

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



**YONGA LEVHA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ KİMYASAL
ARITIMI VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EREN ER

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



YONGA LEVHA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ KİMYASAL
ARITIMI VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE
OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EREN ER

Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Elif ÖZMETİN (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK

Yrd. Doç. Dr. Baybars Ali FİL

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

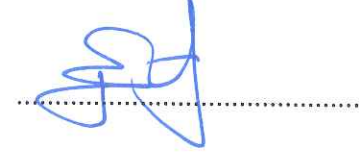
KABUL VE ONAY SAYFASI

Eren ER tarafından hazırlanan “YONGA LEVHA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ KİMYASAL ARITIMI VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 21.06.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

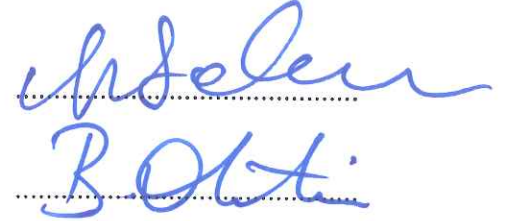
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Elif ÖZMETİN



Üye
Prof. Dr. Hüseyin SELÇUK



Üye
Yrd. Doç. Dr. Baybars Ali FİL

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

YONGA LEVHA ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ KİMYASAL ARITIMI VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EREN ER

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. ELİF ÖZMETİN)

BALIKESİR, HAZİRAN - 2016

Yonga levha endüstrisinde ağacın sahip olduğu selülozik ve lignin yapı haricinde üretim sırasında kullanılan hammaddeler yüzünden yüksek organik madde ve askıda katı madde içeriğine sahip atıksular meydana gelmektedir. Bu atıksuların yeniden kullanılabilmesi veya alıcı ortama deşarj edilebilmesi için arıtılması gerekir. Bu çalışmada arıtma tesisinin her aşamasında maliyeti düşürmek ve iyi bir arıtım sağlamak amacıyla koagülasyon-flokülasyon işlemlerinin optimize edilmesi düşünülmüştür. Yüksek maliyetleri düşürmek ve işlem sürelerini azaltmak için genellikle deney tasarımı yöntemleri kullanılmaktadır. Bu nedenle çalışmada, farklı kimyasal koagülant maddeleri kullanılarak yonga levha endüstrisine ait atıksuların arıtımının yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyonu araştırılmıştır. Yapılan denemelerde koagülant olarak Alum, Demir (III) Klorür ve Polialüminyum Klorür (PAC) kullanılmış ve her bir kimyasal koagülantın atıksudaki Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve Askıda Katı Madde (AKM) giderim verimi üzerine koagülant dozu ve pH etkileri incelenmiştir. Klasik jar testi deneyleri 2 dk 120 rpm hızlı karıştırma, 30 dk 30 rpm yavaş karıştırma ve 60 dk. çöktürme şeklinde uygulanmıştır. Flokülasyon yardımcısı olarak kullanılan anyonik polielektrolit bütün kimyasallar için 2 mL/L olarak alınmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda optimum şartlar Alum için; pH:9, doz:4 g/L, Demir (III) Klorür için pH:7, doz:3,4 g/L ve PAC için ise pH:9, doz:6 mL/L olarak belirlenmiştir. Bu optimum şartlarda KOİ giderim verimleri Alum, Demir(III) Klorür ve PAC için sırasıyla % 72,59, % 78,36 ve % 73,55 olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda yapılan deneylerde AKM giderim verimleri alum, demir(III) klorür ve PAC için sırasıyla % 98,23, % 95,13 ve % 99,06 olarak elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Kimyasal koagülasyon, Yanıt yüzey yöntemi, Yonga levha endüstrisi atıksuları

ABSTRACT

CHEMICAL TREATMENT OF PARTICLE BOARD INDUSTRY WASTEWATER AND OPTIMIZATION BY RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

MSC THESIS

EREN ER

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ELİF ÖZMETİN)
BALIKESİR, JUNE 2016**

Because of the raw materials used in production from tree without cellulose and lignin structure in the particle board industry, wastewaters with containing of a high organic matter and suspended solids occur. This wastewater should be treated of reuse or discharge to environment. In this study, it is thought to optimize the coagulation-flocculation processes to reduce costs and to ensure effective treatment at the treatment plant. Experimental design methods are usually used to reduce the high costs and to reduce processing times. For this purpose, the optimization using RSM for treatment of the particle board industry wastewater with different chemical coagulant agents has been investigated. In experiments, Alum, Iron (III) chloride and poly-aluminum chloride (PAC) coagulant agents were used. In the research, effect of coagulant dosage and pH on removal efficiency of chemical oxygen demand (COD) and total suspended solids (TSS) were examined for each chemical coagulant. Conventional jar test experiments were applied as 2 min and 120 rpm for high speed mixing, 30 min and 30 rpm for slow speed mixing and 60 min for precipitation. Anionic polyelectrolyte which are used as flocculation agent was added as 2 mL/L for all chemical coagulants. As a result optimum conditions, were found as pH 9 and dose of 4 g/L for Alum, pH 7 and dosage of 3.4 g/L for Iron (III) Chloride and pH 9 and dose of 6 mL/L for PAC. COD removal efficiencies for Alum, Iron (III) Chloride and the PAC in optimum conditions were found as 72.59%, 78.36% and 73.55%, respectively. In experiments carried out under the same conditions TSS removal efficiencies for alum, iron (III) chloride and PAC were obtained as 98.23%, 95.13% and 99.06%, respectively.

KEYWORDS: Chemical coagulation, Response surfaca methodology, Particle board industry

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1 Yonga Levha Endüstrisi	2
1.1.1 Dünya’da Levha Sanayi	3
1.1.2 Türkiye’de Levha Sanayi	5
1.2 Yonga Levha Üretiminin Genel Aşamaları	7
1.3 Yonga Levha Atıksu Arıtma Tesisi	9
1.4 Kimyasal Arıtma Prosesi	10
1.4.1 Kolloidlerin Özellikleri	11
1.4.2 Yüzey Yükünün Düşürülmesi	13
1.4.3 Elektriksel Çift Tabaka	13
1.4.4 Kolloidin Stabilitesinin Bozulması (Destabilizasyon).....	14
1.4.5 Koagülantlar ve Yardımcı Maddeleri	16
1.5 Deney Tasarımı	20
1.5.1 Deney Tasarımı Adımları	22
1.5.2 Deney Tasarım Yöntemleri	22
1.6 Literatür Taraması	30
2. MATERYAL VE METOT	35
2.1 Materyaller	35
2.1.1 Kullanılan Atıksuyun Temini ve Karakterizasyonu	35
2.1.2 Kullanılan Cihazlar	37
2.1.3 Deney Düzeneği	37
2.1.4 Kullanılan Kimyasallar	38
2.2 DeneySEL Metotlar	39
2.2.1 YYY ile DeneySEL Tasarım	39
2.2.2 Kimyasal Arıtım ve DeneySEL Yöntem	41
3. BULGULAR	43
3.1 Alum İçin DeneySEL Sonuçlar	43
3.1.1 KOİ Giderimi	43
3.1.2 AKM Giderimi	46
3.2 Demir III Klorür İçin DeneySEL Sonuçlar	49
3.2.1 KOİ Giderimi	49
3.2.2 AKM Giderimi	52
3.3 Polialüminyum Klorür İçin DeneySEL Sonuçlar	55
3.3.1 KOİ Giderimi	55
3.3.2 AKM Giderimi	58
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
5. KAYNAKLAR	65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Yonga levha üretiminin genel aşamaları.....	8
Şekil 1.2: Yonga levha endüstrisi atıksu arıtma tesisi akım şeması	10
Şekil 1.3: Yüklü partiküller	12
Şekil 1.4: Yüksüz partiküller	13
Şekil 1.5: Su içerisindeki bir tanecik yüzeyinde yüklerin gösterimi	14
Şekil 1.6: Alüminyum hidroksitin çözünürlüğü	18
Şekil 1.7: Demir hidroksitin çözünürlüğü	19
Şekil 1.8: Bir sistem veya sürecin genel gösterimi.....	21
Şekil 1.9: 2 düzeyli ve 2 faktörden oluşan tasarım.....	23
Şekil 1.10 2 düzeyli ve 2 faktörden oluşan tasarım	24
Şekil 1.11: 2 ² MKT deneme düzeni.....	29
Şekil 1.12: 2 ³ MKT deneme düzeni.....	29
Şekil 2.1: KOİ kalibrasyon grafiği	36
Şekil 2.2: Jar testi düzeneğine ait şematik gösterim	38
Şekil 2.3: Deneysel çalışmalardan bir fotoğraf.....	38
Şekil 3.1: KOİ giderim verimi pH – Alum dozu contour grafiği	45
Şekil 3.2: KOİ giderim verimi pH - Alum dozu surface grafiği.....	45
Şekil 3.3: AKM giderim verimi pH-Alum dozu contour grafiği.....	48
Şekil 3.4: AKM giderim verimi pH-Alum dozu surface grafiği	48
Şekil 3.5: KOİ giderim verimi pH-FeCl ₃ dozu contour grafiği	51
Şekil 3.6: KOİ giderim verimi pH-FeCl ₃ dozu surface grafiği	51
Şekil 3.7: AKM giderim verimi pH-FeCl ₃ dozu contour grafiği	54
Şekil 3.8: AKM giderim verimi pH-FeCl ₃ dozu surface grafiği	54
Şekil 3.9: KOİ giderim verimi pH-PAC dozu contour grafiği	57
Şekil 3.10: KOİ giderim verimi pH-PAC dozu surface grafiği	57
Şekil 3.11: AKM giderim verimi pH-PAC dozu contour grafiği	60
Şekil 3.12: AKM giderim verimi pH-PAC dozu surface grafiği.....	60

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Dünya levha üretimi (m ³).....	5
Tablo 1.2: 2005-2014 döneminde Türkiye'nin levha ihracatı (\$)	6
Tablo 1.3: Suda bulunan partiküller ve kolloidal maddelerin boyutları.....	11
Tablo 1.4: Koagülantlar	16
Tablo 1.5: MKT eksen noktaları.....	28
Tablo 2.1: Atıksu karakterizasyonu	35
Tablo 2.2: Alum için tasarım faktörleri ve seviyeleri.....	39
Tablo 2.3: Alum için deneysel tasarım matrisi	40
Tablo 2.4: FeCl ₃ için tasarım faktörleri ve seviyeleri.....	40
Tablo 2.5: FeCl ₃ için deneysel tasarım matrisi	40
Tablo 2.6: PAC için tasarım faktörleri ve seviyeleri	41
Tablo 2.7: PAC için deneysel tasarım matrisi	41
Tablo 3.1: Alum koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek-tahmin).....	43
Tablo 3.2: Alum için KOİ giderimi varyans analizi sonuçları.....	44
Tablo 3.3: Alum için KOİ giderimi verimlerinin optimum şartları.....	44
Tablo 3.4: Alum koagülantı ile KOİ giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri	44
Tablo 3.5: Alum koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek-tahmin).....	46
Tablo 3.6: Alum için AKM giderimi varyans analizi sonuçları	47
Tablo 3.7: Alum için AKM giderimi verimlerinin optimum şartları.....	47
Tablo 3.8: Alum koagülantı ile AKM giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri	47
Tablo 3.9: FeCl ₃ koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek-tahmin).....	49
Tablo 3.10: FeCl ₃ için KOİ giderimi varyans analizi sonuçları	50
Tablo 3.11: FeCl ₃ için KOİ giderimi verimlerinin optimum şartları.....	50
Tablo 3.12: FeCl ₃ koagülantı ile KOİ giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri	50
Tablo 3.13: FeCl ₃ koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek-tahmin)	52
Tablo 3.14: FeCl ₃ için AKM giderimi varyans analizi sonuçları.....	52
Tablo 3.15: FeCl ₃ için AKM giderimi verimlerinin optimum şartları	53
Tablo 3.16: FeCl ₃ koagülantı ile AKM giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri	53
Tablo 3.17: PAC koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek-tahmin)	55
Tablo 3.18: PAC KOİ giderimi için varyans analizi sonuçları	56
Tablo 3.19: PAC için KOİ giderimi verimlerinin optimum şartları	56
Tablo 3.20: PAC koagülantı ile KOİ giderimi verimi optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri	56
Tablo 3.21: PAC koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek-tahmin)	58
Tablo 3.22: PAC için AKM giderimi varyans analizi sonuçları	58
Tablo 3.23: PAC için AKM giderimi verimlerinin optimum şartları	59
Tablo 3.24: PAC koagülantı ile AKM giderimi için optimum şartlarda	59
Tablo 4.1: Optimum şartlar.....	62
Tablo 4.2: Koagülantlar için modelden türetilen denklemler.....	62
Tablo 4.3: Doğal pH şartlarında giderim verimleri	63
Tablo 4.4: Koagülant dozlarının en az olduğu şartlar.....	63

Tablo 4.5: Doğal pH ve koagülat dozlarının en az olduğu şartlar	64
Tablo 4.6: Koagülantların ekonomik özelliklerinin karşılaştırılması	64

SEMBOL LİSTESİ

ALUM:	Alüminyum Sülfat
AKM:	Askıda Katı Madde
BOİ:	Biyolojik Oksijen İhtiyacı
DK:	Dakika
DT:	Deney Tasarımı
FeCl₃:	Demir III Klorür
HK:	Hızlı Karıştırma
KOİ:	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
MKT:	Merkezi Kompozit Tasarım
PAC:	Polialüminyum Klorür
RPM:	Devir/Dakika
YK:	Yavaş Karıştırma
YYY:	Yanıt Yüzey Yöntemi

ÖNSÖZ

Bu araştırmanın yapılması ve yürütülmesi konusunda bilgi ve birikimleri ile her zaman desteğini hissettiğim hocam Yrd. Doç. Dr. Elif ÖZMETİN'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma ve araştırmaların her aşamasında fikirlerinden yararlandığım Prof. Dr. Cengiz ÖZMETİN'e ve yardımlarını eksik etmeyen Balıkesir Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümündeki bütün hocalarıma teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım ve tez yazım süresince desteklerini hep yanımda hissettiğim hocalarım Yrd. Doç. Dr. Baybars Ali FİL, Arş. Gör. Mustafa KORKMAZ ve Arş. Gör. Yeliz SÜZEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Atıksu temini ve işletme hakkında yardımlarından dolayı Yıldız Entegre A.Ş. – Manisa Yonga Levha Fabrikası yöneticilerine ve Çevre Mühendisi Şerafettin Saim'e teşekkür ederim.

Değerli arkadaşlarım Eyüp AYHAN ve Selçuk TARCAN'a lisans ve yüksek lisans süresince vermiş oldukları her türlü destekten dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bu tezin her aşamasında ve hayatım boyunca bana maddi manevi destekleri ile güç veren babam Ali ER, annem Mahbube ER ve ablam Gonca ER'e sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Ağaç ve orman ürünleri en eski yapı malzemelerinden biridir. İnsanoğlu yerleşik hayata geçtikten sonra barınma ve korunma amaçlı ağaç ve orman ürünlerini kullanmışlardır. Ağaç malzeme gelişen teknoloji ile beraber hem masif hem de kompozit olarak çok değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Masif ağacın geniş yüzeylerde yetersiz olması, anizotrop yapısı, ormanların yok olma tehlikesi hem de ekonomik sebepler ile teknik yollarla odun hammaddesinden kontrplak, lif levha, yonga levha üretilmektedir.

1940'lı senelerde, doğal kusurlarından arındırılmış, homojen ve izotrop yapıda yonga levha üretilmeye başlanmıştır. Türkiye'de ise bu endüstri 1950'li yıllarda gelişmeye başlanmıştır. Endüstri özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra yeniden yapılandırılan şehirlerde geniş boyutlu malzeme ihtiyacı doğduktan sonra hızla gelişmiştir.

Yonga levha endüstrisinde ağacın sahip olduğu selülozik ve lignin yapı haricinde yonga levha üretimi sırasında kullanılan reçine, sertleştirici, parafin gibi hammaddeler yüzünden yüksek organik madde ve askıda katı madde içeriğine sahip atıksular meydana gelmektedir. Bu atıksuların tesis içerisinde yeniden kullanılabilmesi veya deşarj edilebilmesi için arıtılması gerekmektedir.

Yonga levha endüstrisi atıksuları arıtılırken fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri sırasıyla kullanılmaktadır. Arıtma tesisin her aşamasında maliyeti düşürmek ve iyi bir arıtım sağlamak amacıyla proseslerin optimize edilmesi gerekmektedir. Yüksek maliyet ve uzun süren işlemlerin daha düşük maliyet ve kısa sürelerde etkili çözümler sağlayabilmesi için deney tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Farklı dizaynlar da deney tasarım yöntemleri vardır. Uygulanacak sistemlerde deney sayısı, incelenmek istenen parametreler dikkate alınarak en uygun yöntemin seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, yonga levha endüstrisi atıksularında kimyasal arıtımın Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kullanılarak optimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla konvensiyonel arıtma yöntemlerinden olan kimyasal arıtım tekniği için yonga levha endüstrisinde en etkili koagülant belirlenmeye çalışılmıştır. Bu koagülantlar için optimum doz ve pH'nın arıtma verimi üzerine etkileri incelenmiş, kullanılan üç farklı koagülantla (Alum, Demir III Klorür, Polialüminyum Klorür) atıksudaki Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve Askıda Katı Madde (AKM) gideriminin optimum olduğu şartlar araştırılmıştır.

1.1 Yonga Levha Endüstrisi

Orman ürünleri sanayi, çeşitli amaçlarla ve değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu sanayi ağaç ürünlerini de kapsamakta olup, sektörün kullanılan en yaygın sınıflandırma şekli şöyledir;

a. Birinci İmalat Sanayi

Odunu doğrudan kullanan sanayiler bu grupta yer almaktadır. Elde edilen ürünlere göre birinci imalat sanayi üç ayrı grupta ifade edilmektedir:

- Kereste sanayi
- Levha sanayi
- Kağıt hamuru ve kağıt sanayi

b. İkinci İmalat Sanayi

Birinci imalat sanayinin içerisinde bulunan bıçkı ve levha sanayi kollarından üretilen yarı-mamul ve mamul ürünleri hammadde olarak kullanan orman ürünleridir. Bunlar arasında mobilya, prefabrik ev, parke, doğrama, karoser vs. bulunmaktadır.

c. Diğer Orman Ürünleri Sanayi

Bu grupta silah dipçiği, ahşap oyuncak, ayakkabı kalıbı, müzik aletleri, ahşap torna mamulleri gibi küçük imalat sanayi ile kalem sanayi ve empenye yer almaktadır.

Birinci imalat sanayi grubunda bulunan levha ürünleri ticari olarak dört başlık altında değerlendirilmektedir.

- 1- Yonga Levhalar
- 2- Kontrplak, Kontrtabla
- 3- Lif Levhalar (Düşük, orta ve yüksek yoğunluklu levha ürünleri)
- 4- Kaplama Levhalar

Kaplama levha ve kontrplak doğal ağaç ürünleri iken diğerler ürünler sonradan imal edilen levhalardır. Bunlar ağaç ürünlerinin reçine veya benzeri ürünler ile birleştirilmesi veya preslenmesi ile meydana getirilirler. Bu levha ürünleri arasındaki ayrılıklar kullanılan alanlara göre değişmektedir. Bu alanlardan bazıları dekorasyon, bina yapımı gibidir. Nem direncine göre kullanılan birleştirici maddenin tipi değişmektedir [1].

Yonga levha, “yongaların tutkal ya da uygun yapıştırıcı yardımı ile ısı ve basınç altında büyük ve geniş yüzeyli levhalar haline getirilmesi ile oluşan ve gerek bina yapımında gerekse diğer ihtiyaçlar için kullanılan bir malzemedir” [2].

Levha Sanayi 2015 sektör raporunda ise yonga levha, “odun parçalarından (odun yongaları, rende talaşı, testere talaşı vb.) ve/veya diğer lignoselülozik malzemelerden (kendir ipliği, kenevir ipliği, keten, suyu çıkarılmış şeker kamışı posası vb odunlaşmış bitkilerden) elde edilen yongaların tutkallanıp serme işleminden sonra, sertleştirici madde ve hidrofobik özelliğini sağlayan maddelerinin karıştırılıp sıcaklık ve basınç altında preslenmesiyle elde edilen levhalar” olarak tanımlanmıştır [3].

1.1.1 Dünya’da Levha Sanayi

Yonga levhanın ilk endüstriyel üretimine 1941 senesinde Almanya’da bulunan Tortif Werken A.G. şirketi tarafından Bremen Hemelingren’de başlamıştır. 1946-1948 yılları levha sanayi için modern levha fabrikalarının kuruluş yılları olmuştur. Bu endüstri kolunun Avrupa ülkelerinde doğması ve gelişmesinin nedeni, II. Dünya Savaşı’nın bu ülkelerde yaptığı tahribatın sonucu, diğer yapı malzemelerinde olduğu gibi kereste kullanımında da tasarruf sağlanması ve kereste yerine ucuz, kullanımı ve

boyutları uygun bir yapı malzemesi olarak yeni bir malzemenin ikame edilmesi isteğidir [4].

1994-1998 yılları arasında dünya yonga levha üretiminde sürekli bir artış söz konusudur. 1994'de 59,5 milyon m³ olan üretim 1998 yılında 73 milyon m³ olarak gerçekleşmiştir. 1998 yılı, 17,8 milyon m³'lük üretimi ile ilk sırayı alan ABD ve onu takiben Almanya, Kanada, Çin, Belçika-Lüksemburg ve Polonya dünya yonga levha üretiminde söz sahibi olmuştur. 1998 yılında Türkiye ise dünya üretiminden 1,5 milyon m³'lük pay almıştır [1].

2005-2009 yılları arasında dünya levha üretimi inişli çıkışlı bir eğilim göstermiştir. 2005 senesinde 63,1 milyon m³ olan üretim 2009 senesinde 75,5 milyon m³'e yükselmiştir. 2009-2013 yılları arasında ise sürekli artan bir eğilim gösteren sektörde levha üretimi 2013 yılında 112,8 milyon m³'e yükselmiştir. Levha üretiminin %55'ini gerçekleştiren Çin Halk Cumhuriyeti dünyanın en büyük levha üreticisi konumundadır. 2013 yılında 62,6 milyon m³ levha üreten Çin Halk Cumhuriyeti'ni sırasıyla ABD, Almanya, Brezilya ve Türkiye takip etmektedir. Türkiye, 2009 yılında 4. sırada yer alırken, 2013 yılında 5. sıraya gerilemiştir. Bu düşüşe rağmen Türkiye, dünyanın en büyük 5. levha üreticisi olarak sektör için önemli bir ülke olduğunu ortaya koymuştur [3, 5].

Tablo 1.1: Dünya levha üretimi (m³)

Ülke Adı	2009	2010	2011	2012	2013	2012-2013 Değişim (%)	% Pay
Çin	34 341 000	42 499 000	49 762 000	56 936 000	62 570 000	9,9	55,4
ABD	8 919 400	8 195 350	7 584 750	8 131 000	8 197 000	0,8	7,3
Almanya	4 259 480	4 575 040	4 747 530	5 062 870	5 070 810	0,2	4,5
Brezilya	2 794 540	3 416 410	3 402 000	4 043 000	4 365 000	8,0	3,9
Türkiye	2 950 000	3 300 000	3 585 000	3 915 000	4 300 000	9,8	3,8
Polonya	2 714 090	2 977 070	3 018 130	3 171 420	3 738 460	17,9	3,3
Tayland	1 944 900	2 494 900	2 494 900	2 494 900	2 494 900	0,0	2,2
Rusya Fed.	1 626 000	1 710 000	1 900 000	2 291 000	2 300 000	0,4	2,0
Kore Cum.	1 661 000	1 836 000	1 812 000	1 712 000	1 678 000	-2,0	1,5
Malezya	1 696 000	1 708 000	1 697 000	1 678 000	1 657 000	-1,3	1,5
Kanada	1 361 000	1 314 000	1 277 000	1 290 000	1 320 000	2,3	1,2
İspanya	1 024 600	1 027 810	999 468	984 387	1 228 730	24,8	1,1
Okyanusya	1 326 000	1 256 000	1 269 000	1 183 000	1 162 770	-1,7	1,0
Avustralya&Yeni Zellanda	1 326 000	1 256 000	1 269 000	1 183 000	1 162 770	-1,7	1,0
Fransa	960 000	1 054 200	1 070 610	1 070 610	1 070 610	0,0	0,9
Şili	831 690	955 970	1 003 000	1 006 000	998 000	-0,8	0,9
Japonya	682 000	771 000	834 000	824 000	851 000	3,3	0,8
İngiltere	660 000	776 000	759 000	788 000	756 000	-4,1	0,7
Avusturya	855 225	855 225	860 825	750 000	750 000	0,0	0,7
İtalya	800 000	800 000	760 000	730 000	708 000	-0,3	0,6
Diğerleri	5 123 375	5 377 625	5 784 787	6 605 813	6 462 950	-2,2	5,7
Toplam	77 856 300	88 155 600	95 890 000	105 850 000	112 842 000	6,6	100

1.1.2 Türkiye’de Levha Sanayi

Yaklaşık 400.000 kişiye doğrudan ve 1 milyon kişiye (nakliyat, satış, hizmet vs.) dolaylı istihdam sağlayan levha sektörünün Türkiye’deki büyüklüğü 12 milyar \$ civarındadır. Sektörün 2013 yılı ihracatı 2,4 milyar \$ dır. 2005-2014 döneminde Türkiye’nin levha ihracatı Tablo 1.2 ‘de gösterilmiştir.

Tablo 1.2: 2005-2014 döneminde Türkiye'nin levha ihracatı (\$)

	YONGA LEVHA, OSB VB. LEVHALAR	MED VE LİF LEVHALAR	KONTRPLAK	TOPLAM
2005	627 18	63 272 162	20 238 787	84 138 129
2006	545 388	118 447 381	20 778 841	139 771 610
2007	79 778 670	203 091 933	22 298 460	305 169 063
2008	93 833 272	232 154 050	22 471 236	348 458 558
2009	63 925 858	237 615 659	14 917 214	316 458 731
2010	65 434 172	283 127 072	12 907 185	361 468 429
2011	76 206 898	331 999 989	14 401 302	422 608 189
2012	73 666 502	341 219 560	14 051 216	428 937 278
2013	78 588 869	340 555 879	16 581 595	435 726 343
2014	106 762 237	384 062 544	18 020 475	508 845 256

Levha sektöründe iki önemli alt sektör bulunmaktadır. Birincisi mobilya ve dekorasyon sektörü, ikincisi ise mobilya sektörünün yarı mamul ihtiyacını karşılayan yonga ve lif levha ile ağaç ürünleri sektörüdür. Türkiye’de yonga ve lif levha sektöründe, son yıllarda yatırımlar artmıştır. İleri teknolojiyle dünya standartlarında üretim yapan tesisler kurulmuş ve dünyada söz sahibi olan üretim teknolojisine ve kapasiteye ulaşmıştır.

Türkiye 2014 yılı verileriyle; Yonga levha üretiminde; Dünya’da 5. , Avrupa’da 3. konumdadır, Lif levha (MDF)’de Dünya’da 2. , Avrupa’da 1. ve laminat parke üretiminde Dünya’da 3. , Avrupa’da 2. sırada bulunmaktadır.

Levha sektöründe 25 firma 34 farklı lokasyonda üretimlerini gerçekleştirmektedirler. 5 545 920 m³/yıl yonga levha ve 5 971 200 m³/yıl MDF olmak üzere sektörün tamamının kurulu kapasitesi 11 517 120 m³/yıl’dır

Kapasite kullanım oranları %75-85 olarak değişmekle birlikte, Üretim kapasitesi 2014 Yılı sonu itibariyle 8 500 000 - 9 000 000 m³/yıl’dır.

Lif levha sektöründe faaliyet gösteren 16 fabrikanın büyük çoğunluğu kuru yöntemle üretim gerçekleştirmektedir. Yaş yöntemle çalışan fabrikalar sert lif levha

üretirken, kuru yöntemle çalışan fabrikalar hem sert (HDF) hem de orta sert lif levha (MDF) üretimi yapabilmektedirler.

Levha üretiminde hammadde olarak testere talaşı ile odun ve odun kırıntıları kullanılmakta olup, çimentolu yonga levha üretimi dışında bağlayıcı olarak sentetik bağlayıcı maddeler kullanılmaktadır.

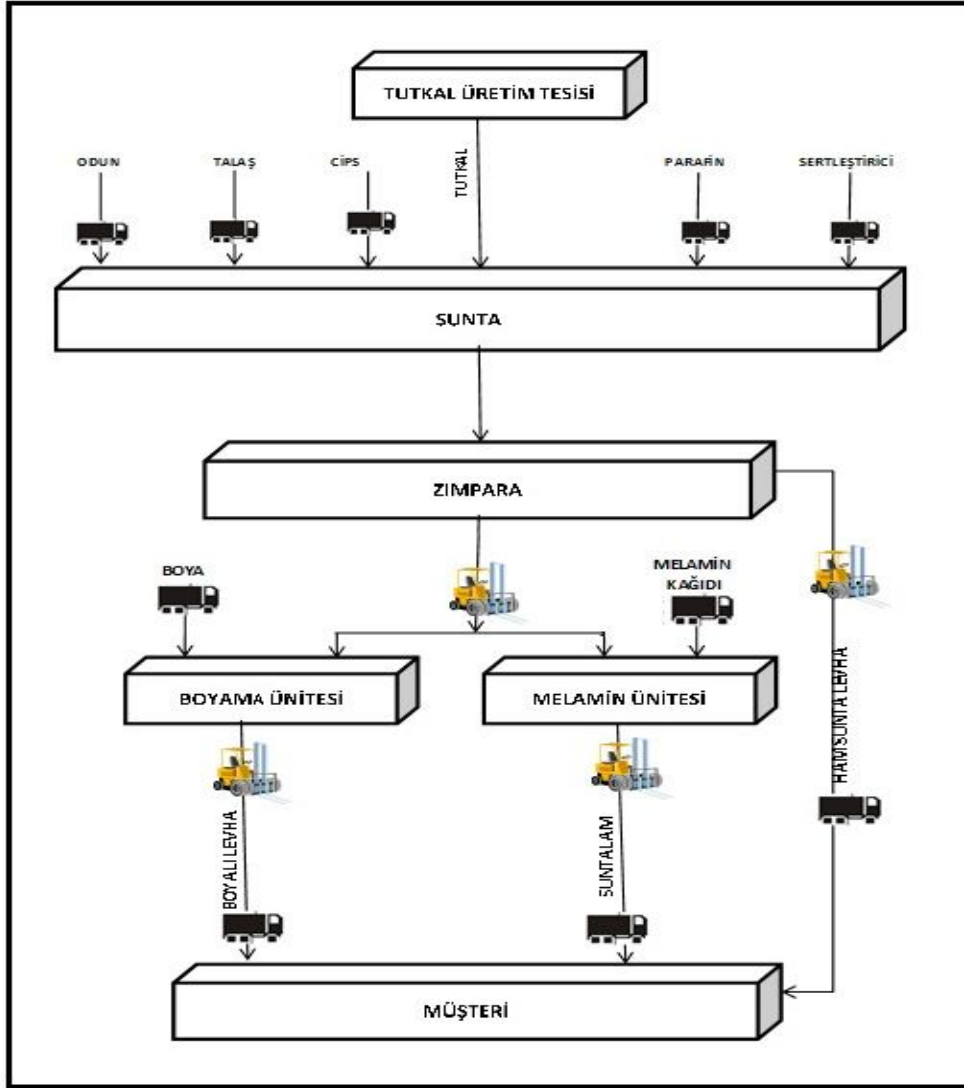
Yonga levha sektöründe tek veya çok katlı preslerde sürekli ve kesintili olarak 3 tabakalı levha üretimi yapılmaktadır. Aynı şekilde lif levha sektöründe de sürekli ve kesintili sistemle levha üretimi yapılmaktadır. Sektördeki tesislerin tamamında melamin kaplama hattı bulunmakta ve üretilen ürünlerin büyük bir kısmı kaplandıktan sonra pazarlanmaktadır.

Sektörde ana girdiler odun ve tutkal olup, diğerlerini katkı maddeleri, yakıt ve enerji oluşturmaktadır. Oransal olarak; odun %42-52, kimyasallar-tutkal %21-24, enerji %11, işletme bakım-işçilik-genel yönetim ve satış pazarlama - amortisman: %20 olarak gerçekleşmektedir [3].

1.2 Yonga Levha Üretiminin Genel Aşamaları

Yonga levha üretim prosesi genel hatlarıyla Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Depolama sahasında bekletilen odunlar haker ünitesinde cips haline getirilir ve depolanır. Depolanan cipsler değirmende yonga haline getirilmekte, bağlayıcılarla karıştırılıp sıcak preslerden geçirilerek yonga levha üretimi yapılmaktadır.

Daha sonraki aşamalarda yonga levhalar tutkal emdirilmiş (emprenye edilmiş) kâğıtla melamin kaplama işlemine tabi tutularak suntalam üretimi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca yonga levhalar boya ünitesinde su bazlı boyalar boya kaplama işlemine tabi tutularak boyalı sunta üretimi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.1: Yonga levha üretiminin genel aşamaları

Yonga levha üretiminde kullanılan başlıca hammadde odun olup, bu bakımdan yonga levhanın %95'ini odun oluşturmaktadır. Ayrıca; saman, yer fıstığı kabukları, keten ve kenevir sapları, saz ve şeker kamışı ile çay fabrikası atıkları yonga levha üretiminde kullanılabilir [6].

Yonga levha üretimindeki ham maddeler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Ağaç Malzeme
- Yıllık Bitkiler
- Kimyasal Maddeler
 - Organik Tutkallar
 - Üre Formaldehit

- Melamin Formaldehit
- Fenol Formaldehit
- Resorsin Formaldehit
- İzosiyanat
- Termoplastik Tutkallar
- Doğal Tutkallar
- Anorganik Tutkallar
- Katkı Maddeleri
 - Sertleştirici Maddeler
 - Hidrofobik Maddeler
 - Alkil Keten Dimer
 - Koruyucu Maddeler

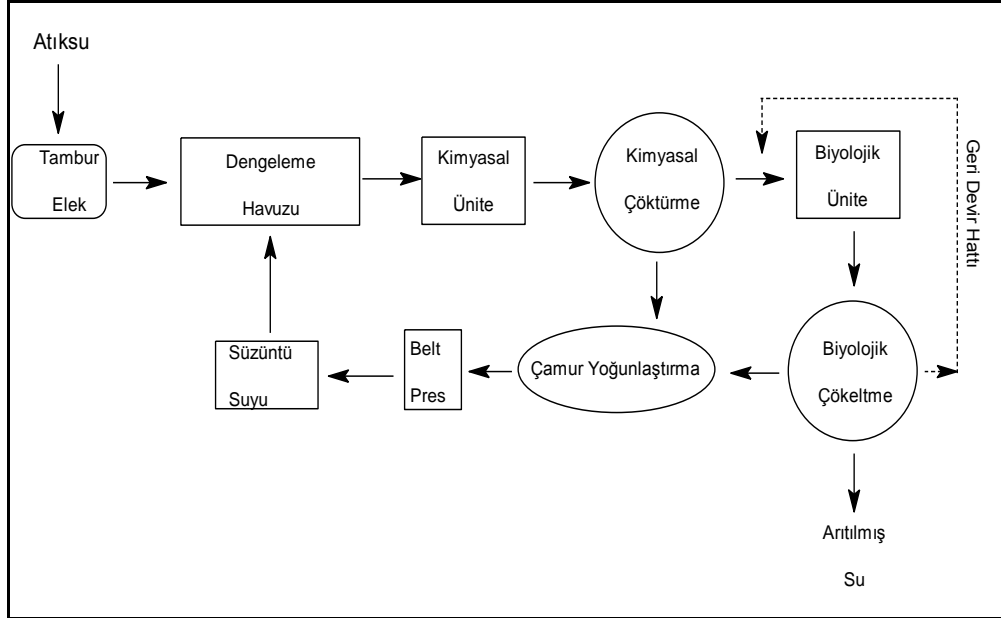
1.3 Yonga Levha Atıksu Arıtma Tesisi

Yonga Levha Sanayii atıksu arıtımında genellikle fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtım üniteleri bir arada kullanılır. Şekil 1.2’de atıksuyun temin edildiği Yıldız Entegre A.Ş. – Manisa Yonga Levha Fabrikası atıksu arıtma tesisinin akım şeması verilmiştir. Tesiste fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtım ardı ardına gerçekleştirilmektedir. Atıksu arıtma tesisinden çıkan atıksular deşarj edilmemekte firma içerisinde yıkama suyu olarak tekrar değerlendirilmektedir.

İşletmeden kanallarla gelen atıksu, terfi havuzundan pompalar ile tambur eleğe basılmaktadır. Tambur elekte fiziksel olarak arıtılan atıksu dengeleme havuzuna alınır. Dengeleme havuzunda toplanan atıksu dalgıç pompalarla, kimyasal üniteye alınır. Kimyasal üniteye sırası ile hızlı karıştırma reaktöründe nötrilizasyon ve koagülasyon, yavaş karıştırma reaktöründe flokülasyon işlemine tabi tutulur.

Flokülasyon işleminden sonra cazibe ile atıksu kimyasal çökeltme havuzuna alınır. Ön çökeltme ünitesinde çökelen floklar, pompa ile çamur havuzuna, arıtılan atıksu da savaklanarak biyolojik üniteye alınır. Biyolojik üniteye alınan atık su, biyolojik olarak arıtıldıktan sonra son çökeltme havuzuna alınır. Son çökeltme havuzunda, atıksu durultulduktan sonra savaklanmakta ve deşarj edilmektedir.

Havuzda çökelen aktif çamur geri devir devir pompaları ile biyolojik üniteye geri verilmektedir. Aktif çamur miktarının fazla olması durumunda ise çamur yoğunlaştırma havuzuna aktarılmaktadır.



Şekil 1.2: Yonga levha endüstrisi atıksu arıtma tesisi akım şeması

Çamur havuzuna alınan çamurlar yoğunlaştırılarak beltpreste susuzlaştırılmaktadır. Susuzlaştırma işlemi sonucu oluşan çamur römorka toplanarak ve mevzuata uygun olarak bertaraf edilmektedir. Susuzlaştırma sonucu oluşan süzüntü suyu ve belt yıkama suları arıtma tesisi girişine verilmekte ve terfi pompaları ile tekrar dengeleme havuzuna aktarılmaktadır.

1.4 Kimyasal Arıtma Prosesi

Kendiliğinden çökelemeyen ve stabil halde olan taneciklerin fiziksel ve kimyasal etkilerle stabilliğinin bozulması işlemi pıhtılaştırma (koagülasyon) olarak tanımlanır. Yumaklaştırma (flokülasyon) işlemi ise, pıhtılaşmış taneciklerin yumaklar teşkil ederek çökebilir büyüklüğe ulaşmasıdır [7].

Bu amaçla, uygun kimyasal maddeler ilave edilir. Alüminyum ve demir tuzları gibi yumaklaştırıcı özelliğe sahip kimyasal maddeler atıksuların arıtımı için uzun

sürelerden beri geniş ölçüde kullanılmıştır. Koagülasyon, koloidal partiküllerin net yüzey yükünün azaltılması sonucu elektrostatik itme kuvvetiyle sıkışması ile bir araya gelip yeterli Van Der Waals kuvvetiyle tutunup birikmesi ile gerçekleştirilir. Yüzey yükünün indirgenmesi, zıt yüke sahip elektrolitin mevcut olması ile elektriksel çift tabakanın itme potansiyelinin azalmasının sonucudur [8].

Koagülasyon ve flokülasyon işlemi su arıtma sistemlerinin esas bileşenlerinden olup, başlıca kullanım amaçları;

- Kirleticileri gidermek,
- Tanecik yüzeyinde adsorplanan toksik bileşenleri gidermek,
- Dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumuna neden olan bileşenleri gidermek,
- Suyu içilebilir seviyeye getirmek

şeklinde sıralanabilir [9].

1.4.1 Kolloidlerin Özellikleri

Çözünmeyen bir maddenin çok küçük tanecikler halinde homojen bir ortamda dağılmasıyla oluşan sisteme kolloidal sistem denir. Suda bulunan partiküller ve kolloidal maddelerin boyutları Tablo 1.3'de gösterilmiştir [10].

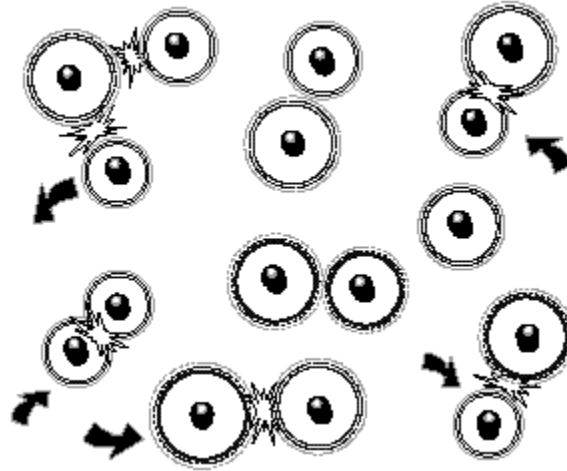
Tablo 1.3: Suda bulunan partiküller ve kolloidal maddelerin boyutları

Partikül	Çap (mm)	Toplam Yüzey Alanı (m ²)	Çökme Süresi (saat)
Çakıllı kum	10	3,14·10 ⁻⁴	8,3·10 ⁻⁵
Kaba kum	1	3,14·10 ⁻³	8,3·10 ⁻⁴
İnce kum	0,1	3,14·10 ⁻²	8,3·10 ⁻³
Silt	0,01	0,314	0,55
Bakteri	0,001	3,14	55
Kolloidler	0,0001	3,17	5 520
Kolloidler	0,00001	2 835	55 188
Kolloidler	0,000001	28 350	551 880

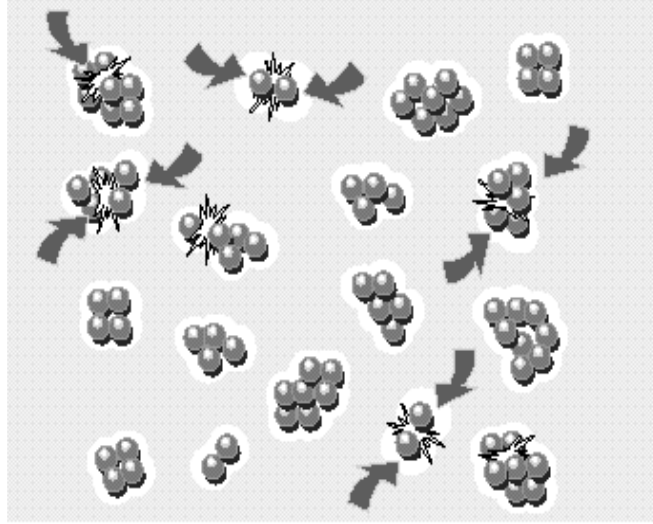
Yumaklaştırmanın verimli ve tesirli bir şekilde tatbik edilebilmesi bakımından kolloidlerin özellikleri bilinmelidir. Su ortamında kil gibi suda çözünmeyen taneciklere suyu sevmeyen manasında hidrofobik; nişasta, proteinler, organik polimerler gibi suda çözünen taneciklere de "suyu seven" manasında hidrofilik kolloidler denilir [11].

Kolloid tanecikler yüzeyinde elektriksel yükler bulunur. Bunlar kolloidin davranışını etkiler. Bu yükler birincil yük olarak adlandırılır ve iki nedene bağlı olarak meydana gelir. Birinci neden kolloidin yapısında uç kısımlarda bulunan reaktif grupların ayrışması, ikinci neden ise su içinde bulunan iyonların absorpsiyon ile kolloidin yüzeyinde toplanmasıdır [8].

Kolloidal partiküller doğada genellikle negatif yüke sahiptir. Bu yükler birbirlerini geri püskürten, etkili birleşmeyi ve flokülasyonu engelleyen komşu partiküllere neden olmaktadır (Şekil 1.3). Partiküllerin etrafındaki yüklü tabakalar partiküller arasında enerji bariyeri oluşturur. Bu partiküllerin çöktürülerek giderilmesi için enerji bariyerinin, elektrik yüklerinin nötralizasyonu ve partiküllerin birbirleriyle çarpışarak indirgenmesini gerektirir. Sonuç olarak, yüklü partiküller, sulu çözeltilerde ayrık ve disperse olmuş haldedirler. Diğer yandan da, eğer yük, önemli bir şekilde indirgenir veya elimine edilirse, kolloidler bir araya gelecektir (Şekil 1.4) [12].



Şekil 1.3: Yüklü partiküller



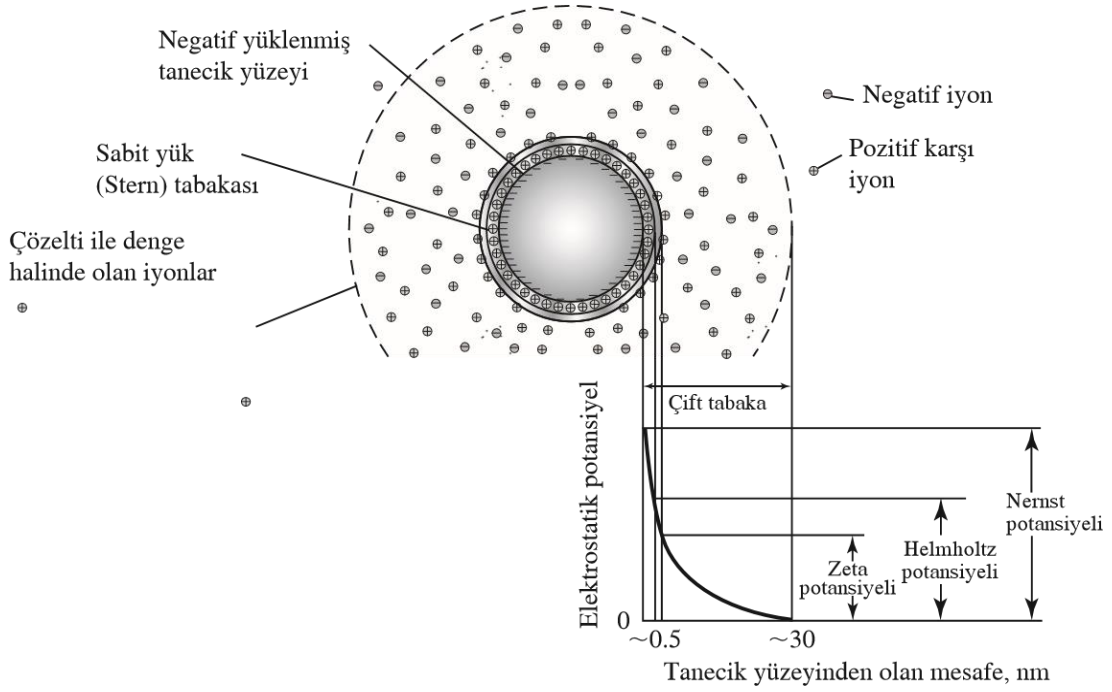
Şekil 1.4: Yüksüz partiküller

1.4.2 Yüzey Yükünün Düşürülmesi

Su arıtımında, yüzey yükünü ve dolayısıyla zeta potansiyelini düşürmek için enerji sınırı koagülant ilave edilerek azaltılır. Burada iki nokta oldukça önemlidir. Birincisi, tüm pratik amaçlar için yüzey yükünün doğrudan hesaplanmasında zeta potansiyeli ve zeta potansiyeli hesaplamaları yük nötralizasyonunu kontrol etmek amacıyla kullanılabilir. İkincisinde yükü sıfıra indirme gerekliliği yoktur. Burada amaç kolloidlerin bastırmasına izin verdiği karışımdan partikül hacminin olduğu noktadaki enerji sınırının düşürülmesidir [8].

1.4.3 Elektriksel Çift Tabaka

Çözeltideki kolloidal dağılımlar net bir yüke sahip değildir. Bunun nedeni, negatif yüklü taneciklerin tanecik yüzeyinde ve yakınlarında pozitif zıt yüklü iyonları toplamasıdır. Sonuç olarak Şekil 1.5’de görüldüğü gibi bir çift tabaka oluşur. Katyonların adsorplandığı tabaka (Helmholtz veya Stern tabakası olarak adlandırılır) tanecik yüzeyine elektrostatik ve adsorpsiyon kuvvetleriyle bağlıdır. Bu tabaka 0.5 nanometre (nm) kalınlığındadır. Helmholtz tabakasının hemen bitişiğinde dağınık difüze tabaka oluşur. Çift tabaka (Helmholtz ve difüze tabakanın toplamı) çözeltide net negatif yüke sahiptir ve çözelti özelliklerine bağlı olarak çözeltide 30 nm’ye kadar genişleyebilir [9].



Şekil 1.5: Su içerisindeki bir tanecik yüzeyinde yüklerin gösterimi

Stern tabakasının dışında yine aynı işaretli iyonların teşkil ettiği bir tabaka daha bulunur. Bu tabakaya Gouy Chapman Tabakası veya "Dağınık Tabaka" denir. İşte bu iki tabakaya "çift tabaka" adı verilir. Çift tabakada esas itibariyle kolloidin yüküne zıt iyonlar bulunmakla birlikte, aynı işaretli iyonlar da bulunur. Ancak iyonların sayıları tanecik yüzeyinden uzaklaştıkça azalır. Belli bir mesafede + ve - yüklü iyonların sayıları eşit olup, bu noktaya izoelektrik nokta denilmektedir. Bu noktada potansiyel sıfırdır. Buradan tanecik yüzeyine gidildikçe anyon ve katyonlar arasındaki konsantrasyon farkı arttığından elektrotstatik potansiyel de artar. Şekil 1.5’ de görülen kesme yüzeyindeki potansiyele "Zeta potansiyeli" denilmektedir. Bu yüzey, ayrılma düzlemini karakterize eder [11].

1.4.4 Kolloidin Stabilitesinin Bozulması (Destabilizasyon)

Doğal suda bulunan askıda maddelerin kararsız hale getirilmesi dört mekanizmayla gerçekleştirilebilir:

- Elektriksel çift tabakanın bastırılması,
- Adsorpsiyon ve yük nötralizasyonu,

- Adsorpsiyon ve tanecikler arası köprü oluşumu,
- Bir çökelti içerisinde yakalama (hapsetme)

Bu mekanizmalar ayrı ayrı ele alınmasına rağmen, pratikte birkaç mekanizma eşzamanlı olarak gerçekleşebilir [9].

❖ Elektriksel çift tabakanın bastırılması

Bu işlemde kullanılacak olan koagülantın kolloid yükü ile ters yüklü olması gerekmektedir. Bu ters yükler yardımıyla kolloidin etrafındaki difüze tabakanın sıkıştırılması sonucu destabilizasyon sağlanır. Negatif yüklü kolloidlerin destabilizasyonu için Na^+ , Ca^{+2} ve Al^{+3} gibi iyonlar kullanılır. Kullanılacak miktarlar iyonun elektriksel yüküne göre değişir. Örneğin Al^{+3} değerlikli olduğu için daha az kullanılmaktadır. Sistemde çözültideki yüksek elektrolit derişimleri, difüze tabakada ters yüklü iyonların yüksek derişimine yol açar. Bu durum difüze tabakanın kalınlığını azaltılır. Böylece benzer kolloid tanecikler arasındaki itme kuvveti azalır ve aktivasyon enerji engeli ortadan kalkar [8].

❖ Adsorpsiyon ve yük nötralizasyonu

Hidrolize metal tuzları, ön hidrolize metal tuzları ve katyonik polimerler pozitif yüklüdürler. Yük nötralizasyonunu sağlayarak tanecikleri kararsızlaştırırlar [9].

❖ Adsorpsiyon ve tanecikler arası köprü oluşumu

Nişasta, selüloz, polisakkaritler ve protein içeren birçok doğal bileşikler ve sentetik polimerler oldukça işlevsel koagülantlardır. Büyük boyutlu moleküllerden oluşan bu tür bileşikler hem (-) hem de (+) yük taşıyan karbon gruplar içerirler. Bu tür bileşiklerin moleküler olarak dallanmış yapıları vardır ve dallanma yoluyla bir ya da birkaç uçlarından kolloid parçacığına yapışabilirler. Bu yapışma zıt yüklerin birbirini çekmesinden dolayı ortaya çıkar. Öte yandan bileşiğin başta kalan ucu veya uçları su ortamında boşa kalır ve uygun koşullarda bir başka kolloid parçacığına yapışır. İki parçacık arasındaki böylesi bir köprüleme parçacıkların daha büyük kümelere dönüşmesini sağlar [8].

❖ Bir çökelti içerisinde yakalama (Hapsetme)

Metal hidroksitlerin doygunluğunun üzerinde olan dozlarda, alüminyum ve demir tuzları çözünmeyen çökelti ve çökelti içerisinde hapsolmuş tanecikli maddeler oluşturur. Bu tür kararsızlaşma işlemine süpürme pıhtılaşma denir. Su arıtım uygulamalarında bu mekanizmanın tanecik yüzeyinde çökeğin çekirdeklenmesi ve sonrasında taneciklerin bir araya gelerek amorf çökeğin büyümesi şeklinde olduğu öngörülür [9].

1.4.5 Koagülantlar ve Yardımcı Maddeleri

Su arıtımında en çok kullanılan pıhtılaştırıcılar Alüminyum Sülfat (Alum) ve demir tuzlarıdır. Alum, daha ucuz olduğu için demir tuzlarından daha çok kullanılır. Demir tuzlarının da geniş pH aralığında etkin olma açısından alum göre üstünlüğü vardır [13].

Koagülasyonda maksat, çok küçük taneciklerin yumaklar haline getirilip çöktürülmesi olduğuna göre, birtakım kimyasal maddelerin ilave edilmesi suretiyle tanecik etrafındaki çift tabakanın sıkıştırılması, tanecik yüzeyindeki potansiyelin azaltılması ve kolloidlerin metal hidroksitler çökerken, onlarla birlikte sürüklenmesinin sağlanması gerekir. Bu maksatla çeşitli koagülantlar kullanılır. Bunlar Tablo 1.4 de verilmiştir [11].

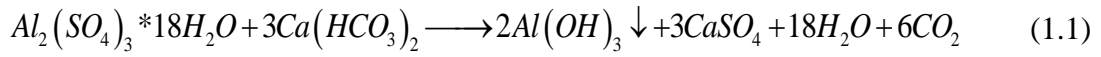
Tablo 1.4: Koagülantlar

Kimyevi madde	Formülü	Molekül Ağırlığı	Rengi	En yaygın şekli	Sudaki eriyebilirliği	Sudaki eriyiğin durumu
Alüminyum Sülfat	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666	Beyaz	Toz ve topak	36,3	Asit
Sodyum Alüminat	$NaAlO_2$	82	Beyaz	Toz	-	Alkali
Ferrik Klorat (Demir (III)Klorür)	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	270	Kahverengi	Topak	91,9	Asit
Ferrik Sülfat (Demir (III) Sülfat)	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	562	Sarımsı Kahverengi	Küçük kristaller	-	Asit
Ferrous Sülfat (Demir (II) Sülfat)	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278	Yeşilimsi	Küçük Kristaller	26,6	Asit
Demir Sülfat Alüminyum Sülfat	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	-	-	-	-	Asit
Kireç (sönmemiş)	CaO	56	Beyaz	Topak toz	-	Alkali
Kireç (Sönmüş)	$Ca(OH)_2$	74	Beyaz	Toz	0,128	Alkali

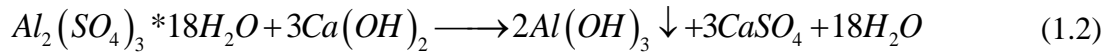
Atıksu arıtımında en çok kullanılan koagülantlar alum ve kireçtir. Bazen hızla çökelen yumakların oluşması için geri döngü çamuru ve polielektrolitler gibi yardımcı maddeler de kullanılır.

✓ **Alüminyum Sülfat;**

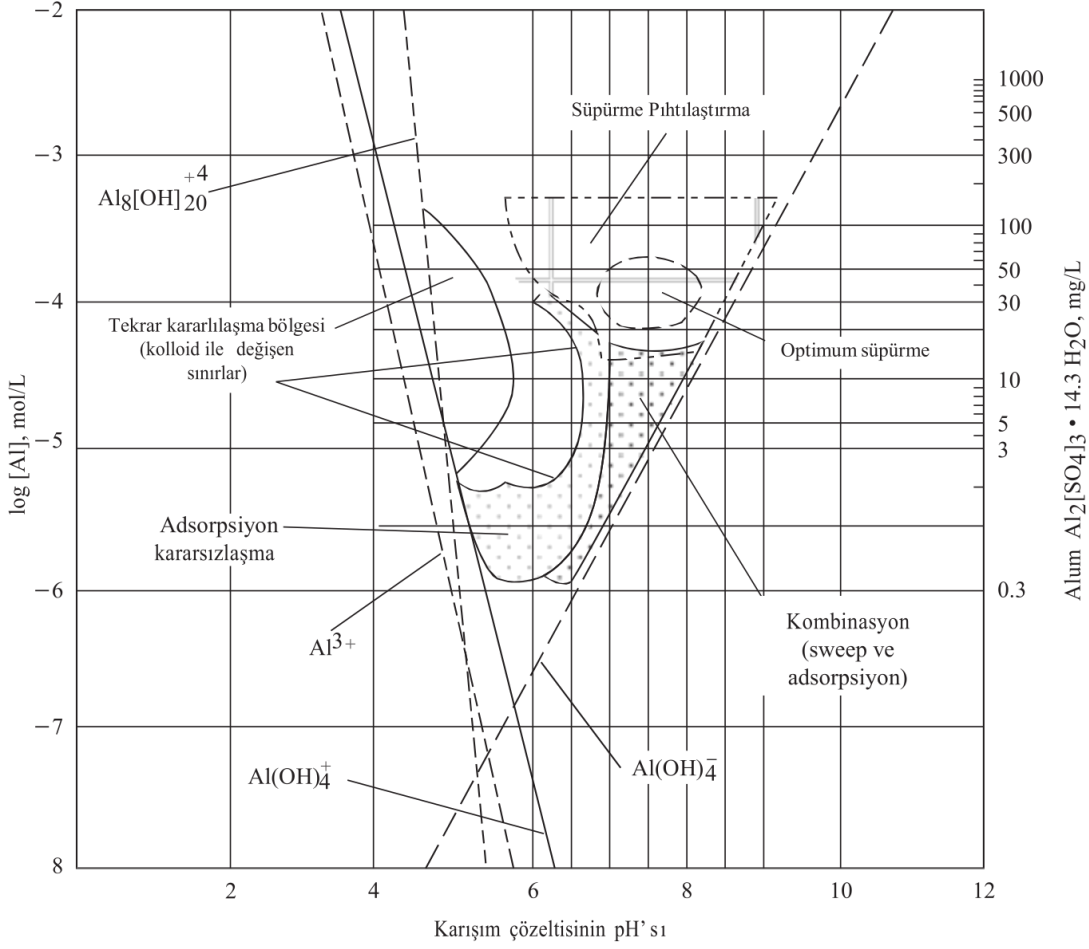
Suda, hidroksit yumakları oluşturmak üzere alüminyum sülfatla tepkime verecek yeterli miktarda alkalinite olmalıdır. Genellikle çalışılan pH aralığında alkalinite bikarbonat iyonu şeklindedir. Yumak oluşturmak için basitleştirilmiş kimyasal tepkime denklem 1.1’de verilmiştir.



Bazı sular alumla tepkimeye girecek kadar alkaliniteye sahip olmayabilir, bu durumda alkalinite eklenmelidir. Genellikle kalsiyum hidroksit (sönmüş yada sönmemiş kireç) ilavesiyle hidroksit iyonu şeklinde alkalinite eklenir. Kalsiyum hidroksitle pıhtılaştırma tepkimesi



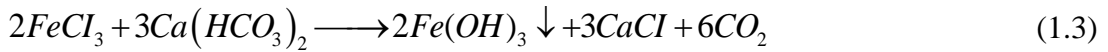
Sodyum karbonat (soda) eklenerek de alkalinite istenen düzeye getirilebilir. Çoğu su, yeterli alkaliniteye sahip olduğundan $Al_2(SO_4)_3$ ’tan başka bir kimyasal madde eklemek gerekmez. Alum için en uygun pH aralığı, Şekil 1.6’da gösterildiği gibi alüminyum hidroksitin göreceli olarak çözünmediği 4,5-8,0’dır. Bu şekilde, su arıtımında kullanılan dozajlar için olağan alüminyum hidroksit derişimleri de gösterilmiştir. Bu derişimler genellikle aşırı doymuş alüminyum hidroksit çözeltileri oluşturur. Alüminyum sülfat, kuru yada sıvı halde bulunabilir; en çok kuru katı halde kullanılır. Kuru kimyasal madde ise tanecik, toz ya da topaklanmış şekilde bulunabilir; en yaygın kullanılan tanecikli alümdür. %15-22 Al_2O_3 ’ ten oluşan tanecikler 18 mol kristal suyu içerir, yoğunluğu $960-1000 \text{ kg/m}^3$ ’tür [13].



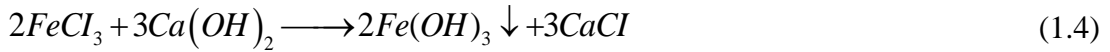
Şekil 1.6: Alüminyum hidroksitinin çözünürlüğü

✓ Demir (III) Klorür

Doğal bikarbonat alkalinitesi ile demir (III) hidroksit oluşturan tepkime:



Doğal alkalinite tepkime için yeterli değilse hidroksit oluşturmak üzere sönmüş kireç $Ca(OH)_2$ eklenir.



Demir (III) klorür için en uygun pH aralığı 4-12'dir. Tepkimede genellikle yoğun, çabuk çökelen bir yumak oluşur. Demir (III) klorür kuru katı yada sıvı şekilde bulunabilir. Kuru kimyasal madde toz ya da topaklanmış halde olabilir; en yaygın kullanılan topaklanmış olandır. %59-61 $FeCl_3$ ' den oluşan topaklar 6 mol kristal suyu

✓ **Yumaklaştırma Yardımcıları**

Yumaklaştırıcı yardımcısı olarak, yüksüz ve negatif yüklü polimerler kullanılır. Bunların kullanılmasının amacı, daha güçlü yumakların oluşturulmasıdır. Pıhtılaştırıcı ilavesiyle tanecikler kararsızlaştırıldıktan sonra ortama yumaklaştırıcı yardımcıları eklenmelidir.

Yaygın olarak kullanılan yumaklaştırıcı yardımcıları aktif silika ve sodyum silikattır. Bunların ilave edildiği ve yüksüz yumaklaşma olarak adlandırılan proseslerde, kimyasal pıhtılaştırmanın ardından ortama yumaklaşma merkezleri oluşturması için mikro ölçekli kum ilave edilir. Kum yumaktan daha yoğundur ve yumakların çökme hızlarını artırır [9].

1.5 Deney Tasarımı

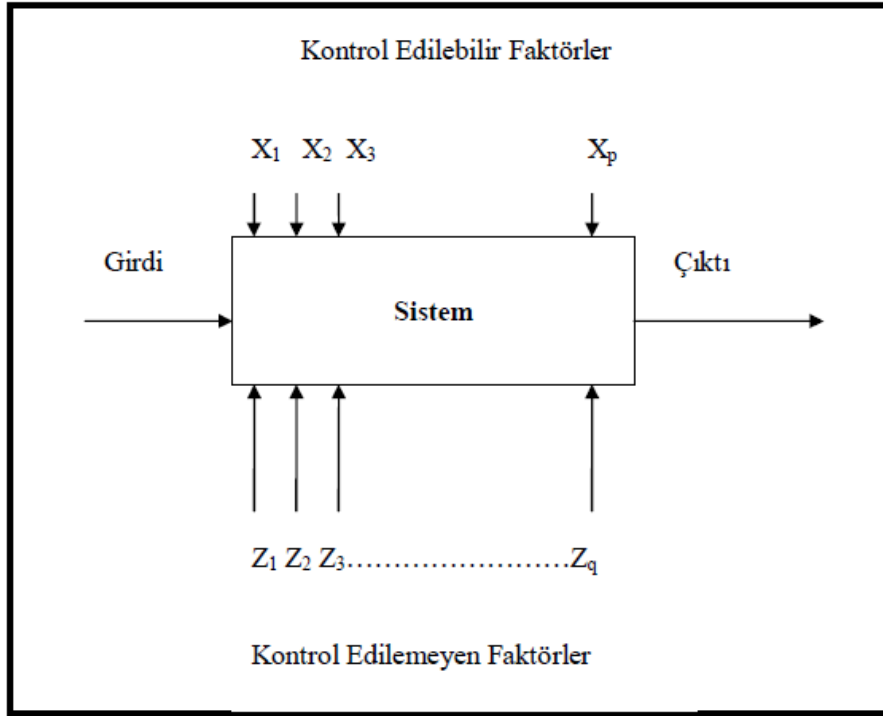
Deney tasarımı (DT) yöntemi ilk defa 1920'lerde tarım alanında araştırmalar yapan istatistikçi Ronald A. Fisher tarafından bulunmuş ve geliştirilmiştir. Ayrıca, günümüzde deney verilerinin analizi için klasik sayılan "varyans analizi" yönteminde Fisher tarafından geliştirilmiştir. "Yöntem, kısa zamanda, Amerika'da tarım sektöründe üretimin geliştirilmesi için yoğun olarak kullanılmış ve Amerika'nın tarım sektöründe lider konuma gelmesini sağlayan önemli faktörlerden olmuştur. İlk uygulamalarında, tarım sektöründe, değişik gübre ve dozları ile iklim koşullarının ve sulama yüzeylerinin çeşitli ürünlere olan etkilerini belirlemek üzere kullanılmıştır" [14].

"DT daha sonra kimya ve ilaç sektörlerinde de uygulanmış olmasına rağmen, 1970'li senelere kadar imalat sektörü uygulamaları oldukça sınırlı kalmıştır. Amerika'da imalat sektörü, Japon kalitesinin sebepleri incelenirken 1980'lerin başında deney tasarımı yeniden gündeme gelmiştir. Deney tasarımı, Taguchi öncülüğünde o tarihlerde Japonya'da etkili ve yoğun olarak kullanılmaktaydı. Taguchi, deney tasarımında herhangi bir kuramsal yenilik getirmemiştir. Ancak, üretimdeki

uygulamalarda yenilikler yapmış ve başarılı uygulamalarla yöntemin imalat sektöründe kabul görmesini sağlamıştır” [14].

Deney Tasarımı, bir prostedeki girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasıyla cevap değişkeni üzerindeki değişkenliğin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması olarak tanımlanabilir [15].

DT proses optimizasyonunda, proses değişkenlerinin tanımlanmasında ve prostedeki değişkenliğin azaltılmasında önemli bir yöntemdir. Bir sistemin veya sürecin genel modeli Şekil 1.8’de gösterilmiştir. Proses değişkenlerinden X_1, X_2, \dots, X_p kontrol edilebilir değişkenler ve Z_1, Z_2, \dots, Z_q kontrol edilemeyen değişkenler olarak adlandırılır [16].



Şekil 1.8: Bir sistem veya sürecin genel gösterimi

DT teknikleri, yeni bir proses geliştirmek için ve prosesin performansını artırma amacıyla mevcut durumu düzeltmekte çok büyük fayda sağlamakta ve önemli bir rol oynamaktadır. Burada amaç, sağlam bir proses geliştirmektir. Burada asıl gerçekleştirilmesi istenen değişkenliğin kaynağı olan, kontrol edilemeyen parametrelerin (Z_1, Z_2, \dots, Z_q) etkisinin en az olduğu süreci geliştirmektir [17].

1.5.1 Deney Tasarımı Adımları

Bir DT , ürün ya da süreç performansında olması gereken durumdan sapmaya neden olan söz konusu problemin tanımlanması ile başlayıp, problemin çözümlenip çözümlenmediğinin ortaya çıkarılması ile sona eren aşağıda verilen bir dizi adımda gerçekleştirilir. DT adımları on başlık altında toplanmaktadır [18].

1. Problemin Tanımlanması,
2. Amacın Belirlenmesi,
3. Performans Karakteristiğinin Seçilmesi,
4. Performans Karakteristiğini Etkileyen Faktörlerin Seçilmesi,
5. Faktörlerin Düzeylerinin Seçilmesi,
6. Deney Tasarımının Seçilmesi,
7. Verilerin Toplanması,
8. Verilerin Analiz Edilmesi,
9. Sonuçların Yorumlanması,
10. Doğrulama Deneylerinin Yapılması.

1.5.2 Deney Tasarım Yöntemleri

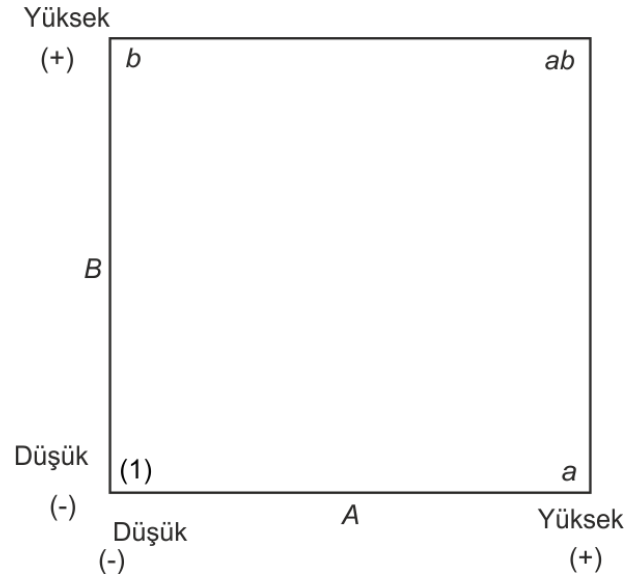
Deney tasarımı yönteminin; Taguchi, Tam faktöriyel, Kesirli faktöriyel ve Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) kapsamında olan Merkezi Kompozit Tasarım (MKT), Box-Behnken ve Karışım Tasarımı gibi farklı türleri bulunmaktadır.

- **Tam Faktöriyel Deney Tasarımı**

Tam faktöriyel tasarım, birden çok parametrenin her seviyesi (en az iki veya daha fazla) için eşit sayıda deney gerçekleştirilerek bu seviyelerin birbirileri ile çarpımları ile birlikte faktörlerin etkileşimleri dahil olası bütün düzeylerinin bağımlı değişken üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir deney stratejisidir [19].

Örneğin, k faktör içeren bir sistemde 1. faktör için n_1 , ikinci faktör için n_2 ve n. faktör için n_k düzey belirlendiğinde tam faktöriyel deney stratejisindeki toplam deney sayısı $n=n_1*n_2*...*n_k$ şeklinde olacaktır [20].

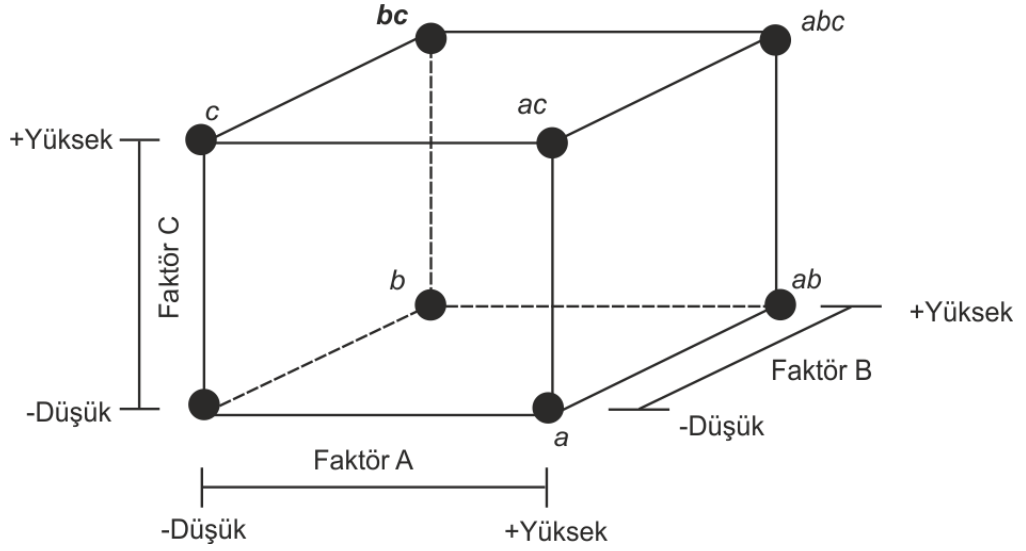
En basit haliyle 2^2 yani 2 düzeyli ve 2 faktör tam faktöriyel tasarım Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



Şekil 1.9: 2 düzeyli ve 2 faktörden oluşan tasarım

Yukarıdaki şekilde (Şekil 1.9) A ve B faktörlerinden oluşan 2^2 bir tasarım görülmektedir. Burada a noktası A faktörünün yüksek B faktörünün düşük düzeyde olduğu noktayı, b noktası B faktörünün yüksek A faktörünün düşük düzeyinde olduğu noktayı, (1) noktası her iki faktörün de düşük düzeyde olduğu noktayı ve ab noktası da her iki faktöründe yüksek düzeyinde olduğu noktayı göstermektedir [19].

2 düzeyli ve 3 faktör kullanıldığında çözüm uzayı küp şeklinde yani 2^3 tasarım şeklinde olmaktadır. Bu tasarım Şekil 1.10'de gösterilmiştir.



Şekil 1.10 2 düzeyli ve 2 faktörden oluşan tasarım

Yukarıdaki şekilde 3 faktörün düşük, yüksek düzeyleri ile faktörlerin etkileşimleri görülmektedir. Tam faktöriyel tasarımda faktörlerin ana etkilerinin ve etkileşim etkilerinin araştırılması için kontrast yaklaşımı ile varyans analizi tablosu oluşturulabilir veya klasik çok faktörlü varyans analizi yapılarak verilerin analizi gerçekleştirilerek süreç performansında etkili olan faktör ve etkileşimler belirlenebilir [19].

- **Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımı**

Tam faktöriyel deney tasarımında parametrelerin bütün seviyelerinin kombinasyonları tek tek denendiğinden deney maliyetini arttırmakta ve çok zaman almaktadır. Yani tam faktöriyel deney tasarımında maksimum zaman ve maliyet söz konusudur. Tasarım yaparken deneyden elde edilecek veriler ile harcanan maliyet ve zaman arasındaki bağıntı çok önemlidir [21].

Maliyetten ve zamandan kazanmak için deney sayısının orantılı olarak azaltarak kesirli faktöriyel deney tasarımı elde edilir. Örneğin 7 parametrelili ve 2⁷ seviyeli bir deney tam faktöriyel olarak yapıldığında 2⁷ = 128 deney yapılması gerekir bunun 1/2 kesri yani 64 deney yada 1/4 yani 32 yada 1/8 yani 16 deney ile yapılabilir. Deney sayısını kesirli olarak azaltmak tamamen araştırmacıların elindedir [21].

- **Taguchi Metodu**

1950’li yıllarda Japon mühendis ve istatistikçi Genichi Taguchi tarafından geliştirilen deney tasarımı yöntemidir. Yöntemin amacı maliyetleri düşük seviyede tutmak için, deney yapma prensibine dayanmaktadır.

Taguchi tarafından geliştirilen bu metot, deneylerin dizaynında ve analizinde kullanılan karmaşık tam anlamıyla eksiksiz bir uygulamadır. Mühendislik deneyleme işlemlerinin optimizasyonu, bu veya bunun gibi metotlar “kalite mühendisliği” kavramı ile ifade edilir. Metotlar, ileri istatistiksel tekniklerden ziyade mühendislik bilimi uygulamasını vurgulamaktadır. Taguchi’nin fikirleri deneylerin dizaynının matematiksel görünümü üzerine değil felsefesi üzerine odaklanır. Onun metotlarında, klasik metotların kısımları, maliyet bedelleri ile birlikte ilave edilir [22].

Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları Sinyal/Gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. Sinyal/Gürültü oranı değeri küçük olan değer iyi, büyük olan değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir [23].

Taguchi Deney Tasarımı tekniğine göre yapılacak bir çalışmada izlenecek adımlar aşağıdaki şekildedir:

1. Faktörlerin seçimi ve aralarındaki etkileşimlerin değerlendirilmesi (beyin fırtınası, akış diyagramı, sebep sonuç diyagramı gibi metotlar kullanarak),
2. Faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi,
3. Doğru dengeli tasarımın seçimi,
4. Faktörlerin ve/veya aralarındaki etkileşimlerin dengeli deney düzenindeki kolonlarla eşleştirilmesi,
5. Deneylerin daha önceki adımlarda planlanan şekilde gerçekleştirilmesi yani testlerin yapılması,
6. Sonuçların analizi,
7. Doğrulama deneyinin veya deneylerinin yapılması.

Bu adımların izlenmesi sonucunda proses veya ürün için en iyi performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneyde ele alınan faktörlerin kalite

değeri üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve en iyi deney parametreleri sonucunda elde edilebilecek kalite değeri öngörülebilecektir [23].

- **Yanıt Yüzey Yöntemi**

Yanıt Yüzey Yöntemi (YYY) ilk defa 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmiştir. YYY süreçlerin iyileştirilmesi, geliştirilmesi ve optimizasyonu için kullanılan istatistiksel ve matematiksel teknikler topluluğudur [24]. YYY, bir dizi özel matematiksel ve istatistiksel metotlardan oluşmaktadır. YYY'de bir takım dizayn parametrelerinin kullanımıyla optimumun belirlenmesine çalışılmaktadır ve proses değişkenlerinin giderim verimleri üzerine etkisi ve aynı zamanda değişkenlerin birbirleri ile etkileşimleri dikkate alınmaktadır. Bu şekilde oluşturulan deneysel planlamalar sonucunda optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Yöntem, kontrol edilebilir deneysel faktörler ile elde edilen sonuçlar arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi için bir ampirik modelin oluşturulması esasına dayanmaktadır [25].

YYY, X_1, X_2, \dots, X_k şeklinde gösterilen bir grup değişken arasında yeterli bir fonksiyonel ilişki geliştirmek için matematiksel ve istatistiksel tekniklerin birlikte kullanıldığı bir yöntem olarak tanımlanmıştır. Deneysel planlama dahilinde, prosese etki eden faktörler için ön deneyler yapılarak sınırlar araştırılır, sınırlar belirlendikten sonra programın ön gördüğü düzende deneysel çalışmalar tamamlanır ve program yardımıyla değerlendirilerek prosesin optimum koşulları ortaya konur [26].

YYY iki amaç doğrultusunda gerçekleştirilmektedir:

1. Bir veya daha fazla ölçülebilir yanıt değişkenlerinin değerleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi, ölçülmesi ve yanıt ve yanıtları etkilediği belirlenen bir grup deneysel faktörün değerlerinin ayarlanması

2. En iyi yanıt değerini veren deneysel faktör ayarlarının bulunması [27]

YYY'de, proses performansı bağımlı çıktılar (cevap), prosese etki eden faktörler ise bağımsız değişkenler olarak tanımlanmaktadır. Deneysel planlama dahilinde, prosese etki eden faktörler için ön deneylerle belirlenen sınırlar, program dahilinde değerlendirilmekte ve prosesin optimum koşullarının belirlenebilmesi ve

faktörler arasındaki etkileşimin tanımlanabilmesi için gerekli deneysel çalışmalar oluşturulmaktadır. Deneysel çalışmalardan elde edilen çıktılar proses performansının değerlendirilmesi için kullanılmaktadır. Deneysel çalışmaların değerlendirilmesinde elde edilen çıktılarla, Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) adı verilen daha karmaşık bir dizayna ikinci dereceden polinomal modelin hesabına geçilebilmektedir. MKT sayesinde, model, gerçek yüzey cevabına yaklaşmaktadır. Bu amaçla, deneysel çalışmaların değerlendirilmesinden elde edilen çıktılar, denklem 1.5'de gösterilen ikinci dereceden polinoma uyarlanmaktadır [25].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i<j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \dots \quad (1.5)$$

Bu denklemde Y girdiler sonucu elde edilen cevapları(çıktıları), X_i ve X_j prosese etkisi olan bağımsız faktörleri, b_0 sabit katsayıyı, b_i ve b_{ii} 1. derece lineer katsayıyı, b_{ij} ikinci dereceden olan etkileşimi göstermektedir. Elde edilen modelin geçerliliği daha sonra, varyans analizi ile kontrol edilmektedir.

YYY uygulanma aşamaları;

1. İnceleme çalışmaları aracılığıyla sistemdeki en önemli değişkenlerin ve düzeylerinin seçilmesi,
2. Deney stratejisinin belirlenmesi ve deneylerin seçilen deney matrisine uygun olarak gerçekleştirilmesi,
3. Toplanan deneysel verilerin polinomal bir fonksiyona uydurularak matematiksel ve istatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesi,
4. Modelin uyumunun değerlendirilmesi,
5. En iyi bölge yönüne doğru bir yer değişiminin gerçekleştirilme olasılığı ve gerekliliğinin doğrulanması,
6. Her değişken için en iyi değerlerin elde edilmesi şeklinde özetlemiştir [19].

- **Merkezi Kompozit Tasarım**

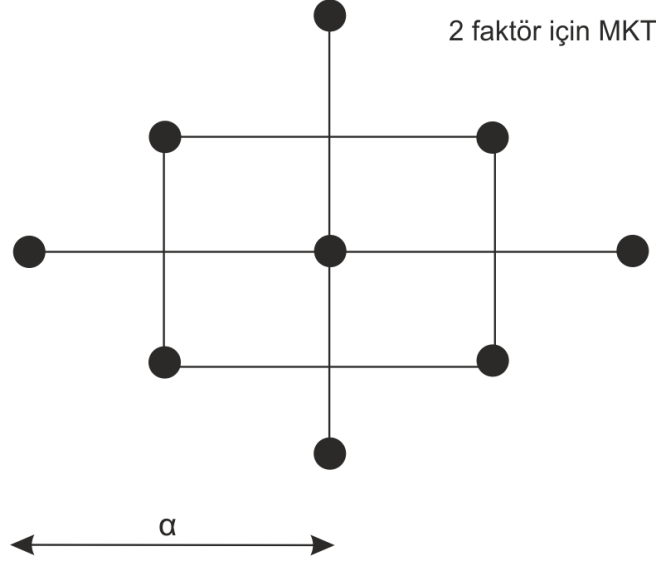
Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) deney stratejisi Box ve Wilson tarafından 1951 yılında 3^k faktöriyel tasarımlara alternatif olarak bulunmuştur. MKT, YYY'nin en sık kullanılan uygulamalarından biridir. MKT deney stratejisi düzeyleri genellikle -1 ve +1 şeklinde kodlanan 2^k faktöriyel bölümden, n_c sayıda ve düzeyi 0 olarak kodlanan merkez noktadan ve merkez noktadan α kadar uzaklıkta $2k$ sayıda eksen (yıldız) noktadan oluşur. Gerçekleştirilecek olan toplam deney sayısı $N = 2^k + 2k + n_c$ şeklinde hesaplanır [19].

Eksen noktalarının deney düzeni içinde Tablo 1.5' de görüldüğü gibi olmaktadır.

Tablo 1.5: MKT eksen noktaları

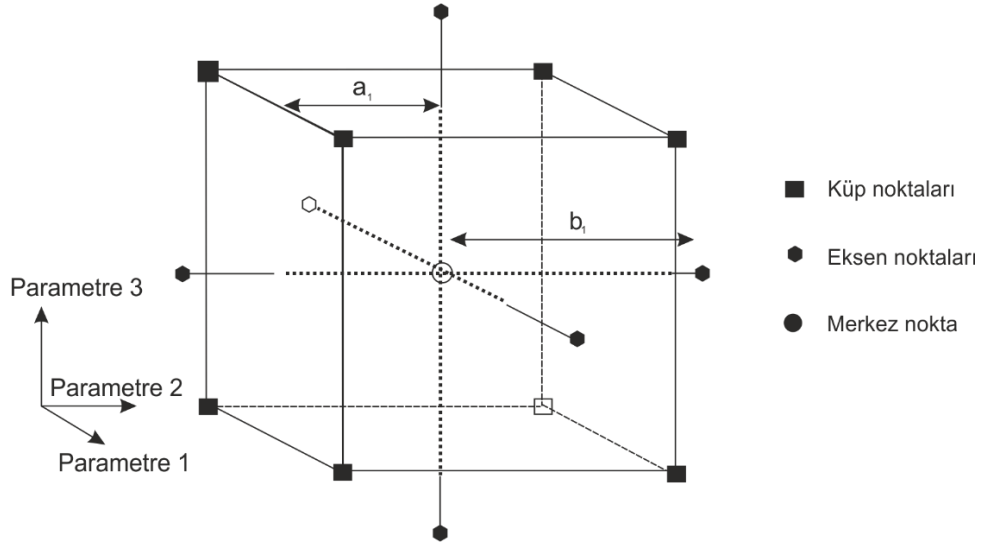
X_1	X_2	.	.	.	X_k
$-\alpha$	0	.	.	.	0
$+\alpha$	0	.	.	.	0
0	$-\alpha$.	.	.	0
0	$+\alpha$.	.	.	0
.
.
0	0	.	.	.	$-\alpha$
0	0	.	.	.	$+\alpha$

MKT deney stratejisi kullanılarak oluşturulacak ikinci dereceden modeldeki faktörlerin ana etkileri ve birinci mertebeden etkileşim etkileri $2k$ denemesinden elde edilir. Merkez noktalar kullanılarak ise modelin eğriselliği test edilir. $2k$ sayıda eksen noktalar kullanılarak da modelin karesel terimleri tahmin edilir [19].



Şekil 1.11: 2^2 MKT deneme düzeni

Şekil 1.11’da yer alan dörtgenin 4 köşesinde yer alan noktalar 2^2 faktöriyel noktalardır. Karenin merkezinde yer alan nokta merkez noktadır ve bu merkez noktada birden fazla tekrar gerçekleştirilebilir. Karenin dışında yer alan ve merkez noktada her biri α kadar uzaklıkta olan 4 nokta da modele ait eksen noktaları tarif etmektedir. Bu durum MKT deney stratejisinin en basit halidir [19].



Şekil 1.12: 2^3 MKT deneme düzeni

Şekil 1.12’da 2 düzeyli 3 faktörlü MKT deneme düzeninin bileşenlerinin çözüm uzayında yerleşimi görülmektedir. 3 faktörlü tasarımda çözüm uzayı küp

şeklindedir. Aynı şekilde küpün köşelerinde $2^3 = 8$ faktöriyel kısma ait noktalar yer almaktadır. Bu deneme düzeninde 2×3 olmak üzere her biri merkez noktadan α kadar uzaklıkta olan ve küpün her bir yüzeyinden geçen 6 tane eksen nokta yer alır [19].

1.6 Literatür Taraması

Guida vd. (2007), çalışmalarında atıksulardan organik maddenin ve AKM'nin koagülasyon prosesi ile giderim etkisini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla dört atıksu arıtma tesisi ve üniversite laboratuvarında bulunan pilot arıtma tesisinden alınan numunelerde (24 örnek) İtalyan su kalite deşarj limitlerini karşılamak için optimizasyon çalışması yapmışlardır. Jar testi deneylerini 100 rpm 1 dk hızlı, 30 rpm da 20 dk. yavaş karıştırma ve 30 dakika çökelme şeklinde yürütmüşlerdir. Alum dozu 150 - 450 mg/L, pH 4-10 arasında ve oda sıcaklığında çalışmışlardır. Flokülasyon işlemi için anyonik polielektrolit kullanmışlardır. Ham ve koagüle edilmiş atıksularda KOİ, AKM ve Kalıntı Alüminyum analizleri yapmışlardır. 450 mg/L alum dozunda yapılan koagülasyon deneylerinde iki tesis için KOİ giderim verimleri sağlanamamasına karşı diğer 2 tesiste 150 mg/L alum dozu kullanılarak yapılan koagülasyon prosesi ile KOİ (<160 mg/L) ve AKM (<80 mg/L) limitlerini karşılamak için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır. En yüksek KOİ giderimi (% 80) Nola tesislerinde pH 6-8 arasında elde etmişlerdir. Nola tesisi ile aynı başlangıç KOİ değerine sahip olmasına rağmen Marcianese tesisi atıksuyunda daha az KOİ giderimi olduğu sonucuna varmışlardır. Üniversite tesisinde KOİ giderimi pH artışı ile beraber (8'e doğru) %55'den %75-85'e AKM ile paralel olarak arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Atıksu kaynağı, pH ve uygulanan alum dozundan dolayı; istatistiksel analizlerin her tesiste KOİ ve AKM giderimleri arasında farklı korelasyon değerleri davranışı gösterdiği sonucuna varılmıştır [28].

Wang vd. (2007), Kağıt geri dönüşüm atıksularının koagülasyon-flokülasyon prosesi ile arıtımı için koagülant olarak alüminyum klorür, flokülant olarak ise modifiye edilmiş polimer olan chitosan-g-PDMC (poly(2-methacryloyloxyethyl) trimethyl ammonium chloride) kullanılmışlardır. Bulanıklık ve çamur hacim indeksi değerlerini en aza indirmek ve optimize etmek için yanıt yüzey yöntemi ve jar testi deneyleri uygulamışlardır. YYY standart tasarımı olan merkezi kompozit tasarım ile

koagülant dozu, flokülant dozu ve pH faktörlerinin arıtma verimine olan etki ve etkileşimleri incelenmiştir. Bulanıklık ve çamur hacim indeksi için optimum koşullar, koagülant dozu 759 mg/L, flokülant dozu 22,3 mg/L ve pH 5,4 şartlarında sağlanmıştır. Doğrulama deneyleri ile koagülasyon-flokülasyon sürecinin optimizasyonu için YYY'nin uygun bir yaklaşım olduğu sonucuna varmışlardır [29].

Ahmad vd. (2005), Palmiye yağı fabrikası atık sularının arıtılmasının yanı sıra su ıslahı ve yeniden kullanımı için membran ayırma teknolojisi ile birleşmiş koagülasyon-flokülasyon prosesini kullanmışlardır. Mevcut araştırmada membran kirlenme sorunlarının azaltılması için bir ön işlem olan koagülasyon-flokülasyon işlemi bir pilot membran tesisinde uygulanmıştır. Arıtma optimizasyonunu sağlamak için jar testi yapılmış ve YYY kullanılmıştır. Koagülant dozu, flokülant dozu ve pH faktörlerinin etkisi ve etkileşimini açıklamak için 23 deney içeren merkezi kompozit tasarım (MKT) seçilmiştir. MKT parametre etkilerinin belirlenmesinde başarılı olmuştur. Koagülant dozu, flokülant dozu ve pH sırasıyla, 15000 mg/L, 300 mg/L ve 6 optimum değerlerinde %78 su geri kazanımı ve 20 NTU bulanıklık değerleri elde edilmiştir [30].

Ahmad vd. (2007), yaptıkları çalışmada kağıt hamuru ve kağıt fabrikası atıksularının arıtılması için iki önemli parametre olan koagülant dozu ve pH'nin optimize edilmesi için YYY ve yüz merkezli merkezi kompozit tasarım uygulamışlardır. Koagülasyon-flokülasyon prosesi ile elde edilecek temel amaç arıtılan atıksuda yüksek toplam askıda katı madde giderimi, düşük çamur hacim indeksi ve yüksek miktarda su geri kazanımıdır. Koagülant dozu ve pH'nin optimum olduğu koşullar sırasıyla 1045 mg/L ve 6,75 olduğunda %99 AKM giderimi, 37 mg/L çamur hacim indeksi ve %82 su geri kazanımı elde etmişlerdir [31].

Koagülasyon-flokülasyon prosesi salça üretiminden kaynaklanan atıksuların biyolojik arıtım kullanılmadan önce uygulanan bir ön arıttır. Martin vd. (2011), bu amaçla yaptıkları çalışmada koagülasyon ve flokülasyon dozlarını optimize etmek ve işletme maliyeti, sonraki biyolojik arıtma etkileri ile arasındaki ilişkileri değerlendirmek için 52 deneyli tam faktöriyel tasarım ve yanıt yüzey yöntemi kullanmışlardır. Sonuçlar tüm pH şartlarında aynı olmasına rağmen kolay işletme ve düşük işletme maliyetleri nedeniyle pH ayar aşamalarını ortadan kaldırmak için bazik

pH seçmişlerdir. Bazik pH şartlarında kimyasal oksijen ihtiyacı, bulanıklık ve toplam organik karbon için en iyi regrasyon değerleri (R^2) sırasıyla 0,9136, 0,8397 ve 0,8512 olarak elde edilmiştir. Bazik pH'da KOİ ve bulanıklık giderimi için ANOVA analizi sonucunda en önemli faktörün koagülant dozu olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ancak koagülant dozu ve flokülant dozunun her ikisinin de etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Alkali şartlarda birden fazla tepki optimizasyon edildiği zaman KOİ, Bulanıklık ve TOC için sırasıyla %82, %72 ve %13 giderim elde etmişlerdir [32].

Wang vd. (2011), koagülasyon-flokülasyon süreciyle kağıt hamuru atıksuları arıtımı için koagülant olarak alüminyum klorür ve flokülant olarak modifiye edilmiş doğal polimer starch-g-PAM-g-PDMC [polyacrylamide and poly (2-methacryloyloxyethyl) trimethyl ammonium chloride] kullanmışlardır. En etkili üç faktör olan koagülant dozu, flokülant dozu ve pH'nın etkileri ve etkileşimlerinin bulanıklık, lignin gideriminin yanı sıra su geri kazanımı üzerine olan etkileri yeni bir yaklaşım olarak YYY ve uniform kombinasyon tasarımı ile değerlendirilmiştir. Supernatant bulanıklık giderimi, lignin giderimi ve su geri kazanımı için istenilen optimum cevapları 871 mg/L koagülant dozu, 22,3 flokülant dozu ve pH 8,35 elde etmişlerdir. Onay deneyleri ile uniform tasarım ve YYY kombinasyonunun kağıt hamuru fabrikası atıksularında koagülasyon-flokülasyon ile arıtım işlemini optimize etmek için güçlü ve yararlı bir yaklaşım olduğunu göstermişlerdir [33].

Freitas vd. (2015), doğal bir koagülant olarak banya sıvısı kullanarak koagülasyon flokülasyon süreci ile tekstil endüstrisi atıksularının gideriminin optimizasyonunu çalışmışlardır. Optimizasyon deneylerini jar testi ile gerçekleştirmişlerdir. Doğal koagülantın koagülasyon aktivesini araştırmışlar ve verimliliğini demir klorür ile karşılaştırmışlardır. KOİ, bulanıklık ve yüzde renk giderimi üzerine pH, koagülant dozu ve banya sıvısı dozajı etkisini analiz etmişlerdir. pH 6'da 88 mg Fe^{+3} ve 3,2 mg/L banya sıvısı kullanılarak, %93,57 renk, %97,24 bulanıklık ve % 85,69 KOİ yüzde giderim verimleri elde etmişlerdir [34].

Wang vd. (2014), tütün sarma kağıdı atıksularını koagülasyon flokülasyon proses ile arıtmak için koagülant olarak PAC, flokülant olarak katyonik poliakrilamit kullanmışlardır. KOİ ve Renk giderimini maksimize etmek için jar testi deneyleri gerçekleştirmiş ve prosesi optimize etmek için YYY uygulamışlardır. PAC dozajı,

flokülant dozajı ve arıtmadaki pH gibi 3 faktörün etkileşimlerini ve etkilerini test etmek için YYY'nin standart bir yaklaşımı olan MKT'yi kullanmışlardır. Katyonik poliakrilamid 4,8 mg/L, PAC 715 mg/L ve pH 6,6 olan optimum şartlarda sırasıyla KOİ için %67,8 renk için %77,7 giderim elde edilebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca bu çalışmanın regrasyon denklemi bütün sarma kağıdı atıksuyunun koagülasyon flokülasyon prosesi için teorik olarak kullanılabilmesi sonucuna varmışlardır [35].

Di Bella vd. (2014), çalışmalarında KOİ, Toplam Organik Karbon ve Toplam Petrol Hidrokarbonları ölçümleri ile koagülasyon/flokülasyon prosesinin ön arıtılmış kirliliklerde organik konsantrasyonun azaltılması amacıyla atıksuların arıtımını değerlendirmişlerdir. Augusta Limanı'ndaki yağ yüzdürme tankı çökeleğinden alınan atıksu örneklerinin koagülasyon şartlarını optimize etmişlerdir. Jar testi deneyleri 200 rpm 1 dk, 30 rpm 20 dk ve 180 dk çökeltme zamanında çalışılmıştır. FeCl₃ ve Al₂(SO₄)₃*18H₂O koagülant olarak kullanmışlardır. Alüminyum sülfatın biyolojik prosesin performansını kısıtlayan temel kirleticilerin gideriminde daha uygun olduğunu gözlemişlerdir [36].

Moghaddama vd. (2010), Acid red 119 sulu boya çözeltisinde, şehir su şebekesi çamurunun Demir Klorür çamuru performansını incelemişlerdir. Bu amaçla, koagülasyon/flokülasyon prosesi için üç işletme değişkeni olan başlangıç pH'sı, koagülasyon dozu ve başlangıç boya konsantrasyonu değişkenlerini optimize etmek için yanıt yüzey yöntemini kullanmışlardır. Optimum başlangıç pH'sı, demir klorür çamuru dozu ve başlangıç konsantrasyonu sırasıyla 3,5 , 236,68 mg kurumuş çamur/L ve 65,91 mg/L olarak bulmuşlardır. %96,53 boya giderimi elde etmişler ki buda YYY ile elde edilen model sonuçlarına oldukça yakındır. Bu nedenle, atıksu arıtma tesislerinde koagülasyon/flokülasyon prosesinde ucuz maliyetli bir materyal olarak demir klorür çamurunun kullanımının bütün arıtma tesisleri işletim maliyetleri üzerine ekonomik yararlar sağlayacağı ve Acid red 119 boyasının arıtımı için yüksek verimlilik gibi bazı avantajlarından dolayı önerilebileceği kanaatine varmışlardır [37].

Gürtekin (2011), çalışmasında peyniraltı suyunun koagülasyon/flokülasyon yöntemi ile fizikokimyasal arıtılabilirliğini incelemiştir. Bu amaçla, koagülant olarak alüminyum sülfat (alum), demir (III) klorür ve demir (II) sülfat kullanmıştır. Farklı pH değerlerinin ve koagülant dozajlarının etkisi karşılaştırmış ve optimum şartları en

yüksek KOİ ve AKM giderme verimine göre belirlemiştir. Çalışmada farklı polielektrolit dozlarında çalışılmıştır. Alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat için optimum pH (alum için: 6, demir (III) klorür için: 5, demir (II) sülfat için: 5), koagülant dozu (alum için: 300 mg/L, demir (III) klorür için: 400 mg/L, demir (II) sülfat için: 400 mg/L) ve polielektrolit dozu (her üç koagülant için: 20 mg/L) bulunmuş ve bu optimum alum, demir (III) klorür ve demir (II) sülfat değerlerinin kullanılması sonucu sırasıyla %34, %31 ve %29 KOİ giderme verimi ve %90, %92 ve %80 AKM giderme verimi elde etmiştir. Bu çalışmadan, koagülasyon/flokülasyon prosesinin peyniraltı suyunun ön arıtımında yararlı bir proses olacağı sonucunu çıkarmıştır [38].

Zahrim vd. (2015), ligninin biyolojik olarak arıtılması zor olduğu için lignin içeren sentetik çözeltilerde koagülant olarak polyDADMAC kullanarak arıtılabilirliğini çalışmışlardır. Ayrıca kalsiyum laktat, magnezyum hidroksit ve anyonik poliakrilamid gibi çeşitli flokülantların etkisini araştırmışlardır. Kalsiyum laktat flokülant olarak magnezyum hidroksit ve anyonik poliakrilamitten daha iyi performans göstermiştir. Ulaşılan en yüksek lignin giderimi %50-68 arasında olmuştur. polyDADMAC – kalsiyum laktat' ın koagülasyon flokülasyon prosesinde kullanılmasıyla palmye yağı, kağıt ve kağıt hamuru, zeytinyağı gibi lignin içeren endüstrilerin atıksularının arıtımında potansiyel olarak kullanılabileceğini düşünülmektedir [39].

Lin vd. (2015), yüksek kalorili kömür atıksularının biyolojik arıtımından önce demir sülfat kullanarak koagülasyon prosesi ile ön arıtımının optimizasyonunu çalışmışlardır. Merkezi kompozit box-behnken deney dizaynı ve YYY'ni koagülasyonun fiziksel ve kimyasal performansı üzerinde başlangıç pH'sı ,demir sülfat dozu ve işletme zamanı gibi üç işletme değişkeninin interaktif etkisini değerlendirmek ve optimize etmek için kullanmışlardır. KOİ giderimi, siyanür giderimi, kükürt giderimi ve toplam yağ giderimi gibi 4 bağımsız parametre sonuçları ölçülmüştür. Başlangıç pH, demir sülfat dozu ve reaksiyon süresi kimyasal çöktürme ve koagülasyon ile giderim üzerinde kayda değer etkilerinden dolayı KOİ gideriminde, siyanür gideriminde, kükürt gideriminde ve toplam yağ gideriminde önemli etkilere sahip olmuştur. Optimum şartlar 11 başlangıç pH'sı, 1,5 g/L demir sülfat dozajı ve 120 dk'lık reaksiyon süresi olarak tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar ve model tahminleri uyum göstermiştir. KOİ, siyanür, kükürt ve toplam yağ giderimleri sırasıyla %15,25, %93,82 , %73,36 ve %4,73 olarak elde edilmiştir [40].

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Materyaller

2.1.1 Kullanılan Atıksuyun Temini ve Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda, Akhisar Organize Sanayi Bölgesi'nde kurulu bulunan Yıldız Entegre A.Ş. – Manisa Yonga Levha Fabrikası'ndan temin edilen atık sular kullanılmıştır. Tesisin ve yonga levha endüstrisi atıksularının toplam kirliliğini temsil etmesi amacıyla numuneler atıksu arıtma tesisinin dengeleme havuzu çıkış noktasından alınmıştır. Alınan numuneler standart metotlar kullanılarak analiz edilmiş ve bulunan değerlerin ortalamaları Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1: Atıksu karakterizasyonu

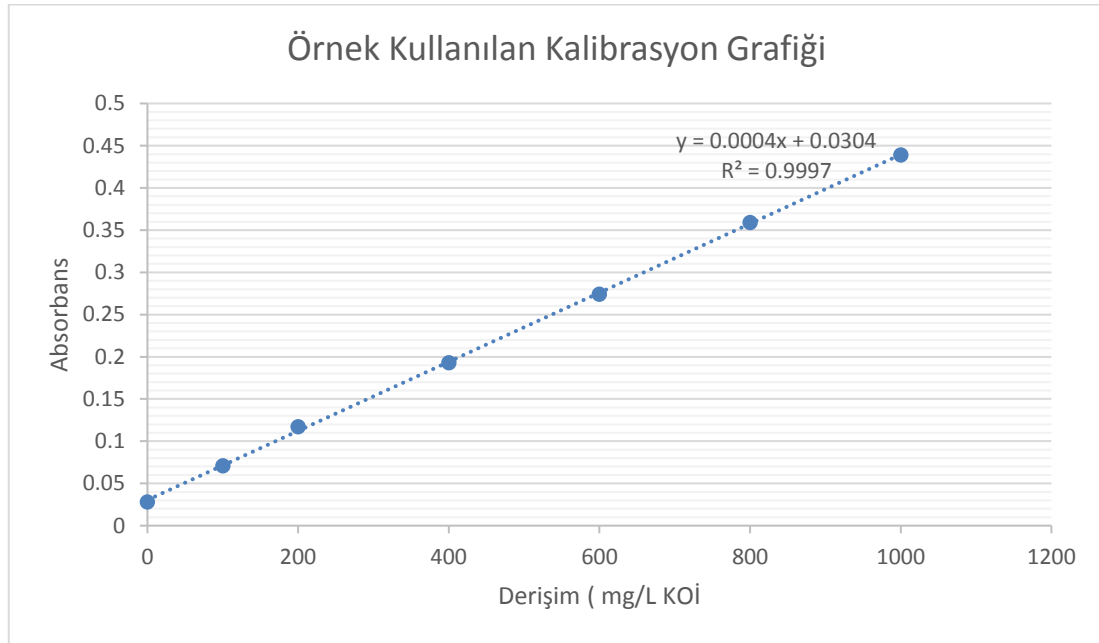
Parametre	Birim	Değer
KOİ	mg/L	9096
BOİ	mg/L	1400
AKM	mg/L	4621
Renk	Hazen	3090
Bulanıklık	NTU	920
pH		7,35
İletkenlik	mS/cm	5,46 (17,4°C)
Alkalinite	mg CaCO ₃ /L	550

- **Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) Analizi**

KOİ analizi Standart Metotlar SM 5220D kodlu kapalı reflüks kolorimetrik yöntem ile yapılmıştır. 1,5 mL Parçalama çözeltisi (Potasyum Dikromat - Civa Sülfat)

üzerine 3,5 mL Sülfürik Asit - Gümüş Sülfat karışım çözeltisi ilave edilmiş son olarak 2,5 mL numune eklenmiş ve dikkatlice çalkalandıktan sonra bu karışım 148 °C'de 2 saat kaynatmaya bırakılmıştır. 2 saat sonunda termoreaktörden çıkartılan karışım oda sıcaklığında soğuması için beklenmiş ve daha sonra bu karışımın önceden kalibre edilmiş spektrofotometre de 600 nm dalga boyunda okuma işlemi gerçekleştirilmiştir.

1000 mg/L'den daha yüksek olan numuneler çeşitli oranlarda seyreltilerek okumalar yapılmıştır. KOİ analizlerinde üç paralel çalışma yürütülmüş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır. Deneyler sırasında kullanılan kalibrasyon grafiklerinden bir tanesi örnek olarak Şekil 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: KOİ kalibrasyon grafiği

- **Askıda Katı Madde (AKM) Analizi**

Askıda Katı Madde deneyleri Standart Metotlar SM 2540'a göre yapılmıştır. Filtre kâğıdı (gözenek çapı 0,45 µm) 1 saat süre ile 105 °C'de sabit tartıma gelinceye kadar kurutulmuştur. Etüvden alınan filtreler desikatörde soğuması bırakılmıştır ve tartılmıştır (A). Uygun hacimde numune vakum pompası ve süzme ekipmanı yardımıyla süzölmüş ve filtre kâğıdı etüvde kurutulularak sabit tartıma getirilmiştir. Desikatörde soğuması beklendikten sonra tartılmıştır (B).

AKM miktarı denklem 2.1 yardımıyla hesaplanmıştır,

$$AKM(mg / L) = \frac{(B - A) \times 1000}{Numune Hacmi(mL)}$$

(2.1)

- **pH – İletkenlik**

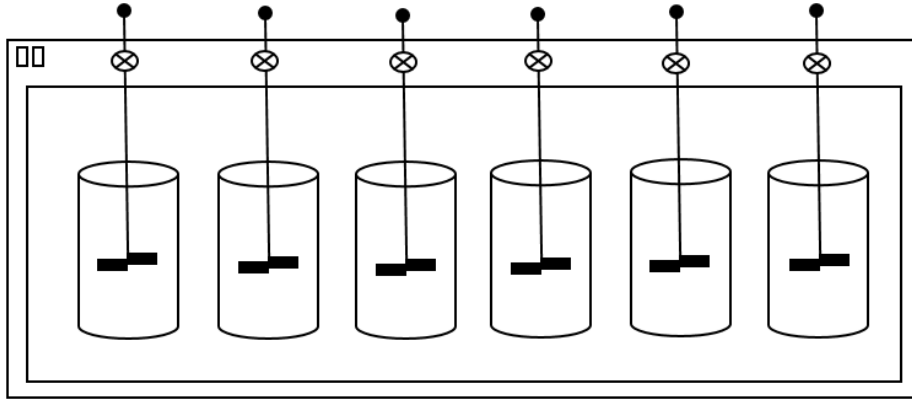
WTW 340i multi parametre yardımıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler yapılmadan önce gerekli olduğu durumlarda cihazın kalibrasyonu yapılmıştır.

2.1.2 Kullanılan Cihazlar

- ✓ Merck spectroquant pharo 300 spektrofotometre
- ✓ Velp Scientifica FC6S marka Jar Test Cihazı
- ✓ WTW CR3200 termoreaktör
- ✓ WTW 340i multiparametre ölçer
- ✓ Rocker 400 vakum pompası ve süzme seti
- ✓ Nüve FN 400 etüv
- ✓ Aquatürk saf su cihazı
- ✓ Precisa XB220A marka hassas terazi
- ✓ WTW photolab S12 model fotometre
- ✓ WTW Turb 550 IR model türbidimetre

2.1.3 Deney Düzenegi

Deneysel çalışmalarda, koagülasyon flokülasyon işlemleri klasik Jar Testi düzenegi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jar Testi düzenegine ait şematik gösterim Şekil 2.2’de verilmiş olup Şekil 2.3’de ise deneysel çalışmalarda çekilmiş bir fotoğraf bulunmaktadır.



Şekil 2.2: Jar testi düzeneğine ait şematik gösterim



Şekil 2.3: Deneysel çalışmalardan bir fotoğraf

2.1.4 Kullanılan Kimyasallar

Yapılmış olan deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasallar;

1. Koagülant Kimyasalları; Demir (III) Klorür ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Merck), Alum ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, Panreac) ve Polialüminyum Klorür ($\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_k$, Hayat Kimya)
2. KOİ analiz kimyasalları; gümüş sülfat (Ag_2SO_4 , Merck), potasyum dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, Merck), sülfürik asit (H_2SO_4 , Merck)
3. pH ayarlaması için; sodyum hidroksit (NaOH , Merck), sülfürik asit (H_2SO_4 , Merck)

2.2 Deneysel Metotlar

Deneysel çalışmalar iki aşamada yürütülmüş olup ilk aşamada ön denemeler yapılarak bağımsız değişkenlerin seviyeleri belirlenmiş, ikinci aşamada ise YYY ile belirlenen deney tasarımına uygun deneyler yapılmıştır.

2.2.1 YYY ile Deneysel Tasarım

Kimyasal koagülasyon, flokülasyon prosesinde KOİ ve AKM giderimini etkileyen değişkenler ve bunların seviyeleri yapılan ön çalışmalarla ve literatür dayalı olarak belirlenmiştir. Deney tasarımı her bir kimyasal koagülant için aynı bağımsız değişkenler için farklı seviyelerde seçilmiştir. Deney tasarımında Minitab 16 (Deneme Versiyonu) ile YYY'nin Merkezi Kompozit Tasarım metodu kullanılmıştır. Tasarımlar, 2 faktör ve bunların 3 farklı seviyeleri ile 4 merkez deneyi içermektedir. Her kimyasal koagülant için proses parametreleri ve bunların düşük, orta ve yüksek seviyeleri Tablo 2.2, Tablo 2.4 ve Tablo 2.6'da verilmektedir. Bağımsız değişken olarak kimyasal arıtım üzerinde en etkili parametreler olan;

- Kimyasal Koagülant Dozu (X_1)
- pH (X_2)

Bu parametrelere karşı bağımlı değişkenken olarak;

- KOİ Giderim Verimi (Y_1)
- AKM Giderim Verimi (Y_2) seçilmiştir.

• Alum ile Deneysel Tasarım

Tablo 2.2: Alum için tasarım faktörleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişkenler	Yanıt Yüzeyleri ve Seviyeleri		
	-1	0	1
Alum Dozu (g/L)	2	4	6
pH	7	9	11

Tablo 2.3: Alum için deneysel tasarım matrisi

	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

- **FeCl₃ ile Deneysel Tasarım**

Tablo 2.4: FeCl₃ için tasarım faktörleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişkenler	Yanıt Yüzeyleri ve Seviyeleri		
	-1	0	1
FeCl ₃ Dozu (g/L)	1	3	5
pH	7	8	9

Tablo 2.5: FeCl₃ için deneysel tasarım matrisi

	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

- **Polialüminyum Klorür ile Deneysel Tasarım**

Tablo 2.6: PAC için tasarım faktörleri ve seviyeleri

Bağımsız Değişkenler	Yanıt Yüzeyleri ve Seviyeleri		
	-1	0	1
PAC Dozu(ml/L)	4	5	6
pH	7	8	9

Tablo 2.7: PAC için deneysel tasarım matrisi

	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1	0
6	1	0
7	0	-1
8	0	1
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0

Tasarımlar 12 adet deneyden oluşmaktadır. Her bir kimyasal koagülant için Tablo 2.3, 2.5 ve 2.7’de oluşturulan deneysel tasarım matrisindeki şartlar uygulanmıştır. Deneyler, çevresel şartların en aza indirilebilmesi için karışık sıra ile gerçekleştirilmiş olup yukarıdaki tablolarda daha anlaşılır olabilmesi adına sırayla gösterilmiştir.

2.2.2 Kimyasal Arıtım ve Deneysel Yöntem

Deneyler 1 L’lik özel yapım cam reaktörlerde gerçekleştirilmiş olup numune hacmi 500 mL seçilmiştir. Deneylerde numunenin alındığı arıtma tesisi dikkate alınarak sıcaklık sabit tutulmamış oda şartlarında çalışılmıştır. Kimyasal arıtım prosesi aşağıda anlatılan adımlara göre uygulanmıştır.

- Öncelikle numuneler 0,01 N NaOH ve 0,01 N H₂SO₄ çözeltileri yardımıyla pH değerleri deneysel tasarımda bulunan değere ayarlanmıştır.
- pH ayarından sonra numuneler reaktöre alınmıştır. Deneysel tasarım matrisinde belirlenen dozajda kimyasal koagülant ilavesi yapılmış ve numuneler 120 rpm’de 2 dakika hızlı karıştırılmıştır (HK).
- HK’nın ardından bütün numunelere 2 ml/L anyonik polielektrolit ilavesinden sonra 30 rpm’de yavaş karıştırma işlemi 30 dakika boyunca uygulanmıştır (YK).
- Karıştırma bittikten sonra oluşan pıhtıların çökmesi için numuneler 1 saat boyunca bekletilmiş ve denge pH’ları ölçülmüştür.
- Çökelme işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin berrak kısmından alınan örneklerde KOİ ve AKM analizleri Bölüm 2.1.1’de anlatılan standart metotlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilen KOİ ve AKM giderim verimlerini hesaplamak için, Denklem 2.2’den faydalanılmıştır.

$$\% \text{ Giderim verimi} = \frac{C_0 - C_s}{C_0} \quad (2.2)$$

C₀= Başlangıç KOİ veya AKM konsantrasyonu (mg/L)

C_s= Kalan KOİ veya AKM konsantrasyonu (mg/L)

3. BULGULAR

3.1 Alum İçin Deneysel Sonuçlar

3.1.1 KOİ Giderimi

Alum kimyasal koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek) ve YYY ile uygulanan analiz sonucunda bulunan değerler (tahmin) ile birlikte Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Alum koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek-tahmin)

Deney No	Doz (g/L)	Başlangıç pH'sı	Denge pH'sı	% KOİ giderimi (gerçek)	% KOİ giderimi (tahmin)
1	2	7	5,93	65,1639	66,2602
2	6	7	4,17	67,6143	67,6574
3	2	11	9,25	58,4574	59,3372
4	6	11	6,18	71,0104	70,8371
5	2	9	6,87	70,1289	68,1528
6	6	9	4,56	74,4712	74,6014
7	4	7	4,50	69,3072	68,1679
8	4	11	7,22	67,0027	66,2962
9	4	9	6,00	72,1293	72,5862
10	4	9	6,11	72,2978	72,5862
11	4	9	5,74	72,1118	72,5862
12	4	9	5,77	71,9630	72,5862

Alum kimyasal koagülantı ile KOİ giderimi için yapılan deneylerin sonucunda elde edilen model Denklem 3.1’de verilmiştir. Denklem korelasyon katsayısı $R^2 = 0,9579$ olarak belirlenmiştir.

KOİ Giderim Verimi için model denklemi;

$$(Y_1) = -20,1779 - 1,6525 * X_1 + 21,1001X_2 - 0,3023 * X_1^2 - 1,3385 * X_2^2 + 0,6314 * X_1 * X_2 \quad (3.1)$$

Tablo 3.2: Alum için KOİ giderimi varyans analizi sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	196,48	196,48	39,296	27,31	0,000
Residual Error	6	8,634	8,634	1,439	155,16	0,001

ANOVA tablosundaki p değerlerine bakılarak parametrelerin ve elde edilen modelin anlamlılık değerleri belirlenebilir. H_0 hipotezi $\alpha=0,05$ ve $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyinde $p < \alpha$ olduğundan dolayı reddedilir. Bu sonuçlara göre seçilen faktörlerin KOİ giderim verimi üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

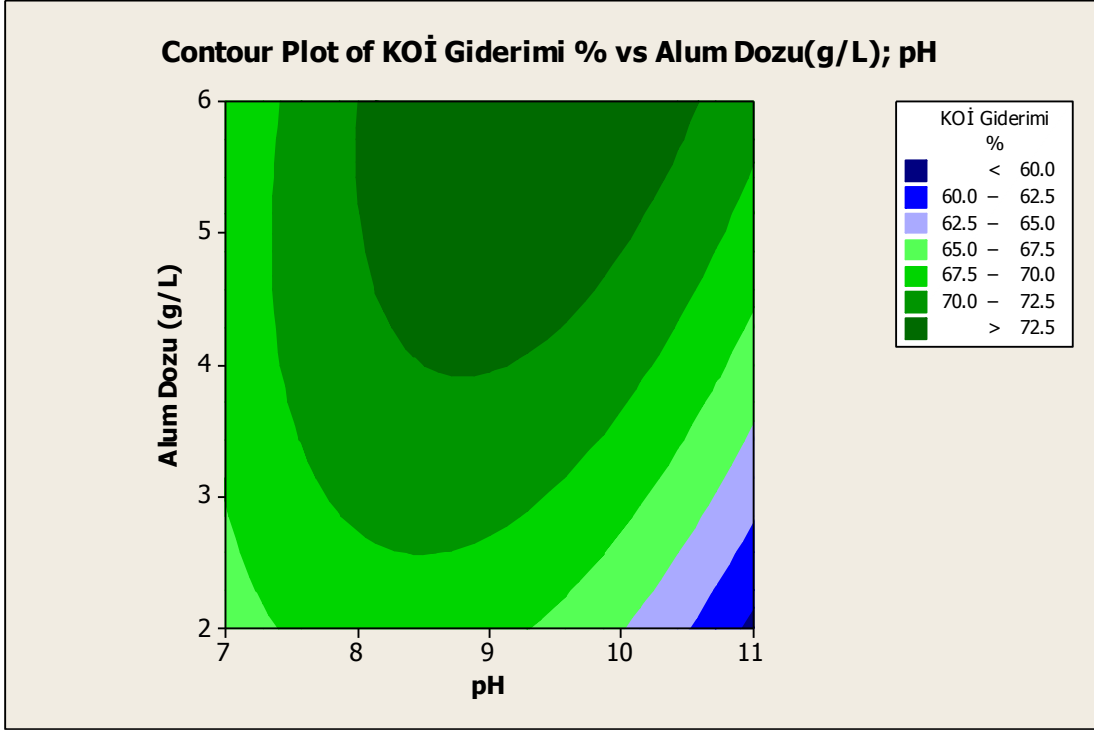
Alum kimyasal koagülantı için yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen şartlar Tablo 3.3’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen modelin geçerliliğini kontrol etmek amacıyla Tablo 3.3’de görülen optimum şartlarda tekrar deneyleri yapılmıştır. Bu tekrar deneyleri sonuçları Tablo 3.4’te gösterilmektedir. Elde edilen bu optimum şartlarda yapılan tekrar deneyleri modelin türettiği KOİ giderim verim sonuçlarına çok yakın olduğu için modelin geçerli olduğuna karar verilmiştir.

Tablo 3.3: Alum için KOİ giderimi verimlerinin optimum şartları

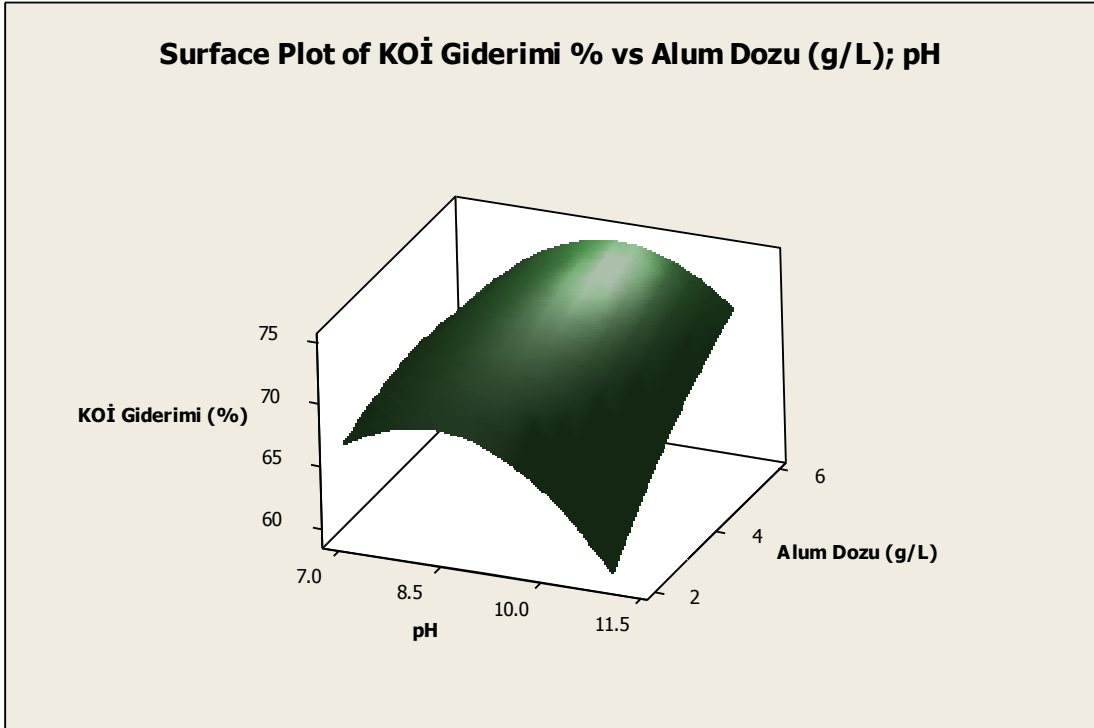
Koagülant Türü	Kimyasal Dozu (g/L)	pH	KOİ Giderimi %
Alum	4	9	72,5862

Tablo 3.4: Alum koagülantı ile KOİ giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri

Tekrar Deneyi	Kimyasal Dozu(g/L)	Başlangıç pH'sı	Denge pH'sı	KOİ Giderimi %	Ortalama
1	4	9	4,43	69,4183	71,9548
2	4	9	4,42	72,1136	
3	4	9	4,36	74,3324	



Şekil 3.1: KOİ giderim verimi pH – Alum dozu contour grafiği



Şekil 3.2: KOİ giderim verimi pH - Alum dozu surface grafiği

Şekil 3.1 ve 3.2’de görüldüğü gibi alum dozunun 4 g/L’nin üzerinde ve pH 8-10 aralığında KOİ giderim veriminin %72,5’in üzerinde olduğu, görülmektedir. Aynı

şekillerden görüleceği üzere düşük alum dozları ve pH 10'un üzerinde KOİ arıtma verimi düşmüştür.

3.1.2 AKM Giderimi

Alum kimyasal koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek) ve YYY ile uygulanan analiz sonucunda bulunan değerler (tahmin) ile birlikte Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5: Alum koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek-tahmin)

Deney No	Doz (g/L)	pH	% AKM giderimi (gerçek)	% AKM giderimi (tahmin)
1	2	7	97,9358	98,0008
2	6	7	95,6250	95,6970
3	2	11	97,6856	97,7934
4	6	11	98,3008	98,4156
5	2	9	98,4987	98,3258
6	6	9	97,6719	97,4850
7	4	7	97,3111	97,1740
8	4	11	98,6523	98,4296
9	4	9	98,3319	98,2305
10	4	9	98,3319	98,2305
11	4	9	98,0469	98,2305
12	4	9	97,8516	98,2305

Alum kimyasal koagülantı ile AKM giderimi için yapılan deney verilerinin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen model Denklem 3.2'de verilmiştir. Denklem korelasyon katsayısı $R^2 = 0,9484$ olarak belirlenmiştir.

AKM Giderim Verimi için model denklemi

$$(Y_2) = 97,1521 - 0,474116 * X_1 + 0,5213X_2 - 0,1072 * X_1^2 - 0,0813 * X_2^2 + 0,1829 * X_1 * X_2 \quad (3.2)$$

Tablo 3.6: Alum için AKM giderimi varyans analizi sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	6,7128	6,7128	1,34256	22,05	0,001
Residual Error	6	0,3654	0,3654	0,6089	1,21	0,44

ANOVA tablosundaki p değerlerine bakılarak parametrelerin ve elde edilen modelin anlamlılık değerleri belirlenebilir. H_0 hipotezi $\alpha=0,05$ ve $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyinde $p < \alpha$ olduğundan dolayı reddedilir. Bu sonuçlara göre seçilen faktörlerin AKM giderim verimi üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

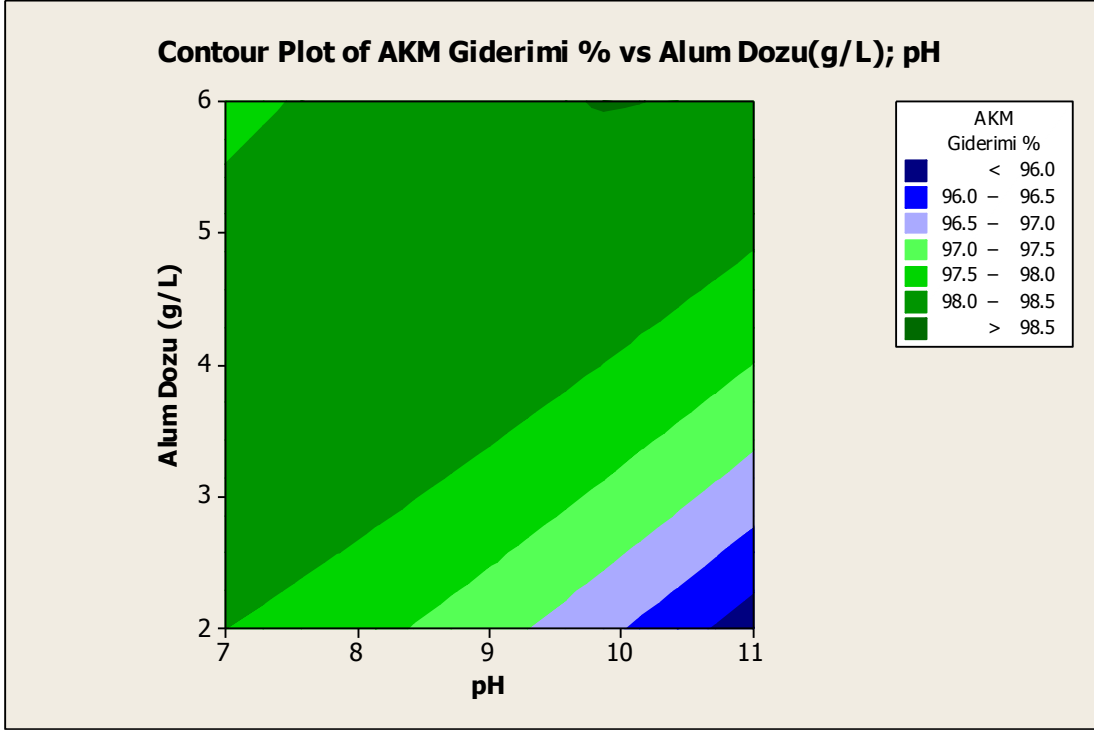
Alum kimyasal koagülantı için yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen şartlar Tablo 3.7’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen modelin geçerliliğini kontrol etmek amacıyla Tablo 3.7’de görülen optimum şartlarda tekrar deneyleri yapılmıştır. Bu tekrar deneyleri sonuçları Tablo 3.8’te gösterilmektedir. Elde edilen bu optimum şartlarda yapılan tekrar deneyleri modelin türettiği AKM giderim verimi sonuçlarına çok yakın olduğu için modelin geçerli olduğuna karar verilmiştir.

Tablo 3.7: Alum için AKM giderimi verimlerinin optimum şartları

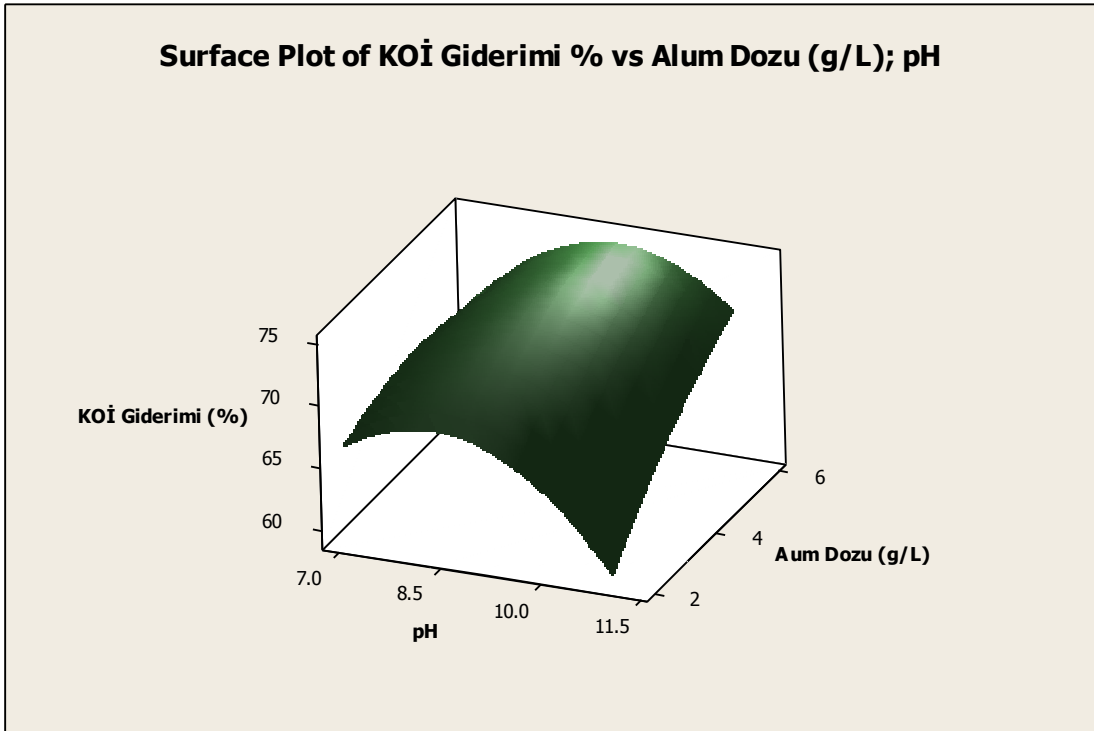
Koagülant Türü	Kimyasal Dozu (g/L)	pH	AKM Giderimi %
Alum	4	9	98,2305

Tablo 3.8: Alum koagülantı ile AKM giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri

Tekrar Deneyi	Kimyasal Dozu (g/L)	pH	AKM Giderimi (%)	Ortalama
1	4	9	98,7243	98,5261
2	4	9	98,5825	
3	4	9	98,2714	



Şekil 3.3: AKM giderim verimi pH-Alum dozu contour grafiği



Şekil 3.4: AKM giderim verimi pH-Alum dozu surface grafiği

Şekil 3.3 ve 3.4' ten doz 2 – 5,5 g/L ve pH 7 - 11 civarında %98-98,5 aralığında AKM giderim verimi elde edilebileceği görülmektedir.

3.2 Demir III Klorür İçin Deneysel Sonuçlar

3.2.1 KOİ Giderimi

Demir III Klorür (FeCl₃) kimyasal koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek) ve YYY ile uygulanan analiz sonucunda bulunan değerler (tahmin) ile birlikte Tablo 3.9’de verilmiştir.

Tablo 3.9: FeCl₃ koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek-tahmin)

Deney No	Doz (g/L)	Başlangıç pH'sı	Denge pH'sı	% KOİ giderimi (gerçek)	% KOİ giderimi (tahmin)
1	1	7	6,33	70,0642	69,1788
2	5	7	2,60	74,7094	74,5085
3	1	9	7,21	57,5936	56,6547
4	5	9	4,12	78,5027	78,2483
5	1	8	6,65	61,1800	63,0043
6	5	8	2,82	76,0107	76,4660
7	3	7	4,23	77,0160	78,1023
8	3	9	6,05	72,5169	73,7102
9	3	8	5,39	76,4314	75,9938
10	3	8	5,39	77,0374	75,9938
11	3	8	5,38	76,1872	75,9938
12	3	8	5,37	76,5989	75,9938

FeCl₃ kimyasal koagülantı ile KOİ giderimi için yapılan deneyler sonucunda elde edilen Denklem 3.3’de verilmiştir. Denklem korelasyon katsayısı $R^2 = 0,9806$ olarak belirlenmiştir.

KOİ Giderim Verimi için elde edilen model denklemi;

$$(Y_1) = 112,571 - 3,51 * X_1 - 6,894X_2 - 1,565 * X_1^2 - 0,088 * X_2^2 + 2,033 * X_1 * X_2 \quad (3.3)$$

Tablo 3.10: FeCl₃ için KOİ giderimi varyans analizi sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	485,522	485,522	97,104	60,73	0,000
Residual Error	6	9,594	9,594	1,599	23,92	0,013

ANOVA tablosundaki p değerlerine bakılarak parametrelerin ve elde edilen modelin anlamlılık değerleri belirlenebilir. H₀ hipotezi $\alpha=0,05$ ve $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyinde $p < \alpha$ olduğundan dolayı reddedilir. Bu sonuçlara göre seçilen faktörlerin KOİ giderim verimi üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

FeCl₃ kimyasal koagülantı ile yapılan deneylerden elde edilen optimum şartlar Tablo 3.11’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen modelin geçerliliğini kontrol etmek amacıyla Tablo 3.11’de görülen optimum şartlarda tekrar deneyleri yapılmıştır. Bu tekrar deneyleri sonuçları Tablo 3.12’te gösterilmektedir. Elde edilen bu optimum şartlarda yapılan tekrar deneyleri modelin türettiği KOİ giderim verim sonuçlarına çok yakın olduğu için modelin geçerli olduğuna karar verilmiştir.

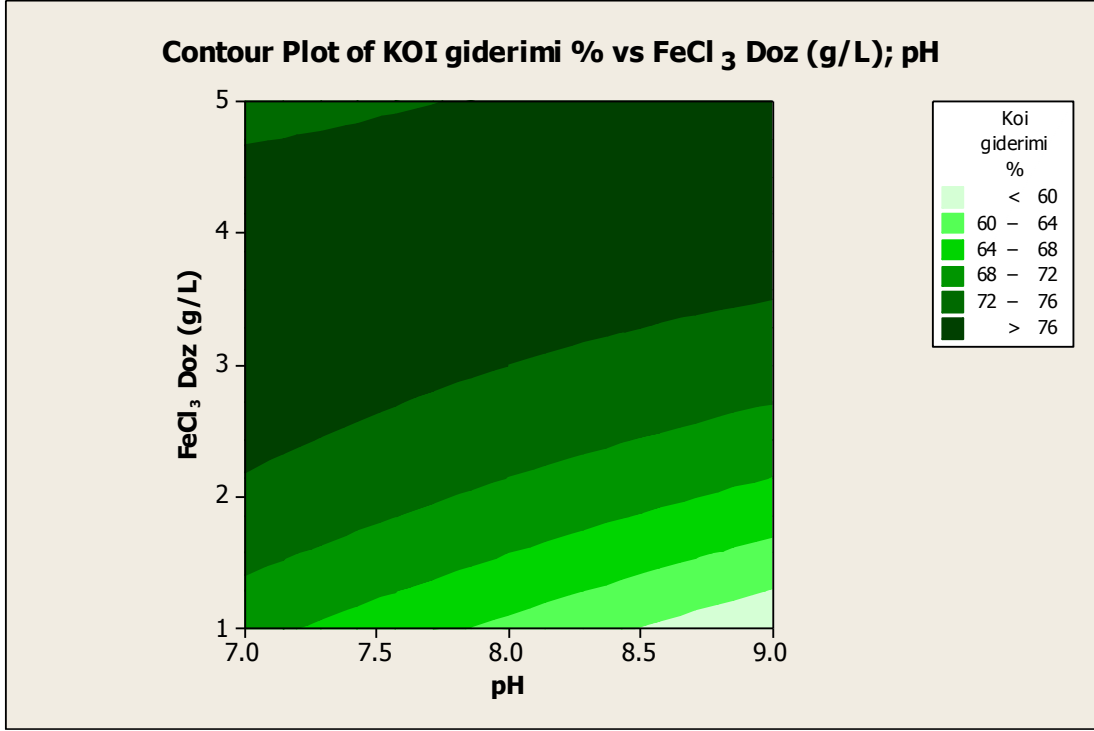
Tablo 3.11: FeCl₃ için KOİ giderimi verimlerinin optimum şartları

Koagülant Türü	Kimyasal Dozu (g/L)	pH	KOİ Giderimi (%)
FeCl ₃	3,4	7	78,3580

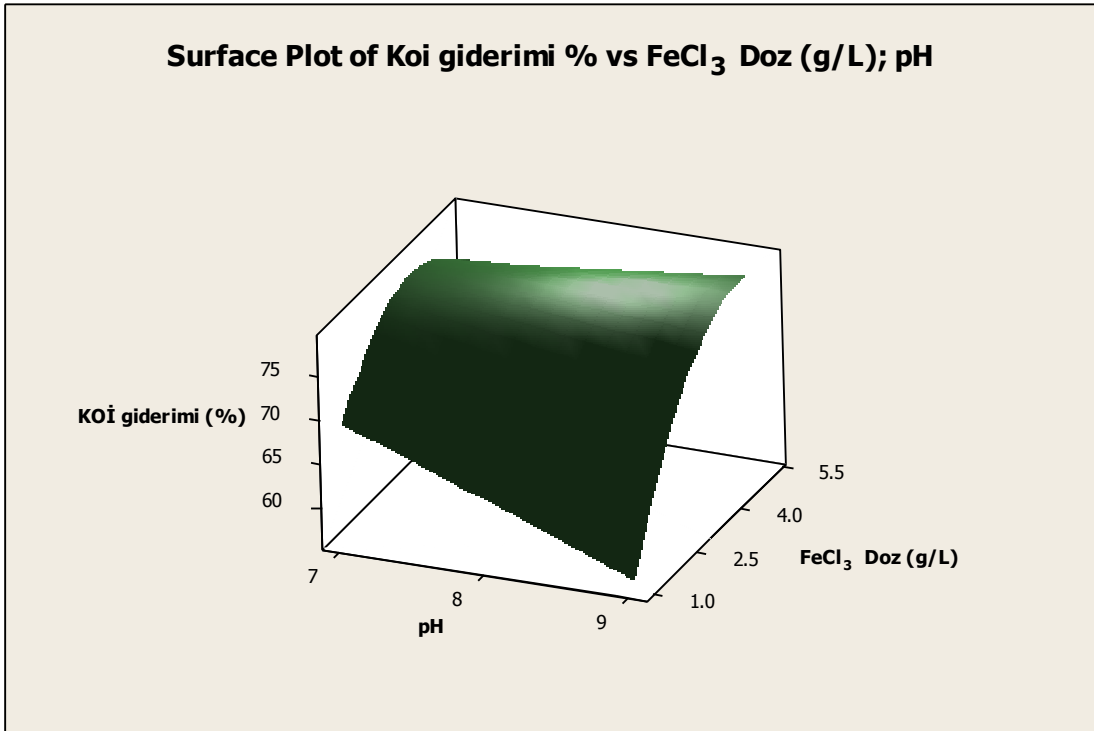
Tablo 3.12: FeCl₃ koagülantı ile KOİ giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri

Tekrar Deneyi	Kimyasal Dozu (g/L)	Başlangıç pH'sı	Denge pH'sı	KOİ Giderimi (%)	Ortalama
1	3,4	7	4,43	78,6282	77,5709
2	3,4	7	4,42	77,4725	
3	3,4	7	4,36	76,6122	

Şekil 3.5 ve 3.6’den görüldüğü gibi 3,4 g/L optimum dozunda çalışıldığında pH 7-9 aralığında %76’nın üzerinde KOİ giderimi elde edilebilmektedir.



Şekil 3.5: KOİ giderim verimi pH-FeCl₃ dozu contour grafiği



Şekil 3.6: KOİ giderim verimi pH-FeCl₃ dozu surface grafiği

3.2.2 AKM Giderimi

FeCl₃ kimyasal koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek) ve YYY ile uygulanan analiz sonucunda bulunan değerler (tahmin) ile birlikte Tablo 3.13’de verilmiştir.

Tablo 3.13: FeCl₃ koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek-tahmin)

Deney No	Doz (g/L)	pH	% AKM giderimi (gerçek)	% AKM giderimi (tahmin)
1	1	7	94,0021	94,7665
2	5	7	92,3992	93,8660
3	1	9	96,8459	96,6682
4	5	9	99,1449	98,6695
5	1	8	96,9397	96,3529
6	5	8	96,8947	96,9033
7	3	7	96,7766	95,5454
8	3	9	98,9199	98,8980
9	3	8	97,3630	97,8572
10	3	8	97,6215	97,8572
11	3	8	98,2448	97,8572
12	3	8	98,2448	97,8572

FeCl₃ kimyasal koagülantı ile AKM giderimi için yapılan deneyler sonucunda elde edilen model Denklem 3.4’de verilmiştir. Denklemin korelasyon katsayısı **R² = 0,8740** olarak belirlenmiştir.

AKM Giderim Verimi için elde edilen model denklemi

$$(Y_2) = 49,2974 - 0,9206 * X_1 + 10,7573 X_2 - 0,3073 * X_1^2 - 0,6356 * X_2^2 + 0,3672 * X_1 * X_2 \quad (3.4)$$

Tablo 3.14: FeCl₃ için AKM giderimi varyans analizi sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	26,7258	26,7258	5,3452	8,32	0,011
Residual Error	6	3,8525	3,8525	0,6421	8,13	0,06

ANOVA tablosundaki p değerlerine bakılarak parametrelerin ve elde edilen modelin anlamlılık değerleri belirlenebilir. H₀ hipotezi α=0,05 ve α=0,01 anlamlılık

düzeyinde $p < \alpha$ olduğundan dolayı reddedilir. Bu sonuçlara göre seçilen faktörlerin AKM verimi üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

$FeCl_3$ kimyasal koagülantı için yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen şartlar Tablo 3.15’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen modelin geçerliliğini kontrol etmek amacıyla Tablo 3.15’de görülen optimum şartlarda tekrar deneyleri yapılmıştır. Bu tekrar deneyleri sonuçları Tablo 3.16’te gösterilmektedir. Elde edilen bu optimum şartlarda yapılan tekrar deneyleri modelin türettiği AKM giderim verim sonuçlarına çok yakın olduğu için modelin geçerli olduğuna karar verilmiştir.

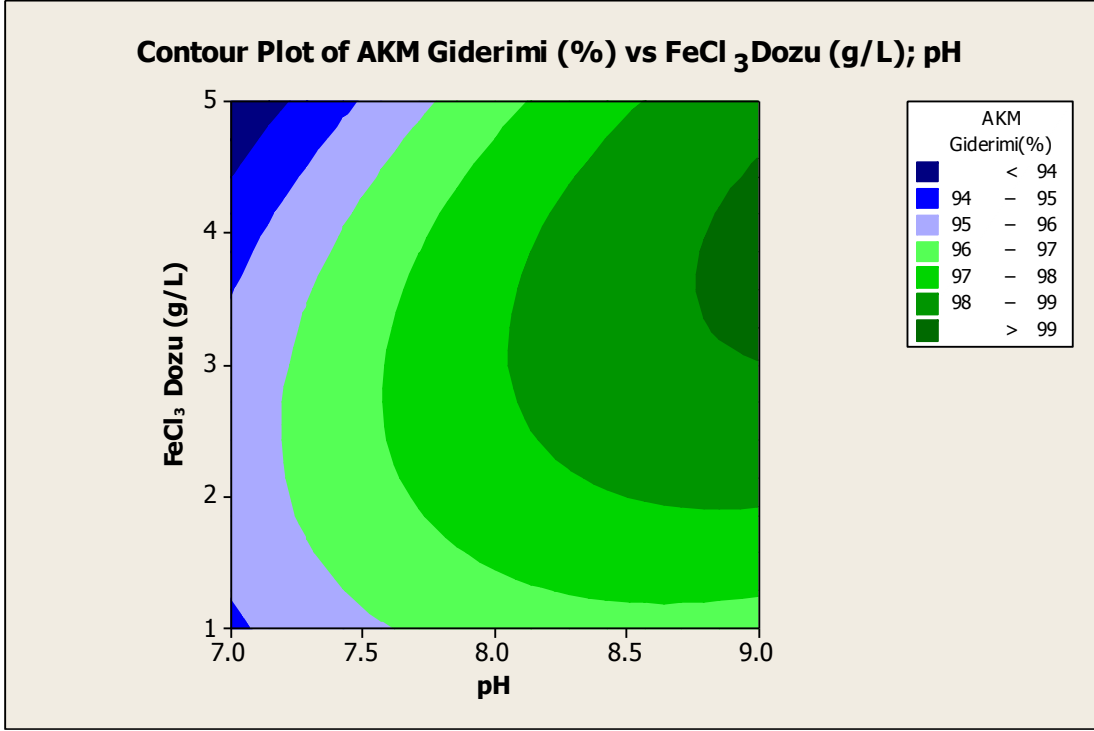
Tablo 3.15: $FeCl_3$ için AKM giderimi verimlerinin optimum şartları

Koagülant Türü	Kimyasal Dozu (g/L)	pH	AKM Giderimi (%)
$FeCl_3$	3,4	7	95,1280

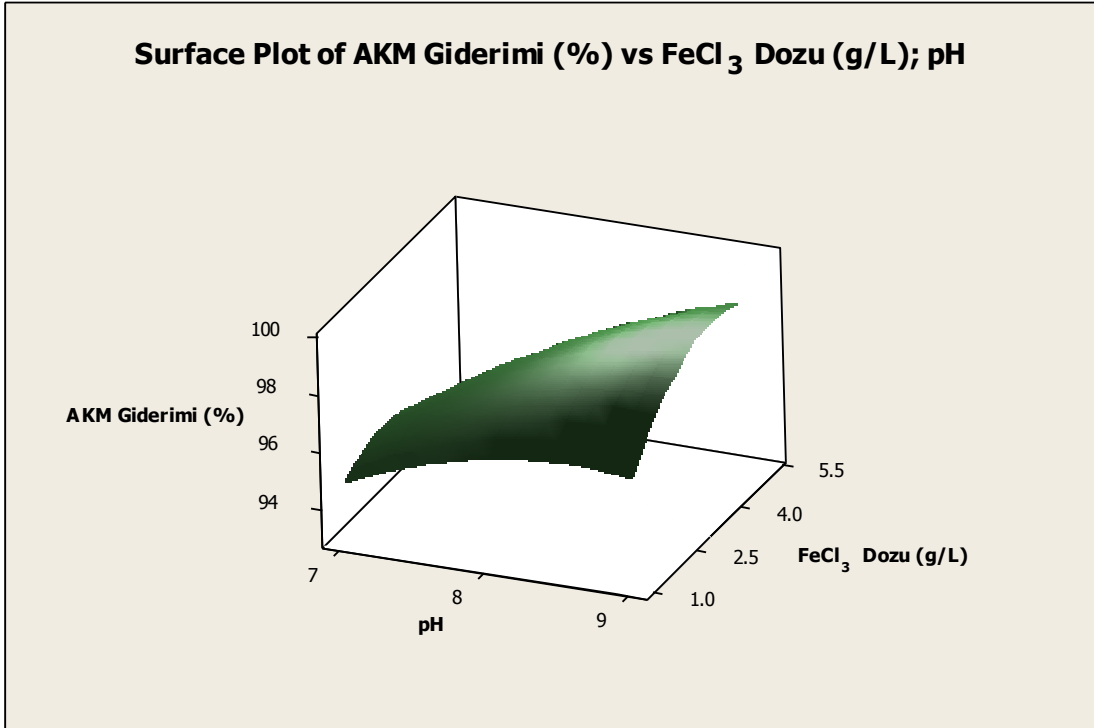
Tablo 3.16: $FeCl_3$ koagülantı ile AKM giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri

Tekrar Deneyi	Kimyasal Dozu (g/L)	pH	AKM Giderimi (%)	Ortalama
1	3,4	7	95,5087	95,945767
2	3,4	7	96,0332	
3	3,4	7	96,2954	

Şekil 3.7 ve 3.8 görüldüğü gibi pH’nın 8,5-9 olduğu zaman 2 g/L’nin üzerinde olduğu $FeCl_3$ dozları ile %98’in üzerinde AKM arıtma verimi elde edilmiştir.



Şekil 3.7: AKM giderim verimi pH-FeCl₃ dozu contour grafiği



Şekil 3.8: AKM giderim verimi pH-FeCl₃ dozu surface grafiği

3.3 Polialüminyum Klorür İçin Deneysel Sonuçlar

3.3.1 KOİ Giderimi

Polialüminyum Klorür (PAC) kimyasal koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek) ve YYY ile uygulanan analiz sonucunda bulunan değerler (tahmin) ile birlikte Tablo 3.17’de verilmiştir.

Tablo 3.17: PAC koagülantı için KOİ giderim verimleri (gerçek-tahmin)

Deney No	Doz (ml/L)	Başlangıç pH'sı	Denge pH'sı	% KOİ giderimi (gerçek)	% KOİ giderimi (tahmin)
1	4	7	4,93	70,5169	70,4198
2	6	7	4,32	67,1624	67,012
3	4	9	5,69	70,7068	71,0392
4	6	9	4,59	71,0104	70,8371
5	4	8	5,41	70,0171	69,7818
6	6	8	4,41	74,4712	74,6014
7	5	7	4,50	69,3072	68,1679
8	5	9	5,14	69,4622	69,3336
9	5	8	4,62	69,7954	70,2138
10	5	8	4,65	69,7869	70,2138
11	5	8	4,75	70,5186	70,2138
12	5	8	4,73	70,3905	70,2138

PAC kimyasal koagülantı ile KOİ giderimi için yapılan deneylerin sonucunda verilerin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen model Denklem 3.5’de verilmiştir. Denklem korelasyon katsayısı $R^2 = 0,9625$ olarak belirlenmiştir.

KOİ Giderim Verimi için elde edilen deneysel denklem

$$(Y_1) = 160,458 - 5,501 * X_1 - 20,772 X_2 - 0,656 * X_1^2 - 0,948 * X_2^2 + 1,480 * X_1 * X_2 \quad (3.5)$$

Tablo 3.18: PAC KOİ giderimi için varyans analizi sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	31,0162	31,0162	6,2032	30,78	0,000
Residual Error	6	1,2090	1,2090	0,2015	1,70	0,337

ANOVA tablosundaki p değerlerine bakılarak parametrelerin ve elde edilen modelin anlamlılık değerleri belirlenebilir. H_0 hipotezi $\alpha=0,05$ ve $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyinde $p < \alpha$ olduğundan dolayı reddedilir. Bu sonuçlara göre seçilen faktörlerin KOİ verimi üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

PAC kimyasal koagülantı için yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen şartlar Tablo 3.19’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen modelin geçerliliğini kontrol etmek amacıyla Tablo 3.19’de görülen optimum şartlarda tekrar deneyleri yapılmıştır. Bu tekrar deneyleri sonuçları Tablo 3.20’te gösterilmektedir. Elde edilen bu optimum şartlarda yapılan tekrar deneyleri modelin türettiği KOİ giderim verim sonuçlarına çok yakın olduğu için modelin geçerli olduğuna karar verilmiştir.

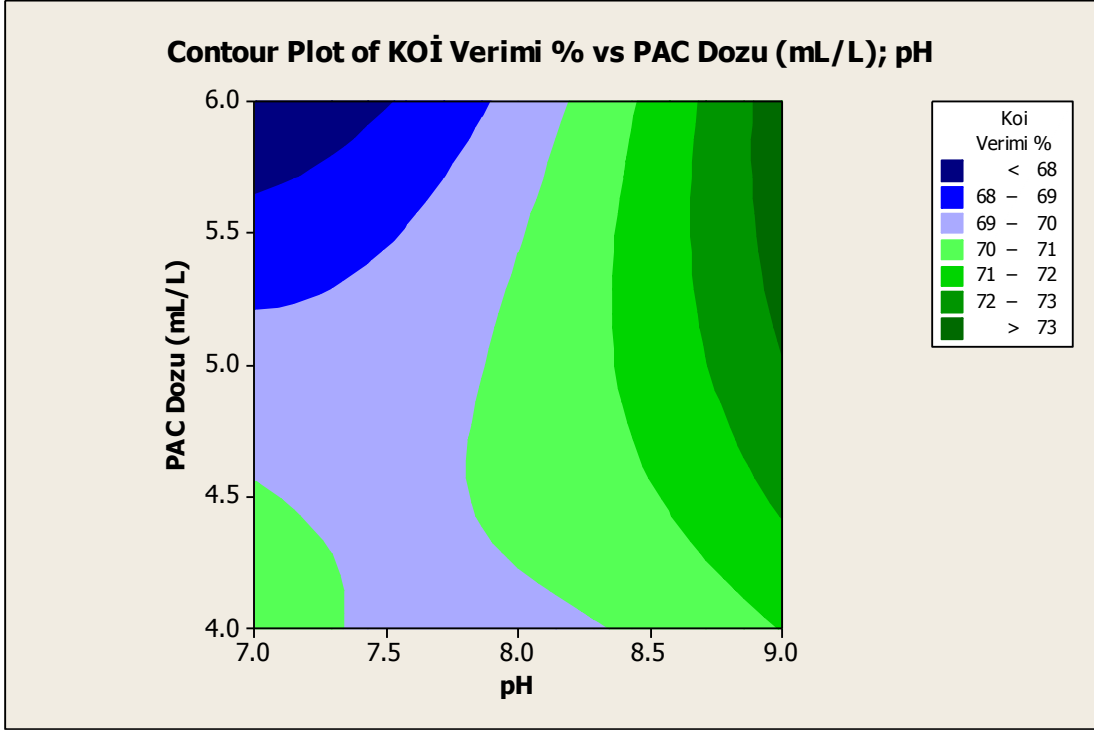
Tablo 3.19: PAC için KOİ giderimi verimlerinin optimum şartları

Koagülant Türü	Kimyasal Dozu (mL/L)	pH	KOİ Giderimi (%)
PAC	6	9	73,5505

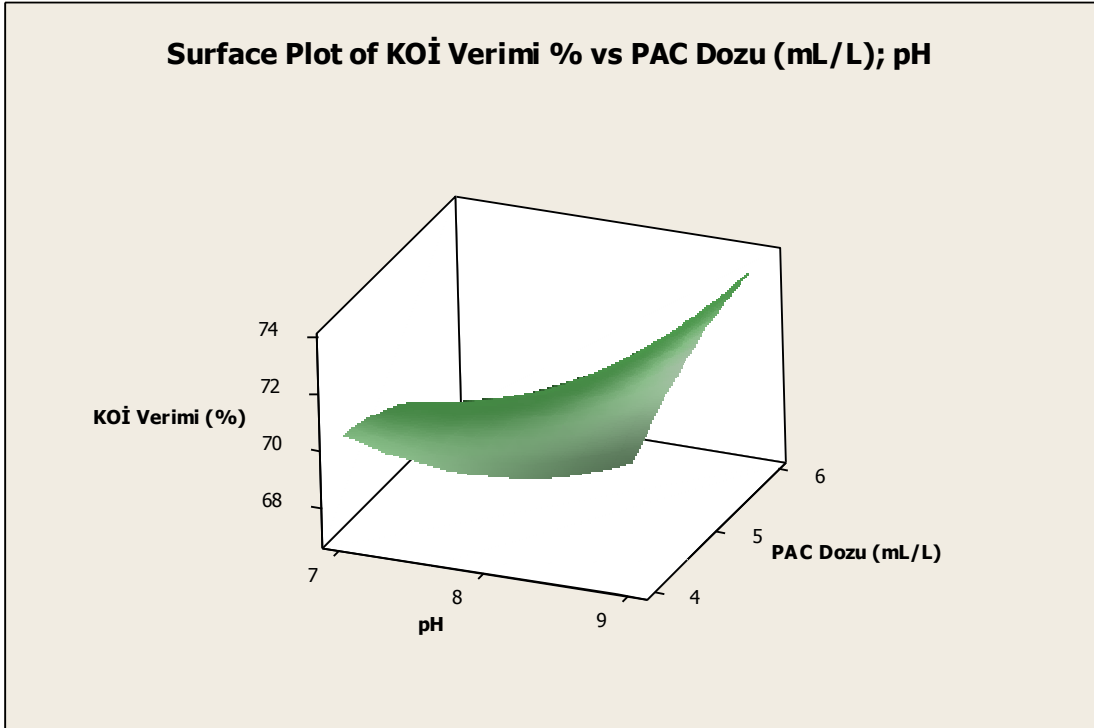
Tablo 3.20: PAC koagülantı ile KOİ giderimi verimi optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri

Tekrar Deneyi	Kimyasal Dozu (mL/L)	Başlangıç pH'sı	Denge pH'sı	KOİ Giderimi (%)	Ortalama
1	6	9	4,43	73,2715	74,2391
2	6	9	4,42	74,1135	
3	6	9	4,36	75,3324	

Şekil 3.9 ve 3.10’den görülebileceği gibi pH 8’in üzerinde KOİ giderim verimi % 70 in üzerine çıkmaktadır. pH:9’da PAC dozunun 5 mL/L’nin üzerinde olduğu şartlarda %73’ün üzerinde KOİ giderim verimi elde edilmiştir.



Şekil 3.9: KOİ giderim verimi pH-PAC dozu contour grafiği



Şekil 3.10: KOİ giderim verimi pH-PAC dozu surface grafiği

3.3.2 AKM Giderimi

PAC kimyasal koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek) ve YYY ile uygulanan analiz sonucunda bulunan değerler (tahmin) ile birlikte Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.21: PAC koagülantı için AKM giderim verimleri (gerçek-tahmin)

Deney No	Doz (mL/L)	pH	% AKM giderimi (gerçek)	% AKM giderimi (tahmin)
1	4	7	98,5030	98,5102
2	6	7	98,5599	98,5565
3	4	9	99,0715	99,0641
4	6	9	98,9126	98,8946
5	4	8	98,8038	98,8040
6	6	8	98,7211	98,7424
7	5	7	98,2567	98,2529
8	5	9	98,6736	98,6989
9	5	8	98,5441	98,4928
10	5	8	98,5062	98,4928
11	5	8	98,4514	98,4928
12	5	8	98,5599	98,5565

PAC kimyasal koagülantı ile AKM giderimi için yapılan deneylerin sonucunda verilerin değerlendirilmesiyle elde edilen model Denklem 3.6’de verilmiştir. Denklem korelasyon katsayısı ise $R^2 = 0,9889$ olarak belirlenmiştir.

AKM Giderim Verimi için elde edilen

$$(Y_2) = 100,635 - 2,404 * X_1 + 0,763X_2 + 0,280 * X_1^2 - 0,017 * X_2^2 - 0,054 * X_1 * X_2 \quad (3.6)$$

Tablo 3.22: PAC için AKM giderimi varyans analizi sonuçları

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0,5430	0,5430	0,1086	107,08	0,000
Residual Error	6	0,0060	0,0060	0,0010	0,38	0,077

ANOVA tablosundaki p değerlerine bakılarak parametrelerin ve elde edilen modelin anlamlılık değerleri belirlenebilir. H_0 hipotezi $\alpha=0,05$ ve $\alpha=0,01$ anlamlılık düzeyinde $p < \alpha$ olduğundan dolayı reddedilir. Bu sonuçlara göre seçilen faktörlerin AKM verimi üzerinde etkili olduğu söylenebilir.

PAC kimyasal koagülantı için yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen şartlar Tablo 3.23’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen modelin geçerliliğini kontrol etmek amacıyla ayrıca Tablo 3.23’de görülen optimum şartlarda tekrar deneyleri yapılmıştır. Bu tekrar deneyleri sonuçları Tablo 3.24’te gösterilmektedir. Elde edilen bu optimum şartlarda yapılan tekrar deneyleri modelin türettiği AKM giderim verim sonuçlarına çok yakın olduğu için modelin geçerli olduğuna karar verilmiştir.

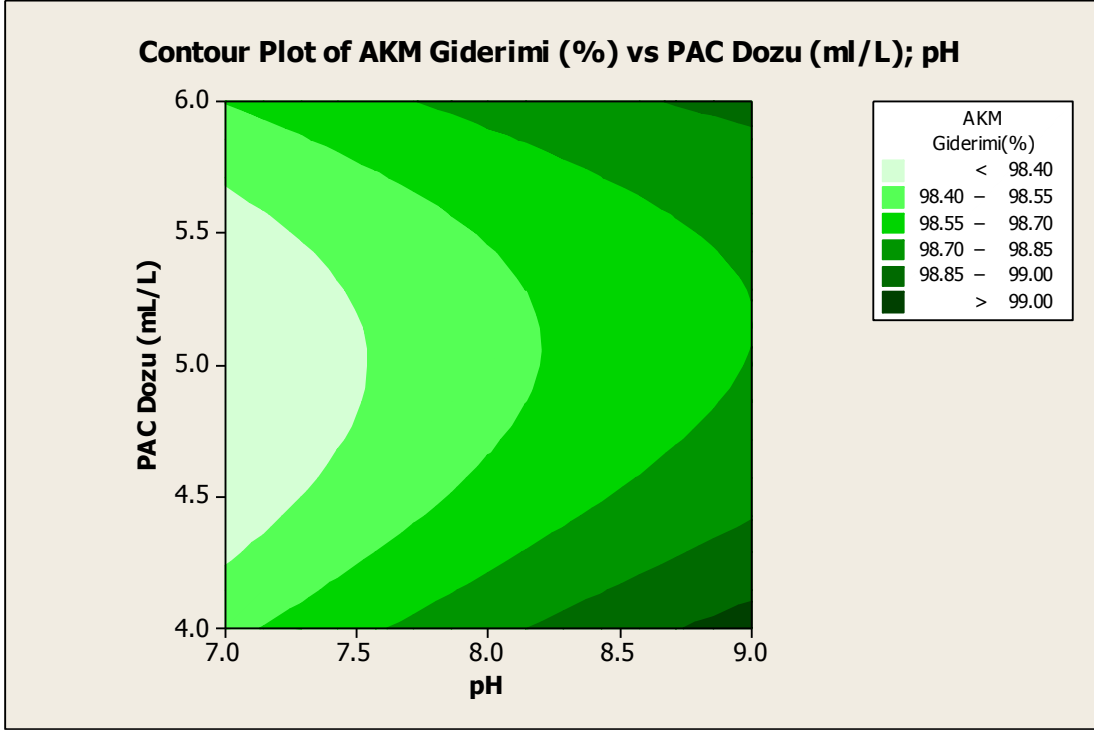
Tablo 3.23: PAC için AKM giderimi verimlerinin optimum şartları

Koagülant Türü	Kimyasal Dozu (mL/L)	pH	AKM Giderimi (%)
PAC	6	9	99,0641

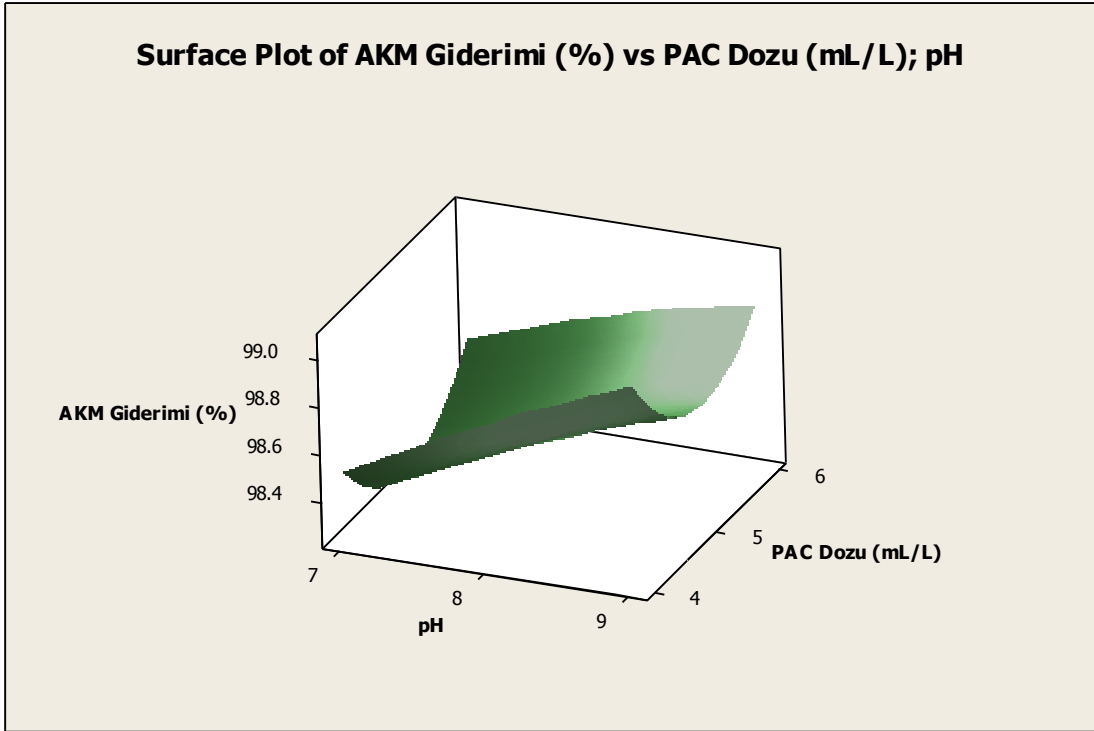
Tablo 3.24: PAC koagülantı ile AKM giderimi için optimum şartlarda yapılan doğrulama deneyleri

Tekrar Deneyi	Kimyasal Dozu (mL/L)	pH	AKM Giderimi (%)	Ortalama
1	6	9	99,1358	99,0964
2	6	9	99,1037	
3	6	9	99,0496	

PAC ile AKM gideriminde pH ve dozun etkisini gösteren grafikler Şekil 3.11 ve 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.11: AKM giderim verimi pH-PAC dozu contour grafiği



Şekil 3.12: AKM giderim verimi pH-PAC dozu surface grafiği

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya’da ve Türkiye’de yonga levha sektörüne ait üretimde günden güne artış olduğu gözlenmektedir. Yonga levha endüstrisinde ağacın sahip olduğu selülozik ve lignin yapı haricinde, üretim sırasında kullanılan reçine, sertleştirici, parafin gibi hammaddeler yüzünden yüksek organik madde ve askıda katı madde içeriğine sahip atıksular meydana gelmektedir. Bu atıksuların tesis içerisinde yeniden kullanılabilmesi veya deşarj edilebilmesi için arıtılması gerekmektedir. Yonga levha endüstrisi atıksularının arıtılmasında sırasıyla fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Arıtma tesisinin her aşamasında maliyeti düşürmek ve iyi bir arıtım sağlamak amacıyla proseslerin optimize edilmesi faydalı olacaktır. Optimizasyon yöntemlerinin kullanılması, yüksek maliyet ve uzun süren işlemlerin daha düşük maliyet ve kısa sürelerde etkili çözümler sunmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada, yonga levha endüstrisine ait atıksuların kimyasal arıtımında kullanılan farklı koagülant maddelerin KOİ ve AKM giderimi üzerine etkisi, optimizasyon metodlarından YYY kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla, Alum, Demir (III) Klorür ve PAC kimyasal koagülantları kullanılmıştır. Araştırmada her bir koagülantın KOİ ve AKM giderim verimi üzerine doz ve pH etkileri incelenmiştir.

Yapılan optimizasyon deneyleri sonucunda kullanılan koagülant maddelerle, Alum için yaklaşık olarak %58-74 aralığında KOİ giderimi, %97-98 aralığında AKM giderimi, Demir (III) Klorür için %57-78 aralığında KOİ giderimi, %92-99 aralığında AKM giderimi, PAC için %67-74 KOİ giderimi ve %98-99 aralığında AKM giderimi elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre her üç koagülant için elde edilen optimum şartlar ve giderimler Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi dozun en az kullanıldığı ve pH nın da atıksuyun pH sına en yakın olduğu, aynı zamanda KOİ gideriminin de en yüksek olduğu optimum şartlar $FeCl_3$ koagülantı için elde edilmiştir. Ancak bu şartlarda denge pH sının 3,5 civarına düşmesi tesiste tekrar pH ayarlamasını gerektirir.

Tablo 4.1: Optimum şartlar

Koagülant Türü	Koagülant Dozu	Başlangıç pH'sı	Denge pH'sı	KOİ Giderimi %	AKM Giderimi %
Alum	4 g/L	9	4,40	72,5862	98,2305
FeCl ₃	3,4 g/L	7	3,50	78,3580	95,1280
PAC	6 mL/L	9	5,16	73,5505	99,0641

Alum ve FeCl₃ için bulunan optimum pH'lar alüminyum hidroksitin ve demir hidroksitin çözünürlüğünü gösteren Şekil 1.6 ve 1.7 de görüldüğü gibi AL(OH)₃ ve Fe(OH)₃'in çözünmesinin en az olduğu aralıktadır.

Optimizasyonun temel amacı, bu değerler dışında başka şartlar oluşması durumunda, deney yapılmadan istenilen şartları model denkleminde yerine koyarak tahmini bir sonuç elde edebilmektir. Bu sayede hem zaman hem de kimyasal tasarrufu sağlanmaktadır. YYY bu amaç için kullanılan etkili optimizasyon yöntemlerinden biridir. Modelin türettiği denklem sayesinde bağımsız değişkenlerin sayısal değerleri değiştirilerek bağımlı değişkenin sayısal değerine ulaşılabilir. Yapılan çalışmalardan elde edilen verilere göre modelden türetilen denklemler kullanılan tüm koagülantlar için Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Koagülantlar için modelden türetilen denklemler

Alum	
<i>KOİ</i>	$(Y_1) = -20,1779 - 1,6525 * X_1 + 21,1001X_2 - 0,3023 * X_1^2 - 1,3385 * X_2^2 + 0,6314 * X_1 * X_2$ (3.1)
<i>AKM</i>	$(Y_2) = 97,1521 - 0,474116 * X_1 + 0,5213X_2 - 0,1072 * X_1^2 - 0,0813 * X_2^2 + 0,1829 * X_1 * X_2$ (3.2)
FeCl₃	
<i>KOİ</i>	$(Y_1) = 112,571 - 3,51 * X_1 - 6,894X_2 - 1,565 * X_1^2 - 0,088 * X_2^2 + 2,033 * X_1 * X_2$ (3.3)
<i>AKM</i>	$(Y_2) = 49,2974 - 0,9206 * X_1 + 10,7573X_2 - 0,3073 * X_1^2 - 0,6356 * X_2^2 + 0,3672 * X_1 * X_2$ (3.4)
PAC	
<i>KOİ</i>	$(Y_1) = 160,458 - 5,501 * X_1 - 20,772X_2 - 0,656 * X_1^2 - 0,948 * X_2^2 + 1,480 * X_1 * X_2$ (3.5)
<i>AKM</i>	$(Y_2) = 100,635 - 2,404 * X_1 + 0,763X_2 + 0,280 * X_1^2 - 0,017 * X_2^2 - 0,054 * X_1 * X_2$ (3.6)

Atıksuyun doğal pH'sında yapılacak bir kimyasal arıtım işleminde modelin verdiği koagülant dozu ve giderim verimleri Tablo 4.3'de gösterilmiştir. Bu sonuçlardan FeCl₃ haricindeki diğer koagülantlarda KOİ giderim veriminin optimum

şartlara göre yaklaşık %3 civarında azaldığı fakat FeCl₃ için optimum şartlarda çıkan pH değeri doğal pH'ya yakın olduğu için çok değişmediği görülmektedir. Buradan atıksuyun doğal pH'sında çalışılmasıyla da verimli sonuçlar alınabileceği sonucu çıkarılabilir.

Tablo 4.3: Doğal pH şartlarında giderim verimleri

Koagülant Türü	Koagülant Dozu	pH	KOİ Giderimi %	AKM Giderimi %
Alum	4,90 g/L	7,35	69,9825	98,2817
FeCl ₃	3,65 g/L	7,35	78,0518	96,3029
PAC	4,00 ml/L	7,35	69,9809	98,6010

Çalışma esnasında kullanılan en düşük dozlar dikkate alınarak yapılan optimizasyon çalışmasında ise modelden elde edilen veriler Tablo 4.4'te görülmektedir. Tablo incelendiğinde alüm için pH 8,35 e düşerken diğer koagülantlar için pH optimum şartlardan farklılık göstermemiştir. KOİ giderim veriminde ise Alum için yaklaşık %4'lük, FeCl₃ için %9'luk ve PAC için ise %2,5'luk bir miktar azalma göstermektedir. AKM giderim verimleri ise hemen hemen sabit kalmıştır. En düşük doz şartları kullanılarak elde edilen sonuçlara göre en uygun koagülantın PAC olduğu görülmüştür.

Tablo 4.4: Koagülant dozlarının en az olduğu şartlar

Koagülant Türü	Koagülant Dozu	pH	KOİ Giderimi %	AKM Giderimi %
Alum	2 g/L	8,35	68,7123	97,5139
FeCl ₃	1 g/L	7,00	69,1788	94,7651
PAC	4 ml/L	9,00	71,0392	99,0450

Atıksuyun doğal pH'sında ve çalışma aralığında seçilen en düşük dozlarda optimizasyon yapıldığında modelden türetilen giderim verimleri Tablo 4.5'te gösterilmektedir. Bu şartlarda KOİ giderim verimleri düşerken AKM verimlerinin çok değişmediği gözlenmiştir. Kullanılan kimyasal dozunun azalması hem maliyeti düşürecek hem de oluşan çamur hacmini azaltacaktır. Bu oranlarda KOİ giderim veriminin atıksu arıtma tesisi için yeterli olması halinde, maliyet ve iş gücünün en aza indirilmesi için Tablo 4.5'te verilen şartlar da kullanılabilir.

Tablo 4.5: Doğal pH ve koagülat dozlarının en az olduğu şartlar

Koagülat Türü	Koagülat Dozu	pH	KOİ Giderimi %	AKM Giderimi %
Alum	2 g/L	7,35	67,3644	97,9032
FeCl ₃	1 g/L	7,35	67,0376	95,4648
PAC	4 ml/L	7,35	69,9809	98,4026

Optimum şartlar referans alınarak yapılan KOİ giderimleri için koagülat maliyet hesaplamaları Tablo 4.6’da verilmiştir. Maliyetlerin karşılaştırılması amacıyla alum ve demir (III) klorür’ün birim fiyatları 25 kg’lık, PAC ise 42 kg’lık ambalaj fiyatları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Endüstride daha büyük miktarlarda koagülat alımı yapıldığı takdirde birim fiyatlar düşecektir. Her üç koagülantın giderim verimleri ve maliyet değerleri karşılaştırıldığında; FeCl₃ %78,358’lik KOİ giderimi sağlarken birim KOİ giderimi başına en yüksek maliyetli koagülat olmakta, PAC ise %73,5505’lik KOİ giderimi ile hem Alum’dan daha yüksek bir giderim verimi sağlamakta hem de en düşük maliyetli koagülat olmaktadır. Bu sebeple yonga levha endüstrisi atıksularının kimyasal arıtımında PAC kullanılmasının ekonomik olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.6: Koagülantların ekonomik özelliklerinin karşılaştırılması

	Alum	FeCl ₃	PAC
KOİ Giderimi (%)	72,5862	78,358	73,5505
Giderilen KOİ (g/m ³ atıksu)	6602,441	7127,444	6690,153
Koagülat miktarı (kg/m ³ atıksu)	4	3,4	8,4
Koagülat maliyeti (\$/m ³ atıksu)	13,6	26,01	10,08
Maliyet (\$/kg KOİ)	2,06	3,65	1,50

Yapılan literatür taramasında bu sektörden kaynaklanan atıksuların arıtılmasıyla ilgili doğrudan bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın, yonga levha endüstrisi atıksularının arıtılması için literatüre önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Levha Sanayii Sektör Raporu, Ankara, (2001).
- [2] Filiz, M., Usta P. ve Şahin H.T., “Melamin, Üre Formaldehit Tutkalı, Kızılçam Ve Çay Atıkları İle Elde Edilen Yonga Levhanın Bazı Teknik Özelliklerinin Değerlendirilmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15, (2), 88-93, (2011).
- [3] Levha Sanayii Sektör Raporu Ankara, (2015).
- [4] Göker, Y., “Türkiye’de Kontrplak, Kontrtabla ve Yonga Levhaları Sanayii, Gelişme Olanakları, Bu Malzemelerin Teknolojik Özellikleri Hakkında Araştırmalar, *İ.Ü. Yayın No.2489. Orman Fakültesi Yayın No.267*, (1978).
- [5] Levha Sanayii Sektör Raporu, Ankara, (2011).
- [6] Gökay, N., “Melamin Emdirilmiş Kağıtlarla Kaplamanın Yongalevha Teknik Özelliklerine Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon, (1995).
- [7] Şengül, F., ve Küçükgül E. Y., *Çevre Mühendisliğinde Fiziksel Kimyasal Temel İşlemler ve Süreçler*, İzmir: DEÜ Müh. Fak. Basım Ünitesi, 165, (1995).
- [8] Karcıoğlu, Z., “Endüstriyel Atıksulardan Kimyasal Koagülasyon İle Bor Giderimi”, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, (2009).
- [9] Mackenzie L. D., Su ve Atıksu Mühendisliği, (Çev: C. Özmetin ve E. Özmetin), Nobel Akademik Yayıncılık, (2014).
- [10] Faust, S.D. and Aly O. M., *Chemistry of Water Treatment*, Oxford: Butterworth Publishers, 723, (1983).
- [11] Eroğlu, V., *Su Tasfiyesi*, Ankara: Çevre ve Orman Bakanlığı, (2008).

- [12] Solak, M., “Elektrokoagülasyon Prosesi İle Mermer Atıksularının Arıtılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı*, Isparta, (2007).
- [13] Reynolds, T.D. and Richards, P. A., *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, Boston: PWS Publishing Company, (1996).
- [14] Şirvancı, M., *Kalite İçin Deney Tasarımı: Taguchi Yaklaşımı*, İstanbul: Litetatur Yayınları, 110, (1997).
- [15] Besterfield, D. H., Besterfield, C., Besterfield, G.H. and Besterfield, M., *Total Quality Management*, New Jersey: Prentice Hall Inc., (1997).
- [16] Lunani, M., Nair, V. N. and Wasserman, G. S., “Graphical methods for robust design with dynamic characteristics”, *Journal of Quality Technology*, 29, 327-338, (1997).
- [17] Montgomery, D. C., *Design and analysis of experiment*, Newyork: John Wiley & Sons, (1991).
- [18] Anagün, A. S., *Kalite Kontrolunda İleri Teknikler Ders Notu*, Eskişehir: Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, (1997).
- [19] Akay, U., “Tekstil Endüstrisindeki Atıksulardan Renk ve KOİ Gideriminin Yanıt Yüzey Yöntemi ile Eniyilenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, (2013).
- [20] Box, G. E. P. and Draper, N. R., *Response Surfaces, Mixtures and Ridge Analysis*, Newyork: John Wiley&Sons, 857, (2007).
- [21] Gökçe, B., and Taşgetiren, S., “Kalite İçin Deney Tasarımı”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (1), 71-83, (2009).
- [22] Toprak, F., “Reaktif Red198'in Fıstık Kabuğu İle Adsorpsiyonunda Optimum Deneysel Şartların Taguchi Metoduyla Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum, (2010).

- [23] Taylan, D., “Taguchi DeneY Yasarımı Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, (2009).
- [24] Myers, R. H., Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, C. M., *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, New Jersey: Wiley, (2009).
- [25] Akın, A., “Bir Tekstil Yüzey Aktif Maddesinin H₂O₂/UV-C Prosesiyle Arıtılabilirliğinin Yanıt Yüzey Yöntemiyle Modellenmesi Ve Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2009).
- [26] Aygün, A., “Tekstil Endüstrisi Reaktif Ve Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon Prosesi İle Arıtımı: Yanıt Yüzey Yöntemi İle Optimizasyon”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2012).
- [27] Khuri, A. I. and Cornell, J. A., "Response Surfaces Designs and Analyses", Newyork: Marcel Dekker, 509, (1996).
- [28] Guida, M., Mattei, M., Della Rocca, C., Melluso, G. and Meriç, S., “Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater”, *Desalination*, 211, (1–3), 113-127, (2007).
- [29] Wang, J. P., Chen, Y. Z., Ge, X. W. and Yu, H. Q., “Optimization of coagulation–flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 302, (1–3), 204-210, (2007).
- [30] Ahmad, A.L., Ismail, S. and Bhatia, S., “Optimization of Coagulation–Flocculation Process for Palm Oil Mill Effluent Using Response Surface Methodology”, *Environmental Science & Technology*, 39, (8), 2828-2834, (2005).
- [31] Ahmad, A. L., Wong, S. S., Teng T. T. and Zuhairi, A., “Optimization of coagulation–flocculation process for pulp and paper mill effluent by response surface methodological analysis”, *Journal of Hazardous Materials*, 145, (1–2), 162-168, (2007).

- [32] Martín, M. A., I. González, I., Berrios, M., Siles, J. A. and Martín, A., “Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater derived from sauce manufacturing using factorial design of experiments”, *Chemical Engineering Journal*, 172, (2–3), 771-782, (2011).
- [33] Wang, J. P., Chen, Y. Z., Wang, Y., Yuan, S. J., and Yu, H. Q., “Optimization of the coagulation-flocculation process for pulp mill wastewater treatment using a combination of uniform design and response surface methodology”, *Water Research*, 45, (17), 5633-5640, (2011).
- [34] Freitas, T. K. F. S., Oliveira, V. M., de Souza M. T. F., Geraldino, H. C. L., Almeida, V. C., Fávaro, S. L., et al., “Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant”, *Industrial Crops and Products*, 76, 538-544, (2015).
- [35] Wang, Y., Chen, K., Mo, L., Li, J. and Xu, J., “Optimization of coagulation–flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater treatment using response surface methodology”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20, (2), 391-396, (2014).
- [36] Di Bella, G., Giustra, M. G. and Freni, G., “Optimisation of coagulation/flocculation for pre-treatment of high strength and saline wastewater: Performance analysis with different coagulant doses”, *Chemical Engineering Journal*, 254, 283-292, (2014).
- [37] Sadri Moghaddam, S., Alavi Moghaddam, M. R. and Arami, M., “Coagulation/flocculation process for dye removal using sludge from water treatment plant: Optimization through response surface methodology”, *Journal of Hazardous Materials*, 175, (1–3), 651-657, (2010).
- [38] Gürtekin, E., “Koagülasyon/Flokülasyon Prosesiyle Peyniraltı Suyunun Fizikokimyasal Arıtılabilirliği”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11, 17-22, (2011).
- [39] Zahrim, A. Y., Nasimah, A. and Hilal, N., “Coagulation/flocculation of lignin aqueous solution in single stage mixing tank system: Modeling and optimization by response surface methodology”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, (3), 2145-2154, (2015).

[40] Lin, C., Liao, J. and Wei, C., “Modeling and optimization of the coagulation of highly concentrated coking wastewater by ferrous sulfate using a response surface methodology”, *Desalination and Water Treatment*, 56, (12), 3334-3345, (2015).