

**ÇİLEK SUYUNDAN FENOLİKLERİN VE ANTOSİYANİNLERİN
ULTRAFİLTRASYON İLE KONSANTRASYONU:
HACİM AZALTMA FAKTÖRÜ VE MEMBRAN AYIRMA SINIRININ ETKİSİ**

Aslı ARSLAN KULCAN*

Akdeniz Üniversitesi, Finike Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Antalya, Türkiye

Geliş / Received 31.07.2025; Kabul / Accepted: 03.11.2025; Online baskı / Published online: 13.11.2025

Arslan Kulcan, A. (2025). Çilek suyundan fenoliklerin ve antosiyaninlerin ultrafiltrasyon ile konsantrasyonu: Hacim azaltma faktörü ve membran ayırma sınırının etkisi. GIDA (2025) 50 (6) 1105-1119 doi: 10.15237/ gida.GD25100

Arslan Kulcan, A. (2025). Concentration of phenolics and anthocyanins from strawberry juice by ultrafiltration: Influence of volume reduction factor and membrane cut-off rate. GIDA (2025) 50 (6) 1105-1119 doi: 10.15237/ gida.GD25100

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, çilek suyundaki fenolik bileşiklerin ve antosiyaninlerin ayrılması ve zenginleştirilmesinde ultrafiltrasyon prosesinin kullanım olanaklarını incelemektir. Bu amaçla 2 kDa ve 5 kDa ayırma sınırına sahip filtreler kullanılmıştır. Ultrafiltrasyon işleminde hacim azaltma faktörünün (VRF) artışıyla permeat akıları azalırken, fenolik bileşenlerin ve antosiyaninlerin konsantrasyon faktörü ve rejeksiyonu artmıştır. Çilek suyunun biyoaktif bileşenler açısından zenginleştirilmesinde 2 kDa ayırma sınırına sahip filtre daha etkili bulunmuştur. 2 kDa' luk filtrede VRF değeri 10' a ulaştığında suda çözünen kuru maddenin, fenoliklerin ve antosiyaninlerin konsantrasyon faktörü sırasıyla 1.26, 3.10 ve 5.08 olmuştur. Membran rejeksiyon oranları ise sırasıyla %11.88, %78.55 ve %95.26 olarak hesaplanmıştır. Çilek suyundan fenoliklerin ve antosiyaninlerin retentat fraksiyonunda seçici olarak ayrıldığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ultrafiltrasyon, çilek suyu, antosiyanin, fenolik bileşik

**CONCENTRATION OF PHENOLICS AND ANTHOCYANINS FROM
STRAWBERRY JUICE BY ULTRAFILTRATION: INFLUENCE OF VOLUME
REDUCTION FACTOR AND MEMBRANE CUT-OFF RATE**

ABSTRACT

The objective of the present study was to examine the potential of employing ultrafiltration as a method for the separation and enrichment of phenolic compounds and anthocyanins in strawberry juice. For this purpose, filters with cut-off rates of 2 kDa and 5 kDa were utilised. In the ultrafiltration process, as the volume reduction factor (VRF) increased, permeate flows decreased, while the concentration factor and rejection of phenolic compounds and anthocyanins increased. The filter with a cut-off rate of 2 kDa was found to be more effective in enriching strawberry juice with bioactive components. As the VRF value attained 10 in the 2 kDa filter, the concentration factors for soluble solids, phenolics and anthocyanins were 1.26, 3.10 and 5.08, respectively. Membrane rejection rates were calculated as 11.88%, 78.55% and 95.26%, respectively. It has been determined that phenolics and anthocyanins are selectively separated in the retentate fraction from strawberry juice.

Keywords: Ultrafiltration, strawberry juice, anthocyanin, phenolic compound

* Sorumlu yazar/Corresponding author:

✉: asliarslan@akdeniz.edu.tr

☎: (+90) 242 855 36 69

Aslı Arslan Kulcan; ORCID no: 0000-0002-1934-5530

GİRİŞ

Son yıllarda sağlıklı yaşam tarzına yönelik artan farkındalık, bireylerin fonksiyonel özelliklere sahip, sağlıklı ilişkilendirilen gıdalara olan ilgisini önemli ölçüde artırmıştır. Fonksiyonel gıdalar, temel besin içeriğinin ötesinde fizyolojik fayda sağlayan bileşenler içeren ürünler olarak tanımlanmakta ve bu özellikleriyle gıda endüstrisinde hızla büyüyen bir pazar segmenti oluşturmaktadır (Granato vd., 2020). Özellikle meyve ve sebzeler, vitaminler, mineraller ve diyet liflerinin yanı sıra polifenoller ve antosiyaninler gibi biyoaktif bileşikler açısından zengin içerikleriyle ön plana çıkmaktadır (Kaur ve Kapoor, 2001; Del Rio vd., 2013).

Epidemiyolojik çalışmalar, meyve ve sebze tüketiminin kanser, kardiyovasküler hastalıklar, diyabet ve yaşa bağlı dejeneratif hastalıkların önlenmesinde koruyucu bir rol oynayabileceğini ortaya koymuştur (Liu, 2013). Bu bağlamda, meyve suları gibi işlenmiş ürünlerin yalnızca besleyici değil, aynı zamanda işlevsel faydalar sağlayacak şekilde zenginleştirilmesi, hem endüstri hem de tüketici açısından önem kazanmıştır. Gıda endüstrisi, tüketici eğilimine uyum sağlamak için gıda ürünlerini, büyük ölçüde klinik olarak kanıtlanmış fizyolojik işlevi olan biyoaktifler ekleyerek yeniden formüle etmektedir (Day vd., 2009).

Çilek, hoşça giden lezzeti, aroması ve besinsel değeri nedeniyle hem taze tüketimde hem de işlenmiş ürünlerde yaygın olarak kullanılan bir meyvedir. Türkiye, dünya genelinde üst sıralarda yer alan önemli bir çilek üreticisi konumundadır. 2024 yılında üretilen çilek miktarı yaklaşık 606 bin ton olarak raporlanmış olup, bu üretim hacmi Türkiye'yi dünya üretiminde ilk dört ülke arasında konumlandırmaktadır (Anonim, 2025). Küresel çilek pazarı büyüklüğü 2023 yılında yaklaşık 20.22 milyar ABD doları değerindeyken, pazardaki büyümenin yıllık %6.4 oranında devam etmesi ve 2032 yılına kadar yaklaşık 35.35 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir (Anonim, 2023). İşlenmiş çilek ürünleri (püre, konsantre, reçel ve dondurulmuş ürünler vb.) ise 2024 yılı itibarıyla 10.9 milyar ABD doları büyüklüğünde bir pazara sahipken ve bu pazarın 2030 yılına

kadar 18.3 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir (Anonim, 2024). Gıda ve içecek endüstrisinde çilek bazlı ürünler, süt ürünleri (meyveli yoğurt, smoothie, milkshake, vb.), fırın ürünleri, tatlılar, soslar, konsantre içecekler ve püre formunda olmak üzere çok yönlü kullanım alanı bulmaktadır. Bu verilere dayanarak, çilekli ürünlerin gıda sektöründe kayda değer bir ekonomik hacme sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu doğrultuda, çilek gibi fenolik bileşen ve antosiyanin içeriği yüksek meyvelerin işlenmesi ve biyoaktif bileşenler bakımından konsantre edilmesi, fonksiyonel gıda ve içecek üretiminde dikkate değer bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

Antosiyaninler son zamanlarda fonksiyonel gıdalar ve diyet takviyeleri geliştirmek için umut verici nutrasötik bileşenler olarak görülmektedir. Antosiyaninler, flavonoid grubu içinde yer alan ve birçok kırmızı, mor ve mavi meyveye rengini veren suda çözünebilen pigmentlerdir. Bu bileşikler yalnızca görsel estetik sağlamakla kalmayıp, antioksidan, antiinflamatuvar, antikarsinogenik, antihipertansif ve antimikrobiyal etkileriyle sağlık açısından çok yönlü faydalar sağlamaktadırlar (He ve Giusti, 2010; Khoo vd., 2017). Ayrıca, reaktif oksijen türlerini (ROS) etkisiz hale getirme kapasiteleriyle oksidatif stresin azaltılmasında önemli roller üstlenirler. Bu nedenle, antosiyaninlerin stabilitesi ve biyoyararlılığı göz önünde bulundurularak işleme teknolojilerinin seçimi büyük önem taşır.

Meyve sularının işlenmesinde geleneksel berraklaştırma tekniklerinin yerini, son yıllarda mikrofiltrasyon (MF) ve ultrafiltrasyon (UF) gibi membran ayırma teknolojileri almaktadır. Ultrafiltrasyon, düşük sıcaklıkta, kimyasal madde ilavesine ihtiyaç duymadan, koloidal partiküllerin ve büyük moleküllerin uzaklaştırılması yoluyla meyve suyunu berraklaştırabilen, basınç güdümlü ve seçici bir ayırma tekniğidir. 1–50 nm por boyutuna veya 1.000–500.000 Da moleküler ağırlık aralığına sahip membranlar sayesinde proteinler, pektinler, polifenoller gibi bileşenler seçici biçimde ayrılabilir. Bu sayede hem istenmeyen bulanıklık kaynağı maddeler giderilebilmekte hem de hedeflenen biyoaktif

bileşenler retentat kısmında zenginleştirilebilmektedir (Girard ve Fukumoto 2000; Vaillant vd., 2001; Cassano vd., 2007a). Ultrafiltrasyonun bir diğer avantajı, ısıya duyarlı bileşiklerin korunarak işlenmesidir. Özellikle antosiyaninler ve fenolik bileşikler gibi bileşenler, ısı işlemleri sırasında kolaylıkla bozulabildiğinden, düşük sıcaklıkla çalışan bu tip membran prosesleri biyolojik aktivitenin korunmasında kritik rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalarda, membran filtrasyon tekniklerinin polifenoller ve antosiyaninler gibi ısıya duyarlı doğal bileşenleri verimli bir şekilde geri kazanmak için kullanılabileceği rapor edilmiştir (Arend vd., 2017; Avram vd., 2017; Conidi vd., 2017). Literatürde nar, böğürtlen, kan portakalı ve üzüm gibi antosiyanin açısından zengin meyveler üzerine yürütülen çalışmalar, ultrafiltrasyonun hem berraklaştırma hem de fenolik bileşiklerin korunmasında etkili olduğunu göstermiştir (Vaillant vd., 2001; Cassano vd., 2007a; Toker vd., 2014; Conidi vd., 2017). Bununla birlikte, bu araştırmalar çoğunlukla tek bir membran tipi veya tekil bir parametreye (örneğin sadece membran ayırma sınırı ya da sadece hacim azaltma faktörü) odaklanmıştır. Çilek suyu özelinde ise, farklı membran ayırma sınırı değerleri ve hacim azaltma faktörlerinin birlikte fenolik bileşikler ve antosiyaninlerin konsantrasyonu üzerindeki etkisi sistematik olarak incelenmemiştir.

Bu çalışmanın amacı, çilek suyunun ultrafiltrasyon prosesiyle işlenerek toplam fenolik madde ve antosiyanin içeriği açısından zenginleştirilmesini sağlamak ve farklı ayırma sınırı değerine sahip (2 kDa ve 5 kDa) membranların farklı hacim azaltma faktörleri altında performansını değerlendirmektir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, benzer meyveler üzerine yapılmış araştırmalarla karşılaştırmalı bir perspektif sunmakta ve çilek suyunda biyoaktif zenginleştirme potansiyelini ortaya koymaktadır. Bunun yanı sıra bu çalışmanın yalnızca çilek suyu işleme teknolojisine değil, aynı zamanda fonksiyonel gıda üretiminde ısıya duyarlı biyoaktif bileşiklerin korunması ve zenginleştirilmesine yönelik proses optimizasyonuna da bilimsel katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Analizlerde kullanılan galik asit standardı (Sigma-Aldrich, ABD), Folin-Ciocalteu reaktifi, sodyum karbonat, asetonitril, potasyum klorür ve sodyum asetat Merck' ten (Darmstadt, Almanya) temin edilmiştir. Çilek suyunun elde edilmesinde kullanılan çilek suyu konsantresi ise Meykon Meyve ve Kaynak Suları San. ve Tic. A.Ş.' den (Antalya, Türkiye) sağlanmıştır.

Çilek Suyunun Ultrafiltrasyonu

Ultrafiltrasyonda kullanılan çilek suyu (8° Brix), 68° Brix konsantreden demineralize su ile seyreltilerek hazırlanmıştır.

Ultrafiltrasyon (UF) denemeleri laboratuvar tipi ultrafiltrasyon sisteminde (Sartorius, Göttingen, Almanya) 2 ve 5 kDa membran ayırma sınırına sahip Hydrosart filtreler (Sartorius AG, Almanya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ekipman, sirkülasyon için 323 model bir peristaltik pompa (Watson-Marlow, Wilmington, MA, ABD) ve giriş (P₁) ve çıkış (P₂) basınçlarını ölçmek için iki manometreden oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan filtreler 1000 cm² ayırma alanına ve en fazla 4 bar basınca kadar dayanabilme özelliğine sahiptir. Tüm denemeler ortam sıcaklığında (25°C±2) kesikli konsantrasyon modunda yapılmıştır. Giriş ve çıkış basınçları sırasıyla 2.5 ve 0.5 bar olarak ayarlanmıştır. UF denemelerinden elde edilen permeat ve retentat numuneleri amber renkli şişelere doldurulmuş ve analize kadar 4°C' de saklanmıştır.

Filtrelerin saf su geçirgenliği değerleri sabit sıcaklıkta (25 °C) uygulanan transmembran basıncına (TMP) karşılık hesaplanan su akış debisi (J) grafiğinde elde edilen eğrinin eğim değeri olarak belirlenmiştir. Transmembran basıncı ve akış debisi değerleri ise sırasıyla aşağıda yer alan Eşitlik [1] ve [2] vasıtasıyla hesaplanmıştır.

$$TMP = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad [1]$$

Denklemden P₁ besleme (giriş) basıncı (bar), P₂ ise retentat (çıkış) basıncı (bar) olarak gösterilmiştir. Saf su akışı (J), sabit TMP ve sıcaklık değerlerinde, membran yüzey alanı boyunca belirli bir sürede toplanan permeat hacminin ölçülmesiyle belirlenmiştir.

$$J = \frac{V_p}{A \times t} \quad [2]$$

Burada V_p , t sürede A yüzey alanına sahip membrandan geçirilen permeat hacmidir.

Denemelere başlamadan önce sabit sıcaklıkta (25°C) uygulanan farklı basınç değerlerine (TMP) karşılık filtrelerin saf su akışı (J) ölçülerek elde edilen grafikten saf su geçirgenliği (WP_0) hesaplanmıştır. Çilek suyunun ultrafiltrasyonundan sonra saf su akışı (WP_1) tekrar ölçülmüştür. Ardından temizlik prosedürü kapsamında, filtre 30 dakika boyunca demineralize su ile durulanmış ve 50°C' de 1 saat boyunca 1N sodyum hidroksit çözeltisi ile temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Bundan sonra, demineralize su ile son durulama uygulanmış ve saf su akışı tekrar ölçülmüştür (WP_2). Kirlenme indeksi (FI), aşağıda yer alan Eşitlik [3]' e göre meyve suyu filtrasyonundan önce ve sonra saf su geçirgenliği karşılaştırılarak hesaplanmıştır.

$$FI (\%) = [1 - (WP_1/WP_0)] \times 100 \quad [3]$$

Burada WP_1 çilek suyu filtrasyonundan sonraki saf su geçirgenliği ve WP_0 kullanılmamış membranın saf su geçirgenliğidir.

Temizleme etkinliği ise (CE) Eşitlik [4]' e göre hesaplanmıştır:

$$CE (\%) = (WP_2/WP_0) \times 100 \quad [4]$$

Burada WP_2 kimyasal temizlik sonrası saf su geçirgenliği ve WP_0 kullanılmamış membranın saf su geçirgenliğidir.

Ayrıca ultrafiltrasyon sırasında uygulanan hacim azaltma faktörü değerleri (hacim redüksiyonu) (VRF) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Eşitlik [5]).

$$VRF = V_f / (V_f - V_p) \quad [5]$$

Burada, V_f ve V_p sırasıyla ilk hacim (besleme) ve membrandan geçen permeat hacmini göstermektedir.

Bir membranın ayırma kabiliyeti, çözünen madde rejeksiyon oranı (R_j) cinsinden belirlenebilir. Bu çalışmada analiz edilen bileşikler için, membranın

rejeksiyon oranı aşağıda verilen Eşitlik [6] aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$R_j (\%) = (1 - (C_p/C_f)) \times 100 \quad [6]$$

Burada C_f ve C_p sırasıyla besleme ve permeat konsantrasyonudur. R_j membran tarafından tutulan çözünen madde oranını ölçmektedir (Díaz-Reinoso vd., 2009).

Çalışma kapsamında analiz edilen bileşiklerin ultrafiltrasyon sonucu ne düzeyde konsantre edildiğini ifade eden konsantrasyon faktörü değerinin (CF) hesaplanmasında ise, aşağıda verilen Eşitlik [7] kullanılmıştır:

$$CF = \frac{C_r}{C_f} \quad [7]$$

Burada C_r , retentatta bulunan bileşenin konsantrasyonu; C_f , besleme çözeltisinde bulunan bileşenin konsantrasyonudur (Dushkova vd., 2022).

Suda Çözünen Kuru Madde (SÇKM) Miktarı Tayini
Suda çözünen kuru madde miktarı (% Brix) dijital refraktometre (Atago, Japonya) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler 25°C±0.5' de gerçekleştirilmiştir.

Toplam Fenolik Madde (TFM) Miktarı Tayini
Örneklerdeki toplam fenolik madde miktarı Folin-Ciocalteu yöntemine göre belirlenmiştir (Spanos ve Wrolstad 1992). Bu amaçla, uygun oranda seyreltilmiş örnekten 0.5 mL alınarak üzerine önce 2.5 mL 0.2 N Folin-Ciocalteu ayırıcı (Merck, Almanya) eklenmiş ve daha sonra 5 dak bekletilmiştir. Süre sonrasında karışıma 2 mL %7.5'lik Na_2CO_3 (Merck, Almanya) çözeltisi eklenerek, elde edilen yeni karışım vorteksle karıştırılıp 5 dak 50°C' ye ayarlı su banyosunda daha sonra da 10 dak karanlık ortamda bekletilmiştir. Spektrofotometrede (Thermo Scientific Evolution 201, ABD) 760 nm dalga boyunda yapılan okumalarda ölçülen absorbans değerleri kaydedilmiştir. Standart gallik asit (Sigma Aldrich, ABD) çözeltileriyle hazırlanan kurveden yararlanılarak miktar tayinleri yapılmıştır. Sonuçlar mg gallik asit eşdeğeri (GAE)/L olarak ifade edilmiştir.

Toplam Monomerik Antosiyanin (TMA) Tayini

Örneklerin toplam monomerik antosiyanin içeriği pH diferansiyel yöntemine göre belirlenmiştir (Lee vd., 2005). Bu amaçla örnekler pH değeri 1.0 (0.025 M potasyum klorid) ve 4.5 (0.4 M sodyum asetat) olan tampon çözeltiler kullanılarak belirlenen oranda seyreltilmiştir. Elde edilen örneklerin absorbans değerleri spektrofotometre kullanılarak (Thermo Scientific Evolution 201, ABD) 520 nm ve 700 nm dalga boylarında, 1 cm tabaka kalınlığında olan tek kullanımlık spektrofotometre küvetlerinde (Brand GmbH, Postfach, Wertheim, Almanya) ölçülerek toplam antosiyanin miktarı pelargonidin-3-glukozid eşdeğeri (mg/L) olarak hesaplanmıştır (Eşitlik 8). Pelargonidin-3-glukozid, çilekte baskın antosiyanin olarak bildirilmektedir (Aaby vd., 2005).

$$\text{Toplam monomerik antosiyanin miktarı (mg/L)} = \frac{A \times MW \times SF \times 10^3}{\epsilon \times l} \quad [8]$$

Burada;

A (absorbans değeri) = ($A_{520\text{nm}}$ – $A_{700\text{nm}}$) pH 1.0 – ($A_{520\text{nm}}$ – $A_{700\text{nm}}$) pH 4.5

MW (pelargonidin-3-glukozidin molekül ağırlığı) = 433.2 g/mol

SF; seyreltme faktörü, ϵ ; molar absorpsiyon katsayısı = 22400 (pelargonidin-3-glukozid için)

İstatistiksel Analizler

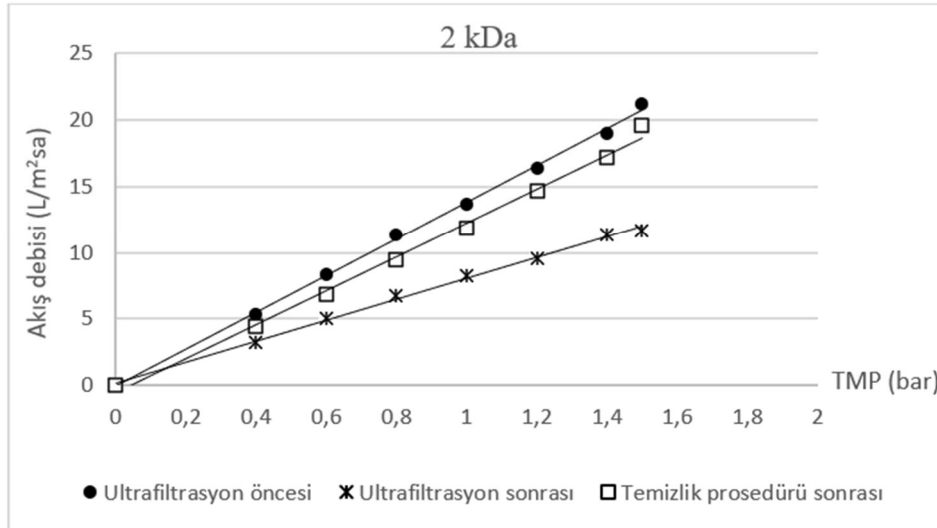
Tüm istatistiksel analizler SAS yazılımı, Versiyon 7 (SAS Institute Inc., Cary, NC) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ultrafiltrasyon denemeleri iki tekerrür halinde gerçekleştirilmiş ve tüm analizler iki paralelli olarak yapılmıştır. İncelenen tüm parametrelerin sonuçları ($n = 4$) ortalama $\pm$ standart sapma olarak sunulmuş ve 0.05 anlamlılık düzeyinde varyans analizine (ANOVA) tabi tutulmuştur.

BULGULAR VE TARTIŞMA

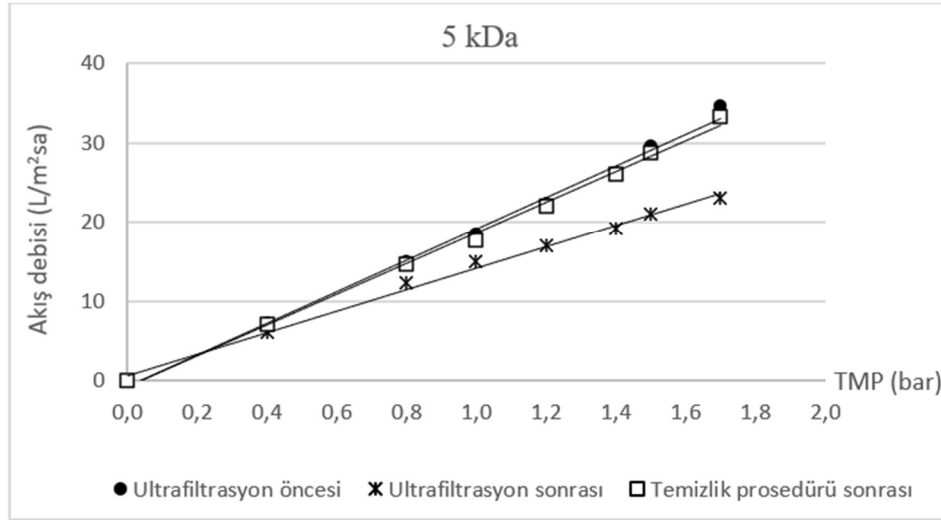
Membran Filtrelerin Akış Performansı

Şekil 1' de, çilek suyunun ultrafiltrasyonunda kullanılan 2 kDa ve 5 kDa ayırma sınırına sahip membran filtreler için transmembran basıncına (TMP) karşılık saf su akışının değişimi gösterilmiştir. Sonuçlar, her iki filtre için de saf su akışının incelenen TMP değerleri aralığında TMP ile doğrusal olarak arttığını göstermektedir.

(a)



(b)



Şekil 1. Çilek suyunun 2 kDa (a) ve 5 kDa (b) ayırma sınırına sahip filtreler ile ultrafiltrasyonunda transmembran basıncına karşılık saf su akışının değişimi

Figure 1. Change in pure water flux corresponding to transmembrane pressure during ultrafiltration of strawberry juice using filters with cut-off rates of 2 kDa (a) and 5 kDa (b)

Grafiklerde yer alan eğim çizgilerinin denklemleri kullanılarak temizleme işleminden önce ve sonra membranın saf su geçirgenliği, kirlenme indeksi (FI) ve temizleme etkinliği (CE) hesaplanmıştır (Çizelge 1). 2 kDa ayırma sınırına sahip filtrenin su geçirgenliğinde çilek suyunun UF' inden sonra %44 oranında azalma tespit edilirken, ayırma sınırı 5 kDa olduğunda bu değer %32' ye düşmüştür. Ultrafiltrasyon işleminde kullanılan filtrenin

ayırma sınırının artması kirlenme indeksinin azalmasına neden olmuştur. Uygulanan temizlik prosedürü sonrasında kullanılan iki filtrenin saf su geçirgenliği değerlerinde önemli düzeyde iyileşme gerçekleştirilmiş ve 2 ve 5 kDa filtrelerde sırasıyla, başlangıç saf su geçirgenliğinin %96' sına ve %97' sine ulaşılmıştır. 5 kDa' luk filtre gözenek çapı daha büyük olduğundan daha az tıkanmaya uğramış ve daha etkin temizlenebilmiştir.

Çizelge 1. Çilek suyunun ultrafiltrasyonunda membranların su geçirgenliği (WP), kirlenme indeksi (FI) ve temizleme etkinliği (CE) değerleri

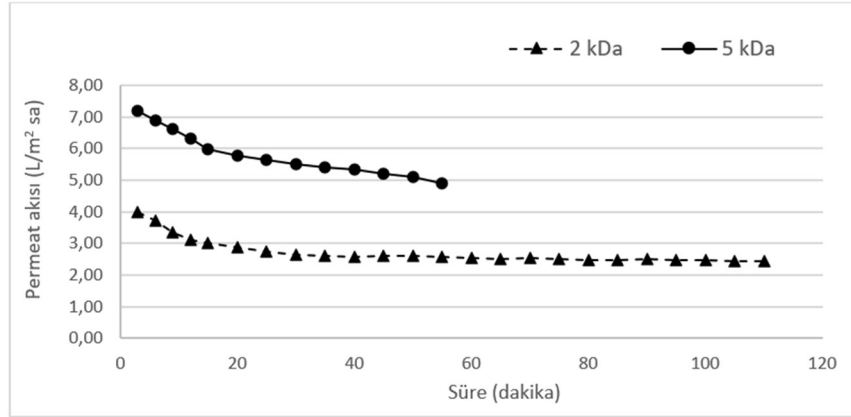
Table 1. Water permeability (WP), fouling index (FI), and cleaning efficiency (CE) values of membranes in the ultrafiltration of strawberry juice

	2 kDa	5 kDa
WP ₀ (L/m ² sabar)	13.88	19.89
WP ₁ (L/m ² sabar)	7.71	13.51
WP ₂ (L/m ² sabar)	13.32	19.39
FI (%)	44.44	32.10
CE (%)	95.96	97.47

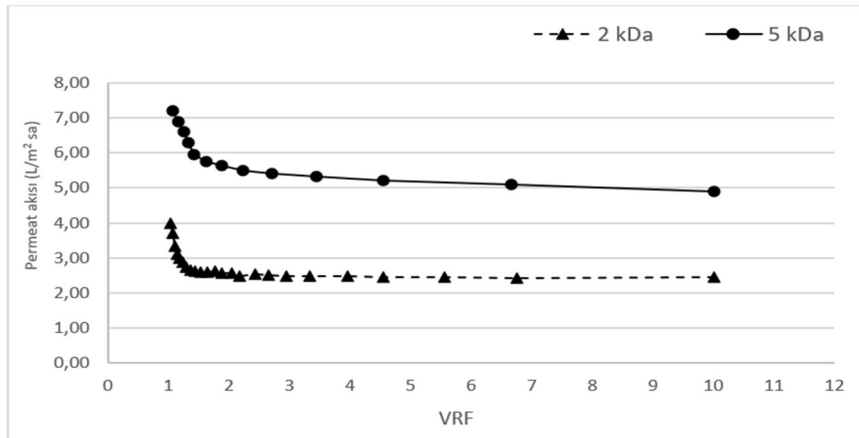
Literatürde farklı özelliklere sahip membran filtrelerle yapılan çalışmalarda beklenildiği üzere aynı yapıdaki membranlarda daha büyük gözenek boyutlarına veya ayırma sınırına sahip olanların daha yüksek permeat akısı sağladığı görülmektedir (Acosta vd., 2014; Dushkova vd., 2025). Bunun yanı sıra permeat akısının sadece transmembran basıncı tarafından etkilenmediği, aynı zamanda membran materyali, membranın yapısı ve çözünen maddeler ile membran arasındaki farklı etkileşimlerden de etkilenebileceği bildirilmiştir (Conidi vd., 2017; Yammine vd., 2019).

Zamana bağlı olarak permeat akısının değişimi Şekil 2’de, hacim redüksiyon faktörü (VRF) ile permeat akısı arasındaki ilişki ise Şekil 3’te sunulmuştur. 2 kDa filtrenin başlangıçta 4 L/m²sa

olan permeat akısı, nihai VRF değeri olan 10’ a ulaşıldığında %39 oranında azalarak 2.44 L/m²sa’ e düşmüştür. 5 kDa’ luk filtre ise 2 kDa’ luk filtreye kıyasla ultrafiltrasyon başlangıcında daha yüksek bir permeat akısına sahipken (7.20 L/m²sa), permeat akısı işlem boyunca azalarak VRF değeri 10 olduğunda 4.91 L/m²sa’ e kadar düşmüştür. Bu durum, literatürde membran yüzeyinde oluşan konsantrasyon polarizasyonu ve jel tabakalarının permeat akısını düşürdüğünü belirten çalışmalarla uyumludur (Cassano vd., 2018; Conidi vd., 2020). Koschuh vd. (2005) tarafından yürütülen çalışmada ise farklı membran filtreler kullanılarak gerçekleştirilen UF/NF proseslerinde VRF artışıyla birlikte permeat akısının azaldığı rapor edilmiştir.



Şekil 2. Zamana bağlı olarak permeat akısının değişimi
Figure 2. Change in permeate flux over time



Şekil 3. VRF'nin permeat akısı üzerindeki etkisi
Figure 3. Effect of VRF on permeate flux

Ultrafiltrasyon Prosesinin Çilek Suyunun Kimyasal Özellikleri Üzerine Etkisi

Çizelge 2, UF prosesinde farklı VRF değerlerinde elde edilen permeat ve retentat fraksiyonlarında ölçülen toplam fenolik madde (TFM), toplam monomerik antosiyanin (TMA) ve suda çözünen kuru madde (SÇKM) miktarlarını göstermektedir. Çizelgeden anlaşıldığı üzere, uygulanan her

koşulda beslemeden permeata geçen madde miktarı, retentatta tutulandan daha düşük bulunmuştur. Ayrıca permeat fraksiyonlarının tüm parametrelerde anlamlı ölçüde düşük değerlere sahip olması, antosiyaninlerin ve fenolik bileşiklerin büyük kısmının membran tarafından tutulduğunu ve permeat fazına geçmediğini göstermektedir.

Çizelge 2. 2 ve 5 kDa filtreler ile ultrafiltrasyon sonrası çilek suyunun suda çözünen kuru madde (%), toplam fenolik (mg GAE/L) ve toplam antosiyanin (mg/L) miktarlarının değişimi

Table 2. Changes in soluble solids (%), total phenolic (mg GAE/L), and total anthocyanin (mg/L) contents of strawberry juice after ultrafiltration with 2 and 5 kDa filters

Ultrafiltrasyon			Suda çözünen kuru madde (% Brix)	TFM (mg GAE/L)	TMA (mg/L)
Ayırma sınırı	VRF	Fraksiyon			
Besleme			8.00 ^f ±0.00	784.29 ^e ±14.28	15.77 ^f ±0.26
2 kDa	2.5	permeat	7.50 ^g ±0.01	187.84 ^f ±7.23	0.98 ^g ±0.00
		retentat	8.00 ^f ±0.01	782.05 ^e ±4.91	18.15 ^f ±0.18
	5	permeat	7.20 ^h ±0.00	177.66 ^f ±2.23	0.96 ^g ±0.01
		retentat	9.40 ^c ±0.00	1726.61 ^c ±15.18	41.58 ^c ±1.75
	10	permeat	7.05 ⁱ ±0.05	168.20 ^f ±3.84	0.86 ^g ±0.01
		retentat	10.05 ^a ±0.05	2425.71 ^a ±73.22	80.19 ^a ±0.18
	2.5	permeat	7.15 ^h ±0.05	235.69 ^f ±4.35	1.91 ^g ±0.09
		retentat	8.60 ^e ±0.01	1335.27 ^d ±11.16	27.87 ^e ±0.30
5 kDa	5	permeat	7.15 ^h ±0.05	240.27 ^f ±0.23	1.80 ^g ±0.06
		retentat	9.20 ^d ±0.01	1743.08 ^c ±36.83	33.80 ^d ±1.78
	10	permeat	7.20 ^h ±0.00	249.31 ^f ±4.13	1.97 ^g ±0.06
		retentat	9.60 ^b ±0.01	2062.28 ^b ±56.92	48.65 ^b ±1.22

Aynı sütunda farklı harfler istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları ifade etmektedir ($P<0.05$).

Statistically significant differences are indicated by different letters in the same column ($P<0.05$).

Ultrafiltrasyon prosesi sonrasında elde edilen retentat fraksiyonlarında, kullanılan filtre ayırma sınırının 2 kDa ve VRF değerinin 10 olduğu koşulda TFM (2425.71 mg GAE/L), TMA (80.19 mg/L) ve SÇKM (10.05 %) içeriklerinin en yüksek düzeyde olduğu belirlenmiştir.

Fenolik bileşiklerin büyük bölümü membran tarafından tutulmuştur. Retentatların toplam fenolik madde miktarının, besleme (784.29 mg GAE/L) ile karşılaştırıldığında UF işleminden etkilendiği ve 2 kDa filtre ayırma sınırının daha

yüksek konsantrasyon sağladığı görülmektedir. Bu durum, 2 kDa' nın fenolik bileşikler açısından daha seçici olduğunu göstermektedir. VRF değerindeki artışın TFM miktarını istatistiksel olarak önemli düzeyde arttırdığı belirlenmiştir ($P<0.05$). 2 kDa' luk filtre ile yapılan işlemde VRF 2.5, 5 ve 10 değerlerinde retentatlardaki TFM miktarı sırasıyla 782.05, 1726.61 ve 2425.71 mg GAE/L olarak ölçülmüştür.

Toplam monomerik antosiyanin miktarı açısından incelendiğinde de VRF değerinin artışı ile

retentatlarda konsantrasyonun arttığı tespit edilmiştir. Ultrafiltrasyon sistemine beslenen çilek suyunun başlangıç antosiyanin içeriği 15.77 mg/L iken, VRF değeri 10 olduğunda 2 kDa membran (80.19 mg/L), 5 kDa membrana (48.65 mg/L) kıyasla daha iyi retensiyon sağlamıştır. Bu da ayırma sınırı azaldıkça daha etkili bir zenginleştirme gerçekleştiği anlamına gelmektedir.

Ultrafiltrasyonun SÇKM miktarı üzerine etkisine bakıldığında 2 kDa filtrede farklı VRF değerlerinde elde edilen permeatlar arasında istatistiksel olarak anlamlı seviyede ($P<0.05$) fark varken, 5 kDa filtrede ise değişen VRF değerlerine karşılık permeatlar arasında istatistiksel olarak fark gözlenmemiştir. Besleme örneğinin SÇKM miktarı %8.00 olup, permeat fraksiyonlarında SÇKM miktarı genellikle daha düşük (%7.05–%7.50 arasında) bulunmuştur.

Retentatlarda ise her iki filtre için de VRF değerinin artmasıyla istatistiksel olarak artış göstermiştir ($P<0.05$). En yüksek SÇKM miktarı, 2 kDa filtrenin VRF değeri 10 olan retentatında (%10.05) elde edilmiştir. Retentatlarda SÇKM miktarının artışı, suyun uzaklaştırılmasına ve çözünmüş katıların konsantre edilmesine bağlıdır.

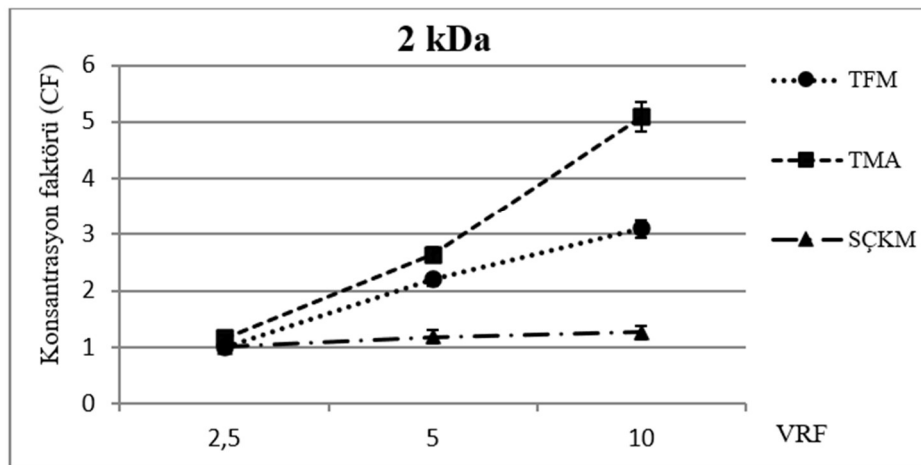
Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde bu çalışmada elde edilen bulguları destekleyen sonuçların rapor edildiği

görülmektedir. Dushkova vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada gül yağı damıtma işlemi sonrası açığa çıkan atık sudan fenoliklerin ultrafiltrasyon ile geri kazanımı için 1 kDa, 10 kDa ve 25 kDa ayırma sınırında poliakrilonitril membran filtreler kullanılmıştır. Ultrafiltrasyon sırasında fenolik bileşiklerin, test edilen tüm membranlardan elde edilen retentatlarda VRF değeri 2' den 8' e yükseldikçe artış gösterdiği, en yüksek fenolik bileşen miktarına ise 1 kDa membran kullanıldığında ulaşıldığı bildirilmiştir. Benzer sonuçlar Toker vd. (2014) tarafından kan portakal suyunda elde edilmiş olup, membranın ayırma sınırı azaldıkça fenolik bileşenler, antosiyaninler ve suda çözünür kuru madde miktarlarının permeat fraksiyonunda azalıp retentat fraksiyonunda arttığı bulunmuştur.

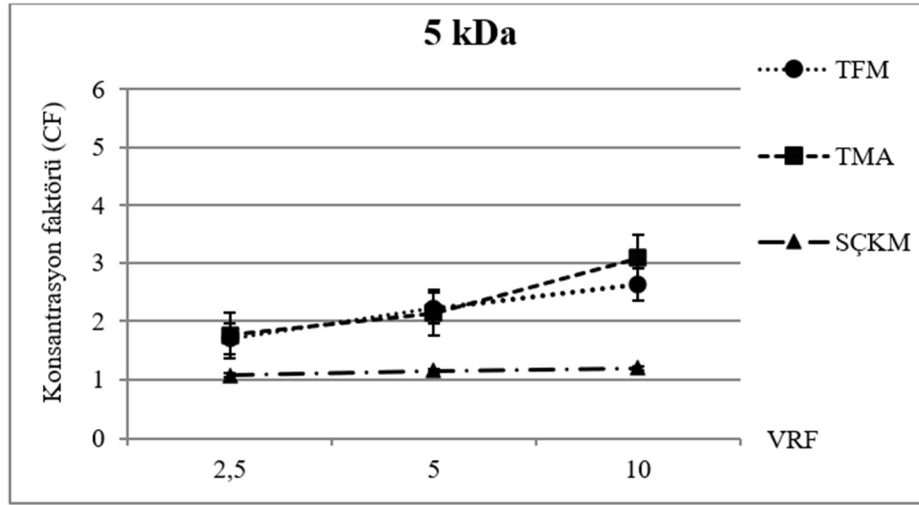
Konsantrasyon Faktörü

Çilek suyunun ultrafiltrasyonu sırasında uygulanan hacim azaltma faktörüne (VRF) bağlı olarak analiz edilen bileşenlerin konsantrasyon faktörünün (CF) değişimi Şekil 4 'te gösterilmiştir. VRF değerinin artması fenolik bileşikler açısından konsantrasyon faktörünü artmıştır. 2 kDa membran filtre ile uygulanan proses aşamasında uygulanan VRF değerleri 2.5, 5 ve 10 olduğunda fenolik bileşiklerin konsantrasyon faktörü sırasıyla 1.0 kat, 2.2 kat ve 3.1 kat olurken, 5 kDa membran filtre kullanıldığında konsantrasyon faktörü sırasıyla 1.7 kat, 2.2 kat ve 2.6 kat olmuştur.

(a)



(b)



Şekil 4. Çilek suyunun ultrafiltrasyonu sırasında hacim azaltma faktörünün (VRF), toplam fenolik madde (TFM), toplam antosiyanin (TMA) ve suda çözünen kuru maddenin (SÇKM) konsantrasyon faktörü (CF) üzerindeki etkileri

Figure 4. Effects of volume reduction factor (VRF) on the concentration factor (CF) of total phenolic matter (TFM), total anthocyanin (TMA) and soluble solids (SÇKM) during ultrafiltration of strawberry juice

Toplam monomerik antosiyaninlerin konsantrasyon faktörü VRF 2.5 iken 5 kDa filtrede (1.8 kat), 2 kDa filtreden (1.2 kat) daha yüksek bulunmuştur. Ancak hacim azaltma faktörünün artışıyla (VRF 5' ten VRF 10' a) 5 kDa filtrede konsantrasyon faktörü sırasıyla 2.1 kat ve 3.1 kat artarken, 2 kDa filtrede sırasıyla 2.6 kat ve 5.1 kat artmıştır. Antosiyaninler açısından en fazla zenginleşmenin sağlandığı konsantrasyon faktörü (5.1 kat) 2kDa filtre ile VRF 10 değerinde yapılan ultrafiltrasyon işlemiyle sağlanmıştır.

Hacim redüksiyonu 2.5 iken suda çözünen kuru madde miktarı 2 kDa membran filtrenin retentat kısmında aynı kalmış, dolayısıyla konsantrasyon faktörü 1 olarak bulunmuştur. Hacim redüksiyonu 5 ve 10 olduğunda ise suda çözünen kuru madde miktarının konsantrasyon faktörü sırasıyla 1.18 ve 1.26 olmuştur. 5 kDa membran filtre ile yapılan ultrafiltrasyonda ise VRF' nin artışıyla konsantrasyon faktörü sırasıyla 1.1 kat, 1.2 kat ve 1.2 kat olarak bulunmuştur. Suda çözünen kuru madde miktarının konsantrasyon faktörü düşüken fenolik bileşenlerin ve antosiyaninlerin konsantrasyon faktörünün

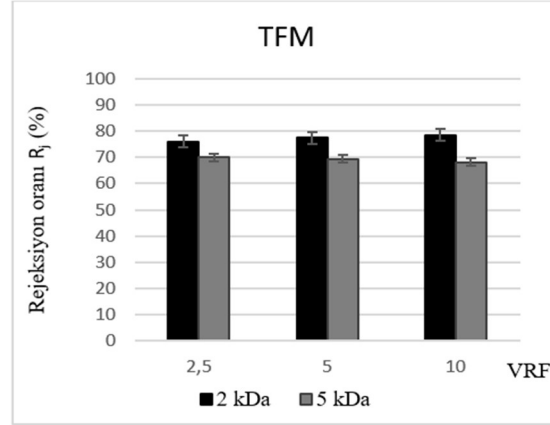
yüksek olması filtrenin bu bileşikler açısından seçici davrandığını göstermektedir.

Geri Kazanım Oranı (Membran Rejeksiyonu)

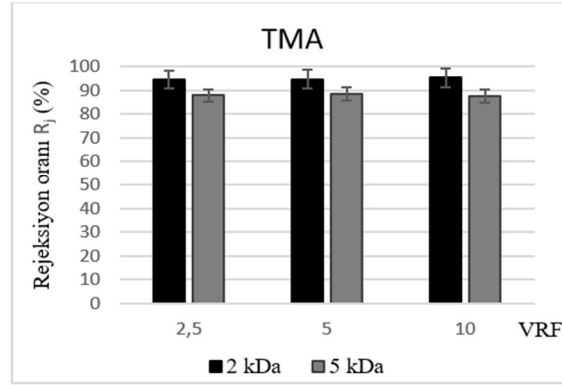
UF denemelerinden elde edilen çilek suyu konsantratları için kullanılan filtrelerin toplam fenolik, toplam antosiyanin ve suda çözünen kuru madde açısından rejeksiyon oranları (R_i) hesaplanmıştır. Değişen VRF değerlerine karşılık toplam fenolik, toplam antosiyanin ve suda çözünen kuru madde miktarının ulaştığı rejeksiyon oranı değerleri Şekil 5' te sunulmuştur.

Kullanılan filtreler ayırma sınırı açısından kıyaslandığında 2 kDa membran filtre ile SÇKM %6.25 - %11.88 aralığında rejeksiyon gösterirken, fenolik bileşenler %76.05 - %78.55 arasında, antosiyaninler %94.60 - %95.26 rejeksiyon göstermiştir. 5 kDa membran filtre kullanıldığında ise gözenek çapı büyüdüğü için SÇKM (%10.00-%10.63), TFM (%68.21-%69.95) ve TMA (%87.51-%88.59) açısından 2 kDa filtreye göre daha düşük rejeksiyon oranları gerçekleşmiştir.

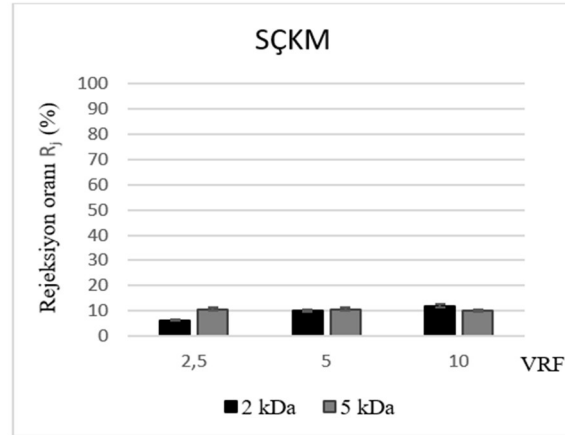
(a)



(b)



(c)



şekil 5. ilek suyunun ultrafiltrasyonu sırasında toplam fenolik madde (TFM) (a), toplam antosiyanin (TMA) (b) ve suda çözünen kuru maddenin (SÇKM) (c) rejeksiyon oranının (R_j) hacim azaltma faktörüne (VRF) bağlı olarak değişimi

Figure 5. Changes in rejection ratio (R_j) of total phenolic matter (TFM) (a), total anthocyanin (TMA) (b) and soluble solids (SÇKM) (c) during ultrafiltration of strawberry juice depending on volume reduction factor (VRF)

Dolayısıyla 2 kDa filtre ile yapılan UF, fenolik bileşenlerin ve antosiyaninlerin geri kazanımı açısından daha etkili bulunmuştur.

Çalışmada kullanılan her iki filtre için artan VRF ile birlikte bileşenlerin rejeksiyon oranları da yükselmiştir. Farklı VRF değerlerinde alınan sonuçlar karşılaştırıldığında, fenolik bileşikler açısından rejeksiyon oranlarının birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Çilek suyunun 2 kDa ayırma sınırına sahip filtre ile ultrafiltrasyonunda, VRF değerleri 2.5, 5 ve 10 iken alınan örneklerde fenolik maddelerin rejeksiyon oranları sırasıyla %76.05, %77.35 ve %78.5 olurken, 5 kDa filtre ile işlem yapıldığında sırasıyla % 69.95, %69.36 ve %68.21 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, filtrelerin toplam antosiyaninlere yönelik rejeksiyonu da VRF' ye bağlı olarak önemli düzeyde değişmemiş ve 2.5, 5 ve 10 VRF değerleri için sırasıyla 2 kDa filtrede %94.60, %94.71 ve %95.26 olurken, 5 kDa filtrede %87.89, %88.59 ve %87.51 olmuştur. Analiz edilen parametreler için 2 kDa filtre ile ultrafiltrasyon işleminde VRF değeri 10 olduğunda bileşenlerin rejeksiyon oranı en yüksek bulunmuştur.

Arend vd. (2017) tarafından çilek suyunun nanofiltrasyonu üzerine yapılan çalışmada, hakim antosiyanin olarak tespit edilen pelargonidin-3-O-glikozit için %95'e varan yüksek rejeksiyon sağlanmıştır. Rapor edilen sonuçlar bu çalışmada belirlenen %94–95 TMA rejeksiyonuyla uyumludur. Bu çalışmada elde edilen TMA (%94–95) ve TFM (%76–78) rejeksiyon oranları, antosiyaninlerin moleküler yapısının 2 kDa membran filtre tarafından daha iyi tutulduğunu göstermektedir. Roda-Serrat vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada siyah havuç suyunun nanofiltrasyonunda kullanılan membran filtre (poliamid, 600-800 Da) antosiyaninleri %98 rejeksiyon oranıyla başarılı bir şekilde tutarken, suda çözünen kuru maddenin rejeksiyon oranı %65 olmuştur. Cassano vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen nanofiltrasyon çalışmalarında TFM için %70–90 arasında, TMA için ise %90' ın üzerinde rejeksiyon oranları bildirilmiştir. Literatürde benzer şekilde, Cisse vd. (2011), hibiskus (rosella) (*Hibiscus sabdariffa* L.) ekstraktının ultrafiltrasyonunda membran ayırma sınırı 20 kDa veya daha az olan tüm

membranların, hibiskus ekstraktının antosiyaninlerini konsantre etmek için etkili olduğunu bildirmiştir. 3 MPa transmembran basıncında, 1 ile 20 kDa arasındaki UF membranları antosiyaninleri %80' in üzerinde tutmuştur.

Acosta vd. (2014) tarafından böğürtlen suyu üzerinde yapılan çalışmada antosiyaninlerin tutulma oranı 0.5 MPa transmembran basıncında UP150 membran (150 kDa) için %60, 3 MPa transmembran basıncında UP005 membran (5 kDa) için %99 arasında değişmiştir. Toplam antosiyaninlerin tutulma oranı, test edilen ultrafiltrasyon membranlarının ayırma sınırı azaldıkça doğrusal olarak artmıştır. Meyve suyunun UF işleminde daha düşük ayırma sınırına sahip membranlarla fenolik bileşiklerin permeat geçişinin büyük ölçüde engellendiğini ve retentatta yoğunlaştığını bildirmiştir. Endüstriyel gül yağı distilasyonu prosesinde açığa çıkan atık suyun UF işlemine tabi tutulduğu bir başka çalışmada ise incelenen membranlar karşılaştırıldığında, 1 kDa membranın VRF 8 değerinde fenolik bileşikler (%42.10), fenolik asitler (%42.94) ve flavonoidler (%41.58) için en yüksek rejeksiyon oranını sağladığı, bunu 10 kDa ve 25 kDa membranların izlediği belirlenmiştir (Dushkova vd., 2025).

Yapılan çalışmalarda membranların tutma (rejeksiyon) özellikleri üzerine; sterik etkiler, membran ve çözünen maddeler arasındaki etkileşimler veya meyve suyundaki farklı kimyasal gruplar arasındaki etkileşimler gibi makromoleküler agregatların oluşumuyla sonuçlanan parametrelerin de etkili olduğu bildirilmiştir (Siebert vd., 1996). UF sisteminde incelenen bileşiklerin kütle dengesi değerlendirildiğinde, çözünen madde-membran etkileşimi ve bunun sonucunda membran yüzeyinde veya gözenek içinde çözünen maddenin adsorpsiyonu sistemdeki kayıpların nedenleri olarak rapor edilmiştir (Liu vd., 2018). Buna ek olarak, özellikle oksidasyona duyarlı bileşiklerin kaybında, meyve suyunun UF çevriminde sürekli olarak geri döndürülmesinin neden olduğu oksidasyonun da etkili olduğu bildirilmektedir (Cassano vd., 2007b).

SONUÇ

Bu çalışmada, çilek suyunun 2 kDa ve 5 kDa ayırma sınırına sahip membran filtreler kullanılarak ultrafiltrasyon yöntemiyle işlenmesi sonucunda, fenolik bileşikler ve antosiyaninler açısından önemli düzeyde zenginleştirme sağlanmıştır. Yapılan analizler, hacim reduksiyon faktörü değerinin artmasıyla birlikte permeat akılarının azaldığını, retentatlarda ise TFM ve TMA miktarlarında anlamlı seviyede artış sağlandığını göstermiştir.

Genel olarak fenolik bileşiklerin ve antosiyaninlerin zenginleştirilmesi için 2 kDa ayırma sınırına sahip filtre daha başarılı bulunmuştur. 2 kDa' luk filtrede hacim reduksiyon faktörü 10' a ulaştığında toplam fenolik madde ve toplam monomerik antosiyaninlerin konsantrasyon faktörleri sırasıyla 3.1 kat ve 5.1 kat olmuştur. Proses sırasında permeat akısı, konsantrasyon ve ayırma etkinliği hacim reduksiyon faktörünün değişiminden önemli düzeyde etkilenmiştir. Bu koşullarda TFM için %78.55 ve TMA için %95.26 olmak üzere yüksek rejeksiyon değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, çilek suyunun biyoaktif bileşenler yönünden zenginleştirilmesinde ultrafiltrasyonun etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca 2 kDa' luk membranın antosiyaninler açısından gösterdiği yüksek seçicilik, fonksiyonel içecek ve doğal antioksidan ürün geliştirme potansiyelini artırmaktadır.

Özellikle düşük enerji gereksinimi, kimyasal girdi kullanılmaması ve termal işlemlere kıyasla renk-aroma korunumu gibi avantajları sayesinde UF sistemleri, endüstriyel ölçekte uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda ilerleyen çalışmalarda UF prosesi ile zenginleştirilmiş retentat fraksiyonlarının fonksiyonel gıda üretiminde kullanım olanaklarının araştırılabileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya materyal desteği sağlayan Meykon Meyve ve Kaynak Suları San. ve Tic. A.Ş.' ye teşekkür ederim.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu makalede yazar, başka kişiler veya kurumlar ile çıkar çatışması bulunmadığını beyan etmektedir.

KAYNAKÇA

- Aaby, K., Skrede, G., Wrolstad, R. E. (2005). Phenolic composition and antioxidant activities in flesh and achenes of strawberries (*Fragaria ananassa*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10): 4032-4040.
- Acosta, O., Vaillant, F., Pérez, A. M., Dornier, M. (2014). Potential of ultrafiltration for separation and purification of ellagitannins in blackberry (*Rubus adenotrichus* Schltdl.) juice. *Separation and Purification Technology*, 125: 120-125.
- Anonim (2023). Zion Market Research. *Strawberry Market Size, Share, Growth and Forecast to 2032*. <https://www.zionmarketresearch.com/report/strawberry-market>
- Anonim (2024). Strategy MRC. *Global Processing Strawberry Market Report*. <https://www.strategymrc.com/report/processin-g-strawberry-market>
- Anonim (2025). Stat Agri. *Çilek İstatistikleri*. <https://www.statagri.com/cilek-istatistikleri/>
- Arend, G. D., Adorno, W. T., Rezzadori, K., Di Luccio, M., Chaves, V. C., Reginatto, F. H., Petrus, J. C. C. (2017). Concentration of phenolic compounds from strawberry (*Fragaria X ananassa* Duch) juice by nanofiltration membrane. *Journal of Food Engineering*, 201: 36-41.
- Avram, A. M., Morin, P., Brownmiller, C., Howard, L. R., Sengupta, A., Wickramasinghe, S. R. (2017). Concentrations of polyphenols from blueberry pomace extract using nanofiltration. *Food and Bioproducts Processing*, 106: 91-101.
- Cassano, A., Conidi, C., Ruby-Figueroa, R., Castro-Muñoz, R. (2018). Nanofiltration and tight ultrafiltration membranes for the recovery of polyphenols from agro-food by-products. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(2): 351.
- Cassano, A., Donato, L., Drioli, E. (2007b). Ultrafiltration of kiwifruit juice: Operating

- parameters, juice quality and membrane fouling. *Journal of Food Engineering*, 79(2): 613-621.
- Cassano, A., Marchio, M., Drioli, E. (2007a). Clarification of blood orange juice by ultrafiltration: analyses of operating parameters, membrane fouling and juice quality. *Desalination*, 212(1-3): 15-27.
- Cissé, M., Vaillant, F., Pallet, D., Dornier, M. (2011). Selecting ultrafiltration and nanofiltration membranes to concentrate anthocyanins from roselle extract (*Hibiscus sabdariffa* L.). *Food Research International*, 44(9): 2607-2614.
- Conidi, C., Cassano, A., Caiazzo, F., Drioli, E. (2017). Separation and purification of phenolic compounds from pomegranate juice by ultrafiltration and nanofiltration membranes. *Journal of Food Engineering*, 195: 1-13.
- Conidi, C., Castro-Muñoz, R., Cassano, A. (2020). Membrane-based operations in the fruit juice processing industry: A review. *Beverages*, 6(1): 18.
- Day, L., Seymour, R. B., Pitts, K. F., Konczak, I., Lundin, L. (2009). Incorporation of functional ingredients into foods. *Trends in Food Sciences & Technology*, 20: 338-395.
- Del Rio, D., Rodriguez-Mateos, A., Spencer, J. P., Tognolini, M., Borges, G., Crozier, A. (2013). Dietary (poly) phenolics in human health: structures, bioavailability, and evidence of protective effects against chronic diseases. *Antioxidants & Redox Signaling*, 18(14): 1818-1892.
- Díaz-Reinoso, B., Moure, A., Domínguez, H., Parajó, J. C. (2009). Ultra- and nanofiltration of aqueous extracts from distilled fermented grape pomace. *Journal of Food Engineering*, 91(4): 587-593.
- Dushkova, M., Mihalev, K., Dinchev, A., Vasilev, K., Georgiev, D., Terziyska, M. (2022). Concentration of polyphenolic antioxidants in apple juice and extract using ultrafiltration. *Membranes*, 12(11): 1032.
- Dushkova, M., Mitova, M., Bakardzhiyski, I., Miteva-Petrova, M., Menkov, N. (2025). Application of Ultrafiltration for Recovery of Bioactive Phenolic Compounds from Rose Wastewater. *Applied Sciences*, 15(4): 2040.
- Girard, B., Fukumoto, L. R. (2000). Membrane processing of fruit juices and beverages: a review. *Critical Reviews in Food Science Nutrition*, 40(2): 91-157.
- Granato, D., Barba, F. J., Bursać Kovačević, D., Lorenzo, J. M., Cruz, A. G., Putnik, P. (2020). Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 11(1): 93-118.
- He, J., Giusti, M. M. (2010). Anthocyanins: natural colorants with health-promoting properties. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1): 163-187.
- Kaur, C., Kapoor, H. C. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables—the millennium's health. *International Journal of Food Science and Technology*, 36(7): 703-725.
- Khoo, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., Lim, S. M. (2017). Anthocyanidins and anthocyanins: Colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food & Nutrition Research*, 61(1): 1361779.
- Koschuh, W., Thang, V. H., Krasteva, S., Novalin, S., Kulbe, K. D. (2005). Flux and retention behaviour of nanofiltration and fine ultrafiltration membranes in filtrating juice from a green biorefinery: a membrane screening. *Journal of Membrane Science*, 261(1-2): 121-128.
- Lee J, Durst RW, Wrolstad RE. 2005. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. *Journal of AOAC International*, 88: 1269-1278.
- Liu, R. H. (2013). Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet. *Advances in Nutrition*, 4(3): 384S-392S.
- Liu, Y. L., Wang, X. M., Yang, H. W., Xie, Y. F. (2018). Quantifying the influence of solute-membrane interactions on adsorption and rejection of pharmaceuticals by NF/RO membranes. *Journal of Membrane Science*, 551: 37-46.

- Roda-Serrat, M. C., Schytt-Nielsen, J. F., Braekevelt, S., Dzhanzeftova, T., Joernsgaard, B., Norddahl, B., Errico, M. (2021). Processing of black carrot juice by nanofiltration and forward osmosis. *Chemical Engineering Transactions*, 87: 547-552.
- Siebert, K. J., Troukhanova, N. V., Lynn, P. Y. (1996). Nature of polyphenol–protein interactions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(1): 80-85.
- Toker, R., Karhan, M., Tetik, N., Turhan, I., Oziyici, H. R. (2014). Effect of ultrafiltration and concentration processes on the physical and chemical composition of blood orange juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(3): 1321-1329.
- Vaillant, F., Millan, A., Dornier, M., Decloux, M., Reynes, M. (2001). Strategy for economical optimisation of the clarification of pulpy fruit juices using crossflow microfiltration. *Journal of Food Engineering*, 48(1): 83-90.
- Yammine, S., Rabagliato, R., Vitrac, X., Peuchot, M. M., Ghidossi, R. (2019). Selecting ultrafiltration membranes for fractionation of high added value compounds from grape pomace extracts. *Oeno One*, 53(3): 487-497.