

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ELEKTROSTATİK TOZ BOYA PROSES PARAMETRELERİNİN
DENEY TASARIMI YÖNTEMLERİ İLE OPTİMİZASYONU VE
ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERDİ ÖZDEN

BALIKESİR, HAZİRAN – 2020

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ELEKTROSTATİK TOZ BOYA PROSES PARAMETRELERİNİN
DENEY TASARIMI YÖNTEMLERİ İLE OPTİMİZASYONU VE
ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERDİ ÖZDEN

**Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN (Tez Danışmanı)
Doç. Dr. Şener AKPINAR
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Ahmet Beyazıt OCAKTAN**

BALIKESİR, HAZİRAN – 2020

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Elektrostatik Toz Boya Proses Parametrelerinin Deney Tasarımı Yöntemleri ile Optimizasyonu ve Endüstriyel Uygulaması**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Erdi ÖZDEN

ÖZET

**ELEKTROSTATİK TOZ BOYA PROSES PARAMETRELERİNİN DENEY
TASARIMI YÖNTEMLERİ İLE OPTİMİZASYONU VE ENDÜSTRİYEL
UYGULAMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ERDİ ÖZDEN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
BALIKESİR, HAZİRAN- 2020**

Otomotiv sektörü ve yan sanayisinde üretilen metal içerikli ürünler için korozyon önemli bir problemdir. Korozyon, metal malzemelerin buldukları ortamdan etkilenerek fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu değişiklik meydana gelmesidir. Endüstride kullanılan metal malzemelerin korozyona uğramaması için metali dış etkilerden koruyucu bir kaplama veya boya uygulaması yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, traktör kabin iskeletinin elektrostatik toz boya prosesi uygulanarak kaplanması (boyama) süreci ele alınmış ve ISO-12944 standardı ile uyumlu biçimde kaplama için optimum kuru film kalınlığı elde edilmeye çalışılmıştır. Toz boya prosesinde optimum film kalınlığı elde etmek için deney tasarımı yöntemlerinden Taguchi ve Yanıt Yüzey Yöntem'leri kullanılmıştır. Girdi parametreleri olarak nozul çeşidi, voltaj değeri, akım değeri, toz boya debisi, toplam hava debisi, tabanca ucu hava debisi, kabartma havası ve boya tanecik boyutu kullanılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde kullanılan faktörler açısından bu çalışma benzerlerinden ayrılmaktadır. Çalışma iki aşamada yapılmış olup, ilk aşamada Taguchi yöntemi kullanılarak kuru film kalınlığı üzerinde etkili faktörler belirlenerek etkisi az olan faktörler için ortam şartları sabitlenmiş ve parametre sayısı azaltılmıştır. İkinci aşamada ise Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak kalan faktörler için optimizasyon yapılmıştır. Minitab istatistiksel analiz programı kullanılarak yapılan deney tasarımı, modelleme ve optimizasyon işlemleri sonunda; üretici firma tarafından istenilen 75µm optimum kuru film kalınlığı değerini sağlayan faktör seviyeleri belirlenerek optimizasyon gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Elektrostatik toz boya prosesi, Taguchi yöntemi, Yanıt yüzey yöntemi, Kuru film kalınlığı, Optimizasyon.

ABSTRACT

**ELECTROSTATIC POWDER COATING PROCESS PARAMETERS'
OPTIMIZATION WITH EXPERIMENTAL DESIGN METHODS, AND THEIR
INDUSTRIAL APPLICATIONS
MSC THESIS
ERDİ ÖZDEN
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
INDUSTRIAL ENGINEERING
BALIKESİR, JUNE- 2020**

Corrosion is one of the most fundamental problems for metal containing products produced in the automotive industry and its sub industries. Corrosion is the result of chemical and electrochemical reactions in the physical, chemical and mechanical properties of metal materials by being affected by their environment. In order to prevent corrosion of metal materials used in the industry from external effects, it is necessary to apply either a protective coating or paint to the metals. In this essay, electrostatic powder coating process of the tractor cabin frame is covered and optimum dry film thickness for coating is achieved in accordance with ISO – 12944 standards. Taguchi and Response Surface Methods were used in order to obtain optimum film thickness in the powder coating process. Nozzle type, voltage value, current value, powder coating flow, air flow, gun tip air flow, relief air and paint particle size were used as input parameters. This study is distinguished from similar studies in the literature in terms of the factors that are used. In this study, the experimental design was carried out in two stages and in the first stage, by using Taguchi method, the effects of input factors are determined. Then, the environmental conditions were fixed, and the number of parameters were reduced according to the effect of input factors on dry paint film thickness. In the second stage by using the response surface method, the remaining factors are optimized. At the end of the experimental design, modelling and optimization processes, factor levels are optimized for 75µm dry film thickness which was determined by the manufacturer is achieved by using Minitab statistical analysis program.

KEYWORDS: Electrostatic powder coating process, Taguchi method, Response surface methodology, Dry film thickness, Optimization

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
RESİM LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Önemi	1
1.2 Çalışmanın Amaçları	2
1.3 Çalışmadaki Kısıtlar ve Varsayımlar.....	4
1.4 Çalışmanın Özgün Katkısı.....	4
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. DENEY TASARIMI	12
3.1 Deney Tasarımı Kavramı ve Temel İlkeleri	12
3.2 Deney Tasarımı Aşamaları	16
3.3 Yaygın Kullanılan Deney Tasarımı Yöntemleri.....	19
3.3.1 Taguchi Yöntemi	20
3.3.2 Yanıt Yüzey Yöntemi.....	25
3.3.3 Faktöriyel Tasarım Yöntemi.....	31
4. UYGULAMA	36
4.1 Sistemin ve Problemin Tanımlanması.....	36
4.2 Deney Parametrelerinin ve Değer Aralıklarının Belirlenmesi	41
4.3 Deney Tasarımı ve Deneysel Sonuçlar.....	52
4.4 Deney Sonuçlarının Analizi ve Optimizasyonu	65
4.5 Doğrulama Deneyleri ve Sonuçların Değerlendirilmesi	68
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	70
5.1 Çalışma Özeti	70
5.2 Elde Edilen Sonuçlar	70
5.3 Sonraki Çalışma için Öneriler	72
6. KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: 1950-1990 yılları arasında deney tasarımının kalite düzeyine katkısı.....	13
Şekil 3.2: Geleneksel kayıp fonksiyonu (Şanyılmaz, 1998).	22
Şekil 3.3: Taguchi kayıp fonksiyonu (Şanyılmaz, 1998).	23
Şekil 3.4: (a)Köşe noktalar (b)Eksenel noktalar-merkez nokta (c)Modelde gösterimi.	27
Şekil 3.5: Merkezi bileşik tasarım (yüzey merkezli) modellemesi.	29
Şekil 3.6: Box-Behnken tasarım modeli (Mason, Gunst ve Hess, 2003).....	31
Şekil 4.1: Boyahane prosesi süreç akışı.	38
Şekil 4.2: Toz boya taneciklerinin kürlenmeden önce ve sonraki görüntüleri.....	47
Şekil 4.3: Taguchi yöntemi ortalama etki değerleri.	60
Şekil 4.4: Taguchi yöntemi gürültü/şiddet değerleri.....	60
Şekil 4.5: Yanıt Yüzey Yöntemi ile elde edilen optimizasyon kombinasyonu.	67
Şekil 4.6: Seri üretim koşullarına uyarlanmış hali.	68

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Literatür Taraması Özet Tablo	10
Tablo 3.1: Merkezi bileşik tasarım (Baş, 2010).	28
Tablo 3.2: Merkezi bileşik tasarım (yüzey merkezli) (Baş, 2010).	29
Tablo 3.3: Box- Behnken modeli (Mason, Gunst ve Hess, 2003).	30
Tablo 3.4: 3 faktörlü ve 2 seviyeli tam faktöriyel tasarım (Mason, Gunst ve Hess, 2003).	32
Tablo 3.5: Tam faktöriyel tasarımın avantajları ve kısıtları.	33
Tablo 3.6: 2 seviyeli, 3 faktörlü 8 deneyli bir tam faktöriyel deney tasarımı (Mason, 2003). ..	34
Tablo 3.7: 2 seviyeli 4 faktörlü 8 deneyli 1/2 kesirli, (2^{4-1}) kısmi faktöriyel tasarım (Mason, 2003).	34
Tablo 4.1: Toz boya tanecik boyutu dağılımı örnek 1.	47
Tablo 4.2: Toz boya tanecik boyutu dağılımı örnek 2.	48
Tablo 4.3: Deney 1 için girdi faktörleri ve seviyeleri.	54
Tablo 4.4: Deney 1 için kuru film kalınlığı sonuçları.	55
Tablo 4.5: Deney 2 için girdi faktörleri ve seviyeleri.	58
Tablo 4.6: Deney 2 için kuru film kalınlığı sonuçları.	59
Tablo 4.7: Yanıt Yüzey Yöntemi ile devam edilecek girdi faktörleri ve seviyeleri.	63
Tablo 4.8: Deney 3 için kuru film kalınlığı sonuçları (gözlenen ve beklenen değerler).	64
Tablo 4.9: ANOVA Tablosu	66
Tablo 4.10: Doğrulama deneyleri.	69
Tablo 4.11: 75 µm kuru film kalınlığı için optimum faktör seviyeleri.	69

SEMBOL LİSTESİ

- L(y)** : Kayıp fonksiyonu
K : Kalite sapma katsayısı
Y : Yanıt değişkeni
 β_i : Regresyon denklemi katsayıları
 β_j : Regresyon denklemi katsayıları
 β_{ij} : Regresyon denklemi katsayıları
n : Maksimum değer
 ϵ : Regresyon denkleminde artık terim
 α : Eksenel noktanın merkez noktadan uzaklığı
D : Arzu edilebilirlik, faktör seviyelerinin belirlenen sınır değerlere uyumluluk katsayısı

RESİM LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Resim 4.1: Boyahane ve diğer proseslerin genel görünümü.....	37
Resim 4.2: Yüzey işlem havuzları ve kataforez banyosu genel görünümü.	40
Resim 4.3: Toz boya prosesi parametre ekranı.....	42
Resim 4.4: Toz boya debisi ile çıkan toz boya bulutu.	43
Resim 4.5: Toplam hava debisi ile çıkan toz boya bulutu.	44
Resim 4.6: Manuel toz boya tabancası.	45
Resim 4.7: Toz boya taneciklerinin film oluşumu süreci.	46
Resim 4.8: Deneyde kullanılan nozul çeşitleri.	49
Resim 4.9: 1 numaralı nozuldaki çıkan toz boya bulutu.....	49
Resim 4.10: 2 numaralı nozuldaki çıkan toz boya bulutu.....	50
Resim 4.11: 3 numaralı nozuldaki çıkan toz boya bulutu.....	50
Resim 4.12: 4 numaralı nozuldaki çıkan toz boya bulutu.....	51
Resim 4.13: Manuel toz boya uygulaması.....	53
Resim 4.14: Deney parçası üzerinde ölçüm yapılan yerler.....	56
Resim 4.15: Kuru film kalınlığı ölçüm aleti.	57

KISALTMALAR LİSTESİ

HVLP	: Yüksek hacim düşük basınç (high volume low density)
PVC	: Polivinil klorür (polyvinyl chloride)
ANOVA	: Varyans analizi (analysis of variance)
VOC	: Uçucu organik bileşen (volatile organic compounds)
ARGE	: Araştırma geliştirme
CNH	: Case new holland company
İPK	: İstatistiksel proses kontrol
MRP	: Malzeme ihtiyaç planlaması (Materials requirement planning)
ΔE	: Boyanın renk uzayındaki karşılık geldiği sayısal değer

ÖNSÖZ

Bu tez Balıkesir ilinde faaliyet gösteren bir kabin fabrikasının boyahane bölümünde yapılmıştır. Kabin parçalarının korozyondan korunması, mekanik ve kimyasal etkilere dayanabilmesi için kullanılan toz boyanın teknik şartnamesinde yazan boya kalınlığının elde edilebilmesi için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan deneyler sırasında kullanılan malzemeler ve ekipmanlar firma bünyesinden karşılanmıştır. Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve bu tezi yazma aşamasında bana her türlü yol gösteren, desteklerini ve hayat tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN' a tüm samimiyetimle teşekkür ederim.

Tez yazma aşamasında gerek bilgi birikimini paylaştığı gerek kaynak temini konusunda yardımcı olduğu için sevgili arkadaşım Mehmet Selman KEMANECİ' ye teşekkür ederim.

Son olarak bana hayatımın her alanında destek olan ve benden sevgilerini hiç esirgemeyen babam Ersin ÖZDEN' e, annem Yıldız ÖZDEN' e, kardeşim Ezgi ÖZDEN' e ve hayatımı paylaşacağım sevgili nişanlım Melek MUTLU' ya çok teşekkür ederim.

Balıkesir, 2020

Erdi ÖZDEN

1.GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Önemi

Günümüzde üretim yapan firmaların ayakta kalabilmesi ve rekabet edebilmesi için ürünlerini kaliteli ve düşük maliyetli olarak üretmesi hayati öneme sahiptir. Bir firmanın üretim girdi maliyetlerini oluşturan ana kalemlerin başında; hammadde-malzeme maliyeti, işçilik maliyeti, genel giderlere ait maliyetler gelmektedir. Etkin bir rekabet için firmaların bu kalemler bazında maliyetlerini iyi analiz etmesinde yarar vardır. Örneğin, eğer firma hammaddesini yurt dışından alıyorsa, hammadde maliyetinde diğer firmalara bir avantaj sağlayamayacaktır. Çünkü ithalat ile yapılan hammadde girdisinde genel olarak benzer fiyatlar söz konusudur. Diğer bir maliyet kalemi olan enerji maliyetlerinde de aynı durum vardır. Devletin belirlemiş olduğu birim başına kullanılan enerji maliyeti bellidir ve üretimin gerekliliğinden doğan ve kullanılması zorunlu olan enerjide de bir kazanç elde edilemeyecektir. Bu konuda özellikle son yıllarda artan enerji maliyetleri yüzünden firmalar enerji çalışmaları yaparak enerji tüketimlerini azaltmaya çalışmaktadırlar. Böylece hem enerji maliyetlerini azaltmayı hem de çevre ile ilgili hükümetlerin her geçen gün katılaştıran emisyon politikalarına da kendilerini hazırlamayı amaçlamaktadırlar. Firmaların diğer firmalara rekabet konusunda fark atacağı, rakiplerinden bir adım önde olacağı en büyük maliyet girdisi işçilik maliyetleridir. Çünkü işçilik maliyeti kendi başına ana maliyet kalemlerinden biri olmakla birlikte, aynı zamanda direkt işçilik süreleri genel gider maliyetlerinin ürünlere dağıtılmasında da kullanılan bir anahtar kalemdir. İşçilik maliyetlerini normal çalışma maliyeti ve ürün kalitesizliğinden doğan yeniden üretme ya da rötuş maliyeti olarak ikiye ayırabiliriz. Normal çalışma maliyetleri, işçilerin haftalık çalışma saatlerine göre ay sonunda almış olduğu ücrete denilmektedir. Bir de kalitesizlik maliyetlerinden doğan maliyetler vardır. Üretim hattından çıkan ürünler yanlış metot, hatalı kullanılan hammadde, makine arızası ve personel hatası gibi nedenlerden dolayı üretim hataları ortaya çıkabilmektedir. Bu hataların düzeltilmesi için de yine çalışanlara fazladan işçilik ücretleri ödenecek ve böylece firmanın işçilik maliyetleri artacaktır. Diğer girdi maliyetlerinde çok fazla tasarruf edemeyen firmaların maliyetlerinin üzerine bir de işçilik maliyetlerindeki artışın eklenmesi, bu firmaların rekabet güçlerini önemli ölçüde etkileyecektir. Böyle bir durumda, işçilik maliyetlerini arttıran önemli bir etken olan

kalitesizlik maliyetlerini azaltma yoluna gitmek iyi bir strateji olarak benimsenebilir. Kalitesizlik maliyetlerini azaltmak için de ürünlerin müşteri tarafından belirlenmiş toleranslar içerisinde üretimini sağlamak önem arz etmektedir.

Yapılacak olan bu tez kapsamındaki çalışmalar sayesinde üretimdeki tolerans dışı hatalı ürünler müşteri tarafından belirlenmiş toleranslar içerisinde tutularak oluşan kalitesizlik maliyetleri en aza indirilmeye çalışılacaktır.

1.2 Çalışmanın Amaçları

Geçmiş yıllarda yapılan boya optimizasyon çalışmaları araştırıldığında optimizasyon yapılan iki ana proses karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan bir tanesi yaş boya, bir tanesi de toz boyadır. Özellikle gelişmiş sanayilere bakıldığında bu sanayilerden otomotiv ve iş makineleri ana sanayi endüstrileri ön plana çıkmaktadır. Ford, CNH, Nissan ve Fiat gibi dünyaca ünlü markaların boya proseslerinde yaş boya kuru film kalınlığı optimizasyon çalışmaları yapıldığı görülmektedir. Bu firmalar gövde dedikleri otomobilin ya da kamyonun ana gövdesini tesislerinde bulunan robotlar sayesinde boyamaktadırlar. Bu robotların da boya optimizasyonu çalışmalarında özellikle yörünge yazılımı optimizasyonu dikkat çekmektedir. Yörünge optimizasyonu boya tabancasının ya da robot ucundaki çan (bell) kısmının boyanacak malzeme üzerinde belirli bir yörüngede hareket ederek boyama hızı ve uzaklığı da dikkate alınarak çalışmalar yapılmasıdır. Yaş boya her ne kadar görsel etkisi sayesinde çok önemli olsa da özellikle hükümetler tarafından artan çevre baskıları yüzünden ARGE mühendisleri yaş boya yerine kullanılacak daha çevresel bir boya araştırmaktadırlar. Çevresel anlamda çok büyük artıları olan ve yaş boyanın en büyük rakibi olarak görülen toz boya ise her ne kadar yaş boyaya çevresel anlamda çok büyük üstünlükler sağlasa da görüntü kalitesi ve rötuşlardaki renk farklılığından dolayı hala yaş boya prosesine otomotiv endüstrisinde rakip olamamıştır. Toz boya prosesi özellikle mekanik ve kimyasal dayanımından dolayı otomotiv yedek parça ve otomobil içerisindeki malzemelerin boyanmasında kullanılmaktadır. Bu parçalarda çoğu zaman otomotiv yan sanayi firmalarında boyandığı için robotik toz boyama yerine manuel toz boyama şeklinde olmaktadır. Otomotiv sanayisinde kullanılan robotlar, yan sanayide işletme ve yatırım maliyetlerinden dolayı kullanılması çok zordur. Yan sanayide robot

kullanılmamasının bir diğerk nedeni ise, robot ile boyamak için malzeme tipi ve miktarı yeterli miktarda olmamasındandır. Malzemeler ya çok küçük ya da her çeşit malzemedenden az miktarda geldiği için robot yatırımları uygun olmamaktadır.

İşletmelerde gelişmiş teknolojinin kullanılmasının yanında yetişmiş işgücü de çok önemlidir. Özellikle sanayi bölgesi gelişmemiş yerleşim yerlerinde personellerin fabrikada çalışma alışkanlığı da olmadığı için el becerisi ve nitelikli mavi yaka isteyen işlerde yetişmiş işgücü son derece önemlidir. Manuel toz boya prosesi de yetişmiş işgücüne ihtiyaç duyulan bir prosestir. Personel boyama yapacağı parça için boya parametrelerini ayarlayabilmeli ve belirli bir boyama tekniklerini izleyerek boyama işlemini tamamlamalıdır. Eğer personel yetkin değil ise belirli boyama prosedürlerini yapmamakta ve personelin tamamen doğru ya da yanlış bildiği tecrübesi ön plana çıkmakta ya da eğitim aldığı kadarıyla ve kişisel becerisiyle toz boya uygulamasını yapabilmektedir. Bu durum ise toz boya prosesini tamamen personelin tecrübesine ve herhangi bir akademik bir çalışma yapılmadan tamamen tesadüfi yapılan bir boyama işlemine neden olmaktadır. Bu etkilerin üzerine bir de personelin boyama anındaki fiziksel ve ruhsal durumu da eklenince boyanan parçanın boya kalitesinde değişkenlikler gözlenecektir. Bahsedilen bu durumlardan dolayı boyanan parçalarda standart olarak sağlanan boya kalitesinden söz edilememektedir.

Kuru film kalınlığının istenilen toleranslar arasında olmaması sadece ürün için yeniden işleme gibi maliyetleri arttırmasının yanında üründe performans kayıplarına da neden olmaktadır. Bu çalışma yapılmadan önce boyanacak parça türüne göre belirli faktör seviyeleri seçilmekte fakat bu seçilen faktör seviyeleri ile 75µ kuru film kalınlığını elde etmek her zaman mümkün olmamaktadır. Kuru film kalınlığının istenen seviyede olmaması yeniden boyama maliyetlerini arttırmaktadır. Bu durumda hem işçilik maliyetlerini hem de işletme maliyetlerini arttırdığı için işletme karlılığına direkt olarak etkisi olmaktadır. Bu gibi olumsuz durumların önüne geçmek için çevrimiçi (online) kalite kontrol olarak bilinen ve üretimin her aşamasında sıkı kalite kontrol yapılarak bozuk ürünün bir sonraki aşamaya geçmesini önlemek yerine çevrimdışı (off-line) kalite kontrol olarak bilinen yöntem kullanılarak seri imalata geçmeden önce kalitesiz ürün üretmeyecek proses parametrelerinin belirlenmesi yönteminin daha uygun bir yaklaşım olduğu artık literatürde yaygın olarak benimsenmektedir. Yapılan bu tez çalışması ile elektrostatik toz boyama süreci sonunda istenilen kuru film kalınlığını elde etmeyi sağlayacak proses parametrelerinin optimize edilmesi amaçlanmaktadır.

1.3 Çalışmadaki Kısıtlar ve Varsayımlar

Firmanın ürün ve boya çeşitliliğinin fazla olması ve deneylerde boyama işlemini gerçekleştirecek personelin vardiya saatleri, deneylerin planlanmasında zorluk yaratmıştır. Bu kısıtların üstesinden gelebilmek amacıyla, deneylerde tek tip boya kullanılmıştır. Bunun yanında personelin deneyler yapılırken boyama işleminde izlediği yörünge sabitlendiği varsayılmaktadır. Personelin aynı şekilde hareket etmesi ve boyanacak parça ile boya tabancası arasındaki mesafenin sürekli olarak sabit tutulmasına özen gösterilmiştir.

1.4 Çalışmanın Özgün Katkısı

Deneylere başlamadan önce hangi faktörün kuru film kalınlığı üzerindeki etkisinin ne aşamada olduğu ve bu faktörlerin çıktığı hangi seviyede etkilediği sadece tecrübeden gelen bilgiler bile bilinmekteydi. Literatür çalışmaları da incelendiğinde toz boya prosesindeki tüm faktörlerin daha önce yapılan hiçbir çalışmada kullanılmadığı görülmüştür. Bu iki durumdan dolayı toz boya prosesinde kullanılan tüm parametreler deneye dahil edilmiştir. Deneye dahil edilen faktörler öncelikle Taguchi yöntemi ile önem dereceleri belirlendikten sonra Yanıt Yüzey yöntemi ile çıktı faktöründe 75μ kuru film kalınlığını elde etmek için optimizasyon yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yapılan literatür çalışmasında 1986 yılından 2019 yılına kadar yapılan çalışmalar incelenmiştir. Kullanılan girdi değişkenleri, çıktılar ve kullanılan yöntemler üzerinde durulmuştur. Aşağıda kronolojik sıra ile yapılan çalışmalar verilmiştir.

Parmak (1986), elektrostatik toz boya kaplamanın avantajları üzerine çalışılmıştır. Bu makalede toz boya teknolojisi ile diğer boya teknolojilerinin arasındaki farklara değinmiş ve toz boya teknolojisinin teknik ve ekonomik açıdan diğer boyama proseslerine göre daha düşük boyama maliyeti, daha az üretim riskleri, daha az çevre kirliliği yapması ve mekanik etkilere karşı daha mukavemetli olması sonucuna ulaşılmıştır.

Mountain ve Mazumder (1996), çalışmalarında toz boya prosesinde Yanıt Yüzey Yöntemi tekniği ile transfer verimliliği üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada Yanıt Yüzey Yöntemi'nden Box- Behnken metodu kullanılmıştır. Girdi parametreleri olarak voltaj değeri, birincil hava debisi ve ikincil hava debisi faktörlerini seçmişlerdir. Çıktı faktörü olarak da toz boya prosesinin transfer verimliliğini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucu matematiksel bir denklem oluşturulmuştur. Birinci derece ve ikinci derece denklemlerinden oluşturulan bu modelde eski sonuçlara göre nispeten daha iyi sonuçlara ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Ferah (2003), Taguchi yöntemini kullanarak alüminyum profillerinin toz boya ile boyanmasında boya kalınlığı ve darbe direnci optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Girdi değişkenleri olarak hava basıncı, boyama uzaklığı, boya tipi ve konveyör hızı kullanılmıştır. Çıktı değişkenleri olarak kuru film kalınlığı, darbe direnci sonuçları ölçülmüştür. Toz boya maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı profillerin film kalınlığının 60 µm ve 80 µm olması ve profillerin dış cephelerde kullanılmasından dolayı da darbe direncinin maksimum olması hedeflenmiştir. L18 ortogonal dizisi kullanılarak algoritma yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda belirlenen optimum proses şartlarında iyileştirmeler gözlemlenmiş ve boya sarfiyatında azalmalar olmuştur.

Wang (2004), elektrostatik toz boya yöntemiyle ince boyutlu (15µ) polyester toz boyalar ile normal boyutlu (35µ) polyester toz boyaların ilk seferde transfer verimliliği ve yüzey kalitesi değerlendirme çalışmalarında bulunmuştur. Girdi değişkenleri olarak boyama uzaklığı ve voltaj değeri kullanılmıştır. Çıktı değişkenleri olarak film kalitesi, boyayı şarjlama

karakteristiği, boya transfer verimliliği kullanılmıştır. Çalışmada normal boyutlu toz boyalarda voltaj arttırıldığında transfer verimliliğinin arttığı gözlemlenirken, ince boyutlu toz boyalarda tam tersi gözlemlenmiştir.

Amembal (2009), “Toz Boya Prosesinde Parlaklık Değeri Optimizasyonu” çalışmasını yapmıştır. Bu alışmasında Taguchi yöntemini kullanmıştır. Girdi faktörleri olarak toz boya tipi, katalizör tipi ve katkı maddesi seçilmiştir. ıktı faktörü olarak parlaklık derecesi incelenmiştir. Deney sonucunda katkı maddesi miktarının toz boya parlaklık değeri üzerinde bağımsız olarak etki ettiği gözlemlenmiştir.

Luangpaiboon (2010), alışmasında Yanıt Yüzey Yöntemi’ ni kullanarak “Almiyumu Alaşımlı Jantların zerine Elektrostatik Toz Boya Prosesi ile Kaplama Kalınlığı Optimizasyonu” alışmıştır. Jantlardaki parlaklık ve gölgeleme problemlerine zm bulunmaya çalışılmıştır. Girdi değişkenleri olarak boya direnci, voltaj, boya viskozitesi, boya debisi ve tabanca hava debisi kullanılmıştır. ıktı değişkenleri olarak boya kalınlığı llmştir. Çalışma sonucunda kritik bölgelerdeki boya kalınlığının istenilen kalınlıkta olabilmesi için parametreler optimize edilmiştir.

Jassbi, Alborzi ve Ghoreshi (2011), çalışmalarında yaş boya prosesinde “Son Kat Boya Kalınlığı Optimizasyonu” alışmışlardır. Yapay sinir ağları ve regresyon yöntemini kullanarak boya kalitesini arttırmayı ve aynı zamanda maliyet ve israfları da azaltmayı amaçlamışlardır. Girdi değişkenleri olarak boya viskozitesi, boya sıcaklığı, boyanın atıldığı kabin sıcaklığı, nemi ve voltaj kullanılmıştır. ıktı değişkenleri olarak kuru film kalınlığı llmştir. Yapılan alışma sonucunda yapay sinir ağları metodu ile boya kalınlıklarının tahminlerinde başarı sonuçlar elde edilmiştir.

Singhtaun ve Prasarthong (2012), elektrostatik kaplama yöntemi kullanarak paslanmaz elik pulların kaplanmadan kalan bölgelerinin azaltılması konusu üzerine çalışmışlardır. Boya kalitesinde en önemli aşamalardan birinin de yüzey hazırlığı olduğunu belirtmişlerdir. Deney tasarımı tekniklerinden 2^3 tam faktöriyel yöntemi kullanılmıştır. Girdi değişkenleri olarak n temizlik zamanı, kimyasal konsantrasyon ve topraklanmayı sağlayan askıların şekli alınmıştır. ıktı değişkeni olarak kaplanmadan kalan alan yüzdesi alınmıştır. Temizlik zamanı süresi optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda kaplanmadan kalan alan %4’ten %1,02’ye dşrlmştir. Operasyon maliyeti de %10 azaltılmıştır.

Ajer (2012), elektrostatik toz boya prosesinde epoksi toz boyanın galvaniz saca uygulanmasında etki eden parametreler üzerine çalışmıştır. Girdi değişkenleri olarak hava debisi, boyama uzaklığı ve toz boya debisi kullanılmıştır. Çıktı değişkenleri olarak kaplama kalınlığı, boya transfer verimliliği, kaplama karakteristiği, kaplamanın çapraz bağ (cross-link) yapısı, görsel yapısı kullanılmıştır.

Gangal (2013), Taguchi yöntemini kullanarak toz boya kaplama prosesinin iyileştirmesi üzerine çalışmıştır. Girdi parametrelerini voltaj, boya debisi ve hava debisi olarak seçmiş ve her bir parametrenin etkisi şiddet/gürültü oranı ve ANOVA tekniği ile belirlenmiştir. Çalışmasında çıktı parametresi olarak yüzeylerdeki portakallanma etkisi ve kuru film kalınlığı çalışmıştır. Minitab sonuçlarına göre boya debisinin diğer girdi parametrelerine göre çıktı değişkenleri üzerinde en yüksek etki ettiği seviyesine göre gözlenmiştir.

Luangkularb, Prombanpong ve Tangwarodomnukun (2014), çalışmalarında Taguchi yöntemini kullanarak yaş boya prosesinde boya tüketimi ile kaplama kalınlığı arasındaki bağlantıyı incelemiştir. Girdi değişkenleri olarak hava basıncı, boyama zamanı, tabanca nozul boyutu kullanılmıştır. Çıktı değişkenleri olarak tek atımda atılan boya miktarı ve kuru film kalınlığı gözlenmiştir. Deney sonuçları göstermiştir ki düşük sprej zamanı, yüksek çapta nozul kullanımı ve düşük sprej basıncı malzeme tüketimini ve kuru film kalınlığını arttırmaktadır.

Bharathi ve Baskaran (2014), Taguchi yöntemini kullanarak çelik yapılarda boya prosesinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarındaki odaklandıkları ana konu boya tüketimi olmuştur. Girdi değişkenleri olarak boya viskozitesi, basınç, kompresör basıncı ve tabanca uzaklığı alınmıştır. Çıktı değişkenleri olarak boya maliyetini iyileştirme, kaplanan boya metrekaresini iyileştirme alınmıştır. Çalışma sonucunda kompresör basıncının ve boya viskozitesinin boya tüketimi üzerinde diğer parametrelere göre daha fazla etkili olduğu gözlemlenmiştir.

R. Ahmad ve M. R. Ajer (2015), çalışmalarında elektrostatik toz boya prosesinde boya atımı ve toplam hava debisini kullanarak optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmayı yaparken de çıktı olarak boya kalınlığı, ilk boya atımındaki transfer verimliliğini ve boyanın referans bir değerden değişkenliğini ölçen ve spektrofotometri cihazı ile ölçülen ΔE değerini ölçmüşlerdir. Boya kalınlığı ölçümü ISO 2178 standartlarına göre ölçülmüştür. Yüzey

kalitesinin belirlenmesi için de boya kalınlığı, boya yapışması, yüzeydeki boyanın yapısı, oyuk direnci ve yüzey yapısı gibi kalite göstergelerini tek tek ölçmüşlerdir.

Bhalamurugan ve Prabhu (2015), çalışmalarında Taguchi ve Gri İlişkisel Analiz yöntemlerini kullanarak yaş boya prosesinde ABB marka boya robotunun ucuna HVLP (yüksek hacim düşük basınç) tipi manuel boya tabancasını takarak performansının ölçümü üzerine çalışmışlardır. Girdi değişkenleri olarak tabancanın hareket hızı, tabanca mesafe uzaklığı ve basınç alınmıştır. Çıktı değişkenleri olarak kuru film kalınlığı değişkenliği, yüzey sertliği ve kuru film yapışma özelliği gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına göre çıktı performansını en fazla etkileyen girdi faktörünün tabanca mesafe uzaklığı olduğu gözlemlenmiştir.

Durgun (2015), çalışmasında yaş boya prosesinde Optimum Renk Sayısının Belirlenmesi üzerine çalışmış ve bir araba fabrikası boyahanesinde uygulama yapmıştır. Girdi değişkenleri olarak direkt malzeme, işçilik, enerji, boya atıklarını kullanmıştır. Çıktı değişkenleri olarak renk sayısını kullanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda her renk değişiminde kayıpların tespit edildiğini, %1'in altında kullanım oranına sahip renklerin kullanılmasının boya sarfiyatını arttırdığını gözlemlenmiştir.

Karaoglan ve Celik (2016), çalışmalarında Yanıt Yüzey Yöntemi' ni kullanarak yaş boya prosesi ile trafo kazanlarının radyatörlerinin boyanmasında yaş üstü yaş boya uygulaması ve optimizasyonu üzerine çalışmışlar ve değişken çevre koşulları altında kullanılabilen "Adaptif Yanıt Yüzey Yöntemi" adında yeni bir yöntem önermişlerdir. Girdi değişkenleri olarak viskozite ve kuruma zamanı kullanılmıştır. Çıktı değişkenleri olarak zaman, maliyet ve işçilik kazancı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda yeni bir Yanıt Yüzey Yöntemi geliştirerek yaş üstü yaş prosesinin sanayide uygulanabilirliği ve bu sayede taşıma, fırınlama, işçilik ve enerji maliyetinde kayda değer azalmalar olabileceği gösterilmiştir.

Gao (2016), toz boya prosesinde siklon tasarımı, metalik pigment ekleyerek kaplama verimliliğini artırma, tabanca tasarımı ve iletken olmayan parçaların toz boya ile boyanması gibi birçok konuda çalışmalar yapmıştır. Yeni bir siklon tasarımında siklonun alt tarafına ikinci bir bölme yapılarak küçük çaptaki boya taneciklerinin burada birikmesi ve bunların kullanılması sağlanmıştır. Yeni bir tabanca tasarımında ise tabancaya birden fazla elektrot ekleyerek boya taneciklerinin daha iyi boyanın şarjlanmasını ve Faraday Kafesi etkisini azaltmaya çalışmıştır.

Jozsef ve Blaga (2017), elektrostatik yaş boya prosesinde maliyet optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Girdi değişkenleri olarak düz ve konveks yüzey, parlak ve parlak olmayan yüzey alınmıştır. Çıktı değişkenleri olarak kaplama kalınlığı ve maliyet alınmıştır. Çalışmada doğru parametreleri kullanarak yüzey kalitesi ve aynı zamanda üretim maliyetini optimize etmek istenmiştir. Çalışma sonucunda kaplama kalınlığı arttıkça boya maliyetinin arttığı gözlemlenmiştir.

Jakobsson ve Jensen (2017), yaş boya prosesinde tam faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılarak boya robotunun boya dağılımı, boya kalınlığı ve son kat boyanın rengini etkileyen proses parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Girdi değişkenleri olarak tabanca boya yönlendirme havası, boya debisi ve robot devir hızı alınmıştır. Çıktı değişkenleri olarak boya kalınlığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda tabanca havasının ve tabanca devir hızının boya dağılımında etkisi olduğu görülmüştür. Boya debisinin ise diğer iki parametreye göre boya dağılımında daha az etkisi olduğu saptanmıştır. Boya kalınlığında ise boya debisinin birincil derecede etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Karidkar ve Mali (2017), toz boya prosesinde proses parametrelerinin optimizasyonu çalışmasını yapmışlardır. Bu çalışmalarında deney tasarımı yöntemlerinden Taguchi yönteminden yararlanmışlardır. Çalışmalarında girdi faktörleri olarak toz boya tabanca uzaklığı ve toz boya tabanca hızını almışlardır. Çıktı faktörleri olarak kuru film kalınlığı ve kuru film mikro yapısını incelemişlerdir. Çalışmalarında Minitab programından yararlanmışlardır. Bu program sayesinde çalışma sonuçlarında ana etki grafiği, etkileşim grafiği ve kontur grafiklerini elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda kuru film kalınlığı üzerinde tabanca uzaklığının tabanca hızından çok daha fazla etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca tabanca ile hedef parça arasındaki uzaklığın azalması ve tabanca hızının düşmesi aşırı kuru film kalınlığına ve istenmeyen boya yüzey yapısına neden olduğunu gözlemlenmişlerdir.

Chidhambara, Shankar ve Vijaykumar (2018), Taguchi yöntemini kullanarak yaş boya robotunda boya kalınlığı optimizasyonu çalışmışlardır. Bu çalışmada amaçları kuru film kalınlığını maksimize etmektir. 5 seviyeli 3 faktör kullanılmıştır. Bu faktörler; yaş boya debisi, tabanca kafası havası ve viskozitedir. ANOVA sonuçları göstermiştir ki kuru film kalınlığını en fazla etkileyen %51,05 ile tabanca kafası havası ve %38,78 ile boya debisidir. Viskozitenin ise önemli ölçüde etki etmediği görülmüştür.

Liu ve arkadaşları (2019), Yanıt Yüzey Yöntemi'nden Box-Behnken Metodu'nu kullanarak plazma tozlarıyla alüminyum kaplama özelliklerini optimize etmek üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmalarında girdi parametreleri olarak güç, boyama uzaklığı ve argon gaz debisi parametrelerini kullanmışlardır. Çıktı parametresi olarak kaplama performansını ve yüzey mikro yapısını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kaplama performanslarını etkileme dereceleri büyükten küçüğe doğru sırasıyla boyama uzaklığı, güç, argon gaz debisi olarak belirlenmiştir. Yüzey mikro yapısını etkileme dereceleri ise büyükten küçüğe doğru sırasıyla boyama uzaklığı, argon gaz debisi ve güç olarak belirlenmiştir. Çıktıyı optimize edecek girdi değerleri ise argon gaz debisi 200 L/min, güç 50 kW, boyama uzaklığı ise 40 mm olarak deney sonuçlarında belirlenmiştir.

Tablo 2.1: Literatür Taraması Özet Tablo

Yazar	Yıl	Konu	Metot	Girdiler	Çıktılar
Parmak	1986	Elektrostatik Toz Boya Kaplamanın Avantajları	-	-	-
Mountain, Mazumder	1996	Toz boya Prosesinde Yanıt Yüzey Yöntemi Tekniği ile Transfer Verimliliği	Box-Behnken	Voltaj, Birincil Hava Debisi, İkincil Hava Debisi	Toz boya prosesinin transfer verimliliği
Ferah	2003	Alüminyum profillerinin boyanmasında boya kalınlığı ve darbe direnci optimizasyonu	Taguchi	Hava Basıncı, Boya Tabanca Mesafesi, Boya tipi, Konveyör hızı	Kuru Film Kalınlığı, Darbe Direnci
Wang	2004	Elektrostatik toz boya yöntemiyle ince boyutlu (15 mic) toz boyalar ile normal boyutlu (35 mic) toz boyaların performans değerlendirme çalışmaları	-	Boyama uzaklığı, Voltaj	Film kalitesi, Şarjlama karakteristiği, Boya Transfer Verimliliği
Amembal	2009	Toz boya prosesinde parlaklık değeri optimizasyonu	Taguchi	Toz Boya Tipi, Katalizör Tipi, Katkı Maddesi	Parlaklık Değeri
Laungpaiboon	2010	Alüminyum alaşımlı tekerleklerin üzerine elektrostatik toz boya prosesi kullanılarak kaplama kalınlığı optimizasyonu	Taguchi	Boya Direnci, Voltaj, Boya Viskozitesi, Boya Debisi, Tabanca Hava Debisi	Kuru Film Kalınlığı
Jassbi, Albonzi, Ghoreshi	2011	Son Kat Boya Kalınlığı Optimizasyonu	Sinir ağları ve regresyon	Boya Viskozitesi, Boya Sıcaklığı, Boya Kabin Sıcaklığı, Nem, Voltaj	Kuru film Kalınlığı
Singtaun, Prasarthong	2012	Elektrostatik Kaplama Yöntemi Kullanarak Paslanmaz Çelik Pulların Kaplanmadan Kalan Bölgelerinin Azaltılması	Tam Faktöriyel	Ön Temizlik Zamanı, Kimyasal Konsantrasyon, Askı Şekli	Kaplanan Alan Yüzdesi
Ajer	2012	Elektrostatik Toz Boya Prosesinde Epoksi Toz Boyanın Galvaniz Saca Uygulanmasında Etki Eden Parametreler	-	Hava Debisi, Boyama Uzaklığı, Toz Boya Debisi	Kaplama Kalınlığı, Boya Transfer Verimliliği, Kaplama Karakteristiği, Kaplamanın Çapraz Bağ Yapısı
Gangal	2013	Toz boya prosesinin iyileştirilmesi	Taguchi	Voltaj, Toz Boya Debisi, Hava Debisi	Kuru Film Kalınlığı, Portakallanma Etkisi.
Luangkularb, Prombanpong, Tangwarodomnukun	2014	Boya Tüketimi ile Kaplama Kalınlığı Arasındaki Bağlantı	Taguchi	Hava Basıncı, Boyama Zamanı, Tabanca Nozul Boyutu	Tek Atımda Kullanılan Boya Miktarı, Kuru Film Kalınlığı
Bharathi, Baskaran	2014	Çelik Yapılarda Boya Prosesini İyileştirme	Taguchi	Boya Viskozitesi Basınç Hava Debisi, Tabanca Uzaklığı	Boya Maliyetini İyileştirme, Kaplanan Boya Metrekaresini İyileştirme

Tablo 2.2 (devam)

Ahmad, Ajer	2015	Elektrostatik Toz Boya Prosesinde Boya Atımı ve Toplam Hava Debisini Kullanarak Optimizasyon	-	Boya Atımı, Hava Debisini, Sprey Uzaklığı	İlk Seferde Transfer Verimliliği, Kaplama Kalitesi (Kalınlık, Yapışma, Düzgün Yapı)
Bhalaruragan, Prablu	2015	ABB endüstriyel robotların boya performansını manuel HVLP boya tabancalarıyla karşılaştırılması	Taguchi	Tabancanın hareket hızı, Tabanca mesafe uzaklığı Basınç	Kuru film kalınlığı değişkenliği, Yüzey sertliği, Kuru film yapışma özelliği
Durgun	2015	Otomobil Boyahanelerinde Optimum Renk Sayısının Optimizasyonu	-	Direkt Malzeme, İşçilik, Enerji, Atık İşlemleri	Renk Sayısı
Karaoğlan, Celik	2016	Trafoların Boyanmasında Yaş Üstü Yaş Prosesi	Yanıt Yüzey Yöntemi	Viskozite, Kuruma zamanı	Zaman kazancı, Maliyet kazancı
Gao	2016	Toz Boya Prosesinde Siklon Dizaynı, Metalik Pigment Ekleyerek Kaplama Verimliliğini Arttırma, Tabanca Tasarımı ve İletken Olmayan Parçaların Toz Boya ile Boyanması	-	Yeni Bir Tabanca Tasarımı, Yeni Bir Siklon Tasarımı	Boya Taneciklerinin Şarjlanmasını ve Faraday Kafesi Etkisini Azaltmaya
Jozsef, Blaga	2017	Elektrostatik boya prosesinde üretim maliyeti optimizasyonu	-	Düz ve Konveks Yüzey, Parlak ve Parlak Olmayan Yüzey,	Kaplama kalınlığı, Maliyet
Jakobsson, Jensen	2017	Boya Robotunun Boya Dağılımı, Boya Kalınlığı ve Son Kat Boyanın Rengini Etkileyen Proses Parametrelerinin Optimizasyonu	Tam Faktöriyel	Tabanca Boya Yönlendirme Havaası, Boya Debisini ve Robot Devir Hızı	Boya Kalınlığı
Karidkar, Mali	2017	Toz boya prosesinde proses parametrelerinin optimizasyonu çalışmasını	Taguchi	Toz Boya Tabanca Uzaklığı ve Toz Boya Tabanca Hızını	Kuru Film Kalınlığı ve Kuru Film Mikro Yapısını
Chidhambara, Shankar, Vijaykumar	2018	Yaş boya robotlarının proses parametrelerinin optimizasyonu	Taguchi	Boya debisi Viskozite Voltaj	Kuru film kalınlığı
Liu ve Arkadaşları	2019	Plazma Tozlarıyla Alüminyum Kaplama Özelliklerini Optimize etme	Box- Behnken	Güç, boyama Uzaklığı ve Argon Gaz Debisini	Kaplama Performansını ve Yüzey Mikro Yapısını

Literatür taraması sonucunda yapılan çalışmalar incelendiğinde bazı çalışmalarda voltaj, amper ve boya atımı parametreleri beraber incelenirken bazı çalışmalarda ise boya tanecik boyutu ile voltaj değeri beraber incelenmiştir. Fakat tüm toz boya proses parametrelerinin birlikte incelendiği bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Yapılan bu tez çalışmasında literatüre yeni bir çalışma katmak amacıyla toz boya prosesinde bulunan tüm faktörler deneye dahil edilerek özgün bir çalışma yapılması hedeflenmiştir.

3. DENEY TASARIMI

3.1 Deney Tasarımı Kavramı ve Temel İlkeleri

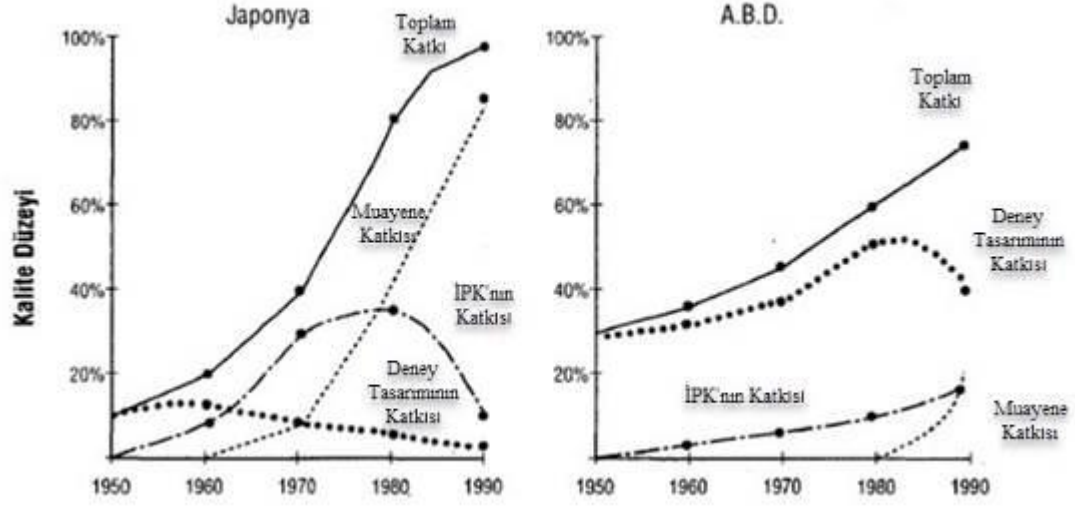
Deney Tasarımı Kavramı

Deney kavramı, bir sistem veya prosesin belirli bir özelliği veya parçasına ait detayları incelemek üzere veri toplamak ve bu verilerden anlamlı bir sonuç çıkarmak amacıyla yapılan gözlemlere denilmektedir. Deneyler esnasında ölçülen çıktı üzerinde etkili olan ve seviyeleri kontrol edilebilen değişkenlerin değerleri araştırmacı tarafından belirlenir ve bu değerler için gözlemler elde edilir. Deney tasarımı ise üretim sürecinde ya da hizmet sürecinde, faktör adı verilen ve seviyeleri araştırmacı tarafından kontrol edilebilen girdi değişkenlerinin üzerinde kontrollü ve planlı değişiklikler yaparak çıktı değişkeni veya değişkenleri üzerinde ne gibi değişikliklerin olduğunun gözlemlenmesi ve bu değişikliklerin analiz edilmesidir (Giesbrecht ve Gumpertz, 2004).

Deney tasarımının temel amacı, incelenen prosesteki girdilerin çıktılar üzerindeki etkileriyle ilgili bir matematiksel model oluşturmak ve bu modeli oluştururken de mümkün olan en az deney yapabilmektir. Oluşturulan bu model sayesinde proses üzerinde istenilen en uygun değer için optimizasyon çalışması yapılabilmesi ve daha önce hiç denenmemiş deney için bir tahminleme çalışması yapılabilmeye fırsat tanınmasıdır.

Deney tasarımı kavramı 1920'li yılların başında Ronald Fisher tarafından İngiltere'nin Londra şehrinde bulunan Rothamsted Tarım Alanı Araştırma Merkezi'nde geliştirilmiştir. İlk olarak çeşitli bölgelerdeki topraklarda farklı gübrelerin nasıl etki ettiği konusunda araştırmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmada bağımsız değişken olarak sadece gübre çeşidinin etki etmediği aynı zamanda topraktaki nem ve bakteri çeşidi gibi değişkenlerin de etkisinin önemli olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Ronald Fisher bu konu hakkında deney tasarımını kullanmış ve bu süreçten sonra tarım ve biyoloji alanındaki deney tasarımı çalışmalarına da öncü olmuştur. Deney tasarımı çalışmalarının başarıları Amerikalı ve Avrupalı üreticiler tarafından da desteklenmiştir (Montgomery, 2008).

Şekil 3.1’ de geleneksel yöntem olan muayene (kontrol) yönteminin, istatistiksel proses kontrol (İPK) yönteminin ve deney tasarımı yöntemlerinin kalite düzeyine olan katkısı Amerika’ da ve Japonya’ da yapılmış olan çalışmalar ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1: 1950-1990 yılları arasında deney tasarımının kalite düzeyine katkısı.

Şekilden de görüleceği gibi başlarda Japonya’daki kalite düzeyi Amerika Birleşik Devletleri’ ne göre daha düşüktür. Özellikle 1960 yılından itibaren deney tasarımı tekniklerinin kullanılmasıyla birlikte 1990 yılına gelindiğinde Amerika Birleşik Devletleri’ne göre Japonya’nın çok daha iyi bir konumda olduğunu görüyoruz. Amerika Birleşik Devletleri’nde ise deney tasarımı yöntemleri 1980 yılından itibaren kullanılmaya ancak başlanılmıştır. Kalite düzeyine olan toplam katkıyı en fazla 1970’li yıllardan sonra deney tasarımı yöntemi yapmıştır (Şirvancı, 1997).

Deney Tasarımının Temel İlkeleri

Bir deney tasarımı yapılırken belli bir plan doğrultusunda yapılması gerekir. Deney tasarımının dayandığı temel prensipler İngiliz bilim adamı Ronald A. Fisher tarafından ortaya atılmıştır. Bu kavramlar; rassallık, tekrarlama ve bloklamadır (Aytekin, 2010).

Rassallık kavramı ilk olarak Ronald. A. Fisher tarafından ortaya atılmıştır. Sonraki yıllarda diğer bilim adamları tarafından da kabul edilmiştir. Yapılan bir deneyde rassallık kavramının iki önemli amacı vardır. Birincisi deney yapılırken deney koşullarının belirli bir metodolojiye bağlı kalmadan deneyin tesadüfi olarak yapılmasını amaçlamaktadır. İkincisi ise deneylerin standart bir sırada yapılmasından kaynaklanabilecek sistematik hatanın ortaya çıkmasını engellemek ve neden-sonuç ilişkisini tartışmak için bir temel oluşturmaktır. Deney tasarımında girdi değişkenlerinin seviyeleri her bir deney için rassal atanmaktadır. Rassallık kavramında bir deney organize edilirken bu deneyin tüm aşamaları verilerin toplanmasından, deneylerin yapılmasına kadar rassal olarak yapılmalıdır. Herhangi bir düzen ya da kurgu içermemelidir. Böylelikle yapılan deneylerin bir sıralamanın ya da bir düzenin getirmiş olduğu çevresel koşullardan etkilenmemesi amaçlanmaktadır (Antony, 2003).

Tekrarlama, deneylerin birden çok tekrar edilmesi demektir. Deneylerin tekrarlanması sayesinde deneyde meydana gelebilecek hataların daha kolay fark edilmesi sağlanır. Hata kavramı gürültü faktörlerinin deneye etkisinden meydana gelmektedir. Bu gürültü faktörlerinin hata üzerindeki etkisi tekrarlama yöntemi ile belirlenmeye çalışılmaktadır. Aynı zamanda bu hataların istatistiksel olarak bir anlam ifade edip etmediği belirlenmiş olacaktır. Diğer bir faydası da ne kadar çok deney yapılırsa örnek ortalamasının varyansı azalacaktır ve böylece deney hakkında daha net sonuçlar oluşacaktır (Antony, 2003).

Bloklama yöntemi deneyin bölümlere ayrılması demektir. Örneğin toz boya optimizasyonu yapılan bir çalışmada iki adet toz boya robotu var ise bunlardan her biri ayrı blok olarak değerlendirilerek deney yapılabilir. Bloklama da temel amaç istenmeyen değişkenleri kaldırmak için toplanan deneysel verileri homojen alt kümelere bölerek deneyler yapmaktır. Deneysel işlemler daha sonra bu alt verilere uygulanır. Yapılan deneylerde doğruluk ve hassasiyetlik önemlidir. Bloklama yönteminde ilgilenilen faktörler bir blok içerisine konularak yanıt değişkenine etki eden başka faktörlerden arındırılmış olur. Böylelikle incelenmek istenen faktörlerin etkisi daha kolay belirlenebilir (Montgomery, 2008).

Deney Tasarımında Kullanılan Temel Terimler

Bir proseste deney tasarımı yapılmadan önce, o prosesin özelliklerini çok iyi bilmek gerekir. Proseste hangi değişkenlerin olduğu, hangi değişkenlerin prosesi etkilediği konularında fikir sahibi olmak deney tasarımına başlamadan önce çok önemlidir. Bu kavramları bilmek deneyi yapan kişi için aşağıda belirtilecek olan kavramları doğru seçmesi açısından önemlidir. Bu kavramlar deney yapılan bölümdeki tecrübeli mavi yakalı ve beyaz yakalı çalışanlar tarafından beyin fırtınası tekniği kullanılarak belirlenmelidir. Deney tasarımında kullanılan kavramlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Yanıt, deneyin çıktısı ya da sonucudur. Çıktı değişkeni olarak da tanımlanabilir. Optimize edilmek istenen bir başka değişle deneyin yapılma amacını oluşturan kavramdır.

Faktör, yanıt üzerinde etkisi bulunan, değiştirilebilen ve/veya değiştirilemeyen parametrelerdir. Değiştirilebilen faktörler deney tasarımı yapılırken değiştirdiğimiz ve yanıt üzerindeki etkisini gözlemleyebildiğimiz parametrelerdir. Bu parametreler ile oynanarak yanıt optimize edilmek istenir. Örnek verilecek olursa akım değeri, voltaj değeri, boya atımı miktarı parametrelerinde değişiklikler yapılarak, film kalınlığı üzerindeki etkisi gözlemlenmek istenebilir. Değiştirilemeyen faktörler ise, değiştirilmesi çok yüksek maliyet gerektiren ya da ortam koşullarından dolayı değiştirilemeyen faktörler olarak tanımlanabilir. Ortam sıcaklığı ve nemi, boya kabini büyüklüğü, boya yapılan hattın hava basıncı gibi örnekler verilebilir.

Seviye, seçilen faktörlerin deneyi yapan kişi tarafından belirlenen değerleridir. Diğer bir ismi düzeydir. Seçilen faktörlerin farklı seviyelerinin yanıt üzerindeki etkisinin görülmesi amaçlanmaktadır. Seviye sayısı ne kadar çok seçilirse deney sayısı da o kadar artış göstermektedir.

Etki, faktörlerin ve faktör düzeylerinin yanıt üzerindeki sonucudur. Seçilen faktörlerin yanıt üzerindeki etkisinin yüksek olması istenir ki doğru faktörlerin seçildiğinden emin olunsun ve bu değerler ile optimum sonuca ulaşılabilsin.

Etkileşim, faktörlerin birbirleriyle olan etkisinin yanıt üzerindeki sonucudur. Seçilen faktörlerin ikili etkileşimleri varsa yanıt üzerindeki etkisi önem kazanmaktadır. Bu gibi durumlarda faktörlerin tek tek etkilerinden ziyade etkileşimlerinin etkisi daha fazla önem kazanmaktadır. Üçlü ve daha fazla faktörün etkileşimleri ise genellikle yanıt üzerinde etkisi çok fazla olmadığı yapılan çalışmalarla gözlemlenmiştir (Şanyılmaz, 1998).

3.2 Deney Tasarımı Aşamaları

Deney tasarımı metodolojisi temelde 4 kısımda incelenmektedir. Bunlar; planlama, tasarım, uygulama ve analizdir.

Planlama

Planlama aşaması; problemin tanımlanması, çıktı faktörünün belirlenmesi, deney faktörlerinin ve tasarım parametrelerinin belirlenmesi, deney faktörlerinin sınıflandırılması, deney faktörlerinin seviyelerinin belirlenmesi ve etkileşimlerin belirlenmesi aşamalarından oluşur (Antony, 2003).

Problemin Tanımlanması

Problemin açık ve net bir şekilde anlaşılması çözümde neler yapılması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Hedefler net bir şekilde belirlenmeli ve ölçülebilir olmalıdır. Problemler aşağıdaki örnekler gibi net bir şekilde olmalıdır:

- Bir proses veya ürünün iyileştirilmesi ya da yeni bir ürün geliştirilmesi
- Müşteri isteklerine uygun olarak bir proses veya ürünün performansının geliştirilmesi
- Ürün maliyetlerinin iyileştirilmesi

Yukarıdaki problemlere yaklaşımın o prosesi ve/veya ürünün özelliklerini çok iyi bilen proses mühendisi, kalite mühendisi, hat ustası gibi kişilerle birlikte problem çözülmelidir.

Çıktı Faktörünün Belirlenmesi

Çıktı değişkenini belirlerken sayısal bir değer belirlenmeli ve ölçülebilir olmalıdır. İyi-kötü, doğru-yanlış, geçerli-geçersiz ve evet-hayır gibi sonuçlar içerse de bu sonuçların çıktısı sayısal olarak ifade edildikten sonra deney yorumlanmalıdır (Kağnıcıoğlu, 1998).

Deney Faktörlerinin ve Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Proses etki eden parametreleri belirlemenin birden fazla yolu bulunmaktadır. Bunlar; histogram yöntemi, sebep-sonuç diyagramları, beyin fırtınası yöntemleri örnek olarak verilebilir. O prosesi iyi tanıyan ve farklı birimlerdeki yetkin personellerin bir araya gelerek konu üzerinde bir beyin fırtınası oluşturması ve deney parametrelerine karar vermeleri gerekir. Deney tasarımı yöntemlerinin belki de en önemli aşaması bu aşamadır. Çünkü prosese etki eden önemli parametreler unutulur ya da değişken olarak alınmaz ise, deney sonuçları istenilen sonuçları vermeyecektir.

Deney Faktörlerinin Sınıflandırılması

Proses faktörlerini belirledikten bir sonraki aşama bu değişkenleri kontrol edilebilir ya da kontrol edilemez şeklinde sınıflandırmaktır. Kontrol edilebilen değişkenler olarak adlandırdığımız değişkenler, proses mühendisi, üretim mühendisi tarafından kontrol edilebilen, istenildiğinde değiştirilebilen bizim kontrolümüzde olan değişkenlerdir. Kontrol edilemeyen değişkenler ise ki bunlara gürültü değişkenleri de denilebilir kontrol edilmesi zor veya çok pahalı değişkenlerdir. Bunlara örnek olarak ortam sıcaklığı dalgalanması, ortam nemi dalgalanması, kullanılan ham madde değişkenliği gibi örnekler verilebilir. Bu değişkenlerin proses üzerindeki etkileri bilinmeli ve uygulanacak deney tasarımı yöntemi ile bu faktörlerin proses üzerinde etkisinin en az olması istenmektedir.

Deney Faktörlerinin Seviyelerinin Belirlenmesi

Proses seviyelerini belirlenmesi aslında ilgili prosesin içerisinde saklıdır. Örneğin bir arabanın km başına yakıt tüketiminde etkili olan değişkenler lastik hava basıncı ve hızı olabilir. Aynı zamanda nitel ya da nicel değerler de olabilir. Eğer nitel değişkenler seçilecekse seviyelerin en az 2 adet seçilmesi deney sonuçları açısından daha uygun olacaktır. Aynı zamanda seçilecek olan fonksiyona da bağlıdır. Eğer lineer olmayan bir fonksiyon seçilecekse en az 3 ve daha fazla seviye belirlenmesi uygun olacaktır (Antony, 2003).

Etkileşimlerin Belirlenmesi

Özellikle endüstride yapılan çalışmalarda değişkenler arasındaki etkileşimden sıklıkla söz edilebilir. Deney sonuçlarının verimli bir şekilde yorumlayabilmek için, proses değişkenleri arasındaki etkileşimin çok iyi anlaşılması gerekmektedir. Endüstrideki çoğu problemin çözümü süreç içerisinde bulunmaktadır fakat probleme etki eden faktörler arasında bir etkileşim olması problemin çözümünü zorlaştıracak ve bu yüzden deney yapan kişiyi deney tasarımı gibi problem çözme metodolojilerine yönlendirecektir.

Tasarım

Bu kısımda deneyi yapan araştırmacı, deneyde kullanılması gereken en uygun metodu seçmelidir. Ronald Fisher' ın klasik istatistiksel yaklaşımı savunulduğu teknik seçilebileceği gibi Genichi Taguchi' nin savunduğu ortogonal diziler yaklaşımı ya da Dr. Dorian Shainin' in savunduğu değişken yaklaşımı teknikleri seçilebilir. Bu seçilen yaklaşımlardan bir tanesiyle birlikte tam faktöriyel, kesirli faktöriyel, Yanıt Yüzey Yöntemi gibi tasarım metodlarına karar verilir. Yapılacak deneyin büyüklüğü, faktör sayısına, her faktör için seçilen seviye sayısına, deney için ayrılan bütçeye ve kaynağa bağlıdır. Özetle bu aşama, deneyde faktörlerin ve seviyelerin belirlenmesi ve hangi yöntem ile deneyin yapılacağına belirlendiği aşamadır.

Uygulama

Bu kısım planlanmış olan deneylerin yapılması ve sonuçların değerlendirildiği kısımdır. Bu kısımda deney için özellikle üzerinde durulması gereken önemli noktalar belirlenir. Bu önemli noktalar aşağıda özetlenmiştir:

- Deney için uygun yer seçiminin belirlenmesi
- Deney için gerekli olan malzeme, makine, insan gibi deney gereçlerinin temin edilmesi
- Deneyin finanse edilebilmesi için parasal konuların temin edilmesi ve fayda/ maliyet oranının incelenmesi
- Özellikle insan etkisinin en aza indirilmesi için tüm deneyin tek bir kişi tarafından yapılması
- Deney anında çıkan sonuçların izlenmesi önemlidir. Olağan dışı bir durum olduğunda deney gözlemcisi deneyi gerektiğinde durdurmalıdır.
- Deney sonuçların kaydedilmesi

Analiz

Deney tamamlandığında deneyin geçerli olup olmadığını belirleyebilmek için deney sonuçlarının analiz edilmesi gerekmektedir. Bu kısımda birkaç önemli nokta bulunmaktadır. Bu önemli noktalar aşağıda belirtilmiştir:

- Seçilen proses değişkenlerinin proses çıktısı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi
- Seçilen proses değişkenlerinin ürünün performans değişkenliği üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi
- İstenilen optimum sonuçlarda olması gereken girdi parametre değerlerinin belirlenmesi
- Daha başka bir iyileştirmenin olup olmadığının değerlendirilmesi (Antony, 2003).

3.3 Yaygın Kullanılan Deney Tasarımı Yöntemleri

Deney tasarımı yöntemleri girdi ve çıktı arasındaki matematiksel ilişkiyi bulmayı sağlayan ve bu ilişkiyi bulurken de hangi istatistik yöntemlerinden yararlanılacağını söyleyen yöntemler

bütünüdür. En yaygın kullanılan deney tasarımı yöntemleri; Taguchi Yöntemi, Yanıt Yüzey Yöntemi ve Faktöriyel Tasarım Yöntemidir.

3.3.1 Taguchi Yöntemi

Taguchi Yönteminin Kısa Tarihçesi

Dr. Genichi Taguchi süreç ve ürün gelişimine katkı sağlamak için metodoloji ve teknikler geliştiren ve bu doğrultuda çalışmalar yapan Japon kökenli bir kalite danışmanıdır. Taguchi' nin geliştirdiği yöntem 1940'lı yılların sonlarına dayanmaktadır. Japonya'da Nippon firmasında çalışırken Taguchi' nin mühendislik becerilerini uygun bir biçimde kullanmasından dolayı firma ona bir laboratuvar vermiştir ve Taguchi felsefesi bu laboratuvarda doğmuştur. Çalışmaları sayesinde Taguchi, üretim mühendislerine ve endüstri mühendislerine düşük maliyet ile yüksek kalitede ürün ve proses geliştirmede deney tasarımı tekniklerinden nasıl yararlanılacağını göstermiştir. Endüstriye ve bilime katkılarından dolayı Taguchi' ye 4 defa Deming ödülü verilmiş ve aynı zamanda Japon endüstrisinin verimliliğine önemli katkı sağladığı için Japon imparatoru tarafından ödüllendirilmiştir. Daha sonra çalışmaları tüm dünyadaki bilim insanları tarafından kabul görmüş ve bilimin hizmetinde kullanılmaya başlanılmıştır (Aytekin, 2010).

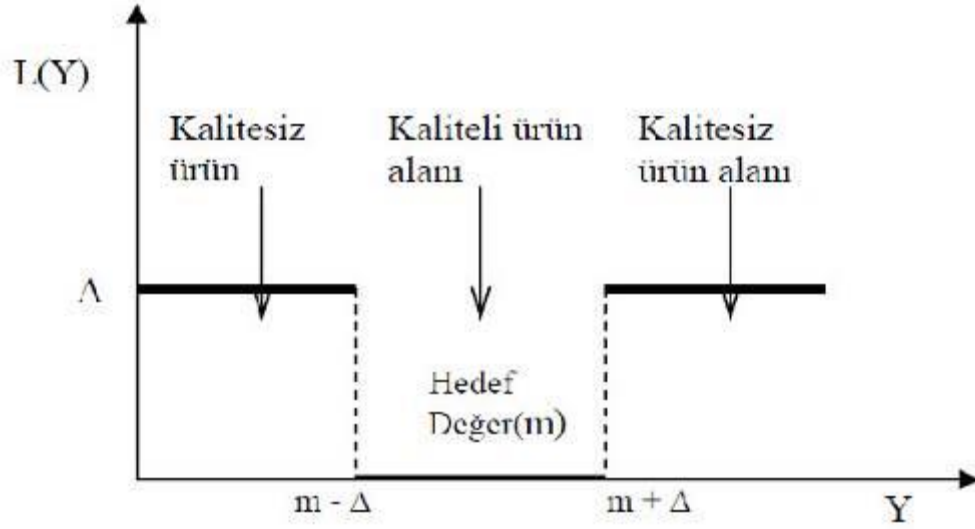
Taguchi Yönteminin Felsefesi

Taguchi felsefesi ürünün üretim esnasında ya da üretim sonrası klasik kalite kontrol çizelgeleri yardımıyla kontrol edilmesi değildir. Bu felsefede önemli olan, ürünün daha üretim sürecine girmeden tasarım aşamasından başlanarak üretimde belirlenen limitler içerisinde kalmasını sağlayacak bir üretim yapılmasıdır. Böylelikle üretim sonrası kalite kontrol azalmakta ve bunun getirdiği maliyet araştırma geliştirme ve kaynak araştırma ve geliştirme çalışmalarına kaydırılmaktadır. Kaybın getirdiği işgücü ve zaman maliyetinden kurtularak bu zamanı ve işgücünü insanlığın yararına kullanılabilir çalışmalar yapılabilecektir. Taguchi kalite felsefesi 7 temel başlık altında incelenmektedir. Bu kavramlar aşağıda listelenmiştir:

1. Üretilen bir ürünün kalitesi toplumda meydana getirdiği kayıpla ölçülür.
2. Bir işletme hayatını devam ettirebilmesi için sürekli kalite iyileştirme çalışmaları yapmalıdır.
3. Üretilen ürün limit değerlerin içinde kalmayı hedefleyici şekilde üretimi değil hedef değerden sapmamaya çalışacak şekilde üretim yapılmalıdır.
4. Bir ürünün kalitesizliğinden kaynaklanan sapmanın müşteri üzerindeki etkisi, hedef değerden sapma miktarının karesi ile doğru orantılıdır.
5. Ürünün kalitesi, üretim sürecinde ve tasarım sürecinde belirlenmelidir.
6. Bir ürünün istenilen hedef değerde tutabilmek için, o hedefe etki edecek parametreleri de kontrol altında tutmak gerekir.
7. Ürün üzerindeki parametrelerin etkisi deney tasarım metotları ile bulunabilir. (Pignatiello, 2007).

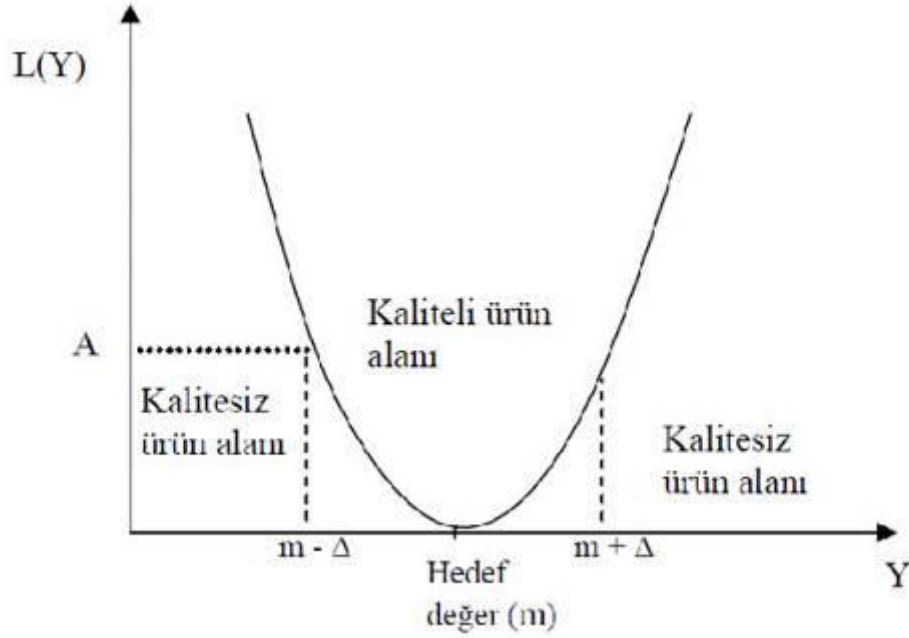
Taguchi Kayıp Fonksiyonu

Taguchi kayıp fonksiyonu prensibi belki de Taguchi yöntemini özetleyen en önemli uygulamadır. Geleneksel kalite kontrol sistemlerinde müşterinin belirlemiş olduğu bir alt limit ve bir de üst limit mevcuttur. Üretici tarafından üretilen bir malzeme eğer bu toleranslar içine giriyorsa hem müşteri tarafından hem de ürünü üreten fabrikanın kalite kontrolü tarafından onaylanıyordu. Fakat onaylanmış ürün alt ve üst limitler arasında kalsa dahi eğer herhangi bir noktaya yakın ise yani hedef noktadan ne kadar uzak ise bu ürünün fonksiyonellik özelliği de hedef değerden sapmaktadır (Kackar, 1985). Aşağıda Şekil 3.2’de, geleneksel kayıp fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 3.2: Geleneksel kayıp fonksiyonu (Şanyılmaz, 1998).

Şekil 3.2' de $L(Y)$ olarak gösterilen parasal kayıptır. Hedef değer ise m ile gösterilmiştir. $-\Delta$ ve $+\Delta$ ile gösterilen ifadeler ise alt ve üst limit değerlerini göstermektedir. Bu değerler arasında üretilen her ürün doğru olarak kabul edilmektedir ve tüketiciye herhangi bir parasal kaybı bulunmamaktadır. Fakat bu durumun riskli bir tarafı vardır. Burada $m - \Delta$ ve $m + \Delta$ değerlerine yakın olarak üretilen her ürünün limit dışına çıkma durumu olabilmektedir. Taguchi bu noktada öne sürdüğü konu, üretilen ürünün limitler içinde kalsa dahi hedef değerde değil ise müşteri ya da son kullanıcı tarafından bir kaybın oluşacağını ve bu kaybın sadece hedef değerde sıfır olacağıdır. Hedef değerden uzaklaşılan her bir noktada kayıp fonksiyonu $L(Y)$ üstel olarak artmaktadır. Taguchi geleneksel kayıp fonksiyonu yerine Şekil 3.3' deki kayıp fonksiyonu grafiğini önermiştir.



Şekil 3.3: Taguchi kayıp fonksiyonu (Şanyılmaz, 1998).

Şekil 3.3’ de görüldüğü gibi hedef değer olarak sadece tek bir nokta vardır. Kayıp sadece hedef değerde sıfır olmaktadır. Bu noktadan en ufak bir uzaklaşmada kayıp oluşacaktır. Bu kayıp üstel olarak artmaya devam edecektir.

Üretim Sürecinde Taguchi Yaklaşımı

Taguchi stratejisi, süreç ve/veya ürün tasarımını iyileştirmek için analiz deneylerinin yapılmasıdır. Bu deneylerde kayıp fonksiyonunun en küçüklenmesi istenir. Bu doğrultuda en iyi ürün tasarımının ya da proses tasarımının yapılacağı deney kombinasyonları belirlenir. Bu deney kombinasyonları belirlenirken 3 çeşit tasarımdan söz edilmektedir. Bu tasarımlar; Sistem Tasarımı, Parametre Tasarımı ve Tolerans Tasarımı’ dır (Tesu1, 2007).

Sistem Tasarımı

Sistem tasarımında, ürün ve proses tasarımı için temel mühendislik ve temel bilim bilgileri ürüne aktarılır. Müşteri tarafından istenilen teknolojinin seçilmesi, malzemenin seçilmesi, istenilen limit değerlerin belirlenmesi gibi üründe proses ya da üründe olması gereken değerler belirlenir. Sistem tasarımı kısmında projeyi yöneten proje mühendisleri proje ile ilgili paydaşları bir araya getirerek müşteri isteği ile üretimin yapılabilirliği arasında bir köprü vazifesi görür. Ürünün yapılabirliği belirlenirken aynı zamanda üretim aşamasında istenilen limitler ve toleranslar dahilinde en düşük maliyetle ürün nasıl üretilir cevabı aranır. Tüketici isteklerinin yanı sıra üretim sürecindeki kısıtlara da dikkat etmek gerekir. Nasıl ki üretime uygun olsun diye müşteri tarafından istenen bir fonksiyonun yapılmaması ürünün pazara sunulmasında sıkıntı yaratacaksa aynı şekilde sırf müşteri istedi diye üretim şartlarını karşılamayan bir ürünün de üretilmesi düşünülemez. Ürün fonksiyonunu tam olarak karşılaması ve kaliteden ödün verilmemesi için müşteri isteği ile üretim aşaması ortak bir noktada buluşması gerekmektedir. Bu aşamada daha çok mühendislik bilgilerine ihtiyaç duyulur. İstatistiksel çalışmalar bir sonraki parametre aşamasında daha yoğun olarak kullanılır (Bisgard, 1990).

Parametre Tasarımı

Parametre tasarımı deney tasarımının kalbini oluşturmaktadır. Parametre tasarımında ürünlerdeki performans değişkenlerini en aza indirgeyecek parametreler belirlenir. Değişkenlerin fazla olması ürünün performansını düşüreceği gibi, ürün maliyetini de arttıracaktır. Bu aşamada optimum parametre değerleri belirlendiği için bu aşamaya parametre tasarımı denilmektedir.

Parametre tasarımı, üründe veya proseste hedeften sapmayı meydana getiren kontrol edilemeyen faktörlere (gürültü faktörleri) karşı ürünü hedef değerde tutmak için belirlenen ve kontrol edilebilen faktör seviyelerinin optimum seçilerek ürünlerdeki değişiklikleri en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Taguchi aynı zamanda bu kavrama robust tasarım demiştir. Robust bir tasarımda kontrol edilebilen değişkenler öyle bir ayarlanır ki kontrol edilemeyen gürültü faktörlerindeki değişim ürünün istenilen çıktıdan sapmasına izin vermeyecektir (Karna, 2012).

Tolerans Tasarımı

Tolerans tasarımı aşaması, parametre tasarımı aşamasında belirlenen faktörlerin toleranslarının belirlendiği aşamadır. Dar bir toleransta çalışmak hem üretim maliyetlerini arttıracak hem kalifiyeli iş gücü ile çalışmak zorunda bırakacak hem de teknolojik aletlere yatırım yapmayı gerektirecektir. Geniş bir toleransta çalışmak ise ürün performansındaki değişkenliği arttıracak ve ürünün fonksiyonelliği ile ilgili risk oluşturacaktır. Bu noktada tolerans tasarımı yapılarak sözü edilen dar ve geniş toleranslar arasında ortak bir nokta bulunur. Ürün maliyetlerini arttırmamak bu kısımdaki önemli noktalardan bir tanesidir. Bu yüzden ürün üzerindeki faktörlerin her biri aynı önemde olmadığı için ürün kalitesine daha fazla etki eden faktörün toleransı dar, diğer faktörlerin toleransı daha geniş seçilebilir. Böylelikle üretim maliyetindeki olabilecek artıştan da kaçınılacaktır (Antony, 2003).

3.3.2 Yanıt Yüzey Yöntemi

Yanıt Yüzey Yöntemi, 1970'li yıllarda George Box ve iş arkadaşı Wilson tarafından yapılan deneylerin optimum noktalarını bulmak için tasarlanmıştır. Bu yıllarda bu yöntem kimya endüstrisindeki, gıda endüstrisindeki ve tekstil endüstrisindeki çalışmalarda uygulanmıştır. Bu yönetimin geliştirilmesinde temel amaçlardan bir tanesi araştırmacı tarafından sonuçların grafiksel olarak gösterimine olanak sağlamasıdır. Yanıt Yüzey Yöntemi, deneyi yapan kişiye alternatif sonuçların da gösterilmesine yardımcı olur (Myers, 2007).

Yanıt Yüzey Yöntemi, uygun yönteminin seçilmesi üzerine verilerin toplanarak deneylerin yapılması, bağımlı değişken üzerindeki bağımsız değişkenlerin etkisini belirleyerek bir matematiksel model oluşturmak bu modelde eniyileme çalışmasının yapılmasıdır (Baş, 2010).

Box ve Wilson, olabilecek en az sayıdaki deney ile yanıt değişkeninin maksimum değerini aldığı noktaya ulaşması çalışmaları üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu yöntemde regresyon analizi önemlidir çünkü bir faktörün yanıt değişkeni üzerindeki etkisini ve diğer faktörler ile etkileşimi üzerinde ne derece bir etkiye sahip olduğuna regresyon katsayıları yardımı ile karar verilir. Bu kararı verirken birinci derece lineer denklemler, ikinci derece tam karesel denklemler ve faktörlerin birbirleri ile olan etkileşim terimleri regresyon denklemini oluşturur.

Örnek olarak girdi değişkenleri X_1 , X_2 ve X_3 olan ve yanıt değişkeni Y olan bir Yanıt Yüzey Yöntemi' nin regresyon denklemi yazılacak olursa;

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 \quad (3.1)$$

şeklinde olacaktır. Bu denklemde lineer terimler, karesel terimler ve etkileşim terimleri aşağıda gösterilmiştir.

Lineer Terimler: $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3$

Karesel Terimler: $\beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2$

Etkileşim Terimler: $\beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3$

Yukarıda gösterilen denklemlerin en genel gösterimi ise Denklem 3.2' deki gibi olacaktır.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

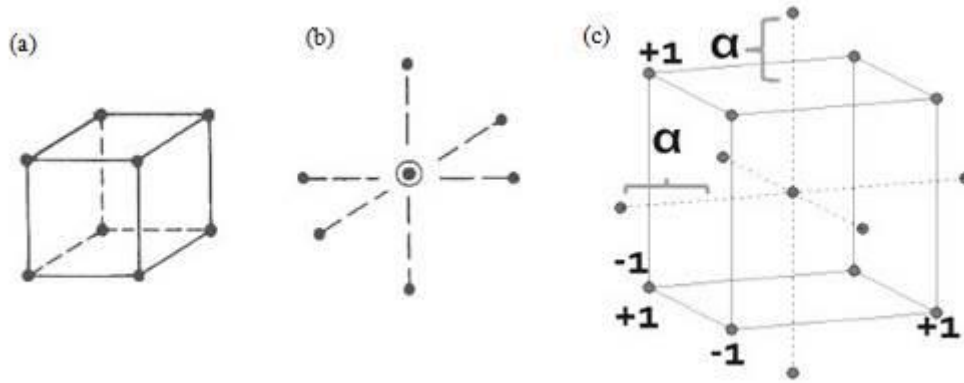
Yanıt Yüzey Yöntemi' nde proses üzerinde değişkenlerin tek tek ve etkileşimli olarak sonuç üzerindeki etkileri öğrenilebilir. Aynı zamanda bu deney metodolojisi sayesinde bağımsız değişkenler üzerinden bir matematiksel model oluşturulabilir.

Yanıt Yüzey Yöntemi optimizasyon imkanının kolay olması, girdi faktörleri ve çıktı faktörü arasında matematiksel bir model kurması, yeterli sayıda veri ile maksimum bilgiye ulaşabilmesi, etkin parametreleri eş zamanlı değiştirebilmesi ile parametreler arasındaki değişimin belirlenebilmesi gibi avantajlarından dolayı son yıllarda mühendislik ve bilim alanında sık kullanılmıştır (Castillo, 2007).

Yanıt Yüzey Yöntemi' nde 3 temel tasarım bulunmaktadır. Bu tasarımlar; Merkezi Bileşik Tasarım, Merkezi Bileşik Tasarım (Yüzey Merkezli) ve Box-Behnken Tasarımı' dır.

Merkezi Bileşik Tasarım

Merkezi bileşik tasarım modeli, 2^k faktöriyel tasarım modeline eklenmiş halidir. 3 faktörlü bir deney tasarımında modellenmiş halindeki gösterimi Şekil 3.4' deki gibidir.



Şekil 3.4: (a)Köşe noktalar (b)Eksenel noktalar-merkez nokta (c)Modelde gösterimi.

Merkezi bileşik tasarım bağımlı değişkenler ile yanıt arasında ikinci dereceden bir etkileşim olduğunda en fazla kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Bu tasarım Box ve Wilson sayesinde literatüre eklenmiştir. Bu modelde merkez noktadan çözüm uzayının dışına doğru giden eksenel noktaların kodlanmış uzunluğu olarak adlandırılan bir α değeri kullanılır. Bu α değerinde belirlenen noktaların dışında bir çözüm uzayı aranır. Faktörleri X_1 , X_2 ve X_3 olarak gösterilen 3 faktörlü 2 seviyeli bir merkezi bileşik tasarım için deney oluşturulmak istenirse Tablo 3.2 gibi olacaktır. Burada ilk 8 deney tam faktöriyel deney düzeneğinde oluşturulduktan sonra her bir faktör için $-\alpha$ ve $+\alpha$ seviyeleri eklenir. 6 adet α noktasında 6 adet merkezde ve 8 adet köşelerde olmak üzere 20 adet deneyden oluşmaktadır. Tablo 3.1' de merkez noktada 1 tane deney içeren toplamda 15 deneyden oluşan örnek kodlanmış merkezi bileşik tasarımın deney tasarımı verilmiştir.

Tablo 3.1: Merkezi bileşik tasarım (Baş, 2010).

Merkezi Bileşik Tasarım			
Deney No	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	- α	0	0
10	α	0	0
11	0	- α	0
12	0	α	0
13	0	0	- α
14	0	0	α
15	0	0	0

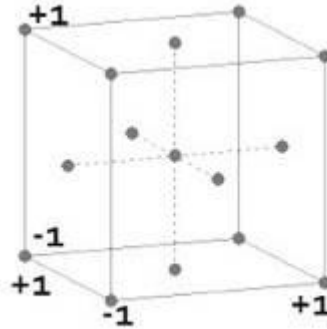
Merkezi Bileşik Tasarım (Yüzey Merkezli)

Merkezi bileşik tasarımın özel bir formu olan yüzey merkezli bileşik tasarımdır. Faktörleri X₁, X₂ ve X₃ olarak gösterilen 3 faktörlü ve 2 seviyeli bir yüzey merkezli merkezi bileşik tasarımdan deney oluşturulmak istenirse Tablo 3.2' deki gibi olacaktır. Bu yöntemde uç noktalar yüzeyde olduğu için ve çözüm yüzeyinden dış uzaya herhangi bir geçiş olmadığı için $\alpha = 1$ olarak alınır. Bu model sadece her faktörün 3 seviyesi olduğunda kullanılabilir.

Tablo 3.2: Merkezi bileşik tasarım (yüzey merkezli) (Baş, 2010).

Merkezi Bileşik Tasarım (Yüzey Merkezli)			
Deney No	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1	0	0
10	1	0	0
11	0	-1	0
12	0	1	0
13	0	0	-1
14	0	0	1
15	0	0	0

Yüzey merkezli merkezi bileşik tasarımın modellenmesi aşağıda gösterilmiştir. Bu model köşe noktalarında 8, $\alpha=1$ noktasında 6 ve merkez noktada 1 olmak üzere 15 deneyden oluşmaktadır. Şekil 3.5' de merkezi bileşik tasarımın yüzey merkezli modellenmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Merkezi bileşik tasarım (yüzey merkezli) modellenmesi.

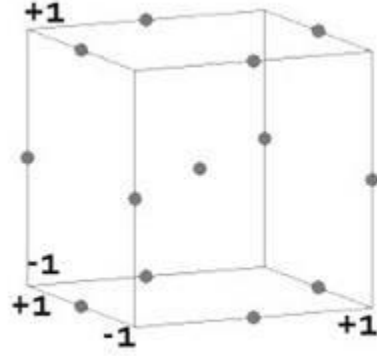
Box-Behnken Tasarımı

Box- Behnken tasarımı 1960 yılında Box ve Behnken tarafından geliştirilmiştir. Box- Behnken tasarımları 3^k faktöriyel tasarımların bir alternatifidir. Tasarım 2^k faktöriyel ve tamamlanmamış blok tasarımlarının kombinasyonu sonucu oluşmuştur. Box- Behnken tasarımları küresel bir tasarım olmasından dolayı sadece 3 düzeyde incelenir. Bu tasarım 15 deney gerektirdiğinden merkezi bileşik tasarımlara göre daha ekonomik tasarımlardır. Bu tasarımın avantajı deneyde herhangi bir fiziksel kısıtlama olması durumunda ya da maliyet olarak fazla olması durumunda küpün köşe noktaları faktör düzeyinde kombinasyonları temsil eder. Faktörleri X_1 , X_2 ve X_3 olarak gösterilen 3 faktörlü ve 2 düzeyli Box- Behnken deney tasarımı Tablo 3.3' de gösterilmiştir. Bu tasarımda X değerleri faktörleri, -1, 0, 1 değerleri ise seviyeleri göstermektedir.

Tablo 3.3: Box- Behnken modeli (Mason, Gunst ve Hess, 2003).

Box- Behnken Modeli			
Deney No	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Box-Behnken deney tasarımı modeli aşağıda gösterilmiştir. Bu deney tasarımında köşe noktalardan dış yüzeye bir taşma gözlenmemektedir. Tüm noktalar ya küre üzerinde ya da kürenin ortasındadır. Şekil 3.6' da Box-Behnken tasarım modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Box-Behnken tasarım modeli (Mason, Gunst ve Hess, 2003).

3.3.3 Faktöriyel Tasarım Yöntemi

Bir veya birden fazla faktörün yanıt üzerindeki etkilerini görmek için deneyler yapılır. Bir deney iki veya daha fazla faktörden oluştuğunda faktörlerin etkileşimleri de yanıt üzerinde etkisi olabilir. Böyle durumlarda faktörlerin bireysel etkileri ve yanıt üzerindeki etkileri anlamlı olmayabilir. Faktörlerin hem bireysel olarak etkilerinin hem de faktör etkileşimlerinin yanıt üzerindeki etkisini görmek için yapılan tasarımlara faktöriyel tasarım denilmektedir. Faktöriyel tasarımlarda seçilen tüm faktörlerin faktör seviyeleri deneye dahil edilmektedir. Seçilen faktörlerin tüm düzeyleri incelendiğinden faktörlerin hem ana etkileri hem de birbirileri ile olan etkileşimlerinin yanıt üzerindeki etkileri görülmektedir.

Yapılacak olan deneylerde araştırmacı tarafından maddi ya da kullanılacak malzeme ile ilgili herhangi bir kısıtlama mevcut değil ise deneylerin tamamen rassal tasarımlar olması deney sonuçlarının doğruluğu açısından son derece önemlidir. Böyle bir deney homojen kabul edilmektedir. Homojen deneylerde faktör etkileri de rassal olacağı için deneyde oluşabilecek hata minimize edilecektir.

Faktörleri A, B ve C olarak gösterilen 3 faktörlü ve 2 seviyeli bir tam faktöriyel tasarım oluşturulmak istensin. Bu faktörlerin her biri için düzeyleri de + ve – olarak gösterilsin. Bu faktör ve düzeyleri için faktöriyel tasarım tablosu ve faktörlerin etkileşim sütunu Tablo 3.4 gibi olacaktır.

Tablo 3.4: 3 faktörlü ve 2 seviyeli tam faktöriyel tasarım (Mason, Gunst ve Hess, 2003).

Deneme	Faktörler			Etkileşim
	A	B	C	
1	-	-	-	1
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	c
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

Burada A, B ve C faktörlerinin etkisinin yanı sıra birbirleriyle olan etkileşimleri de incelenmektedir. Etkileşim sütunundaki değerler her bir sütunun birbiri ile çarpımı sonucu işareti belirlenmektedir. Faktörlerin ve etkileşimlerinin ortalama etkileri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır (Giesbrecht ve Gumpertz, 2004).

$$A = \frac{1}{4n} \{a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc\} \quad (3.3)$$

$$B = \frac{1}{4n} \{b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac\} \quad (3.4)$$

$$C = \frac{1}{4n} \{c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab\} \quad (3.5)$$

$$AB = \frac{1}{4} \{abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)\} \quad (3.6)$$

$$AC = \frac{1}{4} \{(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc\} \quad (3.7)$$

$$BC = \frac{1}{4} \{(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc\} \quad (3.8)$$

$$ABC = \frac{1}{4} \{abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)\} \quad (3.9)$$

Faktöriyel deney tasarımının avantajları her bir faktör düzeyini incelemesi, faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimlerinin çıktı üzerindeki etkisinin hesaplanması açısından önemlidir. Faktöriyel tasarımı N^k şeklinde gösterirsek; N seçilen düzey sayısını, k ise faktör sayısını göstermektedir. 4 faktörlü bir deneyde düzey sayısı 2 seçilirse $2^4 = 16$ deney gerekirken düzey sayısının 3 seçilmesi $3^4 = 81$ deney gerektirecektir. Düzey sayısı 2'den fazla seçilmesi gereken

durumlarda faktör sayısına da bağlı olarak deney sayısında ciddi bir artış olacaktır. Bu durum da faktöriyel tasarım için olumsuz bir durum meydana getirmektedir. Böyle durumlarda kısmi faktöriyel tasarım uygulanmaktadır (Montgomery, 2008).

Tam Faktöriyel Deneylerin Avantajları ve Kısıtları

Tam faktöriyel deneylerin avantajları ve kısıtları aşağıda bir tablo olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.5: Tam faktöriyel tasarımın avantajları ve kısıtları.

Avantajları	Kısıtları
Tüm etkileşimler hakkında bilgi verir.	Faktör sayısı 2' den fazla olduğu durumlarda deney sayıları uzun sürebilir.
Her seferinde bir faktör deneylerde etkilidir.	Seviye sayısı 2' den fazla olduğu durumlarda deney sayıları uzun sürebilir.
2' den daha fazla düzeyli faktörlerle deneyler yapılabilir.	Faktörlerin doğru seçilmemesi durumunda zaman ve para kaybına neden olur.
Hem nicel hem de nitel girdiler için geçerlidir.	Sadece nicel çıktılarda kullanılabilir.

Kısmi Faktöriyel Tasarım

Kısmi faktöriyel tasarım, yeterli zaman ve bütçenin olmaması durumunda endüstride en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Kısmi faktöriyel tasarım tam faktöriyel tasarıma göre daha az deney içerir. Kısmi faktöriyel tasarımların tam faktöriyel tasarımlara göre avantajları aşağıdaki durumlardaki gibidir (Kağnıcıoğlu, 1998).

- Girdi faktörlerinin sayısının 5 veya daha fazla olduğu durumlarda
- Yüksek dereceli etkileşimlerin ihmal edilebilir olduğu durumlarda
- Asıl önemli olan ana etki ve 2'li derecedeki etkileşimler olduğu zaman
- Ön deney çalışması yapılacağı zaman
- Daha detaylı bir çalışma yapmadan önce girdilerin belirleneceği zaman

Kısmi faktöriyel tasarımlarda deney sayısı belirlenirken 2^{k-p} formülünden yararlanılır. 2 sayısı seviye sayısını, k harfi faktör sayısını ve p harfi de kesrin büyüklüğünü ifade eder. Örneğin 2

seviyeli, 5 faktörlü bir deneyde 1/2 kesirli faktöriyel tasarım yapılacaksa; 1/2 kesri aynı zamanda $1/2^1$ olarak da ifade edilebilir. 2'nin üssü durumundaki 1 sayısı p değerini göstermektedir. Böylece; $2^{5-1} = 2^4 = 16$ deney olacak şekilde hesaplama yapılabilir.

2 seviyeli ve 5 faktörlü bir deneyde 1/4 kesirli bir faktöriyel tasarım yapılacaksa, 1/4 kesrini $1/2^2$ şeklinde yazabiliriz. Bu durumda p değeri 2 olacaktır. Deney sayısı; $2^{5-2} = 8$ deney olacaktır. 2 seviyeli ve 3 faktörlü bir deney tasarımını kısmi faktöriyel ile deney yapılmak istenirse deney tablosu Tablo 3.6' daki gibi olacaktır. Deney tablosunda ana etkiler, ikili etkileşimler ve 3'lü etkileşim görülmektedir. Kısmi deney tasarımında 3'lü etkileşimler ve daha yüksek etkileşimler ihmal edilebilir ve böylece bu etkileşim yerine Tablo 3.7' de gösterilen 4. faktör olan D faktörü yazılır.

Tablo 3.6: 2 seviyeli, 3 faktörlü 8 deneyli bir tam faktöriyel deney tasarımı (Mason, 2003).

Deney	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1
7	-1	1	-1	1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1

Tablo 3.7: 2 seviyeli 4 faktörlü 8 deneyli 1/2 kesirli, (2^{4-1}) kısmi faktöriyel tasarım (Mason, 2003).

Deney	A	B	AB	C	AC	BC	D= ABC
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	-1	-1	1	1	-1	-1
7	-1	1	-1	1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1

Böylelikle D faktörü ile ABC etkileşimi bir nevi çakıştırılmış olur. Burada 3'lü etkileşimin etkisi ihmal edilerek yerine bir ana faktör olan D faktörü deney sayısı arttırılmadan deneye ilave edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken durum deney sonuçlarında D faktörünün mü ya da ABC etkileşiminin mi etkisi deney üzerinde daha etkili olacağı Minitab programından bakılarak incelenmelidir.

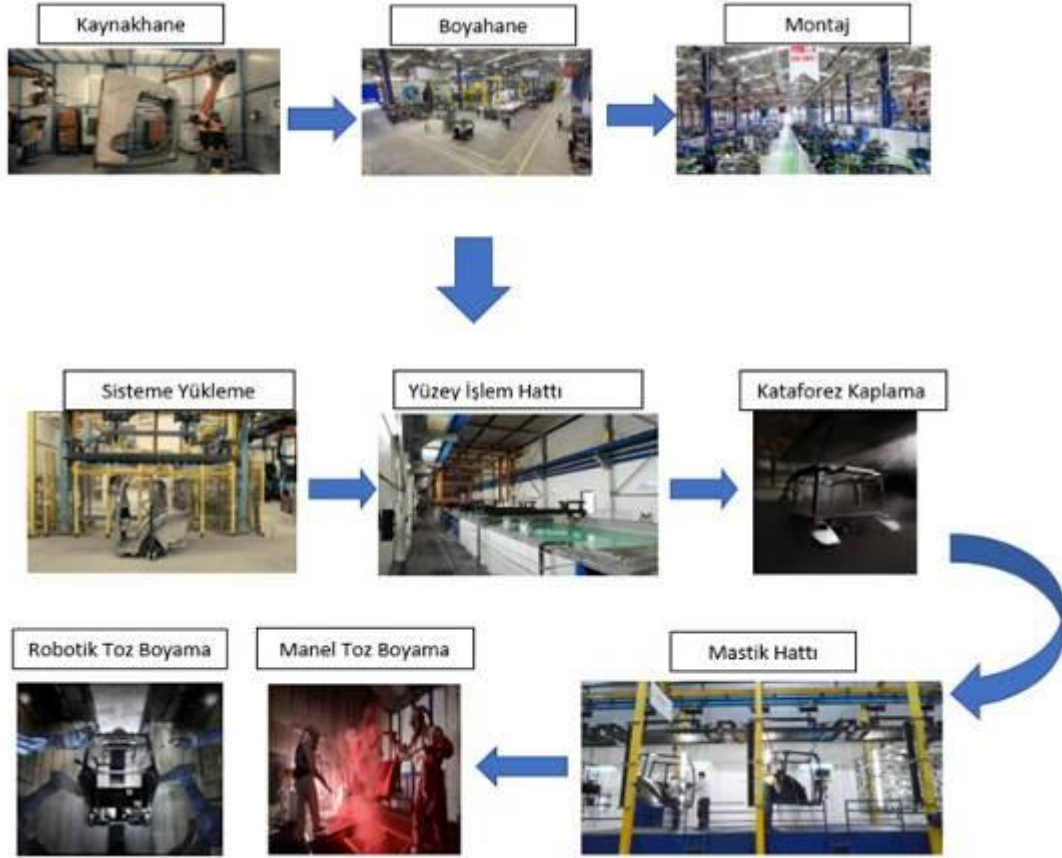
4. UYGULAMA

4.1 Sistemin ve Problemin Tanımlanması

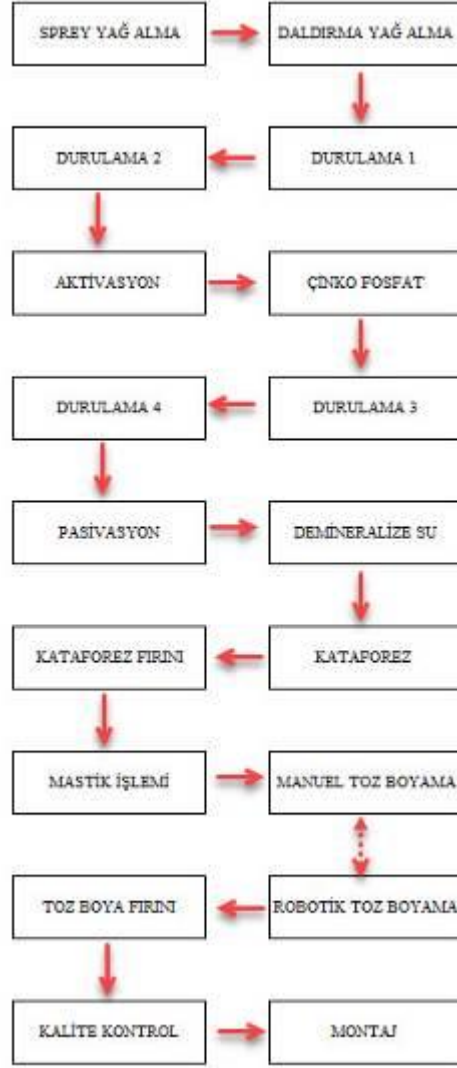
Çalışmada kullanılan veriler traktör ve iş makinası kabinlerinin yapıldığı bir firmanın boyahane bölümündeki toz boya prosesinde kullanılan verilerdir. İlgili firma tarım aletleri ve iş makinaları sektöründe faaliyet göstermektedir. Firma bünyesinde kaynakhane bölümü, boyahane bölümü ve montaj bölümü olmak üzere 3 ana üretim bölümü bulunmaktadır. Kaynakhane bölümünde, lazer, abkant pres ve büküm makinelerinde şekil verilmiş sıcak haddelenmiş sac malzemeler ile profil kesme ve bükme makinalarıyla işlem görmüş profil malzemeler, kaynakhane bölümüne kabin iskeleti yapılmak üzere forklift araçları yardımıyla gönderilir. Gelen sac ve profil parçaları kaynakhane bölümündeki robotlar yardımıyla iskelet kabini halini alır.

Boyahane süreci başlamadan önce planlama bölümü tarafından müşteri taleplerine göre üretim planı hazırlanır. Kaynakhane bölümünde oluşturulan kabin iskeleti ve kabin iskelet parçaları çekme sistemi kullanılarak boyahane bölümü tarafından boyanmak üzere çekilirler. Fabrika içinde tüm bu işlemler bilgisayar ortamındaki MRP programı sayesinde gerçekleştirilir. Üretim planına göre boyanacak yarı mamul ürünler vardiya amirleri tarafından vardiyalara ayrıştırılırlar. Resim 4.1' de fabrikada bulunan 3 ana üretim bölümü ve boyahane bölümünün süreçleri gösterilmiştir.

Kaynakhane bölümü tarafından üretilen yarı mamul metal ürünler montajlı kabin olmadan önce korozyon dayanımları kazandırılmak için boyahane bölümünde bir dizi operasyonlardan geçmektedirler. Boyahane bölümünde bulunan yaklaşık 500 metre uzunluğundaki konveyör sistemi sayesinde bu işlemler sırasıyla uygulanmaktadır. Bu konveyör sistemi sayesinde boyasız gelen metal parça veya kabin iskeletleri sırasıyla yüzey işlem prosesi, kataforez prosesi, PVC (Polivinil klorür) mastik prosesi, manuel toz boya prosesi veya robotik toz boya proselerinden geçmektedirler. Kataforez, toz boya ve mastik proseleri ısı ile kürlenen proseler olduğu için bu proselere ek olarak 2 adet konvansiyonel tipte fırın bulunmaktadır. Boyahane süreç akışı Şekil 4.1’ de detaylı olarak gösterilmiştir.



Resim 4.1: Boyahane ve diğer proseslerin genel görünümü.



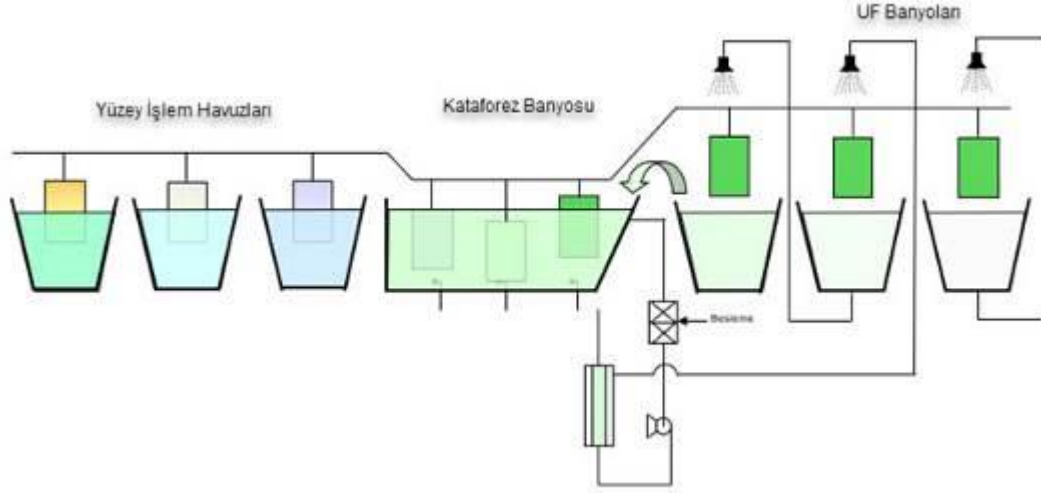
Şekil 4.1: Boyahane prosesi süreç akışı.

Metallerin önce doğasında bulunan ya da işlenirken meydana gelen yağların yağ alma banyolarında uygun alkalite ve sıcaklık değerlerinde yağları yüzeyden alınmaktadır. Eğer bu yağ alınmazsa kuru film, yüzey üzerinde uygun bir tabaka oluşturamaz ve boya kusurlarına neden olur. Yağ alma banyolarından geçen malzemeler daha sonra korozyon dayanımının sağlanması için ilk katman olan çinko fosfat banyosuna alınır. Metal yüzeyine çinko kaplama yapıldığında korozyon direncinin çinko kaplama uygulanmayan proseslere göre daha iyi sonuçlar verdiğini yapılan çalışmalar göstermiştir (Goldschmidt ve Streitberger, 2007). Yüzey işlem kısmının en son prosesi olan demineralize su banyosunda daha önceki banyolardan

gelen alkali iyonlar ve fosfat iyonlarının bir sonraki kataforez banyosuna gelmesi engellenmektedir. Parçalar daha sonra kataforez prosesine otomatik vinçler yardımıyla aktarılır. Tüm bu prosesler bir bütün olarak Şekil 4.1’ de gösterilmiştir. Kataforez prosesi kapalı çevrim bir prosestir ve aşağıdaki süreçler bulunmaktadır.

- Kataforez Banyosu
- 1. Ultrafiltrasyon Banyosu
- 2. Ultrafiltrasyon Banyosu
- 3. Ultrafiltrasyon Banyosu

Kataforez süreçlerinde fosfat kaplanmış metalin üzerine astar boya görevini üstlenen kataforez boyası kaplanır. Kataforez sistemi elektrokimyasal prensiplere dayanan bir kaplamadır. Banyo içerisinde banyo metrekaresine göre yerleştirilmiş anot hücreler bulunmaktadır. Metal parçalar banyo içerisine daldırıldığında parça sistemdeki yapı sayesinde eksi kutup, banyo içerisindeki anot hücreler ise artı kutup özelliği gösterir. Banyo içerisindeki boya tanecikleri de artı kutup özelliği gösterdiği için boya tanecikleri metal parçaya kaplanmayan bölge kalıncaya kadar yapışır ve metal parçanın tüm yüzeyi kataforez boya olana kadar kaplama işlemi devam eder. Üzerine fazla kaplanmış kataforez boya tanecikleri ultrafiltrasyon banyolarından sırasıyla geçerek seyrelir ve böylece boya kataforez banyosuna tekrar aktarılmış olur. Kataforez proseslerinde bu sistemi kontrol eden membran sistemler bulunmaktadır. Bu sistemler boya içerisindeki istenmeyen veya önceki banyolardan taşınan iyonları emerek kataforez banyosunun sürekli uygun aralıklarda olmasını sağlar. Kataforez sistemi kapalı bir çevrim olduğu için ve fazla boya tekrar ultrafiltrasyon banyoları tarafından alınır ve bu yüzden çok verimli ve kaplama birim maliyeti ucuz bir sistemdir. Bu sistemde sadece yatırım maliyeti pahalıdır. Resim 4.2’ de yüzey işlem havuzları, kataforez banyosu ve UF banyolarının genel gösterimi verilmiştir.



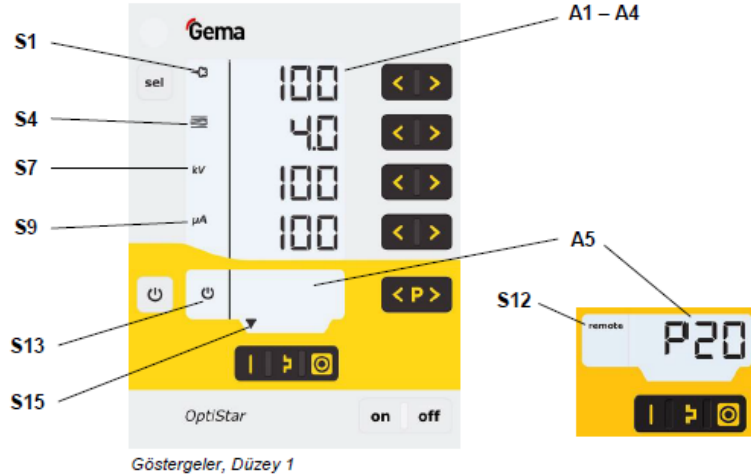
Resim 4.2: Yüzey işlem havuzları ve kataforez banyosu genel görünümü.

Kataforez boya içindeki boya tanecikleri epoksi yapıdadır. Epoksi boyalar kaplandığı malzeme üzerinde kimyasal bağ yapıları kurabilmek için ısıya ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden parça fırınlanmak için konvansiyonel tarzdaki fırına konveyör yardımıyla gönderilir. Fırından çıkan parçalar doğal kuruma alanına yine konveyör yardımıyla gelirler. Bu alanda iskeletlerin veya parçaların kaynak birleşim noktalarına ısı ile kürlenmiş PVC (Polivinil Klorür) mastik malzeme mastik tabancaları yardımıyla boyahane çalışan personelleri tarafından uygulanır. Bu malzeme traktör kabini içine oturan sürücüye yağmur, ses ve toz gibi istenmeyen maddelerden korunması için uygulanır. Mastik kısmından sonra toz boya uygulaması için parçalar manuel toz boya ya da robotik toz boya kabinlerine konveyör yardımı ile ilerlerler. Bir parçanın robot ya da manuel olacağı boyanacağı renk ve parça yapısına göre belirlenir. Çünkü robotik boyamada siklon sistemi sayesinde geri dönüşüm sistemi bulunmaktadır. Bu yüzden sadece tek tip renk koduna robotik boyama yapılabilmektedir. Bu renk ise firmanın en çok tükettiği boya tercih edilmektedir. Toz boya uygulandıktan sonra boyanın kürlenmesi için ısıya ihtiyaç duymasından dolayı konvansiyonel tipteki fırına konveyör yardımı ile gönderilir. Fırından çıkan parçalar ve kabin iskeletleri kalite kontrol onayı sonrasında bir sonraki istasyon olan montaj bandına alınabilirler.

Süreç içerisinde anlatılan toz boya kısmında özellikle toz boya kalınlığı çok önemli bir rol üstlenmektedir. Parçanın korozyon dayanımı, mekanik ve kimyasal testlere karşı sonuçlarında kuru filmi kalınlığı en önemli parametredir (Goldschmidt ve Streitberger, 2007). Toz boya kalınlığı istenilen kalınlıkta olmazsa burada uygulanan boyanın birincil fonksiyonu olan fiziksel ve kimyasal etkilere karşı parçayı koruma görevini tam olarak yerine getiremeyecektir. Aynı zamanda ikincil fonksiyon olan estetik özelliğinden görsel bozukluk gibi kalitesizlik problemlerinden dolayı müşteri tarafından beğenilmeyecektir. O yüzden bu tez çalışmasında uygun toz boya kalınlığı çıktı parametresi olarak seçilmiş ve toz boya kalınlığının birincil ve ikincil fonksiyonlarını tam olarak yerine getirmesi hedeflenmiştir. Kuru film kalınlığı problemi genellikle manuel toz boya prosesinden kaynaklanmaktadır. Bu problemin kök nedenine bakıldığı zaman personellerdeki boya proses bilgisizliği ve boyama işleminde belli bir düzen izlenmemesinden kaynaklandığı görülmüştür. Problem ile ilgili veriler toplandığında manuel toz boya prosesinde deney tasarımı yapılmasına karar verilmiştir.

4.2 Deney Parametrelerinin ve Değer Aralıklarının Belirlenmesi

Yapılan tez çalışmasında İsviçre menşeli Gema markasının toz boya ekipmanları kullanılmıştır. Kullanılan bu toz boya ekipmanlarında proseste kullanılacak değerler ekipmanların izin verdiği aralık dahilinde girilmiştir. Örnek olarak toz atımı için 0,1 ile 100 değerleri seçilebilmektedir. Bu durumdan dolayı minimum değer 0,1, maksimum değer 100 olarak alınmıştır. Toz boya sistemlerinde iki çeşit toz boya tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler korona ve tribo teknikleridir. Korona sistemlerde tabanca içinde bulunan kaskat sayesinde toz boya tanecikleri elektrikleştirilirken, tribo yönteminde ise tabanca ucuna takılan uzun plastik malzeme sayesinde boya parçacıkları plastik malzemeye sürtünerek elektrikleştirilir. İki tekniğin kullanılması boyanacak parçaya ve kullanılacak prosese göre değişkenlik göstermektedir. Firmada korona tekniği ile toz boya uygulaması yapıldığı için tez çalışması da korona tekniğinde yapılmıştır. Resim 4.3' de toz boya prosesinde kullanılan parametrelerin ekranı gösterilmiştir (Gema Switzerland GmbH, 2010).



Göstergeler, Düzey 1

Tanım	Fonksiyon
A1-A4	Olan değerler, olması gereken değerler, sistem parametreleri göstergesi Mümkün olan aralık aşıldığında yanıp söner
A5	Program numarası, hata teşhis kodları ve durum bilgileri göstergesi
S1	Toz atımı (% olarak)
S4	Toplam hava miktarı (gösterim Nm ³ /saat cinsinden)
S7	Yüksek gerilim (gösterim kV cinsinden)
S9	Püskürtme akımı (gösterim µA cinsinden)
S12 remote	Uzaktan işletim tuş kilidi olarak kullanılmaktadır, kumanda kısıtlı mümkündür
S13	Titreşim/Akışkanlaştırıcı göstergesi
S15	Ön tanımlı işletim türleri veya temizlik sırasında yıkama modu gösterimi

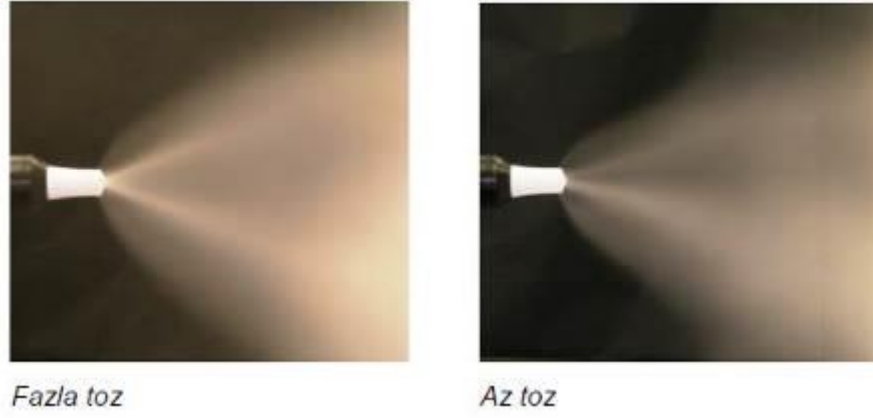
Resim 4.3: Toz boya prosesi parametre ekranı.

Toz boya prosesinde kullanılan terimler olan ve aynı zamanda tez çalışmasında da kullanılacak olan parametrelerin detaylı açıklamaları sırasıyla anlatılmıştır.

Toz Boya Debisi (Toz Atımı) (%)

Bu ifade tabanca içinden geçen toz boya miktarının yüzdesel olarak ifade edilmiş şeklindedir. Bu değer ne kadar yüksek seçileceği istenilen toz boya kuru film kalınlığı ile direkt doğru orantılıdır. Eğer kuru film kalınlığı yüksek kalınlıkta bir ürün isteniyorsa bu değer 100 değerine yakın, kuru film kalınlığı düşük bir değer isteniyorsa bu değer 40-50 değeri arasında girilmelidir. Resim 4.4’ de az toz atımı ile çok toz atımı arasındaki fark gösterilmektedir. Gereğinden fazla toz boya atımı malzeme israfına ve portakallanma, boya akıntıları gibi kalite problemlerine neden olmaktadır. Gereğinden az toz atımı da yüzeyin tam olarak

kaplanamamasına yani boya azlığı problemlerine neden olur (Gema Switzerland GmbH, 2010).



Resim 4.4: Toz boya debisi ile çıkan toz boya bulutu.

Toplam Hava Miktarı (Nm³/saat)

Boya sistemleri boya kazanından boyanın taşınıp yüzeye püskürtülene kadar boyanın hareketine yardımcı olacak bir taşıyıcı sisteme gereksinim duyar. Yaş boya uygulamalarında bu görevi bir kimyasal sıvı üstlenirken, toz boya uygulamalarında ise bu taşıma görevini hava üstlenmektedir. Hava miktarı taşıma havası ve süpürme havası olmak üzere toplam 2 adettir. Taşıma havası toz boyanın toz boya kazanından tabanca ucuna taşınmasına yardımcı olurken, süpürme havası ise bu sistemdeki hortum içindeki arkada kalan boya taneciklerini süpürerek destekleyici bir rol oynar. Resim 4.5' da iyi bir hava miktarında çıkan toz bulutunun ve az miktardaki hava ile çıkan toz bulutunun resmi gösterilmiştir. İyi bir toz bulutunda boya tanecikleri parçaya ulaşmada sıkıntı yaşamayacaktır. Böylece boya miktarının fazla tüketilmesi de önlenecektir. Çok az toplam hava görselinde ise boya tanecikleri parçaya ulaşmadan bir kısmı yere düşecektir. Bu durumda kullanılması gerekenden daha fazla boya tüketilmesine neden olacaktır. Kullanılması gerekenden daha fazla bir hava miktarı da kullanılması da uygun değildir. Böyle bir durumda parça üzerindeki boyanın kalkması sonucu istenmeyen yüzey görüntülerine neden olacaktır (Gema Switzerland GmbH, 2010).



Resim 4.5: Toplam hava debisi ile çıkan toz boya bulutu.

Voltaj Değeri (kV)

Voltaj değeri tabanca içerisinde bulunan kaskat parçasının dış ortamdaki bir elektriklenme ünitesi sayesinde tabanca ile boyanacak parça arasında yüksek miktarda elektrik alan üretmesine yardımcı olur. Parça ile tabanca arasında bir elektriksel alan meydana gelmesi sonucu tabanca ucundan çıkan toz boya tanecikleri tabanca ucundaki iğne sayesinde negatif yük ile yüklenir. Bu alanın ne kadar büyük ve ne kadar yoğun olacağı seçilen voltaj değerine bağlıdır. Özellikle iç bükey parça boyanacağı zaman voltaj değeri Faraday Kafesi etkisi meydana getirmemek için düşük bir değer seçilir. Faraday Kafesi kavramı, elektrostatik kaplama proseslerinde iç bükey bölgelerin etrafında bir elektrik alan oluşarak iç bükey bölgelerin kaplanmamasına neden olan bir elektriksel terimdir. Eğer boyanacak parçalar genellikle iç bükey parçalar ise toz boya sisteminin tribo seçilmesi gerekmektedir çünkü tribo sistemlerde kaskat yapısı olmadığı için Faraday Kafesi etkisi görülmemektedir. Eğer korona tekniği ile parça boyanacaksa yukarıda da bahsedildiği gibi voltaj değeri düşürülmelidir. Bu durumun nedeni yüklenmiş toz boya tanecikleri kendisine en yakın mesafedeki metallere hücum edeceği için parçanın sadece uç kısımlarına yönelecektir. İç kısımlarında istenilen boyama performansı sağlanamayacağı gibi uç kısımlarda kuru film kalınlığı oldukça fazla olacaktır.

Akım Değeri (μA)

Elektrostatik toz boya prosesinde akım değeri yüklenmiş toz boya taneciklerinin şiddetinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Voltaj ve akım değerinin ayarlanması parçanın şekline göre değişkenlik göstermektedir.

Elektrostatik toz boya sistemlerinde akım değerinin özellikle önemli olduğu konu boya transfer verimliliğidir. Yapılan çalışmalar sonucu akım değerinin boya transfer verimliliğine etkisinin oldukça önemli olduğu gözlemlenmiştir. Toz boya uygulama ekipmanları üreten Nordson firması tarafından yapılan çalışmalarda aynı akım değerinde boyama mesafesi arttıķça transfer verimliliğinin arttığı grlmştir (Guskov, 2017).

Tabanca Ucu Hava Debisi (Nm^3/saat)

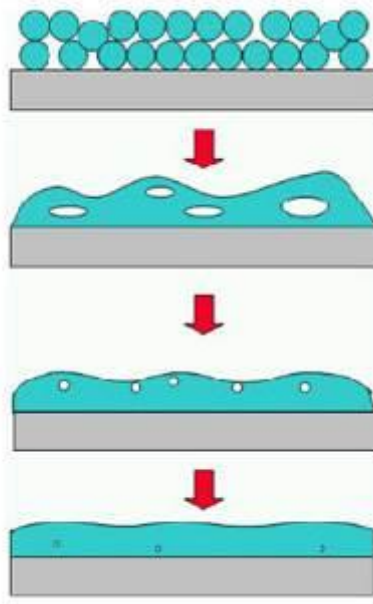
Tabanca ucu hava debisi, toz boya uygulaması yapılırken tabanca ucunda bulunan iğnedeki boyaların atılması için kullanılan bir havadır. Tabanca ucu havasına durulama havası da denilmektedir. İğne ucundaki toz boya miktarı temizlenmezse tabanca ucunda topaklanmalar meydana gelecektir. Bu toz boya topaklanmaları atılan boyanın kalitesini düşürecektir ve yüzeyde düzgün bir film tabakasının oluşmasını engelleyecektir. Resim 4.6' da manuel toz boya tabancası ve tabanca ucundaki toz boya taneciklerinin elektrikleşmesi sağlayan iğne gösterilmiştir.



Resim 4.6: Manuel toz boya tabancası.

Boya Tanecik Boyutu (μm)

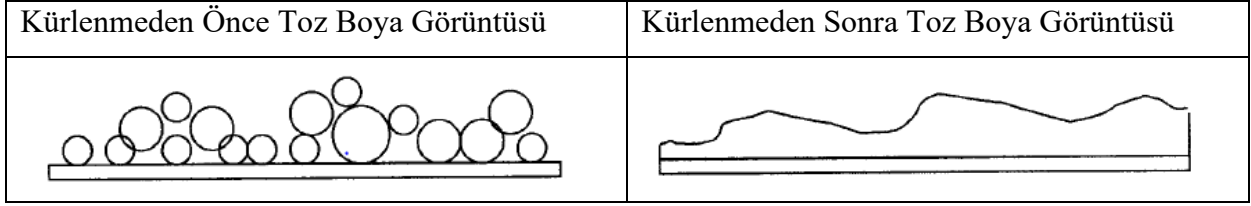
Toz boyanın en önemli özelliklerinden bir tanesi tanecik boyutu ve dağılımının düzgün olmasıdır. Termoset toz boyaların birçoğu belli bir ısı altında eriyik hale geçerek film yapısı oluşturmaktadır. Film yapısı oluştururken toz boya taneciklerinin boyutları arasındaki farklılık taneciklerin eriyik hale geçtikten sonra yüzeyde pürüzlülük şeklinde algılanacaktır. Resim 4.7' de gösterilen yapıda boya tanecikleri parçaya elektrostatik olarak kaplandıktan sonra boya fırınına girene kadar olan görünümü verilmiştir. Daha sonra boya fırını içerisinde toz boyanın reçine yapısına göre erime sıcaklığına ulaştığında film yüzeyi şeklinde bir görüntü kazanır. Bu durumda içerisinde boyanın yapısından kaynaklı hava boşlukları bulunur. Kuru filmin performans ve kalite kriterlerini karşılayabilmesi için içerisindeki havayı atması gerekmektedir. Boya içerisindeki çeşitli katkı maddeleri sayesinde bu havayı sıcaklığın da etkisiyle atmaya çalışır.



Resim 4.7: Toz boya taneciklerinin film oluşumu süreci.

Şekil 4.2' de boya taneciklerinin kendi aralarındaki büyüklük farklılıklarından kaynaklanan ve eriyik oluşturduğunda yüzeyde nasıl bir hal aldığı gösterilmiştir. Böyle bir durumda kuru film

yüzeyde standart bir film kalınlığı oluşturmayacak ve kuru film kalınlığının bölgesel olarak değişmesine neden olacaktır (Biris, Mazumder, Yurteri, Sims, Snodgrass ve De, 2001).



Şekil 4. 2: Toz boya taneciklerinin kürlenmeden önce ve sonraki görüntüleri.

Proseste kullanılan toz boyalar üretici firma tarafından bir kutu içerisine konulmaktadır ve müşterilerine öyle gönderilmektedir. Bu kutu içinde toz boya tanecikleri karışık olarak bulunmaktadır. Deneyde kullanılacak olan toz boya tanecikleri 25 μm , 40 μm , 60 μm ve 90 μm eleklerden elenerek kullanılmıştır. Bu parametreler rastgele seçilmiş olup her bir μm aralığındaki boya taneciklerini temsilen seçilmiştir. Toz boya tanecik boyutu kuru film kalınlığı üzerinde etkisinin büyük olmasından dolayı ve yüzey görüntü kalitesini de etkilediğinden dolayı yapılan deneyde girdi parametresi olarak alınmıştır.

Tablo 4.1: Toz boya tanecik boyutu dağılımı örnek 1.

Toz Boya Boyutu (μm)	Birikimli Yüzde (%)
5	0,81
10	5,45
30	27,71
40	43,95
50	60,09
60	73,45
70	83,36
80	90,21
90	94,65
100	97,38
110	98,85
120	99,51
130	99,87
140	99,96
150	100

Tablo 4.2: Toz boya tanecik boyutu dağılımı örnek 2.

Toz Boya Boyutu (μm)	Birikimli Yüzde (%)
5	0,3
10	5,11
30	39,11
40	58,48
50	73,93
60	84,96
70	91,96
80	96,11
90	93,38
100	99,47
110	99,87
120	99,97
130	100
140	100
150	100

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’ de Akzo Nobel firmasının örnek olarak üretimden aldığı toz boya kutularındaki toz boya boyutlarının her bir μm değerinin altında olan toz boya taneciklerinin yüzdesi gösterilmektedir (Akzo Nobel, 2017). Detaylı olarak açıklayacak olursak, Tablo 4.1’ deki ilk numunede 80 μm altındaki toz boya taneciklerinin boya kutusun içindeki oranı %90,21’dir. İkinci numunedeki Tablo 4.2’ de ise boya kutusu içindeki toz boya taneciklerinin 50 μm altında olması oranı %73,93’tür.

Nozul Çeşidi

Toz boya prosesinde kullanılan nozul çeşitleri boyanacak parçaların uzaklığına ve geometrisine göre değişmektedir. Her bir nozul çeşidinde nozul ağzında toz boya bulutu daha fazla kümelenmiş olup havada aerodinamik etkisiyle ilerledikçe toz bulutu seyrelmektedir. Resim 4.8’ de deneyde kullanılan 4 farklı nozul çeşidi gösterilmiştir. Burada kullanılan nozul sayesinde parçanın geometrisine göre, toz bulutunun hızı, kapladığı alan miktarı ve tabancanın kaplanacak parçadan uzaklığı gibi değişkenlik göstermektedir. Bu nozullardan çıkan toz boya şekilleri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.



Resim 4.8: Deneyde kullanılan nozul çeşitleri.

Resim 4.9’ da 1 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu ve büyüklüğü gösterilmektedir. Bu nozul tipi düz ve çok büyük parçalar için kullanılması uygun bir nozul tipidir. Bu nozul tipinde maksimum uzaklık 180 mm olmalı ve toz boya bulutu 200 mm çapında bir boya bulutu oluşturmaktadır. Nozul boya çıkış çapı 50 mm’ dir. Yakın mesafe boya prosesleri için önerilir. (Gema Switzerland GmbH, 2015).



Resim 4.9: 1 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu.

Resim 4.10’ da 2 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu gösterilmektedir. Bu nozul tipinde ise 1 numaralı nozula tipine göre daha küçük parçalar için uygundur. 2 numaralı nozulun

kullanıldığı yerlerde maksimum boyama mesafesi 160 mm olmalı ve toz boya bulutu 110 mm çapında bir boya bulutu oluşturmaktadır. Nozul boya çıkış çapı 32 mm' dir. Yakın mesafe boya prosesleri için önerilir (Gema Switzerland GmbH, 2015).



Resim 4.10: 2 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu.

Resim 4.11' de 3 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu gösterilmektedir. Bu nozul tipinde 2 numaralı nozula göre daha küçük parçalar için uygundur. 3 numaralı nozulun kullanıldığı yerlerde maksimum boyama uzaklığı 160 mm olmalıdır. Nozul boya çıkış çapı 24 mm' dir. Bu nozul tipinde toz boya bulutu 90 mm çapında bir boya bulutu oluşturmaktadır (Gema Switzerland GmbH, 2015).



Resim 4.11: 3 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu

Resim 4.12' de 4 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu gösterilmektedir. Bu nozul tipi düz ve küçük parçalar için kullanılması uygun bir nozul tipidir. Bu nozul tipinde maksimum

uzaklık 120 mm olmalı ve toz boya bulutu 60 mm çapında bir boya bulutu oluşturmaktadır. Nozul boya çıkış çapı yaklaşık 16 mm'dir (Gema Switzerland GmbH, 2015).



Resim 4.12: 4 numaralı nozuldan çıkan toz boya bulutu.

Bahsedilen nozul çeşitlerinin farklı olarak değişik çeşitte ve boyutlarda nozul eşitleri de bulunmaktadır. Kullanılacak nozullar üretim hızı, parça geometrisi, kullanılan toz boya yöntemi, parçanın yapısal büyüklüğü gibi değişkenlere göre kullanımları farklılık göstermektedir.

Kabartma Hava Debisi (Nm³/saat)

Toz boyayı boya kazanından tabanca ucuna göndermek zor bir işlemdir. Bu işlemleri daha kolay yapmak için boyayı akışkan hale getirmek gerekir. Bu akışkan hale getirme işlemi boya kazanının tabanında bulunan ve toz boyaya deniz dalgası efekti veren bir kabartma havası sayesinde olur. Kabartma havası sayesinde katı halde bulunan toz boya tanecikleri hortum içinde akışkan özellikleri göstererek tabanca ucuna kadar rahat ve düşük basınçla gönderilir. Kabartma havasının iki ana görevi vardır. Bunlardan bir tanesi toz boya birçok komponentten oluştuğu için kazan içerisinde bu komponentlerin karışmasını sağlar. İkinci görevi ise boya kazanında bulunan toz boya taneciklerini hareketlendirerek toz boya taneciklerinin topaklaşmalarını engeller. Kabartma havası; boya tipine, havadaki nem ve ortam sıcaklığına göre farklı değerlere ayarlanabilmektedir (ITW Gema GmbH, 2006).

4.3 Deney Tasarımı ve Deneysel Sonuçlar

Yapılan tez çalışmasında 200 mm eninde ve 200 mm boyunda kırmızı pas yapabilen sıcak haddelenmiş malzemeden üretilen saclar kullanılmıştır. Bu sac parçalara toz boya uygulaması Gema Optiflex 2B marka manuel toz boya tabancası ile yapılmıştır. Toz boyanın yüzeye daha iyi yapışabilmesi için ve firmanın toz boya sürecinin de içinde olan kataforez astar boyası ile kaplandıktan sonra sac parçalar deney çalışması yapılmak üzere manuel boya kabine konveyör yardımı ile gönderilmiştir.

Çalışmada girdi parametresi olarak alınmayıp sabit tutulan 2 adet parametre vardır. Bu parametreler boyama uzaklığı ve boyama hızıdır. Bu parametrelerden boyama uzaklığı, deneyleri yapan personelin boya uygulamasını yaparken aynı uzaklıkta durmasıdır. Her ne kadar uzaklık 150 mm kadar seçilmiş ve personele belli bir çizgi doğrultusunda bu çizgiyi geçmemesi ğtlense de milimetre cinsinde uzaklık az da olsa değişebilmektedir. Bu uzaklık tüm değer boyunca 150 mm olarak alınmış ve tüm sonuçlar bu uzaklığa göre değerlendirilmiştir. İkinci sabit olarak parametre de personelin aynı hızda boyama yapmasıdır. Personele belirli bir yörünge çizilmiş ve bu doğrultuda hareket etmesi sağlanmıştır. Bu yörüngede boyama hareketlerini yaparken belli bir boyama hızı belirlenmiş ve tüm deney boyunca aynı hızda boyama yaptığı varsayılmıştır.

Resim 4.13' de tez çalışması için deney parçasını manuel toz boya prosesi ile boyayan personel gösterilmiştir. Özellikle deney parçasının boyanırken personelin ergonomik olarak rahat bir şekilde boyamasını sağlayacak mesafe ve parça askı yüksekliği seçilmesine zen gösterilmiştir.



Resim 4.13: Manuel toz boya uygulaması.

Toz boya prosesinde kuru film kalınlığı çıktısını etkileyen birçok girdi parametresi vardır. Bu girdi parametrelerinden kuru film kalınlığı çıktısını bazı girdiler az, bazı girdiler çok etkilemektedir. Aynı zamanda bu girdi parametrelerinin seçimlerinden doğan bir toz boya prosesi işletme maliyeti vardır. Hem istenilen kuru film kalınlığına ulaşılması hem de proses işletme maliyetinin minimumda tutulması amaçlanmaktadır. Bundan dolayı seçilecek olan girdi parametreleri proses işletme maliyetini minimumda tutacak şekilde ama ulaşılacak istenilen kuru film kalınlığını da maksimize edecek şekilde seçilmiştir.

Elektrostatik toz boya prosesinde girdi faktörlerinin çıktı faktörünü ne kadar etkilediğini belirleyebilmek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bu teknikle girdi faktörlerinin çıktı faktörünü etkileyen önem dereceleri belirlenmiş ve çıktı üzerinde daha önemli olan faktörlerin aralığı daraltılmıştır.

Taguchi yöntemi kullanılarak kontrol edilebilen faktörleri (şiddet) kontrol edilemeyen faktörlere (gürültü) karşı duyarsız olması amaçlanmaktadır. Bu tarz gürültü faktörlerine duyarsız bir şekilde ürün üretilmesine robust tasarım denilmektedir. Minitab programıyla elde edilecek olan şiddet/gürültü grafikleri ile hangi noktalarda bu deneyin robust olduğu belirlenebilecektir. Şiddet/gürültü grafikleri ile en yüksek şiddet/gürültü noktası gürültü faktörünün en az etkisini gösterdiği nokta olarak gösterilmektedir (Antony, Perry, Wang, ve Kumar, 2006).

Deneylere başlamadan önce toz boya prosesinde kullanılan ve deneye girdi faktörleri olarak dahil edilen parametreler sürekli değişkenler ve kesikli değişkenler olarak ayrılmıştır. Sürekli değişkenlerin minimum ve maksimum değerleri boya ekipmanlarının izin verilen maksimum ve minimum değerlerine göre ayarlanmıştır. Kesikli değişkenlerin seviyeleri ise üretimde kullanılan nozul çeşitleri ve toz boya partiküllerinin her bir aralığı temsil etmesi açısından belirli mikronlar seçilmiştir. Seçilen faktörler ve seviyeleri Tablo 4.3' de gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Deney 1 için girdi faktörleri ve seviyeleri.

Elektrostatik Toz Boya					
Girdi Parametreleri (Sürekli Değişkenler)	Minimum Değer		Maksimum Değer		Birimi
Voltaaj	10		100		kV
Akım	1		100		μ A
Boya Debisi	0,1		100		%
Toplam Hava Debisi	1,5		6,5		Nm ³ /saat
Tabanca Ucu Hava Debisi	0,1		5		Nm ³ /saat
Kabartma Hava Debisi	0,1		1		Nm ³ /saat
Elektrostatik Toz Boya					
Girdi Parametreleri (Kesikli Değişkenler)	Seviye	Seviye	Seviye	Seviye	Birimi
Boya Tanecik Boyutu	25	40	60	90	(μ m)
Nozul Çeşidi	1	2	3	4	-

Girdi faktörleri belirlendikten sonra Minitab programından Taguchi yöntemi seçilerek deney tasarımı yapılmıştır. Programın vermiş olduğu girdi parametre değerleri ve deneyler sonucunda çıkan sonuçlar Tablo 4.4’ de kuru film kalınlığı sütununa yazılmıştır. Yapılan deneylerin bazılarında boya atımının gerçekleşmediği gözlemlenmiştir ve açıklama sütununa yazılmıştır.

Tablo 4.4: Deney 1 için kuru film kalınlığı sonuçları.

Deney Sayısı	Nozul Çeşidi	Voltaj	Akım	Boya Debisi	Toplam Hava Debisi	Kabartma Havası	Tabanca Ucu Hava Debisi	Boya Tanecik Boyutu (µm)	Kuru Film Kalınlığı (µm)	Açıklama
1	1	10	1	0,1	1,5	0,1	0,1	25	22	
2	1	10	1	0,1	1,5	1	5	90	25,6	
3	1	100	100	100	6,5	0,1	0,1	25	129	
4	1	100	100	100	6,5	1	5	90	125	
5	2	10	1	100	6,5	0,1	0,1	90	59,6	
6	2	10	1	100	6,5	1	5	25	26,3	
7	2	100	100	0,1	1,5	0,1	0,1	90	26,3	
8	2	100	100	0,1	1,5	1	5	25	28	
9	3	10	100	0,1	6,5	0,1	5	25		Boya Atmadı
10	3	10	100	0,1	6,5	1	0,1	90		Boya Atmadı
11	3	100	1	100	1,5	0,1	5	25	26,6	
12	3	100	1	100	1,5	1	0,1	90	33	
13	4	10	100	100	1,5	0,1	5	90	23,6	
14	4	10	100	100	1,5	1	0,1	25	35	
15	4	100	1	0,1	6,5	0,1	5	90		Boya Atmadı
16	4	100	1	0,1	6,5	1	0,1	25		Boya Atmadı

Deneyde kullanılan parça ve parça üzerinde alınan ölçüm noktaları Resim 4.14’ de gösterilmiştir. Ölçüm sonuçları alınırken birden fazla ölçüm alınması sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Bu nedenle Tablo 4.4’ de kuru film kalınlığı sütununa yazılan değerler alınan 9 ölçümün ortalamasını göstermektedir. Toz boya yapısı gereği atıldığı parça üzerinde kümelenme eğilimi göstermek istediğinden birbirine çok yakın noktalardan alınan ölçümler bile aynı olmayacaktır. Bu yüzden farklı yerlerden ölçüm alındıktan sonra bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Parça üzerinde ölçüm yapılırken aynı zamanda köşelerden ölçüm alınmamış olup, orta bölümlerden ölçüm alınmaya dikkat edilmiştir. Bu durumun nedeni de korona tekniği ile yapılan toz boya prosesinde köşe bölgeler orta bölgelere göre daha fazla

boya kaplanmaya meyillidir. Böyle bir durum ölçüm sonuçlarını şaşırtacağı için ölçümler köşe bölgelere aynı mesafe uzaklıktaki orta noktalardan alınmıştır.

Yapılan deney kadar deney sonuçlarında yapılan ölçümler de son derece önemlidir. Çünkü yanlış ölçülmüş bir deney tüm emek ve paranın boşa gitmesine neden olabilir. Bu durumun bilincinde olarak kalibrasyonu yapılmış ve her deney öncesi de doğrulama aparatı ile doğrulanan bir ölçüm aleti kullanılmıştır. Ölçüm aleti olarak kullanılan cihaz Resim 4.15' de gösterilmiştir.



Resim 4.14: Deney parçası üzerinde ölçüm yapılan yerler.



Resim 4.15: Kuru film kalınlığı ölçüm aleti.

Yapılan Deney 1 sonuçlarına göre boya debisinin 0,1 ve toplam hava debisinin 6,5 olduğu değerlerde boya atımının gerçekleşmediği ve boya tabancasının ucundan sadece hava çıkışının olduğu görülmüştür. Boya debisinin daha sonraki deneylerde daha yüksek bir değer girilmesine karar verilmiştir. Boya debisinin 0,1 olarak belirlendiği deneylerde boyanın hiç çıkmadığı ya da çok az çıktığı, toplam hava debisinin 1,5 olduğu değerlerde ise tabanca ucundan çıkan boyanın deney parçasına ulaşmadan yere düştüğü gözlemlenmiştir. Burada da toz boya debisi değerinin en yüksek, toplam hava debisi değerinin en düşük olduğu durumda ise hava debisi toz boya taneciklerini hareket ettirecek kuvveti bulamamıştır ve toz boya tanecikleri böylece parçalara erişmeden yere düşmüştür. Voltaj ve akım değerlerinin sırasıyla 10 ve 1 değerlerinde olduğu durumlarda boya tabanca ucundan toz boya tanecikleri çıkmış fakat deney parçasını sarmadığı gözlemlenmiştir. Voltaj ve akım değerinin olması gereken değerden daha düşük olduğu ve bir sonraki yapılacak deneylerde bu değerlerin daha yüksek

seçilmesi gerektiği görülmüştür. Birinci deney sonuçlarında nozullardan çıkan boya tanecik şekilleri incelenmiş ve kürlenmeden sonra deney parçasındaki yüzey kalitesine de ayrıca bakılmıştır. Firma kalite mühendisleri beraber parçalar incelendikten sonra 4 numaralı nozul ile yapılan deneylerde yüzey kalitesinin iyi olmadığı görülmüştür. 4 numaralı nozul deneyden çıkartılmıştır ve kalan 3 adet nozul ile deneylere devam etme kararı alınmıştır. 25 µm boyutundaki toz boya tanecikleri ile yapılan deneylerde ise boya taneciklerinin tam olarak elektriklemediği ve 90 µm boya tanecikleri ile yapılan deneylerde boyanın daha iyi elektriklemediği görülmüştür. Sonraki deneylerde 25 µm boya tanecik boyutu ile devam edilmeme kararı alınmıştır.

Deney sonuçları yorumlarına göre oluşan yeni girdi faktör seviyeleri Tablo 4.5’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.5: Deney 2 için girdi faktörleri ve seviyeleri.

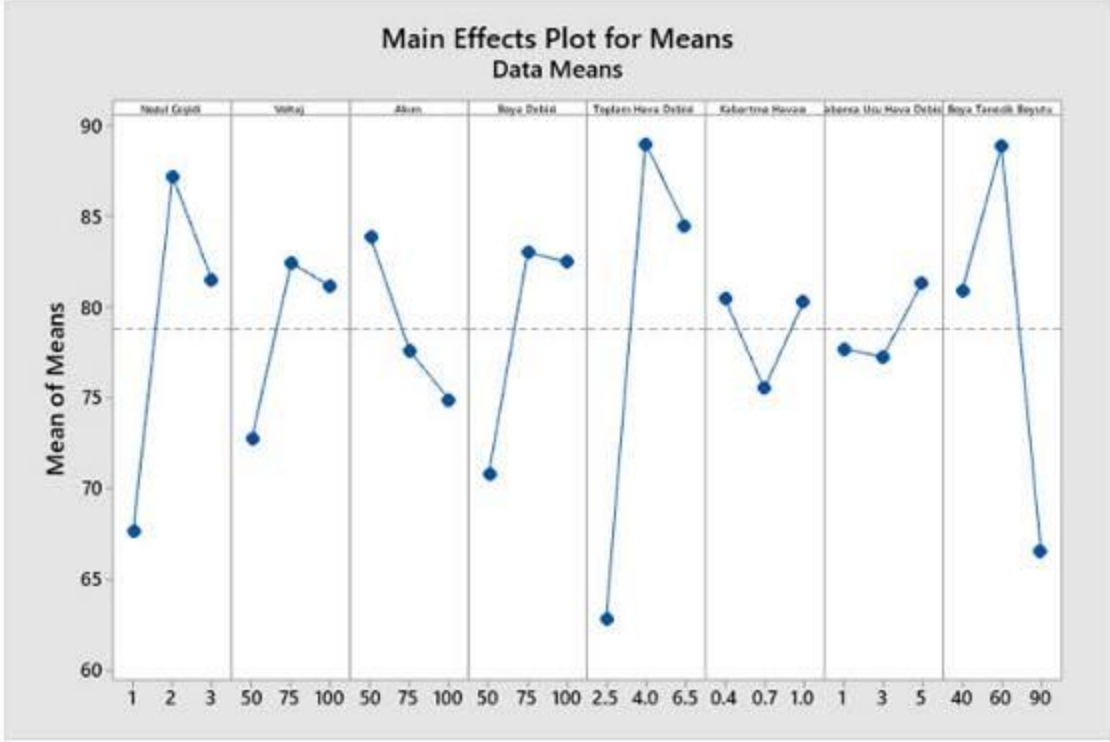
Elektrostatik Toz Boya	Minimum	Ortalama	Maksimum	Birimi	
Girdi Parametreleri	Değer	Değer	Değer		
(Sürekli Değişkenler)					
Voltaj	50	75	100	kV	
Akım	50	75	100	µA	
Boya Debisi	50	75	100	%	
Toplam Hava Debisi	2,5	4	6,5	Nm ³ /saat	
Tabanca Ucu Hava Debisi	1	3	5	Nm ³ /saat	
Kabartma Hava Debisi	0,4	0,7	1	Nm ³ /saat	
Elektrostatik Toz Boya	Seviye	Seviye	Seviye	Birimi	
Girdi Parametreleri	Seviye	Seviye	Seviye		
(Kesikli Değişkenler)					
Boya Tanecik Boyutu	-	40	60	90	(µm)
Nozul Çeşidi	1	2	3	-	-

Tablo 4.5’ e göre düzenlenerek elde edilen girdi faktörleri ile yeni bir deney kombinasyonu oluşturulmuştur. Bu deney kombinasyonunun sonuçları Tablo 4.6’ da gösterilmiştir. Deney 2’ de 8 faktör için ve her bir faktörün 3 seviyesi için L27 Taguchi ortogonal dizisi kullanılmıştır.

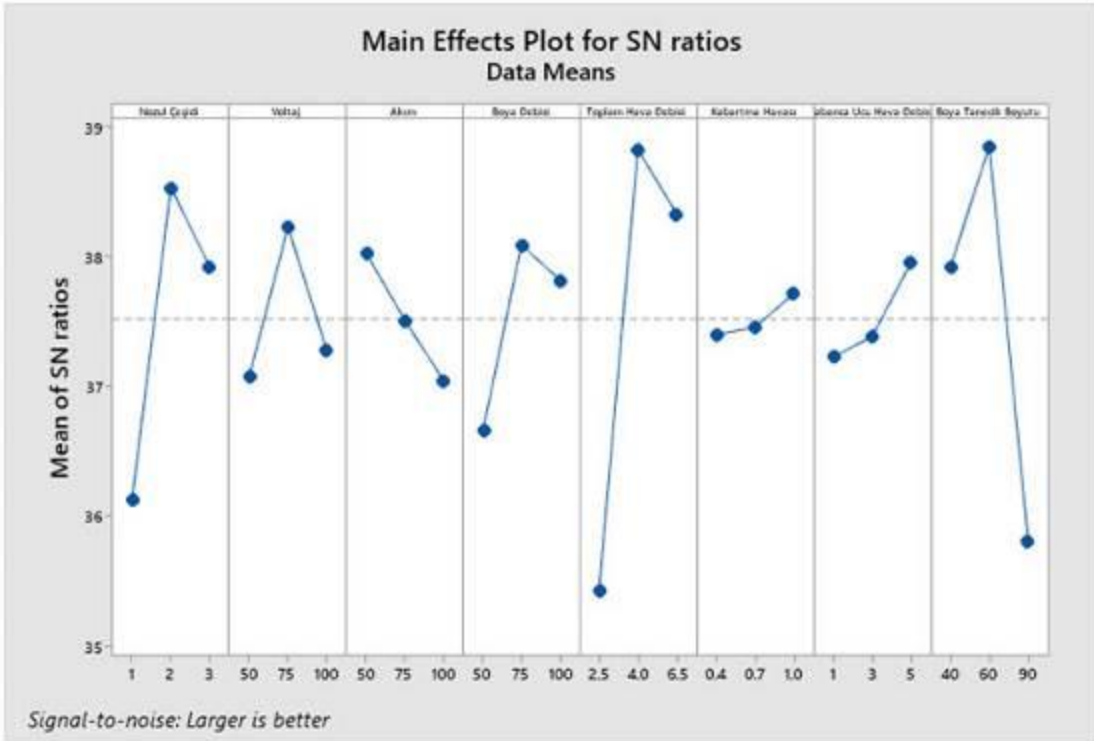
Tablo 4.6: Deney 2 için kuru film kalınlığı sonuçları.

Deney Sayısı	Nozul Çeşidi	Voltaj	Akım	Boya Debisi	Toplam Hava Debisi	Kabartma Havası	Tabanca Ucu Hava Debisi	Boya Tanecik Boyutu	Kuru Film Kalınlığı (µm)
1	1	50	50	50	2,5	0,4	1	40	51,8
2	1	50	50	50	4	0,7	3	60	70,4
3	1	50	50	50	6,5	1	5	90	54,2
4	1	75	75	75	2,5	0,4	1	60	78,2
5	1	75	75	75	4	0,7	3	90	62,6
6	1	75	75	75	6,5	1	5	40	82,2
7	1	100	100	100	2,5	0,4	1	90	27
8	1	100	100	100	4	0,7	3	40	86,4
9	1	100	100	100	6,5	1	5	60	96,2
10	2	50	75	100	2,5	0,7	5	40	67,6
11	2	50	75	100	4	1	1	60	97,2
12	2	50	75	100	6,5	0,4	3	90	86,2
13	2	75	100	50	2,5	0,7	5	60	89,4
14	2	75	100	50	4	1	1	90	81,4
15	2	75	100	50	6,5	0,4	3	40	66,2
16	2	100	50	75	2,5	0,7	5	90	54,6
17	2	100	50	75	4	1	1	40	115
18	2	100	50	75	6,5	0,4	3	60	127
19	3	50	100	75	2,5	1	3	40	66,6
20	3	50	100	75	4	0,4	5	60	74,4
21	3	50	100	75	6,5	0,7	1	90	86,4
22	3	75	50	100	2,5	1	3	60	90
23	3	75	50	100	4	0,4	5	90	106,6
24	3	75	50	100	6,5	0,7	1	40	85,2
25	3	100	75	50	2,5	1	3	90	40
26	3	100	75	50	4	0,4	5	40	107
27	3	100	75	50	6,5	0,7	1	60	77

Deney 2 sonuçlarına göre Minitab programı tarafından “maksimum en iyi” kriteri belirlenerek ortalama etki grafiği ve şiddet/gürültü grafiği sonuçları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Taguchi yöntemi ortalama etki değerleri.



Şekil 4.4: Taguchi yöntemi gürültü/şiddet değerleri.

Taguchi tasarımlarda “maksimum en iyi” ya da “minimum en iyi” problem tiplerine bağlı olmaksızın, gürültü/şiddet grafiğinde problemi en iyilemek için faktör seviyelerini belirlemede daima maksimum noktası alınır. Faktör seviyelerini belirlemede bir diğer çözüm ise ortalama etki grafiğine bakmaktır. Ortalama etki grafiklerinde eğer problem “maksimum en iyi” ise ortalama etki grafiğinde maksimum değer alınır. Eğer problem “minimum en iyi” şeklinde ise ortalama etki grafiğinde minimum değer alınır. Her iki problem tipinde de robust tasarımı elde etmek için gürültü/şiddet grafiğini kullanmak literatürde çok daha yaygındır.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’deki ortalama etki ve şiddet/gürültü grafiklerinden de görüleceği gibi nozul çeşidi parametresi için deneyde kullanılan 3 nozul çeşidinden 2 numaralı nozulun sonuçları maksimize etmek için daha uygun olduğu görülmektedir. 1 ve 3 numaralı nozul çeşitleri elenerek 2 numaralı nozul seçilerek bir sonraki deney tasarımına dahil edilmeyecektir.

Voltaj değerinin 50 kV değerinden düşük olması boya taneciklerinin yeterince yüklenememesine neden olduğu deneylerde görülmüştür. Boyanın yüklenememe problemi istenilen kuru film kalınlığına ulaşamaması demektir. Gürültü/şiddet grafiğinde 75 kV sonucu maksimize etmekte ortalama etki grafiğinde ise 75 kV ve 100 kV değerleri arasında sonuçlarda 50 kV değerine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Geçmiş tecrübeler ve deneyleri yapmanın getirmiş olduğu maliyet ve zaman kaybını en aza indirmek için bir sonraki optimizasyon aşamasında voltaj değerinin deney seviyeleri 75 kV ile 100 kV aralığı olarak belirlenmesine karar verilmiştir.

Akım, boya tabancasından geçen toz boya taneciklerinin elektriklenme derecesini göstermektedir. Akım değeri ne kadar fazla ise tabanca ucundan çıkan boya taneciklerinin elektriklenme derecesi de o kadar fazla olmaktadır. Gürültü/şiddet grafiğine baktığımızda akım değeri 50 μ A değerinde en iyi, 75 μ A ve 100 μ A değerinde ise istenilen sonuçtan uzaklaşmaktadır. Bu yüzden akım değerinin bir sonraki optimizasyon aşamasındaki deney seviyeleri 50 μ A değerini de arasında alacak şekilde 40 μ A ve 100 μ A aralığı belirlenmiştir.

Boya debisi parametresi için gürültü/şiddet grafiğine bakıldığında 75 ve 100 değerleri sonuçları maksimize etmek için uygundur. Bir sonraki optimizasyon aşamasında bu değerler alınacaktır.

Toplam hava debisi parametresi için sonucu maksimize eden değerin 4.0 olduğu görülmektedir. Boyanın taşınmasında en önemli rolü oynayan bu parametre için de 3,5 Nm³/saat ve 6 Nm³/saat değerleri gürültü/şiddet grafiğinde sonuçları maksimize etmesi açısından olumlu olduğu görülmüştür. Bir sonraki aşama olan optimizasyon aşamasındaki deneyler için bu değerler alınacaktır.

Kabartma havası boyanın akışkanlaştırılması noktasında önemli bir parametredir. Gürültü/şiddet grafiğine bakıldığında deneyde alınlığı farklı seviyelerde kuru film kalınlığı üzerinde anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bu parametre 1 Nm³/saat olarak belirlenmiş ve sabitlenmiştir.

Tabanca ucu hava debisi parametresinin asıl amacı boya tabanca ucundaki havanın temizlenmesi, durulanması amacıyla kullanılmaktadır. Parametrenin birincil görevi tabanca ucundaki iğneyi temizlemektir. Ortalama etki grafiği ve gürültü/şiddet grafiği sonuçlarına baktığımızda seçilen 3 seviye için de sonuçları maksimize etmek konusunda parametreler arasında ciddi bir fark gözlemlenmemiştir. Böyle bir durumda proses işletme maliyetleri için hangisi daha uygunsa o göz önüne alınır. 5 Nm³/saat değeri sonuçları maksimize etmek için 1 Nm³/saat' den daha uygun görülse bile işletme maliyetleri açısından tabanca ucu hava debisi parametresi 1 Nm³/saat olarak belirlenmiştir. Parametre bu aşamada sabitlenmiştir ve bir sonraki deneye alınmayacaktır.

Boya tanecik boyutu parametresine bakıldığında 40, 60 ve 90 µm büyüklüklerindeki tanecik boyutlarıyla çalışma yapılmıştır. Toz boya tanecik boyutunun kalınlık ve yüzey pürüzlülüğü açısından önemi büyüktür. Boya tanecikleri ne kadar büyük olursa parça yüzeyinde pürüzlülük ve portakallanma gibi kalite problemlerine de neden olacaktır. 40 µm boya taneciği ise yüzey için gayet uygun olmakla birlikte boya eleme işleminde işçilik maliyetleri oldukça yüksektir. Aynı zamanda boya taneciklerinin küçük olması korona yönteminde toz boya taneciklerinin elektriklenmesini zorlaştırmaktadır. Çünkü bir tanecik boyutu ne kadar büyükse elektriklenmesi de o kadar iyi olmaktadır (Gao, 2016). Bu gibi durumlar da göz önüne alınarak ve Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' de görüleceği gibi sonuçları maksimize etmesi açısından boya tanecik boyutu parametresi 60 µm toz boya tanecikleri sabit tutulacaktır ve bir sonraki deneylerde kullanılmayacaktır.

Tablo 4.7: Yanıt Yüzey Yöntemi ile devam edilecek girdi faktörleri ve seviyeleri.

Faktör	Kısaltma	Birimi	Minimum Değer	Maksimum Değer
Voltaj	x_1	kV	75	100
Akım	x_2	μ A	40	100
Boya Debisi	x_3	%	75	100
Toplam Hava Debisi	x_4	Nm ³ /saat	3,5	6

Bu aşamaya kadar yapılan çalışmalar toz boya prosesindeki kuru film kalınlığı üzerine etki eden parametreleri belirlemek ve belirlenen bu parametrelerin proses üzerindeki etkilerini öğrenmek üzerinedir. Bir sonraki aşamada proses üzerinde etkisi yüksek olduğu belirlenen bu parametreler ile bir matematiksel model oluşturulup optimizasyon çalışmaları yapılacaktır. Sabit olarak alınmayıp deneylere devam edilecek olan parametreler voltaj, akım, boya debisi ve toplam hava debisi parametreleridir. Bu parametreler Yanıt Yüzey Yöntemi'nden merkezi bileşik tasarım metodu kullanılarak optimizasyon çalışmasında kullanılacaktır.

Minitab programında 4 faktörlü Merkezi Bileşik Tasarım için deney tasarlandığında deney sayısı 31 olmaktadır. Bu deneylerin 7 tanesi merkez noktada tekrarlanan deneylerdir. Bu tez çalışmasında zaman ve maliyetin kısıtlarının getirmiş olduğu yükten dolayı deneyleri azaltmak için merkez noktada sadece 1 adet deney yapılmıştır. Böylece deney sayısı 25'e düşmüştür. Yapılan deneyler sonunda kalite problemlerinden dolayı 5 adet (10,15,17,20 ve 21) deney çalışmadan çıkarılmıştır. Çıkarılan deneylerin yerine şirketin daha önceden tecrübe etmiş olduğu 4 adet yeni deney eklenmiştir. Sonuçta toplam deney sayısı 24 adet olmuştur. Yapılan deneyler Tablo 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: Deney 3 için kuru film kalınlığı sonuçları (gözlenen ve beklenen değerler).

Deney No	Standart Deney No (Minitab)	Voltaj (x1)	Akım (x2)	Boya Debisi (x3)	Toplam Hava Debisi (x4)	Kuru Film Kalınlığı (Gözlenen) (Y)	Kuru Film Kalınlığı (Beklenen) (Ŷ)	Sapma (%)
1	1	75	40	75	3,5	83	80,6	2,92
2	2	100	40	75	3,5	72,2	73,4	1,59
3	3	75	100	75	3,5	53,2	57,4	7,38
4	4	100	100	75	3,5	56,2	54,3	3,56
5	5	75	40	100	3,5	60,6	63,1	4,03
6	6	100	40	100	3,5	52	53,2	2,23
7	7	75	100	100	3,5	57,8	57,6	0,33
8	8	100	100	100	3,5	50,6	51,8	2,23
9	9	75	40	75	6	80,6	80,2	0,44
10	11	75	100	75	6	74	72,6	1,94
11	12	100	100	75	6	84,6	82,8	2,22
12	13	75	40	100	6	70,4	71,7	1,77
13	14	100	40	100	6	77,8	75,0	3,67
14	16	100	100	100	6	88,2	89,2	1,09
15	18	100	70	87,5	4,75(4,8)	64,6	70,1	7,87
16	19	87,5(88)	40	87,5	4,75(4,8)	68,8	70,6	2,60
17	22	87,5(88)	70	100	4,75(4,8)	70	63,6	10,05
18	23	87,5(88)	70	87,5	3,5	73	67,1	8,83
19	24	87,5(88)	70	87,5	6	80,8	85,6	5,59
20	25	87,5(88)	70	87,5	4,75(4,8)	70,6	70,2	0,64
21	N/A	10	100	70	5,5	36,6	36,4	0,53
22	N/A	90	15	75	5,5	79,2	77,7	1,90
23	N/A	80	20	50	5	63,4	64,2	1,26
24	N/A	95	20	65	4,5	75	74,8	0,31

Voltaj parametresinde 100 kV ve 75 kV değerlerinin ortalaması olan 87,5 kV değeri, toz boya proses ekipmanında voltaj değerini küsuratlı olarak kabul etmemektedir. Bu yüzden yapılan deneylerde voltaj değeri 88 kV olarak alınmıştır. Aynı şekilde toplam hava debisi parametresinde boya proses ekipmanında virgülden sonra sadece bir basamağa kadar izin verildiği için 4,75 Nm³/saat değeri yerine 4,8 Nm³/saat değeri alınmıştır.

Tablo 4.8’ de ilk sütun firmada yapılan deney sayısını göstermektedir. İkinci sütun ise Yanıt Yüzey Yöntemi’ nin merkezi bileşik tasarım metodu için ortogonal dizi standart çalışma sırasını göstermektedir. Diğer sütunlar ise girdi ve çıktı faktörlerini göstermektedir. Y_i ve Ŷ

indisleri ise gözlenen kuru film kalınlığını ve beklenen kuru film kalınlığını göstermektedir. Sapma değeri ise beklenen sapma oranını ifade etmektedir ve Denklem 4.1' deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Sapma (\%)} = (100 |Y_i - Y'|) / \hat{Y} \quad (4.1)$$

4.4 Deney Sonuçlarının Analizi ve Optimizasyonu

Yapılan tez çalışmasında Akzo Nobel firmasının MN 2074 RAL 9005 LF kodlu toz boyası kullanılmıştır. Bu toz boyanın fiziksel, mekanik ve kimyasal testlerde istenilen maksimum performansa ulaşabilmesi için kuru film kalınlığının $75 \pm 10 \mu\text{m}$ olması ürünün Teknik Bilgi Formu 'nda belirtilmiştir (AkzoNobel, 2014). Çalışmada bu çıktı değeri referans olarak alınmış ve deneyler bu doğrultuda yapılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda gözlenen kuru film kalınlığı, beklenen kuru film kalınlığı ve sapma değerleri Tablo 4.8' de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre matematiksel modelleme ve optimizasyon yapılmıştır. Yanıt Yüzey Yöntemi' nden elde edilen matematiksel model denklemi ve optimizasyon sonuçları, denklem 4.2, Şekil 4.5 ve Sekil 4.6' da gösterilmiştir. Denklem 4.2' de \hat{Y} değeri çıktı parametresi olup beklenen kuru film kalınlık değerini göstermektedir.

$$\hat{Y} = 188,182556 - 0,729439(x_1) - 1,560356(x_2) + 2,879907(x_3) - 68,594973(x_4) - 0,000550(x_1)^2 - 0,001988(x_2)^2 - 0,024166(x_3)^2 + 3,954848(x_4)^2 + 0,002739(x_1)(x_2) - 0,004292(x_1)(x_3) + 0,213401(x_1)(x_4) + 0,011780(x_2)(x_3) + 0,103700(x_2)(x_4) + 0,142814(x_3)(x_4) \quad (4.2)$$

Denklem 4.2' de verilen çoklu regresyon denkleminin determinasyon katsayısı olarak bilinen R^2 değeri Minitab programı tarafından %94,87 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç göstermektedir ki modelde kullanılan faktörler çıktıdaki varyasyonun %94,87' sini açıklayabilmektedir. Geri kalan %5,13' lük kısım modelde yer almayan başka değişkenlerden kaynaklanmaktadır. R^2 değeri, faktörlerin yerleştirilmiş olduğu matematiksel model denkleminin işlevine ne kadar yakın olduğunun istatistiksel bir ölçüsüdür. %0- %100 arasında ölçülür. Kurulan modeller için her zaman %100' e yakın olması istenir. Çıkan sonuç 100' e

yakın bir sonuç olduğu için modele yeni bir parametre eklenmesi hem zaman hem de maliyet yönünden uygun görülmemiştir. Seçilen faktörlerin modelde yeterli olduğuna karar verilmiştir.

Tablo 4.9: ANOVA Tablosu

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	188,183	81,3505	2,313	0,046
voltaj	-0,729	0,8917	-0,818	0,434
akım	-1,560	0,5292	-2,948	0,016
Boya Debisi	2,880	1,0827	2,660	0,026
Hava Debisi	-68,595	18,3613	-3,736	0,005
voltaj*voltaj	-0,001	0,0029	-0,188	0,855
akım*akım	-0,002	0,0022	-0,904	0,389
Boya Debisi*Boya Debisi	-0,024	0,0061	-3,964	0,003
Hava Debisi*Hava Debisi	3,955	1,7498	2,260	0,050
voltaj*akım	0,003	0,0033	0,837	0,424
voltaj*Boya Debisi	-0,004	0,0078	-0,552	0,594
voltaj*Hava Debisi	0,213	0,0876	2,435	0,038
akım*Boya Debisi	0,012	0,0032	3,701	0,005
akım*Hava Debisi	0,104	0,0353	2,941	0,016
Boya Debisi*Hava Debisi	0,143	0,0855	1,671	0,129

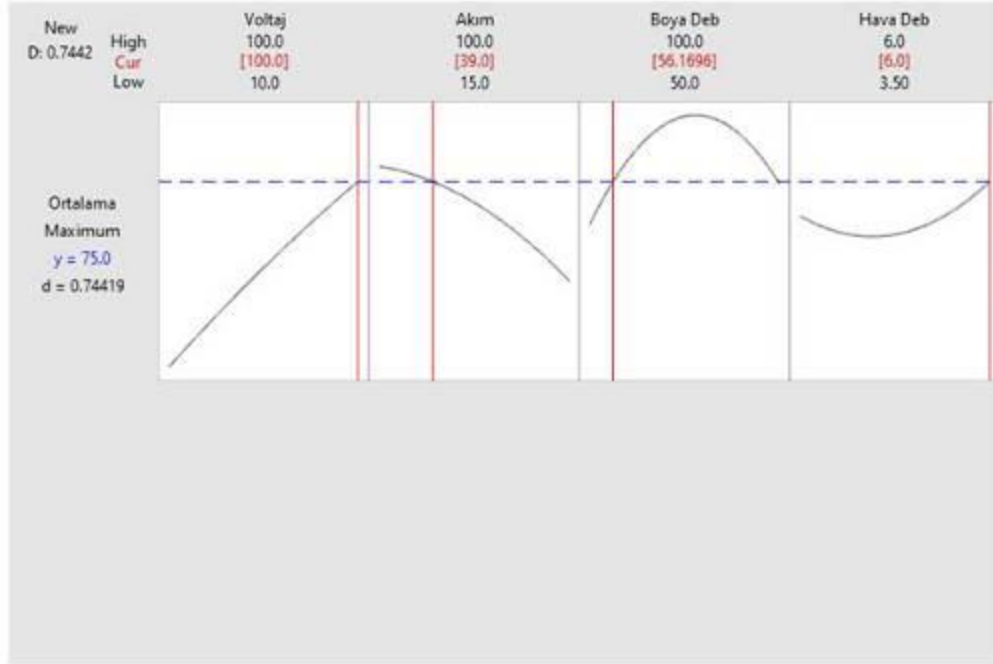
S = 4,58632 PRESS = 17120,7
R-Sq = 94,87% R-Sq(pred) = 0,00% R-Sq(adj) = 86,88%

Analysis of Variance for Ortalama

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	3497,46	3497,46	249,819	11,88	0,000
Linear	4	2050,81	639,18	159,795	7,60	0,006
voltaj	1	789,12	14,08	14,075	0,67	0,434
akım	1	179,73	182,86	182,859	8,69	0,016
Boya Debisi	1	32,57	148,83	148,829	7,08	0,026
Hava Debisi	1	1049,38	293,57	293,567	13,96	0,005
Square	4	640,51	508,15	127,039	6,04	0,012
voltaj*voltaj	1	317,58	0,74	0,745	0,04	0,855
akım*akım	1	73,38	17,20	17,204	0,82	0,389
Boya Debisi*Boya Debisi	1	185,74	330,48	330,476	15,71	0,003
Hava Debisi*Hava Debisi	1	63,81	107,45	107,453	5,11	0,050
Interaction	6	806,15	806,15	134,358	6,39	0,007
voltaj*akım	1	31,88	14,73	14,728	0,70	0,424
voltaj*Boya Debisi	1	1,08	6,41	6,414	0,30	0,594
voltaj*Hava Debisi	1	308,19	124,77	124,766	5,93	0,038
akım*Boya Debisi	1	264,21	288,17	288,171	13,70	0,005
akım*Hava Debisi	1	142,05	181,88	181,883	8,65	0,016
Boya Debisi*Hava Debisi	1	58,74	58,74	58,740	2,79	0,129
Residual Error	9	189,31	189,31	21,034		
Total	23	3686,77				

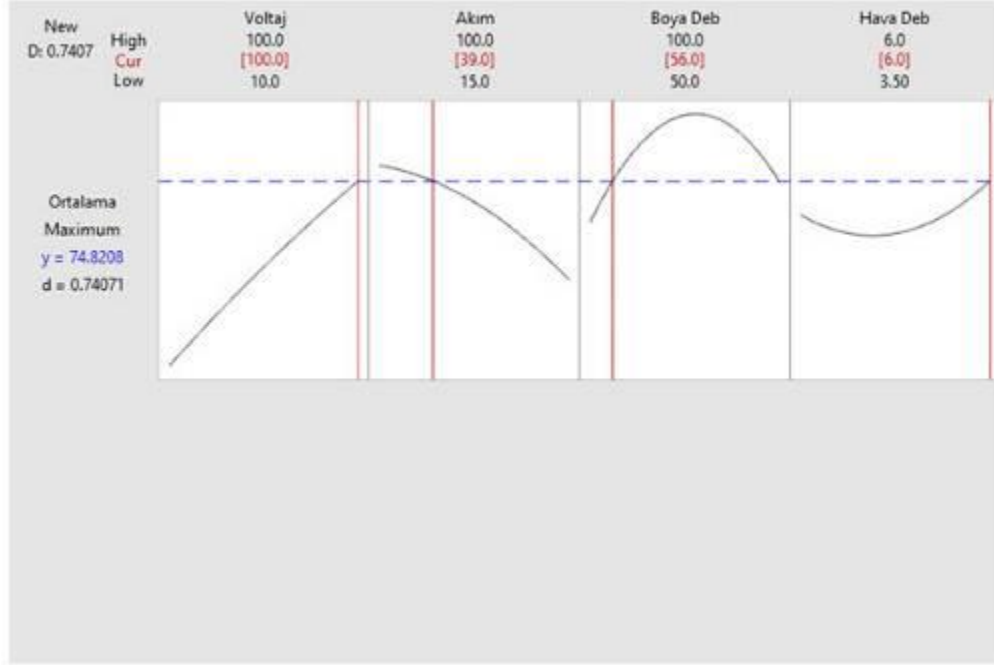
Minitab programından hesaplanan varyans analizi Tablo 4.9’ daki ANOVA tablosu sonuçlarına göre p değeri (0.000), %95 güven aralığı olarak seçilen α değerinden (0.05) daha küçüktür. Bu sonuca göre de modelin anlamlı olduğuna karar verilmiştir. Modelin anlamlı olduğunu ve R^2 değerinin de istenilen değerlerde olduğu görüldükten sonra parametreler için optimizasyon aşamasına geçilmiştir.

Optimizasyon sonuçları Şekil 4.5’te verilmiştir. Buna göre çalışmada hedeflenen 75 μm değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.5: Yanıt Yüzey Yöntemi ile elde edilen optimizasyon kombinasyonu.

Optimizasyon sonucunda hesaplanan faktör seviyeleri Minitab programından kısırlı olarak elde edilmiştir ancak bu seviyeler seri üretim koşullarına uygun değildir. Sonuçlar “Minitab-Response Optimizer” modülü ile çizilmiş olan bu grafiklere faktör seviyelerinin manuel olarak yeniden girilmesi ile seri üretim koşullarına göre tekrar düzenlenmiştir.



Şekil 4.6: Seri üretim koşullarına uyarlanmış hali.

Seri üretim koşullarına uygun girilen faktör seviyeleri için kuru film kalınlığı 74,8208 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 75 μm hedef değerine oldukça yakın olup kabul edilebilir bir değerdir.

4.5 Doğrulama Deneyleri ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Yapılan deney sonuçlarına göre kullanılan boya için ürünün Teknik Bilgi Formu' nda belirtilen $75 \pm 10 \mu\text{m}$ kuru film kalınlığına ulaşıldığı görülmüştür. Yapılan 3 deney sonucunda toplam 27 adet kuru film kalınlığı ölçümü alınmıştır. Alınan 27 adet ölçüm sonucunda ortalama kuru film kalınlığı 74,78 μm olmuştur. Çıkan bu sonuç Şekil 4.6' da verilen seri üretimde kullanılabilir olan optimizasyon deney kombinasyonundaki 74,8208 değerine çok yakın olduğu görülmüştür. Deney tasarımı yöntemi ile kurulan matematiksel modelin, seri üretim koşullarında elektrostatik toz boya prosesine uygulanabileceği görülmüştür.

Tablo 4.10: Doğrulama deneyleri.

Deney Çeşidi	Voltaj	Akım	Boya Debisi	Toplam Hava Debisi	Ölçüm1	Ölçüm2	Ölçüm3	Ölçüm4	Ölçüm5	Ölçüm6	Ölçüm7	Ölçüm8	Ölçüm9	Ortalama Kuru Film Kalınlığı
1	100	39	56	6	78	79	75	75	72	72	70	71	72	73.8
2	100	39	56	6	78	79	82	77	78	79	76	77	80	78.4
3	100	39	56	6	70	75	75	70	72	70	76	71	70	72.1

Son durumda Taguchi yöntemi ve Yanıt Yüzey Yöntemi ile elde edilen 74,78 μm kuru film kalınlığı için optimum faktör seviyeleri Tablo 4.11’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.11: 75 μm kuru film kalınlığı için optimum faktör seviyeleri.

Parametre Çeşidi	Değer	Birimi
Nozul Çeşidi	2	-
Voltaj	100	kV
Akım	39	μA
Boya Debisi	56	%
Toplam Hava Debisi	6	Nm^3/saat
Kabarta Hava Debisi	1	Nm^3/saat
Tabanca Ucu Hava Debisi	1	Nm^3/saat
Boya Tanecik Boyutu	60	μm

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Çalışma Özeti

Bu tez çalışmasında öncelikle beyin fırtınası, balık kılıçığı ve neden-neden analizi gibi problem çözme tekniklerinden faydalanarak problem tanımı ve kök neden analizi yapılmıştır. Kök neden analizi sonucunda ortaya çıkan kök nedenin metot, insan, malzeme ve tasarım gibi hangi ana etkenden meydana geldiği belirlenmiştir. Belirlenen kök neden sonucunda, kök nedenin hızlı kaizen, standart kaizen ve majör kaizen gibi problem çözme tekniklerinden daha karmaşık bir problem olduğu anlaşılmıştır. Bunun sonucunda da bahsedilen tekniklerden bir üst seviyede olan deney tasarımı ile çözülmesinin daha uygun olacağı belirlenmiştir.

Toz boya prosesinde boya atımı, voltaj, akım, toplam hava debisi, iğne ucu hava debisi, kabartma havası ve toz boya tanecik boyutu parametreleri kullanılmaktadır. Daha önce yapılan boya optimizasyon çalışmaları incelendiğinde yukarıda bahsedilen faktörlerin bazılarının farklı çalışmalarda kullanıldığı fakat hepsinin aynı anda girdi faktörü olarak kullanıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Toz boya prosesindeki tüm parametreler deney dahil edilmiş ve deney tasarımı yöntemlerinden Taguchi yöntemi ve Yanıt Yüzey Yöntemi metodundan yararlanılarak çıktı değişkeni olarak alınan kuru film kalınlığı deney tasarımı yöntemleri kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Taguchi yöntemi ile deneyde kullanılan nitel faktörlerin seviyeleri sabitlenmiş, nicel faktörlerin ise en iyi kombinasyonları Minitab programı tarafından oluşturulan sinyal/gürültü ve ortalama etki grafiklerine bakılarak alınmıştır. Daha sonrasında ise Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak matematiksel model oluşturulmuş ve 75µ kuru film kalınlığına ulaşmak için optimizasyon yapılmıştır. Yapılan optimizasyon sonucunda bulunan faktör seviyeleri ile doğrulama deneyleri de yapılarak teorik olarak elde edilen sonucun sanayide seri üretimde de uygulanabildiği görülmüştür.

5.2 Elde Edilen Sonuçlar

Çalışmada kullanılan malzemeler, boyutları 200 mm* 200 mm olan düz sac parçalardır. Bu malzemelerin düz parça olarak seçilmesinin nedeni deneyler yapılırken parça yüzeyinde kuru film kalınlığının farklı noktalardan alınan ölçümlerin arasında bir fark oluşmamasından

dolayıdır. Farklı bir geometride malzeme kullanıldığında örneğin iç bükey, dış bükey gibi bu parçaların köşe bölgelerinde daha fazla elektrik alan oluştuğu için elektrostatik toz boya prosesinin doğasından kaynaklanan bir durumdan dolayı orta alanlardan daha fazla kuru film kalınlığı oluşturmaktadır. Bu yüzden elde edilen sonuçlar düz sac parçalarda kuru film kalınlığı optimizasyonu için geçerli olacaktır. Eğer yapılacak çalışmada malzeme iç bükey ya da dış bükey olarak seçilecekse bu parçanın bükey kısımlarının boyanırken belirlenmiş olan girdi parametrelerinin düz parçadan farklı olacaktır. Bu durum da boyanacak parça için optimizasyon çalışması yapılmak istenirse yeni deneylerin yapılması gerekecektir.

Manuel toz boya prosesi kendi bünyesinde birçok kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen faktör barındırmaktadır. Deney tasarımı sayesinde bu kontrol edilebilen faktörleri kontrol edilemeyen faktörler karşısında duyarsız kalmasını sağlayacak parametreleri bulmamıza yardımcı olacak Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Manuel toz boya prosesi girdi parametreleri olarak nozul çeşidi, voltaj, akım, boya debisi, toplam hava debisi, tabanca ucu hava debisi, kabartma havası ve boya tanecik boyutu belirlenmiştir. Çıktı parametresi olarak da kuru film kalınlığı seçilmiştir. Minitab programında Taguchi yöntemi oluşturulmuş parametrelerin minimum ve maksimum değerleri girilmiştir. Deney güven aralığı %5 olacak şekilde programa girilmiştir. Bu parametrelerin prosesin çıktısı olan kuru film kalınlığı üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Prosese etkisinin az olduğunu gördüğümüz veya etkisi işletmeye daha maliyetli olacak olan fakat proses çıktısı üzerinde etkisi değişmeyen daha maliyetli parametre yerine daha düşük maliyetli parametre seçilmiştir. İlk seçilen 8 faktör elenerek bir sonraki optimizasyon aşamasına 4 faktör ile devam edilmiştir. Bu aşamada Yanıt Yüzey Yöntemi'nden yüzey merkezli Yanıt Yüzey Yöntemi kullanılarak prosesin modellenmesi, analizi ve optimizasyonu yapılmıştır.

Deneyler sonucunda oluşturulan optimizasyon tablolarında boya üreticisi tarafından üretilen ve deneyde kullanılan boyanın istenilen kuru film kalınlığı olan 75µm değeri için optimum faktör seviyeleri belirlenmiştir. Doğrulama deneyleri sonucunda alınan 27 ölçümün ortalaması olan 74,78 µm kalınlığı bulunmuştur. Bulunan kuru film kalınlığının istenilen kuru film kalınlığına çok yakın olmasından dolayı teoride kurulan matematiksel model ile pratikte uygulanan toz boya prosesinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Manuel elektrostatik toz boya prosesinde uygun parametre seçimleri ve uygun boyama yöntemi ile istenilen kuru film kalınlığına ulaşılabileceği görülmüştür. Yapılan çalışmalarda firmanın 20 yılı aşkın toz boya prosesi tecrübelerinden de yararlanılmıştır. Bu çalışma yapılmadan önce düz plakalarda kullanılan boya atımı %50, voltaj 80 kV, akım 20 μ A, toplam hava debisi 5 Nm³/h, tabanca ucu hava debisi 1 Nm³/h ve kabartma havası 1 Nm³/h kullanılıyordu. Boya tanecik boyutu faktörü ise spesifik bir aralıkta tutulmuyordu. Bu parametreler ile yapılan toz boya prosesinde hedef mikron değeri olan 75 μ kuru film kalınlığı olabildiği gibi hedeften az ya da fazla kuru film kalınlıkları da olabiliyordu. Yeniden boyama maliyetini şansa bırakmamak adına bu parametreler üzerinde çalışma yapılarak istenilen boya kalınlığına bir seferde ulaşılmak amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sonrasında düz plaka re-work maliyetlerinde azalmalar buna bağlı olarak da kalitede iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Bu çalışma ile arzu edilmeyen kuru film kalınlığından kaynaklanan yeniden boyama (rework) işçilik maliyetleri ve yeniden boyamak için tüketilen boya ve sarf malzeme maliyetlerinin önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda firmanın sahip olduğu zaman, işçilik ve malzeme gibi kaynakların en verimli bir şekilde kullanılması hedeflenmiştir.

5.3 Sonraki Çalışma için Öneriler

Yapılan tez çalışmasında sabit olarak alınan iki parametre vardır. Bunlar; boyama uzaklığı ve boyama hızıdır. Bu parametreler yapılan tüm tez boyunca sabit kabul edilmiştir. Deney sonucunda çıkan sonuçlar, sabit olarak alınan bu parametre değerlerine göre bulunmuş sonuçlardır ve seçilen bu parametrelerden herhangi bir parametrenin değiştirilmesi durumunda sonucu maksimize eden girdi parametreleri de değişecektir.

Tezin yapıldığı firmada manuel toz boya prosesi haricinde bir de robotik toz boya prosesi bulunmaktadır. Robotik toz boya prosesinde kabinlerin iskeletleri boyanmaktadır. Robotlarla toz boyama işleminde toz boya prosesindeki parametre bilgisi haricinde bir de robot yörünge yazma bilgisi gerekmektedir. Eğer firma robotik toz boyama prosesinde de boya kalınlık optimizasyonu yapmak isterse manuel toz boya optimizasyon çalışmalarındaki tecrübelerinden yararlanarak robotlarda da optimizasyon yapabilecektir

6. KAYNAKLAR

- Ahmad, R. and Ajer, M. R. (2015). Investigation of Epoxy Powder Coated Galvanized Steel Substrate Through Electrostatic Powder Coating System, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)*, 2622-2638.
- Ajer, M. R. B. (2012). Studies of Epoxy Powder Coated Galvanized Steel Substrate via Electrostatic Powder Coating System, MSc. Thesis, *Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Faculty of Mechanical and Manufacturing Engineering*, Johor.
- AkzoNobel. (2014). Product Data Sheet: AkzoNobel Powder Coatings Interpon 810 – MN2074 RAL 9005 LF.
- Akzo Nobel. (2017). Akzo Nobel Toz Boya: Particle Size Distribution.
- Amembal, A. S. (2009). Use of Taguchi Screening Techniques for Gloss Optimization of Appliance Powder Coatings, *Asian PPG Ind. Ltd.*, Mumbai, 57-74.
- Antony, J. (2003). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Elsevier Science & Technology Books, ISBN: 0750647094.
- Antony, J., Perry, D. Wang, C. and Kumar, M. (2006). An Application of Taguchi Method of Experimental Design for New Product Design and Development Process, *Emerald Group Publishing Limited, Assembly Automation*, 26/1, 18-24.
- Aytekin, A. G. Ç. (2010). *Kalite geliştirme süreçlerinde eniyileme problemlerine deney tasarımı yönteminin uygulanması*, (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 265960).
- Baş, C. (2010). *Cevap yüzeyi yaklaşımı ve sinir ağları yaklaşımı*, (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (Tez No. 284998).
- Bhalamurugan, R. and Prabhu, S. (2015). Performance Characteristic Analysis of Automated Robot Spray Painting Using Taguchi Method and Gray Relational Analysis, *Arab J. Sci. Eng.*, 1657-1667.

- Bharathi, D. and Baskaran, R. (2014). Improvement of Painting Process in Steel Structure Using Taguchi's Method of Experimental Design, *International Journal of Mechanical and Industrial Technology*, 2(1), 1-9.
- Biris, A. S., Mazumder, M. K., Yurteri C. U., Sims R. A., Snodgrass, J. and De, S. (2001) Gloss and Texture Control of Powder Coated Films. Particulate Science and Technology, *Particulate Science and Technology*, 19: 199-217.
- Bisgard, S. (1990). Quality Engineering and Taguchi Methods: A Perspective, *Center of Quality an Productivity Improvement*, Report No:40.
- Castillo, E. D. (2007) *Process Optimization*, Springer Science + Business Media, Second Edition, Pennsylvania.
- Chidhambara, K. V., Lathashankar, B. and Vijaykumar. (2018). Optimization of Robotic Spray Painting Process Parameters Using Taguchi Method, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 310 (1), 012108.
- Durgun, İ. (2015). Otomotiv İmalatında Renk Optimizasyonu, 15. Üretim Araştırmaları Sempozyumu, *Ege Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi*, İzmir.
- Ferah, M. (2003). Çok Yanıtlı Taguchi Deneysel Tasarım Metodu ve Alüminyum Sanayinde Bir Uygulama, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sakarya.
- Gangal, A. C. (2013) Taguchi Method for Improving Powder Coating Process – A Case Study, *BEST: International Journal of Management, Information Technology and Engineering (BEST: ILMITE)*, 1(3), 167-180.
- Gao, S. (2016). *Study on Developments of Processes for Powder Coatings*, *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, (Ph. D. thesis). Electronic Thesis and Dissertation Repository.
- Gema Switzerland GmbH. (2010). El Tabancası OptiSelect GM03.
http://www.gemapowdercoating.com/fileadmin/documents/User_Manuals/English/Guns/Manual_Guns_for_Enamel/OptiSelect-GM03. Erişim Tarihi: 01.03.2020

Gema Switzerland GmbH. (2010). Tabanca Kumandası OptiStar CG13.

https://www.gemapowdercoating.com/fileadmin/documents/User_Manuals/English/Equipment_and_Controls/Gun_Controls/OptiStar-CG13. Erişim Tarihi: 01.03.2020

Gema Switzerland GmbH. (2015). Gun Nozzles for Every Application.

http://www.commercial-industrial-finishing-equipment.com/brochures/Gema-Gun_Nozzles.pdf. Erişim Tarihi 01.03.2020

Giesbrecht, F. G. and Gumpertz, M. L. (2004). Planning, Construction and Statistical Analysis of Comparative Experiments, *A John Wiley & Sons, Inc, Publication*, New Jersey.

Goldschmidt, A. and Streitberger, H. (2007). *Basic of Coating Technology*. BASF Coatings AG., Second Revised Edition, Hannover.

Guskov, S. (2017). *Electrostatic Phenomena in Powder Coating*, Powder System Group, Nordson Corporation, PWR-17-1164.

ITW Gema GmbH. (2006). Manuel Coating Equipment, Gallen.

Jakobsson, K. and Jensen, O. (2017). *Optimisation of a Robotic Painting Process by Implementing Design of Experiments*, (MSc Thesis), Blekinge Institute of Technology (BTH), Department of Mechanical Engineering, Karlskrona.

Jassbi, J., Alborzi, M. and Ghoreishi, F. (2011). Car Paint Thickness Control Using Artificial Neural Network and Regression Method, *J. Ind. Eng. Int.* 7(14), 1-6.

Jozsef, B. and Blaga, P. (2017). Optimizing Production Cost with the Correct Setting of the Paint Thickness Parameters, *Procedia Engineering* 181, 1021-1027.

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

Kağmıçoğlu, C. H. (1998). *Üretim Öncesi Kalite Kontrolünde Taguchi Yöntemi ve Kükürtdioksit Giderici Sitrata Yöntemine Uygulanması*, (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No. 73415)

- Karaoğlan, A. D. and elik, N. (2016). A New Painting for Vessel Radiators of Transformer: Wet-on-Wet, *Journal of Applied Statistics*, 43(2), 370-386.
- Karidkar, S. and Mali, R. (2017). Optimization of Powder Spray Process Parameters Using Taguchi Methodology, *Advances in Intelligent Systems Research*, 71-76.
- Karna, S. K. (2012). An Overview on Taguchi Metod, *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*. 11-18.
- Laungpaiboon, P. (2010). Improving an Electrostatic Powder Coating Process via Signal to Noise Response Surface, *American Journal of Applied Sciences*, 7(11), 1521-1527.
- Liu, M., Jin, Z., Ma, G., Zhu, L., Kang, J., Wang, H. and Zhang, W. (2019). Process Optimization and Coating Properties of Aluminum Coating Prepared by Supersonic Plasma Powder Feeding Based on Response Surface, *Journal of Physics Conf. Series* 1176, 052021.
- Luangkularb, S., Prombanpong, S. and Tangwarodomnukun V. (2014). Material Consumption and Dry Film Thickness in Spray Coating Process, *The 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 789-794.
- Mason, R. L., Gunst, R. F. and Hess, J. L. (2003). *Statistical Design and Analysis of Experiments*. A John Wiley & Sons, Inc, Publication, Second Edition, New Jersey.
- Montgomery, D. C. (2008). *Design and Analysis of Experiments*, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Mountain, J. R. and Mazumder, M. K. (2007). Transfer Efficiency Enhancement of Power Coating Application Using Response Surface Methodology, *Particulate Science and Technology: An International Journal*, 14:3, 255-266.
- Myers, R. H. (2007). *Response Surface Methodology in Quality Improvement*, *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 20:2, 457-476.
- Parmak, A. İ. (1986). Elektrostatik Toz Boya Kaplamanın Avantajları, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Kayseri.

- Pignatiello, J. J. (2007). An Overview of the Strategy and Tactics of Taguchi, *IIE Transactions*, 20:3, 247-254.
- Singhtaun, C. and Prasarthong N. (2012). The Application of an Experimental Design for the Defect Reduction of Electrodeposition Painting on Stainless Steel Washers, *International Science of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 6(10), 2070-2074.
- Şanyılmaz, M. (2006). *Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile Bir Uygulama*, (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi. (Tez No.182197)
- Şirvancı, M. (1997). *Kalite İçin Deney Tasarımı "Taguchi Yaklaşımı*, Literatür Yayınları, Savaş Ciltevi.
- Tesui, K. (2007). An Overview of Taguchi Method and Newly Developed Statistical Methods for Robust Design, *IIE Transactions*, 24:5, 44-57.
- Wang, F. (2004). *Electrostatic Spray Coating with Fine Coating Powders*, (Dr. Thesis), The University of Western Ontario, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Ontario.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı :Erdi ÖZDEN
Doğum tarihi ve yeri :10.05.1989 / Balıkesir
e-posta :erdiozden10@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2020
Lisans	Kocaeli Üniversitesi/Kimya Mühendisliği	2013
Lise	Muharrem Hasbi Lisesi	2006