

Uygulamalı Bir Laboratuvar Çalışması Üzerinden Yates ve Taguchi Deneş Tasarımlarının  
Karşılaştırılması

Reyhan Merve Topçu

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2018

Comparison of Yates and Taguchi Experimental Design over a Applied Laboratory Study

Reyhan Merve Topçu

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Industrial Engineering

December 2018

Uygulamalı Bir Laboratuvar Çalışması Üzerinden Yates Ve Taguchi Denev Tasarımlarının  
Karşılaştırılması

Reyhan Merve Topçu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliğı Uyarınca  
Endüstri Mühendisliğı Anabilim Dalı  
Endüstri Mühendisliğı Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Meryem Uluskan

Aralık 2018

## ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Reyhan Merve Topçu'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Uygulamalı Bir Laboratuvar Çalışması Üzerinden Yates ve Taguchi Deney Tasarımlarının Karşılaştırılması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Meryem Uluskan

**İkinci Danışman** : Prof. Dr. Metin Uçurum

### **Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Meryem Uluskan

**Üye** : Prof. Dr. Nimetullah Burnak

**Üye** : Prof. Dr. Nihal Erginel

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Meryem Uluskan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Uygulamalı Bir Laboratuvar Çalışması Üzerinden Yates ve Taguchi Deney Tasarımlarının Karşılaştırılması” başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.  
10/12/2018.

Reyhan Merve Topçu

İmza

## ÖZET

Süreçlerin girdi faktörlerinde değişiklikler yapılarak çıktıya olan etkilerinin araştırıldığı yöntem deney tasarımı olarak tanımlanmaktadır. Yates ve Taguchi deney tasarımları da bu kapsamda geliştirilmiş yöntemlerdir.

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında Yates ve Taguchi deney tasarımları laboratuvar ortamında yürütülen deneyler vasıtası ile uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma deneylerinde; deney malzemeleri, deney faktörleri ve seviyeleri, deneylerin yapılma şartları ve deney ortamı ve deney sonuçlarının alındığı makine ve teçhizatlarla herhangi bir değişiklik yapılmadan bir set Yates deney tasarımı bir sette Taguchi deney tasarımı için adsorpsiyon deneyleri yapılmıştır.

Yates deney tasarımında girdi faktörleri iki seviyeli olarak çalışılmış, optimizasyon deneylerinde orta seviyelerden yararlanılarak deneyler yapılmıştır. Taguchi deney tasarımında ise bütün faktörler üç seviyeli olarak çalışılmış, doğrulama deneyleri yapılmıştır.

Her iki deney tasarımı ile faktörlerin sayısal değerleri açısından birbirleriyle örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Fakat Yates deney tasarımının optimizasyon yapmaya elverişli ve belirlenen faktör değerlerinden farklı değerlerde de çalışılmasına imkan sağlayan bir tasarım olması nedeniyle, Taguchi deney tasarımından daha iyi sonuçlar elde etme imkanının olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Deney Tasarımı, Taguchi Deney Tasarımı, Yates Deney Tasarımı, Adsorpsiyon Yöntemi.

## SUMMARY

Experimental design is defined as the method by which changes in input factors of processes are investigated. Yates and Taguchi experimental designs are also developed within this scope.

Within the scope of the master thesis, Yates and Taguchi experimental designs were compared by using the adsorption experiments carried out in laboratory. In these comparison experiments; Adsorption experiments for the design of the Taguchi experiment were carried out in a set of experimental parameters and levels, experimental materials, a set of Yates experiment design without any changes in the conditions of the experiment materials and the machinery and equipment taken from the experimental environment and the results of the experiment.

In the Yates experimental design, input parameters were studied in two levels, and in the optimization experiments, experiments were made by using intermediate levels. In Taguchi experiment design, all parameters were studied in three levels and validation tests were performed.

Both experimental design results in overlapping results in terms of numerical values of the parameters. However, it is seen that it is possible to achieve better results from the Taguchi experiment design as Yates experimental design is a design that allows for optimization and different values from the determined parameter values.

**Keywords:** Experimental Design, Taguchi Experiment Design, Yates Experiment Design, Adsorption Method.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübeleri ile aşmam konusunda yardımcı olan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Meryem ULUSKAN'a ve ikinci danışmanım Prof. Dr. Metin UÇURUM'a teşekkürlerimi sunarım.

Deney sonuçlarının alınması hususunda bilgi ve yardımlarına başvurduğum Bayburt Üniversitesi Gıda Mühendisliği Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Hüseyin SERENCAM ve Gümüşhane Üniversitesi Gıda Mühendisliği Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Ali GÜNDOĞDU hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin ve hayatımın her döneminde destekleri ve sevgileri ile yalnız olmadığımı hissettiren başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>1.GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	2
<b>3.MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	6
3.1.Deney Tasarımı.....	6
3.1.1.Deney tasarımı için genel kavramlar.....	6
3.1.2.Deney tasarımının tarihçesi.....	8
3.1.3.Deney tasarımı ilkeleri.....	9
3.1.4.Deney tasarımı uygulama adımları.....	10
3.1.5.Deney tasarımı türleri.....	12
3.1.5.1. <u>Klasik(geleneksel) deney tasarımı</u> .....	13
3.1.5.2. <u>Çok faktörlü deney tasarımı(faktörlerin birer birer değiştirilmesi)</u> .....	13
3.1.5.3. <u>Tam faktöriyel deney tasarımı</u> .....	13
3.1.5.4. <u>Kısmi faktöriyel deney tasarımı</u> .....	14
3.1.5.5. <u>2<sup>k</sup> Faktöriyel deney tasarımı</u> .....	15
3.2.Yates Deney Tasarımı.....	15
3.3.Taguchi Deney Tasarımı.....	23
3.3.1.Deney tasarımının toplam kalite yönetimindeki yeri.....	23
3.3.2.Taguchi'nin kalite ve deney tasarımı'na bakış açısı.....	24
3.3.3.Sistem tasarımı.....	28
3.3.4.Parametre tasarımı.....	28
3.3.5.Tolerans tasarımı.....	29
3.3.6.Kayıp fonksiyonu.....	29
3.3.7.Sinyal/Gürültü oranı.....	31

**İÇİNDEKİLER(devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.3.8.Ortogonal dizinler.....	33
3.3.9.Varyans analizi(VARAN).....	34
3.3.10.Doğrulamadeneylei.....	36
3.4. Adsorbsiyon Yöntemi.....	36
3.4.1.Ağır metaller ve kurşun hakkında genel bilgiler.....	38
<b>4.BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>40</b>
4.1.Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	40
4.2.Deney Tasarımlarının Oluşturulması.....	47
4.3.Yates Deney Tasarımı Çalışmaları.....	49
4.4.Taguchi Deney Tasarımı Çalışmaları.....	56
<b>5.SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>61</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>64</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1. Bir Sürecin Genel Şeması.....	7
3.2. Deney Tasarımının Uygulama Alanları.....	10
3.3. Kim Daha İyi Nişancı?.....	24
3.4. Taguchi'nin Kayıp Fonksiyonu.....	30
4.1. Taban Külünün XRD Analizi.....	41
4.2. Taban Külünün FTIR Analizi.....	41
4.3. Taban Külünün SEM Analizi.....	42
4.4. Taban Külünün EDS Analizi.....	43
4.5. Kurşun Stok Çözeltisi.....	44
4.6. Seyreltilmiş Kurşun Çözeltisi.....	45
4.7. a. Deneylerde Kullanılan pHmetre.....	45
4.7.b.Deneylerde Kullanılan Manyetik Karıştırıcı.....	45
4.8.a. Katı Sıvı Ayırma İşlemi.....	46
4.8.b. Katı sıvı Ayırımı Sonucu Elde Edilen Yüklü Çözeltiler.....	46
4.9. Plazma Atomik Emisyon Spektrometresi.....	46
4.10. Deney Sonuçları ve Hesaplanan Değerler Arasındaki İlişki Grafiği.....	50
4.11. Faktörlerin Etki Grafiği.....	52
4.12. Faktör Seviyelerinin Grafikselsel Gösterimi.....	57

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1. Yates Deney Düzenlemesinin Sistemik Olarak Düzenlenmesi.....	17
3.2. $2^4$ İçin Yates Düzeni.....	18
3.3. Yates Notasyonu.....	19
3.4. $2^3$ İçin Yates Çizelgesi.....	19
3.5. Optimizasyon Faktörlerinin Belirlenmesi.....	22
3.6. Çevrim Dışı Kalite Kontrol.....	25
3.7. Çevrim İçi Kalite Kontrol.....	26
3.8. Taguchi Felsefesinin Sistematiği.....	27
3.9. 3 Seviyeli 4 Faktör İçin Ortogonal Dizin Gösterimi.....	34
4.1. Yates Deney Seviyeleri.....	47
4.2. $2^4$ Yates Deney Deseni.....	48
4.3. Taguchi Deney Faktör ve Seviyeleri.....	48
4.4. L18 ( $3^4$ ) Ortogonal Deney Deseni.....	49
4.5. Yates Deney Tasarımına Göre Yapılan Adsorbsiyon Deney Sonuçları.....	50
4.6. Yates Deney Tasarımı Sonuç Grafiği.....	53
4.7. Optimizasyon Deney Şartları İçin Hesaplamalar.....	54
4.8. Optimizasyon Deneyleri Çalışma Şartları.....	55
4.9. Optimizasyon Deney Sonuçları.....	55
4.10. Adsorbsiyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri.....	56
4.11. Faktörlerin S/N (dB) Etkinlik Değeri.....	57
4.12. Taguchi Deney Tasarımı VARAN Analizi.....	58
4.13. Doğrulama Deney Sonuçları.....	60
5.1. Optimum Yates ve Taguchi Faktör Değerleri ve Nihai Sonuçlar.....	61

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Endüstrinin her alanında devam eden ve sürekli olarak gelişimini sürdüren yenilikler kalitenin gerekliliğini her geçen gün daha da önemli hale getirmektedir. Kaliteyi geliştirmenin yanı sıra sürece etki eden her türlü girdi maliyetlerini en aza indirmekte üreticilerin, araştırmacıların ve bilim insanlarının öncelikli amaçları arasındadır (Şanyılmaz, 2006; Sağlam, 2016).

Geçmişte faydalanılan geleneksel kalite kontrol faaliyetlerinde kalite sorunlarına üretim sonrasında çözümler üretilirken, günümüz teknolojik ve bilimsel gelişmeleri ışığında ürün üretim sürecine girmeden önce üzerinde denemeler yapılarak kalite sorunlarına çözümler aranmaktadır. Bununla birlikte, girdi faktörleri üzerinde yapılan analizler sonucunda ürün çıktıları hakkında üretim gerçekleşmeden önce yorumlar ve değerlendirmeler yapılabilmektedir (Aytekin, 2010).

Bu çalışma kapsamında deney tasarımından, tarihçesinden, deney tasarımı türlerinden ve genel çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Materyal ve metod bölümünde literatürde kısmî deney tasarımı olarak tanımlanan Taguchi ve Yates deney tasarımları laboratuvar ortamında yapılan adsorbsiyon deneyleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Laboratuvar ortamında yapılan deneyler aynı deneysel adımlar takip edilerek yapılmış olsa da, elde edilen deney sonuçlarına tasarımlar farklı adımlar kullanılarak uygulanmıştır. Farklı tür deney tasarımlarının karşılaştırmalı olarak çalışılması benzerliklerini ve farklılıklarını ortaya koymanın yanı sıra yapılan analizlerin ve elde edilen sonuçların doğruluğunu göstermek açısından da önem arz edecektir.

Bulgular ve tartışma bölümünde deney sonuçları ve tasarımların sonucunda elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde verilmiş ve tartışılmıştır. Son bölümde ise, çalışmanın genel sonuçları verilerek, gelecek çalışmalara ışık tutması açısından önemli noktalarına değinilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür kapsamında farklı alanlarda çok sayıda çalışma deney tasarımı türlerinden yararlanılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı türünden yararlanan birkaç çalışmadan bahsedilecek olursa,

Hasan Oğuzhan ÇAKAL' ın 2010 yılında yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, sac kesim prosesinde yaşanan tolerans dışı kesim problemi ele alınmış olup, faktör tasarımı yapıldıktan sonra deney tasarımı yaklaşımı probleme uygulanmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre optimum tezgah faktörleri belirlenerek, kesim ölçüsüne etki eden faktörlerin etkileri ve etkileşimleri gösterilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda da, 4 faktörün yüksek ve düşük seviyeleri arasında kalınlık\*hız ve kalınlık\*akım etkileşimlerinin önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Elma posası ile karbonun birleştirilmesi sonucu elde edilen adsorban madde yardımıyla atık sulardan Cu(II) ve Co(II) ağır metallerinin gideriminin çalışıldığı bir makalede, tam faktöriyel deney tasarımı metodu kullanılmıştır. Yapılan deney sonucu ve analizlere göre pH=5, adsorban dozu=0,4gr/50ml, ilk metal konsantrasyonu 10mg/mL ve 20mg/mL, sıcaklık 40°C ve 20°C, etkileşim süresi 60 dk. ve 120 dk. olarak elde edilmiştir. Makalede 2 farklı ağır metal için de pH önemli faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Cu(II)'nin gideriminde adsorbanın dozu ve ilk metal konsantrasyonu ana etkileşimi ve pH ve ilk metal konsantrasyonu etkileşim etkisi de aynı zamanda önemli bulunmuştur (Özbay vd., 2018).

Bir diğer çalışmada amaç, Eskişehir (Kırka) Bor türevleri tesisinin atık sularında bulunan borun adsorbsiyon yöntemiyle uzaklaştırılması incelenmiş ve bu problem üzerine tam faktöriyel deney tasarımı metodu uygulanmıştır. 6 ayrı adsorban madde kullanılmış, bunlardan 3 tanesi adsorbsiyon da daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Ayrıca tam faktöriyel deney tasarımı kapsamında, adsorban türü, pH ve sıcaklık faktörlerinin adsorbsiyonu etkilediği ve daha iyi sonuçlar elde edilmiş olan 3 adsorban maddesi, pH=10 ve 20°C sıcaklıkta maksimum ağır metal giderimi yapılabildiği sonucuna varılmıştır (Bayar, 2001).

Bir diğerk yüksek lisans tez çalışması kapsamında, kemik yapısının inorganik yapıda olması, insan vücuduna yerleştirilen implantın çevresindeki kemik ile bütünleşmesini ve güçlü bir bağ oluşturmasını hızlandırması sebebiyle saf titanyum altlık malzeme üzerine hidroksiapatit ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) ve  $\text{TiO}_2$  tozları kullanılarak plazma spre y kaplama işlemi yapılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı tekniğı kullanılarak bağlanma katmanı, hidroksiapatite ilave edilen  $\text{TiO}_2$  %'si ve spre y mesafesi faktörleri üç seviyeli olarak seçilmiş ve kaplamalar plazma spre yleme teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde, sonuç faktör olan mukavemet üzerinde en etkin faktörün  $\text{TiO}_2$  %'si, sonrasında spre y mesafesinin olduğu bulunmuştur (Zümrüt, 2009).

Tam faktöriyel deney tasarımı metodu kullanılarak tekstil ürünlerinin en önemli kalite karakteristiklerinden olan renk hasarlarından yıkmaya ve sürtmeye karşı renk haslığı üzerine art işlemlerinin etkisi yapılan bir yüksek lisans tez çalışmasında incelenmiştir. Tasarım açısından uygun olarak belirlenen 4 faktör düşük ve yüksek seviyelerde çalışılmış ve analizler sonucunda belirlenmiş 4 faktörün ilgilenen haslıklar üzerinden önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır (Demir, 2004).

Tam faktöriyel deney tasarımının yanı sıra kısmi faktöriyel deney tasarımı çalışmaları da oldukça sıklıkla kullanılmıştır.

Farklı bir makalede, katalizör olarak potasyum hidroksit kullanılarak domuz yağından biodisel üretiminde faktöriyel deney tasarımı kullanılmış,  $3^2$  tane deney şartı oluşturulmuştur. Karıştırma hızı ve katalizör konsantrasyonu faktörleri çalışılmış, metil ester konsantrasyonunu tahmin etmek ve deneysel aralığı yaklaşık olarak tanımlamak için regresyon analizi kurulmuştur. Sonuç olarak ise, katalizör konsantrasyonu, 0,9 wt.% potasyum hidroksit ve 600 rpm çalkalama hızı olarak bulunmuştur (Berrios vd., 2009).

Kısmî faktöriyel deney tasarımı uyku apnesinin uyku bozukluğu üzerine etkisini incelemek amacıyla yapılan bir makale kapsamında uygulanmıştır. Katılımcılar üç tedavi kombinasyonundan birini almak için randomize edilmiştir. Elde edilen bu tedaviler bireylerin alacağı tek bir tedavi kolu olan kontrol durumu ile karşılaştırılmıştır. Sonucunda, bireylerin iki farklı kombine tedavi dizisine rasgele dağılımının eş zamanlı tedaviye göre sıralı uygulamanın faydaları ortaya koyulmuştur (Crawford vd., 2016).

Kısmi faktöriyel deney tasarımı kapsamında değerlendirilen Taguchi deney tasarımından pek çok çalışmada yararlanılmıştır. Örnekleri ise şu şekildedir,

Taguchi deneysel tasarım metodu ayrıntılı bir şekilde incelenerek, Yarış Kabin A. Ş.' de uygulaması bir doktora tezi kapsamında yapılmıştır. Üretimde karşılaşılan problem 3 mm kalınlığında ERDEMİR 3237 tipi sıcak haddelenmiş alaşımsız yapı çeliği kullanılarak yapılan köşe kaynakta yaşanan nüfuziyet sorunu olarak belirlenmiştir. Bu sorunun giderilmesinin yanında, hem nüfuziyet değerlerinin belirlenen aralık ve hedef değer ya da hedef değer yakınlarında sağlanması hem de nüfuziyetin görüntüsünün en iyilenmesi amaçlanmıştır. Belirlenen sorunların çözümü için Taguchi deney tasarımı ortogonal dizinden yararlanılarak beş faktör kontrol faktörü ve bu faktörlerin 3 seviyesi çalışılmış, deneyler sonucunda, Akım(Amper) 220, Kaynak hızı(mm/sn) 0,4, Tel kalınlığı (mm) 0,8, Zigzag boyu (mm) 3, Gaz karışımı %93 Ar, % 2 O<sub>2</sub>, % 5 CO<sub>2</sub> en iyi kombinasyon olarak belirlenmiştir (Aytekin, 2010).

Kereste ve parke üretiminde etkili olan faktörlerin neler olduğu yüksek lisans tez çalışmasında araştırılmış ve bu faktörlerin besleme hızı, bıçak sayısı, kesme derinliği ve bıçakların kesme açısı olduğu belirlenmiştir. Bu faktörlerin Ra değerleri üzerine olan etkileri Taguchi deney tasarım metoduyla test edilmiştir. Çalışmada, ayrıca üretim sırasında kontrolü çok zor olarak ifade edilen ahşabın işlenme yönü gürültü faktörü olarak alınmış ve üretim faktörleri hem radyal hem de teğet yön için optimize edilmiştir. Deney sonuçlarına göre belirlenen bütün faktörlerin Ra değerleri üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ve Besleme hızı 15 m/s, bıçak sayısı 4, kesme derinliği 0,5, bıçakların kesme açısı 46° en uygun kombinasyon olarak belirlenmiştir (Güler 2013).

Bir başka çalışmada, Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak alüminyum ekstrüzyon prosesinin faktörleri olan ekstrüzyon hızı 3 seviyeli, biyet sıcaklığı 2, ekstrüzyon oranı 2 ve kalıp kılavuz mesafesinin 2, kalıp ömründe belirleyici olan profil sıcaklığı, zımba kuvveti ve kalıp yüzey basıncı üzerindeki etki dereceleri ve birbirleri ile etkileşimleri çalışılmıştır. Kalıp ömrünü artırmaya ve enerji sarfiyatını azaltmaya yönelik en küçük – en iyi analizleri yapılmıştır. Kalıp ömrünü etkileyen her üç karakteristiği en çok etkileyen faktör kılavuz mesafesi olarak belirlenmiştir (Öztop, 2007).



Kaleporselen Elektroteknik Sanayi A.Ş' nde üretilen NH bıçaklı sigorta buşonlarında meydana gelen çatlama problemi başka bir yüksek lisans tez kapsamında belirlenmiş olup, ortogonal dizinler kullanılarak Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre buşon gövdesinin basınca karşı mukavemetini en yüksek yapan faktör seviyelerini %4 hammadde nem oranı, 5 saniye şekillendirme süresi 12 saat kurutma süresi ve 1310°C pişirme sıcaklığı olarak bulunmuştur. Bu sonuçları tam Faktöriyel deney tasarımı yöntemiyle karşılaştırmış, daha az sayıda deneyle sonucu ulaşan Taguchi deney tasarımının daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır (Şanyılmaz, 2006).

Bir işletmenin ürün tasarımı sırasında  $2^k$  çarpımsal ve Taguchi deney tasarımı metotlarının karşılaştırılması makale konusu olarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, sistem performansı maksimum iken %99 güven düzeyinde ele alınan faktörlerin hepsinin birinci seviyesinde maliyetin minimum olduğu gözlemlenmiş ayrıca sistem üzerinden yapılması planlanan değişikliklerin performans kısıtı altında mevcut sistem maliyetini düşürmediği ve kullanılan sistemin maliyetinin daha uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Gever vd., 2014) .

Bir diğer kısmi faktöriyel deney tasarımı yöntemi olan Yates deney tasarımı genellikle makale çalışmalarında kullanılmıştır.

$2^n$  faktöriyel deney tasarımında Yates düzenleme yönteminin uygulandığı makalede sarsıntılı masa ile sarsıntılı masa hız, genlik ve eğimin etkileri incelenmiş ve deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda en iyi sonuç  $-0.2 +0.1$  aralığında yapılan deneyde, %51.24 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tenörlü konsantre, %74.30 verimle elde edilmiştir (Öztürk, 2017).

Feldspat numunesinde demir içeriğinin azaltılması için oksalit liçi optimum koşullarının araştırıldığı bir makalede ise, liç deneyleri Yates tekniğine göre yapılmış bu deneyler sonucunda elde edilen etkili faktörler göz önünde bulundurularak optimizasyon deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, feldspattaki demirin %72,59'u giderilmiş ve liç sonrası elde edilen konsantrenin Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği %0,032 olarak bulunmuştur (Arslan ve Bayat, 2008).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Deney Tasarımı

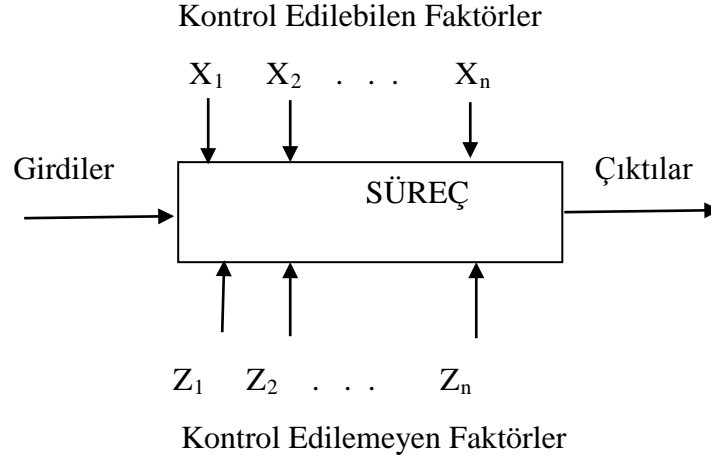
##### 3.1.1. Deney tasarımı için genel kavramlar

Belirli bir konu çerçevesinde ele alınan soruların cevaplarını arama süreci deney olarak tanımlanmıştır (Kasap, 2006). Bununla birlikte deney, kontrol altındaki çeşitli durumların, girdi faktörlerinin bilinmeyen yapısal özellikleri üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla yapılan bir dizi denemelerdir (Şenoğlu ve Acıtaş, 2010). Deney tasarımı ise deneye ait, belirli bir sürecin çıktıları iyileştirmek için girdi faktörlerinde daha önce kararlaştırılan değişiklikleri yaparak, çıktı üzerindeki sapmaları gözleme ve analiz etme sürecidir (Demir, 2004).

Deney tasarımı sürecinde sıklıkla kullanılan faktör, süreç üzerinde etkisi olabilecek bağımsız faktörler olarak adlandırılmaktadır. Seviye, faktör olarak tanımlanan bağımsız faktörlerin aldığı değerleri tanımlamaktadır. Çıktı, sürecin sonucunda elde edilen ve başlangıçta belirlenen girdi faktörlerine bağlı olarak değer almaktadır. Son olarak, süreç üzerinde etkili olan fakat kontrol edilemeyen faktörler “gürültü faktörleri” olarak tanımlanmaktadır (Sağol, 2015).

Seviyeler kullanım miktarı, pH derecesi gibi nicel faktörler olabileceği gibi cinsiyet gibi nitel faktörler de olabilir. Bu durumda seviye sayısı, nicel faktörlerin olduğu deneylerde tasarımcının kontrolü altındayken nitel faktörlerin olduğu deneylerde kontrolü dışındadır (Şenoğlu ve Acıtaş., 2010).

Montgomery'nin 2001 yılında yayınlanan kitabında bir sürecin genel şeması Şekil 3.1.' deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bir Sürecin Genel Şeması

Tasarımcı tarafından oluşturulan deney tasarımına bağlı kalınarak yapılan deneylerde aşağıdaki amaçlar gerçekleştirilmeye çalışılır;

1. Girdi faktörleri arasında hangilerinin etkin olduğuna karar verilmesi,
2. Etkin olarak belirlenen faktörlerin hangisinin ne seviyede daha etkin olduğunun anlaşılması,
3. Kontrol edilebilen faktörlerdeki değişkenliği azaltarak, kontrol edilemeyen faktörlerin sürece etkisinin minimuma düşürülmesi,
4. Sürecin işleyişi hakkında daha fazla bilgi edinilmesi

Doğru bir deney tasarım süreci sonucunda güvenilir veriler toplamak mümkündür. Elde edilen bu verilerle daha kesin sonuçlar elde etmek amacıyla aşağıdaki sorulara cevap aramak ise tasarımcının sürecini kolaylaştıracaktır;

1. Çıktılar ve girdi faktörlerinin etkileri hesaplanabiliyor mu?
2. Çıktıyı kaç faktör etkilemektedir?
3. Eş zamanlı olarak kaç tane faktör için hesaplamalar yapılmalıdır?
4. Deney tekrarına gerek var mıdır? Varsa kaç tekrar yapılmalıdır?
5. Hangi veri analizi (VARAN, Regresyon) yöntemi kullanılmalıdır?
6. Etkiler üzerindeki hangi seviye farklılıkları ne kadar önemlidir? (Lazic, 2004)

### 3.1.2. Deney tasarımının tarihçesi

Deney ve deney tasarımı kavramları günümüzde kullanılan biçimlerine ulaşana kadar birçok değişim ve gelişime uğramıştır.

Deney tasarımı 1920'lerde istatistikçi A. Ronald Fisher tarafından tarım alanında farklı gübre çeşitleri ve dozları ile çevre şartlarının ve sulama seviyelerinin tarım ürünleri üzerindeki etkilerini araştırırken bulunmuş ve geliştirilmiştir (Şirvancı, 1997).

Ayrıca, Fisher deney verilerinin etkilerin istatistiksel açıdan inceleyen “varyans analizi” (VARAN) yöntemini de geliştirmiştir. Varyans analizi deney tasarımında ele alınan faktörlerin ortalama performansları arasındaki değişkenliği açıklamak için kullanılan bir metottur. Bu metotlardan biri olan F testi Fisher tarafından geliştirildiği için isminin baş harfi ile literatüre kazandırılmıştır (Baynal vd., 2012).

Deney tasarımı ilerleyen yıllarda ilaç ve kimya endüstrisinde uygulama alanları bulurken, imalat sektöründeki uygulamaları 1970'li yıllara kadar sınırlı kalmıştır (Şirvancı, 1997).

W. Edwards Deming'in Japonya' da kalite üzerine verdiği konferansların ardından bu yöntemler Japon araştırmacılar tarafından uygulanmaya başlanmıştır. Kaliteli ürün geliştirmek ve bunu yaparken de maliyeti olabildiğince düşürmek için deney tasarımı yöntemleri geliştirilmiştir. Fisher'ın buluşlarından sonra Prof. Genichi Taguchi de kendi yaklaşımlarını ortaya koymuştur (Taguchi, 1991).

Japonya' da 1960'lardan beri kalite açısından deney tasarımı kullanılmaktaydı. Bu tekniğin Amerika'da kullanılmaya başlanması 1980'lerde Taguchi'nin Amerika'da seminerler vermesiyle başlamıştır. Taguchi deney tasarımına kuramsal yenilikler getirmemiş fakat üretimdeki uygulamalarda yenilikler yapmış ve uygulamalardaki başarısı sayesinde imalat sektöründe de benimsenmesini sağlamıştır (Aytekin, 2014).

### 3.1.3. Deney tasarımı ilkeleri

Deneilerin, planlanma aşamasında bilimsel yaklaşımlara dayandırılması daha etkili bir şekilde uygulanmalarını sağlamaktadır. Deneiler sonucunda elde edilen verilerin anlamlı sonuçlar ortaya koyabilmesi için deney tasarımlarının istatistik bilimine dayandırılması tasarımcıya büyük kolaylıklar sunmaktadır.

Eğer ele alınan problemin deneysel hatalara yatkın veri seti içerdiği düşünülüyorsa, istatistiksel yöntemler verilerin analizi ve yorumlanması sürecinde nesnel bir yaklaşım olacaktır. Bu nedenle, ele alınan problem ışığında seçilen deney tasarımı ve verinin istatistiksel analizi arasında çok önemli bir bağ vardır. Deney tasarımı ilkeleri İngiliz istatistikçi Ronald A. Fisher tarafından üç ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar, “Tekrarlama”, “Rassallık”, “Bloklaama” dır (Aytekin, 2010).

Tekrarlama, belirlenen deney şartları altında birden fazla deneyin yapılmasıdır. Tekrarlama yapmanın tasarımcıya sağladığı yararlar şu şekildedir;

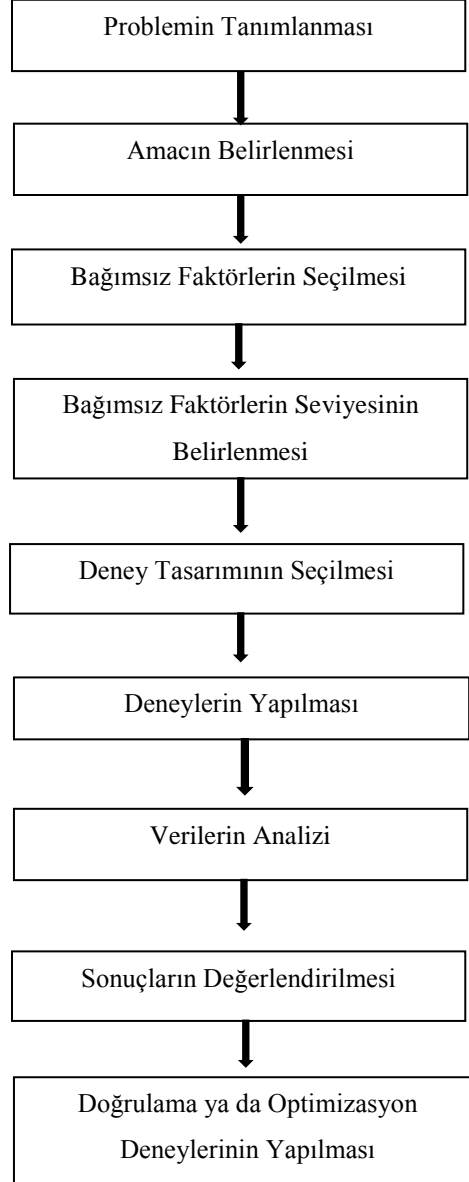
1. Kontrol edilemeyen faktörlerin çıktı üzerindeki etkisini görmeyi sağlar,
2. Örnek ortalaması faktörün etkisini tahmin etmekte kullanılıyorsa tekrarlama deneyi yaparak tam ve doğru bir şekilde sonuca ulaşılır,
3. Tekrarlanan deney sayısı arttıkça istatistiksel analizin hassasiyeti artmaktadır (Sağol, 2015).

Rassallık, deney tasarımı yöntemi ile şartları belirlenmiş deneilerin rastgele bir şekilde yapılmasına denir. Deneileri belirlenmiş olan tasarım sıralamasına göre yapmak yerine rastgele bir biçimde yaparak, çıktı üzerindeki etkisi olan fakat kontrol edilemeyen faktör etkisini azaltmak amaçlanmaktadır. Bu sayede, veriler birbirinden bağımsız olarak değerlendirilebilirler (Sağol, 2015).

Bloklaama, yapılan deneilerin hassasiyetini arttırmak için girdi faktörleri arasındaki farklılıkları göz önünde bulundurarak kendi içinde homojen kendi aralarında heterojen olacak şekilde blok adı verilen gruplara ayrılır. Bu işleme, bloklaama denilmektedir. Amaç ise, deneysel hatanın azaltılmasıdır (Şenoğlu ve Acıtaş, 2010).

### 3.1.4. Deneý tasarımı uygulama adımları

Deneý tasarımı uygulamasında takip edilmesi gereken adımlar Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir. Şekilde sıralanmış adımlar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3. 2. Deneý Tasarımı Uygulama Adımları

#### **Problemin Tanımlanması**

Süreç içerisinde birden fazla etken bir problemin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Burada ilk ve en önemli konu, süreci temelden etkileyen sebebi doğru bir

şekilde tanımlayabilmektir. Asıl problemi tanımlarken balık kılçığı, pareto analizi, kontrol çizelgesi vb. gibi kalite araçları kullanılabilir (Şanyılmaz, 2006).

### **Amacın Belirlenmesi**

Deneyin yapılma amacı problemin tanımlanması aşamasında belirlenebileceği gibi ayrı bir adım olarak da ele alınabilir. Bu adımda, belirlenmiş olan problemin ortaya çıkmasından ötürü etkilenen başka birimler varsa bu birimlerle de bilgi alışverişi yapılarak problemin çözülmesinin hangi birimlere ne şekilde fayda sağlayacağını görmek amaçlanmaktadır (Karagöz,2014).

### **Bağımsız Faktörlerin (Faktörlerin) Seçilmesi**

Deney tasarımına konu olan problem ve problemin amacı belirlendikten sonra sürecin çıktılarını doğrudan etkileyen faktörlerin seçilmesi gerekir. Faktörlerin belirlenmesinde tasarımcı daha önce bu problemin çözümünde kullanılan faktörleri kullanabileceği gibi, kendi araştırma ve gözlem verilerine dayanarak da seçimlerini yapabilir (Şanyılmaz, 2006).

### **Bağımsız Faktörlerin (Faktörlerin) Seviyelerinin Belirlenmesi**

Seçilmiş olan faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi de aynı şekilde tasarımcının deneyimleri ile belirlenebilir. Faktörlerin seviyeleri niceliksel seviyeler (50, 100, 150) olabileceği gibi niteliksel seviyeler (kadın, erkek) gibi de olabilmektedir. Belirlenecek olan seviye sayısı, deney için gerekli olan deneme sayısını belirlerken aynı zamanda tasarımda farklı etkilerin oluşmasına sebep olmaktadır (Karagöz, 2014).

### **Deney Tasarımının Belirlenmesi**

İlk adımlarda belirlenmiş olan problem ve amaçlar doğrultusunda, problem hacmi, faktörler ve faktör seviyelerinin özelliklerine göre en uygun deney tasarımı yöntemi belirlenir (Demir, 2004).

### **DeneYlerin Yapılması**

Belirlenen deney tasarımının gerektirdiği şekilde verilerin toplanma aşamasıdır.

### **Verilerin Analizi**

DeneYlerin yapılmasıyla elde edilen verilerin analizinde istatistiksel yöntemleri kullanmak tasarımcının yorum yapmasını kolaylaştırır. Ayrıca bu yöntemler, çıktılarını belirli bir güven aralığında yorumlanıp yorumlanamayacağı konusunda tasarımcıya ışık tutar (Çömlekçi, 2003).

### **Sonuçların Değerlendirilmesi**

Veriler analiz edildikten sonra deney sonuçları değerlendirilir, değerlendirme aşamasında sıklıkla grafiksel yöntemlerden faydalanılmaktadır (Şimşek, 2014).

### **Doğrulama ya da Optimizasyon DeneYlerinin Yapılması**

Deney sonuçları doğrultusunda Taguchi deney tasarımı için doğrulama, Yates deney tasarımı için optimizasyon deneYleri yapılarak yorumlanır ve istatistiksel olarak sonuçların analizi yapılır.

#### **3.1.5. Deney tasarımı türleri**

Deney tasarımı, ürün ya da süreç için zaman, bütçe, işgücü kısıtları altında en uygun faktör ve bu faktörlerin en uygun seviyelerinin belirlenmesi ve sonuçlarının istatistiksel olarak yorumlanmasıdır. Bu kısıtlar altında ve istatistik bilgileri ışığında birçok deney tasarımı yöntemi geliştirilmiştir.



### **3.1.5.1. Klasik (geleneksel) tasarım**

Bu ilk sayılabilecek deney tasarımı stratejisi herhangi bir faktör için belirlenen seviyeler veya aralıkların değiştirilmek suretiyle, çıktı üzerine etkisini görebilmek adına diğer tüm faktörlerin değerlerinin sabit tutulmasıyla gerçekleştirilmektedir.

Uzun yıllardır kullanılan bu yöntem faktör sayılarının arttığı mühendislik çalışmalarında tasarımcıya istediği sonuçları vermek açısından sınırlı kalmaktadır. Ayrıca bu yöntem belirli bir sistematik dâhilinde uygulanamadığı için tasarımcının deneyim ve sezgilerine bağlı kalmaktadır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

### **3.1.5.2. Çok faktörlü deney tasarımı (faktörlerin birer birer değiştirilmesi)**

Deney için belirlenmiş olan faktör sayısının arttığı çalışmalar için geliştirilen bir tasarımdır. Bu yöntemde, deney için belirlenen 1. Faktörün – diğer faktörlerin seviyeleri sabit tutularak- her iki düzeyinin denenmesi şeklinde uygulanır. 1. Faktörün hangi düzeyi çıktı üzerinde daha etkili ise, 1. Faktör o seviyede sabit tutulur ve diğer faktörlerin denemeleri yapılır. Tüm faktörler tamamlanıncaya kadar devam edilir. Bu yolla faktör sayısının bir fazlası kadar deney yapılması yeterlidir. Fakat faktörlerin birbirleri ile etkileşimlerini gözlemlemek mümkün olmamaktadır (Kumaş, 2011).

### **3.1.5.3. Tam faktöriyel deney tasarımı**

Deney için belirlenmiş olan faktörler ve seviyelerinin birden fazla olduğu çalışmalar için kullanılan bir deney tasarım türüdür (Efendioğlu,2013). Faktöriyel tasarım, deneydeki her bir faktörün tüm seviyelerinin, diğer faktörlerin her bir seviyesini içeren, mümkün olan bütün kombinasyonlarının yapılması ile oluşur (Şanyılmaz, 2006).

Bu tür deney tasarımları için gerekli deney sayısı;

a: faktör seviye sayısı,

k: faktör sayısı olmak üzere,

$a^k$  tanedir.

Örnek olarak, 3 seviyeli 4 faktörlü bir deney çalışması için yapılması gereken deney sayısı  $3^4 = 81$  tane olacaktır.

Faktöriyel deney tasarımların en önemli avantajı, tüm faktörlerin performans karakteristiği üzerindeki etkisi ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini en kolay ölçülebilen deney tasarımı yöntemi olmasıdır. Bu avantajının yanı sıra faktöriyel deney tasarımları deneyde mümkün olan bütün kombinasyonları denediği için diğer tasarım türlerine göre zaman ve maliyet açısından dezavantajlara sahip olan bir yöntemdir (Şanyılmaz, 2006).

#### **3.1.5.4. Kısmi faktöriyel deney tasarımı**

Ürün çıktı performansı üzerinde etkili olan faktör sayısının beşten fazla olduğu çalışmalar için kullanılmaktadır. Girdi faktörlerinin sayısı arttıkça tam faktöriyel deney tasarımı çalışmalarının maliyetleri de artmaktadır. Böylelikle deney tasarımının yapılması açısından etkinliğini kaybetmektedir. Bunların sonucunda da faktörlerin çıktı üzerindeki etkinliğinin belirlenmesi amacıyla deney sayısının azaltıldığı bu deney tasarımı stratejisi kullanılmaktadır (Efendioğlu, 2013).

Kısmi faktöriyel deney tasarımında deney sayısını azaltmak için faktörler arasındaki etkileşimlerin sayısında bir azaltma yapılabilir. Çıktı üzerinde etkinliğinin az olacağı öngörülen ve serbestlik derecesi yüksek olan etkileşimlerin sayısında bir azaltma yapılabilir (Şanyılmaz, 2006).

Bu deney tasarımı yaklaşımında yapılması gereken deney sayısının azaltılmasının bir başka yolu ise, oldukça ‘yüksek ve düşük değer’ olarak seviyelerin seçilmesidir. Bu şekilde deneylerin tüm kombinasyonlarının yapılması yerine sadece sonucu etkileyeceği düşünülen faktör ve seviyelerin performans karakteristiği üzerine olan etkisi araştırılabilir.

Kısmi faktöriyel deney tasarımlarının en büyük dezavantajı tüm deneylerin yapılmamasından dolayı bazı etkileşimlerin çıktı üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılabilmesidir (Şanyılmaz, 2006).

### 3.1.5.5. 2<sup>k</sup> Faktöriyel deney tasarımı

2 seviyeli k sayıda faktör içeren, minimum sayıda deney yapmayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu tasarım ayrıca geçmişte elde edilen deney verilerinin gelecekte oluşturulacak deney tasarımları için kullanılmasını sağlar.

2<sup>k</sup> faktöriyel deney tasarımının uygulanmasının faydaları şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Deney sonucunda elde edilen verilerin hesaplanması kolaydır,
- 2) Daha az deney yaparak sonuçlar gözlemlenebilir,
- 3) Deney faktörlerinin değişmesiyle elde edilecek sonuçlarının öngörülmesine izin verir,
- 4) Deneysel hatalara deneyler yapılırken müdahale edilebilir,
- 5) İleri boyutlu modellerin geliştirilmesinde daha önceki modeller yol gösterici rol oynar,
- 6) Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde hata yapmayı azaltacak adımlara izin verir,
- 7) Birbirinden bağımsız denklem katsayıları sayesinde yanıt yüzeyi daha etkin bir şekilde elde edilir (Özensoy, 1982).

### 3.2. Yates Deney Tasarımı

2<sup>k</sup> faktöriyel deney tasarımı kapsamında geliştirilmiş olan Yates tekniği, deney sonuçlarının hesaplamasını kolaylaştıran, faktörlerin temel ve iç etkileşimlerinin bulunması için kullanılan bir uygulamadır. Hata karelerinin toplamını bulmak için sistematik bir yaklaşım sunmaktadır.

Yates deney düzeni, ortogonal dizinler yardımıyla problem çözümüne odaklandığı için faktör etkileşimlerini birbirinden bağımsız olarak istatistiksel olarak analiz etmeye yardımcı olmaktadır. Her bir faktör için yalnızca iki farklı seviye vardır. Sadece iki seviye olması, faktör değişiminin lineer mi parabolik mi olduğunu gözlemlemek açısından bir problem oluşturmaktadır. Bu problemin ortadan kaldırılması için deney şartlarındaki faktörlere uygun aralıklarda değer vermek gerekmektedir (Özensoy, 1982).

$2^k$  faktöriyel tasarımda, özel bir sıralama ile deney düzeneği oluşturulur. Bu düzenek Yates veya standart düzenleme diye adlandırılmaktadır.

Düşük seviyeler (1, -1, -), yüksek seviyeler (2, 1, +) olarak gösterilebilir. 3 farklı faktör için Yates düzenlemesi ise;

(1) Başlama noktası, düşük seviyelerle deneyin gerçekleştirilmesi,

(a) (Temel etki)  $a.(1) = a$

(b) (Temel etki)  $b.(1) = b$

(ab) (İç etkileşim)  $a.b = ab$

(c) (Temel etki)  $c.(1) = c$

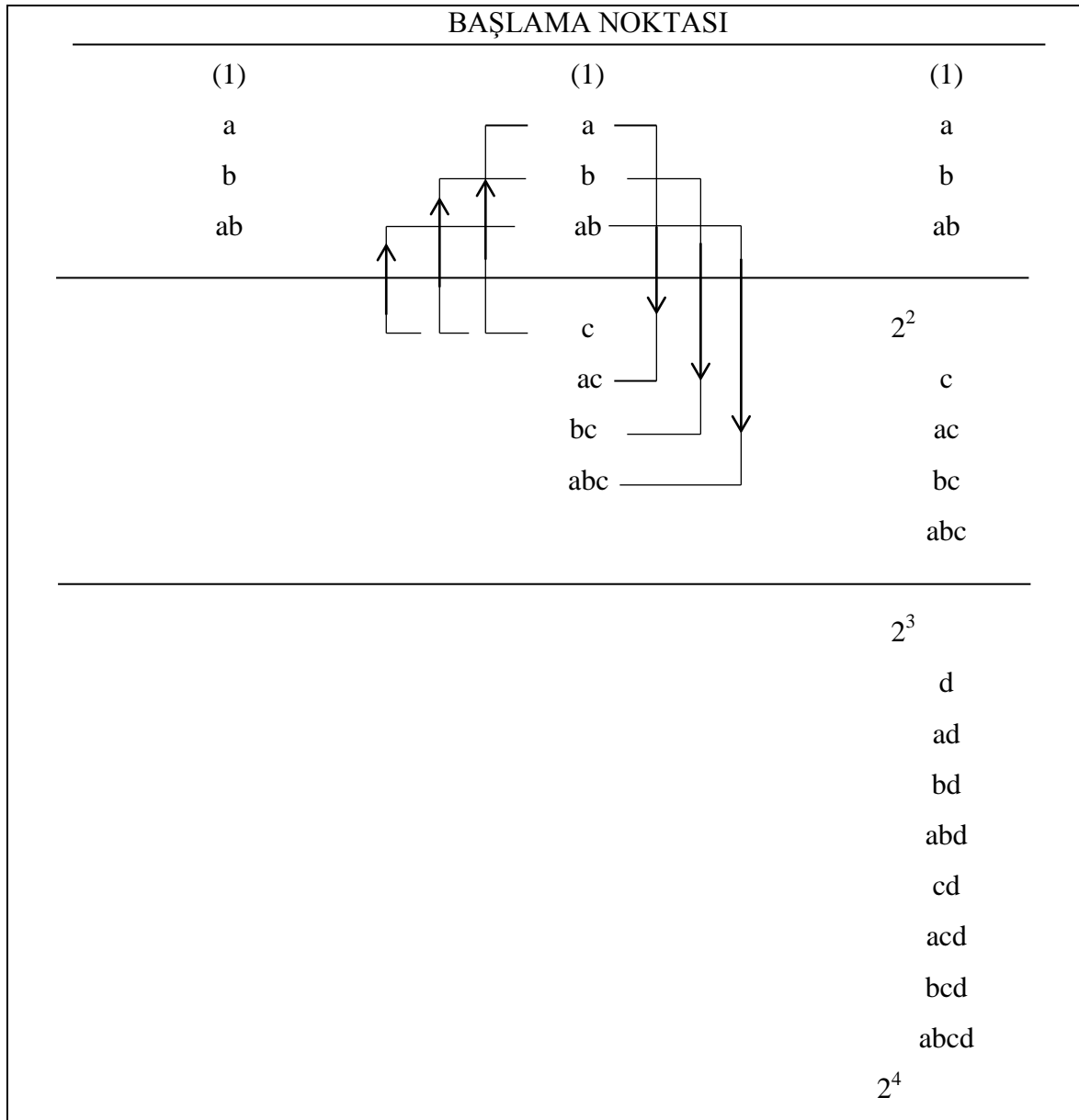
(ac) (İç etkileşim)  $a.c = ac$

(bc) (İç etkileşim)  $b.c = bc$

(abc) (İç etkileşim)  $a.b.c = abc$  şeklinde ifade edilebilir.

Çizelge 3.1'deki notasyon gösteriminde deneyler tasarlanırken  $2^k$  şeklinde bir sistematik olduğu için deney tasarımına eklenen her faktör için 2 kat daha fazla deney yapılması gerekmektedir.

Çizelge 3.1. Yates Deney Düzenlenmesinin Sistematik Olarak Genişletilmesi



Çizelge 3.2.  $2^4$  için Yates Düzeni

Yates Kodu	A	B	C	D
(1)	-	-	-	-
a	+	-	-	-
b	-	+	-	-
ab	+	+	-	-
c	-	-	+	-
ac	+	-	+	-
bc	-	+	+	-
abc	+	+	+	-
d	-	-	-	+
ad	+	-	-	+
bd	-	+	-	+
abd	+	+	-	+
cd	-	-	+	+
acd	+	-	+	+
bcd	-	+	+	+
abcd	+	+	+	+

Çizelge 3.2'deki 2 seviyeli 4 faktörlü bu Yates düzeni için;

Deney faktörleri: A, B, C, D

Faktörlerin seviyeleri: Düşük seviyeler (-)

Yüksek seviyeler (+) ile gösterilmektedir.

### **Yates Deney Düzeninin Uygulanması**

#### **Deney Faktörlerinin ve Seviyelerinin Belirlenmesi:**

Deney çalışması yapılmadan önce deney faktörleri ve seviyeleri belirlenerek Yates sıralama ve notasyonu için çizelgeler oluşturulmalıdır.

### Deney Tasarımının Yapılması

Çizelge 3.3' te gösterildiği gibi deney faktörleri belirlenmiş 4 faktörlü 2 seviyeli deney tasarımı için  $2^4$  adet deney yapılması gerekmektedir.

Çizelge 3.3. Yates Notasyonu Örneği

Faktörler	Faktör Kodu	Yates Sembolü	Düşük Seviye Değeri(-1)	Orta Seviye Değeri(0)	Yüksek Seviye Değeri (1)
A	$X_1$	a			
B	$X_2$	b			
C	$X_3$	c			
D	$X_4$	d			

### Deney Sonuçları Elde Edildikten Sonra Yates Çizelgesinin Doldurulması

Deneyle yapıldıktan sonra Çizelge 3.4'de  $2^3$  için verildiği gibi çizelge adımları takip edilerek Yates çizelgesinin son hali elde edilmektedir.

Çizelge 3.4.  $2^3$  için Yates Çizelgesi

Yates Deney Düzeni	Deney Sonuçları	Kolon(1)	Kolon(2)	Toplam Etki[TE]	$[TE]^2/8$	S.D.	Fhesap (6)/(7)* $S_e^2$	Ftablo	Karar	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\hat{Y}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
(1)	k	k+l	(k+l)+(m+n)	[(k+l)+(m+n)]+[(p+r)+(s+t)]						-1	-1	-1	
a	l	m+n	(p+r)+(s+t)	[(l-k)+(n-m)]+[(r-p)+(t-s)]						1	-1	-1	
b	m	p+r	(l-k)+(n-m)	[(m+n)-(k+l)]+[(s+t)-(p+r)]						-1	1	-1	
ab	n	s+t	(r-p)+(t-s)	[(n-m)-(l-k)]+[(t-s)-(r-p)]						1	1	-1	
c	p	l-k	(m+n)-(k+l)	[(p+r)+(s+t)]-[(k+l)+(m+n)]						-1	-1	1	
ac	r	n-m	(s+t)-(p+r)	[(r-p)+(t-s)]-[(l-k)+(n-m)]						1	-1	1	
bc	s	r-p	(n-m)-(l-k)	[(s+t)-(p+r)]-[(m+n)-(k+l)]						-1	1	1	
abc	t	t-s	(t-s)-(r-p)	[(t-s)-(r-p)]-[(n-m)-(l-k)]						1	1	1	

1. Kolon: Faktöriyel deney tasarımına göre Yates deney düzeni.

2. Kolon: Yates deney düzenine göre yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar.

3. Kolon: 2. Kolondaki değerler yukarıdan aşağıya doğru çiftlere ayrılır. Örneğin,  $2^3 = 8$  deney düzeni ise, yukarıdan aşağıya doğru ilk 4 satır için 2. Kolonda ayrılan çiftler toplanır. Kalan 4 satır için ise, çiftlerden aşağıdaki değerden yukarıdaki değer çıkarılarak kolonun satır değerleri elde edilir. Deneyler 3 faktöre göre yapıldığı için bu işlem 3 kez aynı şekilde 3, 4 ve 5. kolonlar için tekrarlanır.

5. Kolon: Toplam Etki [TE] kolonudur.

6. Kolon: 5. Kolondaki her bir [TE] değerinin karesi alınarak yapılan toplam deney sayısına bölünerek bulunur.

7. Kolon: Serbestlik derecesini ifade eder. Yates deney düzeninde  $n = 2$  seviye bulunduğu için  $(n-1)$  olarak ifade edilir. Her satır için 1 değerini alır.

8. Kolon: 6. Kolon değerleri, 7. Kolon değerlerinin deneysel hata ( $Se^2$ ) ile çarpılmasından elde edilen sonuca bölünmesi sonucunda Fhesap kolonu bulunur.

Deneysel hata ( $Se^2$ )'nin hesaplanması;

Yates deney düzeninde verilen orta değerlerle en az 3 deney yapılarak deneysel hata için sonuçlar elde edilir. Formülasyon ise şu şekildedir;

$$n_{ort} : (n_1+n_2+n_3)/3,$$

$$Se^2 = [(n_1-n_{ort})^2 + (n_2-n_{ort})^2 + (n_3-n_{ort})^2] / (n-1)$$

$n_1$ : orta değerle yapılan 1. Deneyin sonucu,

$n_2$ : orta değerle yapılan 2. Deneyin sonucu,

$n_3$ : orta değerle yapılan 3. Deneyin sonucu,

(3.1)

9. Kolon: Ftablo kolonudur.  $F(\alpha, v_1/v_2)$  yani  $F(\text{güven düzeyi, serbestlik derecesi, deney sayısı})$  için F-istatistik çizelgesi değeridir.

10. Kolon: Karar kolonudur. Fhesap ile Ftablo kolonları karşılaştırılarak bulunur. Eğer hesaplanan Fhesap satır değeri Ftablo satır değerinden büyük ise Etkin, küçük ise Etkin Değil kararı verilir.



11., 12., 13., Kolon: Faktörlerin Yates deney düzenindeki çalışma değerlerini ifade eder.

14. Kolon:  $\hat{Y}$  kolonu hesaplanırken temel ve iç etkileşimler göz önünde bulundurularak karar kolonundaki Etkin değerlerden oluşan Lineer bir model kurulur (Arslan ve Bayat 2008; Sever, 2006).

Yates deney düzeni metoduyla elde edilen sonuçlar VARAN varyans analizi ile birleştirilerek her bir değerlendirme için fonksiyonlar bulunmaktadır. Yates tekniği ve varyans analizinin (VARAN) birleştirilmesi  $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  gibi bir fonksiyon ile oluşturulur. Varyans analizinin uygulanmasının amacı, kararları ve modeli basitleştirmesidir (Özensoy, 1982).

Burada X değerleri,

$X = (a-b)/(c-b)$  formülü ile hesaplanır. Burada,

a: Faktörün sınanma değeri,

b: Faktörün standart değeri,

c: Düşük ve yüksek değer'dir.

4 faktörlü ve tüm faktörlerin etkin olduğu varsayımıyla kurulan model örneği ise şu şekildedir;

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_1 * X_2 + \beta_4 * X_3 + \beta_5 * X_1 * X_3 + \beta_6 * X_2 * X_3 + \beta_7 * X_1 * X_2 * X_3 + \beta_8 * X_4 + \beta_9 * X_1 * X_4 + \beta_{10} * X_2 * X_4 + \beta_{11} * X_3 * X_4 + \beta_{12} * X_1 * X_2 * X_4 + \beta_{13} * X_1 * X_3 * X_4 + \beta_{14} * X_2 * X_3 * X_4 + \beta_{15} * X_1 * X_2 * X_3 * X_4 \quad (3.2)$$

Bu örnek modelde;

$\beta_0$  = Yapılan 16 deneyin sonuçlarının ortalaması,

$\beta_{1-15}$  = Toplam Etki kolon değerlerinin yapılan deney sayısına bölünmesi ile bulunur.

$X_1, X_2, X_3, X_4$  değerleri ise 12.,13., 14. ve 15. Kolonda aldıkları düşük ve yüksek değerlerin karşılığı olan -1 ve 1 değerlerini ifade etmektedir. 16. Kolonun her satırı,

oluşturulan Lineer modeldeki  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$  değerleri için ayrı ayrı hesaplanarak oluşturulur (Özensoy, 1982).

### **Deney Sonuçları ile Y hesap Kolonu Arasındaki Korelasyon**

Formülasyon yardımıyla kurulan Lineer modelin doğruluğu bu aşamada test edilir. Deney sonuçları ile kurulan model arasındaki ilişki hem korelasyon ( $R^2$ ) hem de grafik yardımıyla açıkça ortaya konulmaktadır.

### **Faktörlerin Etkinlikleri ve İç Etkileşimlerin Analiz Edilmesi**

Bu aşamada, oluşturulan çizelgedeki [TE] değeri göz önünde bulundurularak faktörlerin etkinlik durumları, temel ve iç etkileşimleri yorumlanabilmektedir. Etkin faktörler belirlenir ve grafiğe aktarılır. Grafikteki pozitif ve negatif yönlerine göre deney düzenini nasıl etkiledikleri gözlemlenebilir.

### **Optimizasyon**

Optimizasyon deneyleri “steepest ascent” metoduna göre gerçekleştirilmektedir (Akhanazarova and Kafarov, 1982). Bu metotta Çizelge 3.5’de belirlenen artış miktarı, Yates tekniği ile tespit edilen optimum deney şartlarından etkin olan faktör adım adım eklenerek en uygun ve en verimli deney şartları belirlenmektedir.

Çizelge 3.5. Optimizasyon Faktörlerinin Belirlenmesi

Faktör	A	B	C	D
Temel adım, $Z_j$				
Artış, $\Delta Z_j$				
Katsayı, $b_j$				
$\Delta Z_j * b_j$				
Normal adım				

Temel adım ( $Z_j$ ) Yates deney tasarımı için belirlenen orta değerlerdir. Artış değeri ( $\Delta Z_j$ ) maksimum değerler ile orta değerler arasındaki farktır. Katsayı ( $b_j$ ) Y formülünde okunan  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , ve  $X_4$ ’ün önündeki katsayılarıdır. Artış ile katsayılar ( $\Delta Z_j * b_j$ ) çarpılarak bir alt satıra yazılır. Normal adım ile bir üst satırdaki artış ve katsayının

çarpıldığı adıma ulaşılmaktadır. Hesaplamalara göre bulunan sonuçlarla ek deneyler yapılmaktadır (Naik vd., 2004, Naik vd., 2005).

### 3.3. Taguchi Deney Tasarımı

#### 3.3.1. Deney tasarımının toplam kalite yöntemindeki yeri

Deney tasarımı, belirlenen problemin en iyi şekilde optimize edilebilmesi için deney faktörleri üzerinde değişiklikler yapılarak sonuçlarının karşılaştırılması yöntemidir.

Toplam Kalite Yöntemi ise, sürekli geliştirme felsefesini gerçekleştirmek için yönetimin liderliğini, müşteri memnuniyetini, çalışanların eğitimini ve takım çalışmasını bütünüyle kapsayan bir faaliyettir. Ayrıca, Toplam Kalite Yönetimi(TKY) sürekli gelişme faaliyetini devamlılığını sağlayabilmek için Shewart veya Deming çemberi olarak bilinen Planla-Uygula-Kontrol Et-Önlem Al sürecini gerçekleştirir.

Problemin çözümü için, deneylerin ve denemelerinde ilk iki adım içerisinde yapılması gerekmektedir. Bu da, deney tasarımının PUKÖ kalite çemberinin ilk safhalarında yer aldığını göstermektedir.

Faktör sayısı ve seviyeleri küçük boyutlu olan problemlerde “Ishikawa’nın Yedi Basit Aracı” olarak bilinen;

1. Grafik,
2. Çetele Tablosu,
3. Pareto Grafiği,
4. Neden&Sonuç Analizi,
5. Serpilme Diyagramı,
6. Histogram,
7. Kontrol Kartları(X-R Chart),

gibi kalite araçları ile deneylerin planlanması ve sonuçlarının analizi gerçekleştirilebilir. Fakat ürün tasarımı ve üretim aşamalarında karşılaşılan problemlerde faktör sayısı ve seviyeleri artacağı için istatistiksel yöntemler kullanmak gerekmektedir (Şirvancı, 1997).

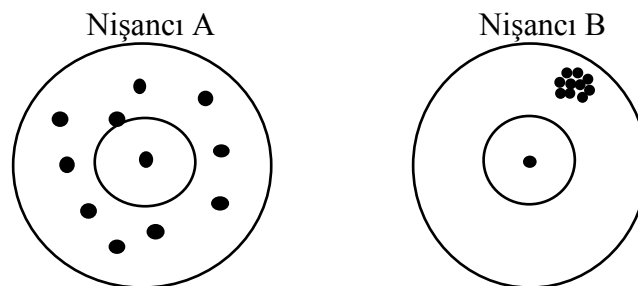
### 3.3.2. Taguchi'nin kalite ve deney tasarımı'na bakış açısı

Dr. Genichi Taguchi'nin deney tasarımı temellerine dayanarak geliştirdiği Taguchi deney tasarımı kısmi faktöriyel deney tasarımına, robust(gürbüz) tasarım ve ortogonal dizinlerin eklenmesi sonucunda oluşturulmuştur.

Geliştirilen bu yöntemde, proaktif yaklaşım ön plana çıkmaktadır. Ürün tasarım aşamasında iken belirlenen kalite hedeflerinden oluşabilecek sapmaları minimuma indirmek temel amaçtır. Taguchi felsefesinin özü, belirlenen hedef değer çevresindeki değişkenliği en aza indirmektir (Taguchi vd., 2005; Şimşek, 2014).

Taguchi, Harvard Business Review basılmış olan makalesinde(1990), üretim sürecindeki değişkenliği azaltmanın zorluklarını göstermek için başka yazarların da kullanmış olduğu “Kim Daha İyi Nişancı?” örneğiyle bu durumu anlatmıştır. Bu örnekte, A ve B nişancıları 10'ar atış yapmışlar ve Şekil 3.3'deki sonuçları elde etmişlerdir. Nişancı A'nın ortalama konumları hesaplanırsa hedefe daha yakın olduğu görülmektedir. Diğer yandan nişancı B'nin ortalaması, hedeften uzaktadır fakat atışları çok daha tutarlıdır. Her ikisi için değişkenlik hesaplandığında, nişancı B'nin değişkenliğinin çok daha az olduğu anlaşılmaktadır. Nişancı B' nin atışlarının düzeltilmesi daha kolayken, nişancı A belki de hiçbir zaman iyi bir nişancı olamayacaktır.

Bu örnek üzerinden düşünecek olursak, üretim içerisinde de bu şekilde değişkenliğe sahip süreçler oluştuğunda süreç B'yi spesifikasyon sınırları içerisine almak süreç A'yı almaktan çok daha kolay ve daha az maliyetlidir (Taguchi vd., 2005; Şirvancı, 1997).



Şekil 3.3. Kim Daha İyi Nişancı?

Ayrıca Dr. Genichi Taguchi, kaliteyi sağlamak ve müşteri ile ürün arasındaki bağı güçlendirmek için kalite sistemini iki ayrı sürece ayırmıştır;

Çevrim Dışı Kalite Kontrol: Ürün henüz tasarım aşamasında iken gerçekleştirilen, kalite ile ilgili oluşabilecek sorunları öngörmeyi amaçlayan aşamadır. Bu aşamada, pazar araştırmaları ve ürünle ilgili detaylı çalışmalar yapılarak müşteri memnuniyeti sağlanmaya çalışılmaktadır (Taguchi vd., 2005; Şirvancı,1997). Çevrim dışı kalite kontrol aşamaları Çizelge 3.6' da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Çevrim Dışı Kalite Kontrol Aşamaları

Çevrim Dışı Kalite Kontrol	
<u>1.Aşama</u>	<u>2.Aşama</u>
<p>Ürün Tasarımı</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Müşteri ihtiyaç ve beklentilerinin belirlenmesi</li> <li>✓ Müşteri ihtiyaç ve beklentisini karşılayacak ve aynı zamanda sürekli ve ekonomik olarak imal edilebilecek ürün tasarımı</li> </ul>	<p>Süreç Tasarımı</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ İmalatçının açık ve yeterli standart spesifikasyon, yöntem, üretim araçlarının tasarımı</li> </ul>
<p><u>Kalite Aşamaları</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Sistem Tasarımı (fonksiyon belirleme)</li> <li>2.Faktör Tasarımı (hedef belirleme)</li> <li>3. Tolerans Tasarımı (tolerans belirleme)</li> </ol>	

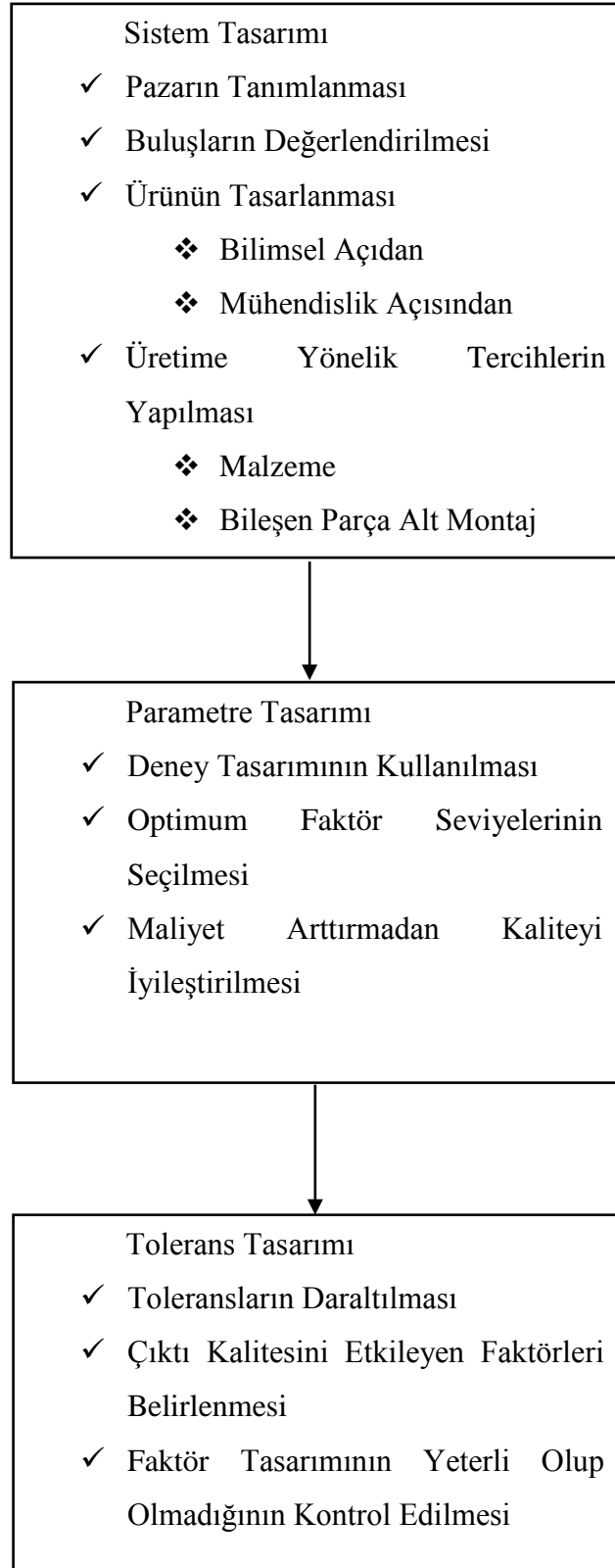
Çevrim İçi Kalite Kontrol: Bu aşama ürün üretime girdiği anda başlar. Süreç içerisinde spesifikasyonlar dışında kalan ürünler ya tekrar üretime gönderilir ya da ıskartaya çıkarılır. Ürünün üretimi sırasında ve sonrasında gerçekleştirilen istatistiksel proses kontrol ve muayeneler gibi her türlü kalite faaliyetini kapsamaktadır (Taguchi vd., 2005; Şanyılmaz, 2006). Çevrim içi kalite kontrol aşamaları Çizelge 3.7' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Çevrim İçi Kalite Kontrol Aşamaları

Çevrim İçi Kalite Kontrol	
<u>1.Aşama</u>	<u>2.Aşama</u>
Üretim	Müşteri İlişkileri
Ürünün daha önce ürün ve süreç tasarımı aşamalarında belirlenen standart ve spesifikasyonlara göre üretilmesi	Müşteriye servis hizmetinin verilmesi ürünün kullanımı sırasında çıkan problemlerle ilgili bilginin, ürünün ve süreç tasarımının gelişmesi için kullanımı
<u>Kalite Aşamaları</u>	<u>Kalite Aşamaları</u>
1.Süreç Teşhisi: Süreç belirli aralıklarla gözlemlenir. Düzeltmeler gerekiyorsa sürece müdahale edilir. 2.Ayarlama: Gözlemlenen problemler ayarlamalar yapılarak düzeltilmeye çalışılır. 3.Muayene ve Iskartaya Ayırma: Her parça muayene edilir. Hatalı parçalar yeniden işlenir ve ıskartaya ayrılır. En pahalı kalite kontrol şeklidir.	1.Tamir, Değişirme 2.Geri Besleme Bilgisi 3.Ürün, Süreç, Spesifikasyon Tasarımının Değiştirilmesi

Taguchi felsefesinin sistematığı sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı olarak üç ana başlıkta incelenmektedir. Bu başlıklar Çizelge 3.8’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Taguchi Felsefesinin Sistematığı



### 3.3.3. Sistem tasarımı

Taguchi felsefesinin ilk adımıdır. Üretilmek istenen ürün yada sürecin hedeflenen sonuçlara ulaşabilmesi için planlar yapılır ve optimum sonucu veren plan seçilir. Bu aşamada, pazar araştırması, konu ile ilgili son zamanlardaki yenilikler, mühendislik ve bilimsel olarak verilerin elde edilmesi ve kullanılacak hammadde ve teçhizatlar hakkında bilgi toplanması konuları araştırılır.

Ayrıca bu adımda, hem tüketici ihtiyaçları hem de üretim süreci için gerekli verilerin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. İlgilenilen ürün ya da süreç tüketiciye göre tasarlanmamışsa pazardaki yerini sağlamlaştıramayacaktır. Aynı zamanda üretim içerisindeki ihtiyaçlarını karşılayamıyorsa ürünün üretilmesi söz konusu olamayacaktır.

Taguchi felsefesinin geneline bakıldığında, sistem tasarımı bir ürün ya da süreç için yatırım yapılıp yapılamayacağı kararının alındığı safha olarak tanımlanabilir. Asıl amaç ise, en az maliyetle belirli kısıtlar altında hedef değere yaklaşmaktır. Bu aşamada istatistiksel analizlerden çok mühendislik deneyimleri ön plana çıkmaktadır (Taguchi vd., 2005; Şanyılmaz, 2006).

### 3.3.4. Parametre tasarımı

Ürün ve proses tasarımı açısından en önemli çalışmaların yapıldığı aşamadır. Ürün parametre tasarımı, ilgilenilen ürün için parametrelerin en uygun değerlerinin belirlenmesini amaçlarken, proses parametre tasarımı ürün üretilirken süreç için önemli olan parametrelerin en uygun değerlerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

Her ikisinde de amaç, ürün ya da süreç içerisinde değişkenliği arttıran kontrol edilemeyen parametreleri belirlemek ve kontrol edilebilen parametrelerin en uygun değerlerini seçerek süreç içerisindeki değişkenliği en aza indirmektir. Bu amacı gerçekleştirdikten sonra robüst(gürbüz) bir tasarım elde edilir. Böylelikle robüst(gürbüz) tasarım kontrol edilemeyen faktörlerden etkilenmez.



Hedef değere en uygun sonucun elde edilebilmesi için tasarım içerisinde birçok parametre etkili olmaktadır. Ayrıca bu parametrelerin birbirleriyle ilişkili olduğu da düşünülürse, ürün ve ürün çıktıları hakkında daha doğru sonuçlar elde edebilmek açısından tasarımcının istatistiksel yöntemlerin kullanması gerekmektedir. Deney tasarımı yardımıyla, ürün ya da süreç içerisindeki değişkenlikler en az maliyetle tasarım aşamasında iken önlenmektedir (Taguchi vd., 2005; Çalışkan, 2014)

### **3.3.5. Tolerans tasarımı**

Faktör tasarımı sonucunda elde edilen optimum faktör değerlerine en uygun tolerans sınırlarını belirlemek için geliştirilmiş tasarım aşamasıdır. Tolerans sınırlarını daraltmak üretim içerisinde daha sık kontroller yapılmasına ve dar toleranslarla çalışan yüksek teknolojik takım ve teçhizatlar kullanılmasına yol açar ve bu da üretim maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan geniş tolerans sınırları ile üretim yapmak kalite sorunlarına ve üretim kayıplarına neden olmaktadır. Sonuç olarak tolerans sınırlarını belirlemek tasarımcı için en iyileme problemi oluşturmaktadır.

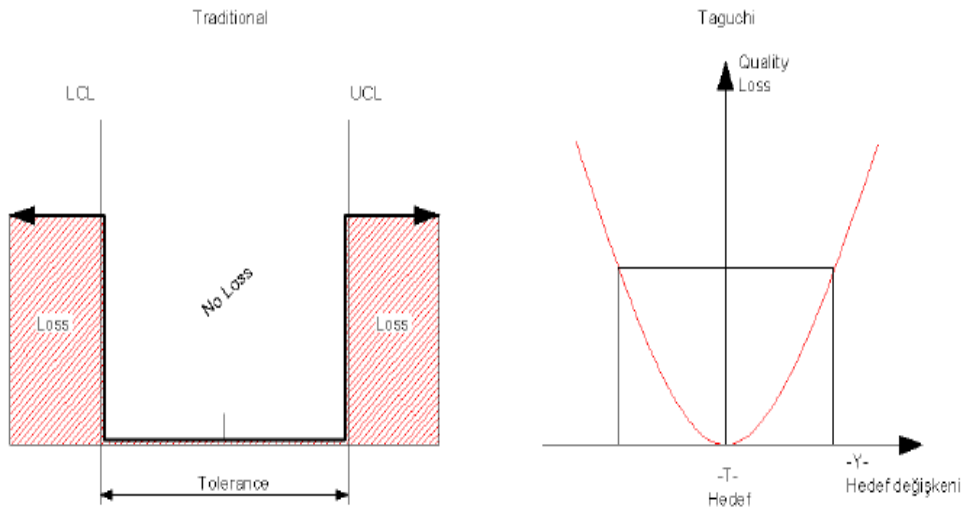
Bu problemi çözmek için ürün ya da süreç üzerindeki değişkenlikte etkisi olan faktörler tespit edilir. Bu sayede, ürün çıktısı üzerinde etkisi olan bütün faktörlerin toleranslarının daraltılması yerine daha etkin olanların toleransları düşük, diğer faktörlerin toleranslarının normal seviye de tutulması amaçlanır. Ürün ya da süreç üzerindeki değişkenlik için yapılan tasarımlar maliyeti azalttığı gibi Taguchi felsefesinde önemli bir yeri olan kayıp fonksiyonu gibi alanlarda elde edilen bu veriler daha kolay kullanılabilir (Taguchi vd., 2005; AYTEKİN, 2010).

### **3.3.6. Kayıp fonksiyonu**

Ürün ya da süreçteki kalitesizlikten kaynaklanan müşteri memnuniyetsizliklerinin boyutlarını tasarımcıya açıkça gösteren sürekli bir fonksiyondur. Kayıp fonksiyonunun orta değeri en az, uç değerleri ise en fazla kaybın olduğu noktaları göstermektedir. Buradaki kayıp üretici için kısa dönemde garanti masrafları, yeniden işleme de kullanılan malzeme, işgücü, uzun dönemde pazar payındaki düşüş olabileceği gibi müşterinin memnuniyetinin sağlanamaması da olabilmektedir (Taguchi vd., 2005; ŞİMŞEK, 2014).

Geleneksel kalite kontrol uygulamalarında üretilen ürünler, hedeflenen değerden sapmalarına bakılmaksızın, spesifikasyon sınırları açısından değerlendirilmektedirler. Üretim çıktıları hedef değerle karşılaştırılır, sınırların dışında ise ürün yeniden işleme ya da hurdaya sevk için ayrılmaktadır; sınırlar içinde ise kabul edilmektedir. Burada işletmenin ürün kaybı ya vardır ya da yoktur. Taguchi bu yaklaşımın kalite kontrol felsefesini doğru bir şekilde açıklayamadığını düşünerek kayıp fonksiyonunu geliştirmiştir.

Bu fonksiyonda yatay eksen hedeften sapmanın miktarını, dikey eksen ise maddi kaybı göstermektedir. Hedef değerden sapmalar arttıkça sapmanın karesi oranında kayıp meydana gelmektedir (Taguchi vd., 2005; Güneş, 2015). Kayıp fonksiyonu Şekil 3.4.'deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Taguchi'nin Kayıp Fonksiyonu

Kayıp fonksiyonunun denklemini ise şu şekilde ifade edilmiştir;

$$\text{Kayıp} = k \cdot (Y - T)^2 \quad (3.3)$$

Burada;

T= Hedef değer,

Y= Faktörün ölçülen değeri,

k= Sapmayı para birimine çeviren bir katsayıdır.

### 3.3.7. Sinyal/Gürültü oranı

Dr. Genichi Taguchi ürün ya da süreç için tasarlanan deneylerin performansını(verimliliğini) daha anlamlı bir şekilde değerlendirebilmek için sinyal/gürültü (S/N) olarak bilinen bir kriter geliştirmiştir. Deney sonuçları tek bir sonuç içermediği için standart istatistiksel analizler kullanmak yerine S/N oranı kullanmak tasarımcıya hem zaman kazanması hem de verilerin daha iyi anlaşılması açısından yardımcı olmaktadır.

Deney tasarımında bir faktörün değiştirilmesi ile ürün kalitesindeki değişim gözlemlenmeye çalışılır. Burada istenilen etkiyi bu faktör oluşturmuş ise, bu sinyal olarak adlandırılmaktadır. Buna ek olarak, deney tasarımında deney sonucuna etki eden dış faktörler de bulunmaktadır. Bu dış faktörlerin ürün kalitesinde oluşturdukları etki ise, gürültü olarak tanımlanmıştır.

Sinyal/Gürültü(S/N) oranı, kontrol altına alınmış kalite karakteristiğinin kontrol altına alınmamış ama sonuca etkisi olan dış faktörlere(gürültü) karşı davranışını araştırmak olarak açıklanabilir.

Ürün ya da süreç tasarımında yüksek bir S/N oranı elde edilmiş ise bu o ürün ya da süreç için optimum kaliteyi ve minimum sapmayı ifade eder. Taguchi deney tasarımı için 3 tane S/N oranı tanımlanmıştır. Değerlendirme aşamasında hangi S/N oranı kullanılırsa kullanılsın sonuç değeri ne kadar yüksek ise değişkenlik o kadar az ve deney sonucu o kadar verimlidir anlamı çıkarılabilir.

#### 1)En Küçük-En İyi:

Bu tip problemlerde, hedef değer minimum olması amaçlanır. Hedef değer negatif yönde değişkenlik göstermez. Daima alt sınırın "0" olması istenir. En Küçük-En İyi yaklaşımında S/N oranı şu şekilde hesaplanır;

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (3.4)$$

### 2)En Yüksek- En İyi:

Bu tip problemlerde hedef değerin üst sınırı belirlenmemiştir. Ve maksimum olması amaçlanır. Hedef değerin sonucu arttıkça performans iyileşmektedir. En Yüksek-En İyi yaklaşımında S/N oranı şu şekilde hesaplanır;

$$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/y_i^2\right) \quad (3.5)$$

### 3)Nominal Değer-En İyi:

Bu tip problemlerde bir hedef değer belirlenir. Nominal değer için toleranslar belirlenirken Taguchi'nin kayıp fonksiyonundan yararlanır. Nominal Değer-En İyi yaklaşımında S/N oranı şu şekilde hesaplanır;

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

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.6)$$

Denklemlerdeki;

$y_i$ : Performans kriterinin i. gözlem değerini,

$n$ : Bir denemedeki deney sayısını ,

$\bar{y}$ : Gözlem değerlerinin ortalamasını,

$s^2$ : Gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir.

S/N oranları yorumlanarak deney sonuçlarına etki eden faktörlerin tespit edilmesinin yanı sıra, proses faktörlerinin optimal değerleri de tespit edilebilmektedir (Taguchi vd., 2005; Güneş, 2015).

### 3.3.8. Ortogonal dizinler

Tam faktöriyel deney tasarımı, tasarımcı her bir faktörün bütün seviyeleri için deneyi tasarlamaktadır. Örneğin 3 seviyeli 4 faktörden oluşan bir deney tasarımı için tasarımcı  $3^4 = 81$  adet deney yapmak durumundadır.

Bu durum tasarımcı açısından hem zaman kaybına hem iş yükünün artmasına hem de deneysel maliyetlerin artmasına yol açmaktadır. Taguchi tam faktöriyel deney tasarımının getirmiş olduğu bu olumsuzlukları gidermek için ortogonal dizinleri literatüre kazandırmıştır. Ortogonal dizinler, birden fazla faktör ve seviyenin bulunduğu durumlarda kaç adet deney yapılacağını ve hangi sırada hangi seviyenin çalışılacağını gösteren çizelgelerdir. Ortogonal dizinler kullanılarak en uygun ürün ya da süreç çıktısını veren faktör seviyeleri, deney tasarımı için bütün kombinasyonlar denenmeden elde edilebilmektedir. Ortogonal dizinlerde faktör seviyelerinin değiştirilmesi eş zamanlı olarak gerçekleştirilmektedir (Okumuş, 2015).

Taguchi'nin önerdiği ortogonal dizin kullanılarak  $3^4$  için yapılması gereken deney sayısı 16'dır. Bu durumda,  $81-16=65$  adet deneyin yapılması için harcanan işgücü, zaman ve bütçede fayda sağlanmaktadır.

İstatistiksel olarak da süreçlerin ya da deneylerin çoğunlukla daha az faktör ile en uygun sonuçların elde edildiği görülmüştür (Phadke, 1989).

Literatürde tasarım matrisi olarak da geçen ortogonal dizinlerin genel gösterimi şöyledir;

- d: toplam deney sayısı,
- a: faktörlerin seviye sayısı,
- k: faktör sayısı,
- L: ortogonal dizi,

$L_d(ak)$  veya sadece  $L_d$  olarak gösterilmektedir. Deney şartları için 2 seviyeli olarak tanımlanmışsa,  $L_4$ ,  $L_8$ ,  $L_{16}$  ve 3 seviyeli olarak tanımlanmışsa  $L_9$ ,  $L_{18}$ ,  $L_{27}$  şeklinde tasarımlar oluşturulmaktadır. Deney tasarımcısı, deney için hangi dizini seçeceğine seviye

sayısını ve toplam serbestlik derecesini göz önünde bulundurarak karar verebilmektedir. Faktör sayısı ve seviyeleri baz alınarak MATLAB programında deney desenleri elde edilebilmektedir. Çizelge 3.9'da üç (3) seviyeli dört (4) faktörlü  $L_{18} (3)^4$  deney deseni aşağıda verildiği gibidir.

Çizelge 3.9. 3 Seviyeli 4 Faktör İçin Ortogonal Dizin Gösterimi

Deney No	Faktör ve Seviyeleri			
	A Faktörü	B Faktörü	C Faktörü	D Faktörü
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	1	3
5	2	2	2	1
6	2	3	3	2
7	3	1	2	3
8	3	2	3	1
9	3	3	1	2
10	1	1	3	1
11	1	2	1	2
12	1	3	2	3
13	2	1	2	2
14	2	2	3	3
15	2	3	1	1
16	3	1	3	2
17	3	2	1	3
18	3	3	2	1

Ortogonal dizinin seçiminde faktörlerin toplam serbestlik derecesi dikkate alınmaktadır. Faktörlerin serbestlik derecesi, bütün faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri toplamına eşittir. Toplam serbestlik derecesi ortogonal dizinlerden hangisine uygunsa o tercih edilir. Toplam serbestlik derecesine 1 eklendiğinde deneme sayısına eşitse uygunluk sağlanır. Toplam serbestlik derecesi deney sayısından büyük veya eşitse bir üst ortogonal dizin tercih edilmelidir (Taylan, 2009).

### 3.3.9. Varyans analizi (VARAN)

Varyans analizinde amaç, belirlenen performans karakteristiğini seçilen faktörlerin ve seviyelerinin nasıl etkilediğini incelemektir. Bununla beraber elde edilen sonuçların istatistikî olarak güvenilirliği de ölçülebilmektedir. Öncelikle faktörlerin toplam kareleri

SSA, SSB, SSC,...,SSN hesaplanır. Bu hesaplama aşağıda A faktörü için örneği verilen formül yardımıyla yapılır;

$$SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} [n_{A_i} * (l_A - l_m)^2] \quad (3.7)$$

Burada,

$k_A$  = A faktörünün seviye sayısı,

$n_{A_i}$  = A faktörünün i seviyesindeki deney sayısı,

$l_A$  = A faktörünün i seviyesindeki deney ortalaması,

$l_m$  = ortalama S/N oranını ifade etmektedir.

Sonra hesaplanan bu her faktör için hesaplanan kareler toplamı hata payının karelerinin toplamı  $SS_e$  değeri ile toplanarak Eşitlik 3.8'de formülü verilen SST (S/N gürültü oranının toplam değişkenliği) değeri elde edilir.

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (l_i - l_m)^2 \quad (3.8)$$

Burada,

$l_i$  = ölçülen kesme kuvvetleri üzerinden hesaplanan S/N oranı,

$l_m$  = ölçülen kesme kuvvetleri üzerinden hesaplanan S/N oranlarının ortalaması,

$n$  = toplam deney sayısını ifade etmektedir.

Bu hesaplamaların sonucunda deney faktörlerinin sonuçlarının ne şekilde etkilendiğini anlamak için F-testi yapılır. F değeri, ortalama karelerin toplamı değerinin hata değerinin ortalama kareleri toplamına bölünmesi sonucu elde edilir. Bu hesaplanan F değeri belirli bir güven seviyesinde ve serbestlik derecesindeki çizelge değeri ile karşılaştırılarak faktörün etkin olup olmadığı kararı verilir.

Belirlenen her faktörün sonucu tüm faktörler içerisinde ne derecede etkilediği hesaplanırken de, her faktörün karelerinin toplam değerinin toplam karelerin toplamı değerine bölünmesi işlemi yapılmaktadır (Savaşkan vd., 2004).

### 3.3.10. Doğrulama deneyleri

Taguchi deney tasarımında VARAN (varyans) analizleri yapıldıktan sonra performans karakteristiği üzerinde hangi faktörün hangi seviyesinin ne kadar etkili olduğu belirlenmiş olmaktadır. Son adım ise, doğrulama deneylerinin yapılması ve optimizasyon işleminin doğruluğunun test edilmesidir.

Bu amacı gerçekleştirirken Eşitlik (3.9) kullanılarak bir hesaplama yapılmaktadır. Yapılan bu hesaplamada her faktörün optimum seviyesi için bulunan S/N oranı ( $m_i$ ), tüm deney sonuçlarının ortalaması alınarak elde edilen S/N oranından ( $m_m$ ) çıkartılarak o faktörün optimum seviyesi ile arasındaki farklılık sayısal olarak belirlenmektedir. Daha sonra bu değerlerin ortalama S/N oranı ile toplanması, teorik olarak hesaplanan ve optimum seviyelerin kombinasyonundan beklenen S/N oranını vermektedir (Mezarcıöz ve Oğulata, 2010).

$$\bar{m} = l_m + \sum_{i=1}^n (l_i - l_m) \quad (3.9)$$

Burada;

$n$  = faktörlerin sayısı,

$\bar{m}$  = tahmin edilen optimum S/N oranı,

$l_m$  = S/N değerlerinin ortalaması,

$l_i$  = i. etkin faktörün optimum seviyesinin ortalama S/N oranı'dır.

### 3.4. Adsorpsiyon Yöntemi

Teknolojinin bilinçsizce kullanılması, sanayi atıklarının çevreye önlem alınmadan bırakılması ve insan nüfusunun giderek artması ekolojik dengenin büyük bir kısmını oluşturan su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır.

Kirliliğe neden olan sulara bırakılır bırakılmaz suda var olan oksijeni tüketerek diğer mikroorganizmaların oksijensiz kalmasına neden olmaktadır. Bu atıkların yüksek miktarlarının sulara bırakılması ile hem sudaki canlıları hem de bu canlıların yaşam döngüsünde bulunduğu diğer canlı sistemleri olumsuz yönde etkilenmektedir.



Çeşitli nedenlerle kirletilen yer altı ve yer üstü su kaynaklarının atıklardan giderilmesi için etkili ve ekonomik yöntemler kullanılması gerekmektedir. Bu yöntemlerden biri de adsorbsiyon yöntemidir (Gündoğdu, 2010).

Katı, sıvı ya da gaz fazında çözünmüş halde bulunan iyon ya da moleküllerin başka bir faz yüzeyi üzerinde birikmesi olayı adsorbsiyon olarak tanımlanmıştır. Adsorpsiyon sürecinde yüzeyde biriken maddeye adsorbat, biriken iyonları yüzeyinde tutan madde ise adsorbent ya da adsorban olarak tanımlanmıştır (Tok, 2009).

3 çeşit adsorpsiyon yöntemi tanımlanmıştır. Bunlar;

Fiziksel adsorpsiyon; “Van der Walls” yani, moleküller arasında oluşan düşük çekim gücü sonucunda oluşur. Adsorbat birikim sağladığı adsorban maddenin yüzeyinde asılı haldedir ve hareketlidir. Bu adsorpsiyon türü tersinirdir ve sürecin geri dönüşümü mümkündür.

Kimyasal adsorpsiyon; fiziksel adsorpsiyondan farklı olarak adsorbat adsorban yüzeyinde hareketsizdir ve adsorban için kullanılan maddenin yüzeyinde tabaka halinde birikim sağlamaktadır. Tersinir özellikler olarak gözlenmektedir. Birikimi sağlanan adsorbatların adsorban maddeden ayrılabilmesi için yüksek sıcaklıklarda çalışılması gerekmektedir (Tok, 2009).

Biyosorpsiyon (Biyolojik adsorpsiyon); adsorban olarak canlı ya da ölü mikroorganizmaların kullanıldığı adsorpsiyon türüdür. Bu tip adsorbanların kullanımı hem süreç verimliliği hem de diğer adsorbanların yüksek maliyetlerinden kaçınmak açısından büyük avantajlar sağlamaktadır (Doğan, 2005).

Her deneysel çalışmada olduğu gibi adsorbsiyon yönteminde de deneye etki eden birden fazla girdi faktörü bulunmaktadır. Bunlar,

1. Yüzey alanı,
2. Adsorbat ve adsorban olarak kullanılan maddelerin cinsi ve özellikleri,
3. Adsorbsiyon süresi,
4. Sıcaklık,

5. Çözelti pH'ı,
6. İlk metal konsantrasyon derişimi şeklinde sıralanabilmektedir (Monser, 2002).

Adsorpsiyon yöntemi literatürde yoğun bir şekilde ağır metallerin biriktikleri fazlardan uzaklaştırılması şeklinde çalışılmıştır. Bu yöntem uygulanırken günlük hayatı birçok yönden olumsuz etkileyen çeşitli ağır metallere çalışmalarda yer verilmiştir. Kurşun da bu ağır metallere biridir ve yüksek oranları insan hayatı ve ekosistem açısından oldukça tehlikeli olarak görülmektedir (Aksoy, 2009; Öncel, 2016).

#### **3.4.1. Ağır Metaller ve Kurşun Hakkında Genel Bilgiler**

Ağır metal içeren atık suların canlıların doğrudan ya da dolaylı şekilde ulaştığı diğer sulara bırakılması, bu suların faydalanan canlılar üzerinde toksik etki oluşturmaktadır. Toksik etki sonucunda meydana gelen zehirlenmelerin bazıları çok etkili olan ağır metallerin az bir miktarıyla bazıları da daha az etkili olanların fazla miktarlarda sulara bırakılmasıyla oluşmaktadır. Ağır metaller öncelikle suda yaşayan bitki ve hayvanları, zaman geçtikçe de besinlerde birikerek yaşam döngüsündeki diğer canlıları etkilemektedir (Allen, vd., 1998 ).

İnsan vücudunun belirli seviyelerde demir, kobalt, bakır, selenyum, mangan ve çinko gibi ağır metallere ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Fakat bu ağır metallerin vücuttaki miktarı arttıkça toksik etkileri de artmaktadır. Bunun yanı sıra kurşun, arsenik, nikel, gümüş, plütonyum gibi ağır metallerin hem vücuda yararları yoktur hem de birikimi sonucunda insan sağlığı olumsuz yönde etkilenmektedir (Aksoy, 2009).

Son yıllarda ağır metallerin çevreye ve insan yaşamına olumsuz etkileri üzerine sıklıkla çalışmalar yapılmaktadır. Kurşunun da, hammadde veya yan ürün olarak birçok sanayi ürününün üretiminde kullanılması nedeniyle bu olumsuz etkilere neden olduğu yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konmuştur (Ahmed vd., 2015).

Toksik etkiye sahip kurşun, hava ile soluyarak, su ve toprak yoluyla ise yiyecekler de birikerek canlı metabolizmalarına ulaşmaktadır. Ekosistem döngüsü içerisinde havaya salınan kurşun atmosfere ulaşır ve tekrar yağmurların etkisiyle yeryüzüne inerek hava kirliliğine neden olmaktadır. Kurşunun elde edildiği ve kullanıldığı her türlü

endüstrinin(metal, akü ve pil fabrikaları, petrol rafinerileri, boya endüstrisi ve patlayıcı sanayii) atık sularının yeraltı ve yüzeysel sulara karışması sonucunda sularda da kurşun kirliliğine rastlanmaktadır (Aksoy, 2009).

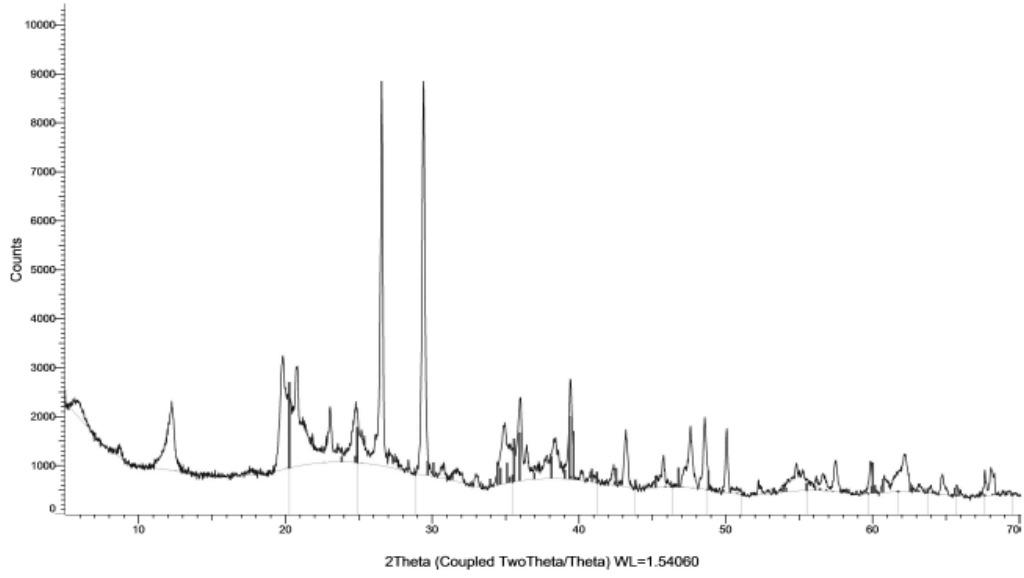
Kurşun gibi ağır metallerin atık sulardan uzaklaştırılmasında kimyasal çöktürme, elektrokoagülasyon, iyon değiştirme, organik çözücü ekstraksiyonu ve adsorbsiyon yöntemleri yoğunlukla kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın ve kolay uygulama alanı bulan yöntem ise adsorbsiyon yöntemidir (Öncel, 2016).

## 4.BULGULAR VE TARTIŞMA

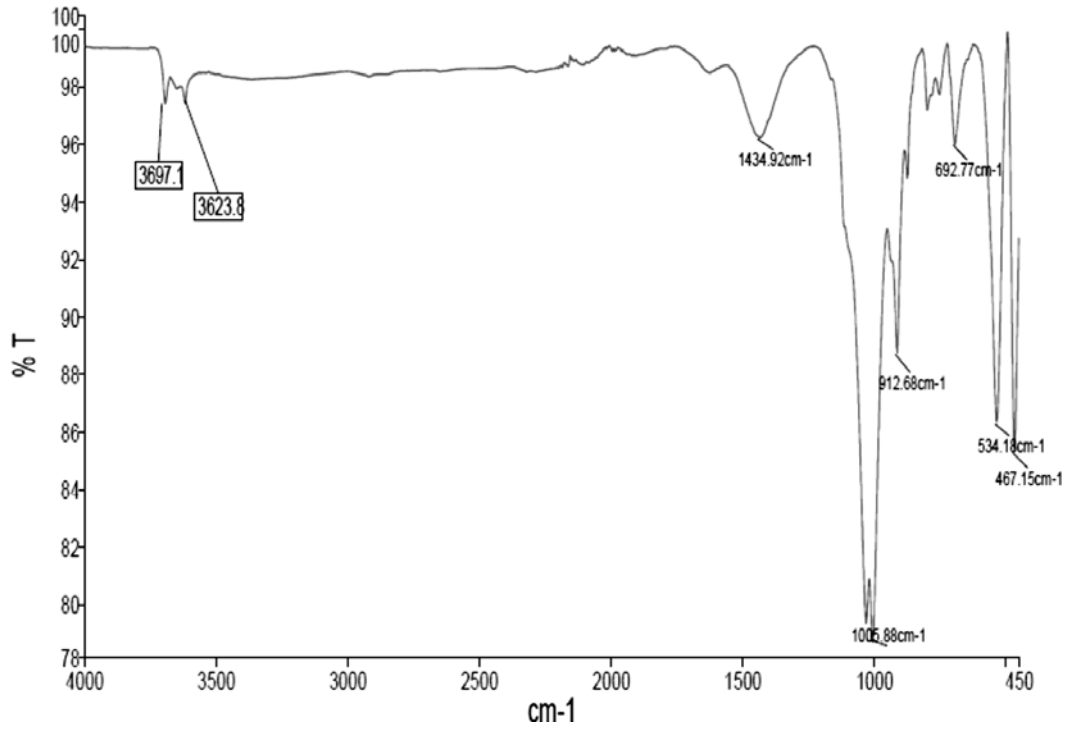
### 4.1. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

Adsorpsiyon deneyleerinde kullanılan taban külü, Niğde ili Bor ilçesi Şeker Fabrikası atık sahasından alınmış olup %80 civarında kül, %20 civarında ise yanabilir madde içeriğine sahip olduğu bilinmektedir. Taban külü öncelikle merdaneli kırıcıda -2 mm boyutuna kırıldıktan sonra paslanmaz çelik yapıya sahip çubuklu değirmende öğütülerek 250 mikron boyutuna indirilmiş ve adsorpsiyon deneyleerinde adsorbant olarak kullanılmıştır. Adsorpsiyon deneyleinde kullanılan numune üzerinde Bayburt Üniversitesi Merkez Labaratuvarlarında mevcut XRD (X-Işını Difraktometresi) , FTIR (Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazları kullanılarak analizler yapılmıştır. Şekil 4.1’de numune üzerinde gerçekleştirilen XRD analizi neticesinde kuvars, müllit, magnetit, kalsit, dolamit ve amorf madde gibi çeşitli içeriklere sahip olduğu görülmüştür.

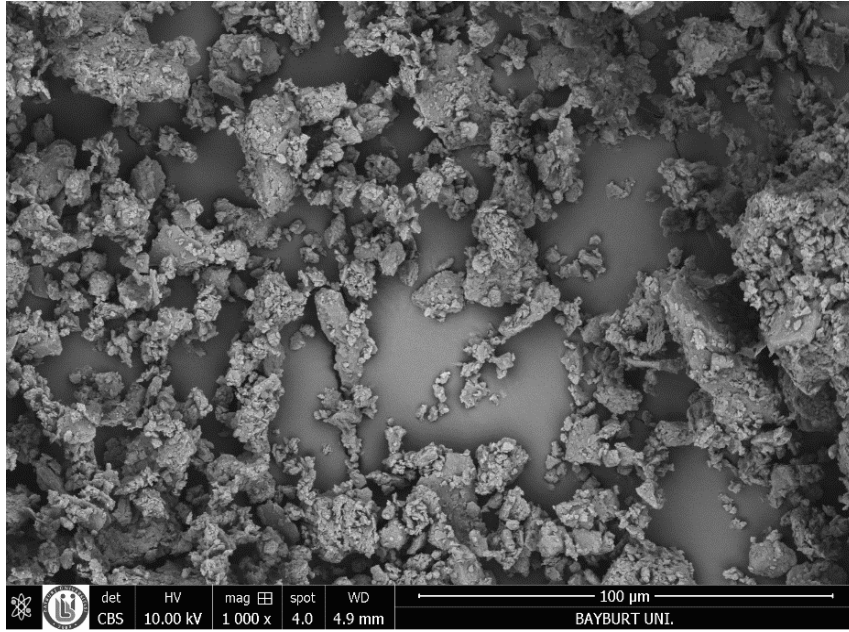
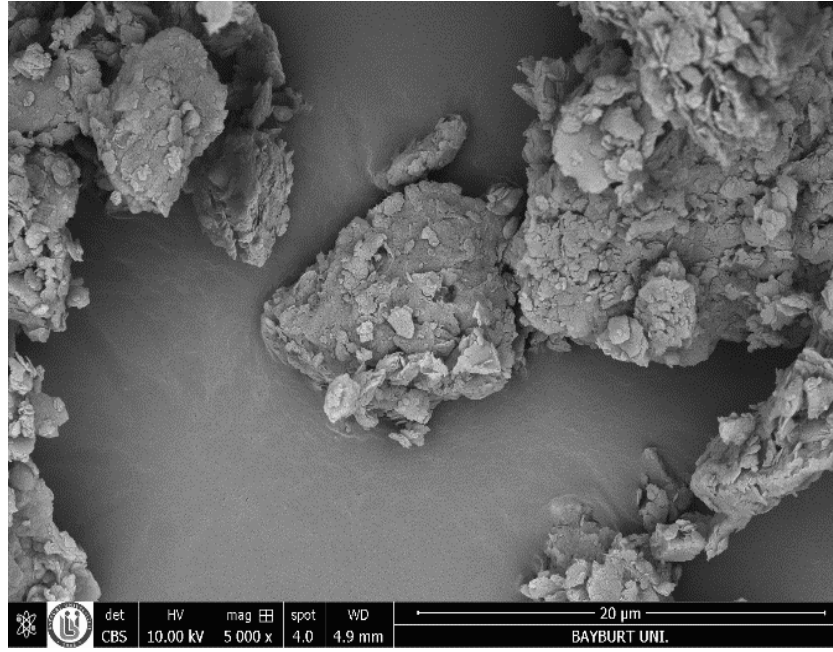
Taban külünün fonksiyonel ve yapısal grupları Şekil 4.2’de verilen FTIR analizi ile belirlenmiştir. FTIR analizinde 3300 cm<sup>-1</sup> spektrumu genellikle keskin ve sağlam C-H bağlarını, 1500–1600 cm<sup>-1</sup> halka içinde zayıf ve orta C=C bağlarını, 1350-1450 cm<sup>-1</sup> yoğun bir pik olmasa da güçlü sülfat S=O bağlarını, 1050-1200 cm<sup>-1</sup> güçlü C=S tiokarbonil bağlarını, 700-100 cm<sup>-1</sup> ise güçlü S-O-R bağlarını göstermektedir (Reusch, 2013). Üzerinde çalışılan taban külünün bu bağların hepsine sahip olduğu FTIR analizinden anlaşılmaktadır. Numuneye ait SEM analizi 20 ve 100 mikron için Şekil 4.3’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.4 ‘de görüldüğü üzere nokta element analizinden Si başta olmak üzere Ca, Fe, Al ve Mg ağırlıklı olarak görülmektedir.



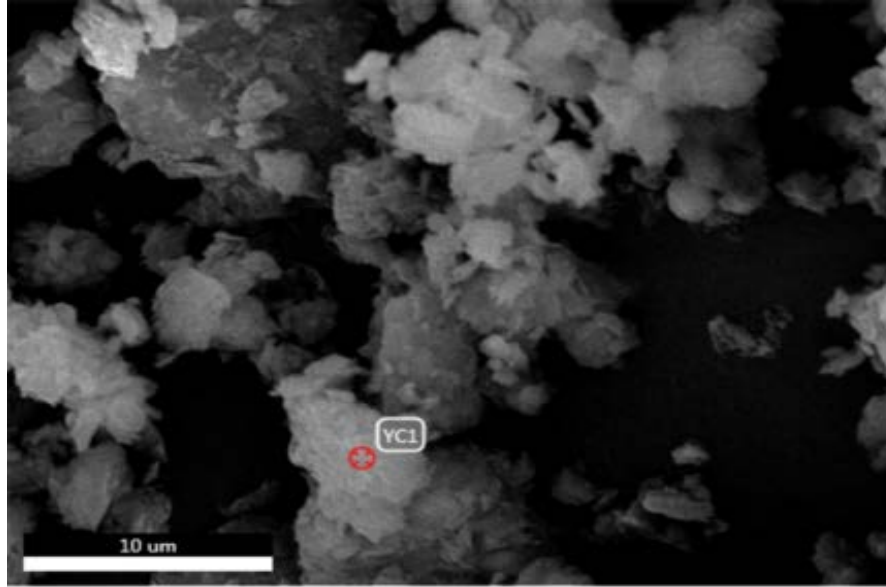
Şekil 4.1. Taban Külünü XRD Analizi



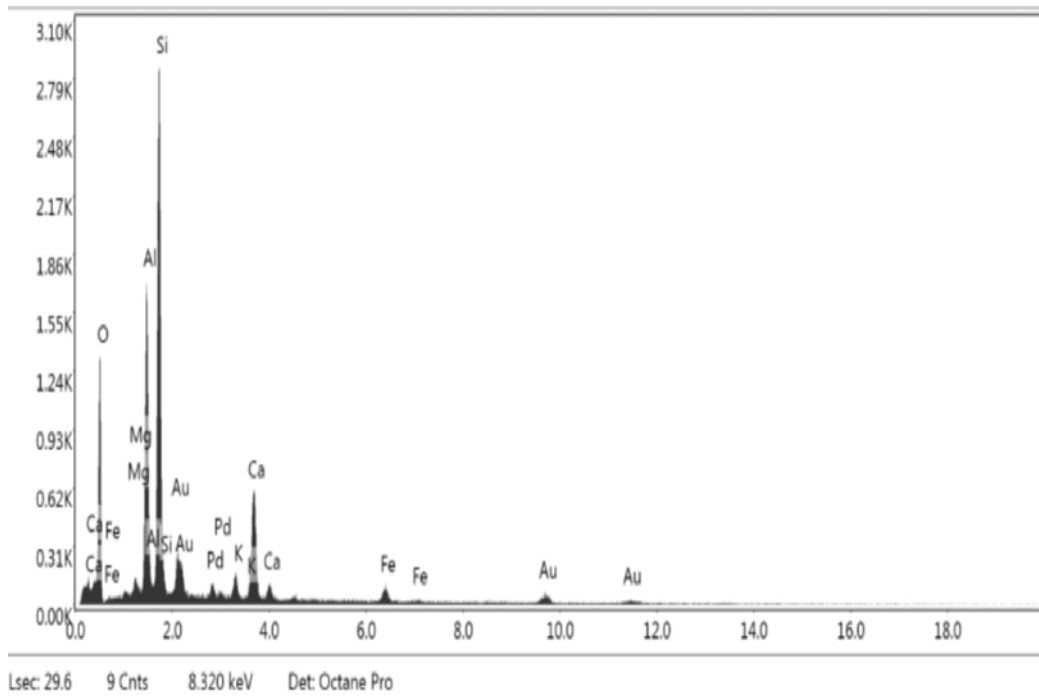
Şekil 4.2. Taban Külünü FTIR Analizi



Şekil 4.3. Taban Külünü'nün SEM Analizi



(a)



(b)

Şekil 4.4. Taban külünün EDS nokta analizi (a) Nokta analizinin SEM görüntüsü, (b) Nokta analiz sonucu.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde birim adsorbant üzerine adsorplanan madde miktarından yararlanılmıştır. Adsorpsiyonun matematiksel ifadesi  $q_e$  olarak verilir ve birimi de mg/g'dır.  $q_e$ 'nin anlamı, gram miktar adsorban başına adsorplanan mg adsorbattır. Adsorpsiyon ifadesinin denklemi:

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) * V}{M * 1000} \quad (4.1)$$

$q_e$  = Birim adsorban üzerine adsorplanan madde miktarı (mg/g),

$C_o$  = Çözeltinin başlangıç ağır metal konsantrasyonu (ppm, mg/L) ,

$C_e$  = Adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan ağır metal konsantrasyonu (ppm, mg/L) ,

$V$  = Çözeltinin hacmi (mL),

$M$  = Kullanılan adsorban miktarı (gr).

Adsorpsiyonlarda,  $q_e$  değerinin büyük olması, adsorbanın adsorplama kapasitesinin büyük olması anlamına gelmektedir (Kayacan, 2007).

Bu çalışmada kullanılan Pb(II) stok çözeltisinin hazırlanmasında Merck firmasının üretmiş olduğu saf kurşun ( $Pb(NO_3)_2$ ) kimyasalı kullanılmıştır. Kullanılan adsorban öncelikle 105 °C etüvde 2 saat kurutulmuştur. Deneylede deiyonize saf sudan yararlanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Kurşun iyonu derişimi 1000 mg/L olan stok çözelti hazırlanmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Kurşun Stok Çözeltisi





Şekil 4.6. Seyreltilmiş Kurşun Çözeltisi

Adsorpsiyon deneylerinde kullanılan 100 mL metal çözeltisi (Şekil 4.6). pH ayarları seyreltik  $\text{HNO}_3$  ve  $\text{NaOH}$  çözeltileri ile yapılarak pH ölçümleri JENCO marka 6173 model pH metre ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7.a). Adsorpsiyon deneylerinde karıştırma işlemi, oda sıcaklığında ISOLAB marka 613.01.001 modele sahip manyetik karıştırıcıda 1000 devir/dak.'da yapılmıştır (Şekil 4.7.b).



(a)

(b)

Şekil 4.7. (a) Deneysel Çalışmalarda Kullanılan pH metre

(b) Deney Çalışmalarında Kullanılan Manyetik Karıştırıcı

Deney sonrası katı sıvı ayırımı Wathmann Grade 4 kalitatif filtre kağıdı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.8.a). Elde edilen yüklü sıvı çözeltilerinin (Şekil 4.8.b)



(a)

(b)

Şekil 4.8. (a) Katı-Sıvı Ayırma İşlemi

(b) Katı-Sıvı Ayırımı Sonrası Elde Edilen Yüklü Çözeltiler

Pb (II) iyonu derişimleri Gümüşhane Üniversitesi'nde bulunan Agilent firmasının 4200 model mikro plazma atomik emisyon spektrometresi (MP-AES) ile belirlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Plazma Atomik Emisyon Spektrometresi

## 4.2. Deney Tasarımlarının Oluşturulması

Deneysel çalışmalar Yates ve Taguchi deney tasarımları için ayrı ayrı aynı faktör ve seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Yates-VARAN analizi yönteminde dört faktör (pH, İlk Metal Konsantrasyonu, Adsorbant Miktarı ve Adsorpsiyon Süresi) belirlenmiş olup buna bağlı olarak  $2^4$  deney desenine göre adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere faktörlerin düşük, orta ve yüksek değerleri verilmiştir. Bu değerlerin düşük ve yüksek olanları ilk etap deneylerde kullanılmıştır ve Çizelge 4.2’de verilen deney deseni baz alınarak on altı adsorpsiyon deneyi yapılmıştır. Orta değerlerle de ise üç adet aynı şartlarda adsorpsiyon deneyleri tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.1. Yates Deney Tasarımı Deney Faktörleri ve Seviyeleri

Faktörler	Birimi	Faktör Kodu	Yates Sembolü	Düşük Seviye (-1)	Orta Seviye (0)	Yüksek Seviye (1)
pH	-	X <sub>1</sub>	a	4	5	6
İlk Metal Konsantrasyonu	ppm	X <sub>2</sub>	b	150	250	350
Adsorbant Miktarı	gr	X <sub>3</sub>	c	0,25	0,5	0,75
Adsorpsiyon Süresi	dak.	X <sub>4</sub>	d	10	20	30

Çizelge 4.2. 2<sup>4</sup> Yates Deney Deseni

Yates Kodu	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
(1)	-	-	-	-
a	+	-	-	-
b	-	+	-	-
ab	+	+	-	-
c	-	-	+	-
ac	+	-	+	-
bc	-	+	+	-
abc	+	+	+	-
d	-	-	-	+
ad	+	-	-	+
bd	-	+	-	+
abd	+	+	-	+
cd	-	-	+	+
acd	+	-	+	+
bcd	-	+	+	+
abcd	+	+	+	+

Taguchi ile ilgili deneysel çalışmalarda ise Yates deneylerinde olduğu gibi pH, ilk metal konsantrasyonu, adsorban miktarı ve adsorpsiyon süresi faktörleri çalışılmıştır. Çizelge 4.3’de söz konusu faktörler ve seviyeleri topluca verilmiştir. Bu faktörlerin seviyelerinin etkisinin araştırılmasında ise Çizelge 3.9’de verilen L<sub>18</sub> (3<sup>4</sup>) ortogonal deney deseni kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. adsorbsiyon deneylerinde qe değerinin en yüksek seviyede olması istendiği için deney sonuçlarının S/N oranına dönüştürülmesinde Eşitlik 3.5’de verilen “En Yüksek En İyi” yaklaşımı kullanılmıştır.

Çizelge 4.3. Taguchi Deney Tasarımı Deney Faktörleri ve Seviyeleri

Faktör Kodu	Faktör	Birimi	Seviyeler		
			1	2	3
A	pH	-	4	5	6
B	İlk Metal Konsantrasyonu	ppm	150	250	350
C	Adsorban Miktarı	gr	0,250	0,500	0,750
D	Adsorpsiyon Süresi	dak.	10	20	30

Ortogonal dizinin seçiminde faktörlerin toplam serbestlik derecesi dikkate alınmıştır. VARAN analizinde hesaplamalar faktörler ve seviyeleri kullanılarak yapıldığı

için belirlenen 4 faktörün bu 3 seviyesi aynı sayıda çalışılmıştır. Çizelge 4.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4.  $L_{18} (3^4)$  Ortogonal Deney Deseni

Deney No	Faktör ve Seviyeleri			
	A Faktörü	B Faktörü	C Faktörü	D Faktörü
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	1	3
5	2	2	2	1
6	2	3	3	2
7	3	1	2	3
8	3	2	3	1
9	3	3	1	2
10	1	1	3	1
11	1	2	1	2
12	1	3	2	3
13	2	1	2	2
14	2	2	3	3
15	2	3	1	1
16	3	1	3	2
17	3	2	1	3
18	3	3	2	1

### 4.3. Yates Deney Tasarımı Çalışmaları

Yates deney tasarımı kullanılarak taban külünün Pb(II) adsorplama kapasitesi ( $q_e$ ), pH, ilk metal konsantrasyonu, adsorban miktarı ve adsorpsiyon süresi faktörleri ile araştırılmıştır. Belirlenmiş deney faktörlerinin etkisinin araştırılmasında Çizelge 4.1'de verilen düşük, orta ve yüksek değerler kullanılmıştır. Çizelge 4.2'de verilen deney deseninde 16 deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen  $q_e$  (mg/g) değerleri Çizelge 4.5'de verilmiştir. Yates düzenlemesine göre yapılan deneylerde temel etki ve iç etkileşimler göz önünde bulundurularak Eşitlik 3.2'de verildiği gibi bir model elde edilmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar, hesaplanan (Y) değeri ve faktörlerin orta değerleri ile yapılan üç adet adsorpsiyon deneyinin sonuçları Yates deney tablosu olarak Çizelge 4.6'de sunulmuştur.

Çizelge 4.6'daki Kolon 9'un hesaplanmasında kullanılan deney ortalaması ve  $S^2$  değeri Eşitlik 3.1 gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Orta değerlerle yapılan bu üç deneyin qe değerleri sırasıyla 38,26 - 39,57 - 38,97 mg/g olarak bulunmuştur. Hesaplama işlemi ise şu şekildedir;

$$\text{Deney Ortalaması} = n_{\text{ort}} = [38,26+39,57+38,97] / 3 = 38,94,$$

$$S^2 = [(n_1-n_{\text{ort}})^2 + (n_2-n_{\text{ort}})^2 + (n_3-n_{\text{ort}})^2] / (n-1) ,$$

$$S^2 = [(38,26-38,94)^2 + (39,57-38,94)^2 + (38,97-38,94)^2] / 2,$$

$$S^2 = 0,43 \text{ tür.}$$

Çizelge 4.5. Yates Deney Tasarımına Göre Yapılan Adsorpsiyon Deney Sonuçları

Yates Deney Düzeni	qe (mg/g)
1	19,81
a	59,48
b	47,34
ab	112,33
c	17,17
ac	19,93
bc	29,63
abc	46,47
d	36,12
ad	59,82
bd	78,49
abd	119,88
cd	16,87
acd	19,96
bcd	34,87
abcd	46,58

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \beta_3 * X_1 * X_2 + \beta_4 * X_3 + \beta_5 * X_1 * X_3 + \beta_6 * X_2 * X_3 + \beta_7 * X_1 * X_2 * X_3 + \beta_8 * X_4 + \beta_9 * X_1 * X_4 + \beta_{10} * X_2 * X_4 + \beta_{11} * X_3 * X_4 + \beta_{12} * X_1 * X_2 * X_4 + \beta_{13} * X_1 * X_3 * X_4 + \beta_{14} * X_2 * X_3 * X_4 + \beta_{15} * X_1 * X_2 * X_3 * X_4$$

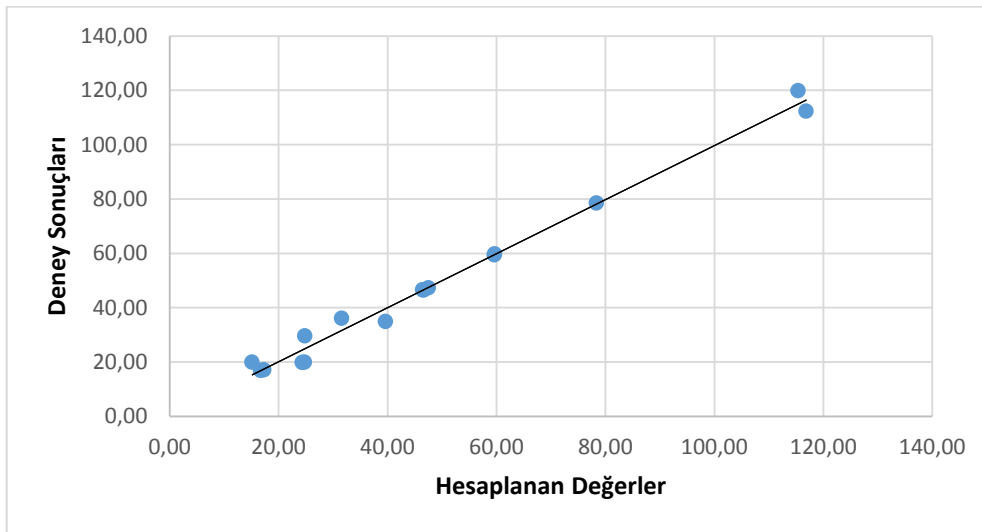
$\beta_0$  = Yapılan 16 deneyin ortalamasıdır.

$\beta_{1-15}$  = Toplam Etki kolonundaki değerlerin deney sayısına bölünmesi sonucu elde edilir.

$X_1, X_2, X_3$  ve  $X_4$  değerleri Çizelge 4.2'de belirlenen faktörlerin seviyelerini (-1, +1) ifade etmektedir.

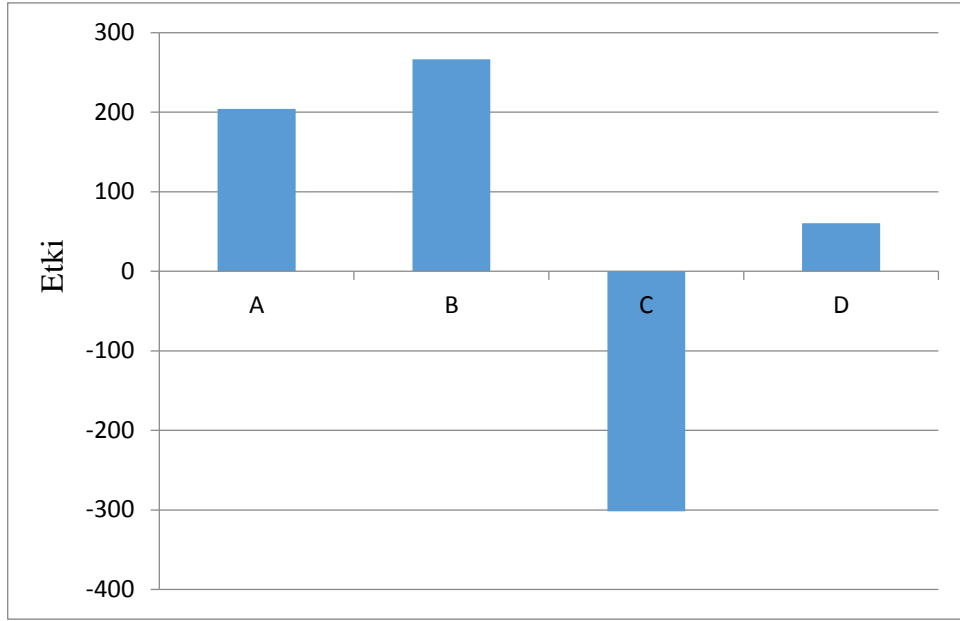
$X_1 * X_2 * X_3 * X_4$  değişkeni Çizelge 4.6'daki Yates sonuç çizelgesinde etkin değil olarak belirlendiği için denkleme dâhil edilmemiştir.

$\hat{Y} = 47,80 + (12,76)*(-1) + (16,65)*(-1) + (4,11)*(-1*-1) + (-18,86)*(-1) + (-8,46)*(-1*-1) + (-6,20)*(-1*-1) + (-1,27)*(-1*-1*-1) + (3,78)*(-1) + (-2,77)*(-1*-1) + (1,73)*(-1*-1) + (-0,82)*(-1*-1*-1) + (-3,14)*(-1*-1) + (2,17)*(-1*-1*-1) + (-1,03)*(-1*-1*-1) = 24,32$  örneğinde olduğu gibi  $\hat{Y}$  kolonu  $X_1, X_2, X_3$  ve  $X_4$  değerleri yerlerine yazılarak bulunmuştur.



Şekil 4.10. Deney Sonuçları ve Hesaplanan Değerler Arasındaki İlişki Grafiği

Şekil 4.10'da deney sonuçları ve hesaplanan değerler için artıkların normallik varsayımı gösterilmiştir. Burada deney sonuçları ile elde edilen model yardımı ile hesaplanan qe (mg/g) değerleri arasında sapmaların çok az olduğu düzgün bir dağılım olduğu görülmektedir. Sonuçların bu şekilde karşılaştırılması oluşturulan modelin doğruluğunu test etmeye yardımcı olmaktadır.



Şekil 4.11. Faktörlerin Etki Grafiği

Adsorpsiyon deneyleri kapsamında çalışılan faktörlerin hangisinin daha etkin olduğunun ve hangi faktörün deney sonucunu hangi yönde etkilediğinin gösterilmesinde Şekil 4.11'deki grafikten yararlanılmıştır. Bu grafiğin oluşturulmasında Çizelge 4.6'daki Toplam Etki (TE) değeri baz alınmıştır. Söz konusu şekil incelendiğinde adsorpsiyon deneylerine C faktörü yani adsorban miktarının negatif yönde en fazla etki ettiği görülmektedir. Bu faktörden sonra ise deneyleri pozitif yönde etkileyen en etkin faktör B (ilk metal konsantrasyonu) daha sonra A (pH) ve son olarak D (adsorban miktarı) faktörleri olduğu görülmektedir.



Çizelge 4.6. Yates Deneş Tasarımı Sonuç Çizelgesi

Yates Deneş Düzeni	Deneş Sonuçları	Kolon	Kolon	Kolon	Toplam Etki	$[TE]^2/16$	S.D.	Fhesap	Ftablo	KARAR	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Ŷ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	19,81	79,30	238,96	352,17	764,75	36552,28	1	85052,50	4,49	E	-1	-1	-1	-1	24,32
a	59,48	159,67	113,20	412,58	204,15	2604,86	1	6061,18	4,49	E	1	-1	-1	-1	59,62
b	47,34	37,11	294,30	124,26	266,42	4436,12	1	10322,28	4,49	E	-1	1	-1	-1	47,47
ab	112,33	76,10	118,28	79,89	65,70	269,82	1	627,83	4,49	E	1	1	-1	-1	116,84
c	17,17	95,93	104,66	119,36	-301,77	5691,72	1	13243,91	4,49	E	-1	-1	1	-1	17,31
ac	19,93	198,36	19,60	147,06	-135,34	1144,89	1	2664,00	4,49	E	1	-1	1	-1	15,15
bc	29,63	36,83	65,09	39,39	-99,18	614,83	1	1430,64	4,49	E	-1	1	1	-1	24,85
abc	46,47	81,45	14,80	26,31	-20,31	25,78	1	60,00	4,49	E	1	1	1	-1	46,60
d	36,12	39,67	80,37	-125,76	60,41	228,12	1	530,80	4,49	E	-1	-1	-1	1	31,61
ad	59,82	64,99	38,99	-176,02	-44,37	123,03	1	286,27	4,49	E	1	-1	-1	1	59,68
bd	78,49	2,76	102,43	-85,06	27,70	47,94	1	111,55	4,49	E	-1	1	-1	1	78,35
abd	119,88	16,84	44,63	-50,29	-13,08	10,69	1	24,88	4,49	E	1	1	-1	1	115,37
cd	16,87	23,70	25,31	-41,38	-50,26	157,87	1	367,34	4,49	E	-1	-1	1	1	16,73
acd	19,96	41,39	14,08	-57,80	34,77	75,55	1	175,80	4,49	E	1	-1	1	1	24,74
bcd	34,87	3,09	17,69	-11,24	-16,42	16,86	1	39,23	4,49	E	-1	1	1	1	39,65
abcd	46,58	11,71	8,62	-9,08	2,16	0,29	1	0,68	4,49	ED	1	1	1	1	46,45
Ort. 1	38,26														
Ort. 2	39,57														
Ort. 3	38,97														

Yates deney tasarımının son adımı olan optimizasyon aşamasıdır. Optimizasyon deney şartları Çizelge 3.5’de gösterildiği gibi “steepest ascent” metoduna göre belirlenmiştir. Bu çalışmada adsorpsiyon deneyleri için etkin olarak belirlenen deney faktörlerinden yararlanılmıştır. Çalışılan deney faktörlerinin etkinliğinin araştırılması Çizelge 4.6 Kolon 11’ de gösterilmiştir. Ayrıca optimizasyon çalışmasında Çizelge 3.1’de verilen faktörlerin orta seviyeleri kullanılmıştır. Bu durum Çizelge 4.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.7. Optimizasyon Deneyleri Şartları İçin Hesaplamalar

Faktör	pH	İMK	Adsorban Miktarı	Adsorbsiyon Süresi
Temel Adım	5	250	0,5	20
Artış, $\Delta Z_j$	1	100	0,25	10
Katsayı, $b_j$	12,76	16,65	-18,86	3,78
$\Delta Z_j * b_j$	12,76	1665	-4,715	37,8
Normal Adım	$12,76/50 = 0,26$	$1665/50 = 33,30$	$-4,715/50 = -0,09$	$37,8/50 = 0,76$

Optimizasyon adımında, Çizelge 4.7’deki  $\Delta Z_j * b_j$  satırı ne kadar büyük bir katsayıya bölünürse daha küçük bir oran elde edileceği için, deney hassasiyeti de bir o kadar artacaktır. Bununla birlikte orta değerden başlanarak “+” ya da “-” yönde etki edecek olan oran değeri düştükçe deney sayısı da artacaktır. Tez çalışmasında bu payda katsayısı 50 olarak belirlenmiş ve normal adım satırında orta değerleri pozitif ya da negatif şekilde etkileyecek oranlar elde edilmiştir. Hesaplanan adım değerleri kullanılarak yeni adsorpsiyon deney şartları Çizelge 4.7’de oluşturulmuştur. Söz konusu çizelgede gösterildiği gibi 4 adıma kadar devam edilmiştir. Optimizasyon deney şartları göz önünde bulundurulduğunda daha fazla deney yapılabileceği görülmektedir. Fakat Pb (kurşun) adsorbsiyonu gerçekleştirilirken pH faktörünün kısıtlayıcı faktör olduğu gözlemlenmiştir. Çünkü pH yüksek değerlerde çalışıldığında, kurşun iyonlarının çözelti içerisinde çökmesi hızlanmakta ve adsorbsiyon için kullanılan külün deneylerdeki etkisini gözlemlemeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, adsorban miktarı faktörünün adsorbsiyon deneylerindeki etkinliğini belirlemeyi zorlaştırmaktadır (Gündoğdu, 2010).

Çizelge 4.8. Optimizasyon DeneYleri Çalışma Şartları

Optimizasyon DeneY Şartları				
	pH	İlk Metal Konsantrasyonu	Adsorban Miktarı	Adsorbsiyon Süresi
1	5,26	283,30	0,41	20,46
2	5,51	316,60	0,31	21,32
3	5,77	349,90	0,22	22,18
4	6,02	383,20	0,12	23,04

pH kısıtı altında ve hesaplamalar sonucunda optimizasyon aşamasında çözelti pH'ı en fazla 6 seviyesine kadar çıkartılmış ve dört deney yapılması öngörülmüştür. Yapılan deneylerin sonuçları ise Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Optimizasyon DeneYleri Sonuçları

Optimizasyon DeneY Sonuçları					
	pH	İlk Metal Konsantrasyonu	Adsorban Miktarı	Adsorbsiyon Süresi	qe Sonucu
1	5,26	283,30	0,41	20,46	62,67439
2	5,51	316,60	0,31	21,32	96,02097
3	5,77*	349,90*	0,22*	22,18*	146,9023*
4	6,02	383,20	0,12	23,04	135,6708

\* Optimum faktör değerleri

Adsorbsiyon deneylerinde amaç, çözelti içerisindeki kurşun iyonlarının adsorblanma miktarını yükseltmektir. Bu amacı gerçekleştirmek için en yüksek etkiye sahip olan adsorban miktarı ve ilk konsantrasyon miktarı faktörlerinin en uygun seviyelerini belirlemek oldukça önemlidir. pH kısıtının yanı sıra optimizasyon için Çizelge 4.8'de gösterildiği gibi deney sayısı arttıkça adsorban miktarı giderek azalmakta, ilk konsantrasyon miktarı artmaktadır. Bu durumun deney sonuçlarına etkisi ise Çizelge 4.9'de görülmektedir. Dördüncü deneye kadar qe (mg/g) değerlerinde giderek artan sonuçlar elde edilmiştir. Üçüncü deneyde 146,9023 Pb(II) mg/g ile de en yüksek seviyesine ulaşmıştır. Dördüncü deneyde ise bu değer 135,6708 Pb(II) mg/g seviyesine

düştür. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi beş ve üzerinde deney yapılması da çalışma açısından çok büyük bir önem teşkil etmemektedir. Sonuç olarak optimum deney şartları 5,77 pH değeri, 349,90 ppm ilk metal konsantrasyonu, 0,22 gr adsorban miktarı ve 22,18 dk adsorpsiyon süresi optimum değerler olarak belirlenmiştir.

Literatürde uygulanan Yates deney tasarımı çalışmalarında optimum sonuçlara ulaşıldığı gibi yüksek lisans çalışmasında da optimum sonuçlar elde edilmiştir. Çalışılan bu iki deney tasarımının laboratuvar çalışması kapsamında elde edilen gerçek hayat verileri ile karşılaştırılması açısından önem arz etmektedir.

#### 4.4. Taguchi Deney Tasarımı Çalışmaları

Yates deneysel çalışmalarında kullanılan faktör ve seviyeleri Taguchi çalışmalarında da kullanılarak bu değerler Çizelge 4.3’de birlikte verilmiştir. Bu faktörlerin seviyelerinin etkisinin araştırılmasında ise Çizelge 4.4’de verilen Taguchi deney deseni kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deney sonuçlarının S/N oranına dönüştürülmesinde ise Eşitlik 3.5’de verilen “En Yüksek En İyi” yaklaşımı kullanılmıştır. Deneylelerden elde edilen adsorpsiyon kapasitesi ( $q_e$ ) ve S/N (dB) değerleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Adsorpsiyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

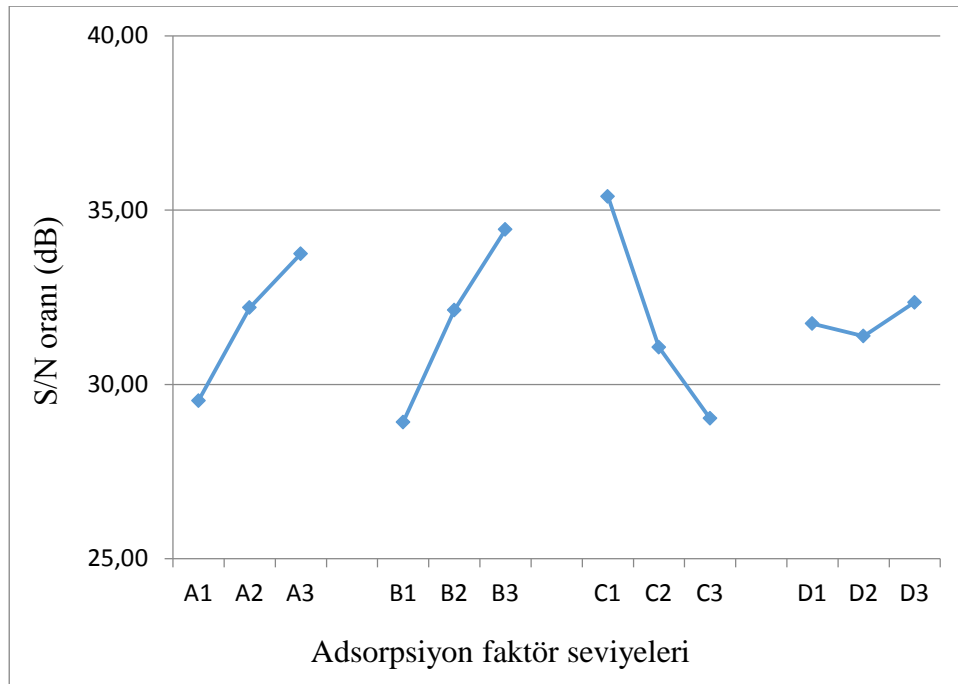
Deney No	$q_e$ (mg/g)	S/N (dB)
1	32,53	30,24
2	30,54	29,70
3	34,50	30,76
4	49,76	33,94
5	36,62	31,27
6	41,06	32,27
7	29,76	29,47
8	33,17	30,41
9	98,40	39,86
10	17,53	24,87
11	37,74	31,54
12	32,01	30,10
13	28,24	29,02
14	31,25	29,90
15	69,32	36,82
16	19,83	25,94
17	99,68	39,97
18	69,53	36,84
Ortalama	43,97	31,83

Adsorpsiyon için faktörlerin optimum seviyelerinin tespitinde, o faktörün çalışılan tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N (dB) oranına göre bir tespit yapılmıştır. Deneysel sonuçları baz alınarak elde edilen S/N (dB) sonuçlarının her bir faktör seviyesi için ortalamaları Çizelge 4.11’de verilmiştir. Ayrıca faktörlerin deneye etkilerinin grafiği Şekil 4.12’teki gibi gösterilmiştir. Faktörler için en iyi seviyelerin pH için üçüncü seviye olan 6’da, ilk metal konsantrasyonu için yine üçüncü seviye olan 350 ppm’de, adsorban miktarı için birinci seviye olan 0,250 gr’da ve adsorpsiyon süresi için ise 30 dakikada elde edildiği görülmektedir. Yani, söz konusu adsorpsiyon çalışması için faktör optimum seviye kodları A3B3C1D3 şeklinde bulunmuştur.

Çizelge 4.11. Faktörlerin S/N (dB) Etkinlik Değerleri

Faktör	Seviyeler		
	1	2	3
pH	29,54	32,2	33,75*
İlk Metal Kon.	28,91	32,13	34,44*
Adsorban Mik.	35,39*	31,07	29,03
Süre	31,74	31,39	32,36*

\*En yüksek S/N (dB) değerleri



Şekil 4.12. Faktör Etkilerinin Grafikselleştirilmesi

VARAN çizelgesinin oluşturulması için öncelikle serbestlik derecesi, kareler toplamı, toplam karelerin toplamı, faktör etkisi ve FHesap sütunlarının hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış ve sonuçları Çizelge 4.12 VARAN çizelgesinde birlikte gösterilmiştir. Her bir faktöre ait  $F_{Hesap}$  değeri elde edildikten sonra bu faktörlerin etkin olup olmadıkları F tablosu kullanılarak ortaya konulmuştur. Hesaplanan F değeri %95 güven seviyesinde her bir faktör için serbestlik derecesi pay için 2 ve payda için 9 olmak üzere F çizelgesinden okunan kritik  $F(0,05;2;9)$  değeri ile karşılaştırılarak %95 güven seviyesinde etkin olan faktörler belirlenmiştir. F çizelgesindeki  $F(0,05;2;9)$  değeri 4,256 olup;  $F_{Hesap}$  değeri 4,256'dan büyük olan faktörler Etkin, küçük olan faktörler Etkin Değil olarak kabul edilmiştir. Bu durumda Çizelge 4.12 incelendiğinde ilk üç faktörün adsorpsiyonda etkin faktörler oldukları görülmektedir. Etkinlik sırası açısından ise faktör etkisine (%) bakıldığı zaman adsorban miktarının (gr) %42,29 ile ilk sırada yer aldığı daha sonra ilk metal konsantrasyonunun (ppm) %30,94 etkinlik değeri ile ikinci sırada bulunduğu ve etkinlik açısından son sırada %18,18 değeri ile pH'ın yer aldığı görülmektedir. Adsorpsiyon süresi ise çalışılan faktörler içinde tek etkin olmayan faktör olmuştur.

Çizelge 4.12. Taguchi Deney Tasarımı VARAN Çizelgesi

	Serbestlik derecesi	Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	Faktör Etkisi	FHesap	F Tablo Değeri	Sonuç
pH	2	54,40	27,20	18,18	10,73	4,256	ETKİN
İlk Met. Kon.	2	92,57	46,29	30,94	18,25	4,256	ETKİN
Adsor. Mik.	2	126,55	63,27	42,29	24,95	4,256	ETKİN
Süre	2	2,90	1,45	0,97	0,57	4,256	ETKİN DEĞİL
Hata	9	22,82	2,54	7,63			
Toplam	17	299,24		100,00			

Çizelge 4.12'deki varyans analizi çizelgesine göre pH, ilk metal konsantrasyonu, adsorban miktarı faktörlerinin etkin olduğu, adsorpsiyon süresinin ise etkin olmadığı belirlenmiştir. Etkin ve etkin değil kararları göz önünde bulundurularak doğrulama deneyleri yapılmıştır. Böylelikle varyans analizi sonucunda elde edilen sonuçların doğruluğu deneysel açıdan da kontrol edilmiş olmaktadır. Bu durumda optimum çalışma seviyelerinin A faktörünün 3. Seviyesi (A3), B faktörünün 3. Seviyesi (B3), C faktörünün 1. Seviyesi (C1), D faktörünün 1. Seviyesi (D1) olarak tespit edilmiştir. Burada deney

süresini etkilediği için zamandan tasarruf edebilmek açısından etkin olmadığı belirlenen adsorbsiyon süresi faktörünün 1. seviyesi optimum olarak kabul edilmiştir. Bu veriler ışığında, deney tasarımı sonucunda elde edilen L18 ortogonal dizininde bu faktörlerin belirlenen seviyelerinde (A3B3C1D1) kombinasyonunun olup olmadığı kontrol edilir. Çalışma kapsamında belirlenen ortogonal dizinde A3B3C1D1 kombinasyonunun çalışılmamış olduğu görülmektedir. Böylelikle,

$$\text{pH} = 6,$$

$$\text{İlk Metal Konsantrasyonu (ppm)} = 350 \text{ ppm},$$

$$\text{Adsorban Miktarı (gr)} = 0,25 \text{ gr},$$

$$\text{Adsorbsiyon Süresi (dk.)} = 10 \text{ dak. olan}$$

deney şartlarında 3 tane tekrarlı doğrulama deneyi yapılarak bulunan sonuçların S/N değerlerinin ortalaması, hesaplanan tahmini sonuç ile karşılaştırılması Taguchi deney tasarımının doğruluğunu kanıtlamaya da yardımcı olacaktır. A3B3C1D1 şartlarında yapılan üç deneyin  $q_e$  (mg/g) sonuçlarının ortalama değeri 92,82 Pb(II) mg/g olup S/N oranlarının ortalaması ise 39,33 dB olmuştur.

Adsorbsiyon çalışması için, VARAN analizi sonucunda birinci, ikinci ve üçüncü faktörlerin etkin olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, hesapla doğrulama deneylerinde bu üç faktörün S/N değer ortalamaları kullanılmıştır. Yani birinci faktör pH için en iyi sonucu üçüncü seviyede elde edilmiş olduğundan bu seviyenin S/N bazında ortalaması daha önce verildiği gibi 33,75 dB olup, ikinci faktör ilk metal konsantrasyonu için yine üçüncü seviye en iyi olup, değeri ise 34,44 dB ve üçüncü faktörün ise birinci seviyesi en iyi olup değeri ise 35,39 dB'dir. Buradan hareketle hesaplanan doğrulama deneyi Eşitlik 3.9 kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\bar{m} = 31,83 + [(33,75 - 31,83) + (34,44 - 31,83) + (35,39 - 31,83)] = 39,92 \text{ dB}$$

elde edilmektedir. Doğrulama deneyi aşağıdaki Çizelge 4.13' da gösterilmiştir;

Çizelge 4.13. Doğrulama Deneysel Sonuçları

	Hesaplanan	Doğrulama deneyi
Seviye	A3B3C1D1	A3B3C1D1
Sonuç	S/N=39,92 dB qe = 94,21 mg/gr	S/N=39,33 dB qe = 92,82 mg/g

Çizelge 4.13’da hesaplanan S/N oranı değeri 39,92 dB ve doğrulama deneyi sonucu elde edilen S/N oranı değeri 39,33 dB olarak bulunmuş ve karşılaştırıldığında birbirine çok yakın değerler elde edildiği görülmüştür. S/N değerleri göz önünde bulundurularak hesaplanan tahminî değer ve VARAN analizi sonucu belirlenen faktör seviyeleri ile gerçek hayatta yapılan deneylerin birbirine yakın sonuçlar vermiş olması Taguchi deney tasarımının adsorbsiyon deneylerine uygulanmasında optimum sonuçlar alındığını ortaya çıkarmaktadır.

Adsorban miktarı azaldıkça qe (mg/g) değerinin artmasının nedeni ise, çekim kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Partiküller birbirlerine çok yaklaştıklarında, interatomik kuvvetler etkin hale gelmektedir. Bu kuvvetlerden en önemlisi London- Van de Walls kuvvetidir. Bu kuvvet moleküller içindeki dipol veya farklı şarjlardan oluşmaktadır. İki yüzey birbirlerinin çok yakınına getirildiğinde bu kuvvet hakim duruma geçmekte ve sonuçta koagülasyon meydana gelmektedir (İpekoğlu, 1990). Genel olarak her iki deney tasarımının optimizasyon sonuçları incelendiğinde tüm faktör seviyeleri için her iki deney tasarımında birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin adsorban miktarı için Yates deney tasarımında en iyi değer 0,22 gr iken bu değer Taguchi deney tasarımında 0,25 gr olarak tespit edilmiştir. Burada adsorban miktarının çalışılan en düşük seviyelerde çıktığı da görülmektedir. Bunun nedeni olarak yukarıda bahsedildiği gibi tanelerin kaogüle (topaklanması) sonucu adsorbanın toplam yüzey alanının düşmesinin neticesinde olduğu düşünülmektedir.

Literatürde Taguchi deney tasarımının uygulandığı çalışmalarda olduğu gibi bu çalışmada da doğrulama deneyleri ve analizler sonucunda elde edilen sonuçlar birbiriyle örtüşmektedir. Böylelikle bu deney tasarımının birçok alanda kullanılmasının yanı sıra adsorbsiyon deneylerinde de belirlenen faktörler ve seviyelerinde tasarımcıya yol gösterici olabileceği istatistiksel açıdan gösterilmiştir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında Yates ve Taguchi deney tasarımları laboratuvar ortamında yürütülen adsorbsiyon deneyleri ile uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma deneylerinde;

- Deney faktörleri ve seviyelerinde,
- Deney malzemelerinde,
- Deneylerin yapılma şartlarında ve deney ortamında,
- Deney sonuçlarının alındığı makine ve teçhizatlar da herhangi bir değişiklik yapılmadan bir takım Yates bir takımda Taguchi için adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Bu iki deney tasarımı için belirlenen uygulama adımları takip edilerek deneyler gerçekleştirilmiş, sonuçlar elde edilmiştir. Her iki tasarım için de elde edilen optimum şartlar ve  $q_e$  değeri temelli nihai sonuçlar kolay karşılaştırma yapılabilmesi için Çizelge 5.1’de özet olarak tekrar verilmiştir.

Çizelge 5.1. Optimum Yates ve Taguchi Faktör Değerleri ve Nihai Sonuçları

	Yates Deney Tasarımı	Taguchi Deney Tasarımı
pH	5,77	6
İlk Metal Konsantrasyonu (ppm)	349,90	350
Adsorban Miktarı (gr)	0,22	0,25
Adsorbsiyon Süresi (dk)	22,18	10
$q_e$ (mg/g)	146,90	92,82
Toplam Yapılan Deney Sayısı (adet)	23	21

Çizelge 5.1.’deki sonuçlar karşılaştırıldığında her iki deney tasarımı için faktörlerin seviye değerleri birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fakat deney tasarımlarını birbirinden ayıran ilk ve en önemli nokta Taguchi deney tasarımında belirlenen faktör seviye değerlerinde doğrulama deneyleri yapılabilmekteyken, Yates deney tasarımı belirlenen faktör seviyelerinden farklı deney şartları belirleyebilmekte ve optimizasyon

yapılmasına izin vermektedir. Optimizasyon sonrası  $q_e$  (mg/g) sonuçları karşılaştırıldığında ise, Yates deney tasarımının 146,90 mg/g değeri ile daha yüksek bir sonuca gidebildiği yönündedir.

Deney tasarımı yapmanın amaçları arasında girdi faktörlerinin maliyetlerini minimum seviyede tutarak en iyi (bu çalışma için en yüksek değeri) sonucu elde etmektir. Çalışmada adsorban miktarı girdi faktörleri arasındadır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler için fazla miktarlarda kullanılmamış olsa da gerçek hayat problemlerinde daha fazla atık su için daha yüksek miktarlarda kullanıldığında maliyet artacaktır.

Tartışma ve sonuç bölümünde adsorban miktarı faktörünün her iki deney tasarımı için de en etkin faktör olduğu grafikler yardımıyla açıklanmıştır. Yates deney tasarımının üstünlüğü, daha az adsorban kullanılarak Taguchi deney tasarımı ile neredeyse aynı ilk metal konsantrasyonuna ve pH'a sahip çözeltiyi adsorbe edilebilmesidir. Bu iki deney tasarımı etkin faktörler açısından karşılaştırıldığında Yates deney tasarımının adsorban miktarı bakımından daha az girdi ile daha iyi sonuçlar verebileceği görülebilmektedir.

Diğer faktörler açısından incelendiğinde, her iki tasarımında da ilk metal konsantrasyonları ve pH değerleri açısından birbirine çok yakın sonuçlar elde etmiştir. Faktörler açısından son olarak, adsorbsiyon süresi Taguchi deney tasarımı için etkin değil, Yates deney tasarımı için ise diğer faktörlere oranla daha az etkin olarak belirlenmiştir. Daha kısa sürede daha iyi sonuçlar elde edilebildiği için adsorbsiyon süresinin bu iki deney tasarımı için de düşük seviyelerinin kullanılabilmesi sonucu çıkarılabilir.

Deney tasarımı yapmanın amaçlarından bir diğeri de, daha az deney yaparak daha iyi sonuçlar gözlemleyebilmektir. Yates deney tasarımında 16 tane ortogonal düzende, 3 tane orta seviyelerle, optimizasyon aşamasında ise 4 tane olmak üzere toplam da 23 deney yapılmıştır. Taguchi deney tasarımında 18 tane ortogonal düzende, 3 tane doğrulama deneylerinde olmak üzere toplam da 21 deney yapılmıştır. Birbirlerine yakın sayıda deney yapılarak optimum sonuçlar elde edilmiştir. Bunun nedeni ise, her ikisinin de ortogonal dizinler kullanan kısmî faktöriyel deney tasarımları olmalarıdır.

Son olarak Taguchi deney tasarımı VARAN analizi sonucunda faktörlerin ana etkileri üzerine yoğunlaşırken, Yates deney tasarımı faktörlerin ana etkileri ile beraber iç etkileşimleri de göz önünde bulundurmaktadır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ahmed, I.M., Helal, Aly A., El Aziz, N.A., Gamal, R., Shaker, N.O., Helal, A.A., 2015, "Influence of some organic ligands on the adsorption of lead by agricultural soil", arabian journal of chemistry, doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.03.012(in press).
- Akhanazarova, S., Kafarov, V., 1982, "Experimental optimization in chemistry and chemical engineering", Mir Publications, p.312.
- Allen, H.E., Garrison, A.W. ve Luther, G.W., 1998, "Metals in Surface Waters", Ann Arbor Press, p.43-45.
- Aksoy, S., 2009, "Bazı killer kullanılarak atık sularda bulunan ağır metallerin adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırılması ve cevap yüzeyi metodu ile adsorpsiyon koşullarının optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.2-8.
- Arpa, C., Alim, C., Bektaş, S., Genç, Ö., Denizli, A., (2001), "Adsorption of heavy metal ions on polyhydroxyethylmethacrylate microbeads carrying Cibacron Blue F3GA", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 176(2-3), 225-232.
- Arslan, V., Bayat, O., 2008, "Feldspattaki demirin oksalik asit liçi ile uzaklaştırılması", Bilimsel Madencilik Dergisi, Cilt:47, Sayı:1, s.35-41.
- Arslan, V., Bayat, O., 2008, "Kimyasal liç ve biyoliç yöntemleri ile kaolen cevherlerinden demirin uzaklaştırılması", Sayı:3, s.175 – 184.
- Aytekin, A.G., 2010, "Kalite geliştirme sürecinde en iyileme problemlerine deney tasarımı yönteminin uygulanması", Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, s.24-61.
- Aytekin, F.G., 2014, "Fotolitografi işleminde uv sertleştirme faktörlerinin deney tasarımı ile eniyilenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.26-28.
- Bayar, D., 2001, "Sulu çözeltiden adsorbsiyonla bor giderimi ve deney tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.91-92.
- Baynal, K., Altuğ, G.S., Ünal, H.İ., 2012, "Ortodontik tellerin korozyon davranışının klasik deney tasarım yöntemi ile belirlenmesi", TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi, cilt 53, sayı 629, s. 48-54.
- Berrios, M., Gutierrez, M.C., Martin, M.A., Martin, A., 2009, "Application of the factorial design of experiments to biodiesel production from lard", Fuel Processing Technology, 90(12), p.1447-1451.
- Crawford, M.R., Turner, A.D., Wyatt, J.K., Fogg, L.F., Ong, J.C., 2016, "Evaluating the treatment of obstructive sleep apnea comorbid with insomnia disorder using an incomplete factorial design", Contemporary Clinical Trials, 47, p.146-152.
- Çakal, H., O., 2010, "Sac levha kesiminde deney tasarımı ile kalite iyileştirme", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.73-83.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Çalışkan, O., 2014, “Tornalamada talaş kaldırma faktörlerinin takım ömrüne etkilerinin taguchi yaklaşımıyla incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi , Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.47.
- Çömlekçi, N., 2003, “Deney Tasarımı İlke ve Teknikleri”, Alfa Yayınları, s.20.
- Demir, L., 2004, “İstatistiksel deney tasarımı yöntemi ve bir tekstil işletmesinde uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.7.
- Doğan, N., 2005, “Ağır metal gideriminde tarımsal atık kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.8.
- Efendioğlu, D., 2013, “Pem yakıt hücresi performansının deney tasarımı kullanılarak optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.11-19.
- Gever, B., Güneş, B.N., Gülel, D., Ataseven, E.B., Saatçioğlu, Ö., Bebek, Z.S., (2015), “Bir üretim işletmesinin verileri kullanılarak çarpımsal deney tasarımı ile taguchi yaklaşımının karşılaştırılması”, Journal Of Industrial Engineering (Turkish Chamber Of Mechanical Engineers), 26(1).
- Gökçe, B., Taşgetiren, S., 2009, “Kalite İçin Deney Tasarımı”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt: 6, Sayı: 1, s.71-83.
- Güler, G., 2013, “Planyalanmış kızılçam (pinus brutia ten.) ürünlerinde taguchi deney tasarımı ile optimum işleme şartlarının belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.44-46.
- Gündoğdu, A., 2010, “Fabrika çay atıklarından aktif karbon üretimi, karakterizasyonu ve adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.116-120.
- Güneş, S., 2015, “Honlama prosesinde yüzey kalitesini etkileyen faktörlerin Taguchi metodu ile optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.69-72.
- İpekoğlu, Ü., 1990, “Susuzlandırma (Katı – Sıvı Ayırımı) ve Yöntemleri”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, s. 36.
- Karagöz, N., 2014, “Taguchi metodunun hava aracı kanat tasarımı sürecine uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.11-14.
- Kasap, Ş., 2006, “F-4 uçaklarında yakıt tüketimini etkileyen faktörlerin 2k deneyleri ve taguchi yöntemiyle belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.13-14.
- Kumaş, E., 2011, “Mühendisler için istatistiksel deney tasarımında hazırlık aşaması”, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.23-25.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lazic, Z.R., 2004, “Design of Experiments in Chemical Engineering A Practical Guide”, WILEY-VCH, p.157-165.
- Mezarcıöz, S. ve Oğulata, R. T., 2010, “Süprem Kumaşlarda Patlama Mukavemeti Değerinin Taguchi Ortogonal Dizayna Göre Optimizasyonu”, Tekstil ve Konfeksiyon, sayı: 4, s. 320–328.
- Monser, L., Adhoum, N., 2002, “Modified activated carbon for the removal of copper, zinc, chromium and cyanide from wastewater” Separation And Purification Technology, 26(2-3), 137-146.
- Montgomery, D.C., 2001, “Design and Analysis of Experiment”, John Wiley&Sons, Inc, p.2.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining, G.G., 2012, “Introduction to linear regression analysis”, John Wiley&Sons, Vol. 821.
- Naik, P. K., Reddy, P.S.R., Misra, V.N., 2004, “Optimization of coal flotation using statistical technique”, 85, p. 1473-1485.
- Naik, P. K., Reddy, P.S.R., Misra, V.N., 2005, “Interpretation of interaction effects and optimization of reagent dosages for fine coal flotation”, 75, p. 83-90.
- Okumuş, F., 2015, “Taş yünü üretim tesisinde hata türü ve etkileri analizi ile taguchi deney tasarımının birlikte uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.50-51.
- Öncel, M.S., 2016, “Doğal kil minerali beydellit ile sulu çözeltilerden Co(II) adsorpsiyonu”, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, s. 617-630.
- Özbay, N., Yargıç, A.Ş., 2018, “Statistical analysis of Cu( II ) and Co II ) sorption by apple pulp carbon using factorial design approach”, Journal Of Industrial And Engineering Chemistry, 57, p.275-283.
- Özensoy, E., 1982, “Teknolojik Ve Bilimsel Araştırmalarda Modern Deney Tasarımcılığı Ve Optimizasyon Yöntemleri”, Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Yayınları, s.26-38.
- Öztop, M., 2007, “Taguchi deney tasarımı yöntemi ile alüminyum ekstrüzyon prosesinin iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.62-64.
- Öztürk, F.D., 2017, “Disten cevherinin sarsıntılı masa ile zenginleştirilmesinde etkin faktörlerin optimizasyonu”, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, Cilt: 8, Sayı: 4, s.883-890.
- Phadke, M.S., 1989, “Quality Engineering Using Design Of Experiments, Quality Control, Robust Design And The Taguchi Method”, Edited By K. Denhad, Wadsworth & Brooks/Cole, p.31 – 32.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Reusch, W., 2013, "Infrared Spectroscopy" lecture notes, <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/infrared/infrared.htm> Michigan State University Department of Chemistry, USA, erişim tarihi 05.11.2018.
- Sağol, E., 2015, "İstatistiksel deney tasarımının Çayırhan bölgesi linyitlerinin flotasyonunda uygulanması", Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.23-27.
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M., 2004, "Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu", İTÜ Mühendislik Dergisi, Cilt: 3, Sayı:6, s.117-128.
- Şanyılmaz, M., 2006, "Deney tasarımı ve kalite geliştirme faaliyetlerinde taguchi yöntemi ile bir uygulama", Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.8-24.
- Sever, E., İskenderun demir çelik fabrikası atıklarına biyoliç uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006.
- Şenoğlu, B., Acıtaş, Ş., 2010, "İstatistiksel Deney Tasarımı", Nobel Akademik Yayıncılık, s.3-7.
- Şimşek, B., 2014, "Hazır betonun optimal karışım oranlarının belirlenmesi için bir çok yanıtli modelleme ve en iyileme uygulaması: topsis tabanlı taguchi yaklaşımı ile cevap yüzey yöntemi", Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.61-65.
- Şirvancı, M., 1997, "Kalite İçin Deney Tasarımı Taguchi Yaklaşımı", Literatür Yayınları, s.1-16, s.75-80.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y., 2005, "Taguchi's Quality Engineering Handbook, Hoboken, NJ: John Wiley&Sons, vol.1736, p.169-483.
- Taguchi, G., Clausing, D., 1990, "Robust Quality", Harvard Business Review, Cilt: 68, Sayı: 1, p. 65-75.
- Taylan, D., 2009, "Taguchi deney tasarımı uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.43-44.
- Tok, S., 2009, "Doğal zeolit (klinoptilolit) ile bakır adsorpsiyonu", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.26-29.
- Zümrüt, Z., 2009, "Tam faktöriyel deney tasarımı tekniği ile hidroksiapatit kaplı titanyum implant malzemelerin mekanik özellikleri üzerine faktörlerin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.73-74.