

## Dewatering of Mucilage Biomass Collected from the Marmara Sea Surface: Optimization of Coagulation and Centrifugation Processes

Nevim Genc\*, Elif Durna, Fatma Ece Sayin

<sup>1\*</sup>Kocaeli University, Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, Kocaeli, 41380, Turkey

•Received Date: Sep 29, 2021

•Revised Date: Dec 08, 2021

•Accepted Date: Dec 10, 2021

•Published Online: Dec 13, 2021

### Abstract

The formation of mucilage observed in the sea surface and bottom sediment in the Marmara Sea in the first half of 2021 adversely affected the aquatic ecosystem aesthetically and ecologically. The mucilage layer formed on the surface, which prevents oxygen entering the water, was first removed with sea sweepers and vacuum trucks. Due to the hydrophilic nature of the mucilage removed by vacuum trucks, the high water content limits the application of disposal/recovery processes. Therefore, the water must be removed first. In this study, coagulation and centrifugation processes were applied to remove the water of mucilage biomass collected from the sea surface with vacuum trucks. The coagulation process is optimized to provide a good suspended solids settling rate and low turbidity in the supernatant with low operating cost, while the centrifugation process is optimized to provide low turbidity and low operating cost. Optimization was implemented with the Taguchi Experimental Design approach. In the coagulation process, 85 ml of precipitated solid, 8.28 NTU supernatant turbidity and 0.594 Euro/L operating cost were determined in optimum conditions (FeCl<sub>3</sub> dose of 0.5 g/L, pH of 11.5, slow mixing of 30 rpm 5 minute and fast mixing of 100 rpm 5 minutes) has been obtained. In the centrifugation process, 180 NTU supernatant turbidity was obtained at an operating cost of 0.042 euro/L at optimum conditions of centrifugation speed of 3500 rpm for 30 minutes. With the Pareto analysis performed for the coagulation process, it was determined that the most effective parameters in coagulation were fast and slow mixing times and pH.

### Keywords

Mucilage, Water removal, Coagulation, Centrifugation, Optimization, Taguchi Experimental Design

\*Corresponding Author: Nevim Genc, [ngenc@kocaeli.edu.tr](mailto:ngenc@kocaeli.edu.tr), [id 0000-0002-6185-1090](https://orcid.org/0000-0002-6185-1090)

## Marmara Denizi Yüzeyinden Toplanan Müsilaj Biyokütlesinin Suyunun Giderilmesi: Koagülasyon ve Santrifüj Proseslerinin Optimizasyonu

Nevim Genç\*, Elif Durna, Fatma Ece Sayın

Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, 41380, Turkey

\*Gönderi Tarihi: 29 Eyl 2021

\*Düzeltilme Tarihi: 08 Ara 2021

\*Kabul Tarihi: 10 Ara 2021

\*Çevrimiçi Yayın Tarihi: 13 Ara 2021

### Özet

Marmara Denizi'nde 2021 yılı ilk yarısında deniz yüzeyi ve dip sedimentinde gözlenen müsilaj oluşumu, sucul ekosistemi estetik ve ekolojik açıdan olumsuz yönde etkilemiştir. Suya oksijen girişini engelleyen yüzeyde oluşan müsilaj tabakası ilk aşamada deniz süpürgeleri ve vidanjörler ile uzaklaştırılmıştır. Vidanjörler ile uzaklaştırılan müsilajın hidrofilik yapısından dolayı su içeriğinin oldukça yüksek olması bertaraf/geri kazanım proseslerinin uygulamasını kısıtlamaktadır. Bu nedenle öncelikle suyunun uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada deniz yüzeyinden vidanjörler ile toplanan müsilaj biyokütlesinin suyunun uzaklaştırılması için koagülasyon ve santrifügasyon prosesleri uygulanmıştır. Koagülasyon prosesi düşük işletme maliyeti ile iyi bir süspanse katı çökeltme oranı ve üst sıvıda düşük bulanıklık, santrifügasyon prosesi ise düşük bulanıklık ve düşük işletme maliyeti sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. Optimizasyonda Taguchi Deneysel Tasarım yaklaşımı uygulanmıştır. Koagülasyon prosesinde belirlenen 0.5 g/L FeCl<sub>3</sub> dozu, pH 11.5, 30 rpm 5 dk yavaş karıştırma ve 100 rpm 5 dk hızlı karıştırma optimum şartlarında 0.594 Euro/L işletme maliyetinde 85 ml çökeltme katı ve 8.28 NTU üst sıvı bulanıklığı elde edilmiştir. Santrifügasyon prosesinde 30 dakika 3500 rpm optimum şartlarında 0.042 Euro/L işletme maliyetinde 180 NTU üst sıvı bulanıklığı elde edilmiştir. Koagülasyon prosesi için gerçekleştirilen Pareto analizi ile koagülasyonda en etkili parametrelerin hızlı ve yavaş karıştırma süreleri ve pH olduğu belirlenmiştir.

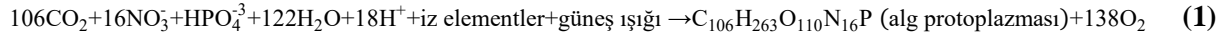
### Anahtar Kelimeler

Müsilaj, Su giderimi, Koagülasyon, Santrifüj, Optimizasyon, Taguchi Deneysel Tasarım

\*Sorumlu Yazar: Nevim Genç, [ngenc@kocaeli.edu.tr](mailto:ngenc@kocaeli.edu.tr), [id 0000-0002-6185-1090](https://orcid.org/0000-0002-6185-1090)

## 1. GİRİŞ

Azot ve fosfor yaşamı destekleyen ana nütrient olmasına karşın alıcı su ortamlarında fazla olması durumunda ötrofikasyona yani aşırı alg çoğalmasına sebep olmaktadır. Dengeli bir su ekosisteminde üretici ve tüketici organizmaların karşılıklı etkileşimlerinde oksijen üretimi ve tüketimi, organik maddenin fotosentez ile üretimi ve solunum yolu ile parçalanması denge halindedir. Her zaman sağlıklı bir ekosistemde bu denge durumunda sabit bir oksijen fazlalığı vardır. Fotosentez yolu ile organik maddenin oluşumu denklem (1) ile ifade edilebilir.



Fotosentez ve solunum doğal su kaynaklarının kendi kendini temizlemesinde yani doğal arıtım süreçlerinde önemli rol oynar. Fotosentez ve solunum arasındaki kararlı hal durumu geçici bir süre bozulması durumunda kimyasal ve biyolojik değişimler ortaya çıkar, bunun anlamı ise kirlenmedir. Yüzeysel su kaynaklarında alg oluşumunda gerekli olan inorganik karbon atmosferden karşılanmaktadır. Mikroalgler atmosferdeki azot gazını kullanabilmektedir. Ancak fosforun tek kaynağı antropojenik kaynaklardır.

Alg protoplazmasında sınırlayıcı element fosfordur. Fosfor bu dengede önemli rol oynar. Kişi başı üretilen atık ile bir günde ortama verilen fosfor derişim 1.5 gramdır. Yüzeysel suya verilen fosfor miktarı nüfus yoğunluğu, yanlış tarımsal gübreleme yöntemleri ve gübreleme sıklığı, yetersiz atık su toplama ve arıtma sistemleri gibi birçok faktöre bağlıdır.

Marmara Denizi, Karadeniz ve Ege Denizi arasında yer alan yarı kapalı bir denizdir. Marmara Denizi'nin hidrografisi her iki deniz tarafından etkilenmektedir. Son yıllarda antropojenik aktiviteler ile ciddi biçimde bozulmuştur. Endüstriyel, tarımsal ve evsel kirlilik ile etkilenmesinin yanı sıra Karadeniz'den gelen nütrient bakımından zengin suları da almaktadır. Bunun yanı sıra yapılan izleme çalışmalarında görülmüştür ki, akarsular tarafından yoğun azot ve fosfor girişi bulunmaktadır.

Bir su ekosisteminde yapılan fizikokimyasal ölçümler ekosistemin fotoğrafını ortaya koymaktadır, oysa o ekosistemde kirlilik göstergesi olarak kullanılabilen biyo-indikatörlerin izlenmesi/belirlenmesi ekosistemin videosunu çekmektedir. Biyolojik indikatörler ekosistemde birçok problemi görebilir ve ileriye dönük öngörülerde kullanılabilir. Marmara Denizi'nde tek hücreli organizmalar ve bakterilerin oluşturduğu müsilağ 2021 Ocak ayı itibari ile yoğun biçimde kendini göstermiştir. Marmara Denizinin iki tabakalı yapısı fitoplanktonun düşey yöndeki dağılımını etkiler, yüzeysel kısımda bol miktarda bulunurken dip kısımlarda daha azdır. Ancak çevresel şartların değişmesi ile bozulan deniz ortamında bu durum

değişmiş ve yüzeyde aşırı çoğalan fitoplankton dibe çökerek dip yaşama zarar vermeye başlamıştır.

Müsilaj durumu, deniz yüzeyinde, su kütlelerinde ve deniz sedimentinde jelatinimsi bir maddenin büyük kütleler halinde birikimidir. Bu durum sahil kesimlerde ve açık denizlerde başlıca fitoplanktonlar ile diatomla meydana gelir. Müsilaj durumu halk sağlığı, su ekosisteminde yaşayan canlılar ve turizm sektörü için son derece önemlidir. Müsilaj bazı fitoplankton ve bazı bakterilerin hücre dışı polimerik maddelerinden oluşmaktadır. Marmara Denizindeki keskin haloklin tabakasının varlığı da müsilaj oluşumuna pozitif yönde etkiler. Yüksek sıcaklık değişimleri primer üretimi artırmaktadır [1]. Müsilaj üreten türlerin yüksek sıcaklık/düşük tuzluluk ile bağlantılı olduğu belirlenmiştir [2].

Müsilaj hidrofilik, hidrokolloid bir bileşiktir. Yapısında karbonhidrat, protein ve lipitler bulunmaktadır.  $-COOH$  ve  $-OH$  grupları taşıdığı için bir polielektrolittir. Yüzey gerilimini azaltma özelliği bulunmaktadır. Müsilaj reaktif oksijen türleri oluşturarak patojenlere antibakteriyal etki gösterdiği ifade edilmektedir. Reaktif oksijen türleri lipit peroksidasyondan dolayı hücre membranına zarar vererek hücreyi etkilemektedir. Gıda kaplama materyali olarak kullanımından atık sularda kirletici giderimine kadar pek çok alanda kullanılabilir [3].

Müsilaj durumu planktonik orjinli hücre dışı organik maddelerin agregasyonu ile ortaya çıkar. Müsilaj oluşumu kompleks bir durum olup birçok faktör rol oynamaktadır. Müsilaj agregasyonu için en önemli zorlayıcı çevresel faktör, yaz ve son bahar aylarında düşey yöndeki termohalin tabakalaşmadır. Bu tabakalaşma ile birlikte sıcaklık ve tuzluluğun rolü çok önemlidir. Bunun yanı sıra mikroalglerin büyüme hızı ve kompozisyonu N/P oranına da bağlıdır. Ayrıca fitoplankton ile heterotrofik bakteriler arasındaki dengesizlik bu durumun gelişmesine sebep olmaktadır. Agregasyon prosesi, polimer jel oluşumu, polisakkaritlerin  $Ca^{2+}$  iyonları ile bağ oluşturması ve hidrofobik etkileşimler gibi çeşitli mekanizmalar ile açıklanmıştır [4].

Müsilaj organik madde birikimi ile kendini gösterir, oluşumunda çevresel faktörlerin yanı sıra meteorolojik ve oşinografik şartların zamansal değişimleri de etkilidir. Kuvvetli rüzgarlar jelatinimsi tabakayı parçalayabilir ve küçük müsilaj agregatlarına dönüşerek disperse olmasını sağlar [2].

Literatürde müsilaj biyokütlesinin bertarafına yönelik az sayıda çalışmalar yer almaktadır. Mikroalgler üzerine yapılan çalışmalar bu konuda ışık tutmaktadır. Pek çok faydalı kullanımı

olan mikroalgler, buldukları ortamda düşük konsantrasyonlarda olmaları ve birkaç mikrometre hücre boyutlarına sahip olmaları sebebi ile susuzlaştırılmaları ve kurutulmaları için çok yüksek oranda enerji tüketen ve işletme maliyeti yüksek olan proseslere ihtiyaç duymaktadır. Mikroalglerin susuzlaştırılmasında kullanılan teknikler kimyasal, mekanik, elektriksel ve biyolojik olarak sınıflandırılmaktadır. Bu metotlar tek olarak veya kombinasyonları şeklinde kullanılabilir. Kimyasal susuzlaştırma metotlarında inorganik ve organik polielektrolit (polimer) flokülantlar yardımı ile flokülasyon yapılmaktadır. Mekanik teknikler ise santrifüjleme, filtrasyon, doğal sedimentasyon, flotasyon ve yüzeyden sıyırma yöntemlerini içermektedir. Elektriksel susuzlaştırma teknikleri elektrokoagülasyon proseslerini baz almaktadır. Biyolojik susuzlaştırma teknikleri yüksek pH'da oto-flokülasyon prosesini, salgılanan biyo-polimer ile flokülasyonu ve mikrobiyal flokülasyonu kapsamaktadır. Biyolojik yöntemlerde kimyasal madde kullanımı yoktur ve minimum düzeyde enerji tüketimi söz konusudur. Mekanik sistemlerde alg biyokütlesinin parçalanmasına izin verilmeyecek şartlar altında yapılmalıdır. Ancak işletim maliyeti yüksektir. Filtrasyon sisteminde hücre dışı polimerik maddeler filtrasyon malzemesine zarar vermektedir. Susuzlaştırma tekniklerinin çevresel etki analizleri mikroalglerin faydalı kullanımının değerlendirilmesinde kritik bir konudur [5].

Yaşam döngüsü analizleri ve tekno-ekonomik analizler, alglerin protein, lipit ve pigment gibi hücre içi değerli maddelerin ekstraksiyonunu değerli kılmıştır. Mikroalglerin boyutlarının küçük olması, yoğunluklarının suya yakın olması ve kolloidlerin stabilitesinden dolayı mikroalglerden değerli ürünlerin ekstraksiyonunda problemler yaşanmaktadır. Değerli ürünlerin ekstraksiyonunda alglerin susuzlaştırılması ilk adımı oluşturmaktadır. Susuzlaştırma, alg biyokütlesinin gerek kompostlaştırılmasında gerek yakıt olarak kullanımında gerekse katı atık deponi alanlarında bertarafında uygulanması gereken bir adımdır [6].

Santrifüj ve belt filtre mikroalg susuzlaştırılmasında en yaygın kullanılan sistemlerdir. İkisinin arasındaki en önemli fark seperasyon prensibidir. Santrifüjde katı-sıvıyı ayırmak için çözeltiye santrifügal güç uygulanmaktadır. Belt filtre sistemlerinde ise seperasyonun temel prensibi sıkıştırma ile suyun drene edilmesidir. Santrifüjleme yüksek dereceden etkili bir metottur, ancak enerji ihtiyacı yüksektir. Belt filtre düşük enerji tüketimi vardır, işletme maliyeti düşüktür [7].

Su yüzeyinden sıyırılarak alınan biyokütle yüksek oranda su içeriğine sahiptir. Biyokütlenin yapısındaki bağlı suyu müsilağın yapısındaki fonksiyonel gruplar sayesinde bırakması oldukça

zordur. Bu biyokütleyle herhangi bir değerlendirme/bertaraf yöntemi uygulanmadan önce, ilk aşama olarak suyunun uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada 2021 yılı ilk yarısında Marmara Denizinde belirgin biçimde gözlenen müsilajın deniz yüzeyinden uzaklaştırıldıktan sonra suyunun giderilmesinde koagülasyon ve santrifüj proseslerinin etkinliği incelenmiştir. Her iki prosese etki eden faktörler belirlenerek proses işletim şartları düşük maliyette yüksek katı çökeltme oranı ve yüksek üst sıvı kalitesi sağlayacak biçimde optimize edilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Müsilaj

Bu çalışmada deniz yüzeyinden vidanjörler ile çekilen müsilaj biyokütlesi kullanılmıştır. 24 saat doğal sedimantasyona bırakılan müsilaj biyokütlesinin çökelek kısmından alınan numuneler deney süresince kullanılmıştır. Kullanılan müsilaj biyokütlesinin süspanse katı içeriği 64.56 g/L, pH 6.4 ve iletkenliği ise 3.26 mS/cm olarak belirlenmiştir.

### 2.2. Deneysel Prosedür

Müsilaj suyunu gidermek için koagülasyon ve santrifügasyon prosesleri ele alınmıştır. Koagülasyon prosesi Jar Testi düzeneğinde (JLT6, VELD SCIENTIFICA) gerçekleştirilmiştir. 150 ml müsilaj biyokütlesine farklı pH (9 ve 11.5), koagülant tipi ( $FeCl_3$  ve alüm), koagülant dozu (0.5 ve 3 g/L) karıştırma süreleri (hızlı karıştırma için 1 ve 5 dakika, yavaş karıştırma için 5 ve 20 dakika) ve karıştırma hızları (hızlı karıştırma için 50 ve 100 rpm, yavaş karıştırma için 10 ve 30 rpm) uygulanarak süspanse katının çökeltmesi sağlanmıştır. Prosesler işletim şartları en düşük işletim maliyetinde en iyi çökeltme, yüksek üst sıvı kalitesi ve optimize edilmiştir. Optimizasyonda Taguchi Deney Tasarım yaklaşımı uygulanmıştır. Ticari olarak temin elden sabit katyonik polielektrolit konsantrasyonunda (0.5 mg/L) yürütülen çalışmada, deney deseninde yer alan işletim şartları uygulandıktan sonra karışım 30 dakika imhoff hunisinde çökelmeye bırakılmıştır. Çökeltmenin sonunda çökelen katı hacmi proseste cevap parametresi olarak kabul edilmiştir. Üst sıvı kalitesi için bulanıklık parametresi dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında müsilaj suyunun giderilmesi amacı ile santrifüj işlemi uygulanmıştır. İşlem UNIVERSAL 320 Hettich marka santrifüj cihazı ile yürütülmüştür. 15 ml müsilaj biyokütlesine farklı hız (1500, 2500 ve 3500 rpm) ve sürelerin (15, 30 ve 45 dakika) etkisinin incelendiği çalışmada çökelen katı miktarı yaklaşık olarak aynı seviyelerde (ortalama 2.5 ml) kaldığı için proses şartlarının optimizasyonunda cevap parametresi olarak alınmamıştır. Üst sıvı bulanıklığı belirleyici parametre olarak kullanılmıştır. Her iki proses için yanıt parametresi olarak kabul edilen işletim maliyetinin hesaplanmasında tüketilen elektrik enerjisi ve kimyasal madde dikkate alınmıştır. Parametre

ve seviyelerinin belirlenmesinde yapılan ön çalışma sonuçları dikkate alınmıştır. Çözümlemede çökelen çamur hacminin, üst sıvı bulanıklık değerinin ve işletim maliyetinin düşük olması amaçlanmıştır. Deneysel verilerin çözümlenmesinde Design Expert 11 programı kullanılmıştır.

### 2.3. Analiz

Bu çalışmada bulanıklık analizi taşınabilir türbidimetre (Hach-2100Q) ile yapılmıştır. İletkenlik Thermo Scientific, Orion Star A112 ile, pH ise Thermo Scientific, Orion Star A111 ile analizlenmiştir. AKM analizi Standard Methods 1989 S.2-75, GEMS S.22'e göre yapılmıştır. KOİ analizi Standard Methods, 1989, 5220 D'e göre kapalı refluks titrimetrik metodu ile yapılmıştır. Maliyet analizinde tüketilen elektrik enerjisi ve kimyasal madde miktarı dikkate alınmış olup müsilaj biyokütle hacmi başına belirlenmiştir. Kimyasal tüketimi için FeCl<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH ve katyonik polielektrolit, enerji tüketimi için jar test düzeneği ve santrifüj cihazları dikkate alınmıştır. Kimyasal madde hesabı için FeCl<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaOH ve katyonik polielektrolit kimyasalları sırasıyla 52.4, 110, 92 ve 5.2 euro/kg olarak kabul edilmiştir. Enerji tüketiminde TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi) birim enerji tüketim maliyeti baz alınarak 0.091 euro/kWh olarak kabul edilmiştir.

### 2.4. Taguchi Deneysel Tasarımı

Koagülasyon ve santrifügasyon proseslerinin performanslarında etkili olan parametreler Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemi Dr. Genichi Taguchi tarafından ortaya konulmuş az sayıda deneyle çok sayıda değişkeni incelemek için deneysel tasarım teorisinden ortogonal dizileri kullanan bir deneysel tasarım yöntemidir. Ortogonal diziler kullanılarak üzerinde çalışılacak deneysel konfigürasyonların sayısını önemli ölçüde azaltılır [8]. Taguchi yönteminde deneysel yanıtlar, istenen faktörün (sinyal) belirlenemeyen/istenmeyen faktörlere (gürültü) oranı olarak ifade edilir. Taguchi yönteminde “daha büyük daha iyidir”, “daha küçük daha iyidir” ve “normal daha iyidir” şeklinde üç farklı performans kriteri bulunmaktadır. Bu çalışmada belirlenen yanıtlar çökelen hacim (ml) ve bulanıklık olduğundan dolayı yanıtlar için “daha küçük daha iyidir” performans kriteri kullanılmıştır. Bu durum için S/N değeri denklem (2)'deki eşitlik ile gösterilir [9].

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

n, bir deney için tekrar sayısıdır ve y<sub>i</sub>, i. deneyin performans değeridir.

Bu çalışmada koagülasyon prosesi için Taguchi L8 deney deseni kullanılırken santrifügasyon prosesi için L9 Taguchi deney deseni kullanılmıştır. Koagülasyon prosesine etki eden çok

sayıda parametre olması nedeni ile her bir parametre için ikişer seviye belirlenmiştir. Santrifügasyon prosesine etki eden parametreler için ise üçer seviye belirlenmiştir. Taguchi Deneysel Tasarımındaki yanıt parametrelerinin geniş aralıkta dağılım sağlaması istendiğinden, bu yanıtları verecek faktör ve seviyeler ön denemeler ile belirlenmiş olup Tablo 1’de belirtilmiştir. Koagülasyon prosesi için yanıt olarak çökelen kısım hacmi, üst sıvı bulanıklığı ve işletme maliyeti, santrifügasyon prosesi için ise üst sıvı bulanıklığı ve işletme maliyeti parametreleri yanıt olarak belirlenmiştir ve proseslerin optimizasyonu çoklu yanıt çözümlemesi ile gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** Uygulanan proseslerin deneysel tasarımda kullanılan parametre ve seviyeleri

Proses	Faktör/Seviye	Seviye 1	Seviye 2	
Koagülasyon	Koagülant tipi	Alüm	FeCl <sub>3</sub>	
	Koagülant dozu (g/L)	0.5	3	
	Yavaş K. Hızı (rpm)	10	30	
	Yavaş K. Süresi (dk)	5	20	
	Hızlı K. Hızı (rpm)	50	100	
	Hızlı K. Süresi (dk)	1	5	
	pH	9	11.5	
	Faktör/Seviye	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 2
Santrifügasyon	Santrifüjleme hızı	1500	2500	3500
	Santrifüjleme süresi	15	30	45

Çalışmada ayrıca varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA, hata varyansını tahmin etmek ve çeşitli parametrelerin göreceli önemini belirlemek için kullanılır. Araştırılan her parametrenin optimizasyon kriteri üzerindeki etkisini gösterir. ANOVA ayrıca yanıtta gözlenen varyasyonun seviye ayarlamalarının değişmesinden mi yoksa deneysel standart hatalardan mı kaynaklandığını gösterir [9]. Aynı zamanda parametrelerin istatistiksel önemini ifade etmek için Fisher testi (F değeri) ve olasılık (P değeri) kullanılır. ANOVA analizinde yüksek F değeri ve 0.05’ten küçük P değeri bulunan parametreler performans karakteristiği üzerinde daha büyük etkiye sahiptir [10].

### 3. SONUÇLAR

#### 3.1. Koagülasyon Prosesinin Optimizasyonu

Yüksek su içeriğine sahip müsilaj biyokütlesinin düşük işletim maliyeti ile süspanse katının çöktürülerek yüksek kalitede üst sıvı elde edebilmek için koagülasyon prosesi uygulanmıştır. Tablo 2’de Taguchi Deney Tasarım modeline göre hazırlanan deney deseni ve cevap



parametre değerleri verilmiştir. Modelde çökelen katı hacmi, üst sıvı bulanıklığı ve işletim maliyeti cevap parametresi olarak alınmıştır.

**Tablo 2.** Koagülasyon prosesi deneysel şartlar ve cevap parametreleri

Deney No	Koagülant Tipi	Yavaş K. Hızı (rpm)	Yavaş K. Süresi (dk)	Hızlı K. Hızı (rpm)	Hızlı K. Süresi (dk)	pH	Koa. Dozu (g/L)	Çökelen Katı Hacim (ml)	Bulanıklık (NTU)	İşletim Maliyeti (Euro/L)
1	FeCl <sub>3</sub>	30	5	100	1	9	3	120	238	1.3056
2	FeCl <sub>3</sub>	30	5	50	5	11.5	0.5	95	21.6	0.5942
3	FeCl <sub>3</sub>	10	20	100	1	11.5	0.5	90	44.4	0.5942
4	Alüm	30	20	100	5	9	0.5	85	159	0.6244
5	Alüm	10	5	50	1	9	0.5	130	250	0.6243
6	Alüm	10	5	100	5	11.5	3	105	30.3	2.6196
7	FeCl <sub>3</sub>	10	20	50	5	9	3	95	132	1.3056
8	Alüm	30	20	50	1	11.5	3	100	10.4	2.6196

Düşük işletim maliyetinde yüksek üst sıvı kalitesi ve yüksek oranda çökebilirliği sağlayacak işletim şartlarını belirlemek için proses optimize edilmiştir. Elde edilen optimum koşullar ve optimum koşullarda yapılan doğrulama deney sonuçları Tablo 3'te sunulmuştur. Tablodan görüleceği üzere doğrulama deney sonuçları modelin güven aralığında öngördüğü değerler içinde kalmıştır.

**Tablo 3.** Koagülasyon prosesinin optimum koşulları, modelin öngördüğü ve gerçek değerler

Optimum koşullar	Modelin öngördüğü değerler	Gerçek değer
FeCl <sub>3</sub> : 0.5g/L pH: 11.5 Hızlı karıştırma hızı: 100 rpm Hızlı karıştırma süresi: 5 dakika Yavaş karıştırma hızı: 30 rpm Yavaş karıştırma süresi: 5 dakika	Çökelen katı hacmi için modelin %95 güven aralığında tahmin ettiği değer 66-93ml aralığında olup 80ml değer öngörülmektedir.  Bulanıklık için modelin %95 güven aralığında tahmin ettiği değer 0-19 NTU aralığında olup 10.5 NTU değer öngörülmektedir.  İşletme maliyeti:0.594 Euro/L	Çökelen katı hacmi için optimum koşullarda 85 ml gerçek değer elde edilmiştir  Bulanıklık için optimum koşullarda 8.28 NTU gerçek değer elde edilmiştir.  İşletme maliyeti:0.594 Euro/L

Koagülasyon denemeleri sabit polielektrolit dozunda gerçekleştirilmiştir. Optimum işletim koşullarında polielektrolit ilavesi yapılmadan gerçekleştirilen denemede, çökelen katı hacminin 75 ml ve üst sıvı bulanıklığının ise 2.56 NTU olduğu belirlenmiştir. Polielektrolit ilavesi yapılmayan koagülasyon denemesinden daha iyi katı çökmesi ve daha iyi kalitede üst sıvının elde edilmiş olması, müsilağın polielektrolit özelliğindeki yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Bu nedenle polielektrolit ilave edilmeksizin koagülasyon prosesinin uygulanması önerilmektedir.

Koagülasyon prosesinde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek amacı ile varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır (Tablo 4 ve Tablo 5). ANOVA ile cevap parametrelerinin istatistiksel analizi yapılmaktadır, bu analiz ile prosesi etkileyen en önemli parametreler tanımlanır. ANOVA çökelen katı hacmi ve bulanıklık bağımlı değişkenleri için yapılmıştır. Çökelen katı hacmi cevap parametresi için yapılan ANOVA’da koagülant tipi, koagülant dozu, hızlı ve yavaş karıştırma hızının etkileri çok küçük olduğu için hataya dahil edilmiştir. Elde edilen modelin anlamlılığı P istatistiksel parametresi ile değerlendirilmiştir. Modelin P değerinin 0.05’in altında olması modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Hızlı ve yavaş karıştırma süresi parametrelerinin P değeri 0.05’in altında kaldığı için çökelen katı hacmini etkileyen önemli iki bağımsız değişken olduğu söylenebilir. P değerinin 0.1’den büyük olması modelin anlamsız olduğunu ifade etmektedir. F değerinin 9.67 olması modelin uygun olduğunu, model ile yanıtların doğru bir biçimde elde edilebileceğini göstermektedir. Yeterli tahminleme değeri (Adequate precision (AP)) tasarım noktasındaki hatayı ölçer, tasarım noktalarında tahmin edilen değerlerin aralığını ortalama tahmin hatası ile karşılaştırır. AP>4 olması arzu edilmektedir. Bu çalışmada bu oranın 7 olarak belirlenmiş olması yeterli sinyali göstermektedir. Regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ve düzeltilmiş  $R^2$  değerleri sırası ile 0.8788 ve 0.7879 olarak belirlenmiştir.  $R^2$ ’nin 0.8788 olması toplam değişkenliğin %87.88’in model tarafından açıklanabildiğini ifade etmektedir. Bu değerler arasındaki farkın sıfıra yakın olması arzu edilmektedir.

**Tablo 4.** Çökelen katı hacmi için ANOVA

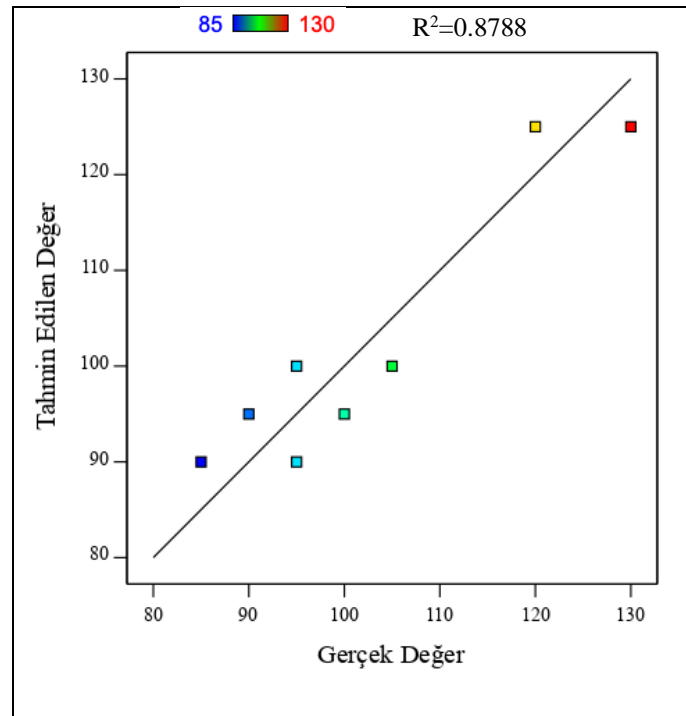
Parametre	Kareler toplamı	SD*	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Model	1450.00	3	483.33	9.67	0.0264
C-Yavaş K. Süre	800.00	1	800.00	16.00	0.0161
E-Hızlı K. Süre	450.00	1	450.00	9.00	0.0399
F-pH	200.00	1	200.00	4.00	0.1161
Hata	200.00	4	50.00		
<b>Toplam</b>	1650.00	7			

\*SD: serbestlik derecesi.

Çökelen katı miktarı için modelin öngördüğü değer ile deneysel olarak elde edilen gerçek değer arasındaki lineer ilişkinin iyi olduğu görülmektedir ( $R^2=0.8788$ ) (Şekil 1). Bu yüzden modelin koagülasyon prosesinin katı madde çökmesinde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çökelen katı miktarına her bir bağımsız değişkenin yüzde etkisini belirlemek için pareto analizi yapılmıştır. Pareto grafiğinde pozitif yönde etkileyen faktörler portakal rengi, negatif yönde etkileyen faktörler ise mavi renk ile gösterilmektedir [11]. Grafikte Bonferroni Limiti mutlak önemi, t-değeri Limiti ise önemli etki seviyesini göstermektedir. Grafikte Bonferroni

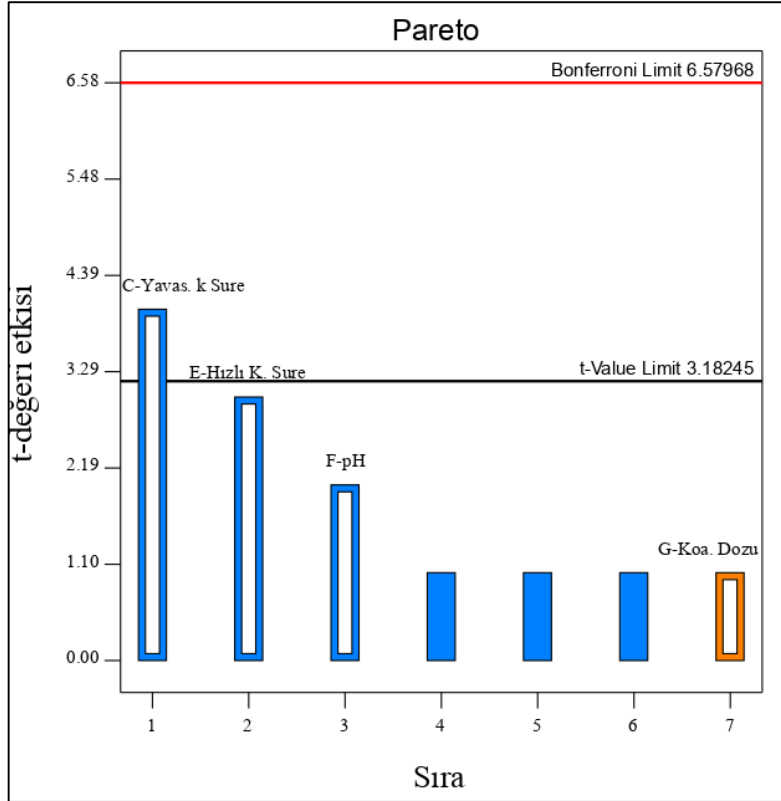
Limiti üzerindeki faktörlerin etkisinin kesinlikle önemli olduğu, t-değeri Limiti üzerindeki faktörlerin etkilerinin önemli olabileceğini, t-değeri Limitinin altındaki faktörlerin etkilerinin ise önemli olamayacağını göstermektedir [12-13]. t-değeri üzerindeki yavaş ve hızlı karıştırma süresi parametrelerinin muhtemelen önemli oldukları ve prosesi negatif yönde etkileyen parametreler olduğu görülmektedir. Pareto analizine göre yavaş ve hızlı karıştırma süresi faktörlerinin etkisi t-değeri limitinin üzerinde olduğundan modele dahil edilmiştir. Koagülasyon prosesinde koagülasyon dozu parametresinin pozitif yönde etkilediği ancak önemsiz etkide olduğu görülmektedir (Şekil 2). Etiketlenmemiş bar grafiklerin ise çok önemsiz parametreler olduğu görülmektedir. Müsilaj biyokütlesinin katı içeriğinin koagülasyon ile çöktürülmesi prosesinde koagülant tipi ve miktarı parametreleri etkisiz kalmıştır. Çökelen katı miktarında hızlı ve yavaş karıştırma sürelerinin çok daha etkili parametreler olduğu Pareto analizi ile ortaya çıkmıştır. Bu durumun ham müsilaj biyokütlesinin yapısında  $-COOH$  ve  $-OH$  gruplarını taşıması ile kazandığı polielektrolit yapısından kaynaklandığı söylenebilir. Polielektrolit ilavesi yapılmadan gerçekleştirilen çökeltme denemesi ile de bu durum doğrulanmıştır. Bu durum uygulamada daha az kimyasal madde tüketimini sağlayacaktır.



Şekil 1. Çökelen katı madde için modelin öngördüğü değer ile gerçek değer arasındaki değişim

Bulanıklık cevap parametresi için ANOVA Tablo 5'te verilmiştir. Modelin P değeri 0.05'in altında olduğu için modelin anlamlı olduğu kabul edilmektedir. Bu çalışmada AP 34.78 olarak belirlenmiştir. Bu değer belirli bir esneklikte regresyon modelinin kullanılabilirliğini ifade

etmektedir.  $R^2$  ve Düzeltilmiş  $R^2$  değerleri sırası ile 0.9982 ve 0.9938 olarak belirlenmiştir. Bu değerler arasındaki farkın sıfıra yakın olması arzu edilmektedir.



Şekil 2. Çökelen katı hacmi için Pareto analizi

Tablo 5. Bulanıklık yanıtı için ANOVA

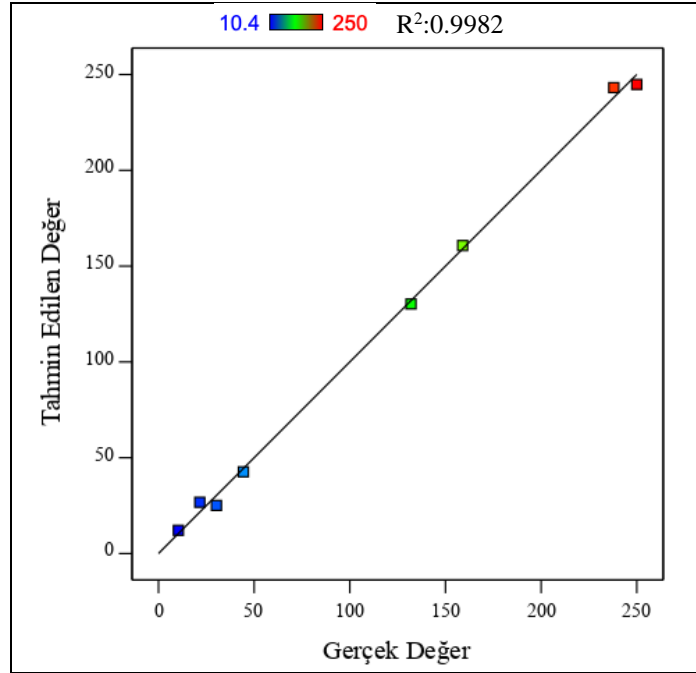
Parametre	Kareler toplamı	SD*	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Model	67135.74	5	13427.15	224.96	0.0044
C-Yavaş K. Süre	4709.35	1	4709.35	78.90	0.0124
E-Hızlı K. Süre	4995.00	1	4995.00	83.69	0.0117
F-pH	56498.41	1	56498.41	946.59	0.0011
G-Koag. Dozu	516.81	1	516.81	8.66	0.0987
Hata	119.37	2	59.69		
Toplam	67255.11	7			

\*SD: serbestlik derecesi.

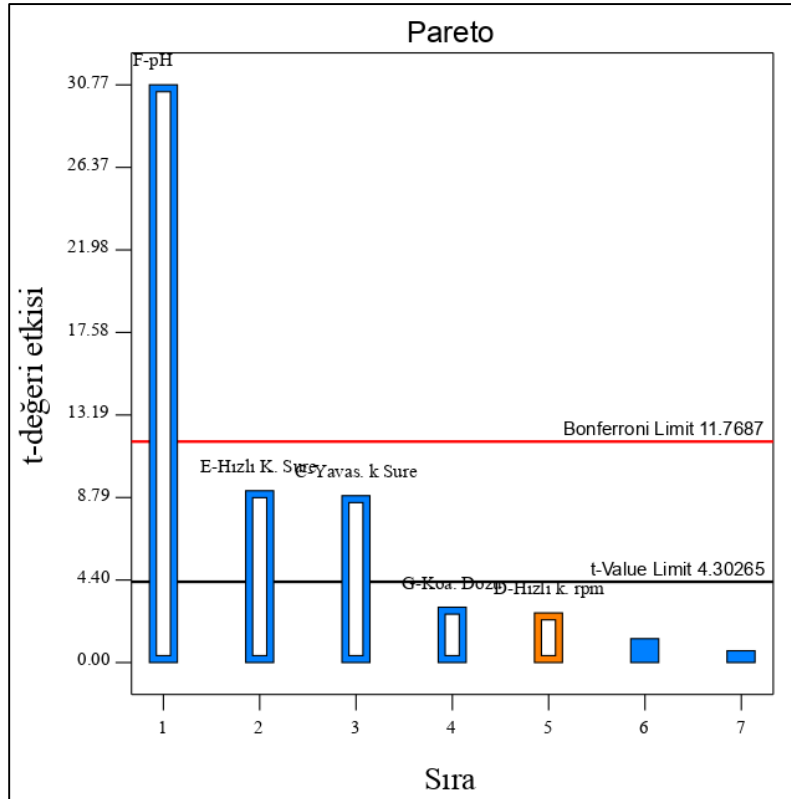
Şekil 3'te görüldüğü üzere bulanıklık cevap parametresi için modelin öngördüğü değer ile gerçek değer arasındaki ilişkinin yüksek dereceden uyumludur.

Üst sıvı bulanıklık değerine çeşitli faktörlerin etkisini incelemek için yapılan pareto analizi Şekil 4'te verilmiştir. pH faktörünün etkisi Bonferroni Limit değerinin üzerinde çıktığı için etkisinin güçlü bir şekilde anlamlı olduğu ve negatif yönde etki gösterdiği söylenebilir. Hızlı ve yavaş karıştırma süreleri Bonferroni Limiti ve t-değeri Limiti arasında kaldığı için önemli etkilere sahip olabileceğini göstermektedir. Diğer parametreler t-değerinin altında kalmıştır.

Pareto analizinden hızlı karıştırma hızı parametresinin bulanıklığı pozitif yönde etkilediği ancak etkisinin önemli olmayacağı görülmektedir.



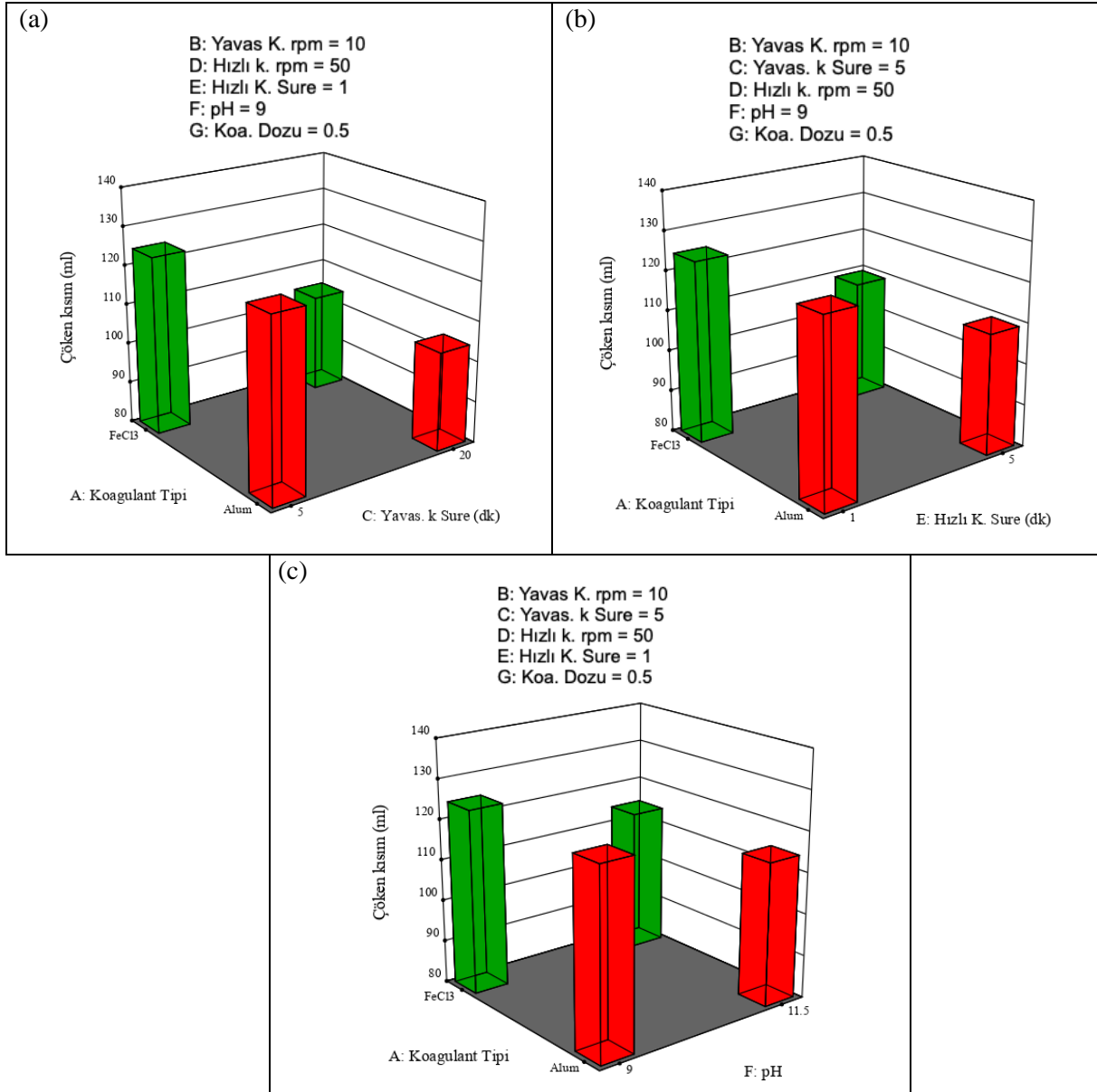
Şekil 3. Bulanıklık için modelin öngördüğü değer ile gerçek değer arasındaki ilişki



Şekil 4. Bulanıklık için Pareto analizi

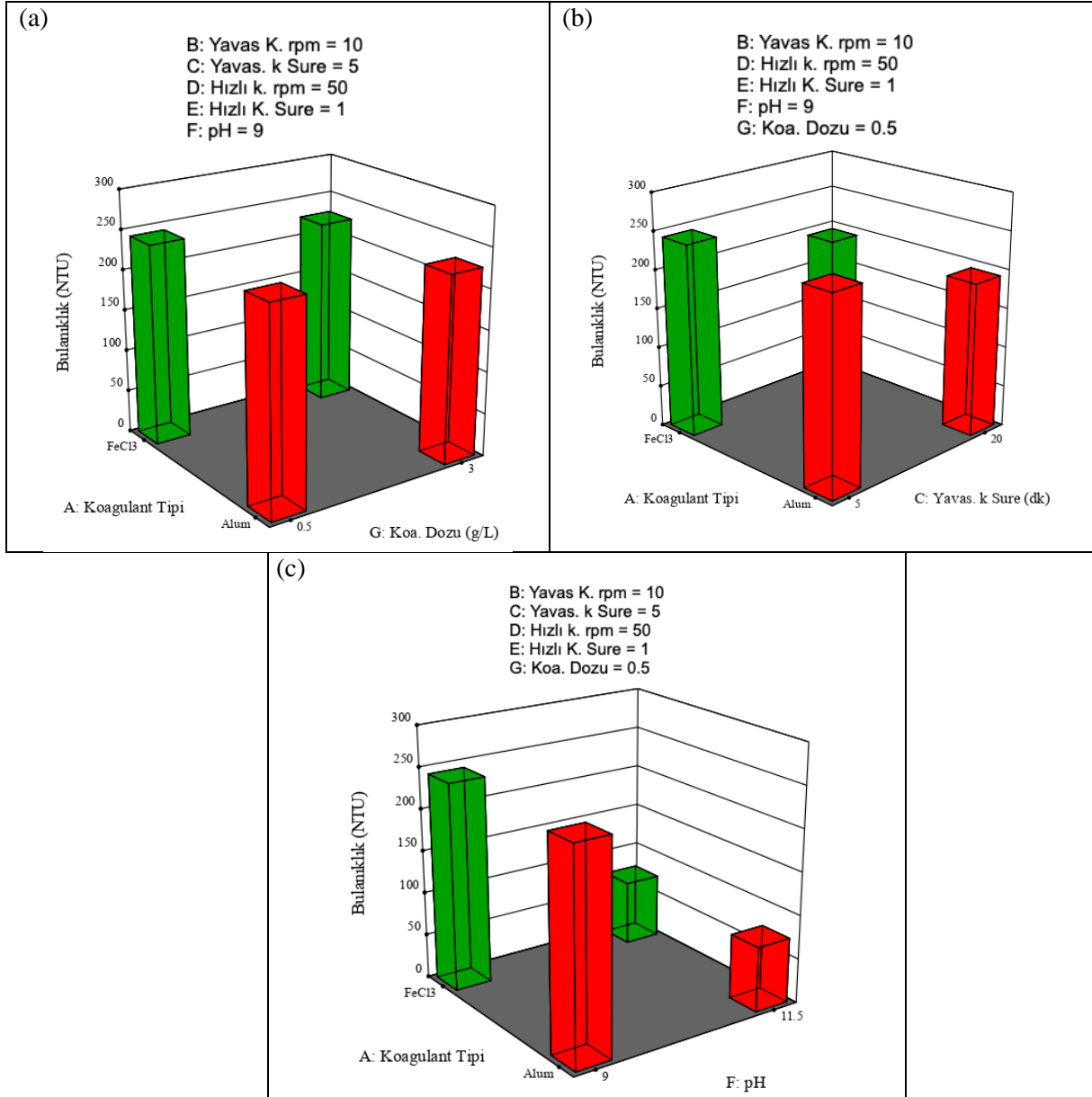
Şekil 5'te koagülasyon prosesinde çökelen katı hacmi cevap parametresi göz önüne alındığında faktörler arasındaki etkileşimler verilmiştir. Şekilde 5 (a) ve (b) de görüldüğü üzere koagülant tipinin değişmesi çöken katı hacmi üzerinde önemli bir etki yaratmamıştır.

Buna rağmen yavaş karıştırma ve hızlı karıştırma süreleri çöken kısım yanıtı üzerinde oldukça etkili olup daha düşük karıştırma sürelerinin çökelen katı hacminin artmasına neden olduğu görülmüştür. Şekil 5 (c)'de ise pH parametresinin çöken katı hacim üzerine etkisine bakıldığında pH 9'da çöken kısım hacminin daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Koagülasyon prosesinde çeşitli parametrelerin çökelen katı hacmine etkisi

Şekil 6'da koagülasyon prosesinde bulanıklık cevap parametresi üzerine çeşitli faktörlerin etkisi gösterilmiştir. Şekil 6 (a) grafiğinde görüldüğü üzere koagülant dozu ve miktarı parametrelerinin bulanıklık üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır. Şekil 6 (b) de görüldüğü üzere yavaş karıştırma süresi arttıkça bulanıklık da artmaktadır. Şekil 6 (c) de ise pH parametresinin bulanıklık yanıtı üzerinde etkisinin önemli olduğunu ve 11.5 pH ile bulanıklığın azaldığı görülmektedir.



Şekil 6. Koagülasyon prosesinde çeşitli parametrelerin bulanıklık değerine etkisi

### 3.2. Santrifüjasyon Prosesinin Optimizasyonu

Müsilaj biyokütlesinin santrifüj prosesi ile düşük işletim maliyetinde yüksek katı/sıvı faz ayırımını sağlayacak biçimde optimize edilmiştir. Uygulanan deney koşullarında üst sıvının KOİ değerleri 65-85 mg/L arasında belirlenmiştir. Bu değerler ham müsilaj biyokütlesinin sıvı fraksiyonundaki KOİ değerine eşdeğerdir. Santrifüjleme ile üst sıvıda KOİ artışı belirlenmemiştir. Üst sıvıda KOİ parametresi için yapılan varyans analizinde proses değişkenleri ile KOİ değeri arasındaki ilişkinin anlamlı olmadığı bulunmuştur. Santrifüj prosesi ile düşük bulanıklığa sahip üst sıvı kalitesi amaçlanmıştır. Tüm denemelerde çökelen katı hacmi ortalama aynı düzeyde (ortalama 2.5 ml) belirlenmiştir. Bu nedenle çökelen katı miktarları ve üst sıvıdaki KOİ değerleri optimizasyonda cevap parametresi olarak alınmamıştır. Santrifüj deney deseni çözümlemesinde bulanıklık ve işletim maliyeti cevap

parametreleri birlikte eşit ağırlıklı olarak dikkate alınmıştır. Prosesin deney deseni ve cevap parametreleri Tablo 6’da verilmiştir.

**Tablo 6.** Santrifüj prosesi deneysel şartlar ve cevap parametreleri

Deney no	Süre (dakika)	Santrifüj hızı (rpm)	Bulanıklık (NTU)	Maliyet (euro/L)
1	30	2500	329	0.0303
2	45	2500	275	0.0455
3	15	2500	381	0.0152
4	30	3500	180	0.0425
5	45	1500	697	0.0273
6	45	3500	139	0.0637
7	15	3500	260	0.0212
8	30	1500	797	0.0182
9	15	1500	864	0.0091

Düşük bulanıklık ve düşük işletim maliyeti için elde edilen optimum deney şartları 3500 rpm ve 30 dk olarak bulunmuştur. Bu şartlar hali hazırda deney deseninde bulunmaktadır (Tablo 7).

**Tablo 7.** Santrifüj prosesi için optimum koşullar, modelin öngördüğü değerler ve gerçek değerler

Optimum koşullar	Modelin öngördüğü değerler	Gerçek değer
Santrifüj süresi: 30 dk Santrifüj hızı: 3500 rpm	Bulanıklık için %95 güven aralığında tahmin ettiği değer: 153.2-231.8 NTU aralığında olup modelin tahmin değeri 192.5 NTU İşletme maliyeti: 0.042 Euro/L	Bulanıklık için optimum koşullarda 180 NTU gerçek değer elde edilmiştir. İşletme maliyeti: 0.042 Euro/L

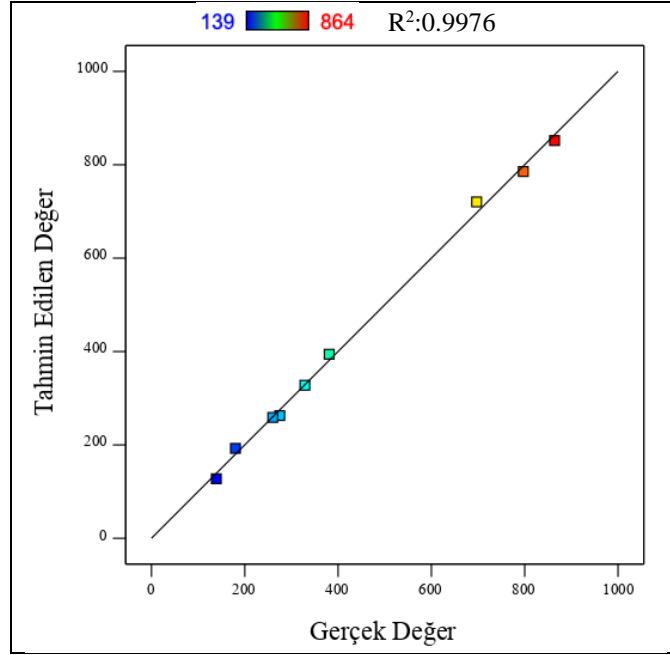
Üst sıvı bulanıklık değeri için hazırlanan ANOVA tablosundan görüleceği üzere modelin P değeri 0.05’in altında olduğu için model anlamlı bulunmuştur (Tablo 8). Bu çalışmada AP değeri 51.13 olarak belirlenmiştir.  $R^2$  ve ayarlanmış  $R^2$  değerleri sırası ile 0.9976 ve 0.9952 olarak belirlenmiştir. Şekil 7’de de görüldüğü üzere santrifüjleme denemelerinde bulanıklık parametresi için öngörülen ile gerçek değer arasındaki ilişki yüksek derecededir.

**Tablo 8.** Santrifüj prosesinde bulanıklık yanıtının ANOVA sonuçları

Parametre	Kareler toplamı	SD*	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri
Model	$6.053 \times 10^5$	4	$1.513 \times 10^5$	418.86	< 0.0001
A- Süre (dakika)	25873.56	2	12936.78	35.81	0.0028
B- Santrifüj hızı (rpm)	$5.794 \times 10^5$	2	$2.897 \times 10^5$	801.91	< 0.0001
Hata	1445.11	4	361.28		
Toplam	$6.067 \times 10^5$	8			

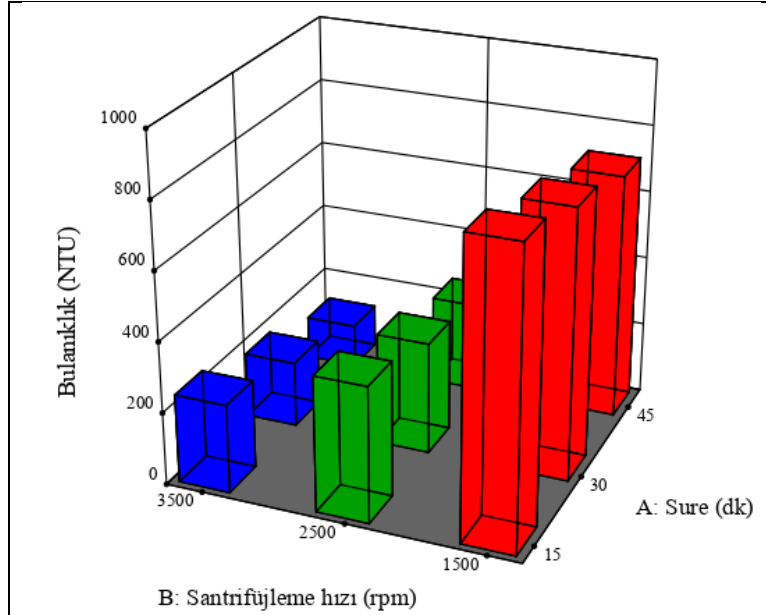
\*SD: serbestlik derecesi.





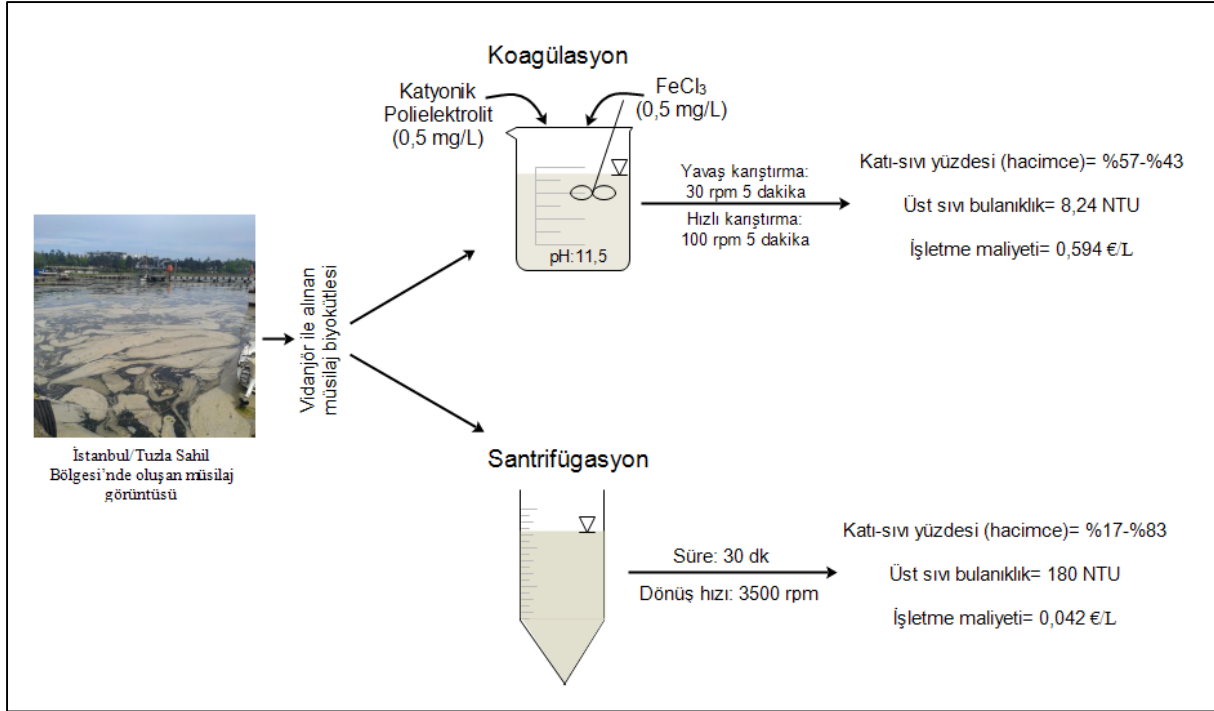
Şekil 7. Santrifügasyon prosesinde bulanıklık yanıtı için modelin tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki ilişki

Şekil 8’de santrifüj prosesine etki eden parametrelerin bulanıklık cevap parametresine olan etkisi gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere sürenin artışı ve santrifüj hızının artışı bulanıklık azalışında önemli etkiye sahiptir. En yüksek santrifüj hızı (3500 rpm) ve en yüksek santrifüj süresi ile en düşük bulanıklık seviyesine ulaşılmıştır.



Şekil 8. Santrifügasyon prosesinde bulanıklık üzerine santrifüjleme hızı (rpm) ve süre (dakika) parametrelerinin etkisi

Gerçekleştirilen çalışma ve elde edilen sonuç Şekil 9’daki gibi özetlenmiştir. Şekil 9’da kullanılan İstanbul/Tuzla sahil bölgesinde oluşan müsülaj fotoğrafı Öztürk ve ark. (2021) çalışmalarından alınmıştır [14].



**Şekil 9.** Müsilaj biyokütlesinin susuzlaştırılmasında koagülasyon ve santrifügasyon proseslerinin optimizasyonu

#### 4. TARTIŞMA

Alıcı su ortamlarında gerek müsilajı yaratan popülasyonun gelişimi için uygun ortam koşullarının oluşması ile gerekse bir bölgede oluşan müsilaj biyokütlesinin akıntılar ve meteorolojik faktörler ile farklı bölgeye taşınması sonucu müsilaj durumunun tüm denizlerimizde görülme olasılığı yüksektir. Su içeriği yüksek olan müsilaj biyokütlesinin suyunun giderilmesi üzerine yapılan bu çalışma biyokütlenin yönetiminde önemli bilgi sağlayacaktır. Bu çalışmada deniz yüzeyinden alınan müsilaj biyokütlesinin suyunun giderilmesi amacı ile koagülasyon ve santrifüj prosesleri uygulanmıştır. Proseslerin işletim şartları düşük işletim maliyetinde müsilaj biyokütlesinde en iyi katı çökeltme ve üst sıvı kalitesi elde etmek amacı optimize edilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

-Sabit polielektrolit dozunda yapılan koagülasyon prosesinin optimum koşulları 0.5 g/L FeCl<sub>3</sub>, pH 11.5, hızlı karıştırma hızı ve süresi sırası ile 100 rpm ve 5 dakika, yavaş karıştırma hızı ve süresi sırası ile 30 rpm ve 5 dakika olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda 0.594 Euro/L işletim maliyeti ile çökelen katı hacmi 85 ml (%56.7 çökelen katı yüzdesi) ve üst sıvının bulanıklığı 8.28 NTU elde edilmiştir.

-Polielektrolit ilavesi olmadan yapılan denemede ise 75 ml çökelen katı ve 2.56 NTU bulanıklık elde edilmiştir. Koagülasyon prosesinde polielektrolit ilavesi yapılmadan daha iyi sonuçların elde edilebileceği belirlenmiştir.

-Verilerin Pareto analizinde katı madde çökmesinde yavaş ve hızlı karıştırma sürelerinin önemli etkilere sahip olabileceği, bulanıklık parametresinde ise pH'nın en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Ancak bu parametrelerin negatif etkiye sahip olduğu görülmüştür.

-Santrifügasyon prosesinde 30 dakikada 3500 rpm santrifüjleme hızında en yüksek katı-sıvı ayrımı gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu koşullarda 0.042 €/L işletim maliyeti ile çökelen katı hacmi 2.5 ml (%16.7 çökelen katı yüzdesi) üst sıvı bulanıklık değeri ise 180 NTU olarak belirlenmiştir.

-İşletim maliyetinin santrifügasyon prosesine göre yüksek olmasına rağmen koagülasyon prosesi ile daha yüksek katı madde çökmesi ve daha yüksek üst sıvı kalitesi elde etmek mümkündür.

## KAYNAKLAR

- [1] B. Toklu-Alicli, S. Polat, N. Balkis-Ozdelice, Temporal variations in the abundance of picoplanktonic *Synechococcus* (Cyanobacteria) during a mucilage event in the Gulfs of Bandırma and Erdek. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 233 (2020) 106513.
- [2] S. Genitsaris, N. Stefanidou, U. Sommer, and M. Moustaka-Gouni, Phytoplankton blooms, red tides and mucilaginous aggregates in the urban Thessaloniki Bay, Eastern Mediterranean. *Diversity*, 11 (8) (2019) 136.
- [3] M. M. Tosif A. Najda, A. Bains, R. Kaushik, S.B. Dhull, P. Chawla, and M. Walasek-Janusz, A Comprehensive Review on Plant-Derived Mucilage: Characterization, Functional Properties, Applications, and Its Utilization for Nanocarrier Fabrication. *Polymers*, 13(7) (2021) 1066.
- [4] F. Ricci, N. Penna, S. Capellacci, and A. Penna, Potential environmental factors influencing mucilage formation in the northern Adriatic Sea. *Chemistry and Ecology*, 30(4) (2014) 364-375.
- [5] R. R. Soomro, T. Ndikubwimana, X. Zeng, Y. Lu, L. Lin, and M. K. Danquah, Development of a Two-Stage Microalgae Dewatering Process – A Life Cycle Assessment Approach. *Frontiers in Plant Science*, 7 (2016) 113.
- [6] V. Gejji, R. Lacey, and S. D. Fernando, The use of polyelectrolytes for simultaneous dewatering and fractionation of microalgal proteins, lipids, and pigments. *Algal Research*, 44 (2019) 101675.
- [7] A. Sandip, V. H. Smith, and T. N. Faddis, An experimental investigation of microalgal dewatering efficiency of belt filter system. *Energy Reports*, 1 (2015) 169-174.
- [8] M. Sadrzadeh and T. Mohammadi, Sea water desalination using electrodialysis. *Desalination*, 221 (2008) 440-447.
- [9] S. Aber, D. Salari, and M. R. Parsa, Employing the Taguchi method to obtain the optimum conditions of coagulation–flocculation process in tannery wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 162(1) (2010) 127-134.
- [10] S. H. Dhawane, T. Kumar, and G. Halder, Biodiesel synthesis from *Hevea brasiliensis* oil employing carbon supported heterogeneous catalyst: Optimization by Taguchi method. *Renewable Energy*, 89 (2016) 506-514.

- [11] N. Genç, E. Durna, and E. Erkişi, Optimization of the adsorption of diclofenac by activated carbon and the acidic regeneration of spent activated carbon. *Water Science and Technology*, 83(2) (2021) 396-408.
- [12] M. M. Abdulredha, S. A. Hussain, and L. C. Abdullah, Separation Emulsion via Non-Ionic Surfactant: An Optimization. *Process*, 7(6) (2019) 382.
- [13] M. Asem, W. M. F. W. Nawawi, and D. N. Jimat, Evaluation of water absorption of polyvinyl alcohol-starch biocomposite reinforced with sugarcane bagasse nanofibre: Optimization using Two-Level Factorial Design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 368 (1) (2018) 012005.
- [14] İ. Öztürk, M. Yanalak, Ö. Arslan, İ. Koyuncu, E. Dilekgürgen, M.E. Erşahin, T. Türken, Marmara Denizi'nde deniz salyası sorunu ile ilgili görüş ve öneriler (Rapor), İstanbul, İstanbul Teknik Üniversitesi, 73, (2021).