



## Kinetic evaluation of organic matter removal in olive mill wastewater treatment using microfiltration membrane

Sevgi Tokgöz Güneş\*<sup>ID</sup>, Ezgi Oktav Akdemir<sup>ID</sup>

Department of Environmental Engineering, Engineering Faculty, Dokuz Eylül University, 35160, Izmir, Türkiye

### Highlights:

- Microfiltration of olive mill wastewater
- Application of kinetic models
- High correlation coefficients

### Keywords:

- Kinetic model
- Organic matter
- Microfiltration
- Olive oil industry wastewater

### Article Info:

Research Article

Received: 24.12.2021

Accepted: 04.02.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1041320

### Correspondence:

Author: Sevgi Tokgöz Güneş  
e-mail:  
sevgi.tokgoz@deu.edu.tr  
phone: +90 232 3017128

### Graphical/Tabular Abstract

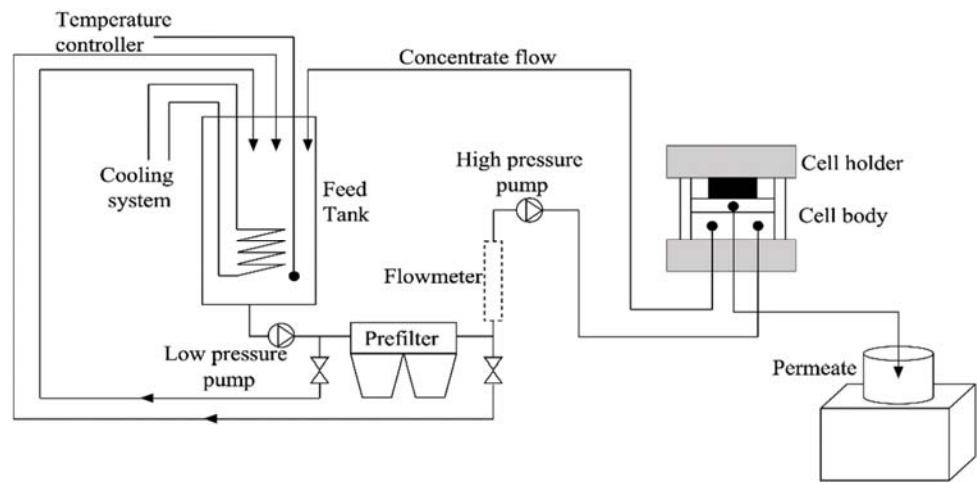


Figure A. Schematic flow diagram of the experimental set-up

### Purpose:

The aim of this study is to investigate the applicability of the kinetic models frequently used in the literature for organic matter removal in microfiltration systems.

### Theory and Methods:

Laboratory scale microfiltration membrane system (Figure A) was operated at 100, 150 and 200 L/h flow rates, 1 bar pressure and 4 different microfiltration times of 30, 60, 90 and 120 minutes. The system was fed with olive oil industry wastewater with COD concentration of 120 g/L. The results obtained after microfiltration were analyzed using the Modified Stover-Kincannon model, Second Order Kinetic model and First Order Kinetic model.

### Results:

The constants,  $U_{max}$  and  $K_B$ , of the Modified Stover-Kincannon model produced values were 39,370- 46,948 g/L.min and 80,114-96,883 g/L.min, respectively. The constants,  $b$  and  $a$ , of the Second-Order Kinetic model produced values of 2,0349-2,0807 and 2,5546-3,0527 1/min, respectively. Meanwhile, the average second-order COD removal rate,  $k_{s(2)}$ , was 39,3095-46,9741 1/min. In the First Order Kinetics model, the first-order COD removal rate constant,  $k_1$  was in the range of 0.8868-0.5286 1/min. These models give high correlation coefficients ( $R^2 = 100-97\%$ ).

### Conclusion:

Although studies on the removal efficiency of organic matter for microfiltration systems have been carried out in the literature, their kinetic modeling studies are not available. Therefore, in this study, the applicability of the models that are frequently used in the literature for organic matter removal kinetics in microfiltration systems was investigated. The high correlation coefficients obtained show that these applied models can be used in microfiltration system design, thus predicting the behavior of the membrane.



## Zeytinyağı endüstrisi atıksuyunu arıtan mikrofiltrasyon membran sisteminde organik madde gideriminin kinetik değerlendirilmesi

Sevgi Tokgöz Güneş\*<sup>ID</sup>, Ezgi Oktav Akdemir<sup>ID</sup>

Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 35160, Buca, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun mikrofiltrasyonu
- Kinetik modellerin uygulanması
- Yüksek korelasyon katsayıları

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.12.2021

Kabul: 04.02.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1041320

#### Anahtar Kelimeler:

Kinetik model,  
organik madde,  
mikrofiltrasyon,  
zeytinyağı endüstrisi  
atıksuyu

#### ÖZ

Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli bir mikrofiltrasyon membran sistemi, 100, 150 ve 200 L/sa debilerde, 1 bar basınçta ve 30, 60, 90 ve 120 dakikalık 4 farklı filtrasyon süresinde (MFS) çalıştırılmıştır. Sistem, 120 g/L Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) konsantrasyonuna sahip zeytinyağı endüstrisi atıksuyu ile beslenmiştir. Mikrofiltrasyon sonrası elde edilen sonuçlar, Modifiye Stover-Kincannon modeli, İkinci Derece Kinetik model, Birinci Derece Kinetik model kullanılarak analiz edilmiş ve uygulanan modellerin deneysel verilere uygun olduğu bulunmuştur. Modifiye Stover-Kincannon model sabitleri olan  $U_{maks}$  ve  $K_B$  sırasıyla 39,370-46,948 g/L.dak ve 80,114-96,883 g/L.dak aralığındadır. İkinci Derece Kinetik model sabitleri olan  $b$  ve  $a$  değerleri sırasıyla 2,0349-2,0807 ve 2,5546-3,0527 1/dak ve ikinci derece KOİ giderme hız sabiti olan  $k_{2(C)}$  değerleri ise, 39,3095-46,9741 1/dak aralığında bulunmuştur. Birinci Derece Kinetik modelinde, birinci derece KOİ giderme hız sabiti,  $k_1$ , 0,8868-0,5286 1/dak aralığındadır. Yüksek korelasyon katsayıları ( $R^2 = \%100-97$ ), uygulanan bu modellerin, mikrofiltrasyon sistem tasarımında organik madde giderme kinetiğinde kullanılabilirliğini, dolayısıyla zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun artımında membranın davranışını tahmin edebileceğini göstermektedir.

## Kinetic evaluation of organic matter removal in olive mill wastewater treatment using microfiltration membrane

### H I G H L I G H T S

- Microfiltration of olive mill wastewater
- Application of kinetic models
- High correlation coefficients

#### Article Info

Research Article

Received: 24.12.2021

Accepted: 04.02.2023

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.1041320

#### Keywords:

Kinetik model,  
organik madde,  
mikrofiltrasyon,  
olive oil industry wastewater

#### ABSTRACT

In this study, a laboratory scale microfiltration system was operated at flow rate of 100, 150, 200 L/h, pressure of 1 bar, and four different microfiltration times (MFT) of 30, 60, 90, and 120 minutes. The microfiltration system was fed with olive mill wastewater consisting of a Chemical Oxygen Demand (COD) concentration of 120 g/L. The results of microfiltration experiments were analyzed using the Modified Stover-Kincannon model, the Second-Order Kinetic model, the First-Order Kinetic model, and the applied models were found to be suitable for the experimental data. The constants,  $U_{max}$  and  $K_B$ , of the Stover-Kincannon model produced values were 39.370- 46.948 g/L.min and 80.114-96.883 g/L.min, respectively. The constants,  $b$  and  $a$ , of the Second-Order Kinetic model produced values of 2.0349-2.0807 and 2.5546-3.0527 1/min, respectively. Meanwhile, the average second-order COD removal rate,  $k_{s(2)}$ , was 39.3095-46.9741 1/min. In the First Order Kinetics model, the first-order COD removal rate constant,  $k_1$  was in the range of 0.8868-0.5286 1/min. These models give high correlation coefficients ( $R^2 = 100-97\%$ ) and these indicate that these applied models can be used in microfiltration system design and therefore predict the behavior of the membrane.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*sevgi.tokgoz@deu.edu.tr, ezgi.oktav@deu.edu.tr / Tel: +90 232 3017128

## 1. Giriş (Introduction)

Membran, iki fazı birbirinden ayıran seçici bir bariyer olarak tanımlanmaktadır. Su ve atıksu arıtımında çeşitli karakteristiklerde membran ayırma prosesleri kullanılmaktadır. Uygulanan yürütücü kuvvet ve kullanılan membranın gözenek boyutuna göre sınıflandırılmakta olan membran proseslerinden mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmoz yaygın olarak uygulanmaktadır [1]. Mikrofiltrasyon, statik basınç farkının itici güç olarak kullanıldığı ve ayırma için membranın eleme ayırımının kullanıldığı bir membran prosesidir. Mikrofiltrasyon membranları (MF) 0,05-2 µm aralığında gözenek çaplarına sahiptir. Mikrofiltrasyonda elekten geçirme prensibine dayanan temel ayırma işlemi gözenek boyutlarına göre olmaktadır. Membran gözenek çapından büyük olan maddeler membran yüzeyinde tutulmaktadır [2]. Prosesin verimliliği yüksek oranda membran malzemesinin doğru seçimine, arıtılacak atıksuda bulunan çözünmüş bileşenler arasındaki etkileşimlere ve uygulanan işletim parametrelerine bağlıdır [3]. Teknolojideki gelişmeler sayesinde membranlar özellikle gıda endüstrisi, suyun yeniden kullanımı ve atıksu arıtımı gibi birçok konuda kullanım alanı bulmuştur. Zeytinyağı endüstrisi atıksularının arıtımı da bu uygulama alanlarından biridir. Bu konuda laboratuvar ölçekli çalışmalar mevcuttur [4-6]. Kinetik model geliştirme çalışmaları kapsamlı ve karmaşık deneysel verileri basit ve kullanışlı matematiksel denklemlere indirgeyerek sürecin tasarımı ve optimizasyonunda kullanımını sağlayan yararlı bir araçtır. Kullanılan modelin uygulanabilirliğini artırmak için kinetik katsayıların belirlenmesi ve süreç değişkenleri arasında uygun matematiksel bağıntının seçilmesi gereklidir. Kinetik katsayılar endüstriyel reaktör tasarımlarında önemli bir yere sahiptir. Böylece, deneysel çalışmalardan elde edilen kinetik analizlerin sonuçları, aynı ya da istenilen işletme koşulları altında tam ölçekli sistemlerin arıtma verimlerinin tahmin edilmesi için kullanılabilir.

Mikrofiltrasyon sistemlerinde süreç modellemesi, membran filtrasyonuna dayanır ve konsantrasyon polarizasyonu ile membran tıkanması gibi filtrasyon sonrasında meydana gelen fiziksel süreçlere odaklanılır [7]. Membran filtrasyon modelleri çoğunlukla Darcy Yasasını ve Seri Direnç Teorisini kullanan mekanik bir yaklaşımla uygulanır [8, 9]. Gözenek engelleme ve tıkanma olgusunun membran filtrasyon verimi üzerindeki etkileri, membran filtrasyon modellerinin uygulamalarında verilmektedir [10-13]. Konsantrasyon polarizasyonu olgusu, küçük gözenek boyutları nedeniyle nanofiltrasyon ve ters ozmoz membranlarını önemli ölçüde etkileyebilirken, mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon membranlarındaki etkileri, daha büyük gözenek boyutları nedeniyle en aza indirgenmiştir. Diğer bir deyişle, mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon membranlarının yüzeylerinde gelişebilecek bileşenlerin çoğu nihayetinde membranlardan geçerek konsantrasyon polarizasyonu etkisinin tamamen ortadan kalkmasına veya azalmasına neden olabilir [14, 15]. Mikrofiltrasyon sistemlerinde konsantrasyon polarizasyonu membran kirlenmesine katkıda bulunan kilit bir mekanizma olmaması nedeniyle teorisi ve ilgili modelleri mikrofiltrasyon sistemi için uygun değildir. Sonuçta, mikrofiltrasyon sistemleri için kullanılacak modeller literatürde kirlenme modelleri olarak da adlandırılan membran tıkanması modelleriyle sınırlı kalmaktadır [16-18]. Membran tıkanma modellerinde, model varsayımları ve pratik olmaması bu modellerin uygulanmasını zorlaştırmaktadır.

Membran teknolojilerinin karasu olarak da adlandırılan zeytinyağı endüstrisi atıksularının arıtımında uygulandığı çalışmalarda Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve Toplam Organik Karbon (TOK) giderimleri üzerine odaklanılmıştır. Örneğin, mikrofiltrasyon ile %91 TOK [19], ultrafiltrasyon ile %87 KOİ [20] ve nanofiltrasyon ile %78 KOİ [21] giderme verimleri elde edilmiştir. İlave olarak, bu atıksuların arıtımında farklı teknolojilerin kombinasyonunun kullanıldığı

çalışmalar da bulunmaktadır [22]. Örneğin, santrifüj ve ultrafiltrasyon kombinasyonu ile %90 KOİ giderimi [23], mikrofiltrasyon, nanofiltrasyon, ozmotik damıtma ve membran emülsifikasyonu kombinasyonunda %92 TOK giderimi [24], flokülasyon, fotoliz ve mikrofiltrasyon kombinasyonunda %80,3 KOİ giderimi [25] ve flokülasyon-sedimentasyon ve membran mikrofiltrasyon sistemlerinin birincil arıtma olarak kullanıldığı bir diğer çalışmada ise, %92,6 KOİ giderme verimi elde edilmiştir [26]. Membran prosesler sonrasında yüksek hacimde oluşan konsantrasyonların yönetimi oldukça önemlidir. Arıtma yapılmaksızın deşarj ya da arıtma ve geri kazanım için uygulanan teknolojiler konsantrasyon yönetimi içinde yer almaktadır. Endüstriyel atıksuların membran prosesler ile arıtımı sonrasında oluşan konsantrasyonların yönetiminde en yaygın kullanılan teknoloji evoparasyondur. Endüstriyel uygulamalarda sıfır sıvı deşarjı yaklaşımı ile yapılan çalışmalarda ise membran prosesler ile termal temelli konsantrasyon giderim yöntemleri bir arada kullanılmaktadır [27]. Gıda endüstrilerinde ve bu endüstrilerden kaynaklanan atıksuların arıtımında genellikle seramik ve polimerik membranlar tercih edilmektedir. Seramik membranlar, kimyasal bozulmalara ve biyokirlenmelere karşı dirençlidir ve uzun raf ömrüne sahiptir. Ancak, üretim maliyetleri yüksektir. Polimerik membranlar ise üstün ayırma performansı, düşük maliyeti ve kolay üretimi nedeniyle seramik membranlara göre daha çok tercih edilmektedir. Ancak, membran gözeneklerinin tıkanması ve membran yüzeyinde geçiş engelleyecek tabaka/katman oluşumu nedeniyle seramik membranlara göre kirlenme eğilimleri yüksektir. Bu sebeple, polimerik membran kullanılması durumunda süzüntü akı değerinin düşmesini engellemek için membrandan geçirilecek çözeltinin ön arıtma işleminden geçirilmesi veya düzenli membran temizliğinin yapılması gerekmektedir [1]. Literatürde mikrofiltrasyon sistemleri için organik maddenin giderme verimleri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, bunların kinetik modelleme çalışmaları bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada mikrofiltrasyon sistemlerinde organik madde kirlilik giderme kinetikleri için literatürde sıklıkla kullanılan modellerin uygulanabilirliği araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

### 2.1. Ham Atıksuyun Özellikleri (Characterization of Raw Wastewater)

Deneysel çalışmalarda zeytinyağı endüstrisi atıksuyu kullanılmıştır. Atıksu, İzmir ilinde bulunan ve 3 fazlı üretim yapan bir zeytinyağı üretim tesisinden temin edilmiştir. Zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun genel bileşimi Tablo 1'de verilmektedir.

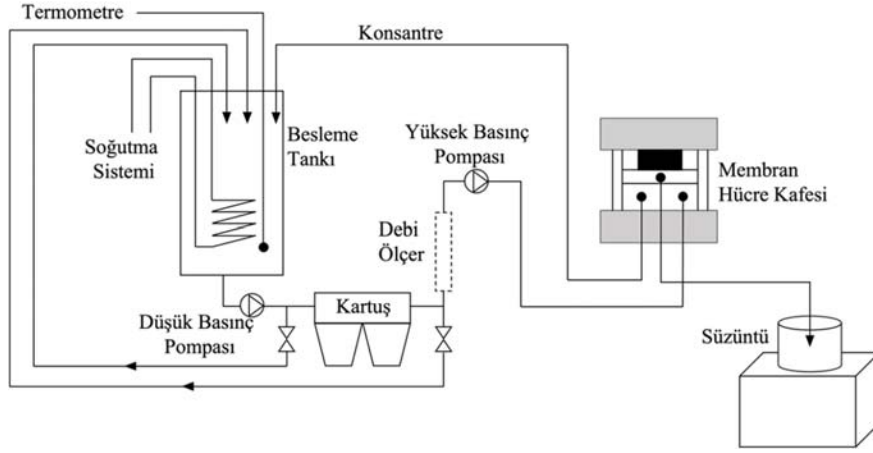
**Tablo 1.** Zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun karakterizasyonu (Characterization of olive mill wastewater)

Parametre (g/L)	Zeytinyağı Atıksu Karakterizasyonu
pH*	4,4
Kimyasal oksijen ihtiyacı	120,0
Toplam organik karbon	46,0
Askıda katı madde	18,6
Yağ-gres	2,87

\*birimsiz

### 2.2. Deneysel Düzenek ve Prosedürü (Experimental Set-up and Procedure)

Deneysel çalışmalarda Osmonics firmasından temin edilen membran sistemi kullanılmıştır. Laboratuvar ölçekli membran sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir. Sistem, hidrolik el pompası, kartuş filtre, düşük ve üç fazlı akımla çalışan yüksek basınç pompaları, membran hücre kafesi, basınç kontrol vanası, soğutma sistemi ve 25 litrelik bir besleme atıksu tankından oluşmaktadır.



Şekil 1. Mikrofiltrasyon sisteminin şematik gösterimi (Schematic diagram of microfiltration system)

Deneylerin başlangıcında membran hücre kafesi hidrolik el pompasıyla sıkıştırılarak işletme sırasında uygulanacak basınca dayanıklı olması sağlanmıştır. Besleme tankından alınan atıksu, düşük basınç pompasıyla kartuş filtreye gönderilmiştir. Kartuş filtreden geçen atıksu yüksek basınç pompasına alınmış, buradan basınçlandırılarak membran hücrelerinden geçirilmiştir. Membran hücrendeki akım, konsantre ve süzüntü olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Konsantre akım geri devrettirilmiş süzüntü ise, ayrı bir beherle hassas terazide biriktirilmiştir. Akı hesaplamaları biriktirilen süzüntü ile yapılmıştır. Sistemin soğutma tertibatında, spiral şekilde sarılmış bakır boru kullanılmış ve atıksu tankına yerleştirilmiştir. Çeşme suyu, soğutma suyu olarak kullanılmış, tanktaki suyun sıcaklığı  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de tutulmuştur. Deneylerde kullanılan JX kodlu mikrofiltrasyon membranı Osmonics firmasından temin edilmiştir. Polivinilidenflorit malzemeden üretilen membran, 2-11 pH aralığına ve maksimum 3 bar basınca dayanabilmektedir. Membran yüzey alanı  $0,0155 \text{ m}^2$ 'dir.

Mikrofiltrasyon membranı ile zeytinyağı endüstrisi atıksularının filtrelendiği bu çalışmada,  $120 \text{ g/L}$  giriş KOİ konsantrasyonu için 3 farklı debi (100, 150 ve  $200 \text{ L/sa}$ ) ve 4 farklı mikrofiltrasyon süresinde (30, 60, 90 ve  $120 \text{ dak}$ ) deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Membran basıncı 1 bar'da sabit tutulmuştur.

### 2.3. Analitik Metodlar (Analytical Methods)

KOİ, AKM ve yağ-gres analizlerinde Standart Metotlar kullanılmıştır [28]. pH ölçümünde 890 MD pH-metre ve TOK analizi ise, DOHRMANN DC-190 markalı cihazı ile yapılmıştır.

### 2.4. Kinetik Model Uygulamaları (Kinetic Model Applications)

Bu çalışmada, mikrofiltrasyon sisteminden elde edilen deneysel veriler kullanılarak organik madde giderme kinetiklerinin belirlenmesinde Modifiye Stover-Kincannon modeli, İkinci Derece Kinetik modeli ve Birinci Derece Kinetik modeli uygulanmıştır. Mikrofiltrasyon sisteminin verimliliği, KOİ giderme verimine bağlı olarak değerlendirilmiştir.

#### 2.4.1. Modifiye stover-kincannon modeli (Modified stover-kincannon model)

Stover-Kincannon, organik yükleme hızını tasarım konsepti olarak önermiş ve dönen biyolojik kontaktör sistemleri için bir kinetik model oluşturmuştur [29]. Bu modelde, organik madde kullanım hızı, biyofilm reaktörleri için monomoleküler kinetiklere göre organik yükleme hızının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [30]. Bu kinetik model, biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), KOİ, TOK ya da

nitrifikasyon açısından karbonlu maddelerin giderimini tanımlamak için kullanılabilir. Stover-Kincannon model denklemi Eş. 1'de verilmiştir.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q(C_g - C_c)}{V} = \frac{U_{\max} \left( \frac{QC_g}{V} \right)}{K_B + \left( \frac{QC_g}{V} \right)} \quad (1)$$

Eş. 1, Eş. 2'deki gibi doğrusallaştırılarak basitleştirilir.

$$\frac{dt}{dC} = \frac{V}{Q(C_g - C_c)} = \frac{K_B}{U_{\max}} \frac{V}{QC_g} + \frac{1}{U_{\max}} \quad (2)$$

Burada;  $dC/dt$ , organik madde giderme hızı ( $\text{g/L.dak}$ );  $Q$ , akış hızı ( $\text{L/sa}$ );  $V$ , reaktör hacmi ( $\text{L}$ );  $C_g$  ve  $C_c$ , sırasıyla mikrofiltrasyona giriş ve çıkış organik madde konsantrasyonları ( $\text{g/L}$ );  $U_{\max}$ , yüzey hacmine bağlı maksimum organik madde giderme hızı sabiti ( $\text{g/L.dak}$ ) ve  $K_B$ , doygunluk değeri sabitidir ( $\text{g/L.dak}$ ). Modifiye Stover-Kincannon modelinde, reaktör hacminin organik madde giderme hızı hesabında KOİ giderimi ile reaktör hacmi arasındaki ilişkiyi temsil ettiği kabul edilmektedir. Bununla birlikte, Eş. 2'de  $V/Q$  hidrolik alıkonma süresini vermekte ve bu bağıntı kullanılarak eşitlik tekrar yazıldığında model reaktör hacminden bağımsız hale gelmektedir. Bu çalışmada ise, organik madde giderme hızı hesabında KOİ giderimi ile mikrofiltrasyon alanı arasındaki ilişkiyi temsil ettiği ve modelin MF sistemine uygulanabilmesi için hidrolik alıkonma süresinin mikrofiltrasyon süresine (MFS) eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Bu durumda, Eş. 2'ye MFS yerleştirildiğinde Eş. 3 elde edilir.

$$\frac{MFS}{(C_g - C_c)} = \frac{K_B}{U_{\max}} \frac{MFS}{C_g} + \frac{1}{U_{\max}} \quad (3)$$

Organik madde giderme hızının tersi olan  $MFS/(C_g - C_c)$ , organik yüklemenin hızının tersi olan  $MFS/C_g$ 'e karşı grafiği çizilirse oluşturulan doğrunun x eksenini kestiği nokta  $1/U_{\max}$  ve eğimi ise,  $K_B/U_{\max}$ 'ı verir.

#### 2.4.2. İkinci derece kinetik modeli (Second order kinetic model)

Biyolojik arıtma ile organik madde gideriminde sıklıkla kullanılan Grau İkinci Derece Kinetik modeli [31] Eş. 4'de verilmekte olan ikinci derece kimyasal reaksiyon kinetiğinin genel diferansiyel denklemden türetilmiştir.

$$-\frac{dC}{dt} = k_2(C) \left( \frac{C_c}{C_g} \right)^2 \quad (4)$$

Bu çalışmada Eş. 4, mikrofiltrasyon sistemi için herhangi bir değişiklik yapılmadan uygulanmıştır. Eşitlikte  $k_{2(C)}$ , ikinci derece organik madde giderme hız sabitidir (1/dak). Eş. 4 integrali alındıktan sonra lineer forma dönüştürüldüğünde ve organik madde konsantrasyonunun zamana göre değişiminde dikkate alınan hidrolik alıkonma süresi yerine MFS kabul edildiğinde Eş. 5 elde edilir.

$$\frac{C_g - C_c}{C_g - C_c} = MFS + \frac{C_g}{k_{2(C)}} \quad (5)$$

Burada;  $(C_g - C_c / C_g)$ , KOİ giderme verimidir (V) ve  $C_g / k_{2(C)}$ , sabit (a) kabul edilirse Eş. 5, Eş. 6 formunda yeniden yazılabilir.

$$\frac{MFS}{V} = a + b \cdot MFS \quad (6)$$

Burada;  $a = C_g / k_{2(C)}$  ve b birden büyük sabitlerdir ve bu sabitler  $MFS / V$ 'ye karşılık MFS grafiğinin çiziminden elde edilebilir. Eş. 6, Grau İkinci Derece Kinetik model ile aynı formdadır [32].

#### 2.4.3. Birinci derece kinetik modeli (First order kinetic model)

Birinci Derece Kinetik modelinde sistemdeki organik madde konsantrasyonunun değişim hızı Eş. 7 kullanılarak belirlenebilir [33].

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{Q}{V} C_g - \frac{Q}{V} C_e - k_1 C_e \quad (7)$$

Burada,  $k_1$  birinci derece organik madde giderme hız sabitidir (1/dak). Kararlı durumda,  $-dC/dt$  ihmal edilebilir ve MF sistemi için hidrolik alıkonma süresi olarak MFS kabul edildiğinde Eş. 7, Eş. 8'e indirgenebilir.

$$\frac{C_g - C_c}{MFS} = k_1 C_c \quad (8)$$

$k_1$  değeri,  $(C_g - C_c / MFS)$ 'ye karşılık  $C_c$  grafiğinin çiziminden elde edilebilir.

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

#### 3.1. Arıtılabilirlik Çalışması Sonuçları (Treatability Study Results)

Bu çalışma kapsamında, zeytinyağı üretimi sonrasında oluşan atıksu mikrofiltrasyon membranından 100-200 L/sa debi aralığında ve 30-120 dak aralığındaki MFS'lerinde geçirilmiştir. Deneysel çalışmalar süresince basınç 1 bar değerinde sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, aynı MFS için, debi arttıkça süzüntü akışının da arttığı görülmüştür. Debideki artışla birlikte yüzeysel çapraz akım hızı ve dolayısıyla türbülans artmakta, buna bağlı olarak süzüntü akışında da artış olmaktadır. Aynı debi değeri için ise MFS süresi arttıkça KOİ giderme veriminin de arttığı belirlenmiştir. 100 L/sa debide yapılan çalışmalara bakıldığında, MFS 30 dakika için verim %46,9 değerinden, 120 dakikaya çıkarıldığında %48,6 değerine yükselmiştir. Ancak, debideki artış arıtma verimini olumsuz yönde etkilemiştir. 100

L/sa debide 120 dak MFS'nde %48,6 KOİ giderme verimi elde edilirken aynı sürede ve 200 L/sa debide verim %47,6'ya düşmüştür. Bu durumda, debinin ve dolayısıyla yatay akım hızının artışıyla membran yüzeyinde türbülans artmakta, membranda biriken maddeler süzüntüye taşınmaktadır. Sonuç olarak, membran yüzeyindeki kirlilik azalırken akı ve süzüntüde KOİ konsantrasyonları artmakta, buna bağlı olarak da KOİ giderme verimi azalmaktadır [34]. Çalışma kapsamında ulaşılabilen en düşük KOİ konsantrasyonu 62,9 g/L ve en yüksek KOİ giderme verimi %47,6'dır. Bu durum mikrofiltrasyon prosesi ile zeytinyağı üretimi atıksuyunun ön arıtımının yapılabilirliğini göstermektedir. Mikrofiltrasyonu takiben ultrafiltrasyon ve/veya nanofiltrasyon proseslerinin kullanımıyla çok daha yüksek giderme verimlerine ulaşılabilir. Zeytinyağı üretimi atıksuyunun mikrofiltrasyon sistemi ile arıtılabilirliğinin değerlendirildiği bir çalışmada, 3,5 bar membran basıncı, 10 m/s akış hızı ve 20 sa filtrasyon süresinde atıksuyun üretildiği zamanda gerçekleştirilen çalışma sonucunda %80 ve 3 ay beklendikten sonra gerçekleştirilen çalışmada ise %60 KOİ giderme verimleri elde edilmiştir. KOİ verimindeki düşüş depolanana kıyasla taze atıksuyun daha düşük olan viskozite değerine bağlanmıştır [35]. Zeytinyağı atıksuyunun seri modda nominal gözenek boyutu 50, 5 ve 0,2 µm olan üç aşamalı MF membranları ile 0,2 bar basınçta 28°C'de gerçekleştirilen filtrasyon çalışmasında ise %67 KOİ, %99 AKM ve %94 yağ-gres giderme verimleri elde edilmiştir [36].

#### 3.2. Modifiye Stover-Kincannon Modelinin Kinetik Analizi (Kinetic Analysis of the Modified Stover-Kincannon Model)

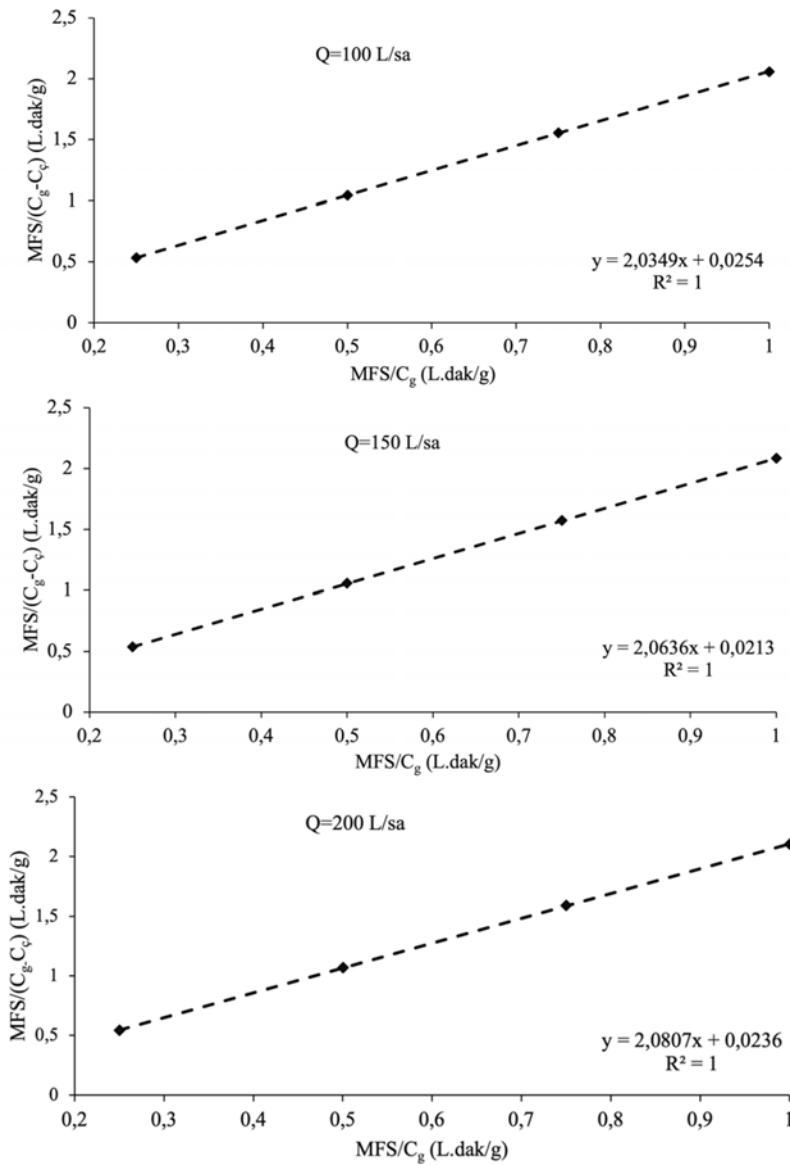
Mikrofiltrasyon membranıyla yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler (Tablo 2) kullanılarak, Modifiye Stover-Kincannon modeli uygulanmıştır. Kararlı durumda, organik madde giderme hızının organik madde yükleme hızının bir fonksiyonu olduğu kabul edilerek çizilen deneysel verilerin grafikleri Şekil 2'de verilmiştir. Maksimum organik madde giderme hız sabiti ( $U_{maks}$ ) ve doygunluk değeri sabiti ( $K_B$ ) Eş. 3 kullanılarak 100, 150 ve 200 L/sa giriş debileri için sırasıyla 39,370 - 46,948 g/L.dak ve 80,114 - 96,883 g/L.dak aralığında bulunmuştur. Yüksek korelasyonlarda ( $R^2=1$ ) elde edilen bu kinetik parametreler Tablo 3'de verilmiştir. Korelasyon katsayıları ( $R^2=1$ ), doğrusalştırılmış Modifiye Stover-Kincannon modelinin geçerliliğini güçlü bir şekilde desteklemektedir. Modifiye Stover-Kincannon modelinin mikrofiltrasyon sistemlerinde zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun arıtma performansını tanımlamak için kullanılabilirliği sonucuna varılabilir. Düşük  $K_B$  değerleri, atıksuyun ilgili sistemde arıtma potansiyelinin düşük olduğunu göstermektedir [30, 37]. Bu çalışmada belirlenen  $K_B$  değerleri ise, zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun mikrofiltrasyon sistemleriyle arıtma potansiyelinin ortalama değerlerde olduğunu göstermektedir.  $U_{maks}$  ve  $K_B$ 'nin birbirine yakın değerlerde olması, organik yükleme hızı arttıkça proses verimliliğinin azalacağını göstermektedir [30, 38]. Bu çalışmada ise, mikrofiltrasyon sistemleri için  $U_{maks}$  ve  $K_B$  değerleri birbirine yakın değerlerde olmamasına rağmen, giriş debisi 100 L/sa'den 200 L/sa değerine çıkarıldığında KOİ giderme verimi artmıştır. Modifiye Stover-Kincannon model sonuçları MF sistemlerinde KOİ giderme veriminin, giriş debilerinden etkilendiğini göstermiştir.

**Tablo 2.** Mikrofiltrasyon sonrasında süzüntü akıları, KOİ konsantrasyonları ve KOİ giderme verimleri (Permeate fluxes, COD concentrations and COD removal efficiencies after microfiltration)

MFS (dk)	Debi (L/sa)			Çıkış KOİ konsantrasyonları (g/L)			KOİ giderme verimleri (%)		
	100	150	200	100	150	200	100	150	200
30	4,90	6,96	8,35	63,7	64,0	64,6	46,9	46,7	46,2
60	4,48	6,27	7,52	62,5	63,1	63,7	47,9	47,4	46,9
90	4,15	5,81	6,97	62,1	62,7	63,3	48,3	47,8	47,3
120	3,85	5,39	6,47	61,7	62,4	62,9	48,6	48,0	47,6

**Tablo 3.**  $U_{maks}$  ve  $K_B$  sabitlerini belirlenmesinde kullanılan veriler ve değerleri  
(The data and values used to determine the  $U_{maks}$  and  $K_B$  constants)

Q (L/sa)	MFS (dak)	$C_g$ (g/L)	$C_ç$ (g/L)	$C_g - C_ç$ (g/L)	MFS/( $C_g - C_ç$ ) (L.dak/g)	MFS/ $C_g$ (L.dak/g)	$U_{maks}$ (g/L.dak)	$K_B$ (g/L.dak)
100	30	120	63,7	56,3	0,53	0,25	39,370	80,114
	60	120	62,5	57,5	1,04	0,50		
	90	120	62,1	57,9	1,55	0,75		
	120	120	61,7	58,3	2,06	1,00		
150	30	120	64	56	0,54	0,25	46,948	96,883
	60	120	63,1	56,9	1,05	0,5		
	90	120	62,7	57,3	1,57	0,75		
	120	120	62,4	57,6	2,08	1		
200	30	120	64,6	55,4	0,54	0,25	42,373	88,165
	60	120	63,7	56,3	1,07	0,5		
	90	120	63,3	56,7	1,59	0,75		
	120	120	62,9	57,1	2,10	1		

**Şekil 2.** Modifiye Stover-Kincannon modeli kullanılarak  $U_{maks}$  ve  $K_B$  kinetik sabitlerinin belirlenmesi  
(Determination of  $U_{maks}$  and  $K_B$  kinetic constants using the modified Stover-Kincannon model)

Eş. 3 yeniden düzenlendiğinde, deneysel verilerden hesaplanan  $U_{maks}$  ve  $K_B$  değerleri yerine yazılarak çıkış KOİ konsantrasyonu ( $C_c$ ) Eş. 9 kullanılarak tahmin edilebilir.

$$C_c = C_g \left( 1 - \frac{U_{maks}}{K_B + (C_g/MFS)} \right) \quad (9)$$

Tablo 4'de, farklı reaktör tipleri ve atıksu türlerine bağlı olarak literatürde verilen Modifiye Stover-Kincannon modeli kinetik sabitleri özetlenmiştir. Araştırmacılar çeşitli organik madde içeren atıksu ve reaktör kullanarak farklı model sabitlerine ulaşmışlardır.

YAF- Yukarı akışlı anaerobik filtre; YAFSY-Yukarı akışlı anaerobik sabit yatak filtre; AKR- Anaerobik kontak reaktör; ADBR- Anaerobik döner biyolojik kontaktör; YAÇY- Yukarı akışlı çamur yatak; BSFR- Batık sabit film reaktör; SKR-Sıralı kesikli reaktör; APR- Anaerobik perdeli reaktör.

Bu çalışmada bulunan  $U_{maks}$  ve  $K_B$  değerleri, Rajagopal vd.'nin [39] bulduğu değerlerle hemen hemen karşılaştırılabilir iken, Nor Faekah vd. [30], Sentürk vd. [37], Ebrahimi vd. [40], Jijai vd. [41], Kordkandi vd. [32] Mekonnen vd. [42] ve Sumantri vd. [33] tarafından elde edilen değerlerden daha yüksektir.  $U_{maks}$  ve  $K_B$  değerlerinin literatürde farklılık göstermesi, reaktör konfigürasyonunun, atıksu karakteristiklerinin ve çalışmalarda kullanılan aşı çamuru çeşitliliğinin bir sonucu olabilir [43].

### 3.3. İkinci Derece Kinetik Model Analizi (Analysis of the Second Order Kinetic Model)

İkinci Derece Kinetik model uygulamasında MFS/V'ye karşı MFS grafiği çizilmiş ve bu grafikler 100,150 ve 200 L/sa giriş debileri için Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'de eğilim çizgisinin y eksenini kestiği

nokta ve eğim değerleri model kinetik sabitleri olan ve Eş. 7'de verilen b ve a'yı temsil etmektedir. Model b ve a değerleri yüksek korelasyon katsayıları ile ( $R^2=1$  olarak) sırasıyla 2,0349-2,0807 ve 2,5546-3,0527 aralığında hesaplanmıştır.  $a=C_g/k_{2(C)}$  eşitliğinden hesaplanan ikinci derece KOİ giderme hız sabiti olan  $k_{2(C)}$  değerleri ise, 39,3095-46,9741 1/dak aralığındadır (Tablo 5).

Deneysel verilerin modele uygulanmasında elde edilen yüksek korelasyon katsayıları ( $R^2=1$ ), zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun mikrofiltrasyon sistemleri kullanılarak arıtılması için bu modelin uygulanmasının geçerliliğini doğrulamaktadır. Bu nedenle, İkinci Derece Kinetik model denklemi (Eş. 6) yeniden düzenlenerek yazıldığına (Eş. 10),  $C_g$  ve MFS değerlerine bağlı olarak çıkış KOİ konsantrasyonunun tahmin edilmesinde kullanılabilir.

$$C_c = C_g \left( 1 - \frac{MFS}{0,052+0,0202MFS} \right) \quad (10)$$

Tablo 6'da, farklı reaktör tipleri ve atıksu türlerine bağlı olarak literatürde verilen İkinci Derece Kinetik model sabitleri özetlenmiştir.

Tablo 6'dan görülebileceği gibi, bu çalışmadaki İkinci Derece Model kullanılarak elde edilen kinetik sabitler diğer kinetik çalışmalara göre farklı bulunmuştur. Rajagopal vd. [39] ve Raja Priya vd.'nin [43] değerlendirmesine katılarak giriş konsantrasyonundan bağımsız olarak, KOİ giderme verimlerinin esas olarak organik maddenin yapısına ve reaktör konfigürasyonuna bağlı olduğu sonucuna varmıştır. Mikrofiltrasyon sistemleri için gerçekleştirilen bu çalışmada ise, ilave olarak sistemin işletim parametrelerinden biri olan debinin verim üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Mikrofiltrasyon sistemleri için basınç, sıcaklık gibi diğer işletim parametrelerinin giderme veriminin üzerine etkisini belirlemek için çalışmalara ihtiyaç vardır.

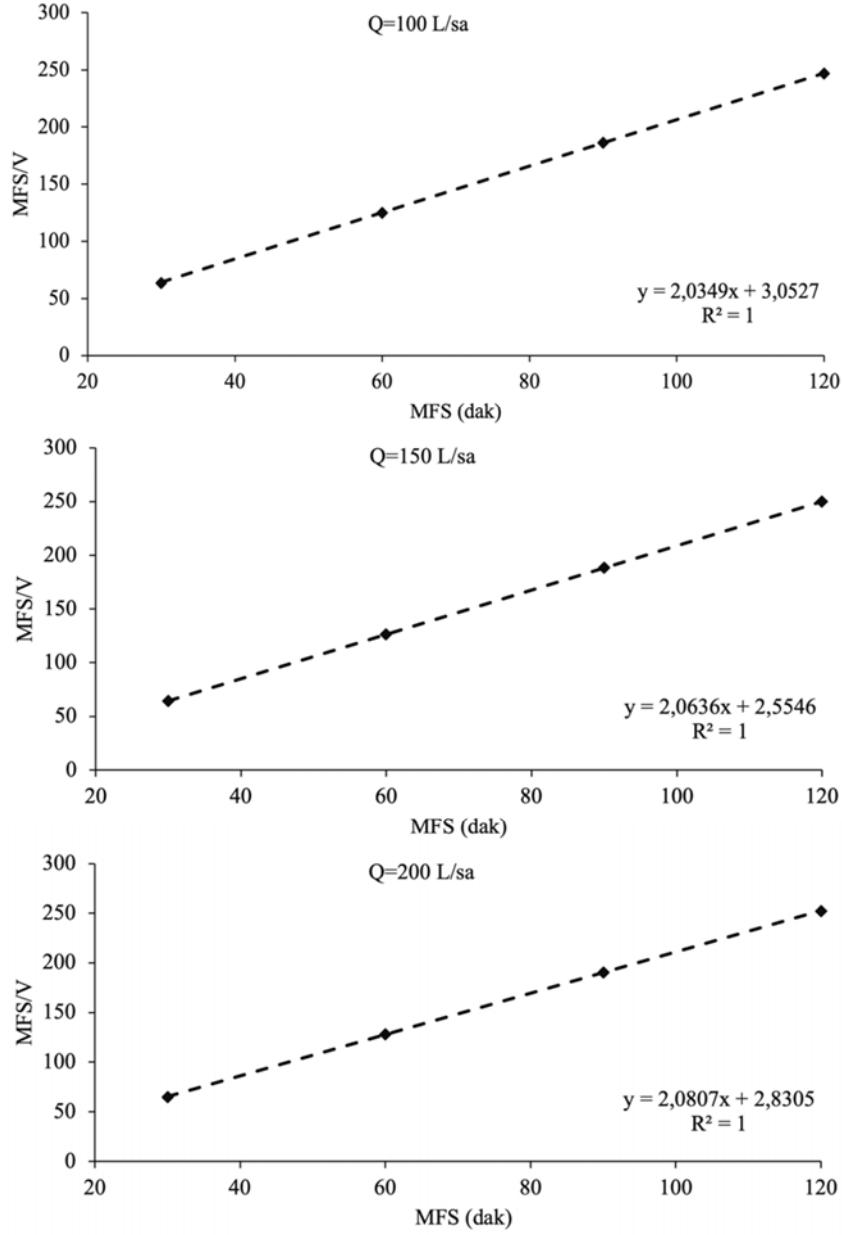
**Tablo 4.** Literatürden alınılan Modifiye Stover-Kincannon modeli kinetik sabitlerinin özeti  
(Summary of Modified Stover-Kincannon model kinetic constants from the literature)

Reaktör Tipi	Atıksu	Giriş KOİ konsan. (g/L)	Hidrolik Alıkonma Süresi (gün)	$U_{maks}$ g/L.gün	$K_B$ g/L.gün	Kaynak
YAF	Peynir sütü	23-40	1,6	53,5	49,7	[39]
YAFSY	Sentetik Kauçuk	6,4	5-17	6,57	6,31	[30]
AKR	Patates işleme	5,2-5,7	1,1-5,1	22,93	23,59	[37]
ADBR	Sentetik	10	3	7,77	8,57	[40]
YAÇY	Deniz ürünleri	4,2	0,25-5	15,34	15,47	[41]
BSFR	Sentetik	0,2-1,2	0,08-0,79	6,42	7,35	[32]
SKR	Tabakhane	4,2-4,5	3,5	5,56	5,78	[42]
APR	Ketçap	2,73-12,1	1-12	-24	5000	[33]

YAF- Yukarı akışlı anaerobik filtre; YAFSY-Yukarı akışlı anaerobik sabit yatak filtre; AKR- Anaerobik kontak reaktör; ADBR- Anaerobik döner biyolojik kontaktör; YAÇY- Yukarı akışlı çamur yatak; BSFR- Batık sabit film reaktör; SKR-Sıralı kesikli reaktör; APR- Anaerobik perdeli reaktör.

**Tablo 5.** İkinci Derece Kinetik model verileri (Second Order Kinetic model data)

Q (L/sa)	MFS (dak)	V (%)	MFS/V	$k_{2(C)}$ (1/dak)	a	b
100	30	46,9	64	39,3095	3,0527	2,0349
	60	47,9	125			
	90	48,3	187			
	120	48,6	247			
150	30	46,7	64	46,9741	2,5546	2,0636
	60	47,4	127			
	90	47,8	188			
	120	48,0	250			
200	30	46,2	65	42,3953	2,8305	2,0807
	60	46,9	128			
	90	47,3	190			
	120	47,6	252			



**Şekil 3.** İkinci Derece Kinetik modeli kullanılarak b ve a sabitlerinin belirlenmesi  
(Determination of b and a constants using the Second Order Kinetic model)

**Tablo 6.** Literatürden alıntılanan İkinci Derece Kinetik sabitlerin özeti  
(Summary of the Second Order Kinetic constants from the literature)

Reaktör Tipi	Atıksu	Giriş KOİ konsan. (g/L)	Hidrolik alıkonma süresi (gün)	$k_{2(C)}$ l/gün	a	b	Kaynak
YAF	Peynir sütü	23-40	1,6	1,93	0,56	0,92	[39]
YAFSY	Sentetik Kauçuk	6,4	5-17	105	0,918	0,962	[30]
ADBR	Sentetik	10	3		1,23	1,01	[40]
YAÇY	Deniz ürünleri	4,2	0,25-5	1,3	0,27	1,009	[41]
BSFR	Sentetik	0,2-1,2	0,08-0,79	10,2	0,03	1,03	[32]
SKR	Sentetik Tuzlu	3	1	89,67-99,25	0,017-0,020	1,007-1,001	[44]
SKR	Tabakhane	4,2-4,5	3,5	-	0,87	1,019	[42]
APR	Ketçap	2,73-12,1	1-12	0,6060	2,3675	0,9204	[33]



### 3.4. Birinci Derece Kinetik Model Analizi (Analysis of the First Order Kinetic Model)

Mikrofiltrasyon sistemi deneysel verilerinin Birinci Derece Kinetik modele uygulamasında, 120 g/L KOİ giriş konsantrasyonu için üç farklı debide (100, 150 ve 200 L/sa) ve 1 bar basınçta  $C_g$ - $C_ç$ /MFS'ye karşılık  $C_ç$  grafikleri Şekil 4'de verilmiştir. Birinci derece kinetik sabitleri,  $k_1$  grafiklerdeki doğruların eğimlerini temsil etmektedir. Bu değer 100, 150 ve 200 L/sa debilerde sırasıyla 0,7170, 0,8868 ve 0,5286 1/dak olarak hesaplanmıştır. Model  $R^2$  değerleri ise, 0,9913-0,9742 aralığındadır ve bu da zeytinyağı endüstrisi atıksuyunun mikrofiltrasyon sistemleriyle arıtılmasında Birinci Derece Kinetik modelin uygulanabilirliğini göstermektedir.

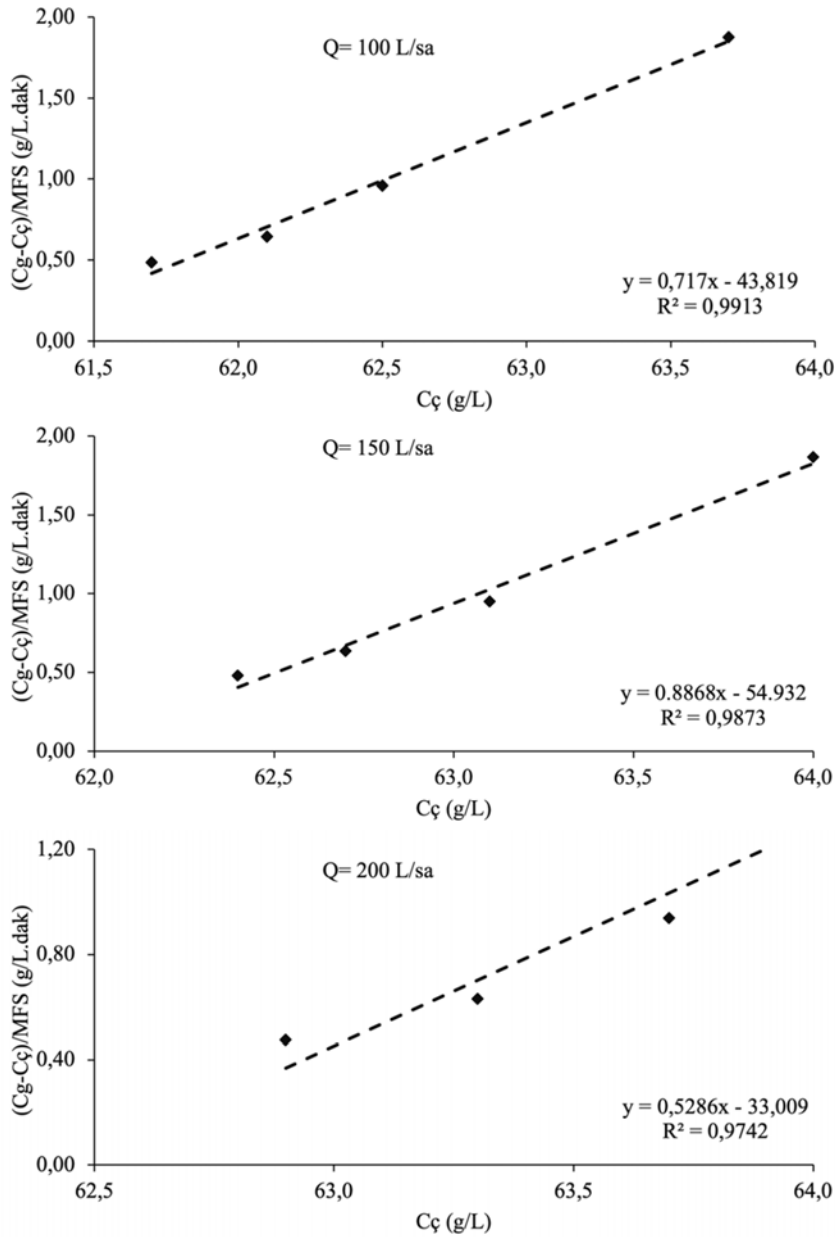
Eş. 8 yeniden düzenlenerek ve hesaplanan  $k_1$  değeri yerine yazılarak MF sisteminden çıkış KOİ konsantrasyonları Eş. 11 kullanılarak tahmin edilebilir.

$$C_ç = \left( \frac{C_g}{1+k_1 MFS} \right) \quad (11)$$

Tablo 7'de, farklı reaktör tipleri ve atıksu türlerine bağlı olarak literatürde verilen Birinci Derece Kinetik model sabitleri özetlenmiştir.

BSFR- Batık sabit film reaktör; SKR-Sıralı kesikli reaktör.

Bu çalışmada elde edilen  $k_1$  değerleri Amin vd.'nin [44] sonuçlarıyla karşılaştırılabilir mertebelere sahiptir. Kordkandi vd. [32], Mekonnen vd. [42] ve Sumantri vd.'nin [33] sonuçlarından ise daha yüksektir. Benzer şekilde, bu model için de reaktör konfigürasyonu ve atıksu karakterizasyonunun model sabiti olan  $k_1$  üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. İlave olarak mikrofiltrasyon sistemleri için diğer işletim parametrelerinin etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalara da ihtiyaç vardır.



Şekil 4. Birinci Derece Kinetik modelin uygulanması (Application of the First Order Kinetic model)

**Tablo 7.** Literatürden alıntılanan Birinci Derece Kinetik model sabitlerinin özeti  
(Summary of the First Order Kinetic constants from the literature)

Reaktör Tipi	Atıksu	Giriş KOİ konsan. (g/L)	Hidrolik alıkonma süresi (gün)	k <sub>1</sub> (1/gün)	Kaynak
BSFR	Sentetik	0,2-1,2	0,08-0,79	8,08	[32]
SKR	Sentetik Tuzlu	3	1	62,39-59,59	[44]
SKR	Tabakhane	4,2-4,5	3,5	0,99	[42]
APR	Ketçap	2,73-12,1	1-12	0,6632	[33]

BSFR- Batık sabit film reaktör; SKR-Sıralı kesikli reaktör.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, zeytinyağı endüstrisi atıksuyunu arıtan mikrofiltrasyon sisteminin organik madde kinetiği, Modifiye Stover-Kincanon modeli, İkinci Derece Kinetik modeli ve Birinci Derece Kinetik modeli kullanılarak araştırılmıştır. Bu analizin sonuçları, Modifiye Stover-Kincanon ve İkinci Derece Kinetik modellerinin mikrofiltrasyonda kinetik katsayıların tahminleri için kullanılabileceğini göstermiştir. Birinci Derece Kinetik modelinin ise, deneysel veri seti ile yüksek derecede uyum sağlamasına rağmen diğer iki modele göre kinetik davranışı daha düşük korelasyonla tanımlayabildiği belirlenmiştir. Bu nedenle, uygulanan modeller, gerek laboratuvar ve gerekse endüstriyel ölçekte mikrofiltrasyon sistemlerinin performansının tasarımı ve tahmin edilmesi için önerilmektedir. Gelecekteki araştırmalarda kinetik parametreler üzerinde, farklı atıksu tipleri, membran konfigürasyonları ve işletim parametrelerinin etkilerinin belirlenmesi için çalışmaların gerçekleştirilmesine ihtiyaç vardır.

#### Kaynaklar (References)

- Çelikten C., Mavuş R., Kemeç S., Ünlü Ü., Ergün A., Deligöz H., Membrane technologies in the food and beverage industry, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 37 (3), 1713-1733, 2022.
- Baker R. W., Membrane Technology and Applications, John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 2004.
- Díaz-Montes E., Castro-Muñoz R., Metabolites recovery from fermentation broths via pressure-driven membrane processes, Asia-Pacific J. Chem. Eng., 10.1002/apj.2332, 2019.
- Lecce G. D., Cassano A., Bendini A., Conidi C., Giorno L., Toschi T. G., Characterization of olive mill wastewater fractions treatment by integrated membrane process, Journal of the Science of Food and Agriculture, 94, 2935–2942, 2014.
- Pulido M. O., Ferez A. M., On the recent use of membrane technology for olive mill wastewater purification, Membranes, 5 (4), 513-531, 2015.
- Akdemir E. O., Aygan E., Pretreatment of olive mill wastewater by ultrafiltration process using chitosan, Desalination and Water Treatment, 142, 49-55, 2019.
- Hamed H., Mohammadzadeh O., Rasouli S., Zendejboudi S., A critical review of biomass kinetics and membrane filtration models for membrane bioreactor systems, Journal of Environmental Chemical Engineering, 106406, 2021.
- Naessens W., Maere T., Nopens I., Critical review of membrane bioreactor models – Part 1: Biokinetic and filtration models, Bioresource Technology, 122, 95-106, 2012.
- You X., Zhang J., Shen L., Li R., Xu Y., Zhang M., Hong H., Yang L., Ma Y., Lin H., Thermodynamic mechanisms of membrane fouling during filtration of alginate solution in coagulation-ultrafiltration (UF) process in presence of different ionic strength and iron(III) ion concentration, Journal of Membrane Science, 635, 119532, 2021.
- Long Y., Yu G., Dong L., Xu Y., Lin H., Deng Y., You X., Yang L., Liao B.-Q., Synergistic fouling behaviors and mechanisms of calcium ions and polyaluminum chloride associated with alginate solution in coagulation-ultrafiltration (UF) process, Water Research, 189, 116665, 2021.
- Wu M., Chen Y., Lin H., Zhao L., Shen L., Li R., Xu Y., Hong H., He Y., Membrane fouling caused by biological foams in a submerged membrane bioreactor: Mechanism insights, Water Research, 181, 115932, 2020.
- Teng J., Zhang M., Leung K. T., Chen J., Hong H., Lin H., Liao B. Q., A unified thermodynamic mechanism underlying fouling behaviors of soluble microbial products (SMPs) in a membrane bioreactor, Water Research, 149, 477-487, 2019.
- Huang Z., Liu J., Liu Y., Xu Y., Li R., Hong H., Shen L., Lin H., Liao B.-Q., Enhanced permeability and antifouling performance of polyether sulfone (PES) membrane via elevating magnetic Ni@MXene nanoparticles to upper layer in phase inversion process, Journal of Membrane Science, 623, 119080, 2021.
- Janus T., In Modelling and Simulation of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, (Doktora tezi), De Montfort University, Leicester, United Kingdom, 2013.
- Sablani S., Goosen M., Al-Belushi R., Wilf M., Concentration Polarization in Ultrafiltration and Reverse Osmosis: A Critical Review. Desalination, 141, 269-289, 2001.
- Panigrahi C., Karmakar S., Mondal M., Mishra H. N., De S., Modeling of permeate flux decline and permeation of sucrose during microfiltration of sugarcane juice using a hollow-fiber membrane module, Innovative Food Science & Emerging Technologies, 49, 92-105, 2018.
- Wang Z., Gao Z., A new flux prediction model for laminar and turbulent flow regimes in constant pressure cross-flow microfiltration, Journal of Environmental Chemical Engineering, 9 (5), 106156, 2021.
- Zhang B., Tang H., Shen Y., Zhang B., Liu G., Shi W., Comparative analysis of membrane fouling mechanisms induced by colloidal polymer: Effects of sodium and calcium ions, Journal of Colloid and Interface Science, 608, 780–791, 2022.
- García-Castello E., Cassano A., Criscuolo A., Conidi C., Drioli E., Recovery and concentration of polyphenols from olive mill wastewaters by integrated membrane system, Water Research, 44 (13), 3883-3892, 2010.
- Akdemir E. O., Özer A., Investigation of two ultrafiltration membranes for treatment of olive oil mill wastewater, Desalination, 249 (2), 660-666, 2009.
- Sánchez-Arévalo C.M., Jimeno-Jiménez Á., Carbonell-Alcaina C., Vincent-Vela M.C., Álvarez-Blanco S., Effect of the operating conditions on a nanofiltration process to separate low-molecular-weight phenolic compounds from the sugars present in olive mill wastewaters, Process. Saf. Environ. Prot., 148, 428-436, 2021.
- Cifuentes-Cabezasa M., Carbonell-Alcaina C., Vincent-Vela M. C., Mendoza-Roca J. A., Álvarez-Blanco S., Comparison of different ultrafiltration membranes as first step for the recovery of phenolic compounds from olive-oil washing wastewater, Process Safety and Environmental Protection, 149, 724-734, 2021.
- Turano E., Curcio S., De Paola M. G., Calabrò V., Iorio G., An integrated centrifugation-ultrafiltration system in the treatment of olive mill wastewater, Journal of Membrane Science, 209, 519–531, 2002.
- Bazzarelli F., Piacentini E., Paoletti T., Mazzei R., Cassano A., Giorno L., Advances in membrane operations for water purification and biophenols recovery/valorization from OMWWs, Journal of Membrane Science, 497 (1), 402-409, 2016.
- Malvis A., Hodaifa G., Halioui M., Seyedsalehi M., Sánchez S., Integrated process for olive oil mill wastewater treatment and its revalorization through the generation of high added value algal biomass, Water Research, 151 (15), 332-342, 2019.
- Hodaifa G., Malvis A., Maaitah M., Sánchez S., Combination of physicochemical operations and algal culture as a new bioprocess for olive mill wastewater treatment, Biomass and Bioenergy, 138, 105603, 1-10, 2020.

27. Subramani A., Jacangelo J.G., Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review, *Separation and Purification Technology*, 122, 472-489, 2014.
28. Baird R.B., Eaton A.D., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association, A.B.D., 2017.
29. Stover E. L., Kincannon D. F., Rotating biological contactor scale-up and design, 1st International Conference on Fixed Film Biological Processes, Kings Island, Ohio, 1982.
30. Nor Faekah I., Fatihah S., Mohamed Z.S., Kinetic evaluation of a partially packed upflow anaerobic fixed film reactor treating low-strength synthetic rubber wastewater, *Heliyon*, 2020 Mar 31, 6 (3), e03594, 2020.
31. Grau P., Dohányos M., Chudoba J., Kinetics of multicomponent substrate removal by activated sludge, *Water Research*, 9 (7), 637-642, 1975.
32. Kordkandi S., Khoshfetrat B. A., Faramarzi A., Performance modelling of a partially-aerated submerged fixed-film bioreactor: Mechanistic analysis versus semi data-driven method, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 61, 398-406, 2017.
33. Sumantri I., Budiyo B., Purwanto P., Kinetic study of anaerobic digestion of ketchup industry wastewater in a three-stages anaerobic baffled reactor (ABR), *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14 (2), 326-335, 2019.
34. Benitez F.J., Acero J. L., Leal A.I., Application of microfiltration and ultrafiltration processes o cork processing wastewaters and assessment of the membrane fouling, *Sep. Purif. Technol.*, 50, 354–364, 2006.
35. Petrotos K. B., Lellis T., Kokkora M. I., Gkoutos P. E., Purification of olive mill wastewater using microfiltration membrane technology, *Journal of Membrane and Separation Technology*, 3, 50-55, 2014.
36. Zirehpour A., Jahanshahi M., Rahimpour A., Unique membrane process integration for olive oil mill wastewater purification, *Separation and Purification Technology*, 96, 124–131, 2012.
37. Şentürk E., Ince M., Engin G. O., Kinetic evaluation and performance of a mesophilic anaerobic contact reactor treating medium-strength food processing wastewater, *Bioresource Technology*, 101 (11), 3970-3977, 2010.
38. Ahn J. H., Foster C.F., Kinetic analyses of the operation of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated starch wastewater, *Process Biochem.*, 36, 19–23, 2000.
39. Rajagopal R., Torrijos M., Kumar P., Mehrotra, I., Substrate removal kinetics in high-rate upflow anaerobic filters packed with low-density polyethylene media treating high-strength agro-food wastewaters, *Journal of Environmental Management*, 116 (15), 101-106, 2013.
40. Ebrahimi M., Kazemi H., Mirbagheri S. A., Rockaway, T. D., Integrated approach to treatment of high-strength organic wastewater by using anaerobic rotating biological contactor, *J. Environ. Eng.*, 144 (2), 04017102(1-10), 2018.
41. Jijia S., Siripatanab C., O-Thong S., Ismail N., Kinetic models for prediction of COD effluent from upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor for cannery seafood wastewater treatment, *Jurnal Teknologi*, 78 (5–6), 93–99, 2016.
42. Mekonnen A., Leta L., Njau K. N., Kinetic analysis of anaerobic sequencing batch reactor for the treatment of tannery wastewater, *African Journal of Environmental Science and Technology*, 11 (6), 339-348, 2017.
43. Raja Priya K., Sandhya S., Swaminathan K., Kinetic analysis of treatment of formaldehyde containing wastewater in UAFB reactor, *Chem. Eng. J.* 148, 212–216, 2009.
44. Amin M. M., Khiadani M. H., Fatehizadeh A., Taheri E., Validation of linear and non-linear kinetic modeling of saline wastewater treatment by sequencing batch reactor with adapted and non-adapted consortiums, *Desalination*, 344, 228–235, 2014.

