri doğrultusunda desteklenerek çağın gerekliliklerini yakalarken analitik düşünceden ve yaratıcılıktan beslenir. Uyum kalitesi ise daha disiplinli ve tecrübeye dayanan, nispeten birikimli bir ilerlemenin ve sürekli gelişme olanaklarının olduğu bir yön olarak göze çarpmaktadır.

2.2 KALİTE VE DEĞİŞKENLİK

Kalitenin boyutlarından yola çıkarak yapılan genel tanımlamanın kullanıma uygunlukla beraber en çok dikkat çeken yönü, kalitenin değişkenlikle ters orantılı bir kavram olmasıdır. Genel olarak süreçlerdeki değişkenliği azaltmak kaliteyi geliştirmekle eşdeğer görölmektedir. Montgomery (2009: 7), Amerika'daki otomotiv şirketlerinden birinde yapılan bir çalışmada yerli üretim ve Japon tedarikçiden gelen vitesler arasında yapılan karşılaştırmalı bir araştırmada garanti taleplerinin ve onarım maliyetlerinin analizi sonucu iki üretim kaynağı arasında çarpıcı bir fark olduğu gözlemlenmiş ve bu farkın nedenini iki kaynaktan gelen viteslerin kalite karakteristiklerinin hedef değerlere göre dağılımda olduğunu belirlemiştir. Japon tedarikçilerden gelen vites parçalarının kalite karakteristiklerinin ortalaması, A.B.D.'de üretilenlerle aynı ve hedef değerde olmasına rağmen, bunların dağılımları kabul edilebilir sınırların %25'lik dilimi içerisinde ilen A.B.D.'de üretilenler bu sınırların %75'lik bölümüne yayılmaktadır. Sınır değerlere yakın parçalar tolerans sınırları içinde kalsa da yan yana kullanıldıklarında yığılmalara neden olarak tolerans birikmeleriyle aşınmayı hızlandırmışlardır. Böylece bu değişkenliğin sonucu garanti maliyetlerine doğrudan yansımıştır. Dahası, müşteri odaklı yürütölen bir araştırmaya göre, Japon yapımı viteslerin daha yumuşak bir geçiş sağladığı, daha sessiz çalıştığı ve müşteri perspektifinden daha üstün algılandığı sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu durum daha az onarım ve garanti talebi yani daha az zaman, çaba ve para israfıyla birleştirildiğinde üretim süreçlerinde değişkenliği azaltmanın önemi ortaya çıkmaktadır.

Müşterilerin tecrübe ettikleri ve onlara yansıyan, üretim süreçlerinin ortalamaları değil, bu süreçlerdeki değişkenlik olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında kalite; belli sınırlara ulaşıldığında başarılmış olacak bir hedeften ziyade, içinde sürekli bir gelişim olanağı içeren bir alan olarak dikkat çekmektedir.

Ürün ve süreç kalitesinde değişkenliklerin azaltılması ve gelişim sağlanması için kullanılacak yöntemler, etkili bir yönetim felsefesinin içinde ve bu yönetimin ayrılmaz bir parçası olarak içselleştirilerek uygulanmalıdır. Bu bağlamda yönetimin görevi iyileştirme felsefesini doğru bir şekilde yönlendirmek, daha genel amaçlarla hizalamak ve işin her alanında yayılmasını sağlamaktır. Kalite alanında bu amaçlar doğrultusunda yönetimin üç temel sorumluluğu vardır. Bunlar kalite planlama, kalite güvencesi, kalite kontrol ve iyileştirmedir (Montgomery, 2009: 17).

2.3 SAĞLAM TASARIM – TAGUCHI YÖNTEMİ

Modern üretimin ilk yıllarından bugünlere kadar uzanan süre zarfında, pek çok alandaki yöntemlerde ileri görüşlülük önem kazanmış; üretimin en belirleyici iki kısıtı olan maliyet ve zaman bağlamında kazanç sağlamaları sebebiyle reaktif yaklaşımlardan proaktif yaklaşımlara doğru kayma gözlenmiştir. İşlerini ilk seferde doğru yapanların yanılıp düzeltenlere karşı sağladığı avantaj çok büyük boyutlarda olmaktadır. Yaygın olarak kabul edilen bir görüşe göre düşük kalite sebebiyle kaybedilen müşterilerin şirketlere maliyetlerinin sınırlarını kestirmek ve telafi etmek çok güçtür (Gunter, 1987: 45-47).

En önemli rekabet avantajı ölçütlerinden biri olan kalite güvencesi ilk zamanlarda bitmiş süreç çıktıları üzerinden muayene yoluyla sağlanırken, bu yöntem süreçlerdeki değişkenliğin varlığını, doğasını ve sebeplerini anlama yönünden eksik kalmış; kalitenin geliştirilmesi açısından yetersiz kalarak müşteri kayıplarına sebep olmuştur. 1980'lere gelindiğinde dünya endüstrisinin merkezi konumunda bulunan güçlü Amerikan şirketlerinin pazar paylarını uluslararası rakiplerine, bilhassa Japon üreticilere kaptırmaya başlamalarıyla kalite üzerine araştırmalar yoğunlaşmış ve kalitenin pazar payı üzerindeki kilit etken olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Tsui, 1992: 44). Söz konusu zamanlarda kontrol grafikleri, histogramlar ve Pareto diyagramları gibi basit ve uygulaması kolay süreç içi kontrol araçları Japonya'da olduğu gibi Amerika'da da yaygın bir şekilde kullanılıyor olsa da nispeten daha karışık olan deney tasarımı gibi süreç dışı kontrol araçları Amerika'da Japonya'da olduğu kadar kapsamlı kullanılmamakta olup, üretim çevrelerinde yeni yeni tanınmaktadır (Tsui, 1992: 44-45; Box ve diğerleri, 1988: 123). Faktörsel tasarım ve varyans analizi gibi geleneksel deney tasarımı araçlarının tarımsal çalışmalardan gelen kökeni 20. yüzyılın başlarına dayansa da deney tasarımının endüstriyel süreçlerde yaygınlaşması büyük ölçüde Japon mühendis ve istatistikçi Genichi Taguchi'nin (1924-2012) çalışmalarıyla ve

geliştirdiği sağlam tasarım yönteminin kullanışlılığıyla sağlanmıştır. 1980 yılında Taguchi'nin yöntemini AT&T, Ford ve Xerox gibi Amerikan ve dünya endüstrisi devi şirketlere tanıtmasıyla ürün ve süreçler tasarım aşamasından itibaren geliştirilerek kalite iyileştirme anlayışı süreçlerde geriye doğru itilmiş ve sağlanan çok ciddi maliyet ve zaman avantajlarıyla söz konusu şirketler pazar paylarını geri kazanmışlardır. Bu başarıyı takiben konu üzerine büyük ilgi uyanmış; hakkında yapılan araştırmalar ve vaka çalışmaları pek çok farklı ortamda olağanüstü maliyet ve kalite kazanımlarıyla sonuçlanmıştır (Phadke ve diğerleri, 1983; Tsui, 1992: 44-45). Yöntemin faktörsel yahut rasgele tasarım gibi geleneksel yöntemlere nazaran yakaladığı başarı, basit fakat akılcı bir uygulama nüansı ile gereken deney sayısını önemli ölçüde düşürmesinden kaynaklanmaktadır.

2.3.1 Taguchi'nin Kalite Yaklaşımı

Taguchi'nin kalite anlayışına göre herhangi bir ürünün bir kalite karakteristiğinde görülen hedef değerden herhangi bir sapma, toplumda genel bir kayba neden olur ve bu kayıp sapmanın karesiyle orantılıdır (Benton, 1991: 1766). Belirli tolerans sınırlarının içinde kalmanın yeterli görüldüğü zamanının konvansiyonel kalite yaklaşımlarının aksine, bu anlayış beraberinde her türlü sapmanın ve değişkenliğin kayıp olduğu ve sürekli olarak azaltılmaları gerektiği fikrini getirir. Ayrıca düşük kalitenin tüm toplum nezdinde zarara sebep olması fikri kalite ve maliyetlerine yeni bir boyut kazandırmıştır. Geleneksel anlamda kalite maliyetleri ürünlerin uygunluğunu ölçen süreç kontrolleri ve muayeneler ile bunların sonucunda uyuşmazlığı belirlenen hatalar ve hurdalardan oluşurken Taguchi'nin yaklaşımıyla boşa giden kaynakların sürdürülebilirlik açısından değeri, tolerans yığılmaları, potansiyel müşteri kayıpları, garanti maliyetleri ve diğer çeşitli kayıplar işin içine dahil olup kalitenin kapsamı genişlemiş ve önemi artmıştır. Spesifikasyon sınırları ve toleranslardan bağımsız olarak değişkenlik kayıp anlamına gelmekteyken ve üretim esnasında yapılan süreç içi ayarlamalar değişkenliği gidermekte tek başına yeterli olmadığından kaliteyi daha ilk etapta, ürün tasarım ve geliştirme sürecindeyken tutturmanın önemi ortaya çıkmıştır (Ünal ve Dean, 1991: 1-2).

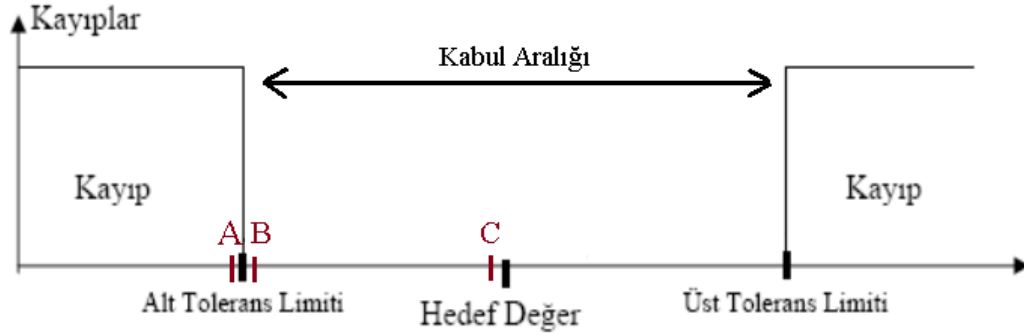
Taguchi'nin kalite felsefesinin temel olarak yedi ilke üzerine dayandığı kabul edilmektedir (Saat, 2000: 97-98). İlk olarak kalitenin önemli bir boyutu, üretimi süresince toplumda yaratabileceği toplam kayıp üzerinden ifade edilmelidir. İkinci ilke bir işletmenin rekabetçi bir ortamda varlığını sürdürebilmesi için sürekli olarak kaliteyi

geliştirmek ve maliyetleri düşürmek için çabalaması gerektiğini belirtir. Üçüncüsü, sürekli kalite geliştirme çabaları mutlaka hedef kalite karakteristiklerinden sapmaların yani değişkenliğin (varyasyonların) azaltılmasını içermelidir. Dördüncü olarak ortaya koyulan ilke; ürün performansı ya da fonksiyonunda ortaya çıkan ve müşterilerin katlanmak durumunda kaldığı kayıpların, genellikle ve yaklaşık olarak performans karakteristiğinin hedef değerden sapmasının karesiyle doğru orantılı olduğunu ifade eder. Beşinci ilkeye göre üretilen bir ürünün nihai kalitesi ve maliyeti, büyük ölçüde ürünün mühendislik tasarımları ve üretim süreçleri tarafından belirlenir. Altıncı olarak bir ürünün bir kalite karakteristiğindeki ya da süreçlerdeki değişkenlik, ürün veya süreç parametrelerinin performans özellikleri üzerindeki doğrusal olmayan etkilerinden yararlanılarak azaltılabilirler. Ve son olarak istatistiksel olarak planlanmış deneyler, performans değişkenliğini azaltan ürün ve süreç parametrelerinin ayarlarını tanımlamak için kullanılabilirler. Taguchi bu temellere dayanarak literatüre ve üretim çevrelerine tutarlı bir metodoloji ve önemli katkılar sunmuştur.

Taguchi'nin kalite kayıp fonksiyonu mevcut literatürde en önemli katkılarından birisi olarak görülmektedir. Süreçlerdeki gürültülerden kaynaklanan değişkenliklerin neden olduğu kalite karakteristiklerindeki hedef değerlerden sapmalara paha biçmesi ve bu değişkenlikleri para birimi cinsinden ortaya koyması açısından önemlidir. Taguchi'ye göre mevcut örnekler göstermektedir ki, bu maliyet ürün teslimatından itibaren söz konusu sapmalarla geometrik bir oranla, parabolik bir şekilde artmaktadır (Kackar, 1985: 179).

Taguchi'nin kayıp fonksiyonuyla getirdiği anlayış zamanının kalite yaklaşımından devrimsel bir ayrım göstermektedir. Belirli sınırların içinde kalmanın yeterli ve sınırların içindeki her noktanın eşit değerde görüldüğü geleneksel kalite yaklaşımı uygulamada kalite problemlerinin hedef değerden saptıkça ilerlemeli olarak artması kadar anlamlı bir karşılık bulmamaktadır. Nitekim kalite çoğunlukla belli bir sınırı çok az miktarda geçince aniden düşüş gösteren bir yapıda değildir. Bu bağlamda karşılıklı bir etkileşim halinde Taguchi, sürekli gelişim yaklaşımlarına da hız kazandırmıştır (Box ve diğerleri, 1988: 123-124).

Şekil 9: Geleneksel kalite yaklaşımında kayıp ve kabuller



Kaynak: Gencel, 2007: 76

Şekil 9 geleneksel kalite yaklaşımını bir örnek üzerinden incelemektedir. Buna göre A ve B çıktıları arasında pratikte neredeyse hiçbir fark olmamasına rağmen biri kabul edilirken diğeri edilmemekte; B ve C çıktıları ise kalite açısından aynı muameleyi görmektedir. Halbuki nihai kullanıcının tecrübesi çok yüksek ihtimalle bu yönde olmayacaktır.

Taguchi'ye göre ürünün müşteriye aktarılmasından sonra kaçınılmaz olarak bazı kayıplar oluşacaktır, bundan dolayı daha düşük kayıplar daha arzu edilir ürün anlamına gelmektedir. Alternatif ürün tasarımı ve üretim süreçlerini karşılaştırabilmek amacıyla yahut iyileştirme süreçlerinin maliyetlerini ve sonuçlarını karşılaştırabilmek için bu kayıpların miktarının belirlenmesi önemli olmaktadır. Bu amaçla üç genel amaca göre ikinci dereceden üç ayrı kayıp fonksiyonu ortaya konmuştur:

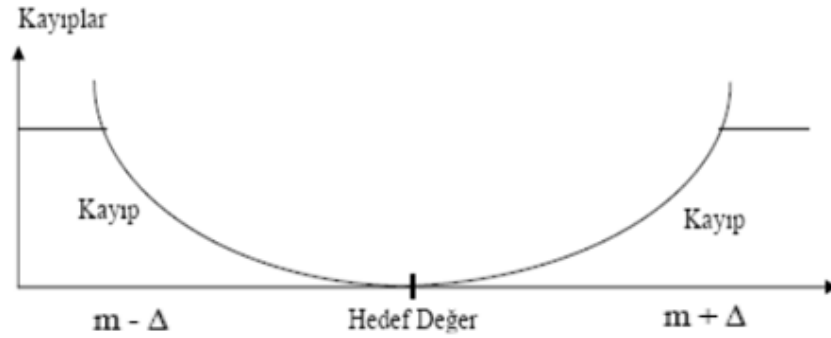
a) Hedef değeri en iyi ise: $L(y) = \frac{A}{\Delta^2} \cdot (y - m)^2$

b) Daha küçük daha iyi ise: $L(y) = \frac{A}{\Delta^2} \cdot y^2$

c) Daha büyük daha iyi ise: $L(y) = A \cdot \Delta^2 \cdot \left(\frac{1}{y^2}\right)$

Formüllerde y gözlenen kalite çıktı değerini, m hedef değeri, Δ tolerans aralığı ve A ekonomik analizler sonucu ürüne ve alana göre belirlenen bir katsayıdır. Bazı durumlarda belli bir ürünlerdeki sapmanın yol açtığı kayıp bir şekilde belirlenmiş yahut öğrenilmiş ise, diğer örneklerde kullanılmak üzere bu katsayı formülde geriye giderek hesaplanabilir. Formüllerden görüldüğü üzere Δ kabul edilebilir sapma miktarı olarak düşünüldüğünde A değeri de kabul edilebilir kayıp miktarı olarak ifade edilebilir. Ayrıca kayıp sapma miktarıyla parabolik bir ilişki içerisinde. Şekil 10 bu yaklaşımı grafik olarak ifade etmektedir.

Şekil 10: Taguchi kalite kayıp yaklaşımı



Kaynak: Kackar, 1985: 179

Değişkenlikten kaynaklanan kalite kayıplarını ve giderildiklerindeki olası maliyet tasarruflarının dengesini belirleyebilmek iki açıdan önemlidir. İlki işletmeye hangi iyileştirme çalışmalarının yapılacağı ve hangilerine öncelik verileceği konusunda rehber olmasıdır. Diğer konu zamanına göre yenilikçi bir yaklaşımla müşterilerin paydaş olarak görülüp işbirliği geliştirme noktasında tecrübelerinin dikkate alınmasıdır. Öyle ki geleneksel anlayışın aksine tolerans sınırlarıyla yetinmeyip hedef değere olabildiğince yakın olma çabasıyla kayıp fonksiyonu, iki taraf açısından ortak maliyeti değerlendirmektedir. Buna göre sapmaları önlemenin maliyeti, tüketicinin sapmalar kaynaklı kaybından fazla olacaksa bu önleme işleminin ekonomik olmadığına; tersi durumda ise bu işlem toplam toplumsal maliyeti düşüreceği için bu sapmaların önlenmesi gerektiğine karar getirilir. Böylelikle kayıp fonksiyonu tolerans belirleme ve kalite geliştirme süreçlerinde üretici ve tüketici açısından tarafsız ve ortak bir ölçüt sağlamaktadır (Cho ve Cho, 2008: 885).

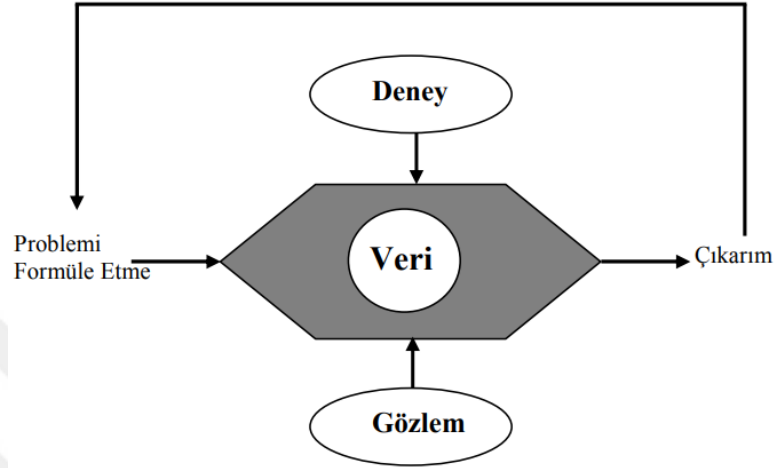
2.3.2 Deney Tasarımı

Yeni fikirleri anlatmanın en iyi yolu, onların önceki fikirlerle benzerliklerini ve zıtlıklarını anlatmaktan geçer (Churchland, 2017). Bu bağlamda ilk olarak deney kavramından, Taguchi yöntemiyle gelene kadar üretim çevrelerinde kullanılan geleneksel deney tasarımı yaklaşımlarından ve yöntemle ortak noktalarından bahsetmekte fayda vardır.

Deneysel çalışmalar ve gözlemler insanoğlunun doğayı anlama arayışında, bilimsel araştırmanın mantıkla beraber en önemli bileşenleri olup bugün bilinen

anlamdaki medeniyetin temelidir. Şekil 11’de bilimsel ilerlemenin yöntemi basitçe gösterilmektedir.

Şekil 11: Bilimsel çalışmalarda mantık ve istatistik



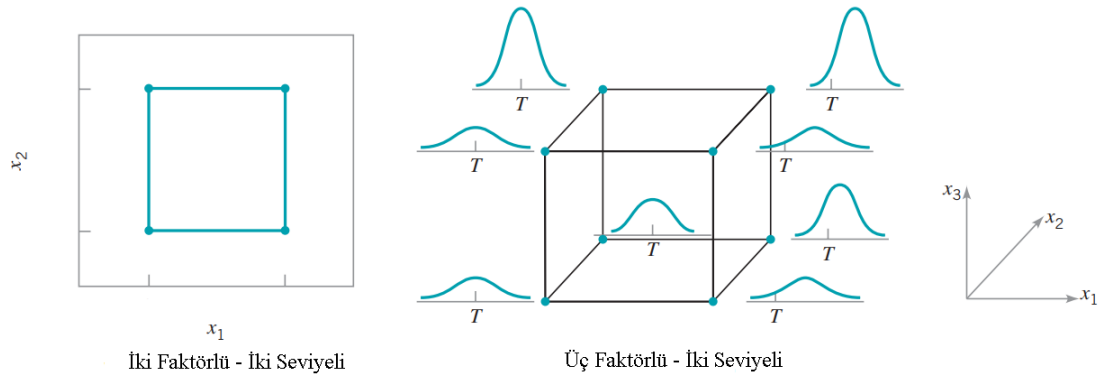
Kaynak: Gökçe ve Taşgetiren, 2009: 73

Deneyin gözlemden ayrılan en önemli noktası, araştırılan objenin yahut fenomenin en azından bazı özellik ya da koşullarının araştırmacının kontrolünde olmasıdır. Söz konusu özne müdahalenin bir getirisi olarak başarılı bir deney yürütebilmek için tasarımının doğru ve tarafsız yapılması, parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi ve sonucunda nasıl bir hassaslıkla ne bekleneceği konusunda fikir sahibi olunması gerekmektedir. Çünkü deneylerin asıl işlevi fikir üretmekten ziyade mantıksal olarak üretilen fikir ve hipotezleri test etmektir. Tüm bu koşullar sağlandığında dahi anlamlı bir sonuca varabilmek için deneylerin çok sayıda tekrar edilmesi gerekebilir. Bu bağlamda bilimsel ilerleme için vazgeçilmez olsalar da daha pratik alanlarda zaman ve maliyet açısından aynı derecede tercih sebebi olmayabilmektedirler.

Deney tasarımı süreçteki kontrol edilebilir girdi faktörlerini sistematik olarak değiştirerek bu faktörlerin ürün çıktı karakteristikleri üzerindeki etkisini araştıran bir yaklaşımdır. Süreçlerle ilgili kalite özelliklerini etkileyen kilit değişkenlerin keşfedilmesinde, gerekli kalite özelliklerini belirlemede ve değişkenliği azaltmada son derece yararlıdır. Süreç performansını optimize eden kontrol edilebilir değişkenlerin seviyelerini belirlemede kullanılmaktadır. Ürün kalitesindeki ve süreç performansındaki gelişmeler genellikle tasarlanmış deneylerden kaynaklanmaktadır.

Deney tasarımının en yaygın kullanılan ana türlerinden biri, girdi faktörlerinin birlikte değiştirilerek tüm olası kombinasyon düzeylerinin test edilebildiği faktörel tasarımıdır. Şekil 12, soldaki iki sağdaki üç değişkenli olmak üzere ikişer seviyeli iki faktörel tasarım örneğidir. X değerleri sürecin kontrol edilebilir girdilerini, T değerleri ise çıktının hedeflenen kalite karakteristiğini ifade etmektedir. Soldaki iki seviyeli iki değişkenli örnekte olası dört test kombinasyonu karenin köşeleri olarak açıkça görülmektedir. Benzer olarak üç değişkenli olan durumda küpün köşeleri olası sekiz kombinasyonu ve performanslarını temsil etmektedir. Bu basit tasarım üzerinden bile bazı seçimlerin daha avantajlı sonuçlar ürettiğini gözlemlemek mümkündür. Örneğin sağdaki şekle dikkat edilirse; birinci değişkeni sağa doğru ikinci seviyesine getirmek sonuçların ortalamasını hedeflenen çıktı değerinden uzaklaştırmaktadır. İki ve üçüncü değişkenleri ikinci seviyelerine yükseltmek ise değişkenliği azaltıp süreci daha kararlı hale getirmektedir (Montgomery, 2009: 13-14).

Şekil 12: Faktörel Tasarım



Kaynak: Montgomery, 2009: 14

Deneyisel tasarım yönteminin üretim alanına girişinin büyük ölçüde ünlü istatistikçi Ronald Fisher'ın (1890-1962) çalışmalarına dayandığı söylenebilir. İstatistiksel düşünce alanındaki çalışmaları biyoloji, psikoloji, sosyoloji ve tarım gibi alanlarda olduğu gibi üretim alanında da uygulanabilirlik açısından kabul görmüştür. Çalışmalarının üretim çevrelerindeki en önemli yansıması karşılaştırma, ortogonallik ve varyans fikirleri üzerinden temellendirdiği faktörel deneyler olmuştur. Karşılaştırma fikrine göre birçok reel alanda izlenebilir bir metroloji standardına göre bağımsız ölçümler yapmak mümkün değildir. Bilimsel bir formüle göre sonuç beklenen geleneksel ölçümlerden ziyade, farklı koşulların etkisini anlamak için aynı

deneyin bu farklı koşullar altındaki sonuçlarını birbiriyle karşılaştırmak gerekir. Ortogonalite çok boyutlu uzaylardaki birim vektörlerin birbirine dikliği, birbiri üzerlerindeki izdüşümlerinin, etkilerinin ve skaler çarpımlarının sıfır olması üzerinden değerlendirilebilir; faktörler arası korelasyonsuzluk ve bağımsızlığı ifade eder ki aynı anda çok faktörün etkilerini bağımsız olarak değerlendirebilmek için gereklidir. Sonuç olarak gelenen faktörsel deney fikriyle; her seferinde bir faktör değiştirilen klasik kontrollü deney yaklaşımının aksine çeşitli faktörlerin etkilerini ve olası etkileşimlerini çoklu olarak değerlendirmek mümkün olmuştur. Bu deneyin analizi ve değerlendirmesi de zamanın ruhu içinde gelişmekte olan değişkenlik fikriyle, değişkenliği faktörlerin etkilerine göre parçalara bölerek ölçek varyans analizi yöntemiyle mümkün olmaktadır (Montgomery, 2009: 140-143; Khuri ve Mukhopadhyay, 2010: 129).

Deneyel tasarımlar süreç dışı (*off-line*) kontrol araçlarıdır ve sıklıkla üretimin erken safhalarında, faaliyetlerin planlanma aşamalarında kullanılmaktadır. Süreç çıktısını etkileyen önemli değişkenler bu şekilde belirlendikten sonra genellikle etkili girdi değişkenleri ile çıktı kalitesi arasındaki ilişkinin boyutunun da modellenmesi gerekmektedir. Bu bağlantıları kurmakta yaygın olarak kullanılan istatistiksel tekniklerden biri regresyon analizleridir. Bu yöntemle oluşturulan modeller, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkilerin doğasını ve yapılması gereken ayarlamaların büyüklüğünü belirlemede kullanılmaktadır (Montgomery, 2009: 150-154).

Deney tasarımlarında girdi faktörleri genel olarak kontrol faktörleri ve gürültü faktörleri olmak üzere iki ana grup altında toplanır. Kontrol faktörleri tasarımcının kontrolü altında olan tasarım parametreleridir. Gürültü faktörleri ise müdahale edilmesi imkansız yahut aşırı maliyetli olan, kontrolün dışındaki faktörlerdir. Sıcaklık, nemlilik, toz oranı, titreşimler ve insani değişkenlik gibi dış kaynaklı olabilecekleri gibi; deney objesi malzemeden kaynaklanan kusurlar ve aşınmalar gibi iç kaynaklı olabilmektedirler (Kacker, 1985: 180).

Deney tasarımları üretim alanında genel olarak üç temel amaç için kullanılmaktadır (Khuri ve Mukhopadhyay, 2010: 136): Çıktıyı en aza indirmek (ne kadar küçük o kadar iyi), çıktıyı en üst düzeye çıkarmak (ne kadar büyük o kadar iyi) ve çıktıyı belli bir hedef değere götürmek (hedef en iyi). Taguchi yöntemine kadar, bu amaçlarla üretimde en sık kullanılan deney tasarımı yöntemleri faktörsel tasarım ve rasgele tasarımıdır. Faktörsel tasarımda bütün kontrol faktörlerinin tüm olası seviyelerinde birbirleriyle olan bütün kombinasyonları denir. Örneğin dörder seviyeye sahip dört parametreden oluşan bir deneyde 256 adet deney yapılması

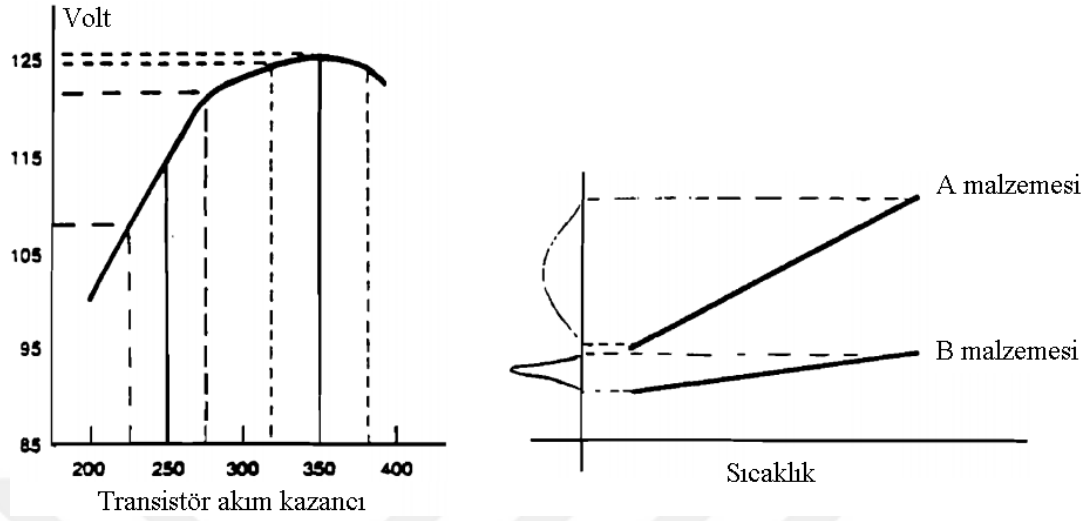
gerekir ve bu sürecin en azından birkaç kez tekrarlanması gerektiği düşünülündüğünde, bu yöntem artan parametre sayıları ile aşırı masraflı ve kullanılamaz hale gelmektedir. Dolayısıyla az sayıda parametre ve seviye içeren sistemler için uygundur. Rasgele tasarım ise parametreler arası etkileşimin az olduğu çok parametrelili sistemler için kullanılabilir ve büyük sistemlerde iyi sonuçlar vermektedir. Ancak küçük ve orta ölçeklerde, özellikle faktörler arası etkileşim varsa yetersiz ve kullanışsız kalmaktadır.

2.3.3 Taguchi'nin Yöntemi ve Katkıları

Taguchi'ye göre ürünlerin ve süreçlerin sağlamlığı süreç içi kalite kontrollerinden çok iyi bir tasarımın işlevidir. Ürün ve süreçleri dış etkenlere karşı sağlamlaştırma fikri Taguchi'nin katkılarından onlarca yıl öncesinden beri üzerine çalışılan bir konu olsa da özellikle Batı'da o zamana kadarki mevcut klasik yöntemler, daha dayanıklı malzemelerden oluşan ve daha dar tolerans aralıklarına sahip bileşenler kullanmak üzerine olup, genellikle üretmesi zor ve pahalı parçalar üzerinden aşırı tasarımla sonuçlanmaktadır (Box ve diğerleri, 1988: 123).

Taguchi'ye kadar üretimde kullanılan geleneksel deney tasarımı yöntemlerinde amaç genellikle arzulan çıktı düzeyini en iyi veren girdi parametrelerinin belirlenmesidir. Ancak bazı parametre kombinasyonları ortalamada en iyi çıktı değerini verseler de kimi zaman göz ardı edilebilen ve kontrol edilemeyen gürültü faktörlerinden ötürü tekrar eden süreçlerde haddinden fazla sapma gösterebilmektedirler. Buna göre girdi parametreleri belirlenirken hedeflenen çıktı değerine ek olarak, ürün ve süreci gürültü faktörlerinden en az etkilenecek şekilde duyarsızlaştırarak kayıp olarak görülen değişkenliklerden arındırmak gerekir. Bu da kontrol faktörlerinin gürültü faktörleriyle doğrusal olmayan ilişkilerinden yararlanarak etkilerinin sönümlenmesi yoluyla mümkün olmaktadır (Tsui, 1992: 46). Şekil 13'te bu durum iki örnek üzerinden açıklanmaktadır. İlk grafik kontrol faktöründeki (transistör akım kazancı) malzeme özelliğinden kaynaklanan bir iç gürültü faktörü sayılabilecek değişkenliğin, kontrol faktörünün değeri arttıkça çıktı değeri (voltaj) üzerindeki azalan etkisini göstermektedir. İkinci grafikte kullanılan malzeme kontrol faktörü olup gürültü faktörü olan sıcaklıkla etkileşimlerinin çıktı üzerinde etkisi gösterilmiştir.

Şekil 13: Kontrol faktörü seçimine göre gürültünün etkisi ve çıktı hassaslığı



Kaynak: Tsui, 1992: 46

Taguchi ürün ve süreçleri gürültü ve değişkenliğe karşı dayanıklı hale getirme yolunda üç temel aşama üzerinden bir yaklaşım önermektedir. Bunlar sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır (Ünal ve Dean, 1991: 2-8).

2.3.3.1 Sistem Tasarımı

Bu aşamada müşteri ihtiyaç ve beklentileri belirlenip, buna göre eldeki malzeme ve yöntemlerle beraber mevcut teknolojik yeniliklerin uygulanabilirlikleri değerlendirilerek bir ilk ürün (prototip) tasarımı geliştirilmektedir. Bu tasarım performans karakteristiklerini etkileyen hammadde, malzeme, yarı mamul ve alt montaj bileşenleri gibi ürün tasarım değerlerinin yanı sıra ekipman, makine ve geçici süreç faktörleri gibi süreç parametre değerlerinin de belirlenmesini içermektedir (Taguchi ve diğerleri, 1989: 20).

Sistem tasarımı kalite geliştirme çalışmalarının yatırıma dönük aşamasıdır. Ciddi anlamda bir mühendislik bilgisiyle bilimsel bir araştırma yapılacak şekilde emek ve zaman gerektirmektedir. Pazarın ve taleplerin tanımlanmasıyla başlamakta, bu bulgular ışığında gerekli bilimsel ve mühendislik araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmaların sonucuna göre ürün ve süreci aynı anda gözetecek şekilde malzeme ve parça seçimi yapılmakta; ürün parametre değerleri, üretim ekipmanları ve süreç faktör değerleri belirlenerek temel prototip tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Sistem tasarım aşaması, üretilecek ürün ve içinden geleceği süreci kavramsallaştırması ve en iyi sonucu verecek şekilde sentezlemesi açısından çalışmaya referans teşkil eden bir nirengi noktasıdır. Bu açıdan tüm çalışmanın esas amacı olan hedef performans karakteristiklerinden sapmaların en az seviyelere indirilmesi düşüncesi henüz bu aşamadan itibaren proaktif bir yaklaşımla gözetilmelidir. Zira bu aşamada oluşabilecek bir eksikliğin telafisi yahut yapılan bir hatadan geri dönüş, zaman ve sermaye bakımından maliyetli olacaktır. Bu bağlamda malzeme, ara parçalar, süreçler ve diğer tasarım faktörlerinin olası en iyi kombinasyonlarını belirleme yolunda tüm yeni fikirler ve yaratıcı çözümler değerlendirilmeli; yenilikçi bir yaklaşımla olası geliştirme olanakları maliyet-getiri dengesi üzerinden dikkate alınmalıdır (Wysk ve diğerleri, 2000: 3).

Örneğin malzeme alımında, ürün ağacındaki parçaların spesifikasyonlarının iyileştirilmesinde, tezgah ve takımların seçilmesinde bir takım kararlar verilirken, daha hassas bir süreç veya çıktı gerektiğinde alınacak satın alma yahut geliştirmeye dair yatırım kararları bu aşamada değerlendirilmektedir. Başlangıç aşaması olmasına rağmen çalışmaya sağlam bir temel teşkil etmesi açısından eldeki tüm imkanlar ve işletmenin tüm yetenekleri çoklu bir karar verme sürecinde değerlendirilmelidir.

2.3.3.2 Parametre Tasarımı

Bu aşama yönteme ismini veren sağlamlaştırmanın yapıldığı esas kısımdır ve yöntemin imza adımıdır. Amaç, arzulanan çıktı değerlerini gürültü faktörlerinden en az etkilenecek şekilde veren kontrol parametrelerini bulmak ve tüm süreçlerdeki değişkenliği en aza indirmektir. Kontrol faktörleri; malzeme özellikleri (öz ısı, iletkenlik, sertlik, esneklik vb.), boyutlar, ağırlıklar, yüzey özellikleri gibi ürünle alakalı yahut akış hızı, sıcaklık, basınç, işlem süresi gibi süreçle alakalı olabilir. Ayarlanabilen özelliklerden yararlanılıp, ayarlanamayanların etkilerini en aza indiren kombinasyonları aranır (Saat, 2000: 102).

Parametre tasarımının ilk adımı çıktı olarak ölçülecek kalite değişkenini ya da değişkenlerini tanımlamaktır. Kalite değişkenlerinin ölçülebilirlik açısından nicel olması beklenir. Eğer söz konusu karakteristik ürün boyası, yüzey parlaklığı yahut paslanma oranı gibi nispeten nitel bir özellikse çıktıların çeşitli nicel seviyelere atanmaları beklenir. Birkaç uzmandan oluşan bir jürinin çıktıları puanlamaları bu sayısallaştırmaya bir örnek olabilir (Işık, 2000: 9). Deney çıktısı kalite karakteristiği ve hedef değeri belirlendikten sonra deney bir doğrultu kazanmış ve problem

tanımlanmış demektir. Hemen akabinde bu çıktıyı etkileyebilecek kaynaklar araştırılır. Faktör olarak nitelendirilen bu kaynaklar sonuç değişkenleri üzerinde belli bir etkisi olan herhangi bir etken olabilir. Bazı gürültü faktörleri yüksek maliyetlere katlanıldığında kontrol faktörlerine dönüştürülebilirler. Böyle durumlarda kalite üzerindeki etkileri ve maliyet dengesi gözetilerek karar verilmesi gerekebilir. Burada temel husus seçilen faktörlerinin değerlerinin birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilir olması, yani tasarımın bağımsızlık aksiyomuna uymaları gerekliliğidir. Buna göre faktörlerinin ayrımının yapılması ve etkileşimlerinin belirlenmesi önemlidir. Bir faktörün kalite değişkenine olan etkisi, diğer faktörün hangi değerde olduğuna bağlı ise aralarında etkileşim var demektir. Örneğin iki faktörün ayrı ayrı birer seviye değişimleri kalite çıktısını birer birim etkilerken aynı anda birer seviye değiştiklerinde çıktı iki yerine dört birim etkileniyorsa iki faktör arasında etkileşim vardır denir. Bu etkileşimleri de türüne göre ayrı bir faktör olarak değerlendirmek gerekebilir. Faktör ve etkileşimlerin belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemler beyin fırtınası, balık kılçığı diyagramı ve iş akış şemasıdır. Genellikle geçmiş tecrübeler uzman fikirleriyle ve çeşitli denemelerle birleştirilerek faktör etkinliklerinin tespitinde üçünden de yararlanılır (Işık, 2000: 11-13). Örneğin bir balık kılçığı diyagramında hedeflenen çıktıya etki edebilecek olası tüm unsurlar gösterilebilir. Kılçığın ana kollarını malzeme, yöntem, işgücü, ekipman ve dış etkenler oluştururken bunların alt kollarındaki etkenleri ve etkileşimlerini belirlemek için beyin fırtınası kullanılabilir.

Faktör ve etkileşimler belirlendikten sonra sıra deneyin yapılabilmesi için seviyelerinin belirlenmesine gelir. Seviye tespitinde bir faktörün deneyde kaç farklı değer alacağı, yani çıktı karakteristiği üzerinde kaç farklı etki yapacağı belirlenir. Bu noktada serbestlik derecesi kavramı devreye girer. Bir faktörün serbestlik derecesi seviye sayısından bir çıkarılarak bulunur. Bir faktörün kontrol faktörü olabilmesi için serbestlik derecesi sıfırdan büyük olmalı, yani en az iki seviyesi olmalıdır. Alternatif sunmayan bir faktör kontrol edilemiyor demektir ve gürültü faktörü olarak tanımlanır. Bununla birlikte faktör seviyelerinin mümkün olan en düşük seviyelerde tutulmasına özen gösterilmesi ve zorunlu bir durum olmadıkça iki veya üç seviyeli olarak belirlenmeleri önerilmektedir. Aksi takdirde gerekli deney sayısına bağlı olarak maliyet ve zaman önemli ölçüde artabilmektedir. Kendiliğinden daha fazla seviyeye sahip faktörler mevcutsa bir takım duruma özgü işlemlerle gerekli sınırlar ve orantısal müdahalelerle iki veya üç seviyeli faktörler haline getirilebilirler (Ross, 1989: 135-140). Faktör seviye sayısına ek olarak her faktör için belirlenecek alt ve üst seviye arasındaki fark da önem arz eder. Aralık gereğinden küçük olursa istenen etki

gözlenemeyebilir. Buna karşılık büyük olduğunda deneye hakim konuma gelip diğer faktörlerin etkilerinin gözlenmesini güçleştirebilir. Bununla beraber deneye dahil edilmeyen faktörler varsa deney süresince sabit kalmalarına dikkat edilmelidir (Işık, 2000: 13).

Seviyeler belirlendikten sonra sıra uygun ortogonal dizilerin seçilmesine gelir. Bu aşama her faktörün seviyelerinin birbirleriyle nasıl sıralanıp eşit miktarlarda denenerek deneyin nasıl yürütüleceğinin belirlenmesiyle alakalıdır. Söz konusu ortogonal diziler kısaca hangi denemede faktörlerin hangi seviyelerinin birbirleriyle deneneceğinin planını veren tablolardır. Taguchi'nin tasarımının pratikte bu denli kabul görmesinin ve faktörsel tasarıma galip gelmesinin sebebi, çok daha az deneyle aynı etkiyi yakalayabilmesinde; bunun sırrı da bu aşamadaki buluş sayılabilecek bir uygulama nüansında yatmaktadır. Örneğin ikişer seviyeli yedi faktörden oluşan bir faktörsel deney tasarımı yapılmak istendiğinde 128 (2^7) deney yapmak gerekirken Taguchi yöntemiyle ortogonal diziler kullanıldığında 8 deney yeterli olmaktadır. Bu tür bir tasarımda yapılması gereken denemelerin faktörsel deney tasarımı ve Taguchi tasarımında ne şekilde olacağı Şekil 14'te gösterilmektedir. Kendisi de bir istatistikçi olan Taguchi, yaptığı uzun çalışmalar sonucu geliştirdiği standart deneme planlarının sonuçlarıyla, tüm faktörlerin bütün seviyelerinin olası tüm kombinasyonlarını içeren faktörsel tasarımın vereceği sonuçların arasında bir fark olmayacağını iddia edip bunu pratikte göstermiştir (Aydın, 1994: 14). Bunu da mümkün olan en farklı kombinasyonlara hızlıca geçerek, her deneyde faktörlerin yarısını ya da daha fazlasını en fazla çeşitliliği verecek şekilde değiştirerek yapmıştır. Deneye göre ortogonal dizi seçim tablosu Şekil 15'te gösterilmektedir.

Şekil 14: İkişer seviyeli yedi faktör için deney tasarımları karşılaştırması

Deneme No	Faktör No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	2
3	1	1	1	1	1	2	1
4	1	1	1	1	1	2	2
5	1	1	1	1	2	1	1
6	1	1	1	1	2	1	2
...	...	...	...	...	...	...	...
128	2	2	2	2	2	2	2

2^k dizayı

Deneme No	Faktör No						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Taguchi Dizaynı

Kaynak: Aydın, 1994: 15

Şekil 15: Taguchi ortogonal dizi seçim tablosu

Seviye Sayısı												
Parametre Sayısı	2		3		4		5					
	P = 2,S = 2	L4	P = 2,S = 3	L9	P = 2,S = 4	L'16	P = 2,S = 5	L25				
	P = 3,S = 2		P = 3,S = 3		P = 3,S = 4		P = 3,S = 5					
	P = 4,S = 2	L8	P = 4,S = 3	P = 4,S = 4	P = 4,S = 5							
	P = 5,S = 2		P = 5,S = 3	P = 5,S = 4	P = 5,S = 5							
	P = 6,S = 2		L18	P = 6,S = 3	P = 6,S = 4	P = 6,S = 5						
	P = 7,S = 2	P = 7,S = 3		P = 7,S = 4	P = 7,S = 5							
	P = 8,S = 2	L11	P = 8,S = 3	L'32	P = 8,S = 4	P = 8,S = 5						
	P = 9,S = 2		P = 9,S = 3		P = 9,S = 4	P = 9,S = 5						
	P = 10,S = 2	P = 10,S = 3	P = 10,S = 4		P = 10,S = 5							
	P = 11,S = 2	L27	P = 11,S = 3		P = 11,S = 5							
	P = 12,S = 2		P = 12,S = 3		P = 12,S = 5							
	P = 13,S = 2		P = 13,S = 3									
	P = 14,S = 2	L16	P = 14,S = 3		L36							
	P = 15,S = 2		P = 15,S = 3									
	P = 16,S = 2		P = 16,S = 3									
	P = 17,S = 2	P = 17,S = 3										
	P = 18,S = 2	P = 18,S = 3										
	P = 19,S = 2	P = 19,S = 3										
	P = 20,S = 2	P = 20,S = 3										
	P = 21,S = 2	P = 21,S = 3										
	P = 22,S = 2	P = 22,S = 3										
	P = 23,S = 2	P = 23,S = 3										
	P = 24,S = 2	L32										
	P = 25,S = 2											
	P = 26,S = 2											
	P = 27,S = 2											
	P = 28,S = 2											
	P = 29,S = 2											
	P = 30,S = 2											
	P = 31,S = 2											

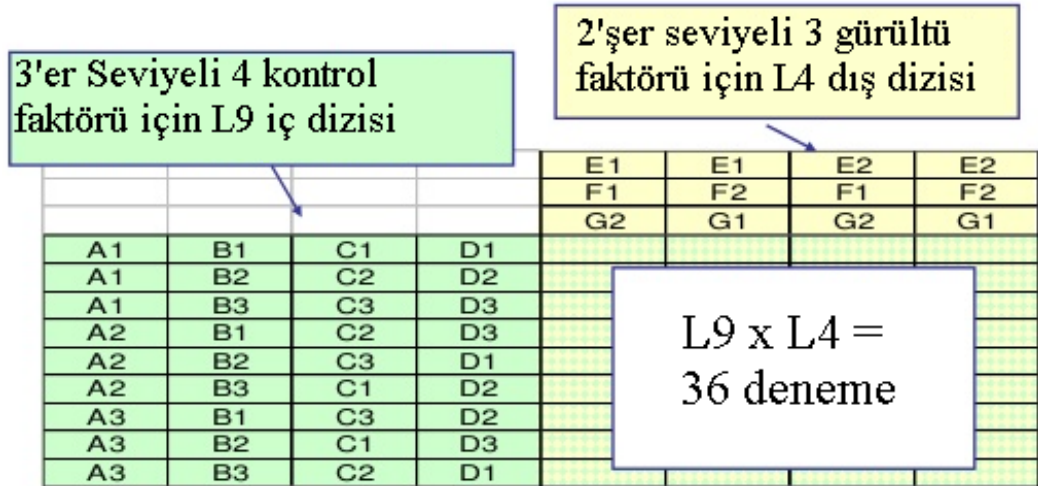
* P faktör, S seviye, L deney sayısını ifade etmektedir.

Kaynak: Gökçe ve Taşgetiren, 2009: 78

Dizilerin seçimi kademe sayısı ve serbestlik derecesinden yararlanılarak yapılır. Bir dizinin toplam serbestlik derecesi her bir faktörün ayrı ayrı serbestlik derecesinin toplamına eşittir. Sütunlara atanan değişkenler tek başına faktör olabilecekleri gibi iki faktörün etkileşimi de olabilecekleri unutulmamalıdır. Faktör grubunun serbestlik derecesi ise tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir ve toplam farklı veri sayısından 1 çıkarmakla bulunur. Dolayısıyla toplam serbestlik derecesi en fazla seçilecek olan dizinin deneme sayısından bir eksik olabilir. Yani toplam serbestlik derecesine 1 eklendiğinde hangi deneyin deneme sayısına eşit oluyor yahut altında kalıyorsa o dizi seçilir (Aydın, 1994: 16). Şekillerde de görüldüğü üzere ortogonal dizilerde her faktörde eşit miktarda seviye

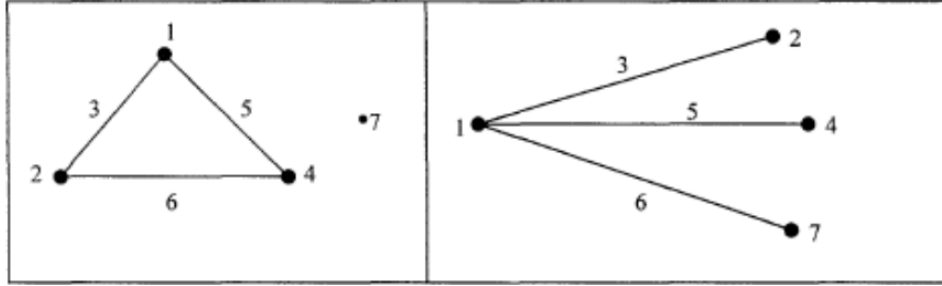
bulunmaktadır ve faktörlerin her seviyesi deney toplamında eşit miktarda kullanılmaktadır. Bu durum etkilerinin homojen ve tarafsız olarak gözlemlenebilmesi açısından kritiktir. Eğer bazı faktörlerin seviye sayıları eşit değilse çeşitli düzeltmelerle faktörlerdeki kademe homojenliği sağlanmalıdır. Yapay kademe yöntemi, birleştirme yöntemi, boş sütun yöntemi gibi çeşitli yöntemler mevcuttur. Faktörler arasında bilinen gürültü faktörleri bulunuyorsa, kontrol faktörleriyle ayrı olarak değerlendirip ayrı ayrı diziler seçmek gerekir. Kontrol faktörleri için seçilen diziye iç dizi, gürültü faktörleri için seçilen diziye dış dizi denmektedir (Işık, 2000: 15). İki dizinin arzulan tüm denemelerini kombine edebilmek için Şekil 16'da görüldüğü gibi grafik üzerinde konumlandırılabilirler.

Şekil 16: Gürültü faktörlerinin dış diziler olarak atanması



Uygun iç ve dış diziler belirlenip matris kurulduktan sonra sıra gerekli faktör ve etkileşimlerinin matris sütunlarına yerleştirilmesine gelir. Etkileşim içermeyen bir deneyde faktörler gelişigüzel dizilebilirken etkileşimler için içine girdiğinde dizilim sıralarına dikkat edilmelidir. Çünkü etkileşimin seviyesi faktörlerden bağımsız olarak değiştirilemez. Taguchi yaptığı çalışmalar sonucunda faktörler ve etkileşimlerini dizilere atamada iki yol belirlemiştir. Bunlar doğrusal grafikler ve üçgen etkileşim tablolarıdır. Şekil 17 bir L8 doğrusal grafik örneğidir. Noktalar faktörleri, çizgiler faktörler arası etkileşimleri ve küçükten büyüğe sayılar diziliş sıralarını göstermektedir. Şekil 18 ise L27 için bir üçgensel tablo örneğidir. Bu tablolar içerisinde yer alan sayılar, etkileşimlerin hangi sütunda yer alacağını gösterir ve faktörlerin numarası bu etkileşimlerle beraber dizilebilecek şekilde seçilir.

Şekil 17: L8 doğrusal grafiği örneği



Kaynak: Gencel, 2007: 85

Şekil 18: L27 üçgensel tablo örneği

Kolon No	Kolon No												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	(1)	3*	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11
2		4*	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12
3		(2)	1*	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7
4			4*	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10
5			(3)	1*	9	10	8	7	5	6	6	7	5
6				2*	13	11	12	12	13	11	10	8	9
7				(4)	10*	8	9	6	7	5	7	5	6
8					12*	13	11	13	11	12	9	10	8
9					(5)	1*	1	2	3	4	2	4	3
10						7*	6	11	13	12	8	10	9
11						(6)	1*	4	2	3	3	2	4
12							5*	13	12	11	10	9	8
13							(7)	3*	4	2	4	3	2
								12*	11	13	9	8	10
								(8)	1*	1	2	3	4
									10*	9	5	7	6
									(9)	1*	4	2	3
										8*	7	6	5
										(10)	3*	4	2
											6*	5	7
											(11)	1*	1
												13*	12
												(12)	1*
													11*
													(13)

* ile gösterilen sayı çiftleri, toplam etkileşimi içeren sütunları göstermektedir.

Kaynak: Gencel, 2007: 86

Faktörler dizildikten sonra sıra ortogonal dizinin öngördüğü şekilde deneyin yürütülmesine ve verilerin toplanmasına gelir. Amaç faktörlere bağımlı bir değişken olan çıktı kalite karakteristiğinin her denemeden sonra gerekli hassaslıkta ölçümüdür. Bu doğrultuda doğru aletler ve insanlarla beraber etkin ve olabildiğince kolay bir ölçüm sistemi kullanılmalıdır. Zira hataları en aza indirmek ve deney güvenilirliğini artırmak

için, süreç değişkenliğine göre karar verilecek bir sayı kadar ortogonal dizideki tüm denemeler tekrar edilip ortalamaları alınacaktır. Normal durumlarda bu sayı 5 ve 10 arasında bir değer alabilmektedir. Örneğin 5 tekrardan oluşan bir L27 deneyinde 135 ölçüm yapmak gerekecektir. Gürültü faktörleriyle dış diziler deneye dahil olduğunda bu oran katlanmaktadır. Dolayısıyla sistematik bir ölçüm yöntemi kullanmakta fayda vardır. Ayrıca deneyin bazı bilinmeyen ilerlemeli faktörlerden etkilenmemesi adına deneyi deneme numaraları arka arkaya gelecek şekilde değil, olabildiğince rasgele bir sırayla yapmakta fayda vardır. Örneğin zamanla ölçümü yapan çalışanların yorulmasıyla titizlikleri ilerlemeli olarak azalabilir yahut ölçüm aletlerinin hassaslığı azalabilir. Bu etkilerin ilk faktörün son seviyesinde birikmesini önlemek için faktör seviyelerinin çok sık değiştirilmesinin maliyetiyle dengesi kurularak deneme sırasının olabildiğince rasgele olması sağlanmalıdır.

Yapılan ölçümlerin sonuçları matriste ilgili yerlere kaydedildikten sonra artık tüm deneyin hedefi olan, çıktının gürültüden en az etkilenmesini sağlayacak olan kontrol faktörü seviyeleri bu verilerin içinde gizlidir ve analiz edilip çıkarılmaları gerekir. Bunun için kullanılabilecek çoklu regresyon analizi, varyans analizi (analysis of variance-ANOVA), sütun farkları yöntemi ve sıralama yöntemi gibi pek çok yöntem olsa da Taguchi'nin önerdiği, dış faktörlerin beklenen çıktıyı etkileme düzeyini göstermek amacıyla elektriksel kontrol teorisinden uyarladığı, sinyal gürültü oranı (signal noise ratio-S/N) üzerinden işleyen S/N ANOVA yöntemidir. En basit haliyle süreç ortalamaları sinyal, standart sapmaları gürültü olarak değerlendirilip olası en yüksek sinyal oranı hedeflenir. Birçok sinyal gürültü oranı bulma yöntemi mevcut olmakla birlikte en çok kullanılan ve kabul görenleri aşağıdaki gibidir (Işık, 2000: 27-28):

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

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

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

Bu formüllerden ilki sağlamlık, saflık derecesi gibi hedef karakteristiğin ne kadar büyükse o kadar iyi olduğu durumlarda, ikincisi kirlenme, paslanma gibi olabildiği en küçük değerde olması gereken durumlarda, üçüncüsü ise boyut, renk gibi belli bir hedef değere en yakın olması gereken durumlarda kullanılır. Burada n

denemenin tekrar sayısını, y_i i numaralı tekrardaki çıktı gözlem değerini, $\bar{y}$ çıktı gözlem değerlerinin ilgili deneme için ortalamasını ve S standart sapmalarını ifade etmektedir.

Buna göre seçilen ortogonal dizinin gerektirdiği deneme sayısı kadar ve her bir denemede tekrarlanan gözlemlerin ortalamalarına göre sinyal gürültü oranları hesaplanır. Böylece matrisin her bir satırına denk gelecek şekilde tüm denemelerin sinyal gürültü oranları bulunmuş olur. Daha sonra her bir faktör için seviyelerinin aynı olduğu denemelerin sinyal gürültü oranı ortalamaları alınarak her bir seviyesine ait sinyal gürültü oranları hesaplanmış olur. Her faktör için en yüksek sinyal gürültü oranına sahip seviye hedeflenen sağlamlık için gerekli üretim seviyesidir. Ayrıca her bir faktörün en düşük ve en yüksek sinyal gürültü oranına sahip seviyelerinin farkından rütbeleri (rank) bulunarak faktörlerin çıktı üzerindeki etki seviyeleri büyükten küçüğe sıralanır ve bir ödünleşme durumu olduğunda dikkate alınır. Şekil 19, L9 ortogonal dizisi kullanılan üçer seviyeli dört faktörlü bir deney tasarımı sürecinde her bir faktör ve her bir seviyesi için sinyal gürültü oranlarının bulunmasını ve faktörlerin rütbelere göre sıralanmasını özetlemektedir.

Şekil 19: L9 dizisinde faktör seviyelerinin sinyal gürültü oranlarının ve rütbelerin bulunması

Experiment Number	P1	P2	P3	P4	SN
1	1	1	1	1	SN1
2	1	2	2	2	SN2
3	1	3	3	3	SN3
4	2	1	2	3	SN4
5	2	2	3	1	SN5
6	2	3	1	2	SN6
7	3	1	3	2	SN7
8	3	2	1	3	SN8
9	3	3	2	1	SN9

$$SN_{P3,1} = \frac{(S_{N1} + S_{N6} + S_{N8})}{3}$$

$$SN_{P3,2} = \frac{(S_{N2} + S_{N4} + S_{N9})}{3}$$

$$SN_{P3,3} = \frac{(S_{N3} + S_{N5} + S_{N7})}{3}$$

Level	P1	P2	P3	P4
1	SNP1,1	SNP2,1	SNP3,1	SNP4,1
2	SNP1,2	SNP2,2	SNP3,2	SNP4,2
3	SNP1,3	SNP2,3	SNP3,3	SNP4,3
Δ	RP1	RP2	RP3	RP4
Rank	...	...	...	...

Kaynak: Fraley ve diğerleri, 2021

Optimum faktör seviyeleri bulunduktan sonra nihayetinde sıra sağlama deneyinin yapılması ve sonuçlandırma adımına gelmektedir. Çalışma öncesi öngörülen yahut hesaplanan optimum faktör seviyelerinin her zaman doğrudan deney

matrisinin bir satırına denk gelmesi beklenmez. Zira yöntem faktör ve seviye sayısı arttıkça giderek daha kesirli ve kestirme bir hal almaktadır. Bu nedenle deneyden bulunan optimum faktör seviyeleri ve varyans analizi gibi çeşitli farklı yöntemlerle bulunan tahmini seviyeler birbiriyle karşılaştırılıp sağlanması yapılır. Örtüşme sağlanıyorsa aranan optimum değerler bulunmuş demektir. Deney başarılı olarak sonlandırılır ve üretim şartları bulunan değerlere göre ayarlanır. Şayet deney sonucu bulunan değerler öngörülenlerle tamamıyla uzak ve kopuksa, deney başarısız olmuş ve bir yerlerde bir hata var demektir. Geri besleme mekanizmasıyla faktör seçimi ve seviye tespiti aşamasına geri dönülür. Süreç tekrar incelenip daha isabetli bir model geliştirilmeye çalışılır. Hatanın kaynağı hedef fonksiyonunun yahut faktörlerin yanlış seçilmiş olması, kalite karakteristiğine uygun olmayan sinyal gürültü oranı yönteminin seçilmiş olması, ortogonal dizi seçiminde hata yapılmış olması olabilir. En sık karşılaşılan durumda ise az miktarda birkaç faktörün optimum bulunan seviyeleri birbirini tutmayabilir. Bu durumda farklı bulunan faktör seviyeleriyle birkaç sefer doğrulama deneyleri yapıp sonuçlar çıktı değerlerinin hedef değerlere yakınlığı ve varyans açısından değerlendirilebilir. Alternatif olarak grafiksel gösterim yahut doğrusal programlama gibi araçlarla söz konusu faktörlerin varyasyonu en düşük kılan yahut hedef değere en iyi yaklaşan seviyeleri hesaplanabilir. Tablo 2 deneysel bir çalışmada bulunan seviyelerin varyans analiziyle bulunanlarla karşılaştırılmasını göstermektedir. Buna göre E faktörünün optimum seviyesi farklı bulunmuştur. Bu doğrultuda faktörlerin rütbeleri göz önünde bulundurularak bir amaç programlama modeli kurulup E faktörünün varyans analizinden bulunan seviyesi seçilmiştir. Bu durum Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 2: Bir deney tasarımında S/N oranı ve varyans analizi karşılaştırması

Faktör / Etkileşim	Ortalamalar için sonuç		S/N Oranı için sonuç (En büyük en İyi)		Log (Std) için sonuç	
	Etki Derecesi	Uygun Seviye	Etki Derecesi	Uygun Seviye	Etki Derecesi	Uygun Seviye
AB	1	*	1	*	5	*
D	2	1	2	1	9	1
AC	3	*	4	*	8	*
E	4	2	7	2	2	1
G	5	2	3	2	1	2
C	6	1	5	1	7	1
F	7	1	6	1	6	1
B	8	1	8	1	3	1
A	9	2	9	2	4	2

Kaynak: Canıyılmaz ve Kutay, 2000: 59

Tablo 3: Amaç programlama modeli ile faktör seviye tespiti

Faktör	Model	Sonuç	En Uygun Seviye
D	$Max = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^-$ $X + Y = 1$ $d_1^+ + d_2^- = 1$ $X - d_1^+ + d_1^- = 0$ $Y - d_2^+ + d_2^- = 0$ $X, Y = 0,1$ $P_1 > P_2$	$X = 1$ $Y = 0$	1
E	$Max = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^+$ $X + Y = 1$ $d_1^+ + d_2^- = 1$ $X - d_1^+ + d_1^- = 0$ $Y - d_2^+ + d_2^- = 0$ $X, Y = 0,1$ $P_2 > P_1$	$X = 0$ $Y = 1$	1
F	$Max = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^+$ $X + Y = 1$ $d_1^+ + d_2^- = 1$ $X - d_1^+ + d_1^- = 0$ $Y - d_2^+ + d_2^- = 0$ $X, Y = 0,1$ $P_2 > P_1$	$X = 0$ $Y = 1$	1
G	$Max = P_1 d_1^+ + P_2 d_2^+$ $X + Y = 1$ $d_1^+ + d_2^- = 1$ $X - d_1^+ + d_1^- = 0$ $Y - d_2^+ + d_2^- = 0$ $X, Y = 0,1$ $P_2 > P_1$	$X = 0$ $Y = 1$	2

Kaynak: Canıyılmaz ve Kutay, 2000: 60

2.3.3.3 Tolerans Tasarımı

Toleranslar kabul edilebilir bir üretim standardı teşkil etmesi açısından gerekli ve önemlidir. Yüksek tolerans seviyeleri istenen kalite karakteristiklerini karşılamakta yetersiz kalabilmekte yahut parçaların montajlanıp yan yana kullanılacağı durumlarda birikmelere sebep olup problemlere yol açabilmektedir. Düşük tolerans seviyeleri ise üretimi güçleştirip hurda oranını artırırken, bir şekilde mümkün kılınabilir bile maliyetleri ciddi anlamda artırabilmektedir. Bu iki ucun dengesi durumsal koşullar altında ekonomik açıdan gözetilmelidir.

Tolerans tasarımı aşaması Taguchi'nin önerdiği yöntemin son aşamasıdır. Hedef karakteristiklerden tüm sapmaların toplum nezdinde genel bir kayıp olarak değerlendirildiği bir görüşte toleransların diğer sistemlere nazaran nispeten düşük olmaları beklenir. Bu bağlamda hedef parametre değerleri için kabul edilebilir toleranslar belirlenir. Parametre tasarımı çıktı değişkenliğini azaltmak için yeterli olmadığında, bu aşamada, değişkenlik üzerindeki etkisi yüksek olan faktörlerin tolerans sınırları daraltılır. Söz konusu daha sıkı koşulları sağlamak da çoğu zaman daha maliyetli ve iyi bileşenlerle mümkün olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında sistem

ve parametre tasarımı aşamaları kaliteyi yükseltip aynı zamanda maliyetleri düşürme olanağı sağlarken bu aşama maliyetleri yükseltebilir (Saat, 2000: 103).

2.4 MEVCUT LİTERATÜR VE UYGULAMALAR ÜZERİNDEN TAGUCHI YÖNTEMİ

Mevcut kaynaklardan ulaşılan en açıklayıcı sağlam tasarım tanımlamalarından birini kendi sistemi üzerine yine Taguchi yapmaktadır. Buna göre bir sistemin sağlam olması; teknoloji, ürün ve süreç performansının, değişkenlik ya da yıpranmaya neden olan gerek üretim ortamından gerekse kullanıcının ortamından kaynaklı etkenlere en düşük birim maliyetle en düşük düzeyde duyarlı olma durumudur (Taguchi ve diğerleri, 2000: 121).

Sağlam parametre tasarımı, Taguchi yöntemi, tepki yüzeyleri ve varyans analizi (ANOVA) gibi deney tasarımı genel başlığı altında değinilebilecek konular, istatistik ve kalite literatüründe akademik anlamda gördüğü ilginin karşılığını endüstri alanında ve nispeten güncel uygulamalarda hakkıyla bulamamaktadır. Yapılan araştırmalar deney tasarımı konularının teknolojisi ve yöntemleri gelişmiş Avrupa şirketlerinde dahi faydalı olabileceği durumlarda gerektiği kadar kullanılmadığını ortaya koymaktadır (Gremyr ve diğerleri, 2003: 288-289; Bergquist ve Albing, 2006: 966). Tanco ve diğerleri (2009: 479), bu durumun nedenini istatistikçi olmayanların da kullanabileceği, basit anlaşılır ve uygulaması kolay bir yöntem tarifi eksikliğine bağlamaktadır. Bask bölgesinde yaptıkları bir araştırma sonucunda deney tasarımı kullanan şirketlerin çoğunun her seferinde tek faktör değiştirilen tek seferde tek faktörlü yöntemi (OFAT – one factor at a time) kullandıklarını ve bunların sadece %20'sinin önceden belirlenmiş bir istatistiksel metodolojiyi takip ettiklerini ortaya koymuşlardır. Dahası, araştırılan şirketlerin %76'sı açık bir metodoloji yokluğunun ya da bilinmemesinin, deney tasarımı uygulamalarının önündeki ana engellerden biri olduğunu belirtmişler ve benzer sonuçlar diğer Avrupa bölgelerinden de elde edilmiştir. Ayrıca Arvidsson ve Gremyr (2008) sağlam tasarım ve Taguchi yöntemi anahtar kelimeleriyle yaptıkları detaylı veri tabanı ve kaynak taramalarının sonuçlarını, endüstrideki karşılıklarıyla kıyasladıkları çalışmalarının sonuç kısmında; sağlam tasarım üzerine yapılan araştırmaların güncel endüstri uygulamalarında neden yaygınlaşıp gerekli karşılığı bulmadığının daha iyi araştırılması gerektiğini belirtmektedirler.

Buna karşılık Taguchi, yöntemini 1950'lerde Japonya'da geliştirip uyguladıktan sonra; 1980'lerden 1990'ların ortalarına kadar olan ve Taguchi dönemi olarak adlandırılan dönemde Batı'nın yararına tanıtmak amaçlı yaptığı yayınlarıyla beraber günümüze kadar üzerine çok sayıda çalışma ve akran değerlendirmesi gözlenmiştir. En önemli ve kapsamlılarından biri; 1992 yılında zamanın birçok kayda değer istatistikçi, araştırmacı, akademisyen ve iş insanının yanı sıra Taguchi'nin oğlu Shin Taguchi'nin de aralarında bulunduğu bir grup tarafından yürütülen bir tartışma paneli olmuştur. Nair ve diğerleri (1992) tarafından yayınlanan raporda destekleyen ve kısmi gelişme önerenlerden karşı çıkanlara kadar pek çok fikir sunulmaktadır.

Akademik çalışma ve araştırmalar rehberliğinde yürütülen pek çok farklı endüstri alanındaki birçok uygulama başarılı ve olumlu sonuçlar vermiştir. Tarng ve Yang (1998) toz altı kaynak sürecinin optimizasyonunda deney düzenini formüle etmek, kaynak parametrelerinin performans üzerindeki etkilerini ve en uygun seviyelerini belirlemek için Taguchi yöntemini kullanmış ve sonucunda yöntemin verimliliğini ve etkililiğini onaylamışlardır. Wang ve diğerleri (1999) fırçasız doğru akım motorların tasarımı aşamasında tork optimizasyonu ile ürün sağlamlığını geliştirme amaçlı bir yaklaşım önermişler, Taguchi yöntemiyle buldukları sonuçları geleneksel optimizasyon yöntemleriyle buldukları sonuçlarla karşılaştırarak yöntemin geçerliliğini göstermişlerdir. Antony ve diğerleri (2000) Taguchi yönteminin İngiliz endüstrisindeki yansımalarını incelemiş; yöntemi kullanan birçok şirket ve endüstrinin yakaladığı başarıları karşın pek çok vakada potansiyel faydalarının tam olarak anlaşılamamasının nedenini genel olarak izole bir şekilde uygulanmalarına ve sürekli iyileştirme yaklaşımlarıyla entegre edilmemelerine bağlamışlardır. Tan ve Tang (2001) esnek bir üretim çevresinde otomatik yönlendirmeli araçlar için bir sevk sisteminin geliştirilmesini, bulanık karar verme modeliyle Taguchi yöntemini birleştiren hibrid bir çözüm üzerinden değerlendirmişlerdir. Söz konusu çalışmada Taguchi yöntemine dayalı istatistiksel bir yaklaşımla, dinamik olarak gelişen bir ortamda çok amaçlı karar verme süreçlerinde optimal performansı sağlayan bulanık ayarlara yaklaşılmıştır. Wang ve Huang (2007) bir tahmin modelinin kontrol edilebilir faktörlerini kalibre etmek için kullandıkları Taguchi yöntemiyle başarılı sonuçlar almışlardır. Mohamed ve diğerleri (2008) düğümlerdeki bekleme, hız ve trafik yükü üzerinden değerlendirdikleri bir rotalama probleminde ana faktör ve etkileşimleri Taguchi yöntemiyle analiz edip teslimatı artırmışlardır. Jiao ve Helo (2008) Taguchi kayıp fonksiyonuna dayanan kümülatif kontrol grafiği temelli bir optimum tasarım algoritması önermişlerdir. Ordoobadi (2009) yeni bir teknolojinin benimsenmesiyle

ilgili maddi olmayan faydaların belirlenmesinde ve bu faydaların ölçülüp karşılaştırılmasında Taguchi'nin kayıp fonksiyonunu kullanmıştır. Ismail ve diğerleri (2009) süreç yeterliliğini ölçmek için Taguchi kayıp fonksiyonunu geliştirerek bir yöntem sunmuşlardır. Hsu ve diğerleri (2010) geri yayımlı sinir ağları ve Taguchi yöntemini birleştirerek zamandan ve hesaplama zorluklarından büyük ölçüde kazanç sağlamış, üç tane gerçek dünya örneği üzerinden önerdikleri modelin faydalı derecede optimale yakın sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Shalini ve Saxena (2018) papaya bitkisinin ozmotik dehidrasyon sürecini optimize etmek için üçer seviye dört faktörlü L9 ortogonal dizisiyle kullanarak yaptıkları çalışmanın sonucunda; en etkili faktörleri, faktörler arası etkileşimleri ve optimal seviyeleri belirlemede Taguchi deney tasarımı yaklaşımının çok faydalı olduğunu ve üretkenliği artırdığını belirtmektedir.

Tüm bunların ve daha pek çok olumlu inceleme ve uygulamanın yanında Taguchi yöntemine yöneltilen bazı eleştirilerden de bahsetmek gerekir. Box ve diğerleri (1988) Taguchi yönteminin yepyeni bir sistem öneriyormuşçasına isminin bu şekilde yaygınlaşmasını talihsiz olarak değerlendirmişlerdir. Onlara göre Taguchi'nin kendisi de bu kullanımdan rahatsızdır; zira kesirli faktörsel tasarım, varyans analizi ve ortogonal diziler gibi kavramlar ancak istatistiksel tarihi bilmeyenler tarafından yeni bir yöntem olarak adlandırılabilir. Bunlara yepyeni ve apayrı keşifler muamelesi yapmak, doğal birikimli ilerlemelerinin önünü tıkamaktadır. Oysa ürün ve hizmetlerin hiç bitmeyen bir şekilde sürekli geliştirilmesine uğraşıldığı kadar istatistiksel yöntemler de sürekli geliştirilmeye çalışılmalıdır. Bu daha çok yöntemin algılanışına gelen bir eleştiri olmakla birlikte yöntemin özüne yönelttikleri bir diğer eleştirileri, uygulamada sıklıkla istatistiksel açıdan külfetli durumlarla karşılaşılmasıdır ve onlara göre istatistiksel verim eksikliği küçük bir detay olarak görülemez. Örneğin %50 verimli olan bir analiz zorluklarla elde edilen verilerin yarısını çöpe atmak demektir, bu kayıp sonucu önemli etkiler gözden kaçabilir yahut bu kaybı telafi etmek için gösterilen fazladan çabalarla maliyet artabilir. Ayrıca çok paydaşlı karmaşık durumlarda toplam toplum zararının hesaplanmasının çok karmaşık bir hale geldiği ve sinyal gürültü oranının her durumda etkili bir performans kriteri olmaması üzerinden yöntemi eleştirmişlerdir. Bu bağlamda araştırmacılar yöntemin ciddiye alınmasını, katkılarının öğrenilip anlaşılmasını; ancak uygulamada daha basit ve çağdaş veri analizi yöntemleriyle desteklenmesini önermektedirler. Nair ve diğerleri (1992) tarafından yöneltilen eleştirilerin ana konusu yöntemin istatistiksel temellerinin teorik açıdan zayıf olması ve sinyal gürültü oranlarının bazı hesaplama problemlerine yol açmasıdır. Shoemaker ve Tsui (1991) yöntemi maliyet açısından ele aldıklarında, kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörleri

iç ve dış olarak iki ayrı diziye yerleştirmenin gerekli deney sayısını katlaması üzerinden faktörleri ayırmanın gerekliliğini tartışarak; nominal en iyi durumundaki ihtiyaca nazaran en küçük en iyi ve en büyük en iyi durumlarındaki gerekliliğini sorgulamışlardır. Tsui (1996) sinyal gürültü oranları yönteminin uygulamada optimal olmayan çözümlere, verimlilik ve bilgi kaybına; iç ve dış dizilerin ise esnek olmayan ve pahalı uygulamalara götürebileceğini belirtmektedir. Kim ve Cho'ya (2000) göre Taguchi yöntemiyle hedeflenen ortalama çıktıya ve en az değişkenliğe sahip bir sürece ulaşmak, önerdikleri asimetrik kalite kaybına dayanan yöntem nazaran daha masraflıdır. Diğer eleştiriler genellikle yöntemin ardışık ve birikimli gelişmeler açısından yetersizliğine, az sayıda seviyeye bölündüklerinden parametrelerin optimum çalışma seviyelerini tam olarak verememesine, faktörler arası etkileşimlerin etkili olarak belirlenememesine ve bazı durumlarda masraflı olabilmesine vurgu yapmaktadır (Baynal, 2003: 180-182).

2.5 YALIN ÇEVRELERDE TAGUCHI YÖNTEMİ

Süreçlerdeki ve çıktı karakteristiklerindeki değişkenlikleri ortadan kaldırmak ve doğru işin standartlaştırılması üzerinden, Taguchi yöntemi yalın anlayış ve bilhassa yalın altı sigma anlayışları aynı amaca hizmet ediyor gibi görünmektedirler. Ancak değinilmesi gereken temel yaklaşım farkları mevcuttur. Taguchi yöntemi süreç dışı araçlarla kaliteyi ilk seferde ve tek çalışmada ürüne doğru olarak yerleştirmeyi, süreçler henüz başlamadan gerekirse radikal bir değişimle tek bir hatalı üretim dahi yapılmamasını sağlamayı hedeflemektedir. Buna karşın yalın anlayışta gembaya giderek gerçek süreçlerin gözlemlenmesi yahut yalın altı sigma yaklaşımında kullanılan kontrol grafikleri gibi süreç içi yöntemlerle süreçlerin izlenmesiyle sağlanan, geleceğe yönelik küçük adımlı geliştirmeler ve birikimli ilerlemeler sık karşılaşılan durumlardır. Bu farklılığın altında yatan sebebi kısaca açıklamak yararlı olacaktır. Söz konusu görüşlerde üretimin mükemmelliğinin önündeki engel gürültü faktörleridir ve bahsedilen yaklaşımlar gerçek dünya koşullarında bunlardan tamamen kurtulunamayacağının farkındadır. Bunlarla baş etme yolunda; Taguchi yöntemi bunların etkilerini azaltmaya, ürün ve süreçleri bunlara karşı duyarsız hale getirmeye, varlıklarından etkilenmemeye çalışırken yalın ve altı sigma yaklaşımları bunları azaltmaya, ufak ufak elemeye ve oluştukça sürekli bir uğraşla tekrar ortadan kaldırmaya çabalamaktadır. Örneğin yalın altı sigma anlayışındaki müdahale edilmeyen süreçlerde uzun vadede en az 1,5 sigmalık bir kalite kayması olacağı

fikrinin Taguchi yaklaşımında bir karşılığı olmaması bu basit anlayış farkındandır. Bir müdahalede bulunulmayan süreçlerde gürültü faktörleri termodinamiğin ikinci yasası gereği yeniden oluşacaktır ve bir süreliğine kararlıymışçasına her süreç için belli bir ortalama değerde seyredeceklerdir. İşte Taguchi yöntemi başından itibaren bu koşul ve seviyelere göre hazırlanmış ve ayarlanmışken yalın altı sigma yaklaşımı bunları oluştukça, gözlendikçe ve sürekli olarak ortadan kaldırmaya çalışır. Bu bağlamda entropi, gürültü ve değişkenlikler kararlı ve istikrarlı bir şekilde yapılması gereken tüm işlerin olduğu gibi üretimin ve bu üç sistemin de en azılı rakipleriyken; yalın anlayış bunları nispeten geleceğe dönük bir bakışla bir daha oluşmayacak şekilde kök nedenleriyle beraber birikimli olarak eleyen bir sistem kurmaya, altı sigma yaklaşımı daha güncel geliştirmelerle bunları elemeye ve mevcut süreçleri iyileştirmeye, Taguchi yöntemi ise süreç ve ürünleri bunların sistemde kalan kısmına karşı duyarsızlaştırmaya çalışmaktadır. Bu açıdan bakıldığında etkili ve bütüncül bir üretim sistemi oluşturmak adına anlayışlar birbirini tamamlar nitelikte görünmektedir. Uzun vadeli hedefler doğrultusunda israflardan sürekli arındırılan yalın bir stratejiyle mevcut değişkenliklerin en aza indirilmeye çalışıldığı bir altı sigma çalışması beraber kullanılırken, kalan değişkenliklere karşı sistem Taguchi yöntemiyle duyarsızlaştırılabilir. Ancak bunun için maliyet getiri dengesinin gözetildiği etkili bir metodoloji izlemek gerekecektir. Zira iyileştirme yapıldıkça, gürültü faktörlerinin hatırı sayılır miktardaki her değişimi için kontrol faktörlerinin optimum değerleri değişecek ve yeni bir deney tasarımı gerekecektir. Bir öneri olarak; sistematik bir yaklaşımla araştırılan ve belirlenen potansiyel iyileştirmeler, mevcut maliyet kısıtlarına göre belli aralıklarla biriktirilerek uygulanıp hemen arkasından bu iyileştirmelerin geliştirme ve kontrol aşamaları deney tasarımlarıyla gerçekleştirilebilir. Farklı bir açıdan yaklaşılsa; yalın altı sigma araçları Taguchi yöntemine optimal gürültü girdisini sabit olarak verecek şekilde kullanılabilir. Nitekim gürültüyü etkilenilmeyen, düşük ama belirli bir seviyede tutmak sürekli yok etmeye çalışmaktan daha kolay olacaktır.

Taguchi yönteminin yalın çevrelerde uygulanmasına dair mevcut literatürdeki çalışmalar ortak ve kapsamlı bir metodoloji üzerinden ilerlemekten ziyade çoğunlukla iki yaklaşımın araçlarını sırasıyla kullanmaktan ibarettir. Sanchez ve diğerleri (1997) Taguchi yöntemini üç aşamadan oluşan bir kanban sistemini optimize etmekte kullanmış, S/N (signal noise ratio) temelli kayıp fonksiyonunun parabolige nazaran daha sağlam sonuç verebileceğinin araştırılmasını önermiştir. Sahoo ve diğerleri (2008) yalın bir sistemdeki kaçınılamayan gürültülerin etkilerini, altı sigma DMAIC problem çözme süreci içinde, gürültülerden oluşan bir dış dizi ve beş kontrol

faktöründen oluşan bir iç dizi içeren bir ortogonal diziyle azaltmışlar ve takiben tepki yüzeyi yaklaşımıyla daha hassas kontrol seviyelerine ulaşmışlardır. Ihueze ve Okpala (2012) bir yalın üretim sistemindeki israfları ve önem sıralarını Taguchi yöntemiyle belirlemişler, atığın büyük bir kısmının fazla üretim ve aşırı stoktan kaynaklandığını saptamışlardır. Noorwali (2013) çalışmasında yalın yöntemlerin simülasyonla ortak kullanımının araba tamiri sektöründe yakaladığı başarıyı yemek sektöründe verimlilik artışı için uyarlarken, yalın yöntemlerle atıkları ortadan kaldırdıktan sonra süreç gecikmelerini ve müşteri davranışlarını üçgen dağılımla modelleyerek simüle edip en önemli gecikme sebeplerini belirlerken ortogonal dizilerden yararlanmışlardır. Ridwan ve diğerleri (2018) çelik üretiminde atıkları yalın araçlarla ortadan kaldırıp en ciddi orandaki atık cinsi olan hurda miktarını Taguchi yöntemiyle azaltmışlardır. Zhang ve diğerleri (2020) yalın bir çevrede çekme stratejisi, parti boyutu, sevkiyat kuralları gibi sistem performansını etkileyen kontrol faktörlerinin en iyi değerlerini simülasyon optimizasyonu ile bulup buldukları sonuçları Taguchi yöntemiyle karşılaştırmışlardır.

Çalışmanın başından itibaren bahsedilen yaklaşımların tamamını etkili bir şekilde uygulamak ve üretimde başarılı olmak, söz konusu üretim sistemleri ve kavramlarının iyi bir anlayışının yanında kapsamlı bir istatistiksel düşünce ve bilgi altyapısıyla mümkündür.

Çalışmanın üçüncü bölümünde yalın altı sigma ve Taguchi yaklaşımlarının bir arada kullanılmasına yönelik bir metodoloji sunulmaktadır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

YALIN ALTI SİGMA YAKLAŞIMI VE TAGUCHİ YÖNTEMİNİN BİRLİKTE KULLANILMASINA YÖNELİK METODOLOJİ

Üretimde istatistiksel çalışma ve yöntemlerin, bunlara göre yapılan ölçümlerin ve sonuçların kayıt altına alınıp işlenmesinin kalite bakımından önemi; geçmişten günümüze artış yönünde görünmektedir. Zaman içinde rekabetin artmasıyla kalite sorunlarına bağlı müşteri ve kazanç kayıplarının telafisinin güçleşmesi kaliteyi süreçlerde geriye doğru desteklemeyi ve daha ilk etapta ürün ve süreçlere yerleştirmeyi zorunlu kılmıştır. Buna bağlı olarak kullanım ağırlıklarında yazıldıkları sıra yönünde zamanla bir kayma gerçekleşse de üretimdeki istatistiksel yöntemlerin temel başlıkları olarak kabul örneklemeleri, istatistiksel süreç kontrolleri ve deney tasarımları geçerliliklerini korumakta, çeşitli amaçlar doğrultusunda farklı araçlar ve uygulama yöntemleriyle üretimde karşılık bulmaktadırlar. Etkili bir üretim geliştirme metodolojisi oluşturma yolunda süreçlerin öncesi, gidişatı ve sonucuna hitap edecek şekilde tamamından yararlanılması gerekir. Bu bağlamda söz konusu alanların tamamında kullanılan pek çok yöntem ve araca temel oluşturmaları, üretimde kullanılan birçok istatistiksel yöntemi önceleyen yöntemler olarak durumlara özgü çeşitli yöntemlerin bunlar üzerlerinden türetilibilmeleri, istatistiksel mantık ve çıkarıma ışık tutmaları bakımından üç temel yöntem açıklanacaktır. Gözlem ve tespit kısmında kontrol grafikleri, verilerin analizi için varyans analizi, kontrol aşamasında ise doğrusal regresyon önerilmiştir. Söz konusu yöntemlerin bu çalışmanın konusu olan üretim felsefelerinin uyumu içinde etkili bir şekilde anlaşılmaları ve kullanılmaları için, öncelikle tamamının dayanak noktasını oluşturan, 20. yüzyıl modernizminin ve bilimsel gelişmelerin katkısıyla şekillenen ve günümüz hakim bilimsel paradigmasına da yön veren genel bilimsel çalışma metodolojisini anlamak gerekir.

Bilimsel çalışma mutlak doğru ve geçerli bir tek sonuca ulaşmaktan ziyade her seferinde daha az yanlışa ulaşmakla ilgilidir; sınanabilir ve yanlışlanabilir olmakla ölçülür. Bilimsel sav sahibi onu en iyi tanıyan kişi olarak, savunucusu olmaktan ziyade ilerleme açısından var gücüyle çürütmeye çalışmalıdır çünkü aranan onay ve doğrulama olduğunda neredeyse her teori için bunlardan bir miktar bulmak mümkündür. Bir bilimsel teori bazı şeylerin olmasını yasakladığı ölçüde iyidir. Her şeyi açıkladığını iddia eden bir sav büyük ihtimalle hiçbir şeyi açıklamıyor demektir (Popper, 1962: 34-37).

Hipotez testi, varyans analizi, kontrol grafikleri ve korelasyon tespiti gibi üretimde geniş yer bulan ve çalışmada kullanılabilecek çok temel istatistiksel yöntemler, mevcut bilimsel paradigmaya uygun olacak şekilde kökenlerini bu fiktirden almaktadır. Örneğin bilimsel çalışma ve araştırma yöntemlerinin en basit yapı taşı olarak kullanılan ve ortaya atılan savları sınamaya yarayan hipotez testi yaklaşımında; ortaya konulan fikrin çeşitli gözlem ve örneklemelerle doğrulanmasından ziyade, karşıt savı olan sıfır hipotezinin yanlışlanması daha güvenilir olması bu anlayışa dayanır. Söz konusu sağduyulu yaklaşım; bilimsel yöntemin geneline ve üretim çalışmalarında kullanılması muhtemel istatistiksel araçlara yön verdiği gibi, tezin konusu üretim anlayışlarıyla tutarlı bir şekilde işleyebilecek bir metodolojiye de temel oluşturabilmektedir.

Bağlantı ve uyumlarına kısaca değinmek gerekirse; yalın üretimin gerçek kuzey olarak ifade ettiği, doğruya değil, her seferinde daha az yanlışa ulaşma fikri söz konusu bilimsel yaklaşımla paralellik göstermektedir. Yahut altı sigma yaklaşımında belli bir seviyenin üzerindeki değişkenliği tespit etmekte kullanılan süreç içi kontrol yaklaşımlarında, sıfır hipotezi üretimin yolunda gittiğini ifade ederken bazı özel değişkenlik sebebi kriter ve belirteçleriyle bu sav yanlışlanarak olası gelişim imkanları tespit edilebilir. Benzer mantığın bir devamı olarak Taguchi yöntemiyle yapılan bir çalışmada, örneğin bir üretim faktörünün üç seviyesinden çevre koşullarına göre en az varyasyonu sağlayan bir seviyesi belirlendiğinde doğru seviye bulunmuş değil, yanlış olan iki seviye elenmiş olarak düşünülmelidir. Sonraki çalışmalarda faktörün doğruya daha yakın olan bu seviyesi etrafında daha dar aralıklarla, bir altında ve bir üstünde iki seviye belirlenerek, bir nevi budama işlemi gibi daha etkili seviyeler aranabilir. Bu mantık yalın felsefedeki sürekli gelişim anlayışıyla ve altı sigmanın döngüsel iyileştirme yöntemleriyle birleştirilip ortak bir metodoloji kurulabilir. Buna göre yapılan araştırmalar, yöntemlerin avantajları ve uygunlukları doğrultusunda döngüsel olarak çeşitli durumsal koşullara uyarlanabilir metodolojik bir yaklaşım önerilmeye çalışılacaktır.

Bu bağlamda önerilen metodolojinin adımları aşağıdaki gibidir:

1. İyileştirme projelerinin seçimi
2. Proje takımının ve deney faktörlerinin belirlenmesi
3. Ölçüm güvenilirliğinin ve değişkenliğin analizi
4. Taguchi Deney Tasarımı ve Kontrolü

3.1 İYİLEŞTİRME PROJELERİNİN SEÇİMİ

İlk olarak iyileştirme yapılacak alanın seçilmesinde, metodolojinin geneline yayılmaya çabalandığı üzere, üç temel üretim yaklaşımının yöntemleri istatistiksel düşünce boyutları da gözetilerek dikkate alınacaktır. Buna göre yola çıkış noktaları incelendiğinde yalın üretim tüm atıklardan kurtulup müşteri için değer yaratmayı, altı sigma süreç ve çıktılardaki değişkenliği azaltarak üretimi stabilize etmeyi, Taguchi yöntemi ise ürün ve süreçleri kontrol edilemeyen faktörlere karşı duyarsızlaştırarak değişkenlik sebepli toplumsal kaybı en aza indirmeyi vurgular. Yeri geldiğinde tüm toplum potansiyel müşteri olarak ele alınabileceğinden yaklaşımların temel dayanak noktaları olabildiğince paralellik göstermektedir ve bu durum iyileştirme projesi seçiminde ve önceliklendirilmesinde yol gösterici olmalıdır. Kalite sorunları kaynaklı müşteri kayıplarının olası zararları ve telafi etmenin güçlüğü düşünüldüğünde, Taguchi'nin kayıp fonksiyonunun yorumlanmasıyla paralel olarak kalite karakteristiklerindeki değişkenliğin boyutu kritik bir karar faktörü olacaktır.

Araştırma konusu sistemlerin ortak olarak müşteri ve toplum odaklı yaklaşımları düşünüldüğünde, sistematik yalınlaştırmalar müşteri tarafından tanımlanan değer ve müşterinin sesi gözetilerek belirlenmelidir. Yalın altı sigma ilkelerini benimsemiş bir üretim çevresinde, yalın anlayış gereği şirketin uzun vadeli stratejileriyle örtüşecek şekilde hizalanmış orta ve kısa vadeli amaçları doğrultusunda tüm süreçlerde atıklar elenerek bölgesel iyileştirmeler yapılmaya çalışılır. Yapılan bu sadeleştirmeler sonucu süreçlerin çehresi değişebileceğinden ilk etapta kararlılıkları etkilenebilir. İyileştirme projesi için girdi sağlayacak bahsedilen en yüksek değişkenliği olan süreçleri aramaya, birtakım israfların yeni elendiği bu süreçlerden başlamakta fayda vardır. Bu bağlamda tek başına yalın anlayışta sürekli, her alanda, küçük ve birikimli iyileştirmeler kullanılsa da bu ortak yöntemde söz konusu yalınlaştırmaların sistematik bir yaklaşımla araştırılıp belirlenmesi ve mevcut maliyet kısıtlarına göre belli aralıklarla ölçülü bir şekilde biriktirilerek uygulanması önerilmektedir. Bahsedilen atıklardan arındırma çalışmalarını akla gelen her yerde ve tüm süreçlerde aynı anda uygulamak yerine bölgesel olarak biriktirip ölçülü bir sırayla uygulamak; gereksiz işlemleri, stoku ve hareketleri azaltacağı gibi; akabinde uygulanacak Taguchi analiziyle bir diğer önemli israf türü olan hata ve kusurlara karşı tedbir alınmasını kolaylaştıracaktır.

İyileştirme projesi seçiminde süreçlerdeki değişkenliğin boyutu ve müşterinin sesi kritik karar faktörleri olmakla beraber, durumu maliyet ve zorluk ekseninde

değerlendirmekte de fayda vardır. Öyle ki nispeten zor ve tahmini süresi uzun görünen bir proje yerine daha hızlı tamamlanıp doğrudan getiri sağlayacak nispeten kolay bir projeye öncelik verilebilir. Böylece toplam süre içinde maruz kalınan kalite kaybı ve değişkenlik daha az olacaktır. Bu noktada maliyet, zorluk, getiri, müşteri değeri gibi faktörler durumsal koşullar altında dikkate alınmalıdır. Gerektiği durumlarda karar matrislerinden yararlanılabilir yahut doğrusal programlama yöntemleriyle getiri maksimizasyonu veya toplam değişkenliği en aza indiren sıra aranabilir. Ancak öncelikle kritik karar faktörü olarak süreçlerdeki değişkenlik oranları belirlenip buna göre bir karşılaştırma yapılmalıdır. Aşırı değişkenlikleri tespit etmede çeşitli üretim süreçlerinin ve farklı şirketlerin durumsal koşullarına göre kullanılabilecek kutu grafikleri (box and whisker plots), kontrol grafikleri, matris diyagramı ve ürün analizi gibi pek çok yöntem söz konusudur. Bunlar arasından kontrol grafikleri gerek üretim sektörlerinde uygulama yaygınlığı gerek temel istatistiksel çalışma mantığını üretim açısından iyi yansıtması, gerekse basit fakat etkili bir yöntem olmasıyla öne çıkmaktadır. Ölçülebilir nicelikler ve nitelikler açısından kullanılabilen çok çeşitli kontrol grafikleri mevcuttur. Ancak hem bu çalışmanın genel kapsamının dışında olması hem de kullanım yaygınlığı açısından ölçülebilir niceliklere, yani kalite özelliklerine ilişkin kontrol grafikleri öne çıkmaktadır. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde, kontrol grafikleri yaklaşımını en temel haliyle yansıtan klasik $\bar{x}$ ve R kontrol grafikleri ele alınmıştır.

Üretimde süreç çıktıları olarak kalite karakteristiklerinin genellikle normal dağıldığı kabul edilmektedir. Buna göre ilgili kalite karakteristiği μ ortalama etrafında, σ standart sapma ile bir dağılım göstermektedir. Geleneksel olarak üretimde çoğu durumda 6 standart sapmalı bir güven aralığı kullanılır ve ürünlerin %99,74'ünün bu aralık içerisinde olacağı düşünülür. Normal dağılımlı μ ortalamalı ve σ standart sapmalı bir süreçten alınan n boyutlu bir örneklemin ortalaması $(1 - \alpha)$ ihtimalle aşağıdaki şekilde hesaplanabilecek bir aralığa düşecektir:

$$\left(\mu - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} , \mu + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Burada standardize normal dağılıma ilişkin Z değerleri, karşılık gelen α anlamlılık değerlerine göre ilgili tablolardan çekilirler ve belirlenen sınırlar kontrol grafikleri için alt ve üst kontrol sınırlarını oluştururlar (Montgomery, 2009: 228).

Ancak pratikte çoğu zaman μ ve σ tam olarak bilinemez, sürecin kontrol altında varsayıldığı daha önceki numune ölçümleri ve alt grup gözlemlerinden kestirilmeye çalışılırlar. Bu çıkarımlar için genellikle en az 20-25 örnekli bir numune gerekir ve her

biri belli sayıda gözlemlerden oluşur. m örnekli ve her biri n gözlem içeren bir numune grubunda her bir örnek için n sayıda gözlemin ortalaması $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ olacağından μ için en iyi tahmin tamamının genel ortalaması olarak aşağıdaki gibi olacaktır (Montgomery, 2009: 228):

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m}$$

Sonuçta bulunan ortalama kontrol grafiğinin merkez çizgisi için eldeki en iyi adaydır. Örnekleme ve gözlem sayısı arttıkça isabeti artacaktır ve teoride sonsuz gözlem yapıldığında μ 'ye gidecektir. Merkez çizgisinden sonra kontrol sınırlarını oluşturmak için standart sapmanın kestirilmesi gereklidir ve $\bar{x}$ ve R kontrol grafiklerinde bu durum için aralık yöntemi kullanılır. Buna göre her bir örneklemedeki n sayıdaki gözlem için en büyük ve en küçük gözlemlerin farkından ($R=x_{\max}-x_{\min}$) m sayıda gözlem aralığı boyutu bulunur ve bunların ortalaması alınarak genel bir $\bar{R}$ aralık değeri bulunur. Sonuçta grafik değerleri aşağıdaki verilen eşitliklerde gösterildiği gibi bulunmuş olur. A_2 karşılık gelen örneklem boyutlarına göre ilgili tablodan ulaşılan bir sabittir.

$$\text{Üst Kontrol Sınırı} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$\text{Merkez Çizgi} = \bar{\bar{x}}$$

$$\text{Üst Kontrol Sınırı} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

Shewhart'tan bu yana $\bar{x}$ ve R kontrol grafikleri gerek görsellik bakımından gerekse pratiklik bakımından sağladığı avantajlarla en sık kullanılan süreç kontrol araçlarından olmuştur ve uygulamada n ile ifade edilen gözlem sayısı 4-6 aralığında kullanıldığında normallik varsayımına makul veri sağlayacak şekilde yeterli sonuçlar vermektedir. Pratikte söz konusu tablo değerleri belirlendikten sonra, özel yahut genel sebepli değişkenlikleri izlemek amaçlı kullanılabilirler. Özel sebepleri saptamakta önerilen birtakım belirteçler mevcuttur. En geçerli olanlar bir gözlem noktasının merkez çizgisinden 3 standart sapma ve üzerinde uzakta olması, merkez çizgisinin aynı tarafında dokuz ardışık nokta olması, tamamı artan ya da azalan sırada peş peşe 6 nokta gözlenmesi, bir artıp bir azalacak şekilde 14 ardışık gözlem belirlenmesidir (Nelson, 1984). Bunlar genellikle nispeten basit çözümlü ve daha acil önlem alınması gereken sebeplerden kaynaklanır. $\bar{x}$ ve R kontrol grafikleri aynı zamanda özel sebepli değişkenlik içermeyen süreçleri izlerken süreçlerdeki toplam değişkenliğin boyutunu ölçmek için ve en yüksek değişkenliğe sahip süreci belirlemek için de kullanılabilirler.

Kontrol grafikleri ve sınır değerlerini belirlemek için yapılan tarifler, süreçlerin kontrol altında ve uygun çalıştığı kabul edilen bir zaman zarfındaki ölçüm verilerine

dayanmaktadır. Pratikte bazı süreçlerde bu durum dışsal dayatmalarla değişim gösterebilir. Örneğin bir yöntem yahut teknoloji değişimi sonucu yeni edinilen bir süreçte geçmiş verilere ulaşmak mümkün olmayacaktır ve genellikle bu tarz süreçlerin gerekli yeterlilik sınırları içinde olmaması oldukça muhtemeldir. Daha yaygın bir durumda birtakım hassas bileşenlerin üretiminde kabul edilebilir sınırlar doğrudan dışsal bir dayatmanın sonucu olan dar tolerans aralıklarıyla belirlenir. Bu tarz durumlarda azaltılması gereken sapma ve değişkenlik genel sebepli olarak karşımıza çıkacaktır ve bu durum birtakım basit ve düzeltici önlemler almaktan ziyade süreci dış etkilere karşı duyarsızlaştırıp bütünüyle sağlamlaştırmayla mümkün olacaktır.

3.2 PROJE TAKIMININ VE DENEY FAKTÖRLERİNİN BELİRLENMESİ

Projenin yapılacağı süreç belirlendikten sonra bu iyileştirmeye uygun olarak projede yer alacak personel belirlenmelidir. Proje takımı olabildiğince farklı fikirlere açık olmalıdır. Yalın anlayışa göre mutlaka işin gerçek sahibi olarak görülen ve o işi her gün gerçekleştiren operatör ve teknisyenleri barındırmalıdır. Altı sigma anlayışına göre mümkünse istatistiksel düşünce konusunda eğitilmiş uzman kara kuşak ve kara kuşak personelleri içermelidir. Şirketin kalite yaklaşımına ve çalışmalarına hakim bir kalite uygulayıcısı ve kalite yöneticisi de muhakkak takımda olmalıdır. Ayrıca kalite sorunlarını esas tecrübe eden iç ve dış müşterilerin ve mümkünse tedarikçilerden bir temsilcinin de takımda bulunmasında fayda vardır.

İyileştirme alanı belirlenip proje takımı buna göre oluşturulduktan sonra etkili bir ekip çalışması ve ortak bir beyin fırtınası gereklidir. Yalın anlayışı benimsemiş çevrelerde bu tarz çalışmaların zorlanmadan verimli bir şekilde yapılabileceği öngörülmektedir. Sürecin durumuna göre en önemli sebepler doğrudan belirlenemiyorsa, ekip üyelerinden seçilen sürecin ilgili kalite karakteristiğindeki yüksek değişkenliğin olası sebeplerine dair çok sayıda fikir ortaya koymaları beklenir. Önemli bir noktanın gözden kaçmaması adına başlangıçta bu liste olabildiğince uzun olmalıdır. Ancak listenin çıktısı Taguchi yöntemine girdi sağlayacağından, durumsal koşullara göre değişebilecek olmakla birlikte tercihen 6-8 tane en önemli olanları belirlenmelidir. Bu seçim sırasında fikir birliğine varılamadığı takdirde, ekip üyelerinin tecrübeleri ve fikirleri doğrultusunda ağırlıklı bir oylama yoluna gidilebilir. Balık kılçığı diyagramı ve Pareto analizi gibi yöntemler bu noktada faydalı olacaktır. Balık kılçığı diyagramı, bir diğer adı sebep sonuç diyagramıyla önerilen sebeplerin çeşitli

bileşenler altında gruplandırılıp görselleştirilmesiyle benzer alt bileşenler altındaki diğer faktörlerin çağrışımı kolaylaşabilir ve sebepler kategorize edilerek kendi içlerinde alt nedenleri görünür hale getirilebilir.

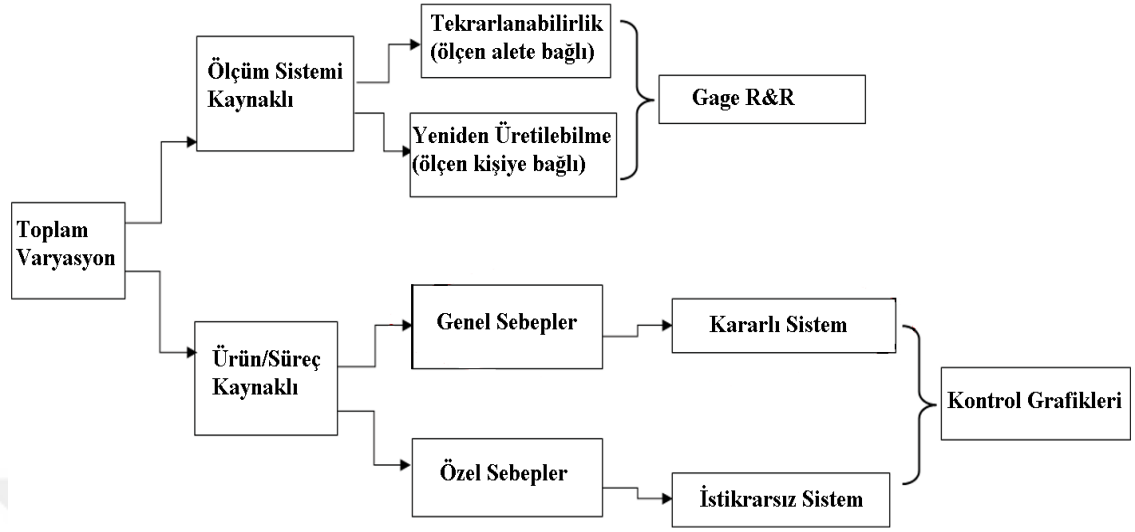
Bu aşamada neden-sonuç analizi ve Pareto analizi gibi genel geçer teknikler değişkenliğin olası nedenlerinin incelenmesinde ve üzerinde çalışılacak kalite karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Çalışmanın uygulama bölümünde gerek neden-sonuç analizine gerekse Pareto analizine ilişkin uygulamalar yer almaktadır.

Değişkenliğin olası sebepleri olan üretim faktörleri belirlendiğinde sıra gürültü faktörleri ve kontrol faktörleri ayrımını yapmaya gelmiştir. Daha sonra Taguchi deneyi, yöntemde belirtilen adımlar durumsal koşullara uyarlanarak uygulanacaktır. Ek bir öneri olarak gürültü faktörlerinin ayrımı yapılırken ürünün sıklıkla kullanılacağı çevresel koşullar gözetilebilir. Örneğin ürün yüksek sıcaklık ve basınç değişimlerinin olduğu çevrelerde kullanılacaksa, bu faktörler üretim sırasında ayarlanabilir olsalar dahi gürültü faktörleri olarak kullanılıp ürün bunlara karşı duyarsızlaştırılmaya çalışılabilir. Deneyin etkinliğini ve kontrolünü kaybetmemek adına gürültü faktörlerinin toplam faktör sayısının yarısını geçmemesi önerilmektedir.

3.3 ÖLÇÜM GÜVENİLİRLİĞİNİN VE DEĞİŞKENLİĞİN ANALİZİ

Yapılacak deney tasarımı tüm iyileştirmeye temel teşkil etmesi açısından oldukça önemlidir ve faktör-seviye sayılarının fazla olduğu yahut seviyeler arası ayar sürelerinin uzun olduğu durumlarda oldukça zahmetli olabilmektedir. Bu bağlamda yapılacak ölçümlerin güvenilirliğinden ve istatistiksel ilkeler gereği değişkenliğin doğasının iyi anlaşıldığından emin olunmalıdır. Zira bir sistemde gözlenen değişkenlik gerçekten sistemin içindeki ürün ve süreçten kaynaklanabileceği gibi ölçüm ve gözlem yönteminden de kaynaklanabilir. Buna göre süreçlerin yeterliliğini ve çıktılarındaki değişkenliği ölçerken ölçüm sisteminden kaynaklanan değişkenliği, toplam değişkenliğin yüzdesi olarak anlamak ve tespit etmek önemlidir. Bu amaç doğrultusunda varyans analizi mantığına dayanan, geçerli ve güvenilir bir yöntem olan gage R&R yöntemi önerilmiştir. Şekil 20 bir sistemdeki toplam değişkenliği, olası sebeplerini ve önerilen ölçüm yöntemlerini göstermektedir.

Şekil 20: Sistemdeki varyasyonun sınıflandırılması ve ölçümü



Yapılan ölçümlerin güvenilirliğinin bir çalışması olan gage R&R, gözlemlenen değişkenliğin ölçüm sistemiyle ilgili kısmını kestirebilmekle ilgilidir. İsmindeki R harfleri tekrarlanabilirliği (repeatability) ve yeniden üretilebilmeyi (reproducibility) ifade etmektedir. Tekrarlanabilirlik aynı operatörün aynı parçayı aynı aletle aynı koşullarda ölçtüğünde gözlenen değişkenlikle alakalı kısımdır. Yeniden üretilebilirlik ise ölçüm sisteminde aynı parçanın farklı koşullarda ya da farklı kişiler tarafından ölçüldüğündeki değişkenliklerle ilgilidir.

Bilimsel çalışmaların çok temel bir dayanak noktası olarak hipotez testi mantığına dayanan varyans analizi yöntemi üretimde kullanılan istatistiksel mantık, yöntem ve araçlara başlangıç noktası oluşturması açısından oldukça önemlidir ve gage R&R çalışmasının da temelini teşkil etmektedir. Bu bağlamda öncelikle varyans analizinden kısaca bahsetmekte fayda vardır. Varyans analizi kısaca bir örneklem kütesinde alt grupların kendi içindeki varyasyonların örneklemin genelindekinden ve birbirlerinden anlamlı bir şekilde farklı olup olmadığını belirlemekte kullanılır (Montgomery, 2009: 140).

Varyans analizi çoklu örneklem incelemeleri ve karşılaştırmaları ile üretimde pek çok alanda güçlü ve uygun analiz yöntemlerine temel teşkil etmektedir. Çıkarımsal istatistik alanında en çok kullanılan yöntemlerden biri olarak çok çeşitli deney tasarımlarının ve istatistiksel araçların analizi için kolaylıkla adapte edilebilmektedir. Bu araçlardan biri de süreçlerde gözlenen değişkenliğin ne kadarının

ölçümden kaynaklandığını kestirmekte kullanılan ve bir nevi ölçüm sisteminin yeterliliğini ölçen gage R&R analizidir (Ciani ve diğerleri, 2016: 125).

Üretim süreçlerinde gözlenen değişkenlik genel olarak ölçülen nesnenin ilgili karakteristiğindeki gerçek değişkenlikten ya da ölçüm sisteminden kaynaklanır. Kalite geliştirme çalışmalarını asıl ilgilendiren ürünün doğasında var olan değişkenlik olduğundan, bunların ölçüm sisteminden kaynaklananlarla ayrımı yapılmalı ve ölçüm sisteminin yeterliliğinin kararı verilmelidir. Bir ölçüm sistemi en minimal haliyle bir ölçüm aleti ve bu aletten alınan sonuçları değerlendiren bir gözlemciden oluşur. Ancak çevresel faktörler, kurulum ve kalibrasyon faaliyetleri yahut bunların etkileşimleri de ölçüm sonucunu etkileyebilir. Etkili ve tarafsız ölçümler kaliteden karar almaya pek çok alanda hayati bir öneme sahiptir ve iş performansı üzerinde doğrudan etkileri mevcuttur. Ölçümlerdeki toplam değişkenlik; σ_T^2 toplam varyans, σ_x^2 parçanın ölçüm karakteristiğindeki varyans ve σ_m^2 ölçüm sisteminden kaynaklanan varyans olacak aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Garcia ve Rio, 2013: 2515):

$$\sigma_T^2 = \sigma_x^2 + \sigma_m^2$$

Toplam varyansın ölçülebilir olduğundan yola çıkarak bileşenlerin oranını belirlemek için σ_x^2 ve σ_m^2 'den biri belirlenmeli ve toplam içindeki oranına bakılmalıdır.

Her bir gözlem noktasındaki ölçüm değeri genel süreç ortalaması, ölçüm aletinin etkisi, ölçen kişinin, aletler arası etkileşimlerin etkisi ve kategorize edilemeyen rasgele hata etkisinden oluşmaktadır. Böyle bir durumda rasgele hatadan kaynaklanan varyans tekrarlanabilirlikle; ölçüm aletinden, ölçen kişiden ve aletler arası etkileşimden kaynaklanan varyans yeniden üretilebilirlikle ilişkilendirilir. Bunların toplamından kaynaklanan σ_m^2 ve gözlenen toplam değişkenlik olan σ_T^2 oranına bakarak ölçüm sisteminin geçerliliğine karar verilir. Genelde %10'un altı kabul edilip %30'un üstü kabul edilmezken, aradaki değerler durumsal koşullar altında değerlendirilir (Garcia ve Rio, 2013: 2515). Ayrıca sistemin isabet ve keskinliği bakımından zamanla ya da değişik koşullar altında orantısı açısından doğrusalılığı, kararlılığı ve yansızlığı diğer karar faktörleridir (Montgomery, 2009: 368). Ölçüm isabetinin mevcut durumu anlamak bakımından ve gelişime temel teşkil etmesi açısından önemi son derece kritiktir.

3.4 TAGUCHI DENEY TASARIMI VE KONTROLÜ

Seçilen projedeki sistem genelindekine nispeten yüksek değişkenlik, çalışacak kişiler ve ölçüm sisteminin güvenilirliği onaylandıktan sonra artık iyileştirme

çalışmasının gövdesini teşkil eden Taguchi'nin deney tasarımı yöntemine geçilebilir. Ölçüm sisteminden kaynaklı değişkenlikler artık göz ardı edilebilir kabul edilecektir. Süreci anlamlı düzeyde etkileyebilecek diğer koşullar zaten kontrol ve gürültü faktörleri olarak belirlenmiş olmalıdır. Bu aşamanın sonucu olarak gürültü faktörlerine karşı en duyarsız ve değişkenliğe karşı en dayanıklı kontrol faktörleri kombinasyonunun bulunması beklenmektedir. Bulunamadığı yahut bir aksilik olduğu takdirde teorik kısımda bahsedilen çeşitli olası sebepler irdelenerek süreç ilgili aşamaya kadar geri götürülüp yeniden başlanabilir. Öngörülene yakın ve mantıklı sonuçlara ulaşılsa dahi bunları faaliyete geçirip üretimi bunlara göre ayarlamadan önce hem kontrol imkanı vermesi açısından hem sürecin içyüzü hakkında çıkarım ve fikir sağlaması açısından çoklu doğrusal regresyon analizi önerilmektedir. Pek çok alanda olduğu gibi üretimde de sıklıkla başvurulanan doğrusal regresyon, tüm tahmin ve çıkarım yöntemlerini önceleyen bir araç olmasıyla, doğrusal ilişkilerin boyutu ve istatistiksel çalışmaların temel mantığını anlamak açısından da ayrıca fikir vericidir. Kontrol faktörlerinin kuvvetle muhtemel seçilen seviyeleri arasında bulunacak olan optimum düzeyleriyle gelecekteki çalışmalara yön tayin edecektir. Ayrıca eş doğrultululuk ve sinerji kavramları üzerinden faktörler arası etkileşimin irdelenmesine de katkıda bulunacaktır.

Çalışma sonucunda bulunan faktörler, mevcut gürültü koşullarında en sağlam tasarımı veren faktörlerdir. Zamanla; farklı iyileştirme çalışmalarıyla, çevresel değişimlerin yahut entropinin etkisiyle bu koşulların seviyelerinin değişebileceği unutulmamalıdır. Bu yüzden yöntem pek çok üretim sürecine uyum gösterebilecek şekilde tekrarlanabilir ve döngüsel bir yöntem olarak tarif edilmeye çalışılmıştır. Yalın, altı sigma ve Taguchi yöntemlerinin pratikte hep birlikte uyumlu ve etkili olabilecekleri varsayımına dayanmaktadır. Bu bağlamda tamamının yöntem ve felsefeleri geçerli olup, uygulamadaki olası boşluklar doldurulmaya çalışılmıştır. Teorik araştırmalarla tespit edilen uyumları ve birbirlerini destekledikleri noktalar yöntemin ana dayanak noktalarını oluşturacak şekilde gözetilmelidir. Öyle ki yalın altı sigma anlayışına göre iyileştirmeler yapıp en iyi potansiyel gelecek durum ile süreçlerdeki karalılık arasındaki ödünleşmeden doğan denge gözetilirken; yöntemin süreç içi kontrol çalışmaları tasarım kısmında Taguchi yöntemiyle desteklenecektir. Süreçler israflardan elenirken sistemde kalan yahut yeni oluşan değişkenliklere karşı Taguchi yöntemiyle sistem sağlamlaştırılacaktır.

İstatistik biliminde ve sosyal alanlardaki kullanımlarında yaklaşık 200 yıllık bir geçmişi olan doğrusal regresyon, nicel bir yanıt değeri ile bir veya daha fazla

açıklayıcı değişken arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak modellemeye yönelik bir yaklaşımdır. Temel fikrini Laplace ve Gauss'un en küçük kareler yöntemlerinden almakla birlikte farklı alanlarda kullanılarak yaygınlaşması Quetelet ile başlamıştır. Basit bir yöntem olmakla birlikte denetimli istatistiksel öğrenmenin en temel yöntemi olarak, iki genel istatistiksel çalışma amacı olan tahmin ve çıkarım açısından çoğunlukla bir hayli kullanışlı olabilmektedir. Dahası iyi bir başlangıç ve temel dayanak noktası olmasıyla diğer pek çok istatistiksel öğrenme yaklaşımı doğrusal regresyonun genellemeleri ve uzantıları olarak görülebilir (Hastie ve diğerleri, 2013: 59). Bu bağlamda doğrusal regresyonu iyi bir şekilde anlamak ve uygulamak pratikte uygunluk gösterip kullanışlı olacağı pek çok durumda sağlanacak fayda yanında daha karmaşık yöntemlere geçmeden bir temel oluşturması ve istatistiksel çalışma mantığını anlamak açısından da oldukça yararlıdır.

Yöntemin kullanım imkanlarını ve amacını anlamak adına, istatistiksel çalışmalarda çoğu zaman cevabı aranan ve regresyonla yanıtlanabilecek birtakım sorular açıklayıcı olacaktır. İlk olarak yapılan gözlem ve toplanan verilerin, yanıt değeri (bağımlı değişken) ile açıklayıcı değerler (bağımsız değişken) arasında bir ilişkiye işaret edip etmediğine ve bu ilişkinin gücüne bakılır. Açıklayıcı değerlerin bağımsız olarak ayrı ayrı yanıt etkileri ve tespit edilen bu etkilerin isabeti irdelenir. Geçmiş gözlemler ışığında gelecekteki durumların yaklaşık olarak nasıl bir isabetle tahmin edilebileceği öngörülür. Tahmin değişkenleri ve yanıt değişkeni arasındaki ilişkinin yaklaşık olarak doğrusal olup olmadığı belirlenir, değilse bile değişkenlerin doğrusallaştırılması gibi birtakım değişimlerle doğrusal regresyon hala kullanılabilir. Ayrıca değişkenler arası etkileşim yahut sinerji etkisi kontrol edilir (Hastie ve diğerleri, 2013: 60).

Genel mantığın anlaşılması ve katsayıların belirlenmesi için tek tahmin değişkeni (X) ve buna bağlı nicel bir yanıt (Y) oluşan basit doğrusal regresyon açıklayıcı olacaktır. Aralarında doğrusal ilişki bulunduğu varsayılan iki değişken, birbiri cinsinden yaklaşık olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$y \approx \beta_0 + \beta_1 x$$

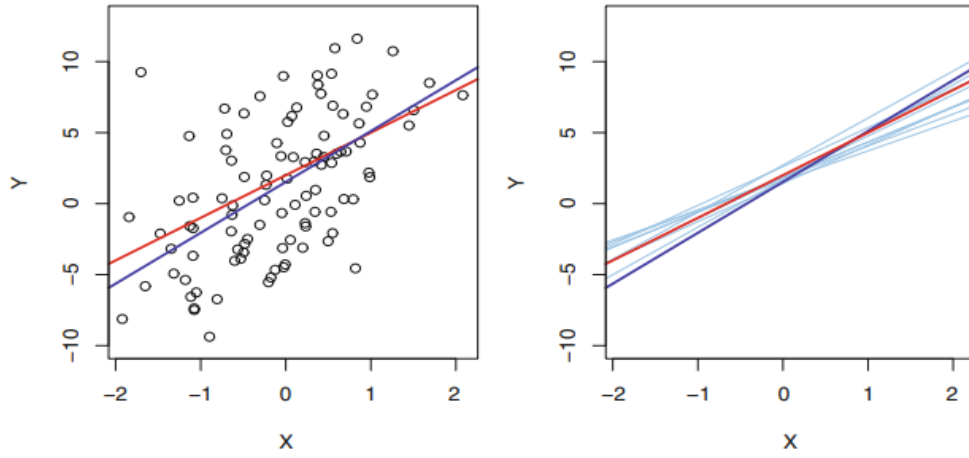
β_0 ve β_1 sırasıyla doğrusal modelin kesen ve eğim parametreleridir. Pratikte çoğu çalışmada tam olarak bilinemediklerinden amaç bunları kestirmek yoluyla X ve Y arasındaki ilişkiyi tahmin etmektir. Bu gösterimde değişkenlerin üzerine şapka sembolleri geldiğinde (örneğin $\hat{y}$ gibi), üstüne geldikleri değer yaklaşık tahmin değeri olduğunu ifade etmektedir.

Amaç X ve Y değerleri bilinen n sayıdaki geçmiş gözleme (eğitme verileri) dayanarak gerçek yanıt değerleri ve tahmin değerleri arasındaki farkı en aza indirerek modeli eğitmektir. Bunun için artık kareler toplamını en küçük yapan β_0 ve β_1 değerleri bulunur. Bu katsayıların tek ve biricik oluşları, her gözlem setine en uygun olup en az hatayı verecek yalnızca tek bir regresyon çizgisi çekilebileceğini ifade eder.

Katsayılar bulunduğunda ilişki modeli kurulmuş demektir, ancak uygulamada anlamlı bir şekilde kullanılabilmesi için bu modelin ve dolayısıyla belirlenen katsayıların isabetinin değerlendirilmesi gerekir. Gözlem örnekleminin eğitme verileri olarak kullanılmasıyla belirlenen regresyon modeline ek olarak, gerçek ilişkiye mümkün olan en iyi çizgisel yakınsama olan popülasyon regresyon çizgisi de normal dağılımlı sıfır ortalamalı bir miktar rasgele hata içerir. Tahmin edilen regresyon çizgisinin gerçek popülasyon modeliyle farkından kaynaklanan indirgenebilir hatalar modelin geliştirilip eğitilmesiyle giderilebilirken, bahsedilen bir kısım indirgenemez hatalar gerçek ilişkinin tam olarak çizgisel olmayışından, hesaba katılamayan faktörlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisinden yahut ölçüm hatalarından kaynaklanabilir. Pratikte popülasyon regresyon çizgisi çoğu zaman tam olarak belirlenemese de popülasyondan alınan veri örneklerinin yeterli boyutta olmasıyla anlamlı düzeyde yakınsanabilir bir hedef noktası teşkil eder. Örneklem ortalamalarının, popülasyon ortalaması değeri etrafında normal dağıldığı ve yansız tahmin değerleri olduğu kabul edilir (Hastie ve diğerleri, 2013: 63-64).

Bu durum kontrol grafikleri ve varyans analizinde kullanılan, μ genel süreç ortalaması için eldeki en iyi tahmin değerinin örneklem ortalamaları olmasına benzetilebilir ve örneklem sayısı yahut örneklemdeki gözlem sayısı arttıkça tahminin isabetinin artması beklenir. Buna göre eski çalışmalar kaydedilip farklı gözlemler yapıldıkça değerlerin ortalamalarının alınması isabeti artıracaktır. Şekil 21'in sol tarafında mavi çizgi örneklem değerleriyle artık kareler toplamını en küçük yapan örneklem regresyon çizgisini, kırmızı çizgi gerçek popülasyon regresyon çizgisini göstermektedir. Sağ tarafında çeşitli örneklemelerden alınan regresyon çizgilerinin eğimlerinin ortalamasının popülasyon regresyon çizgisinin eğimine gittiği görülmektedir.

Şekil 21: Örneklem ve popülasyon regresyon çizgileri



Kaynak: Hastie ve diğerleri, 2013: 64

Bahsedildiği üzere örneklem ortalamaları toplamda popülasyon ortalamasına yaklaşırsa da tek bir örneklemden çıkarılan model aracılığıyla yapılan bir tahmin önemli miktarda hata içerebilir. Bu hatayı ölçmek için standart hata kavramı geliştirilmiştir ve kabaca örneklem değerlerinin gerçek popülasyon değerlerinden ortalama olarak ne ölçüde saptığının bir ölçüsüdür. Gözlem sayısı arttıkça standart hata azalacaktır (Hastie ve diğerleri, 2013: 65).

Gözlem ve ölçümlerden belirlenen tahmini β_0 ve β_1 değerleri ve standart hata miktarlarıyla güven aralıkları oluşturulur. Çoğu uygulamada yeterli görülen ve en sık kullanılan güven aralıklarından biri tahmini değere iki standart hata eklenip çıkarmasıyla oluşturulan %95'lik güven aralığıdır. Buna göre tahmini β ($\hat{\beta}$) değerlerinden iki standart hata fazla ya da eksik aralıkları yaklaşık olarak %95 ihtimalle gerçek popülasyon β değerlerini içerecektir (Hastie ve diğerleri, 2013: 66).

Söz konusu standart hatalar katsayılar üzerinde hipotez testi uygulamak için de kullanılırlar. Regresyonun geçerli olduğunun belirlenmesi için X'teki değişimlerin Y'yi etkilemesi, aralarında bir ilişki olması gerekir. Buna göre sıfır hipotezi β_1 'in sıfıra eşit olduğu ve alternatif hipotez de sıfır olmadığı durum olarak kurulur. Sonuçta regresyonun anlamlı olabilmesi için tahmini $\hat{\beta}_1$ değeri sıfırdan yeterince farklı olmalıdır. Bu uzaklığın yeterliliği de β_1 değerinin tahmin isabetine, dolayısıyla standart hatasına bağlıdır (Montgomery, 2009: 158).

Sıfır hipotezinin reddedilip olası bir ilişkinin saptanmasıyla sıra modelin veriye ne ölçüde uyduğunun ve onu ne kadar ifade edebildiğinin ölçülmesine gelir. Bu ölçü genellikle artık standart hata (residual standard error – RSE) ve R^2 olarak iki bağlantılı

büyüklikle değerlendirilir. RSE indirgenemez hata değerinin bir tahmini olarak yanıt değerlerinin gerçek popülasyon çizgisinden ortalama ne kadar saptığının bir ölçüsüdür ve oluşturulan modelin eldeki veriye uyum eksikliğinin bir ölçüsü olarak düşünülebilir. Eğer modelle ulaşılan tahmin değerleri gerçek çıktı değerlerine yakınsa küçük olacaktır ve oluşturulan modelin verilere uygun olduğu sonucuna varılır. Fakat bir ya da daha fazla gözlem için tahmin değeri gerçek cevap değerinden uzaksa RSE ciddi ölçüde büyük çıkabilir ve modelin veriye iyi uyum göstermediği fikrine ulaşılır. Ancak RSE; çıktı değeri olan Y'nin birimi cinsinden orantılı yahut kıyaslamalı değil, mutlak bir ölçüdür ve duruma göre değişmekle beraber her zaman neyin iyi bir RSE değeri oluşturduğunu kestirmek güçtür (Hastie ve diğerleri, 2013: 69).

Bu noktada R^2 alternatif bir uyum ölçümü sağlar. Determinasyon ya da belirlilik katsayısı olarak da adlandırılan R^2 , varyansın modelle açıklanan kısmının ölçüsünü ifade edecek şekilde Y çıktılarının boyutu ve ölçeğinden bağımsız olarak sürekli 0 ve 1 arasında bir değer alır. R^2 , Y'deki değişkenliğin X tarafından açıklanabilen kısmını ölçmektedir. Yani 1'e yakın R^2 değerleri yanıtta değişimin büyük bir kısmının regresyonla açıklandığına işaret ederken 0'a yakın olanlar değişimin X'le açıklanamayacağını vurgular. Sebebi doğrusal modelin yanlış olması veya içsel varyansın (σ^2) yüksek olması olabilir (Hastie ve diğerleri, 2013: 70).

R^2 ölçümünün RSE'ye göre bir yorumlanabilirlik avantajı sağladığı söylenebilir. Yine de iyi bir R^2 değerinin ne olduğunu belirlemek güç olabilir ve bu durum genel olarak uygulamanın koşullarına bağlı olacaktır. Söz gelimi bir fizik veya biyoloji probleminde olabildiğince çizgisel beklenen bir ilişki düzeyinde R^2 açısından nispeten küçük düşüşler bile bir probleme işaret edebilirken, sosyal alanlarda yahut işletmede hesaba katılamayan faktörler genellikle fazla olduğundan, girdinin yanıtta varyansın küçük bir bölümünü açıklaması bile tatmin edici olabilmektedir (Montgomery, 2009: 159).

Görüldüğü üzere R^2 istatistiği X ve Y arasındaki doğrusal ilişkinin bir ölçüsüdür. Bu noktada korelasyon kavramından da kısaca söz etmekte fayda vardır. Korelasyon da aynı zamanda bir doğrusal ilişki ölçüsüdür. Bu bağlamda bakıldığında basit doğrusal regresyon için korelasyon katsayısının karesinin R^2 istatistiğiyle özdeş olduğu gösterilebilir ($r^2=R^2$). Ayrı kavramlar olmaları bir yanıt değişkenini tahmin etmek için birden fazla bağımsız değişkenin kullanıldığı çoklu doğrusal regresyon analizinde faydalı hale gelmektedir. Korelasyon tek başına yalnızca iki değişken arasındaki çizgiselliği ölçebilmektedir ve daha çok değişken olduğunda toplam etkiye

uygulanmakta yetersiz kalmaktadır. R^2 istatistiği bu rolü doldurmaktadır (Montgomery, 2009: 159).

Basit doğrusal regresyon analizi yöntemin mantığını kavramak açısından oldukça faydalı olsa da çoklu doğrusal regresyon uygulamaları pratikte daha fazla karşılık bulmaktadır. Bir çıktıyı etkileyen birden fazla etken olan bazı durumlarda her bir etken üzerinden tek tek basit doğrusal regresyon uygulansa da faktörler arası sinerji ve korelasyonun olduğu durumlarda bu yöntem oldukça yanıltıcı olabilmektedir. Kısa bir örnekle açıklamak gerekirse bir sahil bölgesinde belli bir zaman aralığındaki dondurma satışlarıyla köpekbalığı saldırıları arasında doğrusal pozitif ilişki belirlenmiştir. Basit doğrusal regresyonla bu artış ve eğim katsayısı güvenilir bir şekilde sıfırdan farklı çıkmaktadır. Gerçekte durum diğer bir faktör olan sıcaklıkların artmasıyla sahile daha çok insan gelmesi, daha çok dondurma satılması ve daha çok köpekbalığı saldırısı gözlenmesinden ibarettir. Çoklu regresyon analiziyle sıcaklık bağımsız değişkeni modele dahil edildiğinde dondurma satışlarının saldırılar üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı tespit edilebilir (Hastie ve diğerleri, 2013: 74).

Benzer şekilde faktörler arası etkileşim, sinerji içeren durumlarda bir ya da daha fazla faktörün modele dahil edilmemesi diğer bir faktörün olduğundan daha büyük yahut daha küçük bir etkiye sahip olduğu sonucunu verebilir. Bu bağlamda isabetli tahminler ve çıkarımlar yapabilmek için birçok durumda çoklu regresyon analizi gereklidir ve başlangıç aşamasında bağımlı değişken üzerinde etkisi olabilecek mümkün olan tüm faktörler belirlenmelidir.

Çoklu doğrusal regresyon her bir açıklayıcı değişkene farklı bir eğim katsayısı (etki boyutu) tanımlayarak en genel haliyle p sayıdaki bağımsız değişken için eş zamanlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon$$

β_j katsayıları diğer bütün bağımsız değişkenler sabit tutulduğunda X_j değişkeninin bir birimlik artışının Y bağımlı değişkeni üzerindeki etkisi olarak yorumlanabilir.

Basit doğrusal regresyona benzer şekilde yöntemi başarılı bir şekilde uygulamak için sırasıyla irdelenmesi gereken sorular vardır. Öncelikle modelin bir anlam ifade etmesi için, belirlenen açıklayıcı değişkenlerden en azından birinin bağımlı değişkenle bir ilişki içinde olduğunun belirlenmesi gerekir. Buna göre sıfır hipotezi tüm eğim katsayı β değerlerinin sıfıra eşit olması üzerine, alternatif hipotez en azından birinin sıfırdan farklı oluşu üzerine kurulur (Montgomery, 2009: 161).

Bağımsız değişkenlerden en azından birinin yanıt değerini etkilediği belirlendikten sonra sıra bunların hangi değer olduğunu belirlemeye gelir. Düşük açıklayıcı değişken sayılarında tüm kombinasyonlarında modeller oluşturulup en isabetlisi seçilebilir. Örneğin iki bağımsız değişken olduğunda ikisini de içermeyen, birini içeren, diğerini içeren ve ikisini de içeren dört model üzerinden seçim yapılabilir. Ancak değişken sayısı arttıkça gereken model sayısı 2^P olmak üzere bu yöntem kullanışsız hale gelmektedir. Bu aşamada kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur. İleri yönlü seçim yönteminde tek bir kesen katsayısı içeren (β_0) boş modelle başlanır ve tüm değişkenler için basit doğrusal regresyon modelleri çizilir. Daha sonra bu modellerde en düşük artık kareler toplamını veren değişken modele eklenir ve bu işlem belli bir eşik isabet aşılanı kadar tekrarlanır. Geri yönlü seçim yönteminde ise başlangıçta model tüm değişkenleri içerir. En yüksek p değerine sahip değişken modelden elendikten sonra kalan değişkenlerle model yeniden kurulur ve yine en yüksek p değerine sahip değişken elenerek yöntem devam eder. Belli bir karar kuralına ulaşıncaya, örneğin kalan tüm değişkenlerin p değerleri belli bir seviyenin altında kaldığında seçim sonlanmış olur. Bu yöntem bağımsız değişken sayısının gözlem sayısından fazla olduğu durumlarda kullanılamazken ileri yönlü seçim kullanılabilir, ancak ileri yönlü seçim de bir nevi doyumsuz bir yöntem olarak sonradan gereksiz hale gelebilecek değişkenleri ilk aşamalarda modele alabilir. Bu duruma bir çare olarak ikisinin de avantajlarından faydalanmak üzere karışık seçme yöntemi geliştirilmiştir. Buna göre ileri yönlü seçimdeki gibi boş modelle başlanır ve en iyi uyumu veren değişkenler teker teker modele eklenir. Modele yeni değişkenler eklendikçe geçmişte eklenen bazı değişkenlerin p değeri artış gösterebilir. (köpekbalığı dondurma örneğinde sıcaklığın eklenmesi gibi) Bu yüzden modele ekleme yapıldıkça bir yandan p değeri belli bir eşik üstüne çıkan değişkenler modelden elenir. Bu şekilde içeride kalan değişkenlerde belli bir p değeri sağlanır (Hastie ve diğerleri, 2013: 78-79).

Modelin uyumunu değerlendirmek için kullanılan RSE ve R^2 ölçüleri çoklu doğrusal regresyonda da geçerlidir ve çok benzer şekilde hesaplanıp yorumlanırlar. Bir fark olarak basit doğrusal regresyonda R^2 değeri bağımlı ve bağımsız değişkenin korelasyonunun karesine eşitken, çoklu doğrusal regresyonda bu değer gerçek çıktı değerleriyle tahmin edilenlerin korelasyonunun karesine ($\text{Cor}[Y, \hat{Y}]^2$) eşit olarak modelin tüm girdi değerlerine göre değerlendirilip olası modeller arasında korelasyonun en büyük olmasını sağlar. R^2 değerlerindeki anlamlı farklılıklar açıklayıcı ve güvenilir olsa da modele yeni değişkenler dahil edildiğinde bunların

model üzerinde anlamlı bir etkisi olmasa dahi R^2 değerleri çok küçük de olsa artış göstermektedir. Bunun nedeni en küçük kareler yöntemine farklı bir değişken eklendiğinde, test verilerinde aynı sonuç alınamayacak olsa da modelin eğitime verilerine daha fazla uyum göstermesi ve R^2 değerinin de eldeki, sonuçları belirli olan bu eğitime verilerinden elde edilmesidir. Bu durum küçük farklarla da olsa tahmin aşamasında yanıltıcı olabilmektedir. Dolayısıyla bu noktada RSE değeriyle birlikte değerlendirilmelidir (Montgomery, 2009: 159-160).

Modeller eğitilip uygunlukları kontrol edildikten sonra yapılan tahminlerin ne ölçüde güvenilir olduklarını belirlemek gerekmektedir. Verilerle eğitilen en küçük kareler düzleminin gerçek popülasyon regresyon düzleminin yaklaşık bir tahmini olduğu unutulmamalıdır ve aralarındaki fark indirgenebilir hatadır. Buna ek olarak doğrusal modeller uyarlandıkları neredeyse her gerçek durumda bir yakınsamadır ve en iyi model kurulduğunda bile giderilemeyen bu indirgenemez hataya model sapması veya yanlılığı (model bias) denir (Montgomery, 2009: 166). Bu sistematik olmayan, rasgele hatadan ötürü gerçek β katsayı değerleri bilinse dahi tahminler gerçek değerlerden sapmalar gösterecektir. Bu sapmaların aralığını belli olasılıklar altında belirlemek için tahmin aralıkları kullanılır. Bu aralıklar güven aralıklarından farklı olarak hem indirgenebilir hem indirgenemez hataları göz önünde bulundurdıklarından güven aralıklarından geniş olacaktır. Bir başka deyişle en iyi eğitilmiş modelin sonucu istenen olasılıkla belli bir güven aralığına düşecekken, gerçek sonuç tahmin aralığına düşecektir.

Doğrusal regresyon teorik zemininde gerçek hayat uygulamalarında çoğu zaman ihlal edilen iki temel varsayıma dayanır. Bunlar bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin toplanabilir ve doğrusal olduğu varsayımlarıdır. Toplanabilirlik varsayımına göre bir bağımsız değişkenin yanıt üzerindeki etkisi diğer değişkenlerin değerlerinden bağımsızdır. Doğrusallık varsayımına göre ise bir bağımsız değişkendeki bir birimlik artışın yanıt üzerindeki etkisi o bağımsız değişkenin hangi değerde olduğundan bağımsızdır. Bu varsayımları ciddi düzeyde ihlal eden durumlara karşı modeli düzeltmek ve genişletmek için çeşitli yöntemler mevcuttur (Hastie ve diğerleri, 2013: 86-87).

En yaygın olarak karşılaşılan durumlardan birinde bir faktörün çıktı üzerindeki etkisi diğer bir faktörün hangi değeri aldığından etkilenebilir. Bu durum faktörler arası etkileşim veya sinerji etkisi olarak adlandırılır. Böyle bir durumda modele faktörlerin çarpımından ve bir katsayıdan oluşan etkileşim terimi eklenir. Gerçekten etkileşim

içeren sistemlerde etkileşim terimi modele dahil edildiğinde modelin isabet düzeyi önemli ölçülerde artabilmektedir.

Toplanabilirlik ihlalleriyle etkileşim terimi yoluyla başa çıkıldığı gibi doğrusallık ihlali içeren durumlara göre de bir takım basit düzeltmeler uygulanabilir. Örneğin bazı durumlarda çıktı bir bağımsız değişkenin karesi yahut daha yüksek dereceleriyle oranlandığında daha isabetli sonuçlar alınabilmektedir. Böyle durumlarda doğrusal model söz konusu bağımsız değişkeni ve söz konusu bağımsız değişkenin gereken kuvvetlerini farklı bir değişkenmiş gibi içerecek şekilde genişletilir. Doğrusal regresyonun doğrusal olmayan durumları kapsayacak biçimde bu şekilde genişletilmesine polinamiyal regresyon denir (Hastie ve diğerleri, 2013: 90-91).

Pratik uygulamalarda karşılaşılabilecek bir diğer önemli problem hata terimlerinin korelasyon içermediği varsayımının ihlalidir. Gözlem noktalarının indirgenemez hata terimleri arasında korelasyon olan durumlarda tahmini standart hatalar gerçek standart hatalardan düşük çıkar. Sonuç olarak tahmin ya da güven aralıkları olması gerektiğinden daha fazla daralır ya da %95 ihtimalle bir güven aralığında bulunması beklenen gerçek değer aynı güven aralığında çok daha düşük bir olasılıkla bulunabilir. Ek olarak bazı parametreler öyle olmasalar dahi istatistiksel açıdan anlamlı görünebilirler, kısacası modelin güvenilirliği tüm boyutlarıyla azalır. Uygulamada bu gibi problemlere genellikle zaman serilerine göre yapılan ölçümlerde veya bir sebepten ötürü tekrarlayan örüntülerin olduğu durumlarda rastlanır. Sonuç olarak rasgele hataların korelasyon içermeme varsayımı istatistiksel çalışma mantığı açısından oldukça önemlidir ve olası risklerinden kaçınmak istatistiksel mantık içinde tutarlı olarak tasarlanmış deneylerle mümkündür (Hastie ve diğerleri, 2013: 94).

Uygulamada ihlaline neden olunabilecek bir diğer önemli varsayım hata terimlerinin varyansının sabit olmasıdır. Standart hatalar, güven aralıkları ve hipotez testlerinin uygulanabilmesi bu varsayıma dayanır. Pratikte sıklıkla karşılaşılan bu değişen varyans durumu dilimize de farklıserpilimsellik (*heteroscedasticity*) olarak geçmiştir. Buna göre hata miktarı bazı durumlarda yanıt değerinin artışıyla birlikte artış gösterebilir. Bir çözüm olarak Y yanıt değeri $\log Y$ yahut $\sqrt{Y}$ gibi konkav fonksiyonlarla dönüştürülüp regresyonda kullanıldığında, büyük Y değerlerindeki hatalar ciddi ölçüde düşer ve farklıserpilimsellik azalır (Yalta, 2007: 48-65).

Pratikte sık karşılaşılan bir başka problem aykırı değerlerdir. Çeyrekler arası mesafe kuralının yanı sıra artık grafikleri yardımıyla kolaylıkla tespit edilebilirler. Uygulamada tek yahut az sayıda olduklarında model katsayılarını ve uyumunu önemli ölçüde bozmasalar da modelin görünürdeki isabetini ve güvenilirliğini ciddi anlamda

düşürebilirler. Dolayısıyla sebepleri araştırılarak giderilmelidirler. Ölçüm hatasından kaynaklanıyorsa doğrudan kaldırılabilirler. Bunlar genellikle olağan bağımsız değişken değerlerindeki olağandışı bağımlı değişken değerleridir. Benzer şekilde yüksek kaldırma noktaları olağandışı seviyedeki bağımsız değişken değerlerini ifade eder. Genellikle modelin verinin geneline uyumu üzerinde daha büyük etkileri vardır. Bu bağlamda tespit edilmeleri önemlidir. Basit doğrusal regresyon analizlerinde bu durum nispeten kolay ve görünürken çoklu regresyon analizinde zorlayabilmektedir. Nedenine kısaca değinmek gerekirse, bir gözlem noktasının açıklayıcı değişkenlerinin aldıkları değerlerden her biri ayrı ayrı diğer gözlemlerdekilerle yakın bir değer alsalar da bir düzlem ya da uzaydaki öbek olarak düşünüldüklerinde topluluktan uzakta olabilirler. Özellikle üçten fazla değişken olduğunda görselleştirmek de olanaksız hale geleceğinden kaldırma istatistiği (h_i) yöntemi geliştirilmiştir (Hastie ve diğerleri, 2013: 98).

Son olarak eş doğrultululuk (collinearity) yahut doğrudanlıktan söz etmekte fayda vardır. Bu durum iki veya daha fazla bağımsız değişken birbiriyle ilişkili olduğunda baş gösterir ve regresyon analizinde yanıt üzerindeki bireysel etkilerini ayırmanın zorunluluğundan ötürü problem yaratır. Bu durum söz konusu olduğunda katsayı tahminlerindeki en ufak sapmaların artık kareler toplamında büyük farklara yol açabildiği görülmektedir. Bu da katsayı tahminlerinde büyük bir belirsizliğe yol açabilir (Hastie ve diğerleri, 2013: 99-100).

Eş doğrultululuk katsayı tahminlerinin isabetini düşürdüğünden standart hatalarının artmasına neden olur ve gerçekte sonuç üzerinde etkili olan bazı değişkenlerin etkisini maskeleyerek regresyon performansını önemli ölçüde düşürür. İki bağımsız değişken arasındaki eş doğrultulu olma durumunu tespit etmek korelasyonlarını incelemek üzerinden nispeten kolaydır. Ancak çoklu eş doğrultululuk durumu söz konusu olduğunda, yani herhangi ikisi arasında yüksek korelasyon gözlenmeyen üç veya daha fazla değişken yüksek boyutta eş doğrultululuk içerdiğinde, bu durumun tespiti için daha iyi bir yöntem varyans enflasyon faktörü (variance inflation factor-VIF) olmaktadır (Hastie ve diğerleri, 2013: 102). Bu faktör her değişkenin tahmini eğim katsayısı için ayrı olarak hesaplanır ve tüm değişkenleri içeren tam dolu modeldeki tahmini değişken katsayılarının varyansının çıktığı tek başına belirlemeye çalıştığı basit doğrusal regresyondaki tahmini değişken katsayısı varyansına bölünmesiyle bulunur. Buna göre mümkün olan en küçük değeri 1 olmakla birlikte, pratikte açıklayıcı değişkenler az da olsa bir miktar korelasyon

içereceklerinden değer 5 veya 10'u geçtiği zaman sorun yaratabilecek bir eş doğrultululuktan şüphelenilir (Hastie ve diğerleri, 2013).

Değişkenler arası eş doğrultululuk belirlendikten sonra sezgisel olarak dahi uygulanabilecek iki basit çözüm mevcuttur. İlk olarak; çoğunlukla ikili değişken içeren durumlarda, sorunlu değişkenlerden biri modelden çıkarılabilir. Bu genellikle regresyon başarısından çok az taviz vererek yapılabilir; çünkü çıkarılan değişkenin yanıt üzerindeki etkisi eş doğrultulu olduğu, sistemde kalan değişken tarafından temsil ediliyor olacaktır. Bir diğer yöntemde eş doğrultulu faktörler ortalama etkileri doğrultusunda tek bir yeni değişken altında birleştirilerek modele dahil edilebilir (Hastie ve diğerleri, 2013: 102).

Doğrusal regresyonun ve çeşitli durumlara göre yöntemin genişletilmelerinin iyi anlaşılması deney tasarımı çalışmalarında pek çok durumda oldukça faydalı olacaktır. Örneğin sık karşılaşılan bir durumda; gürültü faktörleri üretim sırasında kontrol edilemeyen faktörler olsalar da deney sırasında kontrol edilebilmeleri beklenirken tam olarak edilemediği, seviye sayısından daha fazla salınım gözlenen durumlarda deney tasarımında doğrusal regresyondan yararlanılır.

Şekil 22 bu durumu bir örnek üzerinden açıklamaktadır. Buna göre etkileşim ve doğrusal olmayan faktörleri de hesaba katarak çıktıyı en iyi açıklayan genel model, tablonun hemen altında gösterildiği üzere belirlenmiştir. Kontrol faktörlerinin sabit seviyelerinin her birinde, çıktı değeri gürültü cinsinden ifade edilecek şekilde grafikte gösterildiği gibi çizildiğinde; gürültüye karşı en sağlam faktör seviye seçiminin $x_A=-1$ ve $x_B=0$ olduğu, nispeten sağlam şekilde en yüksek çıktı değerini veren $x_A=-1$ ve $x_B=1$ olduğu ve en düşük çıktı değerini veren $x_A=-1$ ve $x_B=-1$ olduğu görülmektedir.

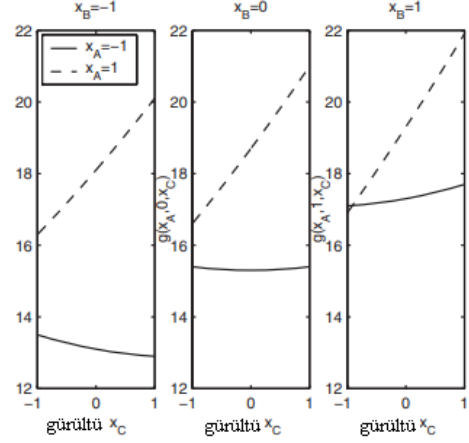
Şekil 22: Deney tasarımımda yüksek salınımlı gürültü faktörlerine karşı regresyon kullanımı

Kontrol		Gürültü	Yanıt
A	B	C	y
-1	-1	-0.8	22.1
1	-1	0.4	22.7
-1	1	1.1	24.3
1	1	-1.3	8.7
-1	-1	-0.7	22.3
1	-1	-0.5	12.1
-1	1	0.1	23.1
1	1	1.7	26.3

$$y = 17.0 + 1.7x_A + 1.3x_B + 1.1x_C - 0.7x_{AB} + 1.1x_{AC} + 0.3x_{BC} + 0.1x_C^2 + \epsilon$$

$$\left. \begin{array}{l} y = 13.3 - 0.3x_C + 0.1x_C^2 + \epsilon \text{ if } x_A = -1 \\ y = 18.1 + 1.9x_C + 0.1x_C^2 + \epsilon \text{ if } x_A = 1. \end{array} \right\} x_B = -1.$$

$$\left. \begin{array}{l} y = 15.3 + 0.1x_C^2 + \epsilon \text{ if } x_A = -1 \\ y = 18.7 + 2.2x_C + 0.1x_C^2 + \epsilon \text{ if } x_A = 1. \end{array} \right\} x_B = 0$$



Kaynak: Arner, 2014: 118-120

Çalışmanın dördüncü bölümünde, bu bölümde önerilen metodoloji doğrultusunda yapılmış olan bir uygulamaya yer verilmiştir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

YALIN ALTI SİGMA YAKLAŞIMININ TAGUCHİ YÖNTEMİYLE DESTEKLENMESİNE YÖNELİK BİR UYGULAMA

Taguchi yaklaşımı ile desteklenmiş bir yalın altı sigma uygulamasının işletme performansına önemli katkısı olacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda bu yaklaşımların birlikte kullanılmasına bir örnek teşkil etmesi açısından bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

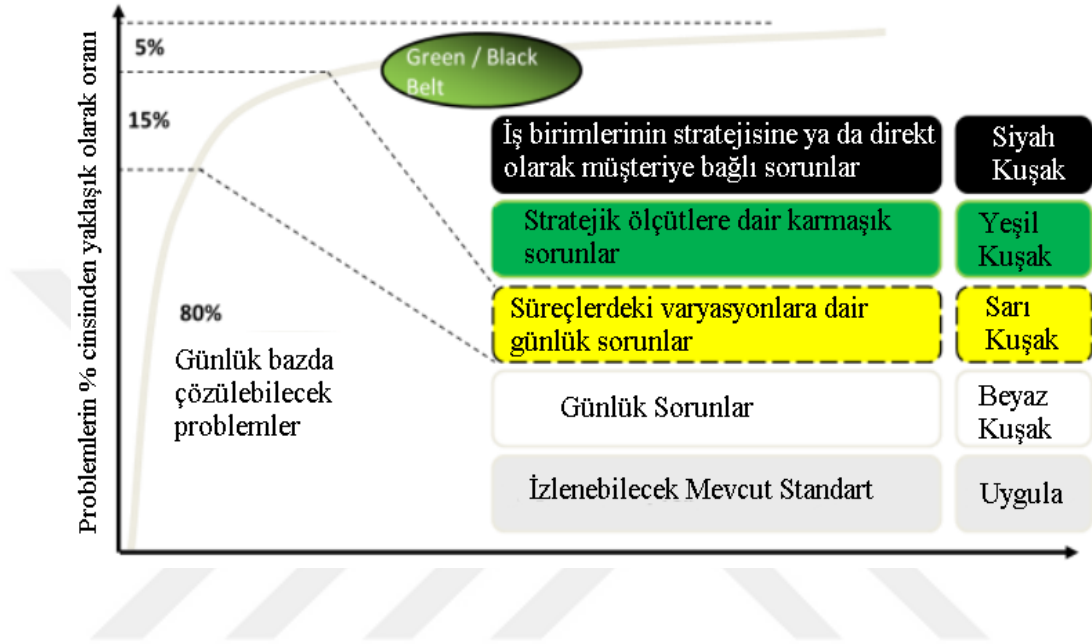
4.1 İŞLETMENİN TANITIMI

Kalitenin kontrolünün ve sağlanmasının zaman içinde çıktılarından süreçlere ve sonrasında tasarım aşamasına kadar desteklenmesinin günümüz koşullarındaki gereğine, istatistiksel düşüncenin üretimde artan önemine ve bunlara bağlı olarak etkili bir deney tasarımı yaklaşımının yalın ve altı sigma anlayışlarıyla uyum içinde yarar sağlayabileceğine dikkat çekmek adına; uygulama yapılacak şirketin yalın ve altı sigma prensiplerini benimsemiş ve bir süredir başarılı bir şekilde uygulayan olgun bir çevre olmasına öncelikli olarak dikkat edilmiştir.

Bahsedilen kaygılar doğrultusunda seçilen şirket yıllık 4.500.000 jant kapasitesiyle ve %10'u beyaz yakalı olmak üzere yaklaşık 1000 çalışanıyla Türkiye'nin en büyük jant üreticilerinden biri konumundadır. 2007 yılında yalın üretim felsefesini benimseyen şirket 2011 yılında altı sigma prensiplerinin de eklenmesiyle yaklaşık on yıllık bir süredir yalın altı sigma anlayışı temelinde yönetilmektedir. Bu süre zarfında yalın ilkelerin tüm çalışanlar tarafından anlaşılıp benimsenmesi en çok önemsenen ve üzerinde durulan konulardan biri olmuş; iş süreçlerinin muhatapları tarafından sahiplenilmesi çeşitli eğitim ve teşviklerle desteklenmiştir. Buna bağlı olarak otonom bakım, 5S ve kalıp değiştirme süresi azaltma çalışmaları mevcut durumda hala en sık uygulanan yalın üretim yöntemleridir. Bunlara ek olarak altı sigma yaklaşımı kapsamında çeşitli çalışanlara her yıl düzenli olarak uzman kara kuşak, siyah kuşak ve yeşil kuşak altı sigma eğitimleri verilmekte ve bu eğitimler çok sayıda altı sigma projesiyle karşılıklı olarak birbirlerini desteklemektedir. Söz konusu altı sigma iyileştirme projeleri yetki ve yeterlilik bağlamında çeşitli seviyelerden katılımcılar gerektirebilmekle ve çeşitli kazanımlar sağlamakla beraber; bu projelerin yaklaşık %25'lik bir kısmı beyaz kuşakların, %30-35'i sarı kuşakların, %20-25'i yeşil kuşakların ve %15-20'si siyah ve uzman siyah kuşakların eğitiminde kullanılmaktadır.

Özel amaçlı olarak çalışanların eğitiminde yol gösteren bu projelerin bahsedilen oranlarına karşın üretimde günlük bazda karşılaşılan sorunların oranı ve muhatapları Şekil 23'teki gibidir. Şekil şirketin operasyonel mükemmellik rehberinden alınmıştır.

Şekil 23: Üretimde karşılaşılan problemlerin yaklaşık oranı ve ilgili sorumlular



Yapılan araştırma ve görüşmeler doğrultusunda çalışma çevresi önerilen metodolojiyle ortak bir yöntem ve uygulama yürütme konusunda uygun görünmektedir. Şekilde görüldüğü üzere kurumun iyileştirme kültüründe yüksek oranda yer tutan günlük bazdaki yalınlaştırma çalışmaları ve nispeten basit sadeleştirmeler her departmanda en sık uygulanan çalışmalar olarak gelişime temel teşkil etmektedir. Yalın üretim gereği israfların sıklıkla elendiği bu süreçlerde elde edilen getiri, ürünlerde kaliteyi artırma ve müşteri değeri yaratma noktasında Taguchi yöntemiyle desteklenecektir.

4.2 UYGULAMANIN AMACI, KAPSAMI VE YÖNTEMİ

Uygulama çerçevesinde işletmede yalın altı sigma kapsamında gerçekleştirilen iyileştirme projelerinden çıktı karakteristiklerini en fazla etkileyecek olan projenin seçilerek optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Ortaya koyulan metodolojinin daha yaygın uygulanması işletmenin genel başarısı açısından daha önemli sonuçlar ortaya koyma potansiyeli taşısa da gerek uygulamada bir örnek oluşturması açısından, gerekse işletme kaynaklarının kısıtları doğrultusunda

uygulama kapsamı sınırlı tutulmuştur. Uygulamada izlenecek yol, çalışmanın metodoloji ile ilgili kısmında açıklandığı şekilde olup, temel olarak aşağıdaki adımları içermektedir:

- İyileştirme projelerinin incelenmesi
- Proje ekibinin belirlenmesi
- Görüşmeler yoluyla çıktı kalite karakteristiklerinin değerlendirilmesi
- Kalite faktörlerinin belirlenmesi
- Deney tasarımı ve taguchi analizi
- Deney sonuçlarının kontrolü ve uygulamaya geçilmesi

4.3 UYGULAMANIN KISITLARI

İşletmenin kendi kurumsal alışkanlıklarına ve oturmuş yöntemlerine ek olarak Taguchi analizi gibi nispeten maliyetli ve karmaşık bir projeyi yürütmek, yüksek iş hacmi düşünüldüğünde maliyet-getiri ölçeklendirmesinde kabul edilebilir olmakla beraber, önerilen metodolojinin adım adım uygulanmasında yetki alanı bağlamında birtakım kısıtlamalar söz konusu olmuştur.

Uygulama aşaması pandemi sürecinde ve kapanma zamanlarında çoğunlukla uzaktan yürütülmek durumunda kalmıştır. Bu durumun getirdiği birtakım kısıtlamalarla beraber bundan bağımsız olarak şirket isminin paylaşılmasına, fabrika içinden görüntü alınmasına, bazı verilerin kayıt altına alınmasına ve bütçe paylaşımına müsaade edilmemiştir. Ayrıca önerilen metodolojiye göre tam olarak uygulanamayan bazı durumlar oluşmuştur. Örneğin süreçlerin son yapılan değişikliklerden etkilenme dereceleri yakın olacağı ve seçilen sürecin önceliği belirtilerek, proje seçiminde değişkenlik maliyet kıyaslamasına gerek görülmemiştir. Ortogonal dizi seçiminde teoride L8 ya da L12 diziler yeterli görünse de L16 dizi kullanılmıştır ve bu durum örneklem büyüklüğüyle kontrol aşamasının isabetini kullanılabilir düzeyde artırmıştır. Proje seçiminde değişkenliği yüksek süreçlerin belirlenmesinde önerilen kontrol grafikleri yerine kutu diyagramı kullanılmıştır. Ayrıca ölçülen kalite karakteristiği ve ölçüm yönteminin doğası gereği ölçülen her parçanın hurdaya çıkması nedeniyle, ölçüm güvenilirliğinin teyidi ve varyans analizi için arzulanan sayıda ölçüm ve deney yürütülemedi; ölçüm sistemlerine güvenilerek ölçüm güvenilirliğinin teyidi için Gage R&R çalışmasına şirket tarafından gerek görülmemiştir.

4.4 UYGULAMA AŞAMALARI

4.4.1 Projenin Seçimi

Deney tasarımı projesinin seçiminde müşteri için değer yaratmak ve buna bağlı olarak yüksek değişkenliğe karşı sistemin öngörülen sağlamlaştırılma düzeyi kritik karar faktörü olacaktır. Bu bağlamda kullanılan metodolojiyle örtüşecek biçimde son zamanlarda uygulanan, Şekil 23'te görülen %80'lik bölüme giren, günlük ve haftalık bazda yürütülen nispeten basit beyaz ve sarı kuşak iyileştirmeleri araştırılmıştır. Tarihleri net olarak ifade edilmemekle beraber 2020 yılının Temmuz ayından 2021 yılının Nisan ayına kadar yaklaşık dokuz aylık bir süre zarfında yalın altı sigma kapsamında uygulanan dökümhane projelerine ulaşılmıştır.

Buna göre öncelikle en büyük bekleme israfı olarak kalıp kaynaklı dökümhane duruşlarının azaltılmasına çalışılmıştır. 25 dakika süren kalıp sökme takma işinin farklı tip mengene (clamping) sistemleriyle 5 dakika civarına düşürülmesi sağlanmıştır. Ocak dışı ısıtma üniteleri yoluyla kalıp ısıtma süreleri azaltılması çalışması yapılmıştır. Döküm ocağı filtre değişiminin otomasyonu sağlanmıştır. Bir *heijunka* çalışması olarak Arena simülasyon programı ile robot ve tezgahların senkronizasyonu sağlanarak çevrim süreleri dengelenmiştir. Kalıphanedeki taşıma israflarının elenmesi amacıyla FIFO (ilk giren ilk çıkar-first in first out) sistemine göre yerleşim düzeni ayarlanmıştır. Dökümhane faz basınçları ve faz süreleri optimizasyonu çalışması yürütülmüştür. Forkliftten inmeden, Internet üzerinden komut ile ocak kapağı açma kapama sistemiyle çevrim başına 20 saniye kazanım ile ocak açma kapama süreleri optimize edilmiştir. Metal yokluğu kaynaklı duruşların sıfırlanması için ocak içinde kalan metal seviyesinin ölçümü ve kritik seviye analizleri geliştirilmiştir. Ayrıca ocak tesisatının sadeleştirilmesi yoluyla temizlik ve bakım süreleri önemli ölçüde azaltılmıştır. Bahsedilen bu ana başlıklar dışında operatör ve teknisyenlerin otonom bakım gereği yetki alanları dahilinde günlük bazda *kaizen* faaliyetleri uygulama konusunda teşvik edilip desteklendiği belirtilmiştir.

Söz konusu iyileştirme projelerinden çıktı kalite karakteristiklerini etkileyebilecek olanlar dökümhane şefiyle beraber soru cevap yöntemiyle irdelenmiştir. Faz basınçları ve faz süreleri optimizasyonu çalışmasının çıktıya doğrudan etki edeceğinin belirlenmesinin yanında, kalıp ısıtma yönteminin değiştirilmesi ile kalıp söküp takma sürelerinin azaltılmasının döküm sırasındaki ortalama kalıp sıcaklığını etkileyerek kısmen de olsa çıktıyı etkileyebileceği

belirtilmiştir. Yine kısmi bir etki olarak ocak tesisatının sadeleştirilip temizlik ve bakım sürelerinin azaltılmasının ve filtre değişimi sıklığının alaşım saflığını ve buna bağlı olarak ürün kalite karakteristiklerini etkileme ihtimali mevcuttur. Bahsedilen çalışmalar zaman ve maliyetten önemli ölçüde kazanç sağlasa da bazıları süreçlerin çehresini etkilediklerinden, zararları kazanıma görece düşük de olsa çıktılar üzerinde değişkenlik yaratabileceklerdir.

Burada sektördeki kritik kalite ölçütlerinden kısaca söz etmekte fayda vardır. Literatürde sık karşılaşılan yüzey pürüzlülüğü ve paslanma çalışmalarına ek olarak jant üretiminde çıktı kalite karakteristikleri arasında en önemlilerinden biri mukavemettir. Mukavemetin ölçümüne dair üç önemli parametre; plastik deformasyona uğramayacak şekilde elastik olarak esneyebileceği yani şekli kalıcı olarak bozulmadan orijinal şekline dönebileceği en yüksek yük miktarını belirten akma dayanımı (yield strength), kopma ya da kırılma gibi bütünlük bozulması gözlenmeden katlanabileceği en yüksek yük miktarını belirten çekme dayanımı (ultimate tensile strength) ve bu ikisi arasında gözlemlenebilecek kopmadan yahut kırılmadan hacmindeki mümkün olan en yüksek değişimi ifade eden uzama (elongation) olarak ifade edilebilir. Söz konusu parametreler günlük kullanımda konforu ve ürün güvenilirliğini etkiledikleri gibi can güvenliği ve insan hayatını doğrudan ilgilendirdiklerinden ayrıca elzemdir. Öyle ki akma ve çekme dayanımları jantın işlevsel bir şekilde kullanılabilmesi ve efektif ömrü açısından önem arz ederken, olası bir sorun özellikle yüksek hızlarda insan hayatı açısından da çok ciddi sonuçlar doğurabilir. Dolayısıyla bu özelliklerin mümkün olan en yüksek seviyelerde tutulması gerektiği gibi ayrıca parçanın boyuna oranla yüzde cinsinden ifade edilen uzama değerinin de olabildiğince yüksek olması beklenir. Bu durumun en kritik sebebi ise olası bir kaza anında jantlar, boylarındaki kırılmadan maruz kaldıkları değişimle doğru orantılı bir yükü absorbe ederler ve çarpmanın etkisini uzamaları oranında sönümlerler. Bu bağlamda akma ve çekme dayanımlarının olabildiğince yüksek olması beklendiği gibi eş zamanlı olarak uzama değeri de yüksek olmalıdır. Söz konusu özellikler dökümde kullanılan alaşımla doğrudan ilgili olduğu gibi molekül yapısını ve dizilişini etkileyen soğuma hızı ve soğuk işlem gibi süreçle ilgili faktörlerden de etkilenir.

Yaklaşık dokuz aylık zaman zarfında bahsedilen çalışmalar süresince kritik çıktı karakteristikleri en çok etkilenen süreç, Model 8498 ALSi7 alaşım jant döküm süreci olarak belirlenmiştir. Tablo 4 kritik kalite karakteristiği olarak feder, göbek ve arka flanş uzaması üzerinden uygulanan kalite kontrol testlerini tarihleriyle

göstermektedir. Beklendiği üzere süreçlerde, gerekli çıktı özelliğindeki sürekli bir düşüşten ziyade değişkenlik oldukça artmış ve bu durum sigma kalite düzeyini olumsuz yönde etkilemiştir. Tablo 5 ile Şekil 24 ve 25 modelin toleranslarıyla beraber süreç ortalamalarını ve dağılımlarını; ayrıca kırmızı kesikli çizgilerle bu toleranslar ve şirket kalite yönetimi gereği standart sapmaları göz önünde bulundurarak ortalamaların ulaşması gereken seviyeleri göstermektedir. Kritik kalite karakteristiklerinin tamamı en yüksek en iyi özelliğinde olduklarından toleranslar alt sınır olarak verilmektedir.

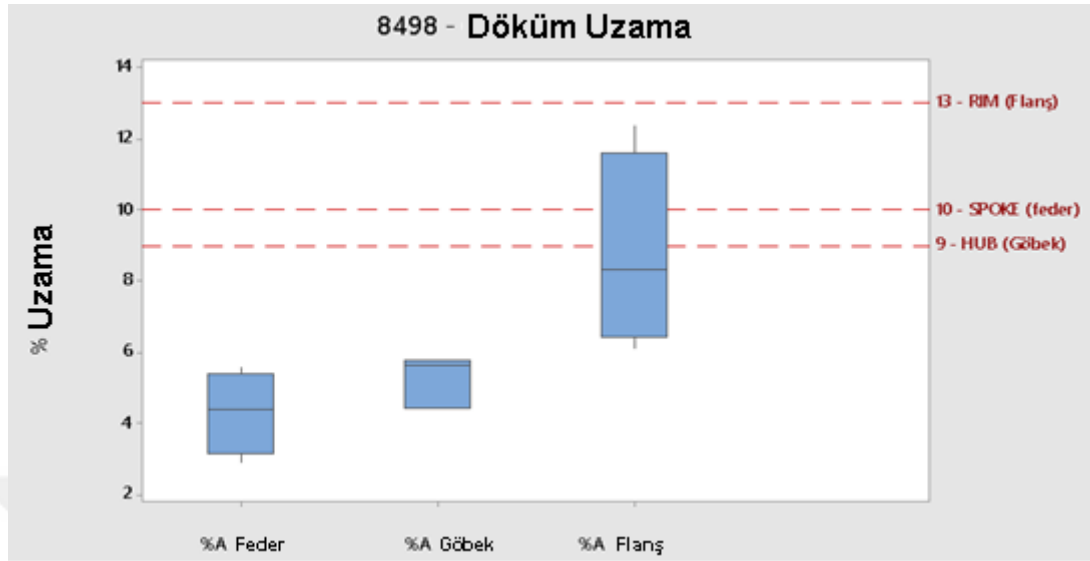
Tablo 4: Model 8498 uzama testleri

Döküm Tarihi	Isıl İşlem Tarihi	Boya Tarihi	Test Tarihi	Ay	Fabrika	Durum	%A Feder	%A Göbek	%A Arka Flanş
11.07.2020	11.07.2020	-	20.07.2020	7	J2	Isıl İşlem	2.45	2.41	9.76
27.07.2020	-	-	31.07.2020	7	J2	Döküm	2.91	2.33	9.2
30.07.2020	3.07.2020	-	31.07.2020	7	j2	Isıl İşlem	3.23	2.5	8.01
12.08.2020	12.08.2020	-	12.08.2020	8	J2	Isıl İşlem	4.1	4.22	7.85
5.09.2020	5.09.2020	-	5.09.2020	9	J2	Isıl İşlem	3.07	1.45	14.33
8.09.2020	8.09.2020	-	11.09.2020	9	J2	Isıl İşlem	2.8	2.1	9.89
20.09.2020	20.09.2020	-	20.09.2020	9	J2	Isıl İşlem	2.15	2.95	6.89
24.10.2020	-	-	24.10.2020	10	J2	Döküm	5.58	5.66	12.36
28.10.2020	-	-	29.10.2020	10	J2	Döküm	4.82	5.77	7.45
29.12.2020	29.12.2020	-	29.12.2020	12	J2	Isıl İşlem	3.46	1.29	7.16
20.01.2021	20.01.2021	-	20.01.2021	1	j2	Isıl İşlem	1.89	1.55	6.6
30.01.2021	30.01.2021	-	4.02.2021	2	J2	Isıl İşlem	4.85	3.77	11.43
5.02.2021	5.02.2021	-	6.02.2021	2	J2	Isıl İşlem	2.21	0.88	8.75
15.03.2021	15.03.2021	-	16.03.2021	3	J2	Isıl İşlem	4.85	2.86	9.59
27.03.2021	-	-	29.03.2021	3	J2	Döküm	3.94	4.43	6.09

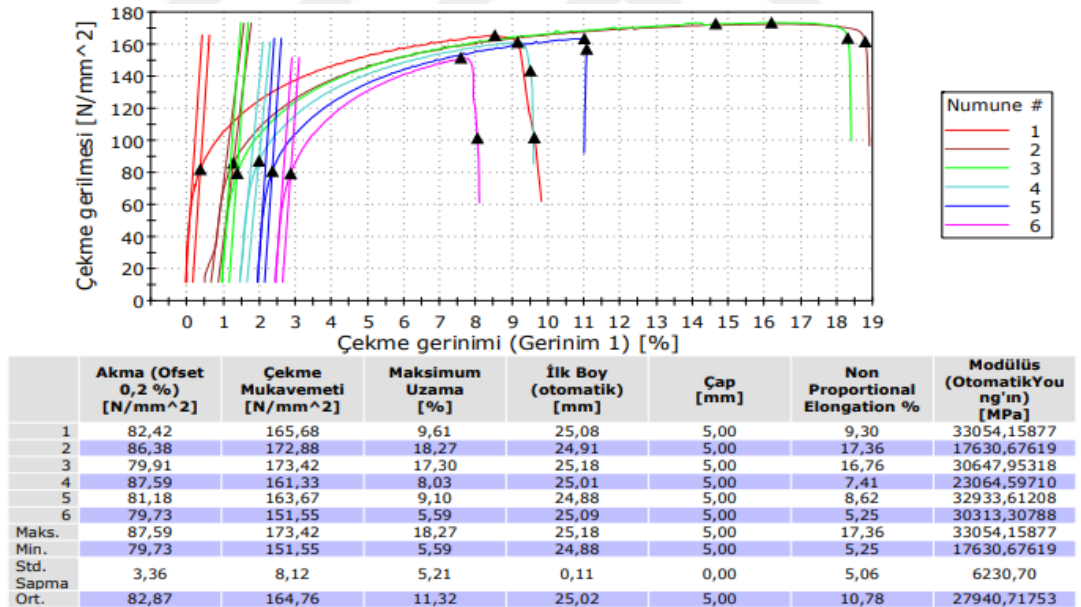
Tablo 5: Model 8498 toleranslar

Müşteri	Alaşım	Isıl İşlem	Şartname	Uzama (%)						
				Feder	Göbek	Arka Flanş	Ön Flanş	Lastik Yüzeyi		
PSA	AlSi7	VAR	B54 2110	4	3	7	7	-		
	Akma Dayanımı - R _{p0.2} (Mpa)					Çekme Dayanımı - R _m (Mpa)				
	Feder	Göbek	Arka Flanş	Ön Flanş	Lastik Yüzeyi	Feder	Göbek	Arka Flanş	Ön Flanş	Lastik Yüzeyi
	80	80	80	80	-	160	160	190	190	-

Şekil 24: Döküm modellerin uzama testi ortalama, dağılım ve hedef değerleri



Şekil 25: Süreçten alınan altı farklı numune grubunun kritik göstergelerdeki performansı



Özellikle Tablo 4'e dikkatle bakıldığında ani artışlar ve 3-4 deneme sonra eğimi azalarak azalan düşüşler göze çarpabilir. Bu durum yalın projelerin ilk etkisiyle iyileşme sağlanan süreçlerin zamanla hızının azalarak kararlı hale dönmesine benzetilebileceği gibi etkili bir tasarruf uğrunda kaliteden az bir miktar feragat edildiğini ifade edebilir. İki durumda da peşi sıra uygulanan projelerin bireysel ve birbirleriyle olan ilişkilerinin etkilerini ayrı ayrı kestirmek süreç konusunda oldukça tecrübeli

Çalışanlar açısından bile güçtür. Bu noktada kontrol edilebilen bileşenler yoluyla kontrol edilemeyen yahut hesaba dahi katılamayan değişkenlere ve varyasyonların doğasına karşı, sistemin Taguchi analiziyle sağlamlaştırılmasına çalışılmıştır.

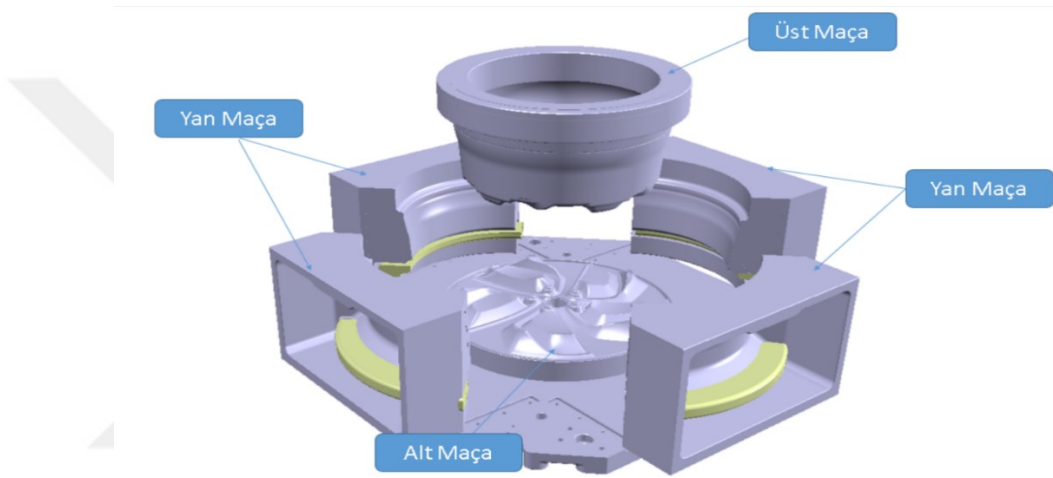
4.4.2 Proje Takımının ve Deney Faktörlerinin Belirlenmesi

Proje zaman ve maliyet açısından masraflı ve sonuçları bir o kadar ehemmiyetli bir proje olarak şekil 23'te belirtilen kara kuşak projelerinden biri olduğundan, personel seçimi yetki alanı dışında kalmış ve fabrikanın operasyonel ilkelerine göre belirlenmiştir. Buna göre altı sigma unvanlarına göre şampiyon fabrika müdürü ve uzman kara kuşak dökümhane şefi projeye öncülük etmiştir. Ek olarak ekip yeleri arasında tamamı yeşil ya da sarı kuşak olan iki kalite sorumlusu, iki bakım personeli,  döküm operatörü ve opex (operasyonel mkemmelik) ekibinden bir endüstri mühendisi bulunmaktadır.

Deney faktörleri ve deneyin genel çerçevesinden bahsetmeden önce deneyin yapılacağı üretim sürecinden kısaca söz etmekte yarar vardır. Döküm aşaması yaklaşık %97 oranında alüminyum içeren klcelerinin 700 C'nin üzerine çıkan fırınlarda yaklaşık 25 dakika gibi bir sürede eritilmesiyle başlamaktadır. Eriyen alüminyumun doğrudan aktığı karıştırıcıda içindeki hidrojeni atması için argon gazı uygulanmaktadır. Bu süreç alüminyumun yoğunluğunu artırarak katılaştığında oluşabilecek hava kabarcığı sayısını azaltmaktadır. Daha sonra alüminyumu güçlendirmek için toz halde titanyum, magnezyum ya da silisyum gibi diğer maddelerin eklenmesiyle alaşım elde edilir. Bu eriyik alaşımın içinden alüminyum oksidi yüzeye çıkarması ve ayrıştırması için çeşitli kimyasallar eklenir ve bunlar yüzeyde birikip temizlenir. Yine alaşımın sağlığını muhafaza etmek ve içinde kalan alüminyum oksidi yakalamak adına erimiş metal alaşım döküme girmeden son kez ince aralıklı ve yüksek ısıya dayanıklı seramik filtreden geçirilir. İçine döküm yapılacak olan güçlendirilmiş çelikten oluşan kalıplar üç ana kısımdan oluşur. Bunlar şekil 26'da görülebileceği üzere alt maça, st maça ve dört ayrı parçadan oluşan yan maalardır. Soğuma ve katılaşma hızı molekül dizilişleri üzerinden alaşımın mukavemeti üzerindeki en kritik faktörlerden olduğundan, bu kalıplar döküm işleminden önce alaşıma yakın olarak onu şoklamayacak düzeyde, yaklaşık 500 C'lere kadar ısıtılır ve katılaşma sırasında kontrollü olarak soğutulur. Eriyik halde alaşımın kalıba yukardan döküldüğünde daha fazla hava kabarcığı oluştuğundan döküm makineleri kalıbı dipten doldurmak için alçak basınçlı olarak tasarlanmıştır. Bu sayede yaklaşık

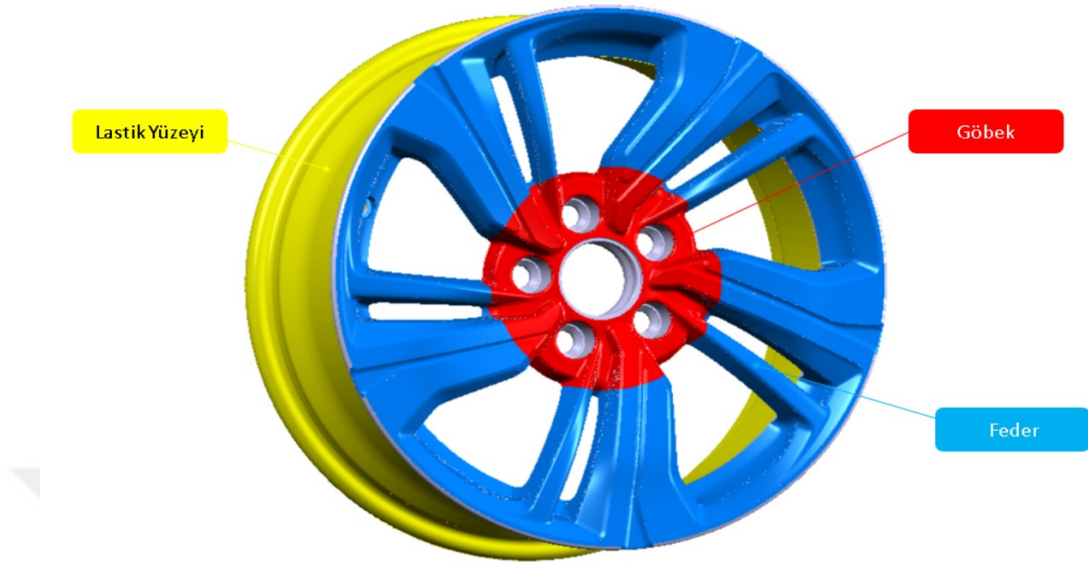
0,1 MPa'lık bir alçak basınçla sıvı metal kalıba aşağıdan yukarıya doğru dolar ve oksitlenme en aza indirilerek mekanik özellikler korunmuş olur. Alaşım kalıba dolduktan belli bir süre sonra hava ve su soğutmaları devreye girip belli sürelerde akışları sağlanarak yaklaşık 7-10 dakikalık bir süreçte jant katılaşır şeklini almış olur ve döküm işlemi tamamlanır. Daha sonra kalıp otomatik olarak açılarak jant ılık suya batırılır ve birkaç dakika içerisinde elle tutulacak sıcaklığa getirilir. Döküm sürecini ısı işlem süreci takip etmektedir.

Şekil 26: Jant kalıbının parçaları



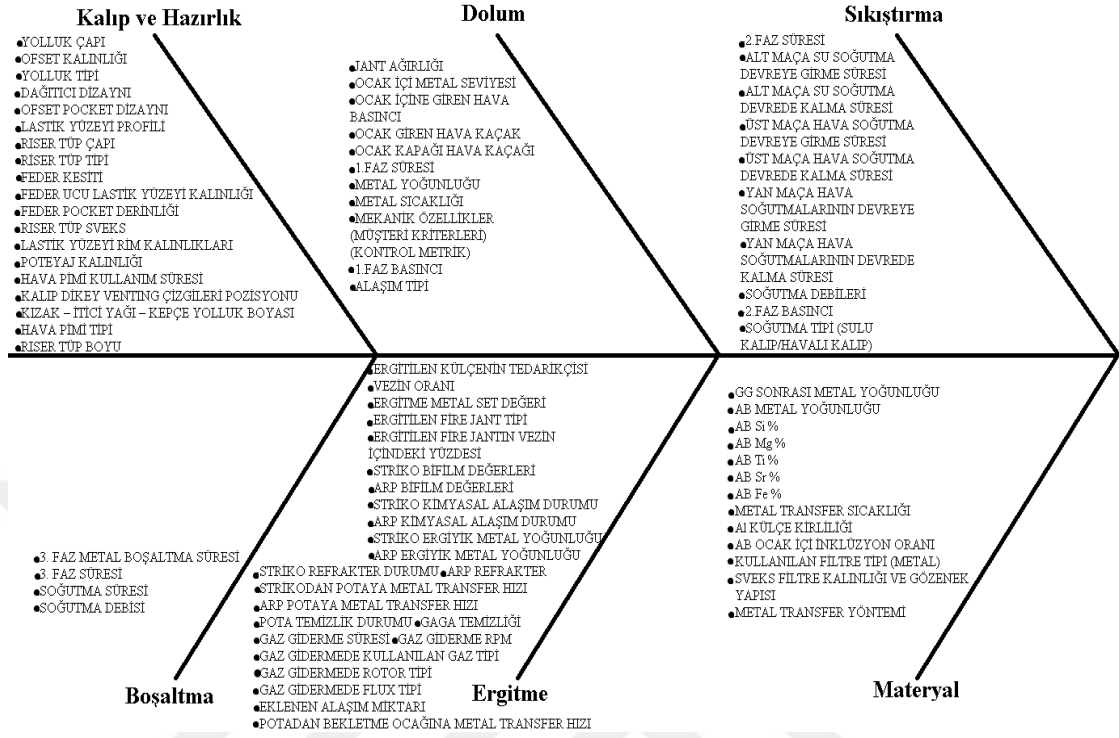
Daha önce yürütülen bir müşterinin sesi analizi çalışmasında en çok önemsenen kritik kalite göstergeleri sırasıyla mukavemet-10, x-ray hata oranı-8, ön yüzey porozitesi (gözeneklilik)-6 ve görsel hata oranı-5 olacak şekilde ağırlıklarıyla belirlenmiştir. Aralarında yüksek korelasyon ilişkisi bulunduğu belirtilen bu göstergelerin tamamı nedensellik kısmında kullanılan malzeme ve katılma sürecinden doğrudan ve ortak olarak etkilenirler. Bir sonraki aşamada proje takımından bu başlıkları genişletmeleri, nedenleri ve alt maddeleri olabildiğince çoğaltmaları istenmiştir. Ancak öncelikle deneyin hedef çıktı değeri olarak ölçülüp optimize edilecek kritik kalite karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre müşteri tarafından en çok önemsenen ve seçili süreçteki ölçüm sonuçlarında yüksek varyasyon gösteren mukavemet değeri ölçülmüştür.

Şekil 27: Jant üzerinde feder ve göbek bölgeleri



Süreci seçilen ürünün şekli feder ve göbek bölgeleriyle beraber Şekil 27’de gösterilmiştir. Jantın bu şekli ve geometrik yapısı da göz önünde bulundurularak deneylerin sonucunda ölçülecek üç temel mukavemet ölçütü belirlenmiştir. Buna göre kırılması yahut kopması en olası bölge olarak belirlenen federdeki çekme mukavemeti ilk ölçülecek kalite çıktı karakteristiğidir. Mukavemetin bir diğer ölçütü olan uzama miktarı parçanın boyuna oranla yüzde cinsinden ölçüldüğünden, ikinci kalite çıktısı olarak uzama yine en uzun parça olan feder üzerinden ölçülmüştür. Üçüncü mukavemet ölçüsü olan akma dayanımı ise, üzerindeki olası bir plastik deformasyonun jantın tüm şeklini ve geometrik yapısını etkileyeceğinden göbek bölgesi üzerinden incelenmiştir. Sonuç olarak deneyin bağımlı değişkenleri federdeki çekme dayanımı ve uzama ile göbek bölgesindeki akma dayanımı olarak belirlenmiştir. Bunlar tıpkı mukavemet ve diğer kalite ölçütleri gibi, aralarında yüksek korelasyon bulunan ölçütlerdir ve genellikle birini iyileştiren bir çalışmanın diğerlerini de iyileştirmesi beklenebilir. Ancak ürünün şeklinden ötürü bazı durumlarda az da olsa farklılıklar gözlenebildiği belirtilmiştir. Buna göre eş zamanlı olarak en yüksek değerlerine ulaştıkları ya da en azından en iyi kombinasyonlarını veren faktör-seviye dizisi aranmıştır. Deneyin bağımsız değişkenleri olan faktörler ve seviyeleri, bahsedilen diğer kalite ölçütleri göz önünde bulundurulmuş olsa da ağırlıklı olarak bunlara göre belirlenmiştir.

Şekil 28: Deneyin olası girdi faktörleri için balık kılıcı diyagramı



Kontrol faktörlerini belirlemek için ilk etapta proje takımından, kalite çıktısına etki edebilme ihtimali olan ve akıllarına gelen her türlü değişkeni tespit etmeleri beklenmiştir. Şekil 28 ortaya atılan ve henüz herhangi bir yargı filtresinden geçmemiş her türlü fikrin altı ana başlık altında derlenmesini göstermektedir. Daha sonra beyin fırtınası yoluyla bu faktörler arasında modelde etkisiz yahut etkisi göz ardı edilebilir olanlar, etkisi olsa da sürekli değiştirmesi çok maliyetli olduğundan yahut optimum değeri bilindiğinden en iyi durumunda devreye alınacak olanlar, sürekli sabit tutulmаса da yahut müdahale edilemese de kontrol amaçlı ölçülecek olanlar ve deneyi en çok etkileyeceği düşünülüp müdahale edilebilir olanlar belirlenmiştir ve bunlar Tablo 6'daki gibi sınıflandırılmıştır. Sistemin müdahale edilemeyen yahut sabit tutulamayan kalite faktörlerine karşı sağlamlaştırılması için, müdahale edilebilir olanlar arasından etkileri en fazla öngörülenler kontrol faktörleri olarak seçilecektir.

Deneyde kullanılacak kontrol faktörlerinin seçimi aşaması tüm deneye yön vermesi açısından oldukça önemlidir ve sağlıklı bir deney yürütülebilmesi için bu aşamada seçilen faktörlerin, çıktıdaki değişimlerin büyük bir kısmını açıklayabilecek şekilde seçilmesi önerilmektedir. Buna göre değiştirilebilir faktörler arasında ekip üyelerinin verdikleri oyların ortalamaları üzerinden müşterinin sesi de göz önünde

bulundurularak ağırlıklı bir oylama yapılmıştır. Bu oylamanın sonuçları ve buna göre çizilen bir Pareto analizi Tablo 7 ve Şekil 29'daki gibidir.

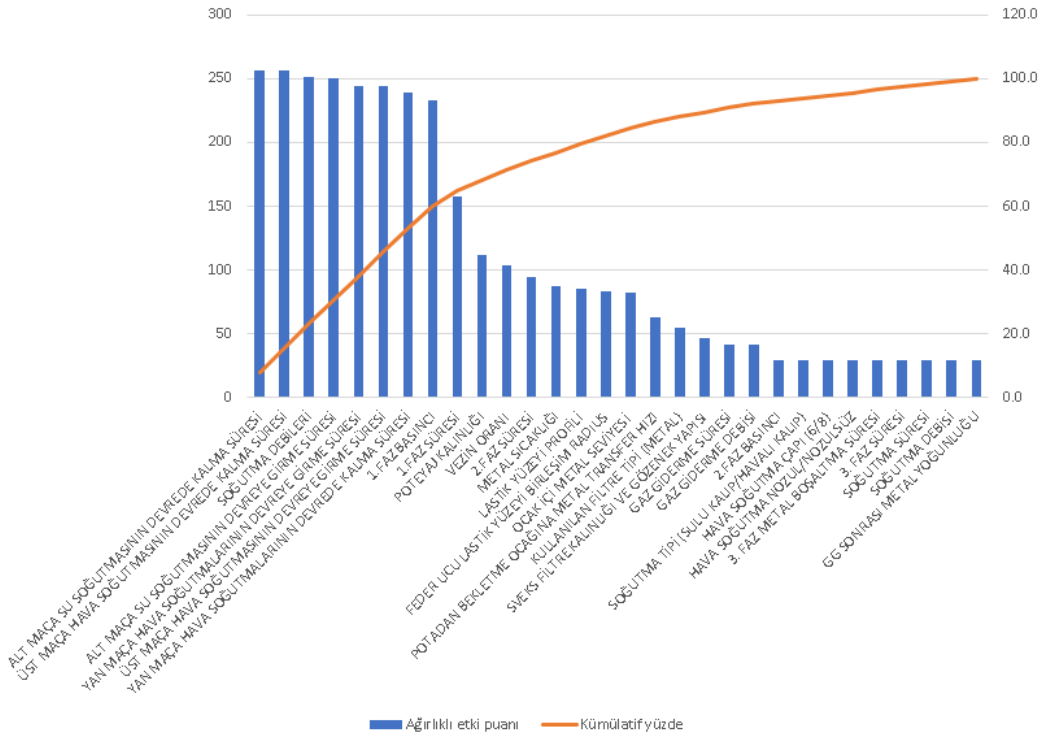
Tablo 6: Faktörlerin deneyde kullanım durumlarına göre ayrılması

KALIP VE HAZIRLIK	OFSET KALINLIĞI	ERGİTME	POTADAN BEKLETME OCAĞINA METAL TRANSFER HIZI
KALIP VE HAZIRLIK	YOLLUK TİPİ	METAL	GG SONRASI METAL YOĞUNLUĞU
KALIP VE HAZIRLIK	OFSET POCKET DİZAYNI	METAL	KULLANILAN FİLTRE TİPİ (METAL)
KALIP VE HAZIRLIK	RİSER TÜP ÇAPI	METAL	SVEKS FİLTRE KALINLIĞI VE GÖZNEK YAPISI
KALIP VE HAZIRLIK	RİSER TÜP TİPİ	KALIP VE HAZIRLIK	YOLLUK ÇAPI
KALIP VE HAZIRLIK	FEDER KESİTİ	KALIP VE HAZIRLIK	DAĞITICI DİZAYNI
KALIP VE HAZIRLIK	FEDER POCKET DERİNLİĞİ	KALIP VE HAZIRLIK	FEDER KALINLIĞI
KALIP VE HAZIRLIK	RİSER TÜP SVEKS	KALIP VE HAZIRLIK	KALIP DIKEY VENTING ÇİZGİLERİ POZİSYONU
KALIP VE HAZIRLIK	LASTİK YÜZEYİ RİM KALINLIKLARI	Dolum	OCAK İÇİ METAL SEVİYESİ
KALIP VE HAZIRLIK	HAVA PİMİ KULLANIM SÜRESİ	KALIP VE HAZIRLIK	HAVA PİMİ TİPİ
KALIP VE HAZIRLIK	KIZAK – İTİCİ YAĞI – KEPÇE YOLLUK BOYASI KULLANIMI	Dolum	OCAK GİREN HAVA KAÇAK
KALIP VE HAZIRLIK	RİSER TÜP BOYU	Dolum	OCAK KAPAĞI HAVA KAÇAK
Dolum	JANT AĞIRLIĞI	ERGİTME	ERGİTİLEN KÜLÇENİN TEDARİKÇİSİ
Dolum	OCAK İÇİNE GİREN HAVA BASINCI	ERGİTME	ERGİTME METAL SET DEĞERİ (Sıcaklık)
Dolum	MEKANİK ÖZELLİKLER (MÜŞTERİ KRİTERLERİ) (KONTROL METRİK)	ERGİTME	ERGİTİLEN FIRE JANT TİPİ (Boyalı-Boyasız)
Dolum	ALAŞIM TİPİ	ERGİTME	STRİKO BİFİLM DEĞERLERİ
ERGİTME	STRİKO REFRAKTER DURUMU	ERGİTME	ARP BİFİLM DEĞERLERİ
ERGİTME	ARP REFRAKTER DURUMU	ERGİTME	STRİKO KİMYASAL ALAŞIM DURUMU
ERGİTME	STRİKODAN POTAYA METAL TRANSFER HIZI	ERGİTME	ARP KİMYASAL ALAŞIM DURUMU
ERGİTME	ARP POTAYA METAL TRANSFER HIZI	ERGİTME	STRİKO ERGİYİK METAL YOĞUNLUĞU
KALIP VE HAZIRLIK	LASTİK YÜZEYİ PROFİLİ	ERGİTME	ARP ERGİYİK METAL YOĞUNLUĞU
KALIP VE HAZIRLIK	FEDER UCU LASTİK YÜZEYİ BİRLEŞİM RADIUS	ERGİTME	POTA TEMİZLİK DURUMU
KALIP VE HAZIRLIK	POTEYAJ KALINLIĞI	ERGİTME	GAGA TEMİZLİK DURUMU
Dolum	1.FAZ SÜRESİ	ERGİTME	GAZ GİDERMEDE KULLANILAN GAZ TİPİ
Dolum	METAL YOĞUNLUĞU	ERGİTME	GAZ GİDERMEDE KULLANILAN ROTOR TİPİ
Dolum	METAL SICAKLIĞI	ERGİTME	GAZ GİDERME RPM HIZLARI
Dolum	1.FAZ BASINCI	ERGİTME	GAZ GİDERMEDE KULLANILAN FLUX TİPİ
Sıkıştırma	2.FAZ SÜRESİ	METAL	AI KÜLÇE KİRLİLİĞİ
Sıkıştırma	SOĞUTMA SÜRELERİ	METAL	METAL TRANSFER YÖNTEMİ
Sıkıştırma	SOĞUTMA DEVREYE GİRME SÜRESİ	METAL	AB METAL YOĞUNLUĞU
Sıkıştırma	SOĞUTMA DEBİLERİ	METAL	AB Si %
Sıkıştırma	2.FAZ BASINCI	METAL	AB Mg %
Sıkıştırma	SOĞUTMA TİPİ (SULU KALIP-HAVALI KALIP)	METAL	AB Ti %
Sıkıştırma	HAVA SOĞUTMA ÇAPI (6/8)	METAL	AB Sr %
Sıkıştırma	HAVA SOĞUTMA NOZUL/NOZULSÜZ	METAL	AB Fe %
Boşaltma	3. FAZ METAL BOŞALTMA SÜRESİ	METAL	METAL TRANSFER SICAKLIĞI
Boşaltma	3. FAZ SÜRESİ	METAL	AB OCAK İÇİ İNKÜZYON ORANI
Boşaltma	SOĞUTMA SÜRESİ	SIKİŞTIRMA	YAN MAÇA REZİSTANS SET DEĞERLERİ
Boşaltma	SOĞUTMA DEBİSİ		Modelde etkili ancak en iyi hale getirilerek devreye alınacak
ERGİTME	VEZİN ORANI		Modelde etkisiz
ERGİTME	GAZ GİDERME SÜRESİ		Etkisi var ve müdahale edilebilir
ERGİTME	GAZ GİDERME DEBİSİ		
ERGİTME	EKLENEN ALAŞIM MİKTARI		Kontrol için ölçülecek veriler

Tablo 7: Müdahale edilebilir faktörlerin önem derecelerine göre ağırlıklı oylaması

		Müşteri için önem derecesi	10	8	6	5	Ağırlıklı Puan Toplamı
		Kalite Ölçütleri	Mekanik & Metalurjik Özellikler	X-Ray hata oranı	Ön Yüzey Porozite	Görsel Hata Oranı	
		Faktörler					
1	KALIP VE HAZIRLIK	LASTİK YÜZEYİ PROFİLİ	4	3	1	3	85
3	KALIP VE HAZIRLIK	FEDER UCU LASTİK YÜZEYİ BİRLEŞİM RADIUS	2	4	1	5	83
4	KALIP VE HAZIRLIK	POTEYAJ KALINLIĞI	3	4	5	4	112
5	Dolum	OCAK İÇİ METAL SEVİYESİ	3	3	3	2	82
6	Dolum	1.FAZ SÜRESİ	6	7	2	6	158
8	Dolum	METAL SICAKLIĞI	3	3	3	3	87
9	Dolum	1.FAZ BASINCI	9	9	6	7	233
10	Sıkıştırma	2.FAZ SÜRESİ	4	2	4	3	95
11	Sıkıştırma	YAN MAÇA HAVA SOĞUTMALARININ DEVREYE GİRME SÜRESİ	9	9	7	8	244
12	Sıkıştırma	ALT MAÇA SU SOĞUTMASININ DEVREYE GİRME SÜRESİ	9	9	8	8	250
13	Sıkıştırma	ÜST MAÇA HAVA SOĞUTMASININ DEVREYE GİRME SÜRESİ	9	9	7	8	244
14	Sıkıştırma	SOĞUTMA DEBİLERİ	9	9	9	7	251
15	Sıkıştırma	ALT MAÇA SU SOĞUTMASININ DEVREDE KALMA SÜRESİ	9	9	9	8	256
16	Sıkıştırma	ÜST MAÇA HAVA SOĞUTMASININ DEVREDE KALMA SÜRESİ	9	9	9	8	256
17	Sıkıştırma	YAN MAÇA HAVA SOĞUTMALARININ DEVREDE KALMA SÜRESİ	9	9	7	7	239
18	Sıkıştırma	2.FAZ BASINCI	1	1	1	1	29
19	Sıkıştırma	SOĞUTMA TİPİ (SULU KALIP/HAVALI KALIP)	1	1	1	1	29
20	Sıkıştırma	HAVA SOĞUTMA ÇAPI (6/8)	1	1	1	1	29
21	Sıkıştırma	HAVA SOĞUTMA NOZUL/NOZULSÜZ	1	1	1	1	29
22	Boşaltma	3. FAZ METAL BOŞALTIMA SÜRESİ	1	1	1	1	29
23	Boşaltma	3. FAZ SÜRESİ	1	1	1	1	29
24	Boşaltma	SOĞUTMA SÜRESİ	1	1	1	1	29
25	Boşaltma	SOĞUTMA DEBİSİ	1	1	1	1	29
26	ERGİTME	VEZİN ORANI	5	4	2	2	104
27	ERGİTME	GAZ GİDERME SÜRESİ	1	2	1	2	42
28	ERGİTME	GAZ GİDERME DEBİSİ	1	2	1	2	42
30	ERGİTME	POTADAN BEKLETME OCAĞINA METAL TRANSFER HIZI	2	2	2	3	63
31	METAL	GG SONRASI METAL YOĞUNLUĞU	1	1	1	1	29
32	METAL	KULLANILAN FİLTRE TİPİ (METAL)	2	3	1	1	55
33	METAL	SYEKS FİLTRE KALINLIĞI VE GÖZENEK YAPISI	2	2	1	1	47

Şekil 29: Kontrol faktörlerinin belirlenmesinde Pareto analizi



Yapılan beyin fırtınası ve analizler sonucu kontrol edilebilir olanlar arasından sıralanan faktörlerden ilk altı-sekiz adedinin çıktısı üzerindeki etkisinin deneyi anlamlı şekilde yürütmek için yeterli düzeyde olacağı öngörülmüştür. Buna göre alt maça su soğutmasının devreye girme süresi (1R_G), alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi (1R_D), üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi (2R_G), üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi (2R_D), yan maça hava soğutmalarının devreye girme süresi (3R_G), yan maça hava soğutmalarının devrede kalma süresi (3R_D), soğutma debileri (4S_D) ve 1. faz basıncı (5F_B) deneyin kontrol faktörleri olarak belirlenmiştir. Parantez içinde verilmiş olan faktör kodları şirketin veritabanına kayıtlı oldukları halleriyle kullanılmıştır.

Faktörlerin mevcut kullanımdaki seviyeleri alt maça su soğutmasının devreye girme süresi için 150 saniye, alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi için 60 saniye, üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi için 140 saniye, üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi için 80 saniye, yan maça hava soğutmalarının devreye girme süresi için 100 saniye, yan maça hava soğutmalarının devrede kalma süresi için 120 saniye, 1. faz basıncı için 400 bar ve soğutma debileri için 1000 litre/dakika şeklindedir.

Deneyde kullanılacak faktör seviyeleri faktörlerin etkisini gözlemleyebilecek kadar geniş ve diğer faktörlerin etkisini maskeleyecek kadar dar bir aralıkta seçilmeye çalışılmıştır. Önerilen metodoloji doğrultusunda faktörler mevcut kullanımlarından anlamlı düzeyde fark yaratacak bir alt ve bir üst olmak üzere iki seviyeye ayrılmıştır. Böylece hangi yönde gittiklerinde gelişime katkı sağladıklarının belirlenmesi, sonraki deneylerde daha dar aralıklarla olmak üzere yine bir alt ve bir seviye belirlenerek yalın anlayış içinde sürekli gelişime katkı sağlanabilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca etkileri zayıf olarak belirlenen faktörler sonraki tasarımlarda yenileriyle değiştirilebilecekken etkili olarak belirlenenler sonraki çalışmalara sağlam bir referans zemin teşkil edeceklerdir.

Bu bağlamda sayılan faktörler için ikişer seviyeleri sırasıyla 130 ve 170 saniye, 40 ve 80 saniye, 110 ve 170 saniye, 50 ve 110 saniye, 70 ve 130 saniye, 90 ve 150 saniye, 380 ve 420 bar, 800 ve 1200 litre/dakika olarak belirlenmiştir.

4.4.3 Deneyin Yürütülmesi ve Taguchi Analizi

Ölçüm güvenilirliği adına yapılacak deneylerin tamamen gelişigüzel bir sırayla yürütülmesi ve tüm çıktı değeri ölçümlerinin farklı kişiler tarafından ikişer kez

tekrarlanması uygun görülmüştür. Yapılan ön hazırlık ve değerlendirmenin ardından termodinamik açıdan ısı alışveriş hızına, akabinde alaşımın katılma hızına ve buna bağlı olarak molekül yapısı ve mukavemet özelliklerine doğrudan etkisi olsa da; üretim koşullarına bağlı olarak soğutma debilerinin ve 1. faz basıncının sıklıkla değiştirilmesinin zahmetli ve maliyetli olacağına kanaat getirilerek son dakikada kontrol faktörlerinden çıkarılıp etkilerinden feragat edilmiş ve sonucu etkilememeleri için deney boyunca öngörülen optimum seviyelerinde sabit tutulmalarına karar verilmiştir (1000 litre/dakika, 400 bar). Sonuç olarak elde kalan soğutmaların devreye girme ve devrede kalma süresiyle ilgili altı kontrol faktörü üretim çevresinin durumuna göre kontrol edilmesi en kolay ve maliyetsiz faktörler olarak göz çarpsalar da alaşımın katılma düzeni ve hızına etkileri bakımından yeterli düzeyde açıklayıcı kabul edilmişlerdir. Bu süreler ısı alışverişinin gerçekleşeceği zamanın sınırlarını çizirken bu sürelerde gerçekleşen akının hızı ($\dot{Q}$) molekül yapısının oturmasındaki bir diğer önemli faktör olarak ısı alışverişinin gerçekleştiği yüzeyler arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır. Bu bağlamda dolum ve katılma sırasında sabit olarak kontrol edilmeleri güç olsa da alt maça (T4), üst maça (T2) ve yan maçalardaki (T1, T3) sıcaklıklar soğutmalar devreye girdiklerinde termokupllar yoluyla kayıt altına alınmıştır.

İkişer seviyeden oluşan altı kontrol faktörü içeren bir deney tasarımı için Taguchi yöntemine göre L8 bir ortogonal dizi seçimiyle sekiz deney yeterli görünmekle beraber, faktörlerin kolay ayarlanabilir olması bakımından ve geçerlilik adına L16 dizisinin seçilmesine karar verilmiştir. Bu da 16 deney ve 32 ölçüm yapılacağı anlamına gelmektedir.

Tablo 8: L16 ortogonal dizi üzerinden deneyin yürütüleceği faktör seviye kombinasyonları

L16	Faktörler					
Deneyler	1	1	1	1	1	1
	1	1	1	2	2	2
	1	2	2	1	1	1
	1	2	2	2	2	2
	2	1	1	1	1	2
	2	1	1	2	2	1
	2	2	2	1	1	2
	2	2	2	2	2	1
	1	1	2	1	2	1
	1	1	2	2	1	2
	1	2	1	1	2	1
	1	2	1	2	1	2
	2	1	2	1	2	2
	2	1	2	2	1	1
	2	2	1	1	2	2
	2	2	1	2	1	1

Olası en yüksek seçim çeşitliliğini yakalamak adına Tablo 8'deki L16 ortogonal dizisi seçilmiştir. Deneyler bu sırayla yürütülmemiş olsa da altı faktörün ikişer seviyeleri sırasıyla bu tabloya göre dizilmiş ve bu seviye seçimlerindeki ikişer süreç çıktısının ilgili özellikleri ölçülmüştür. Buna göre faktörlerin yerleştirildiği tablonun son hali ölçülecek üç kalite karakteristiği ve kontrolü sağlanacak dört sıcaklık değeriyle beraber Tablo 9'da gösterilmiştir. Tabloda büyüklükleri gösterilen kontrol faktörlerinin birimi saniye olmakla birlikte deney sırasında ve deneyden sonra ölçümü sağlanacak sıcaklıklar santigrat cinsinden, uzama boya oranla yüzde cinsinden, akma ve çekme dayanımları N/mm² cinsinden ifade edilecektir.

Tablo 9: Kontrol faktörlerinin ikişer seviyelerinde dizilişleri

DENEY NO.	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D	T1	T2	T3	T4	F.Çekme	F.% Uzama	G.Akma
1	130	40	110	50	70	90							
2	130	40	110	110	130	150							
3	130	80	170	50	70	90							
4	130	80	170	110	130	150							
5	170	40	110	50	70	150							
6	170	40	110	110	130	90							
7	170	80	170	50	70	150							
8	170	80	170	110	130	90							
9	130	40	170	50	130	90							
10	130	40	170	110	70	150							
11	130	80	110	50	130	90							
12	130	80	110	110	70	150							
13	170	40	170	50	130	150							
14	170	40	170	110	70	90							
15	170	80	110	50	130	150							
16	170	80	110	110	70	90							

Kritik gürültü faktörleri üretim sırasında kontrol edilemeseler de etkilerinin ve bunlara karşı sistemi en sağlam yapan kontrol seviyesi kombinasyonunun etkili bir biçimde gözlenebilmesi için deney sırasında kontrol edilebilmeleri beklenir. Böylece ortogonal diziye bir dış dizi olarak yerleştirilebilirler ve ayrılmış seviyelerinin değişiminden en az etkilenen çıktı seçilimi belirlenebilir. Ancak metodoloji bölümünde bahsedildiği üzere bazı durumlarda bu faktörler deney sırasında da tam olarak kontrol edilemediği gibi; kesikli bir yapıdansa devamlı bir yapı gösterip seviye sayısından daha fazla salınım sergiledikleri durumlarda deneyde dış dizi içinde kullanılamazlar. Bu bağlamda tablodaki sıcaklık değerleri girdi ve çıktı arasındaki ilişkideki doğrudan etkilerinden ötürü kritik gürültü faktörleri olarak kaydedilmiştir. Deneyler yürütülüp gerekli ölçümler yapıldıktan sonra uygulanan Taguchi analizi, bu ve diğer tüm gürültü faktörlerine karşı en etkili faktör seviye bileşimini veriyor olsa da bu ölçümler kontrol

aşamasında yahut üç çıktı değerinin ortak olarak maksimize edilme sürecinde doğrusal regresyonda kullanılabileceklerdir.

Deneyler bahsedildiği üzere rasgele sırayla yürütüldükten sonra ölçüm sonuçları analiz rahatlığı açısından ortogonal dizi sırasına göre kaydedilerek Tablo 10'da aktarılmıştır. Bu sonuçların Taguchi yöntemiyle analizinde şirket politikasına uygun olarak, veri ve kayıt formatı uyumluluğu açısından Minitab uygulaması kullanılmıştır.

Tablo 10: Deney sonuçları

ÖLÇÜM	DENEY	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D	T1	T2	T3	T4	F.Çekme	F.% Uzama	G.Akma
1	1	130	40	110	50	70	90	452	373	446	474	179.36	6.62	103.33
2	1	130	40	110	50	70	90	452	373	446	474	174.57	6.22	91.55
1	2	130	40	110	110	130	150	423	359	437	464	174.13	4.59	82.3
2	2	130	40	110	110	130	150	423	359	437	464	171.2	4.74	88.89
1	3	130	80	170	50	70	90	434	371	459	474	169.19	5.32	90.05
2	3	130	80	170	50	70	90	434	371	459	474	171.24	4.76	86.95
1	4	130	80	170	110	130	150	409	375	462	472	165.53	5.3	81.59
2	4	130	80	170	110	130	150	409	375	462	472	170.8	6.07	84.15
1	5	170	40	110	50	70	150	438	376	464	482	176.67	6.48	85.98
2	5	170	40	110	50	70	150	438	376	464	482	174.52	6.19	98.11
1	6	170	40	110	110	130	90	441	374	462	484	180.31	6.94	94.45
2	6	170	40	110	110	130	90	441	374	462	484	177.03	5.39	90.28
1	7	170	80	170	50	70	150	428	381	470	484	174.4	5.01	90.23
2	7	170	80	170	50	70	150	428	381	470	484	173.28	4.58	90.07
1	8	170	80	170	110	130	90	416	378	458	471	171.64	6.2	90.64
2	8	170	80	170	110	130	90	416	378	458	471	170.79	5.43	90.26
1	9	130	40	170	50	130	90	456	387	475	488	182.28	6.49	94.62
2	9	130	40	170	50	130	90	456	387	475	488	176.37	6.17	94.87
1	10	130	40	170	110	70	150	468	401	486	498	181.21	6.19	93.96
2	10	130	40	170	110	70	150	468	401	486	498	183.46	8.44	90.86
1	11	130	80	110	50	130	90	440	391	476	485	174.56	5.04	91.39
2	11	130	80	110	50	130	90	440	391	476	485	171.45	5.21	86.77
1	12	130	80	110	110	70	150	423	386	466	472	178.18	5.37	92.29
2	12	130	80	110	110	70	150	423	386	466	472	174.72	5.5	94.43
1	13	170	40	170	50	130	150	437	383	472	493	177.88	4.8	88.45
2	13	170	40	170	50	130	150	437	383	472	493	171.86	5.03	89.75
1	14	170	40	170	110	70	90	442	389	469	494	178.28	5.14	88.54
2	14	170	40	170	110	70	90	442	389	469	494	173.64	5.27	88.74
1	15	170	80	110	50	130	150	443	380	462	482	160.47	3.95	90.42
2	15	170	80	110	50	130	150	443	380	462	482	170.72	5.51	90.89
1	16	170	80	110	110	70	90	405	382	462	473	172.9	5.9	84.43
2	16	170	80	110	110	70	90	405	382	462	473	174.04	5.94	87.39

Analiz sonuçları üç farklı çıktı karakteristiğinin ikişer farklı noktalarındaki ölçüm sonuçları göz önünde bulundurularak Minitab uygulaması yoluyla elde edilmiştir. Buna göre federlerdeki çekme dayanımı, federlerdeki yüzde cinsinden boyca uzama miktarı ve göbeklerdeki akma dayanımı için on altı deneydeki ikişer ölçüm sonucu gözetilerek yürütülen üç farklı Taguchi analizinin sonuçları Tablo 11, 12 ve 13'teki gibidir.

Tablo 11: Feder çekme dayanımı için Taguchi analizi sonuçları

Sinyal Gürültü Oranları İçin Yanıt Tablosu

Larger is better

Level	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
1	44,85	44,96	44,81	44,79	44,89	44,85
2	44,79	44,68	44,83	44,85	44,75	44,79
Delta	0,06	0,28	0,02	0,06	0,14	0,06
Rank	3	1	6	5	2	4

Tahmin

S/N Ratio	Mean	StDev	Ln(StDev)
45,1911	181,649	1,07127	0,392601

Ayarlar

1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
130	40	110	110	70	150

Tablo 12: Feder boyca uzama oranı için Taguchi analizi sonuçları

Sinyal Gürültü Oranları İçin Yanıt Tablosu

Larger is better

Level	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
1	15,06	15,28	14,83	14,62	15,15	15,12
2	14,65	14,42	14,88	15,09	14,55	14,58
Delta	0,41	0,87	0,05	0,47	0,60	0,54
Rank	5	1	6	4	2	3

Tahmin

S/N Ratio	Mean	StDev	Ln(StDev)
16,6399	6,92062	0,930729	-0,399801

Ayarlar

1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
130	40	170	110	70	150

Tablo 13: Göbek akma dayanımı için Taguchi analizi sonuçları

Sinyal Gürültü Oranları İçin Yanıt Tablosu

Larger is better

Level	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
1	39,11	39,21	39,14	39,21	39,17	39,16
2	39,07	38,97	39,04	38,97	39,01	39,02
Delta	0,04	0,24	0,10	0,23	0,15	0,13
Rank	6	1	5	2	3	4

Tahmin

S/N Ratio	Mean	StDev	Ln(StDev)
39,6528	96,4294	7,12322	1,68011

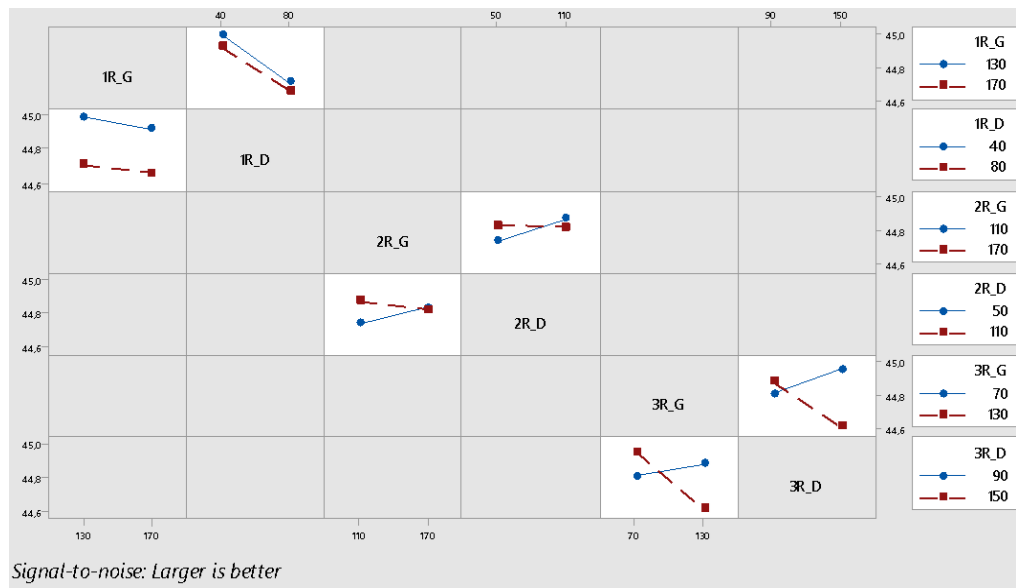
Ayarlar

1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
130	40	110	50	70	150

Tablo 11 çıktı için seçilen kritik kalite göstergelerinden ilki olan feder çekme dayanımı için Taguchi analizi sonuçlarıdır. Buna göre en yüksek çıktı kalite değerini

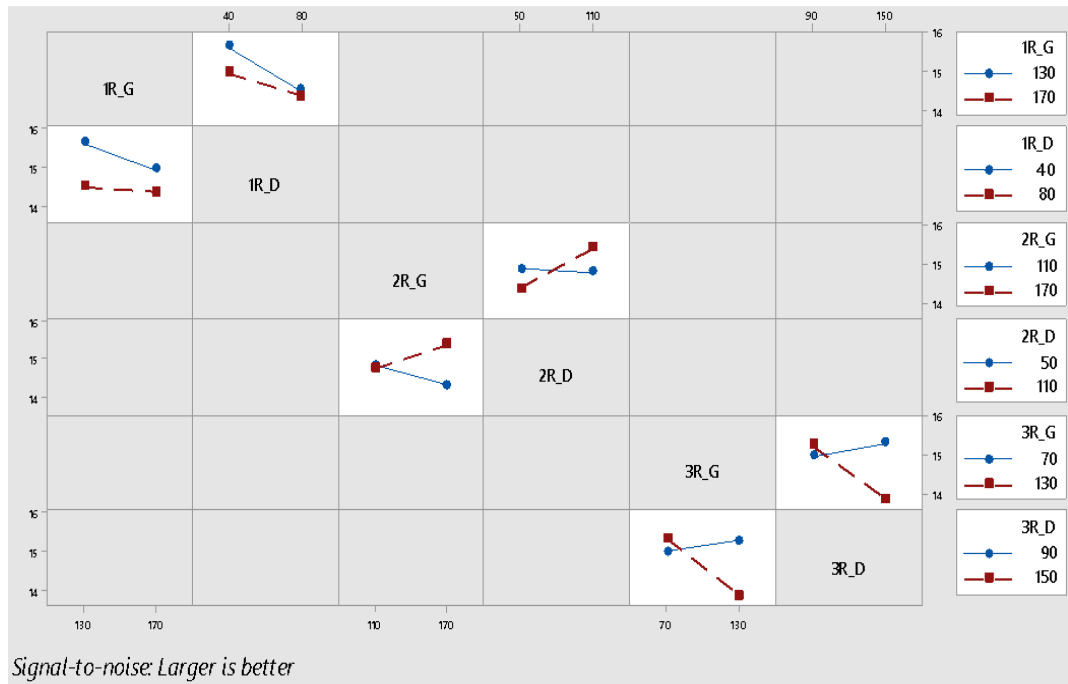
en düşük varyasyonla veren faktör seviye ayarları sırasıyla alt maça su soğutmasının devreye girme süresi için 130 saniye, alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi için 40 saniye, üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi için 110 saniye, üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi için 110 saniye, yan maça hava soğutmalarının devreye girme süresi için 70 saniye ve yan maça hava soğutmalarının devrede kalma süresi için 150 saniye olarak bulunmuştur. Alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi ve yan maça hava soğutmasının devreye girme süresi en etkili faktörler olurken üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi etkisi en düşük faktör olarak belirlenmiştir. Çalışma öncesinde yaklaşık 8 birimlik bir standart sapmayla ve 164 N/mm^2 ortalamayla ölçülen çekme dayanımının, analiz sonucunda üretim bahsedilen ayarlara alındığında çok daha düşük bir standart sapmayla 180 civarında bir ortalama seyredeceği öngörülmektedir. Ayrıca feder çekme dayanımı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri de Şekil 30'daki gibidir. Buna göre yukardan aşağı sıralanan ilk iki faktör için optimum değerler birbirleriyle etkileşimlerinden bağımsız olarak 130 ve 40 iken, üst hava soğutmanın devreye girme süresinin 110 saniye olduğu durumlarda devrede kalma süresinin de 110 saniye olması daha iyi sonuçlar vermektedir. Son iki faktörde de benzer bir etkileşim gözlenmektedir ve herhangi bir sebeple gelecekte bu seviyelerden birinin seçilip sabitlenmesi yahut değiştirilmesi gerektiğinde bu grafikler göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil 30: Feder çekme dayanımı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri



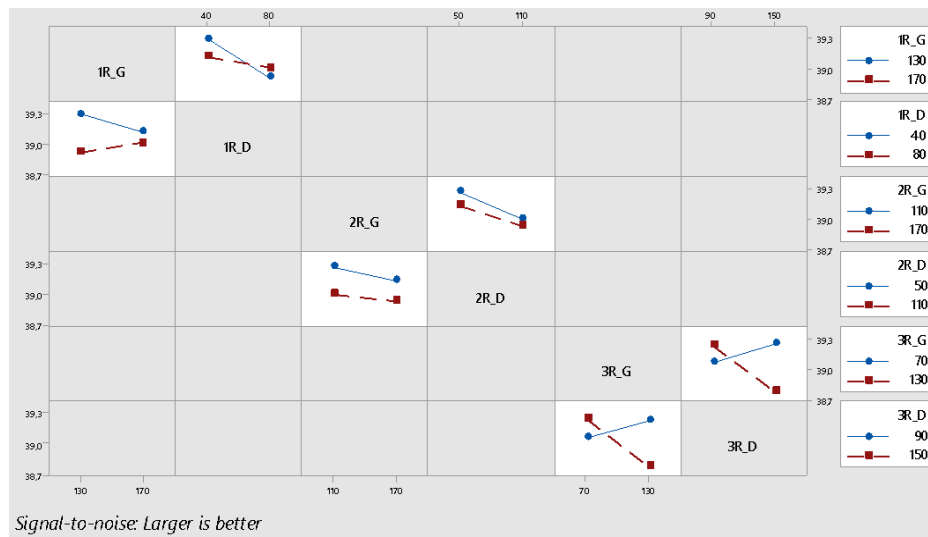
Tabo 12 çıktı kalite karakteristiklerinden feder boyca uzama oranı için Taguchi analizi sonuçlarıdır. Buna göre optimum ayarlar sırasıyla alt maça su soğutmasının devreye girme süresi için 130 saniye, alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi için 40 saniye, üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi için 170 saniye, üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi için 110 saniye, yan maça hava soğutmalarının devreye girme süresi için 70 saniye ve yan maça hava soğutmalarının devrede kalma süresi için 150 saniye olacaktır. Alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi ve yan maça hava soğutmasının devreye girme süresi en etkili faktörler olurken üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi etkisi en düşük faktör olarak belirlenmiştir. Proje seçimi kısmında yaklaşık 1,12 birimlik bir standart sapmayla 3,5 ortalamayla ölçülen feder uzama değerinin sayılan faktör ayarlarında 0,93 birimlik standart sapmayla %6,92 ölçülmesi beklenmektedir. Feder uzama oranı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri Şekil 31'deki gibidir. Görüleceği üzere yukarıdan üçüncü faktör olan üst hava soğutmasının devreye girme süresi; dördüncü faktör olan devrede kalma süresi 50 saniyeyken 110 saniye değerinde, 110 saniye iken 170 saniye değerinde gürültüye oranla en yüksek sinyali üretmektedir. Benzer şekilde altıncı faktör olan yan hava soğutmalarının devrede kalma süresi için optimum değer; devreye girme süresi 70 saniyeyken 150 saniye, 130 saniye iken 90 saniyedir.

Şekil 31: Feder uzama oranı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri



Tablo 13 göbek bölgesi akma dayanımı için Taguchi analizi sonuçlarını göstermektedir. Analiz sonucu en iyi çıktı değerini veren ayarlar sırasıyla alt maça su soğutmasının devreye girme süresi için 130 saniye, alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi için 40 saniye, üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi için 110 saniye, üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi için 50 saniye, yan maça hava soğutmalarının devreye girme süresi için 70 saniye ve yan maça hava soğutmalarının devrede kalma süresi için 150 saniye şeklindedir. Alt maça su soğutma ve üst maça hava soğutma devrede kalma süreleri en etkili, bunların devreye girme süreleri de en etkisiz faktörler olarak bulunmuştur. Deney öncesi ölçüm örnekleminde 3,36 birimlik bir standart sapmayla 82,87 N/mm² ortalamasında gözlenen akma dayanımının, belirlenen faktörlerde yaklaşık 7 birimlik bir standart sapmayla 96 N/mm² civarında çıkması beklenmektedir. Standart sapma nispeten yüksek görünse de beklenen değer yüksekliği sayesinde hala tolerans değerinden yaklaşık 2,5 σ uzak konumdadır. Göbek akma dayanımı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri Şekil 32’de gösterilmiştir. Buna göre alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi, üst maça hava soğutmasının devreye girme ve devrede kalma süreleri her halükarda belirttikleri seviyede en iyi sonucu vereceklerken; alt maça su soğutmasının devreye girme süresi devrede kalma süresi 40 saniye iken 130, 80 saniye iken 170 saniye olduğunda; yan maça hava soğutmasının devreye girme süresi devrede kalma süresi 90 iken 130, 150 iken 70 saniye olduğunda en iyi sonucu vermektedir.

Şekil 32: Göbek akma dayanımı için sinyal gürültü oranı etkileşim grafikleri



Sonuç olarak altı kontrol faktörünün Taguchi analizi yoluyla belirlenen optimum seviyeleri üç çıktı kalite ölçütü için Tablo 14'teki gibidir. Tamamı için en önemli faktör alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi olacak şekilde alt ve üst soğutmaların devreye girme süreleri görece en etkisiz faktörler olarak belirlenmiştir.

Tablo 14: Faktörlerin kritik kalite karakteristiklerine göre ideal seviyeleri

	alt maça su soğutmasının devreye girme süresi	alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi	üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi	üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi	yan maça hava soğutmalarının devreye girme süresi	yan maça hava soğutmalarının devrede kalma süresi
	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
F. Çekme	130	40	110	110	70	150
F. Uzama	130	40	170	110	70	150
G. Akma	130	40	110	50	70	150

Tablo 14'te de görüleceği üzere birinci faktör için 130 saniye, ikinci faktör için 40 saniye, beşinci faktör için 70 saniye ve altıncı faktör için 150 saniye tüm çıktı göstergeleri için ortak optimum değerler olarak bu şekilde uygulamaya alınacaklardır. Ancak üçüncü ve dördüncü faktörlere bakıldığında; üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi feder çekme ve göbek akma dayanımları için 110 saniye seviyesinde en iyi sonucu veriyorken, feder uzama oranı için 170 saniye seviyesinde en iyi sonucu vermektedir. Benzer şekilde üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi feder çekme dayanımı ve uzama oranı için 110 saniye seviyesinde gürültüye oranla en yüksek sinyali üretirken göbek akma dayanımı için optimum değeri 50 saniye olarak hesaplanmıştır.

Sezgisel olarak, ikişer çıktı değerini en iyileyip birer çıktı değerini dışarda bırakmalarından ötürü, bu iki faktörün de 110 saniye seviyelerinin seçilmesinin toplamda en iyi etkiyi yaratacağı düşünülebilir. Ancak durumun analizi için sinyal gürültü grafiklerine başvurmakta fayda vardır. Buna göre grafiklerin üçüncü satır dördüncü sütun etkileşimlerine bakıldığında yatay eksenlerdeki üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi değişkenliğinin (2R_D=110, 2R_D=50), düşey ekseninde üst maça hava soğutmasının devreye girme süresinin (2R_G) sinyal gürültü oranı üzerine etkisi gözlemlenebilir. Şekil 31'de 2R_D =50 seçildiğindeki 2R_G=110 ve 2R_G=170 arasındaki sinyal gürültü oranı farkı 2R_D=110 seçildiğinkine oldukça yakinken, optimum sinyal gürültü oranı 2R_D=110 ve 2R_G=170 seçildiğinde

gözlenmektedir. Şekil 30 ve Şekil 32’de üçüncü satır dördüncü sütundaki aynı grafikte yataydaki 2R_D=110 ayarına bakıldığında optimum değerler iki çıktı için de 2R_G=110 olarak gözlenebilir de sinyal gürültü oranları birbirine olabildiğince yakındır ve farklarının etkileri yok denecek kadar azdır. Bu nedenle feder uzama grafiğinde gözlenen 2R_G=110 yerine 2R_G=170 seçilmesinin sinyal gürültü oranlarına etkisi bakımından toplama yansımalarının, akma ve çekme dayanımı grafiklerinin gerektirdiği 2R_G=110 seçiminden daha faydalı olacağı söylenebilir. Benzer şekilde bu kez dördüncü satır üçüncü sütunlara baktığımızda; feder uzama oranı grafiğinde 2R_G=170 ve 2R_D=110 seçiminin sinyal gürültü oranı açısından yarattığı fark, diğer seviye seçimlerinin kalan iki karakteristik üzerindeki etkisinden gözle görülür ölçüde azdır. Nihayetinde üst maça hava soğutmasının devreye girme süresinin optimum seviyesi feder çekme dayanımı ve göbek akma dayanımı için 110 saniye olarak hesaplanmış olsa da faktörler arası etkileşim ve toplam etkileri düşünüldüğünde 170 saniye olarak belirlenmiştir. Bu sonuç üst maça hava soğutmasının devreye girme süresinin etkisi en düşük faktör olması durumuyla da örtüşmektedir. Yine de kontrol aşamasında sonuçlarının analizinin farklı bir yöntemle sağlanması yapılırken ve kontrol deneyleri sırasında bu durumun göz önünde bulundurulması önerilmektedir. Tablo 15 toplam etkiye göre optimum olduğu belirlenen ve kontrolü sağlanacak nihai faktör seviyelerini göstermektedir.

Tablo 15: Kontrolü sağlanarak uygulamaya geçirilecek optimum faktör seviyeleri

	alt maça su soğutmasının devreye girme süresi	alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi	üst maça hava soğutmasının devreye girme süresi	üst maça hava soğutmasının devrede kalma süresi	yan maça hava soğutmalarının devreye girme süresi	yan maça hava soğutmalarının devrede kalma süresi
	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D
Toplam	130	40	170(110)	110	70	150

4.4.4 Deney Sonuçlarının Kontrolü ve Uygulamaya Geçirilmesi

Kontrol deneyleri yapıp bulgular uygulamaya geçirilmeden önce deney sonuçlarının sağlanması doğrusal regresyonla yapılmıştır. Doğrusal regresyon analizi için uygulamada yine Minitab programı kullanılmıştır. İsabetli bir regresyon analizi için örneklem büyüklüğü tam olarak yeterli görünmese de ikincil bir yöntem olarak kontrol amaçlı fikir vereceği öngörülmektedir.

Deneyin çıktı değerleri olan mukavemet karakteristikleri temelde alaşımın malzeme bileşiminden (tek bir molekülünü oluşturan elementlerin çeşitleri ve bunların birleşme oranı) ve moleküllerin kendi aralarındaki dizilim formasyonundan (granülometri) etkilenmektedir.

Dökümhane tarafında yapılan bir dizi iyileştirme çalışması sonucu söz konusu çıktı değerlerinin etkilendiği ve değişkenliğin arttığı tespit edilmiştir. Malzeme bileşimi şirketin uluslararası protokolleriyle belirlenip yine de farklı bir deneyin konusu olabileceken, bu çalışmada gerçekleştirilen deneyde sağlamlaştırma molekül dizilim yapısı üzerinden çalışılmıştır. Bu da doğrudan döküm süreciyle, alaşımın eriyik halden katı hale geçiş süreci ve hızıyla ilgilidir. Bu bağlamda ölçülen çıktı özellikleri arasında bir korelasyon varken girdi faktörleri ve çıktı değerleri arasındaki nedensellik ilişkisi üzerindeki doğrudan etkilerinden ve kesin olarak kontrol edilememelerinden, fakat ölçülebilmelerinden ötürü kalıp sıcaklık değerleri deney sırasında kritik gürültü faktörleri olarak kaydedilmiştir. Buna göre çeşitli noktalardan ölçülen sıcaklık değerleri 440 °C bir ortalama ve 40 birimlik bir standart sapmayla kayda değer bir salınım göstermektedir. Optimum değerler bu salınım altında kontrol edilmiştir.

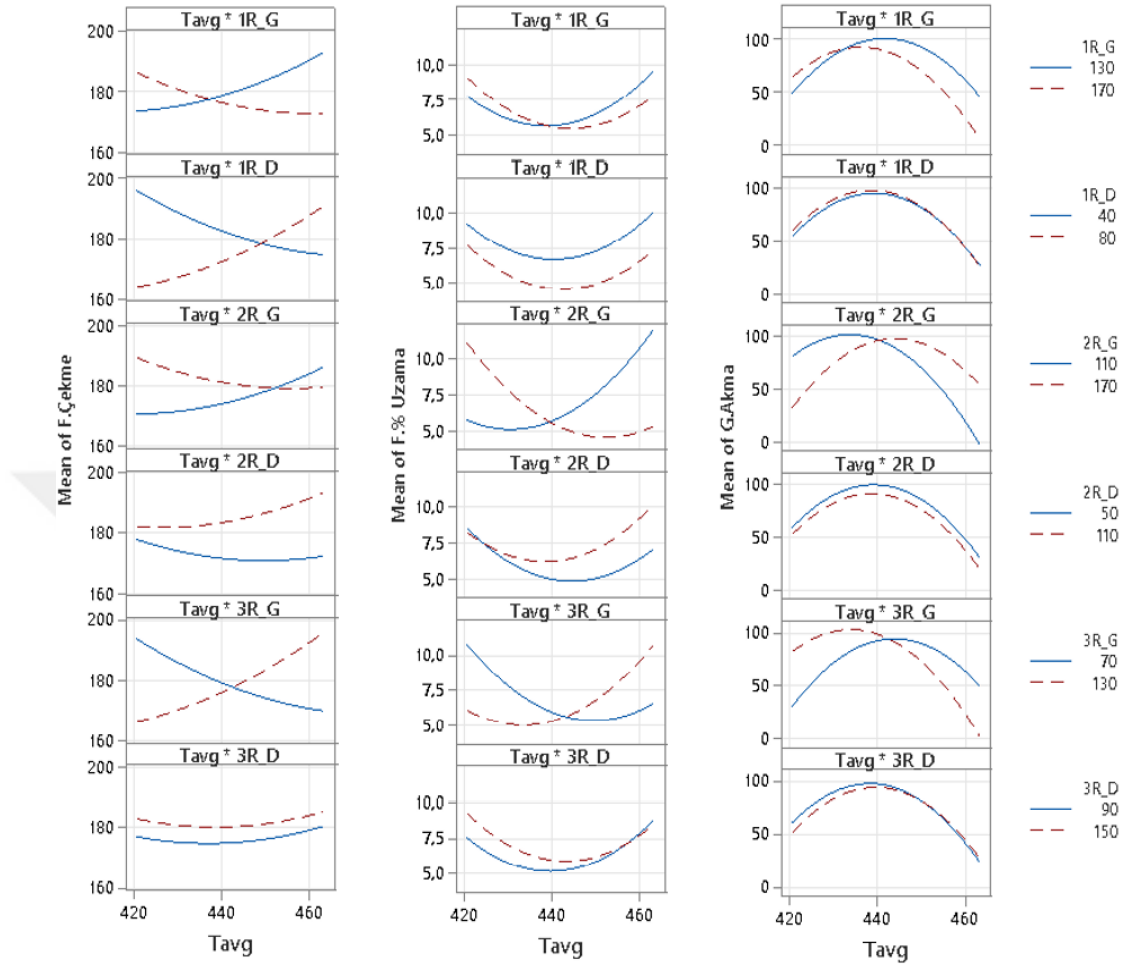
Taguchi analizi sonucunda tüm gürültüye karşı en fazla sinyali üreten faktör seviye bileşimleri bulunmuş olsa da kontrol aşamasında regresyon analiziyle bu faktörlerin kritik gürültü faktörleriyle etkileşimleri incelenerek deneyin sağlanması yapıp arada kalınan durumlarda karar verilebilecektir. Deney 32 adet gözlem değeri içerdiğinden, regresyonda etkili tahmin değişkeni sayısı-gözlem sayısı oranını bozmamak adına her deneydeki dört sıcaklık değerinin (T_1 , T_2 , T_3 , T_4) ortalaması bir yakınsama olarak (T_{avg}) çevre sıcaklığı şeklinde kullanılmıştır. Buna göre bahsedilen kritik anlardaki çevre sıcaklık değerleriyle beraber bunların her bir faktörle etkileşimlerini de içeren regresyon denklemleri Minitab uygulamasıyla üç çıktı kalite karakteristiği için ayrı ayrı hesaplanmış olup, bu hesaplamanın sonuçları Tablo 16'da gösterilmektedir.

Tablo 16: Çıktı kalite değerleri için regresyon denklemleri

Regresyon Denklemleri	Model İisabetleri	
$\begin{aligned} F.Çekme = & 1774 - 7,2 \text{ Tavg} + 8,18 \text{ 1R}_G - 13,08 \text{ 1R}_D + 4,5 \text{ 2R}_G - 2,68 \text{ 2R}_D - 9,3 \text{ 3R}_G \\ & + 0,28 \text{ 3R}_D + 0,0082 \text{ Tavg} \cdot \text{Tavg} - 0,0190 \text{ Tavg} \cdot \text{1R}_G + 0,0283 \text{ Tavg} \cdot \text{1R}_D \\ & - 0,0099 \text{ Tavg} \cdot \text{2R}_G + 0,0065 \text{ Tavg} \cdot \text{2R}_D + 0,0209 \text{ Tavg} \cdot \text{3R}_G - 0,00044 \text{ Tavg} \cdot \text{3R}_D \\ & + 0,00251 \text{ 1R}_G \cdot \text{1R}_D \end{aligned}$	S	R-sq
	3,09550	77,90%
$\begin{aligned} F.\% \text{ Uzama} = & 1011 - 5,11 \text{ Tavg} + 0,74 \text{ 1R}_G + 0,08 \text{ 1R}_D + 2,07 \text{ 2R}_G - 0,56 \text{ 2R}_D - 1,54 \text{ 3R}_G \\ & + 0,355 \text{ 3R}_D + 0,00649 \text{ Tavg} \cdot \text{Tavg} - 0,00184 \text{ Tavg} \cdot \text{1R}_G - 0,00068 \text{ Tavg} \cdot \text{1R}_D \\ & - 0,00472 \text{ Tavg} \cdot \text{2R}_G + 0,00132 \text{ Tavg} \cdot \text{2R}_D + 0,00347 \text{ Tavg} \cdot \text{3R}_G - 0,00078 \text{ Tavg} \cdot \text{3R}_D \\ & + 0,00115 \text{ 1R}_G \cdot \text{1R}_D \end{aligned}$	S	R-sq
	0,614133	74,09%
$\begin{aligned} G.Akma = & -24058 + 107,2 \text{ Tavg} + 14,48 \text{ 1R}_G + 2,57 \text{ 1R}_D - 17,9 \text{ 2R}_G + 0,57 \text{ 2R}_D + 17,2 \text{ 3R}_G \\ & - 2,34 \text{ 3R}_D - 0,1188 \text{ Tavg} \cdot \text{Tavg} - 0,0327 \text{ Tavg} \cdot \text{1R}_G - 0,0037 \text{ Tavg} \cdot \text{1R}_D \\ & + 0,0407 \text{ Tavg} \cdot \text{2R}_G - 0,0016 \text{ Tavg} \cdot \text{2R}_D - 0,0389 \text{ Tavg} \cdot \text{3R}_G + 0,00520 \text{ Tavg} \cdot \text{3R}_D \\ & - 0,00574 \text{ 1R}_G \cdot \text{1R}_D \end{aligned}$	S	R-sq
	3,57668	65,86%

Uygulamadan alınan modellerin R^2 değerleri öngörülen tahmin isabetiyle ilgilidir ve şeklin en sağ tarafında görüleceği üzere bulunmuştur. Durumdan duruma değişebilmekle birlikte müspet alanlarda genellikle %80'in üzerinde olduklarında isabetli kabul edilseler de metodolojide belirtildiği üzere sosyal alanlarda yahut üretimde girdinin yanındaki varyansın küçük bir bölümünü açıklaması bile faydalı olabileceğinden mevcut durumda çıktı değerlerindeki değişkenliği belirtilen oranlarda açıklıyor oluşlarıyla yeterli kabul edileceklerdir. Buna göre optimum seviyeleri belirlenen faktörlerin seçilen bu seviyeleri kritik gürültü faktörünün salınımı altında kontrol edilmiş ve iki değer arasında kalınan seviyeler ayrıca iredelenmiştir. Şekil 33 çevre sıcaklığının salınım gösterdiği değerlerde her bir faktörün seviyelerinin çıktı üzerine etkisini görselleştiren çoklu regresyon etkileşim grafiklerini göstermektedir. İlgili kalite karakteristiklerinin doğası ve kalite yaklaşımı gereği, üretimin gerçekleştiği gürültü faktörü aralığında en yüksek çıktı değerini veren faktör seviyeleri makbulken; Taguchi yöntemi ve altı sigma anlayışı gereği gürültüdeki değişkenlikten çıktının en az etkilendiği faktör seviyesi de gözetilmelidir.

Şekil 33: Çoklu regresyon etkileşim grafikleri



Bahsedilen en büyük değer ve gürültü altındaki en az değişkenlik kıstaslarına göre etkileşim grafikleri incelendiğinde, regresyon analizinden bulunan sonuçlar Taguchi analiziyle bulunanlarla örtüşmektedir. Örneğin üst hava soğutmasının devrede kalma süresinin (2R_D) optimum seviyesi feder çekme dayanımı ve feder uzama oranı için 110 saniye iken göbek akma dayanımı için 50 saniye de olsa, göbek akma dayanımı için 50 saniyenin 110 saniyeye kıyasla yarattığı fark diğerlerine oranla bir hayli düşük olduğundan dördüncü faktör için 110 saniye seviyesi seçilecektir. Taguchi analizinin sinyal gürültü oranı grafiklerinde de çok benzer bir sonuca ulaşılmış olup bu sonuç regresyon analiziyle doğrulanmıştır. Ayrıca birinci, ikinci, beşinci ve altıncı faktörlerin Taguchi analizi sonucunda belirlenen optimum seviyelerinin neden bu şekilde seçildiği de Şekil 33'ten görsel olarak doğrulanabilir. Ancak feder çekme dayanımı ve göbek akma dayanımı olmak üzere iki kalite karakteristiği için 110 saniye seviyesinde en iyi sonucu vermesine rağmen sinyal

gürültü oranı grafiklerinin incelenmesiyle daha sonra kontrolü yapılmak üzere 170 saniye seviyesinde seçilen üst hava soğutmasının devreye girme süresi (2R_G) için durum o kadar görünür değildir. Şekil 33'ün üçüncü satırına bakıldığında ilk sütundaki feder çekme dayanımı için 170 saniye seçiminin eğrinin eğimini bir miktar düşürdüğü, dolayısıyla gürültüden etkilenişi azalttığı görülse de genel olarak eğriler birbirine çok yakındır. Bu durum ilk bakışta sezgisel olarak seçilen iki seviyenin gerçek optimum seviyeden eşit uzaklıkta olduğu ve optimum seviyenin 140 saniye civarlarında olacağı şeklinde yorumlanabilecek olmakla beraber kontrolünün sağlanması önemlidir. Zira önerilen metodoloji bağlamında sürekli gelişime temel teşkil etmesi açısından gelecek çalışmalarda; çıktıya etkisi en fazla olan ve önemli bulunan faktörlerin budama yöntemiyle daha dar aralıklarla daha etkili seviyeleri aranacakken, önemi ve etkisi nispeten az olan faktörlerin çalışmada belirlenen optimum seviyelerine sabitlenerek deney tasarımında yerlerine etkili olabilecek diğer faktörlerin yerleştirilip etkilerinin geliştirmeye dahil edilmesi planlanmaktadır. Bu bağlamda seçilen diğer faktör seviyeleri altında, üç kalite çıktı değerini aynı anda maksimize eden bir üst hava soğutmasının devreye girme süresi (2R_G) değerine ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda Minitab uygulaması yoluyla doğrusal regresyonun çoklu yanıt tahmini analizi özelliği kullanılmıştır. Bu durumun doğrusal programlamanın mantığında olduğu gibi; diğer faktörlerin seçilen seviyeleri kısıt, optimum değeri aranan faktör karar değişkeni ve regresyon denklemleri amaç fonksiyonu olarak düşünülebileceği belirtilebilir. Böylece bulunan optimum faktör seviyelerindeki beklenen çıktı değerleri de güven aralıklarıyla beraber belirlenebilecek ve uygulamaya konulmadan önce Taguchi analizinden bulunanlarla karşılaştırılabilecektir. Tablo 17 bu analizin sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 17: Doğrusal regresyon çoklu yanıt tahmini analizi

Değişkenler

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
G.Akma	Maximum	81,59	103,33		1	1
F.% Uzama	Maximum	3,95	8,44		1	1
F.Çekme	Maximum	160,47	183,46		1	1

Çözüm

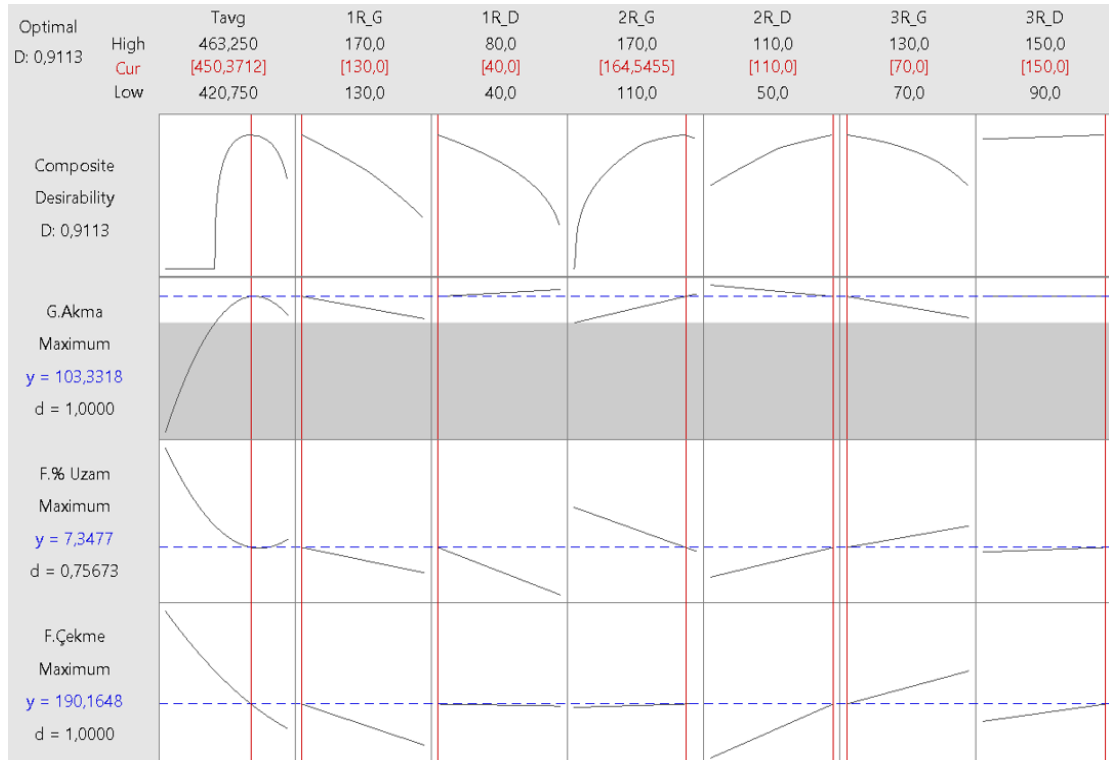
Solution	Tavg	1R_G	1R_D	2R_G	2R_D	3R_G	3R_D	G.Akma Fit	F.% Uzama Fit	F.Çekme Fit
1	450,371	130	40	164,545	110	70	150	103,332	7,34773	190,165

Solution	Composite Desirability
1	0,911271

Çoklu Yanıt Tahmini

Variable	Setting	Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Tavg	450,371	G.Akma	103,33	4,74	(93,28; 113,38)	(90,74; 115,92)
1R_G	130	F.% Uzama	7,348	0,814	(5,622; 9,073)	(5,186; 9,509)
1R_D	40	F.Çekme	190,16	4,10	(181,47; 198,86)	(179,27; 201,06)
2R_G	164,545					
2R_D	110					
3R_G	70					
3R_D	150					

Şekil 34: Çoklu yanıt analizi optimizasyon grafiği



Şekil 34'ün ilk satırının dördüncü faktörü üzerinden arada kalınan faktör için üç çıktı üzerindeki toplam etkisi üzerinden okunduğunda; seçildiği takdirde çıktı değerini civarındaki seviyelerde en kararlı yapıp aynı zamanda maksimize eden seviyenin 110'dansa 170 saniye seviyesi olduğunu, tam olarak 164,5 saniye olduğunu göstermektedir. Buna göre yapılan analiz sonucunda üst hava soğutmasının devreye girme süresinin optimum seviyesi, sinyal gürültü oranı grafiklerinin yorumlanmasına ve feder çekme dayanımı için regresyon ortalama sıcaklıkla etkileşim grafiğine paralel olarak 165 saniye olarak bulunmuştur. Bu seviye ve diğer faktörlerin en iyi seviyeleri baz alınarak belirlenen tahmini optimum çıktı değerleri Taguchi analizinden bulunanlardan yaklaşık %4-6'lık bir sapmayla daha iyimser görünse de örtüştükleri belirtilebilir. Bu durumun kısmi bir sebebi olarak 170 saniye seviyesi yerine denklemlere göre en iyi sonucu veren 164,5 saniye seviyesinin analizde kullanılmış olması gösterilebilir. Tablo 17 ayrıca optimum ayarlarda beklenen çıktı kalite değerlerinin standart hatalarıyla (Standard Error-SE) beraber güven (Confidence Interval-CI) ve tahmin (Prediction Interval-PI) aralıklarını göstermektedir. Pratikte bu değerlerin bir miktar düşük olacağını öngörmek mümkündür. Zira her deneyde alt, yanlar ve üst olmak üzere dört noktada ölçülen ve aralarında kayda değer sapma gözlenen sıcaklık değerleri; regresyona makul girdi sağlamak ve etkileşimleri değerlendirebilmek adına bir yakınsama olarak her deneyde tek bir ortalama değer olarak analize sokulmuştur. Bu durum da ayrıca göz önüne alındığında regresyondan elde edilen sonuçların Taguchi analizini sağladığı söylenebilir. Ayrıca ufak bir düzeltme de olsa arada kalınan faktöre dair daha etkili olacağı öngörülen ve hesaplanan bir seviye tespit edilmiştir ve buna göre kullanılacaktır. Son tahlilde üzerinde karar kılınan optimum seviyeler saniye cinsinden aşağıdaki gibidir ve kontrol deneyleri yürütülüp üretim bunlara göre ayarlanacaktır:

$$1R_G = 130 \quad 1R_D = 40 \quad 2R_G = 165 \quad 2R_D = 110 \quad 3R_G = 70 \quad 3R_D = 150$$

Tablo 18: Kontrol deneylerinin sonuçları

Ölçüm	F.Çekme	F.% Uzama	G.Akma
1	179.15	6.65	93.65
2	169.28	3.95	86.97
3	180.10	7.24	95.14
4	178.97	6.64	92.70
5	178.28	5.00	89.08
6	180.19	7.94	95.59
7	179.99	6.92	94.64
8	182.87	8.24	96.13
9	184.36	8.46	98.01
10	178.71	6.38	89.55
11	179.59	6.68	94.55
12	178.92	6.42	91.59
13	181.84	8.14	95.96

Bir miktar daha fazla yapılması önerilmiş olsa da ölçüm sisteminin doğası gereği maliyetli olmasından ve ölçülen ürünleri hurdaya çıkarmasından ötürü Tablo 18’de sonuçları görülebileceği üzere on üç adet kontrol deneyi yeterli görülerek seçilen faktör seviyelerinde yürütülmüştür. İsabetli ortalamalar ve standart sapmalar, akabinde buna bağlı olarak güvenilir bir altı sigma düzeyi kestirebilmek için veri büyüklüğü tam olarak yeterli olmamakla beraber süreç çıktıları feder çekme dayanımı için 179,4 N/mm² ortalama ve 3,5 birimlik bir standart sapmayla, feder boyca uzama oranı için %6,82 ortalama ve 1,29 birimlik bir standart sapmayla, göbek akma dayanımı için 93,3 N/mm² ortalama ve 3,22 birimlik bir standart sapmayla ölçülmüştür. Toleranslar da göz önünde bulundurulduğunda bu rakamlar sırasıyla 5,5 sigmalık, 2,2 sigmalık ve 4,1 sigmalık kalite güvenlik değerlerine tekabül etmektedir. Zamanla farklı sebeplerle hurdaya ayrılan parçalarda ölçüm yapılarak yakın ancak daha kararlı seviyelere oturmaları beklenmektedir. Yalın iyileştirmeler sonrası ve deney öncesi ölçüm Şekil 25 üzerinden toleranslarla beraber değerlendirildiğinde çekme, akma ve uzama için sırasıyla 0,58 sigma, 0,85 sigma ve 1,40 sigma olan altı sigma kalite seviyelerinde mevcut durumda dahi kayda değer bir iyileşme sağlanmıştır.

Sonuç olarak yalnızca soğutmaların devreye girme sürelerini kontrol ederek nispeten basit bir deneyle kayda değer bir iyileşme sağlandığı görülebilmektedir. Bu iyileşmeyi sürdürebilmek ve geliştirebilmek için gelecek çalışmalara dair bir dizi öneri aktarılmıştır. Buna göre en etkisiz faktörler olarak belirlenen alt maça su soğutma ve üst maça hava soğutmanın devreye girme süreleri, 130 ve 165 saniye değerlerinde sabit tutulmak üzere deneyden çıkarılmalıdır. Bunların yerine soğutma debileri, birinci faz basıncı ve süresi gibi öneminin yüksek olduğu düşünülen faktörler, seviyelerini

sürekli değiştirmenin mevcut üretim çevresinde zahmetli ve nispeten maliyetli görölmesine rağmen gerekirse aynı seviyelerindeki deneyler peşi sıra uygulanmak suretiyle deneye alınmalıdır. Deneyde kalan ve yüksek önem arz ettiği tespit edilen diğer faktörler, örneğin deney öncesi 60 saniye seviyesinde kullanılan ve optimum seviyesi 40 saniye olarak bulunan alt maça su soğutmasının devrede kalma süresi, bir sonraki çalışmada 30 ve 50 saniye seviyelerinde denenerek daha etkili bir seviyesi aranabilir. Ayrıca etkisi önemli bir faktör olarak belirlendiğinden, kontrol aşaması ortalama sıcaklık yerine doğrudan alt kalıp sıcaklığıyla etkileşimi üzerinden incelenebilir. Etkisi yüksek diğer faktörler için de benzer öneriler geçerli olacaktır.

Bu şekilde deney tasarımları, sürekli gelişim yolunda sıklıkla uygulanan yalın iyileştirmeleri, kaizen faaliyetlerini ve israf eleme çalışmalarını takiben, özellikle süreçlerin işleyişini değiştirme ihtimali olanlar biriktirilerek uygulandıktan sonra kullanılabilir. Bu bağlamda Taguchi analizi şimdiki kararlđ durumlardan gelecekteki israfsız durumlara geçiş aşamasında, altı sigma ve yalın üretimi birbirine bağlayan bir köprü görevi görerek virajların daha yumuşak alınmasını destekleyebilecektir.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çağdaş işletmecilik içerisinde işletmelerin karşısına çıkan en temel sorunların başında her sektörde faaliyet gösteren işletme sayısının sürekli olarak artması gelmektedir. Bunun etkisi iki yönde ortaya çıkmaktadır: Birincisi müşteri tarafında giderek artan bir rekabettir ki bu rekabet durumu işletmeleri, müşterileri sürekli olarak kendilerine doğru cezbetme zorluğu ile karşı karşıya bırakmaktadır. Bu zorluğu aşma çabaları içerisinde en öne çıkan konulardan biri de kalitenin yönetilmesi olmakta ve işletmelerin sürekli olarak bu doğrultuda geliştirilmiş olan çağdaş yaklaşımları uygulamaya alarak kaliteyi iyileştirmeleri gerekmektedir. İkinci boyut ise artan işletme sayısı ve üretim miktarları ile birlikte kaynak elde etmenin zorlaşması ve kaynak maliyetlerinin yükselme eğilimine girmesidir. Buna bağlı olarak işletmelerin maliyetlerinin artması, hem müşteriye daha düşük maliyetli ürünler sunarak rekabet edebilme becerilerini hem de işletmelerin karlılıklarını olumsuz etkilemektedir. Bu doğrultuda da işletmeler maliyetleri azaltacak, verimliliklerini arttıracak yol ve yöntemleri de yoğun olarak yönetim yapıları içerisinde dahil etmektedir.

Kalitenin yönetilmesi bağlamında toplam kalite yönetimi düşüncesi ile hız kazanan süreç içerisinde bunun sonrasında geliştirilmeye devam eden ve artık kalite yönetiminin ayrılmaz parçası haline gelmekte olan uygulamaya yönelik yaklaşımlar arasında, kalite mükemmelliği yolunda somut bir hedef sunan altı sigma yaklaşımı önemli bir uygulama aracı olarak görülmektedir. Çok sayıda işletmede uygulama alanı bulan bu yaklaşım, kaliteyi sürekli olarak iyileştirme döngüsü içerisinde hatayı neredeyse ortadan kaldırmayı hedefleyerek işletmelerin gerek rekabet gücü üzerinde gerekse kalitesizlikten kaynaklanan kayıpları üzerinde iyileştirici etkiler yaratmaktadır. Bununla birlikte maliyetleri yönetmek tarafına döndüğünde ise en sıklıkla başvuru olan yolun yalın düşünce olduğu ortadadır. Burada da işletmeler israf sayılacak tüm unsurları süreçlerden eleme yoluyla maliyet tasarrufu sağlamak ve bu yolla da hem rekabet gücünü hem de karlılıklarını arttırmak arayışında olmaktadır.

Her iki yaklaşım da temel vurgusunu mevcut üretim sistemlerinin ve süreç yapılarının iyileştirilmesi yoluyla elde edilecek kazanımlara odaklanmaktadır. Ancak bir taraftan da bir sistemin iyileştirilebilirlik düzeyinin, o sistemin tasarımının el verdiği derecede olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda kalite açısından da olsa, sistemdeki israfların önlenmesi açısından da bakılsa sistem tasarımlarının iyi yapılmasının önemi ortadadır. Bu bağlamda sağlam tasarım yaklaşımı önem taşımaktadır. Sağlam tasarımların elde edilebilmesi için ise odak noktası sistem

parametrelerinin çeşitli kombinasyonlarının denenerek doğru parametre değerlerinin bulunmasına yönelik deneysel tasarım yaklaşımları gerekmekte olup, bu noktada daha az sayıda deneyle etkin bir sağlam tasarım elde etmeyi amaçlayan Taguchi yaklaşımı hem zaman kazancı, hem maliyetlerin azaltılması hem de fazladan yapılan işlemlerin elenmesi yoluyla bir nevi yalınlaşma sağlaması açısından önemli bir kalite aracı olarak görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı, uygulamada genellikle birbirinde ayrı ya da birbirinin ardılı olarak kullanılan bu yaklaşımları, sürekli iyileştirme felsefesi içerisinde bir arada kullanabilecek şekilde bir metodoloji içerisinde birleştirmek ve bunun uygulamadaki geçerliliğini ortaya koymaktır.

Buna göre değer akış haritalamayla gösterilen gelecekte gidilecek israfsız süreçlerle, normal durumunda kararlı olması beklenen oturmuş süreçler düşünüldüğünde, yalın ve altı sigma görüşleri arasında değişkenlik ve israf ödümlenmesinin üzerinde ekonomik açıdan bir denge kurmak gerekir. Ancak zaruri olarak birinden feragat etmektense, süreçlerin işleyişini ve çıktıları etkileme ihtimali olan yalın iyileştirmeleri, her akla geldiğinde en kısa sürede sürekli uygulamak yerine belirli aralıklarla biriktirilerek uygulanmaları önerilmiştir. Bu aralıklar süreçlerin doğası ve ekonomik koşullar gereği Taguchi analiziyle takip edilebilecek boyutlarda olduğunda süreçler israflardan elendiği gibi maruz kalınan değişkenlik de en aza indirilebilecektir. Ekonomik açıdan deneylerin maliyeti elenen israflarla ve kalite kazanımlarıyla kompanse edilebilecektir. Ayrıca Taguchi yöntemiyle ulaşılan faktör seviyelerine doğru faktör seviyeleri olarak değil, yanılsa daha uzak ve diğerlerine oranla ideale daha yakın faktör seviyeleri olarak bakılacaktır. Sonraki çalışmalarda bu ideal seviyelerin daha dar aralıklarla bir alt ve bir üstünde iki seviye belirlenmesiyle gelişime bir istikamet verilmesi, ilerletilmesi ve ideal duruma yaklaşıması önerilmiştir. Faktörler belli bir seviyede kararlılığa ulaşsa dahi diğer faktörlerle etkileşim durumlarına göre ideal seviyelerine sabitlenerek deneyden çıkarılıp önemli olduğu düşünülen diğer faktörler deneye dahil edilebilecektir. Karmaşık etkileşimler içeren süreçlerde yeni gelen faktörlerin değişen değerlerinden ötürü optimum seviyeler etkilense dahi; deney tasarımının teorik altyapısı bağlamında sağladığı avantaj gereği çıktı değerleri az da olsa daima iyiye doğru gidecektir. Benzer şekilde yalın anlayış gereği süreçlerdeki iyileştirmeler gerek entropiye karşı gerekse teknolojik gelişmeler yahut çevresel değişimlerle beraber en ideal durumlarda bile durmayacağından bu sürekli arayışlar biriktirilerek tekrar deneyleriyle desteklenecektir. Yöntemlere ve çalışmalara tavır olarak bilimsel anlayış gereği doğruya ulaşma değil yanıştan

uzaklaşma olarak bakılacaktır. Böylece Taguchi yöntemi tasarım kısmında değişkenliğin azaltılmasında yalın altı sigma yaklaşımını desteklerken, literatürde Taguchi'ye getirilen en temel iki eleştiri olan birikimli ilerlemeye katkıda bulunmaması ve faktör seviyelerinin tam olarak belirlenememesi problemleri de aşılabilecektir. Bu bağlamda düşünüldüğünde yöntem tek seferlik bölgesel bir yöntem olarak değil; etkileri tek bir uygulamaya sığmayacak biçimde uzun vadeli ve genel bir üretim yaklaşımı olarak tarif edilmiştir.

Önerilen yöntem pratikte denenmiş ve Taguchi analizi israfların yeni elendiği süreçlerde feder çekme dayanımı için 4,92 sigma (0,58 sigmadan 5,5 sigmaya), feder boyca uzama oranı için 1,35 sigma (0,85 sigmadan 2,2 sigmaya) ve göbek akma dayanımı için 2,7 sigma (1,4 sigmadan 4,1 sigmaya) kalite kazanımı sağlanmıştır. Uygulamanın neredeyse tüm adımlarında istatistiksel düşünce etkili olmuş; deney tasarımları, süreç kontrolleri ve kabul örneklemeleri olarak üretimdeki tüm ana başlıklarından yararlanılmıştır. Böylece çalışmanın temel savı olan bahsedilen üretim yaklaşımlarının birlikte uyum içinde kullanılabileceği fikri ile bunların uygulanmasında ve dünya genelinde üretimde istatistiksel düşüncenin artan önemi bir nevi doğrulanmıştır. Ancak metodolojide belirtildiği üzere ortaya koyulan çalışma; doğrulanarak güçlenmekten ziyade yanlışlanmaya, eleştiriye ve eksik kısımlarının geliştirilmesine açıktır.

Metodoloji yalın anlayışa uygun olacak şekilde uygulanması olabildiğince basit ve sade, fakat bir o kadar da kapsayıcı bir yöntem olarak sunulmaya çalışılmıştır. Teorik temeli ve kullanımı açıklanan araçlar üretimdeki pek çok deneysel ve istatistiksel çalışmaya yön verebilecek, daha gelişmiş ve karmaşık çalışmalar için iyi bir temel ve yeterli bir başlangıç noktası oluşturacak şekilde uyarlanabileceklerdir. Söz konusu araçlar istatistiksel çalışma mantığı açısından fikir verip iyi bir istatistiksel düşünce temeli oluşturdukları gibi; çalışmanın kapsamında olan üretim yaklaşımları pratikte birbirlerini destekleyecek şekilde beraber uygulandıklarında aralarında oluşabilecek olası boşlukları tamamlama açısından da yeterli görünmektedir. Uyumları ve benzerliklerinden bahsedilen yaklaşımlardan yalın üretimin en büyük farkı kullandığı araçlardan ziyade felsefesinde ve olayları ele alış biçimindeki yaklaşımında öne çıkmaktadır. Özüm senerek uygulanmaları birçok durumda başarıya götüren yalın ilkelerin çalışanların yaklaşımında ve akabinde şirket bünyesinde tezahür etmesi için arka planda eğitimlerle desteklenip genel bir rehber zemin oluşturmaları tavsiyesine ek olarak önerilen yöntem pratikte; istatistiksel ölçüm ve kontrol kısmında altı sigma yaklaşımıyla, altı sigma yaklaşımı ilk etapta tasarım ve

süreç dışı geliştirme kısmında Taguchi yöntemiyle, Taguchi yöntemi de bahsedilen istatistiksel araçlarla desteklenmiştir. Söz konusu araçlar Taguchi yöntemine literatürde getirilen pek çok eleştiriyi çözebilecek nitelikte görünmektedir. Örneğin çok paydaşlı karmaşık süreçlerde kayıp fonksiyonunun ve buna bağlı toplam kalite kaybının, geliştirme amaçlı seçim kriteri olarak etkisini kaybettiği durumlarda kontrol grafikleri ve varyans analizi yardımıyla en fazla iyileştirme ve getiri sağlayacak süreçler belirlenebilecektir. Bir diğer genel eleştiri olarak yöntemin ardışık ve birikimli gelişmeler açısından yetersizliği, yalın altı sigmanın desteğiyle önerilen metodoloji çerçevesinde aşılabilecektir. Buna bağlı olarak az sayıda seviyeye bölündüklerinden parametrelerin optimum çalışma seviyelerini tam olarak verememesi eleştirisi metodolojinin başında yöntemin geneline uygun olarak tarif edilen ilerlemeli “budama” yöntemiyle aşılabilecektir. Faktörler arası etkileşimlerin tam olarak belirlenememesi eleştirisine karşı çalışmalar doğrusal regresyonla desteklenecek ve etkileşimler etkili ve anlamlı düzeyde tespit edilebilecektir. Çalışmanın kapsamındaki üretim yaklaşımlarının tamamının felsefesine ve karakteristiklerine uygun olacak şekilde metodoloji, kısa zamanlı ve bölgesel bir iyileştirme çalışması olmaktan ziyade uzun vadede daha etkili olabilecek; bilimsel, birikimli ve tekrarlamalı bir yöntem olarak tarif edilmiştir.

Bununla birlikte, çalışmanın belirli kısıtlar altında gerçekleştirilmesi nedeniyle ortaya koyulan metodolojide önerilen bazı kısımlarda eksiklikler olduğu da belirtilmelidir. Uygulamanın yapıldığı şirketin yönlendirmesi doğrultusunda bazı verilerin kayıt altına alınmasına ve bütçe paylaşımına müsaade edilmemesi, uygulama aşamalarının gerçekleştirilmesinde ve iyileştirmelerin belirlenmesinde bazı sıkıntılar yaratmıştır. Örneğin süreçlerin son yapılan değişikliklerden etkilenme dereceleri yakın olacağı ve seçilen sürecin önceliği belirtilerek, proje seçiminde değişkenlik maliyet kıyaslamasına gerek görülmemiştir. Ortogonal dizi seçiminde teoride L8 ya da L12 diziler yeterli görünse de L16 dizi kullanılmıştır ve bu durum örneklem büyüklüğüyle kontrol aşamasının isabetini kullanılabilir düzeyde artırmıştır. Proje seçiminde değişkenliği yüksek süreçlerin belirlenmesinde önerilen kontrol grafikleri yerine kutu diyagramı kullanılmıştır. Ayrıca ölçülen kalite karakteristiği ve ölçüm yönteminin doğası gereği her ölçülen parçanın hurdaya çıkması nedeniyle, ölçüm güvenilirliğinin teyidi ve varyans analizi için arzulanan sayıda ölçüm ve deney yürütülemediği görülmüştür.

Tüm bu kısıtlamalara karşın az sayı ve çeşitlilikte ve kolay değiştirilebilir altı faktörle yakalanan başarıyla, sonraki deneylerde etkisi düşük olarak gözlenen iki

faktörün çıkarılmasıyla ve bu çalışmadan sağlanan kazanıma dayanarak diğer önemli olarak oylanan iki faktörün maliyetine rağmen deneye alınmasıyla sigma seviyesinin yükseltilebileceği öngörülmektedir. Uygulama aşaması yalın iyileştirmelerin, en azından süreci etkileyebilecek olanların toplanıp beraber uygulanmaları ve akabinde deney tasarımıyla desteklenmeleri önerisini güçlendirmiştir. Mevcut uygulamadaki ölçümün doğası gereği ölçümü yapılan her jant hurdaya ayrıldığından Taguchi analizi kontrol aşamasında detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Bu şekilde olmayan yahut birim maliyetin nispeten düşük olduğu süreçlerde, arada kalınan her seviye için kontrol deneyleriyle parçalar üretilip karşılaştırılabileceği gibi daha isabetli bir doğrusal regresyon analizi için gerekli örneklem büyüklüğü de henüz deney aşamasından sağlanabilecektir.

Daha önce de vurgulandığı üzere, öne sürülen metodoloji yanlışlanmaya ve geliştirilmeye açık bir yapıdadır. İleriki çalışmalar ile değişkenliğin belirlenmesinde ve değişkenliği yüksek süreçlerin önceliklendirilmesinde alternatif yöntemler kullanılması, deney tasarımlarının ilerletilerek daha dar tolerans sınırları ile denemeler yapılması ve iyileştirme sonuçlarının değerlendirilmesinde ve doğrulanmasında alternatif yöntemler ortaya koyulması değer taşıyabilecek katkılar olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Akarslan, B. (2004) *Altı Sigma Metodu ve Bir Şirket Uygulaması*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi) İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Anderson, J.C., Rungtusanatham, M. (1994). A Theory Of Quality Management Underlying The Deming Management Method. *Academy of Management Review*. 19 (3): 472-509.

Antony, J. (2004). Some Pros and Cons of Six Sigma: An Academic Perspective. *The TQM Magazine*. 16: 303-306.

Antony, J., Rowlands, H., Knowles, G. (2000). An Application of Experimental Design for Process Optimisation. *The TQM Magazine*. 12 (2): 78–84.

Arlbjørn, J. S., Freytag, P. V. (2013). Evidence of Lean: A Review of International Peer-Reviewed Journal Articles. *European Business Review*. 25 (2): 174–205.

Arner, M. (2014). *Statistical Robust Design – An Industrial Perspective*. UK: John Wiley & Sons Ltd.

Arthur, J. (2001). *Six Sigma Simplified: Quantum Improvement Made Easy*. Colorado: KnowWare International.

Arvidsson, M., Gremyr, I. (2008). Principles of Robust Design Methodology. *Quality and Reliability Engineering International*. 24 (1): 23–35.

Avunduk, H. (2019). Yalın Altı Sigma: Bir Pet Şişirme Makinesinde Süreç İyileştirme Uygulaması. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*. 18 (70): 633 – 653.

Aydın, M.E. (1994). *Taguchi Metodu ve Bir Uygulama*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Barton, R., Thomas, A., Chuke-Okafor, C. (2008). Applying Lean Six Sigma in a Small Engineering Company—a Model for Change. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 20 (1): 113-129.

Baynal, K. (2003). Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi Yöntemi ile Eniyilenmesi ve Bir Uygulama. (Yayınlanmamış Doktora Tezi) İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Bellgran, M., Safsten, E.K. (2010). *Production Development: Design and Operation of Production Systems*. London: Springer Science Business Media.

Benton, W.C. (1991). Statistical Process Control and the Taguchi Method: A Comparative Evaluation. *International Journal of Production Research*, 29 (9): 1761–1770.

Bergquist, B., Albing, M. (2006). Statistical Methods - Does Anyone Really Use Them?. *Total Quality Management and Business Excellence*. 17 (8): 961–972.

Berthrong, J.H., Berthrong, E.N. (2000). *Confucianism: A Short Introduction*. Oxford: U.K Oneworld Publications.

Bessant, J., Caffyn, S., Gilbert, J., Harding, R., Webb, S. (1994). Rediscovering Continuous Improvement. *Technovation*. 14 (1): 17-29.

Bevan, H., Westwood, N., Crowe, R., O'Connor, M. (2006). Lean Six Sigma: Some Basic Concepts. *Institute for Innovation and Improvement*, London: NHS (The English National Health Service)

Bhuiyan, N., Baghel, A. (2005). An Overview of Continuous Improvement: From the Past to the Present. *Management Decision*. 43 (5): 761-771.

Bircan, H., Köse, S. (2012). Altı Sigma ve Firmaların Altı Sigmaya Bakış Açısı: Sivas - Kayseri İli Örneği. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*. 8 (2): 107-119.

Box, G.E.P., Bisgaard, S., Fung, C. (1988). An Explanation and Critique of Taguchi's Contributions to Quality Engineering. *Quality and Reliability Engineering International*. 4 (2): 123-131.

Breyfogle, F.W. (2003). *Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Method*. Canada: John Wiley & Sons.

Campbell-Allen, N.M., Jayamaha, N.P., Wagner, J.P., Grigg, N.P., Harvie, W. (2014). Testing a Theoretical Model Underlying the 'Toyota Way' – An Empirical Study Involving a Large Global Sample of Toyota Facilities. *International Journal of Production Research*. 52 (14): 4332-4350.

Canıyılmaz, E., Kutay, F. (2003). Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*. 18 (3): 51-63.

Cho, Y.G., Cho, K.T. (2008). A Loss Function Approach to Group Preference Aggregation in the AHP. *Computers & Operations Research*. 35 (3): 884-892.

Churchland, P. M. (2017) *Platon'un Kamerası*. İstanbul: Alfa Bilim Yayınları.

Ciani, L., Zanobini, A., Sereni, B., Catelani, M. (2016). Repeatability and Reproducibility Techniques for the Analysis of Measurement Systems. *Measurement*. 86: 125-132.

Convis, G.L., Liker, J.K. (2012). *Toyota Tarzı Yalın Liderlik*. Çev. Ayşe Soydan. İstanbul: Optimist Yayınları.

Çelik, K., Pehlivanoğlu, H.E., Avcı, S., Aladağ, Z. (2020). Aksiyomlarla Tasarım Yöntemi ile Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük Boncuk Hammaddesi Seçimi. *Endüstri Mühendisliği Dergisi* 31 (0): 32-43.

Dahlgaard, J.J., Mi Dahlgaard-Park, S. (2006). Lean Production, Six Sigma Quality, TQM and Company Culture. *The TQM Magazine*. 18 (3): 263–281.

Dahlgaard-Park, S.M., Chen, C.K., Jang, J.Y., Dahlgaard, J.J. (2013). Diagnosing and Prognosticating The Quality Movement – A Review On The 25 Years Quality Literature (1987-2011). *Total Quality Management & Business Excellence*. 24 (1): 1-18.

Dasgupta, T. (2003). Using the Six-Sigma Metric to Measure and Improve the Performance of a Supply Chain. *Total Quality Management and Business Excellence*. 14 (3): 355-366.

El-Haik, B., Yang, K. (2008). *Design for Six Sigma: Roadmap to Product Development*. USA: McGraw-Hill.

Ergün, A.K. (2003). *Altı Sigma Metodolojisi ve Türkiye'deki Uygulamaları*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi) İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., Zalewski, J. Design of Experiments via Taguchi Methods - Orthogonal Arrays. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/14%3A_Design_of_Experiments/14.01%3A_Design_of_Experiments_via_Taguchi_Methods_-_Orthogonal_Arrays](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/14%3A_Design_of_Experiments/14.01%3A_Design_of_Experiments_via_Taguchi_Methods_-_Orthogonal_Arrays), (15.03.2021).

Garcia, A.C., Rio, A.G. (2013). Number of Distinct Data Categories and Gage Repeatability and Reproducibility: A Double (But Single) Requirement. *Measurement*, 46 (8): 2514-2518.

Garvin, D.A. (1987). Competing in the Eight Dimensions of Quality. *Harvard Business Review*. 87 (6): 101–109.

Gencel, İ. (2007). *Çok Yanıtlı Problemlerin Optimizasyonunda Taguchi Yönteminin Kullanılması ve Alkollü İçkiler Sektöründe Bir Uygulama*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi) Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Fakültesi.

Gökçe, B., Taşgetiren, S. (2009). Kalite İçin Deney Tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 6 (1): 71-83.

Gremyr, I., Arvidsson, M., Johansson, P. (2003). Robust Design Methodology: A Status In the Swedish Manufacturing Industry. *Quality and Reliability Engineering International*. 19 (4): 285–293.

Gunter, B. (1987). A perspective on the Taguchi Methods. *Quality Progress*. 20: 44-52.

Haitao, Y., Tweed, T., Al-Hussein, M., Nasser, R. (2009). Development of Lean Model for House Construction Using Value Stream Mapping. *Journal of Construction Engineering and Management*. 135 (8): 782- 790.

Harry, M., Schroeder R. (2000). *Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*. USA: Doubleday Business.

Hastie, T., James, G., Witten, D., Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. New York: Springer Science Business Media.

Hines, P., Holweg, M., Rich, N. (2004). Learning to Evolve: A Review of Contemporary Lean Thinking. *International Journal of Operations & Production Management*. 24 (10): 994-1011.

Hines, P., Rich, N. (1997). The Seven Value Stream Mapping Tools. *International Journal of Operations & Production Management*. 17 (1): 46-64.

Hoerl, R.W., Gardner, M.M. (2010). Lean Six Sigma, Creativity and Innovation. *International Journal of Lean Six Sigma*. 1 (1): 30-38.

Hopp, W.J., Spearman, M.L. (2004). To Pull or not to Pull: What is the Question. *Manufacturing & Service Operations Management*. 6 (2):133-148.

Hsu Y.Y., Chen W.C., Hsieh L.F., Tai P.H. (2010). A Systematic Optimization Approach for Assembly Sequence Planning Using Taguchi Method, DOE, and BPNN. *Expert Systems with Applications*, 37 (1): 716–726.

Ihueze, C.C., Okpala, C.C. (2012). Application of Taguchi Robust Design as Optimized Lean Production System in Manufacturing Companies. *Research Journal in Engineering and Applied Sciences*. 1 (1): 45-50.

Ikovenko, S. (2004). TRIZ as a Lean Thinking Tool. *ETRIA TRIZ Future Conference 2004*. Florence: Firenze University Press. 608 (20): 157-164.

Ismail, M.Y., Abdolshah, M., Yusuff, R.M., Hong, T.S. (2009). A New Technique to Measure Process Capability with Taguchi Loss Functions. *2009 International Conference on Information Management and Engineering*. Kuala Lumpur, Malezya, 3-5 Nisan 2009, 186–190.

Işık, F. (2000). *Taguchi Metodu ve Bir Uygulama*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi) İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Fakültesi.

Jarial, S.K., Kumar, N., Narwal M.S. (2019). Lean Six Sigma: A Literature Review. *A Journal Of Composition Theory*. 12 (7): 645-652.

Jawalekar, S.B., Lande, M.S., Tupkar, R.S. (2016) Implementation of Lean Six Sigma. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 3 (5): 1753-1760.

Jenab, K., Wu, C., Moslehpour, S. (2017). *Design for Six Sigma: A Review*. USA: Management Science Letters.

Jiao J.R., Helo, P.T. (2008). Optimization Design of a CUSUM Control Chart Based on Taguchi's Loss Function. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 35 (11): 1234–1243.

Kackar, R.N. (1985). Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method. *Journal of Quality Technology*. 17 (4): 176-188.

Khuri, A.I., Mukhopadhyay, S. (2010). Response Surface Methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2 (2): 128–149.

Kim, Y.J., Cho, B.R. (2000). Econonmic Considerations on Parameter Design. *Quality and Reliability Engineering International*. 16 (6): 501-514.

Kobu, B. (2013). *Üretim Yönetimi*. 16. Baskı, İstanbul: Beta Basım.

Koskela, L. (2000). *An Exploration Towards a Production Theory and Its Application to Construction*. Espoo: VTT Publications.

Krafcik, J.F. (1988). Truimph of the Lean Production System. *MIT Sloan Management Review*. 30 (1): 41-48.

Kulaç, Ü. (2003). Yalın Üretim Felsefesi. <https://lean.org.tr/yalin-uretim-felsefesi/> (15.03.2021).

Liker, J.K. (2004). *Toyota Way*. New York: McGraw Hill.

Liker, J.K., Morgan, J.M. (2006). The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development. *The Academy of Management Perspectives*. 20 (2): 5-20.

Liker, J.K., Ogden, T. (2008). *Toyota Under Fire*. New York: McGraw Hill.

Marodin, G.A., Saurin T.A. (2013). Implementing Lean Production Systems: Research Areas and Opportunities for Future Studies. *International Journal of Production Research*. 51 (22): 6663–6680.

Meirovich, G. (2006). Quality of Design and Quality of Conformance: Contingency and Synergistic Approaches. *Total Quality Management* 17 (2): 205 –219.

Mohamed, H., Lee, M.H., Sarahintu, M., Salleh, S., Sanugi, B. (2008). The Use of Taguchi Method to Determine Factors Affecting the Performance of Destination

Sequence Distance Vector Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks. *Journal of Mathematics and Statistics*. 4 (4): 194–198.

Montgomery, D.C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*. 6. Edition. Arizona: John Wiley & Sons Inc.

Moyano-Fuentes, J., Sacristán-Díaz, M. (2012). Learning on Lean: A Review of Thinking and Research. *International Journal of Operations and Production Management*. 32 (5): 551–582.

Nair, V.N., Abraham, B., MacKay, J., Nelder, J.A., Box, G., Phadke, M.S., Wu, F.J. (1992). Taguchi's Parameter Design: A Panel Discussion. *Technometrics*. 34 (2): 127-161.

Nelson, L.S. (1984). Technical Aids: Notes on the Shewhart Control Chart-Tests for Special Causes. *Journal of Quality Technology*. 16 (4): 237-239.

Noorwali, A. (2013). Apply Lean and Taguchi in Different Level of Variability of Food Flow Processing System. *Procedia Engineering*. 63: 728 – 734.

Ordoobadi S. (2009). Evaluation of Advanced Manufacturing Technologies Using Taguchi's Loss Functions. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 20 (3): 367–384.

Parasuraman, A. (1997). Reflections on Gaining Competitive Advantage Through Customer Value. *Journal of the Academy of Marketing Science*. 25 (2): 154-161.

Pasqualini, F., Zawislak, P.A. (2005). Value Stream Mapping in Construction: A Case study in a Brazilian Construction Company. *Proceedings 13th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Sydney: IGLC-13: 117-125.

Pettersen, J. (2009). Defining Lean Production: Some Conceptual and Practical Issues. *The TQM Journal*. 21 (2): 127–142.

Phadke, M.S., Kackar, R.N., Speeney, D.V., Grieco, M.I. (1983). Off-Line Quality Control in Integrated Circuit Fabrication Using Experimental Design. *TheBtU System Technical Journal*. 1 (5): 250-251.

Popper, K. (1962). *Conjectures and Refutations*. New York: Basic Books.

Prokopenko, J. (1992). *Verimlilik Yönetimi Uygulamalı El Kitabı*. Çeviren: Olcay Baykal, Nevda Atalay. Ankara: MPM Yayınları.

Reeves, C.A., Bednar, D.A. (1994). Defining Quality: Alternatives and Implications. *Academy of Management Review*. 19 (3): 419-445.

Richardson, K. C., Malone, M. H. (2012). *Standardizing Ammunition Distribution within the United States Navy as either a Push or Pull Methodology*. (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi) Monterey. CA: Naval Postgraduate School Monterey.

Ridwan, A., Ekawati, R., Novitasari, A. (2018). Quality Control of the Steel Wire Rod Product by Integration Lean Six Sigma and Taguchi Method. *The 1st International Conference on Industrial, Electrical and Electronics (ICIEE 2018)*. Banten, 4-5 Eylül 2018. MATEC Web of Conferences 128: 04013.

Ross, P. J. (1989). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Singapur: McGrawHill.

Rother, M., Shook, J. (2000). *Learning to See: Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda*. Massachusetts: The Lean Enterprise Institute.

Russell, G.R., Miles, M.P. (1998). The Definition and Perception of Quality in ISO-9000 Firms. *Review of Business*. 19 (3): 13-16.

Saat, M. (2000). Kalite Denetiminde Taguchi Yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi İİBF Dergisi*. 2 (3): 97-108.

Sahoo, A.K., Singh, N.K., Shankar, R., Tiwari, M.K. (2008). Lean Philosophy: Implementation in a Forging Company. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 36 (5-6): 451-462.

Salah, S., Rahim, A., Carretero, J.A. (2010). The integration of Six Sigma and Lean Management. *International Journal of Lean Six Sigma*. 1 (3): 249–274.

Sanchez, S.M., Moeeni, F., Ria, A.J.V. (1997). A Robust Design Methodology for Kanban System Design. *International Journal of Production Research*. 35 (10): 2821-2838.

Schroeder, R.G., Linderman, K., Liedtke, C., Choo, A.S. (2008). Six Sigma: Definition and Underlying Theory. *Journal of Operations Management*. 26 (4): 536-554.

Shah, R., Ward, P.T. (2007). Defining and Developing Measures of Lean Production. *Journal of Operations Management*. 25 (4): 785-805.

Shahin, A., Alinavaz, M. (2008). Integrative Approaches and Frameworks of Lean and Six Sigma: A Literature Perspective. *International Journal of Process Management and Benchmarking*. 2 (4): 323-337.

Shalini, R., Saxena, A. (2018). Application of Taguchi Approach for the Optimization of Osmotic Dehydration of Papaya (*Carica papaya* L.). *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*. 20 (3):954-964.

Shoemaker, A.C., Tsui, K. L. (1991). Economical Experimentation Methods for Robust Design. *Technometrics* 33 (4): 415-427.

Singh, J., Singh, H. (2013). Continuous Improvement Philosophy – Literature Review and Directions. *Benchmarking: An International Journal*. 22 (1): 75-119.

Snee, R. (2004). Six Sigma: The Evolution of 100 Years of Business Improvement Methodology. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*. 1 (1): 4-20.

Snee, R.D. (2010). Lean Six Sigma: Getting Better All Time. *International Journal of Lean Six Sigma*. 1 (1): 9-29.

Starr, K.M. (1972) *Production Management Systems And Synthesis*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.

Şahin, M. (1977). *Üretim Yönetiminde Simülasyon Analizi ve Uygulaması*. (Yayınlanmamış Doktora Tezi) Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü.

Taguchi, G., Chowdhury, S., Taguchi, S. (2000). *Robust Engineering*. New York: McGraw- Hill.

Taguchi, G., Elsayed, E.A., Hsiang, T. (1989). *Quality Engineering in Production Systems*. Singapur: McGraw-Hill.

Tan K.K., Tang K.Z. (2001). Vehicle Dispatching System Based On Taguchi-Tuned Fuzzy Rules. *European Journal of Operational Research*. 128 (3): 545-557.

Tanco, M., Viles, E., Ilzarbe, L., Alvarez, M.J. (2009). Implementation of Design of Experiments Projects in Industry. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*. 25 (4): 478–505.

Tarng, Y.S., Yang, W.H. (1998). Application of the Taguchi Method to the Optimization of the Submerged Arc Welding Process. *Materials and Manufacturing Processes*. 13 (3): 455–467.

Tikici, M., Aksoy, A., Derin, N. (2006). Toplam Kalite Yönetiminin Radikal Unsurlarından Birisi Olarak Yalın Yönetim. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*. 5 (15): 20-33.

Tsui, K.L. (1992). An Overview Of Taguchi Method And Newly Developed Statistical Methods For Robust Design. *IIE Transactions*. 24 (5): 44-57.

Tsui, K.L. (1996). A Critical Look at Taguchi's Modelling Approach for Robust Design. *Journal of Applied Statistics*. 23 (1): 81–96.

Uğur, A. (2003). *İşletmelerde Verimlilik Ders Notları*. Sakarya: Sakarya Kitabevi.

Upton, M.T., Cox, C. (2008). Lean Six Sigma: a Fusion of Pan-Pacific Process Improvement. *Six Sigma Quality Resources for Achieving Six Sigma Results*. <http://texasleansixsigma.com/wp-content/uploads/2016/08/Lean-Six-Sigma-Pan-Pacific-paper-with-graphics13Apr04.pdf>. (15.03.2021).

Ünal, R., Dean, E.B. (1991). Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: An Overview. *Proceedings of the 13th Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts*, New Orleans, LA, USA, 21-24 Mayıs 1991: 1-10.

Wang, H.T., Liu, Z.J., Chen, S.X., Yang, J.P. (1999). Application of Taguchi Method to Robust Design of BLDC Motor Performance. *IEEE Transactions On Magnetics*. 35 (5): 3700-3702.

Wang, T.Y., Huang, C.Y. (2007). Improving Forecasting Performance by Employing the Taguchi Method. *European Journal of Operational Research*. 176 (2): 1052–1065.

Womack, J.P., Jones, D.T. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in your Corporation*. New York: Simon & Schuster Inc.

Womack, J.P., Jones, D.T. (2005). *Lean Solutions: How Companies and Customers can Create Value and Wealth Together*. Brookline: Mass Free Press.

Wysk, R.A., Niebel, B.W., Cohen, P.H., Simpson, T.W. (2000). *Manufacturing Processes: Integrated Product and Process Design*. New York: McGraw Hill.

Yalta, A. T. (2007). Bölüm 4: Farklı serpilimsellik.

<https://www.yumpu.com/tr/document/read/9774586/ekonometri2-notlari-kitap-surumu-bolum-04>, (19.04.2021).

Yüksel, H. (2017). *Üretim/İşlemler Yönetimi Temel Kavramlar*. İzmir: Kitapana Yayınevi.

Zhang, J., Yang, T., Wen, Y.F., Hsieh, Z.R. (2020). A Lean Production System Design for Semiconductor Crystal-Ingot Pulling Manufacturing Using Hybrid Taguchi Method And Simulation Optimization. *Assembly Automation*. 40 (3): 433–445.

Zhang, Q., Irfan, M., Khattak, M.A.O., Zhu, X., Hassan, M. (2012). Lean Six Sigma: A Literature Review. *Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business*. 3 (10): 599-605.