

MEMBRAN AYIRMA TEKNİKLERİNİN MEYVE SUYU İŞLEMEDEKİ UYGULAMALARI

Ayşe Seda APAYDIN*, Pelin ONSEKİZOĞLU BAĞCI

Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Türkiye

Geliş / Received 07.02.2025; Kabul / Accepted: 22.05.2025; Online baskı / Published online: 30.05.2025

Apaydın, A. S., Onsekizoğlu Bağcı, P. (2025). Membran ayırma tekniklerinin meyve suyu işlemedeki uygulamaları. GIDA (2025) 50 (3) 442-465 doi: 10.15237/ gida.GD25027

Apaydın, A. S., Onsekizoğlu Bağcı, P. (2025). Applications of membrane separation techniques in fruit juice processing. GIDA (2025) 50 (3) 442-465 doi: 10.15237/ gida.GD25027

ÖZ

Membran ayırma teknikleri, meyve suyu endüstrisinde sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi, çevre dostu kaynak kullanımı ve atık azaltımı açısından önemli potansiyele sahiptir. İyileştirilmiş kalite ve besin değerine sahip ürünlerin üretiminde sürdürülebilir süreçlere yönelik ilgi artışıyla, meyve suyu üretiminde berraklaştırma, aroma geri kazanma ve konsantrasyon gibi işlemlerde kullanılan geleneksel teknolojilerin yerine membran ayırma tekniklerinin kullanımı konusundaki çalışmalar son yıllarda ivme kazanmıştır. Bu derlemede mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, ters ozmoz, ozmotik distilasyon ve pervaporasyon tekniklerinin temel ilkeleri, meyve suyu işlemede uygulamaları, kullanılan membran yapıları, sistem performansını etkileyen faktörler detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca membran uygulamalarında karşılaşılan kirlenme olayı kapsamlı olarak ele alınmış, kirlenmeyi etkileyen faktörler ve bu sorunu azaltmaya yönelik geliştirilen stratejiler irdelenmiştir. Güncel araştırmaların bulgularını sentezleyen bu derleme, sürdürülebilir membran proseslerinin tasarımı ve işletimine yönelik bir rehber niteliğindedir. Ayrıca kirlenme yönetimi ve yeni membran yapılarının tasarımı yaklaşımlarını bütüncül olarak inceleyerek meyve suyu teknolojisi alanına özgün bir bakış açısı kazandırmaktadır.

Anahtar kelimeler: Membran filtrasyon, berraklaştırma, konsantrasyon, aroma geri kazanımı, membran kirlenmesi

APPLICATIONS OF MEMBRANE SEPARATION TECHNIQUES IN FRUIT JUICE PROCESSING

ABSTRACT

Membrane separation techniques have significant potential for high efficiency, low energy consumption, environmentally friendly resource use, and waste reduction in the fruit juice industry, in line with sustainable production goals. Growing interest in sustainable processes for producing product with improved quality and nutritional value has been a accelerated research into using membrane separation instead of traditional clarification, aroma recovery, and concentration. This review explains the basic principles of microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, osmotic distillation, and pervaporation techniques; their application in juice processing, membrane structures, and performance factors. It also addresses fouling in membrane applications, its influencing factors, and strategies to mitigate it. By synthesizing recent research findings, the review

* Sorumlu yazar / Corresponding author

✉: asedaapaydin@trakya.edu.tr

☎: (+90) 555 060 0252

Ayşe Seda Apaydın; ORCID no: 0009-0009-9686-5423

Pelin Onsekizoğlu Bağcı; ORCID no: 0000-0001-6612-5170

serves as a guide to designing and operating sustainable membrane processes and, through a comprehensive examination at fouling control and new membrane design approaches, provides an original perspective in fruit juice technology.

Keywords: Membrane filtration, clarification, concentration, aroma recovery, membrane fouling

GİRİŞ

Dünyada en çok ticareti yapılan gıda ürünlerinden biri olan meyve suları, şeker, lif, organik asitler, antioksidanlar, karotenoidler, mineraller ve vitaminlerin yanı sıra biyoaktif bileşikler ve fitokimyasalları da içerdiğinden dengeli beslenmede önemli bir yere sahiptir. Son yıllarda işlenmiş gıda ürünleri tercih eden tüketici bilinci doğrultusunda geleneksel ısıl işleme tekniklerine alternatif yeni teknolojiler önem kazanmıştır. Bunlar içerisinde membran ayırma teknikleri ılımlı çalışma koşulları, yüksek seçicilikte ayırma performansı, düşük enerji gereksinimi ve düşük olumsuz çevresel etki gibi çeşitli avantajları ile meyve suyu üretim süreçlerinde öne çıkmaktadır.

Membran filtrasyon teknolojisi 1960'lı yılların başında Loeb ve Souriragin tarafından selüloz asetat membranların keşfedilmesiyle birlikte laboratuvar ortamından endüstriyel boyuta taşınmış ve içecek endüstrisinde kullanımı hızlı bir artış göstermiştir (Tseng, vd., 2022). Geleneksel ayırma süreçlerinde bileşenin ayrılması için gereksinim duyulan kimyasal veya termal dönüşümlere gerek duyulmaması membran ayırma süreçlerinde duyulan enerji gereksinimi azaltmaktadır. Bu sayede hem enerji tasarrufu sağlanmakta hem de ürün içerisindeki ısıya duyarlı biyoaktif bileşikler korunmaktadır (Naeem vd., 2024). 2023 yılında gıda ve içecek işleme için 6.11 milyar \$ olarak rapor edilen küresel membran teknolojisi pazar büyüklüğünün 2024-2030 döneminde %6.6'lık bir Büyüme Oranıyla 2030 yılına kadar 10.04 milyar \$ seviyelerine ulaşması öngörülmektedir (Verified Market Reports, 2024).

Membran ayırma teknikleri günümüzde meyve suyu ve alkollü içeceklerde durultma, saflaştırma, geri kazanım ve konsantrasyon gibi üretim basamaklarında kullanılmaktadır (Castro-Muñoz vd., 2020). Genel bir ifade ile, belirli maddelerin geçmesine ve diğerlerinin tutulmasına izin veren seçici bir bariyer işlevi gören küçük gözeneklere veya ince ağ yapısına sahip çok katmanlı moleküler bir elek olarak tanımlanabilecek

membranların kullanıldığı ayırma süreçlerinde basınç, sıcaklık veya elektriksel potansiyel farkı gibi itici kuvvetler yaratılarak ayırma sağlanır (Biniaz vd., 2022). Meyve suyu işlemede kullanılan membran ayırma teknolojisi uygulamaları itici gücün türüne göre (1) basınç farkına dayalı süreçler: mikrofiltrasyon (MF), ultrafiltrasyon (UF), nanofiltrasyon (NF) ve ters ozmoz (TO); (2), basınç farkına dayalı olmayan diğer süreçler: ozmotik distilasyon (OD) ve pervaporasyon (PV) olarak incelenebilir (Rudolph-Schöpping vd., 2024).

Basınç farkına dayalı süreçlerde permeat akışı için itici güç, membran yüzeyi boyunca sirküle edilen beslemenin ortalama basıncı ile permeat basıncı arasındaki farktır. Bu fark transmembran basınç farkı (TMP) olarak adlandırılır. Basınca dayalı süreçlerden düşük TMP seviyelerinde uygulanan MF ve UF teknikleri meyve suyu endüstrisinde mikroorganizmaların uzaklaştırılması, durultma ve berraklaştırma aşamalarında; yüksek TMP seviyelerinde ayırma sağlayan NF ve TO uygulamaları ise konsantrasyon amacıyla kullanılmaktadır. Hidrofobik mikroporöz membranların kullanıldığı ozmotik distilasyon (OD) ve membran distilasyon (MD) tekniklerinde itici güç membranın iki yüzeyi arasında oluşturulan buhar basıncı farkıdır. Her iki uygulama da meyve sularının atmosferik basınç altında konsantrasyonuna olanak sağlamaktadır. Meyve suyu işlemede aroma ayırma aşamasında kullanılan pervaporasyon tekniğinde ise itici güç membranın iki yüzeyi arasındaki kısmi buhar basıncı farkıdır. Çizelge 1'de membran ayırma tekniklerinin genel özellikleri ve uygulama alanları özetlenmiştir.

Bir membran ayırma sürecinde membranın gözeneklerinden geçen sıvı akımı permeat, membrandan geçemeyen, alıkonulan partiküllerin olduğu akım ise retentat olarak isimlendirilir (Kapi, 2021). Birim zamanda birim membran alanından toplanan permeat miktarını ifade eden

permeat akısı (J_p , kg/m²sa) eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.

$$J_p = \frac{W_p}{A \cdot t} \quad (1)$$

Burada W_p t anında toplanan permeat miktarı (kg), A membran yüzey alanı (m²) ve t permeatın toplandığı zaman (sa)'dır (Yılmaz, 2019).

Çizelge 1. Membran Ayırma Tekniklerinin Genel Özellikleri

Membran Tekniği	İtici Kuvvet ^a	Kütle Aktarım Mekanizması ^b	Membran; Gözenek Boyutu ^a	Basınç Aralığı (bar) ^c	Filtre edilen Partiküller ^a	Uygulamaları ^b
Mikrofiltrasyon (MF)	Transmembran basınç farkı, 10-500 kPa	Konveksiyon	Mikrogözenekli; 0.1–10 µm	0.1-3	Nişasta, Bakteri, Fungi (100000-10 ⁶ Da)	Berraklaştırma, ön arıtma, sterilizasyon
Ultrafiltrasyon (UF)	Transmembran basınç farkı, 0.1-1 MPa	Konveksiyon	Mikrogözenekli; 0.05–0.5 µm	1-10	Makromoleküller, kolloidler, virüs, proteinler (1000-100000 Da)	Konsantrasyon, berraklaştırma, makromoleküler çözeltilerin ayrıştırılması
Nanofiltrasyon (NF)	Transmembran basınç farkı, 0.6-4 MPa	Konveksiyon /Difüzyon	Nanogözenekli; 0.001–0.01 µm	10-50	Şekerler, iki değerli iyonlar (100-1000 Da)	Konsantrasyon, düşük moleküler ağırlıklı organik bileşiklerin saflaştırılması
Ters Ozmoz (TO)	Transmembran basınç farkı, 2-10 MPa	Difüzyon/Konveksiyon	Gözeneksiz; 0.1-1.0 µm	10-100	Tek değerli iyonlar (10-100 Da)	Konsantrasyon, berraklaştırma
Ozmotik Distilasyon (OD)	Buhar basınç farkı	Evaporasyon /Difüzyon/Yoğuşma	Hidrofobik mikrogözenekli; 0.2–1 µm	Atmosferik basınç		Konsantrasyon
Pervaporasyon (PV)	Buhar basıncı ve sıcaklık farkı	Adsorpsiyon /Difüzyon /Desorpsiyon	Homojen polimer gözeneksiz		Azeotropik karışımlar	Uçucu sıvı karışımlarının ayrılması

a: Martín, vd., 2018; b: Castro-Muñoz, vd., 2020; c: Conidi, Castro-Muñoz ve Cassano, 2020

Bir membran sisteminin ayırma performansını yansıtan membran seçiciliği genellikle “alıkonma faktörü” R_f ile tanımlanır ve her çözünen için eşitlik 2 ile hesaplanır:

$$R_f = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) * 100 \quad (2)$$

Burada C_f besleme akımındaki çözücü konsantrasyonu (kg/m³) ve C_p permeat akımındaki çözücü konsantrasyonu (kg/m³)'dur.

Meyve suyu üretim süreçlerinde içi boş fiber, tübüler ve spiral sarımlı modüller yaygın olarak tercih edilen membran modül konfigürasyonlarıdır (Charcosset, 2021). Beslemenin bileşimi, akış hızı, sıcaklık ve basınç gibi etmenler de membranın ayırma

performansını etkileyen parametrelerdendir. Membran ayırma sürecinde karşılaşılan en büyük zorluk olan kirlenme olayının neden olduğu konsantrasyon polarizasyonu ve akı azalmasının kontrol altına alınabilmesi için membranın özelliklerinin göz önünde bulundurularak işlem parametrelerinin optimizasyonu önem taşımaktadır.

Bu derlemede, mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, ters ozmoz, pervaporasyon, ozmotik distilasyon ve entegre membran işlemlerinin kullanımı da dahil olmak üzere, meyve sularının berraklaştırılması ve konsantre edilmesine yönelik membran işlemlerinin genel prensipleri hakkında bilgi verilecek; son önemli teknolojik gelişmeler ve iyileştirmeler ele alınacaktır.

MEYVE SUYU ÜRETİMİNDE KULLANILAN MEMBRAN TEKNOLOJİLERİ

Mikrofiltrasyon ve Ultrafiltrasyon

Meyve suları bileşiminde yer alan polisakkaritler, proteinler, tanenler ve metallerden dolayı doğal olarak bulanıktır (Kaushal vd., 2021). Berrak meyve suyu üretiminde durultma ve berraklaştırma aşamalarında kullanılan geleneksel yöntemler dekantasyon, flokülasyon, santrifüjleme ve enzimatik durultma olarak sıralanmaktadır (Sarbatly vd., 2023). Bu yöntemlerin uzun vakit alması, ürün ve zaman kaybına neden olması ve ileriki adımlarda yüksek maliyetli ekipmanlara ihtiyaç duyulması gibi birçok dezavantajları bulunmaktadır (Conidi vd., 2020). Ayrıca bu yöntemler sürekli bir sistem yerine kesikli işlem adımlarını içermektedir (Chew vd., 2020). Meyve suyu üretiminde berraklaştırma yardımcı maddelerine duyulan gereksinimi ortadan kaldırma, beslemenin besinsel ve aromatik kompozisyonunun daha iyi korunması, işlem süresinin kısılması, ısıl işleme gereksinim duyulmaması, yüksek verimlilik, düşük enerji gereksinimi gibi bir dizi avantaja sahip mikrofiltrasyon (MF) ve ultrafiltrasyon (UF) teknikleri meyve suyu üretiminde berraklaştırma aşamasında geleneksel uygulamalara alternatif olarak giderek daha yaygın tercih edilmektedir (Urošević ve Trivunac, 2020). Meyve suyu üretiminde berraklaştırma aşamasında MF veya UF tekniklerinin kullanımıyla mikrobiyolojik olarak stabil ve yüksek kalitede ürün eldesi yüksek verimle sağlanabilmektedir (Panigrahi vd., 2021).

Meyve suyu işlemede kullanılan MF membranlarının gözenek boyutu 0.1-10 µm düzeylerindedir (Zhu vd., 2024). Tercih edilen MF membran yapıları polipropilen (PP), polikarbonat (PC), polisülfon (PS), polivinil klorür (PVC), alümina, paslanmaz çelik ve silika gibi doğal veya sentetik olabilirler. MF tekniği ile meyve suyu üretiminde bozulmaya neden olan mikroorganizmaların üründen uzaklaştırılmasının yanı sıra turuncgiller gibi meyve sularında bulanıklık etmeni yüksek moleküler ağırlıklı süspanse ve kolloidal katılar da uzaklaştırılarak berraklaştırma etkisi sağlanmaktadır (Demoulin vd., 2022; Díaz-Montes ve Castro-Muñoz, 2019).

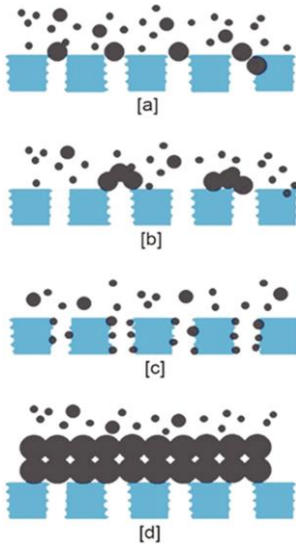
Ultrafiltrasyon membranlarında gözenek boyutu 0.01–0.1 µm aralığında olup, tercih edilen polimerik membran yapıları poliviniliden florür (PVDF), polietersülfon (PES), poliamid (PA) ve polipropilen (PP)'dir (Othman, vd., 2020). UF tekniği meyve suyu işlemede berraklaştırma aşamasında endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Maya, küf, mikroskobik organizmalar ve yüksek molekül ağırlıklı kolloidler de bu teknik ile meyve suyundan uzaklaştırılmaktadır (Bevilacqua vd., 2018). UF çalışmalarında kullanılan TMP genellikle 0 ila 500 kPa arasında değişmekle beraber yüksek basınç etkisiyle membran yüzeyinde ani partikül birikiminin oluşmasını engellemek amacıyla genellikle 100 kPa'dan daha düşük TMP değerlerinde çalışılmaktadır.

Ultrafiltrasyon ve mikrofiltrasyon membran teknikleri, meyve suyu işleme süreçlerinde önemli avantajlar sunarak geleneksel termal yöntemlere alternatif oluşturmaktadır. MF, düşük enerji tüketimi ve düşük işletme basıncı gerektirmesi sayesinde ekonomik bir seçenek sunarken, süspanسیون halindeki katıları ve bakterileri etkin bir şekilde uzaklaştırarak meyve suyunun mikrobiyolojik kalitesini artırmaktadır. Bu sayede, ürünün raf ömrü uzatılmakta ve besin içeriği korunmaktadır (Conidi vd., 2020). UF ise daha küçük gözenek boyutları sayesinde mikroorganizmaların yanısıra çözünmüş büyük moleküllerin de uzaklaştırılmasına olanak tanır. Termal işlem gerektirmeyen yapısı sayesinde, şeker karamelizasyonu ve renk değişimi gibi olumsuzluklar önlenerek meyve suyunun doğal aroması ve besin içeriği korunmaktadır (Ma vd., 2024). Ayrıca, UF süreci kolay ölçeklenebilir olup düşük enerji tüketimi ile maliyet avantajı sağlamaktadır. MF ve UF tekniklerinin kullanımı meyve suyu kalitesinin artırılmasını, enerji tüketiminin azaltılmasını ve işlem verimliliğinin optimize edilmesini sağlamaktadır.

Meyve suyu endüstrisinde MF ve UF membranlarının kullanımındaki başlıca problem, sisteme beslenen gıdanın bileşimindeki makro ve mikro partiküllerin membranın gözenekli yapısında ve membranın yüzeyinde birikmesidir. Kirlenme permeat akısının zamanla azalmasına, membran boyunca basınç düşüşünün artmasına

ve membran üzerinde bakteri gelişimine neden olmakla birlikte (Yılmaz ve Bağcı, 2019), membran bakım, işletim maliyetleri ve işlem süresini arttırarak, membran modüllerinin ömrünü ve son ürün kalitesini azaltmaktadır (Lu vd., 2021). Bu tip membran kirlenmeleri konsantrasyon polarizasyonu, kek veya jel oluşumu olarak da adlandırılmaktadır (Rajendran vd., 2021).

Membran kirlenmesi membranın gözenek boyutu ve katı partiküllerin boyutu arasındaki farka bağlı olarak dört farklı mekanizma ile açıklanabilmektedir. Bunlar; partiküllerin membran gözenek girişlerini engellemesi ile gerçekleşen tam gözenek tıkanması (a), katı parçacıkların membran girişinde bir köprü oluşturmasıyla gerçekleşen yarı gözenek tıkanması (b), partiküllerin membran gözenek boyutundan küçük, gözenek duvarlarında çökerek adsorbe olması ile gerçekleşen iç gözenek tıkanması (c) ve partiküllerin membran gözenek boyutundan daha büyük, membran yüzeyinde birikerek bir kek tabakası (d) oluşturmasıdır (Bağcı, 2021). Genellikle UF tekniğinde gözlemlenen membran kirlenmesi mekanizmaları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Membran kirlenmesi mekanizmaları (a) tam gözenek tıkanması; (b) yarı gözenek tıkanması; (c) iç gözenek tıkanması; (d) kek tabakası oluşumu (Bağcı, 2021)

MF ve UF ayırma teknikleri için genelde partikül adsorpsiyonu ve partikül birikimi olarak iki çeşit kirlenmeden bahsedilir. Partikül adsorpsiyonu geri dönüşü olmayan bir kirlenme olup, hücre dışı makromoleküler etkileşimler olduğundan yapışkan yapıdadır. Partikül birikimi ise pektin gibi maddelerin membranın üst yüzeyinde birikmesiyle yapışkan olmayan yapıda geri dönüşümlü bir kirlenme olarak bilinir. Dış kirlenme ve kek oluşumu burada gözlemlenir. Membran filtrasyon işlemi esnasında kirlenmeye bağlı olarak zamanla permeat akısında kademeli bir azalış gözlemlenir (Rajendran vd., 2021).

Filtrasyon esnasında besleme çözeltisinin membran üzerine dikey akış (dead-end) ve çapraz akış olarak iki tip akışı vardır. Çapraz akış membran yüzeyinde yüksek ve kararlı bir şekilde akar böylece konsantrasyon polarizasyonu oluşumu azaltılır ve membran temizliğini kolaylaştırır (Castro-Muñoz vd., 2020). Membran filtrasyonu için seçicilik kadar geçirgenlik değeri de önemlidir (Mondal vd., 2021). Bu yüzden hidrolik geçirgenlik verilerinden yola çıkılarak membran kirlenmesinin modellendiği çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Field modeli, 1982 yılında Hermia tarafından önerilen sabit basınçlı filtrasyonda dikey akış (dead-end) filtrasyon mekanizmalarında kullanılan modelin, çapraz akış filtrasyonu için modifiye edilmesiyle geliştirilmiştir (Pereira vd., 2023). Dört farklı kirlenme mekanizması bu modelde tek bir denklem (eşitlik 3) ile ifade edilmiştir (Field ve Wu, 2022).

$$\frac{dJ}{dt} = k(J - J_{lim})J^{2-n} \quad (3)$$

J_{lim} yataşkın koşullarda elde edilen limit akı, k transmembran basıncına, dinamik permeat viskozitesine, permeat akısı başına tıkanan alana ve membran direncine bağlı olan bir katsayı, n parametresi ise kirlenmenin türüne bağlı olarak (a) tam gözenek tıkanması ($n=2$), (b) yarı gözenek tıkanması ($n=1$), (c) iç gözenek tıkanması ($n=1.5$; $J_{lim}=0$) ve (d) kek tabakası oluşumu ($n=0$) olarak tanımlanmaktadır.

Ghosh ve arkadaşlarının (2018), MF kullanarak jamun suyuna uyguladıkları berraklaştırma çalışmasında membran por çapının kirlenmeye olan etkisi değerlendirilmiştir. Membran gözenek boyutu küçüldükçe permeat akısının da azaldığı; bu azalmanın membran yüzeyindeki kek tabakası oluşumu veya konsantrasyon polarizasyonundan kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Ananas suyunun UF ile berraklaştırıldığı bir çalışmada ise çapraz akış hızının artmasıyla membran yüzeydeki makromolekül birikimi azaldığı, daha yüksek basınç değerlerine çıkıldığında dinamik tabakanın sıkışmasıyla reddedilen makromolekül miktarında önemli bir artış görülmemiştir. Bu çalışmaya ek olarak UF ve MF teknikleri karşılaştırılmış, UF için yüzeydeki makromolekül birikiminin ve konsantrasyon polarizasyonunun permeat akısını etkilediği; MF için ise iç gözenek tıkanmaların veya dinamik membran oluşumunun permeat akısı için kontrol faktörü olduğu belirtilmiştir (De Barros vd., 2003).

Membran kirlenmesinin analizi için kullanılan en yaygın bir diğer teori ise permeat akısını TMP ve toplam hidrolik dirençle ilişkilendiren Darcy Yasası'dır. Seri direnç (Resistance-in-series) modeli akı düşüşünün membran direncine ek olarak tersinir ve tersinmez dirençlerden kaynaklandığı belirtir. Bu modelde permeat akısındaki azalmayı etkileyen tüm dirençler (eşitlik 4) özetlenmiştir (Conidi vd., 2020).

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_{firr}} + \frac{1}{R_{frev}} + \frac{1}{R_c} \quad (4)$$

R_m membranın iç direncini, R_{firr} geri dönüştürülemez kirlenme direncini, R_{frev} geri dönüştürülebilir kirlenme direncini R_c membran yüzeyinde biriken kek tabakası direncini, temsil eder (Choi vd., 2005). Geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz kirlenmenin toplamı ile fouling direnci (R_f) elde edilmektedir.

Rezzadori ve arkadaşlarının (2014), MF tekniği kullanılarak çarkıfelek meyvesi içeren meyve suyunda berraklaştırma işleminin gerçekleştirildiği bir deneysel çalışmada permeat akısının davranışı seri direnç modeli ile incelenmiştir. Mikrofiltrasyonun ilk aşamalarında permeat

akısında %50 oranında hızlı bir düşüş gözlemlenmiş, konsantrasyon polarizasyonun bu düşüşte büyük etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca akıdaki bu düşüşe kirlenmeden kaynaklı direncin ikincil derecede ve membran direncinin en düşük oranla üçüncül derecede katkı sağladığı söylenmiştir. Bir diğer seri direnç modeli çalışmasında, ön işleme tabi tutulmuş elma suyuna UF işlemi uygulanmış, filtrasyonun başlangıcında gözlemlenen ani akı düşüşünün membran gözenek tıkanması ve konsantrasyon polarizasyonundan; permeat akısı sabit bir hıza ulaşmasının ise membran yüzeyinde oluşan kek tabakasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Abdullah vd., 2022).

Genel bir ifade ile kirlenme oluşumunu etkileyen temel faktörler membran yüzey özellikleri, beslemenin özellikleri ve işleme parametreleri olarak sıralanabilmektedir. Meyve sularının MF ve UF teknikleri ile berraklaştırılmasında kullanılacak olan membranın materyali, por çapı, porozitesi, porların dağılımı membran seçiminde dikkate alınması gerekli unsurlardır. Özellikle membran materyalinin beslemenin özelliklerine göre seçimi önemlidir. Farklı meyvelerin MF ile berraklaştırıldığı bir çalışmada misket limonlarından elde edilen besleme ile polisülfon membranlarda çatlamalar olduğu, polivinilden florür membranların ise daha kararlı davrandığı gözlemlenmiştir (Cui ve Muralidhara, 2010). Polisülfon ve polietilenimin MF membranlarının kullanıldığı bir çalışmada ise nar suyunun durultma performansları değerlendirilmiş, membran yapısına TiO_2 ve Al_2O_3 nanopartiküllerinin eklenmesiyle membran hidrofilikliğinin ve gözenekliliğin artması sağlanmıştır. Çalışma sonucunda permeat akısının arttığı ve ürün kalitesinin iyileştiği belirtilmiştir (Severcan vd., 2020). UF membranlarının malzeme yapısının incelendiği bir çalışmada ise polimerik membranlara kıyasla seramik membranlarda çok daha yüksek permeat akısı elde edildiği ve polimerik membranların işleme esnasında daha fazla deforme olduğu belirtilmiştir (Tomczak ve Gryta, 2021). Buna ek olarak MF ve UF sistemlerinde polimerik nano elyaf, polisülfon ve seramik gibi birden fazla kalite kriterini karşılayabilen malzemelerin kullanımının işleme

performansını iyileştirdiği çalışmalarla desteklenmiştir (Sandoval vd., 2019). Membran por çapı, beslemedeki partikül boyutuna uygun seçildiğinde kirlenme riskini azaltarak filtrasyon performansını artırmaktadır (Zhao vd., 2022). Yüksek poroziteye sahip membranlar genellikle daha yüksek akı değerleri sunmakta olup, membran üzerindeki gözeneklerin homojen bir şekilde dağılımı, filtrasyon sürecinde eşit bir akış sağlayarak membran performansının kararlılığını artırmaktadır (Li vd., 2022).

Filtrasyon işleminin verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için basınç, sıcaklık ve akış

hızı gibi işletme parametreleri de temelde permeat akısı ve ürün kalitesi temelinde belirlenmektedir. Membran kirliliği, farklı koşullarda detaylı olarak karakterize edilmesi gereken bir olgu olup, optimum çalışma koşullarının belirlenmesi, kirlenme sorunlarının önüne geçilmesine katkı sağlayacaktır. (Lu vd., 2021). Literatürde MF ve UF teknikleri kullanılarak meyve suyu ürünlerinde berraklaştırma amacıyla yapılan çalışmalar incelenmiş olup, en verimli sonuçların elde edildiği parametreler Çizelge 2’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. MF ve UF Membranlarının Çeşitli Meyve Sularında Kullanımı

Teknik	Meyve Suyu	Membran tipi	MWCO veya por boyutu	TMP	Membran alanı	Sıcaklık	Kaynak
UF	Elma suyu	Polietersülfon	100 kDa	2 bar	200 cm ²	25 °C	Onsekizoğlu vd., 2010
UF	Mandalina suyu	Polisülfon, içi boş fiber	30 kDa	69 kPa	0.028 m ²	25 °C	Ilame, vd., 2018
MF	Jamun suyu	Polisülfon, içi boş fiber	0.45 µm	137.89 kPa	0.005 m ²	30 °C	Ghos vd., 2018
UF	Portakal suyu	Tubular, PVDF	15 kDa	0.85 bar	0.23 m ²	25 °C	Cassano vd., 2007
UF	Brokoli suyu	PES	50 kDa	105 bar	200 cm ²	60 °C	Yılmaz vd., 2019
MF	Portakal suyu	Seramik membran	0.11 µm	206,8 kPa	7.899x 10 ⁻⁷ m ²	-	Satyannarayana vd., 2023
UF	Kivi suyu	Tubular, PVDF	15 kDa	90 kPa	0.23 m ²	25 °C	Cassano vd., 2007
UF	Kızılcık suyu	PVDF, düz levha	500 kDa	250 kPa	0.014 m ²	15 °C	Perreault vd., 2021
MF	Çilek suyu	Poliamid	0.4 µm	300 kPa	0.7 m ²	20 °C	Arend vd., 2019
UF	Elma suyu	Rejenere selüloz	30 kDa	2.5 bar	0.014 m ²	25 °C	Güleç vd., 2017
UF	Nar suyu	PVDF	30 kDa	3 bar	155 cm ²	25 °C	Bağcı, 2014
MF	Kaktüs armudu suyu	Polisülfon, içi boş fiber	0.1 µm	69 kPa	420 cm ²	20 °C	Mejia vd.,2021
MF	Narenciye suyu	Poliamid	2.5 µm	69 kPa	2.83x10 ⁻³ m ²	28 °C	Singh vd., 2021
UF	Aronya suyu	PES	50 kDa	3 bar	140 cm ²	25 °C	Apaydın, 2024

MWCO:Molecular weight cutoff, TMP: Transmembrane pressure, PES:Polietersülfon, PVDF:Poliviniliden florür

Teoride transmembran basıncındaki artış permeat akısıyla doğru orantılı şekilde artışa neden olmalıdır. Pratikte ise transmembran basıncındaki artış çözeltinin membran yüzeyine hızlı bir şekilde taşınmasına neden olmakta bu durum permeat akısındaki artışı sınırlanmaktadır. Örneğin, membran por çapının ve TMP değerinin permeat

akısına olan etkisinin incelendiği bir çalışmada basıncın 0.3 MPa’a kadar yükselmesiyle birlikte permeat akısında artış gözlemlenmiş, fakat bu değerden daha yüksek basınçlara çıkıldığında sabit bir akı değeri ile karşılaşmıştır. TMP artışı ile itici kuvvetin yerini filtrasyon direncinin aldığı belirli bir basınç değerinden sonra permeat akı

davranışının basınçtan bağımsız hale geldiği belirtilmiştir (Zhu vd., 2018). Bu yüzden membran filtrasyonda zamanla akı düşüşünün veya TMP'nin yükselişinin gözlemlenmediği bir kritik akı değeri belirlenmesi önerilmektedir (Hua vd., 2020). Aronya suyunun iki farklı gözenek boyutuna (150 kDa ve 50 kDa) sahip polietersülfon UF membranları ile berraklaştırıldığı bir çalışmada membran kirliliği akı profilleri üzerinden değerlendirilmiştir. Daha hidrofilik yapıya ve küçük gözenek boyutuna sahip olan membranın diğerine kıyasla yüksek kritik akı değerlerine ulaştığı ve daha az kirlendiğini belirtilmiştir (Apaydın, 2024). Besleme akış hızındaki artış ile süpürme etkisi artarak membran yüzeyinde biriken katı partiküller zorlanmış konveksiyonla daha hızlı uzaklaştırılabilmektedir. Dolayısıyla konsantrasyon polarizasyonunu azalırken, kütle transfer katsayısı artmakta ve permeat akısında da artış gözlemlenmektedir (Apel vd., 2024). Sıcaklık faktörünün kirlenme üzerinde direkt bir etkisinin olmamasına rağmen, dolaylı yoldan sıcaklık artışıyla birlikte besleme akışının viskozitesinde azalma ve permeat akısında ise artışa neden olduğu belirtilmektedir (Lu vd., 2021).

Son yıllarda, membran filtrasyonda membran kirliliğinin önlenmesine yönelik yapay zekâ uygulamalarına dayalı yenilikçi yaklaşımlar dikkat çekmektedir. Yapay sinir ağları kullanılarak filtrasyon koşulları simüle edilebilmekte ve elde edilen sonuçlar kirlenme için kullanılan matematiksel modeller ile karşılaştırılabilmektedir (Lu vd., 2021). Corbatón-Báguena ve arkadaşları (2016), çapraz akışlı UF çalışmalarında membran kirliliğini Field modeli kullanarak değerlendirmişlerdir. Yapay sinir ağları modelini kullanarak transmembran basıncı, akış hızı ve kirlenme dinamiği parametrelerinin permeat akısı üzerindeki etkisi tahmin edilmiştir. Deneysel akı verileri ile modelin tahmin ettiği akı verileri kullanılarak baskın kirlenme mekanizması belirlenmiştir. Çalışma sonucunda modelin farklı işleme parametrelerindeki permeat akısı ve kirlenme mekanizması (iç gözenek tıkanması) tahminlerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu belirtilmiştir (Corbatón-BBáguena vd., 2016). Membran kirliliğinin ve

filtrasyon verimliliğinin makine öğrenmesi modeli ile tahmin edildiği bir diğer çalışmada ise elma kabuklarından elde edilen polifenoller membran filtrasyon tekniği kullanılarak saflaştırılmıştır. Filtrasyon sonunda membran kirliliği hem Hermia modeli hem de görüntü işleme yöntemi ile analiz edilmiştir. Membran görüntülerinden elde edilen sonuçlarda baskın olan tam gözenek tıkanması, Hermia modeli ile doğrulanmıştır. Ayrıca geliştirilen model ile polifenol saflığı ve membran kirlenme derecesi arasındaki ilişki başarılı bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Elde edilen tutarlı sonuçlar doğrultusunda yapay zekâ uygulamalarının membran süreçlerinde kullanımının önemli bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2023).

MF ve UF ile yapılan berraklaştırma çalışmalarında daha yüksek akı değerlerine ulaşmak için depektinizasyon ve yardımcı maddelerin kullanımı gibi ön işlemlerin verimliliği arttırdığı çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir (Rudolph-Schöpping vd., 2024; Meher vd., 2023). Portakal ve mandalina suyuna uygulanan MF işlemi öncesinde depektinizasyon işleminin gerçekleştirildiği bir çalışmada pektinaz enzimi kullanılmıştır. Depektinizasyon işlemi uygulanan örneklerde pektik moleküllerin hidrolizi sayesinde ortalama parçacık boyutunun büyük ölçüde değiştiği ve permeat akısının arttığı gözlemlenmiştir (Satyannarayana vd., 2023). Kızılıçık suyunun UF membranları kullanılarak berraklaştırıldığı bir çalışmada ise taze ve depektinize meyve suları farklı por çaplı membranlarda işlenmiştir. En verimli sonuçların depektinize kızılıçık suyu ve daha büyük por çapına sahip olan membran kullanıldığında elde edildiği belirtilmiş, depektinizasyon işlemi ile berraklaştırma sürecinin önemli ölçüde kısaltıldığı gözlemlenmiştir (Perreault vd., 2021). UF kullanılarak nar suyunun berraklaştırması amacıyla yapılan bir diğer çalışmada jelatin, bentonit ve PVPP kullanımının sistem performansına etkisi araştırılmıştır. Durultma yardımcı maddelerinin geleneksel uygulamadaki 1/5'i oranında UF sistemi ile birlikte kullanımının UF proses performansının önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır (Bağcı, 2014). Ultrason teknolojisi de membran kirliliğinin azaltılarak

filtrasyon verimliliğinin artırılması amacıyla uygulanan ön işlemlerden biridir. MF öncesinde ultrason ön işleminin etkisinin incelendiği bir çalışmada jak meyvesinin suyu berraklaştırılmıştır. Filtrasyon süresinin yaklaşık yarıya düşürülmesi, biyoaktif bileşenlerin korunarak permeata geçebilmesi ve membran tıkanmalarının önlenmesi sürecin en büyük avantajları olarak sıralanmıştır. Sono-Mikrofiltrasyon olarak adlandırılan bu entegre sistemin meyve suyu işlemede proses koşullarını iyileştirebileceği yönünde etkili olabileceği belirtilmiştir (Miramontes-Escobar vd., 2024). Paraíso ve arkadaşları (2024), hibiskus özütünün ultrafiltrasyonu çalışmalarında permeat akısını iyileştirmek ve membran kirliliğini azaltmak amacıyla bir ön işlem olarak türbülans promotörü ve ultrason desteği kullanmışlardır. Filtrasyon sırasında türbülans promotörü ve ultrason desteğinin entegre kullanıldığı sistemin en yüksek akı değerlerine ulaştığı, türbülans promotörünün membran yüzeyindeki kayma gerilimini artırarak kirliliğin önemli ölçüde azalmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.

Nanofiltrasyon

Nanofiltrasyon (NF) membranları MWCO (molekül ağırlığı ayırma sınırı) değeri 120-1000 Da arasında olan basınçlı dayalı membran ayırma tekniğidir. Meyve suyu üretiminde küçük molekül ağırlığındaki bileşenlerin geri kazanımı ve konsantrasyon amacıyla kullanılmaktadır (Belleville vd., 2021). NF uygulamalarında genellikle spiral, tubular ve plaka-çerçeve membran modülleri tercih edilmektedir (Firman vd., 2020).

Nanofiltrasyon işlemi ile iyonların difüzyon özelliklerine ve yüklerine göre sıvı içerisindeki düşük moleküler ağırlığa sahip çözünmüş maddeler seçici olarak ayrıştırılabilmektedir (Lu vd., 2022). Özellikle diafiltrasyon prosesi ile kombine edildiğinde NF teknolojisi ile meyve sularındaki şekerlerin %30-95 oranında uzaklaştırılması mümkündür (Gagliano vd., 2022). Diafiltrasyon, besleme solüsyonuna su veya solvent eklenerek membranda tutulan makro çözünenlerin membrandan geçen mikro çözünenlerden ayrılma derecesini arttırmaya

yönelik bir yaklaşımdır (Gagliano vd., 2022). Ancak, NF teknolojisi ile şekerlerin benzer moleküler ağırlığa sahip diğer moleküllerden seçici olarak ayrılması son derece zordur. Dolayısıyla doğal meyve sularında şekerin azaltılmasında NF teknolojisinin uygulanabilirliği membranların alıkoyma ve seçicilik özelliklerine bağlıdır. Wei ve arkadaşları (2008), elma suyunun 1 kDa MWCO membran kullanarak 4 bar basınç altında nanofiltrasyonu sonunda permeattaki şeker geri kazanımının %72 ve alıkonulan polifenollerin geri kazanımının %43 civarında olduğunu göstermiştir. Pruksasri ve arkadaşları (2020), bulanık elma suyundaki NF ile şekerin azaltılmasında fenolik madde kayıplarını minimize etmek için mekanik ön fraksiyonlama ve NF kombinasyonunu önermiştir. Çalışmada, ilk aşamada, belirli miktarda elmanın (ham maddenin %45'i) soyulması ve çekirdeğinin çıkarılmasından sonra, düşük polifenol içeriğine sahip bir meyve ham suyu (A) üretilmiştir. İkinci aşamada meyve ham suyu, NF/diafiltrasyon kombinasyonu ile berraklaştırılmıştır. Son olarak elmaların geri kalanının kabuklar ve çekirdeklerle birlikte öğütülmesi, preslenmesi ve santrifüj edilmesiyle üretilen fenolik bileşikler açısından zenginleştirilen B meyve suyuyla NF permeatı karıştırılmıştır. Bu sayede %30 daha az şeker içeren bulanık bir elma suyu elde edildiği ve asitlerin, minerallerin, antioksidan kapasitelerin ve polifenollerin kayıplarının da %11-18 düzeyinde kaldığı rapor edilmiştir. Mekanik fraksiyonlamanın biyofonksiyonel bileşik kayıplarını azaltmak için önemli bir ayırma adımı olduğu ifade edilmiştir. Gangliano ve arkadaşları (2022), ise elmaları soymadan entegre bir NF/diafiltrasyon yaklaşımını araştırmıştır. Üç farklı spiral sarımlı ticari membran kullanıldığı çalışmada, MWCO'su 200-300 Da olan ince film kompozit membran ile seçilen çalışma koşullarında şeker içeriği yaklaşık %60 oranında azaltılırken, fenolik bileşiklerin %70'inden fazlası geri kazanılmıştır.

Nanofiltrasyon geleneksel çok aşamalı termal evaporasyon işleminin bir alternatifi olarak meyve sularının konsantrasyonunda da kullanılmaktadır. Bu teknik, ters ozmoz (TO) uygulamalarına göre yaklaşık %20 daha az enerji tüketimi

sağlamaktadır (Bevilacqua vd., 2018). Ayrıca yüksek ozmotik basınç sınırlamaları dolayısıyla 25-30 °Briks seviyelerine ancak konsantrasyonun sağlanabildiği TO uygulamalarına kıyasla daha yüksek düzeylere kadar konsantrasyon NF ile sağlanabilmektedir. Ancak NF uygulamalarında kullanılan membranların alıkoyma ve seçicilik özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan organik asitler, şeker ve fenolik asitler gibi küçük molekül ağırlıklı bileşen kayıpları tek başına bu yöntemle konsantre üretiminde kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle genel olarak meyve sularının konsantrasyonunda NF teknolojisi TO ve/veya DCMD/OD (doğrudan temaslı membran distilasyon/osmotik distilasyon) ile entegre edilerek kullanılmaktadır (Sotoft vd., 2012). Zeytin posasının entegre membran prosesleri ile konsantre edildiği bir çalışmada UF, NF ve TO teknikleri birlikte kullanılmıştır. Toplam katı madde içeriğini azaltmak ve fenolik bileşikler şekerlerden ayırmak amacıyla UF ön işlemine başvurulmuş, daha sonra NF membranları kullanılarak hidroksitirosol ile vanilik ve ferulik asit gibi fenolik asitler geri kazanılmıştır. Elde edilen nanofiltrasyon permeatını konsantre etmek amacıyla TO işlemi gerçekleştirilmiş böylece saflaştırılmış fenolik bileşiklerin daha yüksek konsantrasyonda retentatta toplanmasını sağlamıştır. Çalışma sonunda yüksek katma değerli bileşiklerce zengin bir ürün eldesi gerçekleştirilmiştir (Sánchez-Arévalo vd., 2024).

Meyve sularının işlenmesinde kullanılan NF membranlarının kirlenme dinamikleri incelendiğinde, MF ve UF membranlarına kıyasla çok daha küçük por yapılarının olması dolayısıyla çoğunlukla kek direnci ve konsantrasyon polarizasyonu kirlenmeden ve performans düşüşünden sorumlu temel etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, doğal çilek suyunun 150-300 Da MWCO değerine sahip bir PVDF membranı (GE Osmonics®, Philadelphia, ABD) kullanılarak 600 kPa'da gerçekleştirilen NF ile konsantrasyonu sırasında membran kirlenme mekanizmalarının incelendiği bir çalışmada, en uygun kirlenme modelinin kek tabakası oluşumu olduğu belirlenmiştir. Ön işlem olarak 0.4 µm por çapındaki poliamid MF membranı (PAM

Selective Membranes, Rio de Janeiro, RJ, Brazil) ile berraklaştırılan örneklerde ise iç gözenek tıkanmasının membran kirlenmesinden sorumlu temel faktör olduğu belirtilmiştir (Arend vd., 2019). Cai ve arkadaşları (2021), yaban mersini suyunun NF ile konsantrasyonunda permeat akısındaki azalmayı membran yüzeyinde antosiyaninlerin, basit şekerlerin, polisakkaritlerin veya fenolik maddelerin birikimi ve konsantrasyon polarizasyonundaki artışla ilişkilendirmiştir. Çalışmada, membranda biriken kolloidal partiküllerin oluşturduğu agregasyonu ve polarizasyonu sonucu tam gözenek tıkanması olduğu rapor edilmiştir.

Ters Ozmoz

Ters ozmoz (TO), sudaki çözünmüş tuzları, kimyasal bileşenleri ve inorganik kirleticileri ayırmak amacıyla kullanılan bir membran ayırma teknolojisidir. Yüksek basınç altında çalışan bu teknoloji, tipik olarak 20 ila 65 bar arasında değişen basınçlarla, özellikle deniz suyu veya tuzlu suyu arıtma, içme suyu saflaştırma ve atık su arıtımı gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılır (Warsinger vd., 2018). TO teknolojisi yaklaşık 300 Da ve daha küçük çözünmüş maddeleri ayırıştırma yeteneği sayesinde meyve suyu endüstrisinde de önemli bir yer tutar (Zapata-Sierra vd., 2021).

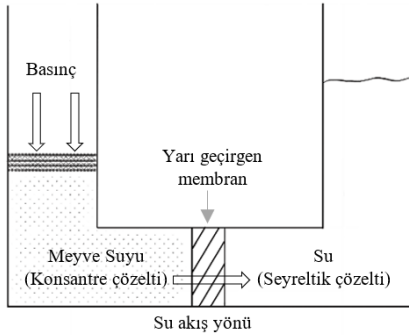
Meyve suyundan suyun uzaklaştırılmasına yönelik bir konsantrasyon tekniği olarak TO membran teknolojisi çalışmalarının kökeni, 1960'ların sonlarına kadar uzanır (Heiranian vd., 2023). Ters ozmozun endüstriyel uygulamalarında ilk önemli adım olan bu çalışmalar, Loeb ve Sourirajan tarafından anizotropik selüloz asetat membranların geliştirilmesinden sadece birkaç yıl sonra başlamıştır. O zamandan bu yana, aserola, elma, üzüm, nar, kivi, ananas, portakal suyu gibi çeşitli meyve suları, laboratuvar ölçeğinde RO teknolojisi ile konsantre edilmiştir (Cassano vd., 2020; Bağcı vd., 2020; Destani vd., 2020). RO teknolojisi, meyve sularının konsantrasyonunda kullanılan geleneksel ısı buharlaştırma yöntemlerinin aksine, suyun ayrışması için herhangi bir faz değişimi gerektirmez. Bu sayede aroma ve flavor kayıpları minimize edilerek son ürün kalitesi iyileştirilmekte ve enerji verimliliği

sağlanabilmektedir (Cassano vd., 2020; Belleville vd., 2021).

Ters ozmoz suyun, yarı geçirgen bir membran aracılığıyla, çözünen madde konsantrasyonunun düşük olduğu ortamdan yüksek olduğu ortama doğru hareket ettiği doğal bir süreç olan ozmozun tersidir (Şekil 2). Suyun çözünen madde konsantrasyonunun yüksek olduğu bölgeye hareketiyle oluşan ozmotik basınç, Gibbs termodinamik ilişkisi kullanılarak hesaplanabilir, ancak seyreltik çözeltilerde Van't Hoff yasası (eşitlik 5), ozmotik basıncın tahmin edilmesinde daha yaygın kullanılan bir modeldir. Van't Hoff Yasası'na göre ozmotik basınç, çözeltinin sıcaklığı ve çözücü içindeki çözünen madde konsantrasyonu ile doğru orantılı; çözünen maddenin moleküler ağırlığı ile ters orantılıdır.

$$\Pi = \frac{cRT}{M} \quad (5)$$

Burada, Π ozmotik basınç (kPa), c çözelti konsantrasyonu (kg/m^3), T mutlak sıcaklık (K), R gaz sabiti ($\text{kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kgmol} \cdot \text{K}$) ve M molekül ağırlıktır (kg/kgmol) (Singh ve Heldman, 2020).



Şekil 2. Ters ozmoz filtrasyon sistemi

Ters ozmoz prosesinde, suyun çözünen madde konsantrasyonunun fazla olduğu ortamdan, az olduğu ortama doğru aktarımını sağlamak için ozmotik basınçtan daha büyük bir hidrolik basınç uygulanmalıdır. Konsantrasyon süresince meyve suyundan uzaklaştırılan su ile birlikte ozmotik basınç farkı sürekli artış gösterdiğinden, TO prosesinde sürecin devamlılığını sağlamak için giderek daha yüksek seviyelerde hidrolik basınç

uygulanması zorunlu hale gelir. Ozmotik basınç sınırlaması olarak adlandırılan bu olay meyve sularının TO ile konsantrasyonunun ancak 25-30 °Brix seviyelerine kadar gerçekleştirilebilmesine neden olmaktadır. Bu kuru madde değerlerine ulaşıldığı noktadan itibaren ozmotik basınç farkı daha da artarak işlem verimliliğini azaltır ve daha yüksek basınç değerlerine ihtiyaç duyulmasına yol açar (Wenten vd., 2021). Bu nedenle meyve sularının kimyasal ve mikrobiyal stabilitenin sağlandığı 65-70 °Briks seviyelerindeki konsantrasyonunda TO, ısı evaporasyonunun neden olabileceği zararlardan kaçınmak amacıyla bir ön işlem olarak kullanılır. Berrak nar suyunun yüksek °Briks değerlerinde konsantrasyonu için ters ozmoz ve ozmotik distilasyon tekniklerinin birlikte kullanıldığı bir çalışmada poliamid ince film kompozit TO membranları kullanılmıştır. UF ile berraklaştırma, TO ile ön konsantrasyon işlemleri gerçekleştirilmiş, daha sonra nar suyu OD ile konsantre edilmiştir. Ozmotik basınç sınırlaması nedeniyle TO ile yaklaşık 18 °Briks'e çıkan nar suyu OD ile 60 °Briks'e kadar konsantre edilmiştir. Çalışma sonucunda bir ön işlem olarak TO tekniğinin kullanılmasının konsantrasyon işleminde önemli avantajlara neden olduğu belirtilmiştir (Bagcı vd., 2019).

Meyve suyu işlemede genellikle alümina, polisülfon, polietilen kompozit ve poliamid membranlar kullanılmaktadır (Do Nascimento vd., 2024). TO membranlarının tipik olarak belirgin gözeneklere sahip olmayan yoğun bir yapıya sahip olması nedeniyle TO süreçlerinde ayrıştırma çoğunlukla bir eleme etkisine değil, çözünme-difüzyon mekanizmasına dayanır (Du vd., 2023). Bu nedenle TO prosesinde suyun geçiş hızı oldukça yavaş olur ve membran boyunca önemli bir transmembran akışı elde edebilmek için yüksek transmembran basınç seviyelerine ve mümkün olduğunca ince membran yapılarına gereksinim duyulur (Singh ve Heldman, 2020). TO sırasında membran boyunca su moleküllerinin ve diğer çözünmüş maddelerin geçişi polimer zincirlerinin termal hareketiyle oluşturulan hacimsel elemanlar adı verilen mikroboşluklar aracılığıyla gerçekleşir (Tian vd., 2022). Bu serbest hacim elemanları, geçirgen maddelerin membran boyunca hareketiyle paralel

olarak sürekli olarak ortaya çıkar ve kaybolur. Dolayısıyla TO süreçlerinde ayırma mekanizması, yalnızca moleküllerin boyutuna ve şekline değil, aynı zamanda iyonik yükü ve türü gibi faktörlerle membran arasındaki spesifik etkileşimlere de bağlıdır. Bu etkileşimler, bir TO membranının çözünmüş maddeleri geri çevirme özelliklerinde önemli rol oynar (Baker, 2023).

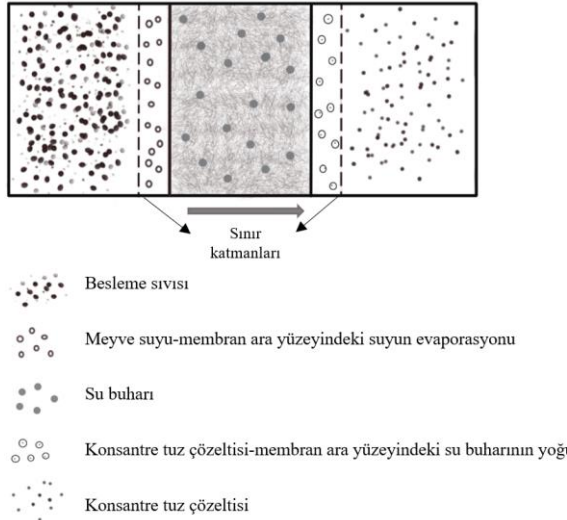
Membran kirlenmesi ters ozmoz teknolojisinin meyve suyu işlemede kullanımında karşılaşılan önemli bir problemdir. Permeat akısının hızla düşmesine neden olan kirlenme olayı, TO membran performansını olumsuz yönde etkiler ve proses verimliliğini düşürür. Kirlenme olayını ve permeat akısını etkileyen başlıca etmenler; basınç, besleme konsantrasyonu, sıcaklık ve besleme hızıdır (Idrees, 2020). Bir TO prosesinde besleme çözeltisinin membrana difüzyon hızı, çözeltinin ozmotik basıncının sabit tutulması koşuluyla, sisteme uygulanan hidrolik basınca bağlıdır. İdeal koşullar altında, permeat akışı, yani çözücünün membran üzerinden geçiş hızı, besleme basıncı ile doğru orantılıdır. Bu durum, TO sistemlerinin tasarımında ve operasyonel yönetiminde önemli bir parametre olarak kabul edilir. Ancak, gerçek operasyonda kirlenme olayı ilerledikçe membranın geçirgenliği azalır ve bu durum permeat akışının basınçtan bağımsız hale gelmesine yol açar. (Sheu ve Wiley, 1983; Liu vd., 2024). Polipropilen TO membranları kullanılarak karpuz suyunun konsantre edildiği bir çalışmada, 40 bar basınçta 30 bar değerine kıyasla daha yüksek permeat akı değerlerine ulaşılmış, basınçtaki artışın membran yüzeyi sınır tabakasındaki kütle transferini arttırdığı belirtilmiştir. Yüksek basınç değerlerinin türbülanslı akışlara neden olarak membran kirlenmesi olgusunu da azalttığı sonucuna varılmıştır (Lai Quoc vd., 2022). Aguiar ve arkadaşları (2012), elma suyunu membran teknikleri kullanarak konsantre ettiği çalışmalarında TO sırasında gözlemlenen permeat akısındaki azalışı hem kirlenme etkileri hem de ürünlerdeki suyun uzaklaştırılması ile artan ozmotik basınç ile açıklamışlardır. Meyve suyunun viskozitesinin artmasıyla birlikte kütle transferine karşı direncin de arttığını ve bu durumun membran geçirgenliği ile akısını azalttığını belirtmişlerdir. Ters ozmoz proseslerinde düşük

işletme basınçları; moleküllerin membran üzerinden geçiş hızının azalmasına, permeat akısı değerinin düşmesine, besleme sıvısında bulunan moleküllerin membran kirlenmesine katkısının artmasına ve sonuç olarak konsantrasyon oranının düşmesine neden olmaktadır (Guo vd., 2023). Sıcaklığın artışı ise işleme kapasitesini arttıran bir parametredir fakat artan sıcaklık uçucu aroma madde kayıplarını da beraberinde getirebilmektedir (Jiao vd., 2004). Ters ozmoz ile yapılan konsantrasyon çalışmasında her 1°C sıcaklık artışının işleme kapasitesini %3-4 oranında arttırdığı belirtilmiştir (Sheu ve Wiley, 1983). Kırmızı şarap konsantrelerinin TO ve NF membranları kullanılarak elde edildiği bir çalışmada sıcaklık ve basınç değerlerinin etkileri değerlendirilmiştir. Yüksek basınç değerleri şekerlerin ve aroma bileşiklerinin tutulmasını sağlarken yüksek sıcaklık, aroma bileşenleri kayıplarına neden olmuştur. Ancak sıcaklık değerinin yükselmesi, besleme sıvısının viskozitesinin azalmasını sağlamış ve daha yüksek geçirgenlik akı değerleri elde edilmesi ile sonuçlanmıştır (Shigidi vd., 2021). Elma suyunun TO membranları ile konsantrasyon sürecinin optimize edildiği bir çalışmada besleme akış hızının işleme olan etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda besleme akış hızındaki artışın konsantrasyon polarizasyonu oluşumunu azalttığı ve permeat akısını arttırdığı gözlemlenmiş, yüksek akış hızı değerlerinde besleme kanalının ozmotik basıncın azalmasına bağlı olarak membrandan geçen çözünen madde akışını azalttığı belirtilmiştir (Al-Obaidi vd., 2017).

Ozmotik Distilasyon

Atmosferik basınç ve oda sıcaklığı koşullarında, hidrolik basınca gereksinim duyulmadan yüksek °Briks değerlerinde konsantre üretimine olanak sağlayan ozmotik distilasyon (OD) meyve sularının konsantrasyonunda en etkili ve güncel membran ayırma tekniği olarak bilinmektedir. İzotermal membran distilasyon, ozmotik evaporasyon veya gaz membran ekstraksiyon adlarıyla da anılan OD tekniğinde mikrogözenekli bir membran ile birbirinden ayrılan besleme çözeltisi ile hipertonic tuz çözeltisi arasındaki buhar basıncı farkı, su buharının besleme çözeltisinden hipertonic tuz çözeltisine doğru

transferi için itici güç sağlar (Yılmaz, 2019). TO gibi basınç tahrikli membran tekniklerinin aksine itici gücün hidrolik basınç farkı değil, su buharı basıncı farkı olması meyve sularının OD ile konsantrasyonunda 65 °Briks değerinin üzerine çıkabilmesine olanak tanır (Yılmaz, 2019). OD sisteminde su buharının membran boyunca transferi şematik olarak Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Ozmotik distilasyon sisteminin şematik gösterimi (Onsekizoğlu'dan adapte edilmiştir, 2010)

İzotermal koşullar altında meyve suyunun konsantre tuzlu su çözeltisi ile konsantre edildiği sistemde membranın hidrofobik yapısı sayesinde su, gözenekler içerisine girememektedir (Conidi vd., 2020). Hidrofobikliğin yanı sıra OD prosesi için kullanılacak olan mikrogözenekli membranlar aynı zamanda iyi termal ve kimyasal dayanıma, sıcaklık polarizasyonunu aza indirmek için iyi ısı iletkenliğe ve mekanik özelliklere sahip olmalıdır (Onsekizoğlu, 2012). Literatürde meyve sularının OD ile konsantrasyonu çalışmalarında genellikle PE, PTFE, PP ve PVDF gibi düşük yüzey serbest enerjili tipik polimerler membranlar içi boş fiber ve plaka çerçeve gibi konfigürasyonlarda tercih edilmiştir (Conidi vd., 2020).

Meyve suları OD ile atmosferik basınç altında ve oda sıcaklığında konsantre edilebildiğinden termal evaporasyonda karşılaşılan kalite kayıplarının büyük ölçüde önüne geçilebilmektedir. Termal

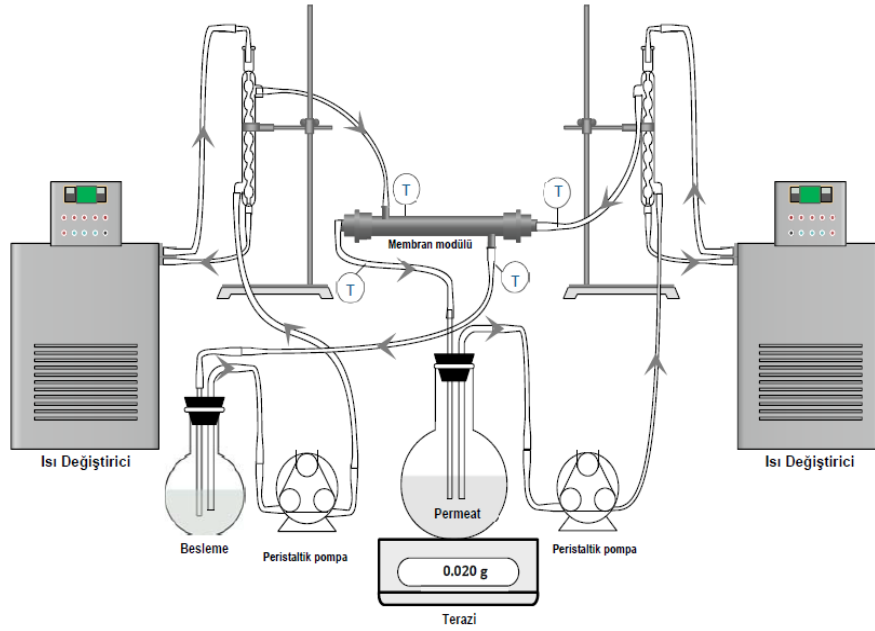
veya vakum evaporasyon ile konsantrasyon işlemlerinde renk bozulmaları ve uçucu aroma bileşenlerin kayıpları gerçekleşebilmektedir (Kaynarcalıdan, 2022). OD sürecinde kullanılan hipertonik tuz çözeltisinde lipofilik karakterdeki aroma bileşenlerinin çözünürlüğünün düşük olması da aroma madde kayıplarını sınırlandıran ve organoleptik özelliklerinin korunmasını sağlayan önemli bir faktördür (Kahvecioğlu, 2019; Roozitalab vd., 2019). Rosella özütü, üzüm ve elma sularının pilot ölçekli hidrofobik ve polipropilen OD membranı ile konsantre edildiği bir çalışmada aroma kayıpları rosella özütü, üzüm ve elma sularında sırasıyla yaklaşık olarak %1-27, %6-31 ve %12-46 aralığında değişmekteyken, vakum buharlaştırma tekniğinde sırasıyla %21-79, %32-100 ve %71-100 aralıklarında olduğu belirtilmiştir (Cissé vd., 2011).

OD sistem performansını etkileyen operasyonel parametreler, beslemenin ve permeatın konsantrasyonları, sıcaklıkları, akış hızları ve kullanılan hipertonik tuz çözeltisinin türü olarak sıralanabilir. Beslemenin sıcaklığındaki artış ve permeatın sıcaklığındaki azalış OD için itici güç olan transmembran buhar basıncı farkının artmasına neden olur. Ananas suyunun OD ile konsantre edildiği bir çalışmada meyve suyu sıcaklığının 15°C kadar artırılması buharlaşma akışını yaklaşık iki kata kadar çıkarmıştır. (Hongvaleerat vd., 2008). OD tekniğinde çalışma koşullarının sistem performansına etkilerinin incelendiği bir çalışmada ise tuzlu veya şekerli çözeltilerin kütle aktarımını etkileyen en önemli etken olduğu belirtilmiştir. Besleme çözeltisinin viskozitesinde meydana gelen artışın, su akışında azalmaya ve konsantrasyon polarizasyona neden olduğu çeşitli çalışmalarla desteklenmiştir (Rehman vd., 2019). Farklı tuzlu su çözeltisi kullanımının OD sistem performansı üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada ise greylift suyu PVDF ve hidrofobik membranlar kullanılarak konsantre edilmiştir. Konsantrasyon performansı CaCl_2 ve yüksek ozmotik basınç üretme potansiyeline sahip AlCl_3 ve LiCl tuzlu çözeltileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Tuzlu su ağırlığındaki en az artış gösteren koşullarda, akış hızlarının en yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Deney sonunda AlCl_3

çok sayıda iyon içerdiğinden ve LiCl yüksek doygunlukta konsantre bir çözelti olduğundan greyluft sularının konsantrasyonunda daha verimli sonuçların elde edildiği belirtilmiştir (Takallu vd., 2022). OD sırasında gözlemlenen akı düşüşü ise ozmotik çözelti konsantrasyonundaki azalışından veya yüksek °Briks değerinin üzerine

çıkıldığı zaman gerçekleşen meyve suyu viskozitesindeki artışından kaynaklandığı belirtilmiştir (Onsekizoglu, 2010).

OD tekniğinin laboratuvar ölçekli deneysel şeması Şekil 4'te gösterilmiş olup, membrana giriş ve çıkış hatları şekil üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 4. Ozmotik distilasyon düzeneğinin laboratuvar ölçekli şematik gösterimi (Yılmaz ve Bağcı, 2018)

Ozmotik distilasyon sisteminin kullanımda meyve sularındaki biyoaktif bileşenlerin korunması çeşitli çalışmalara konu olmaktadır (Liguori vd., 2021; Kumar vd., 2022). Brokoli suyundaki ısıya duyarlı biyoaktif bileşenlerin geri kazanılmasına yönelik membran tekniklerinin kullanıldığı bir çalışmada ekstraksiyon işlemi UF, konsantrasyon işlemi ise OD ile gerçekleştirilmiştir. UF membranlarından elde edilen permeatta ve OD ile yaklaşık 6 kat konsantre edilen örneklerde biyoaktif bileşiklerin ve toplam antioksidan aktivitenin önemli ölçüde korunduğu belirtilmiştir (Yılmaz, 2019). Mandalina suyunun OD ile konsantrasyonu işlemi öncesinde UF ile berraklaştırmanın yapıldığı bir diğer çalışmada ise meyve suyu 9°Briks'den 60.4°Briks değerine kadar konsantre edilmiştir. UF ve OD sonrası elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında antioksidan aktivite ve toplam fenolik madde miktarının OD örneklerinde en

yüksek seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir. Deney sonucunda UF ve OD sistemlerinin birlikte kullanımının geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli sonuçlara neden olduğu belirtilmiştir (Kumar vd., 2020). Vilar ve arkadaşlarının (2025), böğürtlen suyunun ozmotik distilasyonla konsantrasyonunun fizikokimyasal özellikler üzerindeki etkilerini incelediği çalışmada; MF, TO ve OD teknikleri entegre şekilde uygulanmıştır. Ön işlem olarak gerçekleştirilen MF, berraklaştırma amacıyla kullanılmış; ardından TO ve OD teknikleri birlikte kullanılarak 55.5 °Briks'e ulaşan bir konsantre elde edilmiştir. Bu işlem sonucunda, konsantre böğürtlen suyunun antosiyanin içeriği ve antioksidan kapasitesi, beslemeye kıyasla sırasıyla 6.2 ve 7.7 kat artış gösterdiği belirtilmiştir (Vilar vd., 2025). Ancak bu değerlendirmelerde konsantrasyon faktörü de göz önünde bulundurulmalıdır.

Pervaporasyon

Meyve suyu üretiminde meyvenin kendine has aromasının korunması son ürünün kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle konsantrasyon aşamasında uygulanan termal evaporasyon işlemi sırasında alkoller ve aldehitler gibi uçucu nitelikteki aroma bileşenleri kayıpları sıkça gözlenmektedir. Bu kayıpları minimize etmek amacıyla konsantrasyon öncesinde buhar damıtma, kısmi yoğunlaştırma veya sıvı solvent ekstraksiyonu gibi aroma ayırma işlemleri uygulanmaktadır (Berk ve Gökmen, 2024). Ancak bu yöntemler hedef moleküllerin kararlılığını olumsuz yönde etkileyerek aroma geri kazanım verimliliğini düşürebilir (Castro-Muñoz vd., 2023). Sıvı çözeltilerde seyreltik türlerin ayrımı için termal olmayan alternatif membran uygulaması olarak ortaya çıkan pervaporasyon (PV), meyve sularından aroma bileşenlerinin yüksek seçicilikte ayrımına olanak sağlayan yüksek enerji verimliliğine sahip bir tekniktir (Bağcı, 2021). Düşük miktarda enerji tüketimi, kimyasal kullanımına gerek duyulmaması, kontaminasyon riskinin olmaması ve düşük maliyetli olması PV tekniğinin avantajlarından. Dezavantajları ise uzun işlem süreleri, besleme sıvısının saflaştırılması gerekliliği ve membran kirlenmelerinin neden olduğu işletme maliyetleri olarak sıralanabilmektedir (Rochón vd., 2020).

“Permeasyon” ve “evaporasyon” terimlerinden yola çıkarak 1917 yılında Kober tarafından tanımlanan PV tekniği, sıvı karışımları seçici geçirgen bir membran kullanarak kısmi buharlaştırma yoluyla ayrıştırabilen bir ayırma tekniğidir (Tofighy ve Mohammadi, 2020). Pervaporasyonda sıvı besleme membranın seçici yüzeyi ile temas ettirilir ve kimyasal potansiyel farkı itici kuvvetiyle membran içinden geçen maddeler diğer yüzeyden buhar olarak uzaklaştırılır. Uygulamada bu fark, vakum uygulanarak, taşıyıcı gaz beslenmesi yapılarak veya sıcaklık farkıyla permeat tarafındaki buhar basıncının azaltılmasıyla yaratılır (Castro-Muñoz vd., 2023). Her durumda da buhar fazında membranı geçen permeat bir yoğunlaştırıcı vasıtasıyla sıvıya dönüştürülür. Sistemde, çözelti-difüzyon modeline göre üç aşamalı kütle aktarımı söz konusudur: (1) Hedef bileşenin, kimyasal

afiniteye dayalı olarak membranın seçici katmanına adsorpsiyonu, (2) konsantrasyon gradyanı nedeniyle bileşenin membran boyunca difüzyonu, (3) Bileşenin, membran/permeat ara yüzeyinde desorpsiyonu (Conidi, vd., 2020; Wang vd., 2024).

PV teknolojisinde hedef bileşenlerle olan kimyasal afiniteye dayalı olarak seçici bir bariyer işlevi gören membran, sürecin ayırım performansını etkileyen en kritik bileşendir. Membranın seçiciliği meyve suyu gibi sıvı karışımlardan aroma bileşenlerinin ayrılmasında etkin rol oynar (Castro-Muñoz vd., 2023). Genel olarak, hidrofobik membranlar daha az polar veya apolar moleküllerin taşınmasına daha uygun olup, özellikle alkoller, aldehitler ve esterler gibi aroma bileşenlerinin geri kazanımında tercih edilirken, hidrofilik membranlar su ve yüksek polariteye sahip moleküllerin taşınmasını kolaylaştırır (Liv vd., 2020; Silvestre vd., 2019). Bu nedenle, aroma bileşenlerinin etkin bir şekilde ayrılması için doğru membran seçimi, pervaporasyon sürecinde kritik öneme sahiptir. PV sistemlerinde genellikle organofilik kompozit asimetric membranlar tercih edilmekte olup, polidimetilsiloksan (PDMS), PV yoluyla ile meyve sularındaki aroma maddelerinin geri kazanımı konusunda mevcut literatür çalışmalarında açık ara en çok kullanılan malzemedir (Paredes vd., 2024; Rao vd., 2020; Sun vd., 2020).

PV işleminin verimliliğini etkileyen temel operasyonel parametreler besleme sıcaklığı ve süzüntü basıncıdır. Besleme sıcaklığındaki artış, amorf bölgedeki polimer zincirlerinin termal hareketliliğini artırarak daha fazla serbest hacim yaratır; dolayısıyla aroma bileşiklerinin membran boyunca difüzyon hızı artar (Wang vd., 2024). Sıcaklık artışı ile birlikte aroma bileşenlerinin denge buhar basıncının yükselmesi de permeat akısındaki artışa katkı sağlayan bir diğer faktördür (Du vd., 2021). Pereira ve arkadaşlarının (2005), böğürtlen suyundan uçucu aroma maddelerinin PVDF PV membranı kullanılarak ayrıldığı bir çalışmada, sıcaklığın sistem performansı üzerine etkisi Arrhenius denkliği kullanılarak incelenmiş, aktivasyon enerjisi arttıkça akı değerlerinin de doğru orantılı olarak arttığı belirtilmiştir (Rao vd., 2020). Diğer taraftan, yüksek sıcaklıklar membran

seçiciliğini olumsuz yönde etkileyebilir (Soares vd., 2020). Örneğin, taze nar suyundaki ve model çözeltideki (aldehit, ester, alkol ve terpen yapılarındaki dört farklı aroma bileşiğinden oluşan) aroma bileşenlerinin plaka çerçeve PV modülünde iki farklı kompozit membran türü ile geri kazanımının karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışmada kullanılan her iki kompozit membranda da yüksek akı değerine ulaşıldığı ve daha düşük zenginleştirme faktörlerine erişilebildiği belirtilmiştir. (Raisi vd., 2008). Dolayısıyla, PV işleminin optimum performansı için besleme sıcaklığının dikkatlice kontrol edilmesi gerekir. PV işleminde, süzüntü tarafındaki basınç da aroma bileşiklerinin geri kazanım verimliliğini önemli ölçüde etkiler. Süzüntü tarafındaki basınç arttığında membran boyunca kısmi basınç farkı azalır. Bu durum aroma maddelerinin taşınımı için membran boyunca itici gücün azalmasına yol açar (Wang vd., 2024; Pereire vd., 2005). Bununla beraber süzüntü basıncının PV ile aroma maddelerinin geri kazanıma etkisi ayrımı yapılacak aroma maddelerinin uçuculuk derecesi ile doğrudan ilişkilidir. Genel olarak, düşük doymuş buhar basıncına sahip alkoller yüksek doymuş buhar basıncına sahip esterlere kıyasla süzüntü basıncındaki değişikliklere daha duyarlıdır (Li vd., 2020). Örneğin, portakal suyundan uçucu aroma bileşiklerinin ticari bir polidimetilsiloksan (PDMS) membranı kullanılarak PV ile geri kazanımı sürecinde süzüntü basıncındaki artışın, limonen, linalool ve a-terpineol gibi bazı aroma bileşiklerinin zenginleştirme faktöründe hafif bir düşüşe neden olduğu, buna karşılık, etil asetat, etil bütirat ve hekzanal gibi bazı aroma bileşiklerinin zenginleştirme faktörlerinin süzüntü basıncının artmasıyla arttığı rapor edilmiştir (Aroujalian ve Raisi, 2007). Aroma maddelerinin uçuculuklarındaki farklılıklar göz önünde bulundurularak süzüntünün aroma profili süzüntü basıncı ile kontrol edilebilir (Wang vd., 2024). Portakal suyu endüstrisinin organik atıklarının değerlendirildiği bir çalışmada enerji tasarrufu sağlamak amacıyla sisteme pervaporasyon işlemi entegre edilmiştir. Pervaporasyon membranlarıyla damıtma kolonunu birleştirerek etanol geri kazanım sürecinin iyileştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada kolondan %99,9 oranında etanol

geri kazanımı sağlanabilmiştir. Pervaporasyonla desteklenen entegre sistem sayesinde enerji ve su tüketimini minimize edilirken; susuz etanol gibi yüksek katma değerli ürünler geri kazanılabilmektedir. Bu yaklaşımın endüstriyel üretimde atıkların değerlendirilmesinde ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilir çözümler sunduğu belirtilmiştir (Marchette vd., 2025).

SONUÇ

Meyve suyu üretim süreçlerinde ürünün kalitesinin ve besin öğelerinin korunması özellikle termal bazlı konsantrasyon işlemleri gibi geleneksel uygulamalarda önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Bu tür işlemler, yüksek sıcaklıkların etkisiyle “pişmiş tat” oluşumuna sebep olmakta ve organoleptik özellikleri olumsuz yönde etkilemekte; aynı zamanda ürünün besinsel kalitesinin düşmesine yol açmaktadır. Buna karşın, membran ayırma teknikleri düşük sıcaklık gereksinimleri, düşük enerji tüketimi, gelişmiş ürün kalitesi, yüksek verimlilik ve atıkların azaltılması gibi avantajları sayesinde sürdürülebilir üretim hedeflerine ulaşmada umut verici bir alternatif olarak görülmektedir. Meyve suyu üretiminde MF veya UF teknikleri berraklaştırma aşamasında kullanılan geleneksel depektinizasyon ve berraklaştırma aşamalarına alternatif olarak yaygın olarak tercih edilirken, NF, TO ve OD teknikleri geleneksel termal evaporasyona kıyasla ürün kalitesinin daha iyi korunması ve enerji verimliliği gibi avantajlarıyla giderek popülerleşmekte ve endüstriyel boyuttaki üretimlerde de yaygınlaşmaktadır. Aroma geri kazanımı veya aroma bileşenlerinin konsantrasyon edilmesinde ise PV tekniğinin kullanımı ile olumlu sonuçlar elde edilmektedir. Ancak membran ayırma tekniklerinde kullanılan membranların yüzeyinde ve gözeneklerinde partikül birikimi dolayısıyla ortaya çıkan ve sistem performansının azalmasına neden olan “kirlenme olayı” ve sınırlı membran dayanıklılığı gibi problemler membran bazlı ayırma teknolojilerinin endüstride kullanımını sınırlandırmaktadır. Membran modül konfigürasyonlarının ve membran materyalinin doğru seçimi, operasyonel parametrelerin işletim ve akışkan dinamiği bağlamında optimizasyonu, meyve suyuna uygulanan önfloklaştırma gibi ön işlemler gibi süreç mühendisliği yaklaşımları

kirlenme ve membran ömrü ile ilgili yapısal sınırlamaların üstesinden gelmek için temel faktörler olarak görülmektedir. Membran yüzeylerinin modifikasyonu, yeni nesil membran tasarımları, yapay zekâ destekli süreçlerin kullanımı, ultrason ve entegre membran prosesleri meyve suyu endüstrisindeki uygulamalarda kirlenmenin sınırlandırılması için yeni stratejilerdir. Membran kirlenmesi olayının kontrol edilerek membran ömrünün uzatılmasına yönelik bahsedilen stratejiler sayesinde pilot ölçekli modellerden endüstriyel boyuttaki sistemlere daha hızlı bir geçiş yapılabilecektir. Membran bazlı ayırma tekniklerinin entegrasyonuna yönelik yaklaşımlar özellikle meyve sularının konsantrasyonunda yüksek verimlilikle taze meyve suyu karakteristiklerinin büyük ölçüde korunması bakımından dikkat çekmektedir. Entegre membran ayırma sistemleri, meyve suyu endüstrisi atıklarındaki değerli biyoaktif bileşenlerin yüksek seçicilik ve verimlilikle geri kazanımı ve katma değerli ürün eldesinde de sürdürülebilir ve çevre dostu bir yaklaşım olarak önemli bir potansiyele sahiptir. Bu doğrultuda pazardaki hızlı büyüme potansiyeli, sanayideki giderek artan uygulanabilirliği ve gelecekteki teknolojik yeniliklerle birleşerek meyve suyu endüstrisinde sürdürülebilir, verimli ve kaliteli üretim süreçlerinin yaygınlaşması beklenmektedir.

YAZAR KATKILARI

Tüm yazarlar makalenin hazırlanması, yazımı ve yayınlanmasına katkıda bulunmuşlardır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

KAYNAKLAR

Abdullah, S., Karmakar, S., Mishra, S., Pradhan, R. C. (2022). Ultrafiltration of cashew apple juice using hollow fibers for shelf life extension: process optimization, flux modelling and storage study. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-11.

Aguir, I. B., Miranda, N. G., Gomes, F. S., Santos, M. C., de GC Freitas, D., Tonon, R. V., Cabral, L. M. (2012). Physicochemical and

sensory properties of apple juice concentrated by reverse osmosis and osmotic evaporation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 137-142.

Al-Obaidi, M. A., Kara-Zaitri, C., Mujtaba, I. M. (2017). Optimum design of a multi-stage reverse osmosis process for the production of highly concentrated apple juice. *Journal of Food Engineering*, 214, 47-59.

Apaydın, A.S. (2024). Aronya suyunun polietersülfon (PES) ultrafiltrasyon membranları ile berraklaştırılması ve membran kirlenme mekanizmalarının incelenmesi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Apel, P. Y., Biesheuvel, P. M., Bobreshova, O. V., Borisov, I. L., Vasil'eva, V. I., Volkov, V. V., ... Yaroslavl'tsev, A. B. (2024). Concentration polarization in membrane systems. *Membranes and Membrane Technologies*, 6(3), 133-161.

Arend, G. D., Rezzadori, K., Soares, L. S., Petrus, J. C. C. (2019). Performance of nanofiltration process during concentration of strawberry juice. *Journal of food science and technology*, 56, 2312-2319.

Aroujalian, A., Raisi, A. (2007). Recovery of volatile aroma components from orange juice by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 303(1-2), 154-161.

Bağcı, P. O. (2014). Effective clarification of pomegranate juice: A comparative study of pretreatment methods and their influence on ultrafiltration flux. *Journal of Food Engineering*, 141, 58-64.

Bağcı, P. O. (2021). Integrated membrane processes in pomegranate juice processing. *Membrane Systems in the Food Production: Volume 2: Wellness Ingredients and Juice Processing*, 207.

Bagci, P. O., Akbas, M., Gulec, H. A., Bagci, U. (2019). Coupling reverse osmosis and osmotic distillation for clarified pomegranate juice concentration: Use of plasma modified reverse osmosis membranes for improved

- performance. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 213-220.
- Bagci, P. O., Kahvecioglu, H., Gulec, H. A., Bagci, U. (2020). Pomegranate juice concentration through the consecutive application of a plasma modified reverse osmosis membrane and a membrane contactor. *Food and Bioproducts Processing*, 124, 233-243.
- Baker, R. W. (2023). *Membrane technology and applications*. John Wiley & Sons.
- Belleville, M. P., Sanchez-Marcano, J., Bargeman, G., Timmer, M. (2021). Nanofiltration in the food industry. *Nanofiltration: Principles, Applications, and New Materials*, 2, 499-542.
- Berk, E., Gökmen, V. (2024). Evaporation in the fruit juice industry. In *Evaporation Technology in Food Processing* (pp. 105-136). Woodhead Publishing.
- Bevilacqua, A., Petruzzi, L., Perricone, M., Speranza, B., Campaniello, D., Sinigaglia, M., Corbo, M. R. (2018). Nonthermal technologies for fruit and vegetable juices and beverages: Overview and advances. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(1), 2-62.
- Biniáz, P., Rahimpour, E., Basile, A., Rahimpour, M. R. (2022). Fundamentals of membrane technology. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 1-23). Elsevier.
- Cai, M., Xie, C., Zhong, H., Tian, B., Yang, K. (2021). Identification of anthocyanins and their fouling mechanisms during non-thermal nanofiltration of blueberry aqueous extracts. *Membranes*, 11(3), 200.
- Cassano, A., Conidi, C., Drioli, E. (2020). A comprehensive review of membrane distillation and osmotic distillation in agro-food applications. *Journal of Membrane Science and Research*, 6(3), 304-318.
- Cassano, A., Donato, L., Drioli, E. (2007). 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. (2007). Clarification of blood orange juice by ultrafiltration: analyses of operating parameters, membrane fouling and juice quality. *Desalination*, 212 (1-3), 15-27.
- Cassano, A., Rastogi, N. K., Basile, A. (2020). Reverse osmosis in food processing. In *Current trends and future developments on (bio-) membranes* (pp. 229-257). Elsevier.
- Castro-Muñoz, R., Ahmad, M. Z., Cassano, A. (2023). Pervaporation-aided processes for the selective separation of aromas, fragrances and essential (AFE) solutes from agro-food products and wastes. *Food Reviews International*, 39(3), 1499-1525.
- Castro-Muñoz, R., Boczkaj, G., Gontarek, E., Cassano, A., Fila, V. (2020). Membrane technologies assisting plant-based and agro-food by-products processing: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 219-232.
- Charcosset, C. (2021). Classical and recent applications of membrane processes in the food industry. *Food Engineering Reviews*, 13(2), 322-343.
- Chew, J. W., Kilduff, J., Belfort, G. (2020). The behavior of suspensions and macromolecular solutions in crossflow microfiltration: An update. *Journal of Membrane Science*, 601, 117865.
- Cissé, M., Vaillant, F., Bouquet, S., Pallet, D., Lutin, F., Reynes, M., Dornier, M. (2011). Athermal concentration by osmotic evaporation of roselle extract, apple and grape juices and impact on quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 12(3), 352-360.
- Conidi, C., Castro-Muñoz, R., Cassano, A. (2020). Membrane-based operations in the fruit juice processing industry: A review. *Beverages*, 6(1), 18.
- Conidi, C., Drioli, E., Cassano, A. (2020). Perspective of membrane technology in pomegranate juice processing: a review. *Foods*, 9(7), 889.
- Corbatón-Báguena, M. J., Vincent-Vela, M. C., Gozálvarez-Zafrilla, J. M., Álvarez-Blanco, S., Lora-García, J., Catalán-Martínez, D. (2016).

- Comparison between artificial neural networks and Hermia's models to assess ultrafiltration performance. *Separation and Purification Technology*, 170, 434-444.
- Cui, Z. F., Muralidhara, H. S. (2010). Membrane technology: a practical guide to membrane technology and applications in food and bioprocessing. Elsevier.
- De Barros, S. T. D., Andrade, C. M. G., Mendes, E. S., Peres, L. (2003). Study of fouling mechanism in pineapple juice clarification by ultrafiltration. *Journal of membrane Science*, 215(1-2), 213-224.
- Demoulin, C., Wisniewski, C., Ricci, J., Delalonde, M., Dahdouh, L. (2022). Viscoelastic behavior and fouling propensity of concentrated suspended particles of orange juice with defined size distributions: Towards a better control of the deposit layer properties during microfiltration. *LWT*, 153, 112473.
- Destani, F., Naccarato, A., Tagarelli, A., Cassano, A. (2020). Recovery of aromatics from orange juice evaporator condensate streams by reverse osmosis. *Membranes*, 10(5), 92.
- Díaz-Montes, E., Castro-Muñoz, R. (2019). Metabolites recovery from fermentation broths via pressure-driven membrane processes. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 14(4), e2332.
- Do Nascimento, N. N., Paraíso, C. M., Molina, L. C., Dzyazko, Y. S., Bergamasco, R., Vieira, A. M. S. (2024). Innovative Trends in Modified Membranes: A Mini Review of Applications and Challenges in the Food Sector. *Membranes*, 14(10), 209.
- Du, C., Du, J. R., Feng, X., Wang, J. (2021). Green extraction of perilla volatile organic compounds by pervaporation. *Separation and Purification Technology*, 261, 118281.
- Du, S., Zhao, P., Wang, L., He, G., Jiang, X. (2023). Progresses of advanced anti-fouling membrane and membrane processes for high salinity wastewater treatment. *Results in Engineering*, 17, 100995.
- Field, R. W., Wu, J. J. (2022). Permeate Flux in Ultrafiltration Processes—Understandings and Misunderstandings. *Membranes*, 12(2), 187.
- Firman, L. R., Ochoa, N. A., Marchese, J., Pagliero, C. (2020). Designing of spiral wound nanofiltration multistage process for oil concentration and solvent recovery from soybean oil/n-hexane miscella. *Chemical Engineering Research and Design*, 164, 46-58.
- Gaglianò, M., Conidi, C., De Luca, G., Cassano, A. (2022). Partial removal of sugar from apple juice by nanofiltration and discontinuous diafiltration. *Membranes*, 12(7), 712.
- Ghosh, P., Pradhan, R. C., Mishra, S. (2018). Clarification of jamun juice by centrifugation and microfiltration: Analysis of quality parameters, operating conditions, and resistance. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), e12603.
- Guo, P., Abdollahpour, A., Jazbizadeh, M. H., Semiromi, D. T. (2023). The amount of improvement and therapeutic effect of sports health by increasing the viscosity of peach juice through reverse osmosis and polymer membrane. *Food Bioscience*, 56, 103330.
- Heiranian, M., Fan, H., Wang, L., Lu, X., Elimelech, M. (2023). Mechanisms and models for water transport in reverse osmosis membranes: history, critical assessment, and recent developments. *Chemical Society Reviews*.
- Hongvaleerat, C., Cabral, L. M., Dornier, M., Reynes, M., Ningsanond, S. (2008). Concentration of pineapple juice by osmotic evaporation. *Journal of Food Engineering*, 88(4), 548-552.
- Hua, L., Cao, H., Ma, Q., Shi, X., Zhang, X., Zhang, W. (2020). Microalgae filtration using an electrochemically reactive ceramic membrane: Filtration performances, fouling kinetics, and foulant layer characteristics. *Environmental Science & Technology*, 54(3), 2012-2021.
- Idrees, M. F. (2020). Performance analysis and treatment technologies of reverse osmosis plant—a case study. *Case studies in Chemical and environmental engineering*, 2, 100007.

- Ilame, S. A., Singh, S. V. (2018). Physico-chemical properties of ultrafiltered kinnow (mandarin) fruit juice. *Journal of food science and technology*, 55, 2189-2196.
- Jiao, B., Cassano, A., Drioli, E. (2004). Recent advances on membrane processes for the concentration of fruit juices: a review. *Journal of food engineering*, 63(3), 303-324.
- Kahvecioğlu, H. (2019). Ters ozmoz ve ozmotik distilasyon yöntemleriyle oda sıcaklığında nar suyu konsantresi üretimi. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Kapi, Y. (2021). Stevia ekstraktlarının saflaştırma aşamalarında fonksiyonel bileşiklerin değişiminin saptanması.
- Kaushal, J., Khatri, M., Singh, G., Arya, S. K. (2021). A multifaceted enzyme conspicuous in fruit juice clarification: An elaborate review on xylanase. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 1350-1361.
- Kaynarcalıdan, S. (2022). *Ozmotik distilasyon yöntemi ile ısı olmayan koşullarda nar ekşisi üretimi* (Master's thesis, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kumar, D., Ladaniya, M. S., Gurjar, M., Mendke, S., Kumar, S. (2020). Osmotic membrane distillation for retention of antioxidant potential in Nagpur mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) fruit juice concentrate. *Journal of Food Process Engineering*, 43(1), e13096.
- Kumar, D., Ladaniya, M. S., Gurjar, M., Mendke, S., Kumar, S. (2022). Positive retention of bioactive compounds and biochemical components of Sathgudi sweet orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) juice concentrate by integrated membrane process. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 4161-4170.
- Lai Quoc, D., Doan Ngoc Thuc, T., Nguyen Hoang, D. (2022). Flux decline and fouling analysis in reverse osmosis of watermelon juice. *Journal of Food Process Engineering*, 45(12), e14183.
- Li, W., Estager, J., Monbaliu, J. C. M., Debecker, D. P., Luis, P. (2020). Separation of bio-based chemicals using pervaporation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(9), 2311-2334.
- Li, X., Younas, M., Rezakazemi, M., Ly, Q. V., Li, J. (2022). A review on hollow fiber membrane module towards high separation efficiency: process modeling in fouling perspective. *Chinese Chemical Letters*, 33(8), 3594-3602.
- Liguori, L., Russo, P., Albanese, D. (2021). Production of highly valued vegetable juice by osmotic distillation technique: Optimization of process parameters. *Chemical Engineering Transactions*, 87, 331-336.
- Liu, W., Livingston, J. L., Wang, L., Wang, Z., del Cerro, M., Younssi, S. A., ... Lin, S. (2024). Pressure-driven membrane desalination. *Nature Reviews Methods Primers*, 4(1), 10.
- Lu, C., Bao, Y., Huang, J. Y. (2021). Fouling in membrane filtration for juice processing. *Current Opinion in Food Science*, 42, 76-85.
- Lu, D., Yao, Z., Jiao, L., Waheed, M., Sun, Z., Zhang, L. (2022). Separation mechanism, selectivity enhancement strategies and advanced materials for mono-/multivalent ion-selective nanofiltration membrane. *Advanced Membranes*, 2, 100032.
- Ma, Z., Noor, I. I., Wang, X., Ren, Y., Wang, J., Wang, Q., ... Liu, H. (2024). A comprehensive review on the recent advances in membrane-based processes for fruit juice concentration. *Food and Bioproducts Processing*.
- Marchette, I. R., Cavallari, R. B. C., Rothier, F. D. C., Bojorge, N. I. B. R., Alhadeff, E. M., Young, A. F., dos Santos, B. F. (2025). Economic assessment and process design to valorize citrus juice industry waste. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
- Martín, J., Díaz-Montaña, E. J., Asuero, A. G. (2018). Recovery of anthocyanins using membrane technologies: a review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 48(3), 143-175.
- Meher, J., Durairaj, S., Dharmadhikari, S., Meher, R. (2023). Future Scope of Membrane Technology in Pineapple Juice Processing: A Review. *Membrane and Membrane-Based Processes for Wastewater Treatment*, 181-197.

- Mejia, J. A. A., Yáñez-Fernandez, J. (2021). Clarification processes of orange prickly pear juice (*Opuntia* spp.) by microfiltration. *Membranes*, 11(5), 354.
- Miramontes-Escobar, H. A., Hengl, N., Dornier, M., Montalvo-González, E., Chacón-López, M. A., Achir, N., ... Ortiz-Basurto, R. I. (2024). Coupling Low-Frequency Ultrasound to a Crossflow Microfiltration Pilot: Effect of Ultrasonic Pulse Application on Sono-Microfiltration of Jackfruit Juice. *Membranes*, 14(9), 192.
- Mondal, S., Cassano, A., Conidi, C., De, S. (2021). Quantification of selective transport of fructose and glucose during membrane filtration of pomegranate juice. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 272-286.
- Nacem, A., Saeed, B., AlMohamadi, H., Lee, M., Gilani, M. A., Nawaz, R., ... Yasin, M. (2024). Sustainable and green membranes for chemical separations: A review. *Separation and Purification Technology*, 126271.
- Onsekizoğlu, P. (2010). Elma suyu üretiminde ozmotik destilasyon ve membran destilasyon uygulamalarının ürün kalitesine etkileri. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 150-163.
- Onsekizoğlu, P. (2012). Membran distilasyon ve ozmotik distilasyon ile meyve suyu konsantrasyonu. *Gıda*, 37(2), 103-110.
- Othman, M. H. D., Adam, M. R., Pauzan, M. A. B., Hubadillah, S. K., Rahman, M. A., Jaafar, J. (2020). Ultrafiltration Membrane for Water Treatment. *Self-standing Substrates: Materials and Applications*, 119-145.
- Panigrahi, C., Shaikh, A. E. Y., Bag, B. B., Mishra, H. N., De, S. (2021). A technological review on processing of sugarcane juice: Spoilage, preservation, storage, and packaging aspects. *Journal of Food Process Engineering*, 44(6), e13706.
- Paraíso, C. M., dos Santos Pizzo, J., Gibin, M. S., Volnistem, E. A., Visentainer, J. V., Sato, F., ... Madrona, G. S. (2024). Intensified ultrafiltration process for fouling mitigation during concentration of bioactive compounds from hibiscus (*Hibiscus sabdariffa* L.) extract: Innovation by using ultrasound and 3D turbulence promoters. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 195, 109612.
- Paredes, D. A. F., Assof, M., Sánchez, R. J., Sari, S., Catania, A., Fanzone, M., Espinosa, J. (2024). Partial dealcoholization of a Malbec wine through pervaporation with a PDMS membrane: Effect of operation temperature on process economics, volatile aroma composition and sensory properties. *Separation and Purification Technology*, 335, 126076.
- Pereira, C. C., Rufino, J. R. M., Habert, A. C., Nobrega, R., Cabral, L. M. C., Borges, C. P. (2005). Aroma compounds recovery of tropical fruit juice by pervaporation: membrane material selection and process evaluation. *Journal of food engineering*, 66(1), 77-87.
- Pereira, G. L. D., Cardozo-Filho, L., Jegatheesan, V., Guirardello, R. (2023). Generalization and Expansion of the Hermia Model for a Better Understanding of Membrane Fouling. *Membranes*, 13(3), 290.
- Perreault, V., Gouin, N., Bérubé, A., Villeneuve, W., Pouliot, Y., Doyen, A. (2021). Effect of pectinolytic enzyme pretreatment on the clarification of cranberry juice by ultrafiltration. *Membranes*, 11(1), 55.
- Pruksasri, S., Lanner, B., Novalin, S. (2020). Nanofiltration as a potential process for the reduction of sugar in apple juices on an industrial scale. *Lwt*, 133, 110118.
- Raisi, A., Aroujalian, A., Kaghazchi, T. (2008). Multicomponent pervaporation process for volatile aroma compounds recovery from pomegranate juice. *Journal of Membrane Science*, 322(2), 339-348.
- Rajendran, S. R., Mason, B., Doucette, A. A. (2021). Review of membrane separation models and technologies: processing complex food-based biomolecular fractions. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 415-428.
- Rao, Y., Ni, F., Sun, Y., Zhu, B., Zhou, Z., Yao, Z. (2020). Efficient recovery of the volatile aroma

- components from blackberry juice using a ZIF-8/PDMS hybrid membrane. *Separation and Purification Technology*, 230, 115844.
- Rehman, W. U., Muhammad, A., Younas, M., Wu, C., Hu, Y., Li, J. (2019). Effect of membrane wetting on the performance of PVDF and PTFE membranes in the concentration of pomegranate juice through osmotic distillation. *Journal of Membrane Science*, 584, 66-78.
- Rochón, E., Cortizo, G., Cabot, M. I., Cubero, M. T. G., Coca, M., Ferrari, M. D., Lareo, C. (2020). Bioprocess intensification for isopropanol, butanol and ethanol (IBE) production by fermentation from sugarcane and sweet sorghum juices through a gas stripping-pervaporation recovery process. *Fuel*, 281, 118593.
- Roozitalab, A., Raisi, A., Aroujalian, A. (2019). A comparative study on pomegranate juice concentration by osmotic distillation and thermal evaporation processes. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36, 1474-1481.
- Rudolph-Schöpping, G., Petrinić, I., Bukšek, H., Lipnizki, F. (2024). Membrane processes in fruit juice production. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 25-56). Elsevier.
- Sánchez-Arévalo, C. M., Aldegheri, F., Vincent-Vela, M. C., Álvarez-Blanco, S. (2024). Integrated Membrane Process in Organic Media: Combining Organic Solvent Ultrafiltration, Nanofiltration, and Reverse Osmosis to Purify and Concentrate the Phenolic Compounds from Wet Olive Pomace. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(10), 5233.
- Sandoval, A. D. O., Brião, V. B., Fernandes, V. M. C., Hemkemeier, A., Friedrich, M. T. (2019). Stormwater management by microfiltration and ultrafiltration treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 30, 100453.
- Sarbatly, R., Sariau, J., Krishnaiah, D. (2023). Recent developments of membrane technology in the clarification and concentration of fruit juices. *Food Engineering Reviews*, 15(3), 420-437.
- Satyannarayana, K. V. V., Sandhya Rani, S. L., Vinoth Kumar, R. (2023). Clarification of citrus fruit juices using microfiltration technique equipped with indigenously developed novel ceramic membrane. *Journal of Food Science and Technology*, 1-11.
- Severcan, S. S., Uzal, N., Kahraman, K. (2020). Clarification of pomegranate juice using PSF microfiltration membranes fabricated with nano TiO₂ and Al₂O₃. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(8), e14559.
- Sheu, M. J., Wiley, R. C. (1983). Preconcentration of apple juice by reverse osmosis. *Journal of Food Science*, 48(2), 422-429.
- Shigidi, I., Anqi, A. E., Elkhaleefa, A., Mohamed, A., Ali, I. H., Brima, E. I. (2021). Temperature impact on reverse osmosis permeate flux in the remediation of hexavalent chromium. *Water*, 14(1), 44.
- Silvestre, W. P., Livinalli, N. F., Baldasso, C., Tessaro, I. C. (2019). Pervaporation in the separation of essential oil components: A review. *Trends in food science & technology*, 93, 42-52.
- Singh, V., Das, C. (2021). Clarification of Citrus fruit (Mosambi) juice by hybrid (Pretreatment and Membrane) process. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1384-1388.
- Singh, R. P., Heldman, D. R. (2020). *Introduction to food engineering*. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Soares, L. S., Vieira, A. C. F., Fidler, F., Fritz, A. R. M., Di Luccio, M. (2020). Pervaporation as an alternative for adding value to residues of oyster (*Crassostrea gigas*) processing. *Separation and Purification Technology*, 232, 115968.
- Sotoft, L. F., Christensen, K. V., Andrésen, R., Norddahl, B. (2012). Full scale plant with membrane based concentration of blackcurrant juice on the basis of laboratory and pilot scale tests. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 54, 12-21.
- Sun, X., Dang, G., Ding, X., Shen, C., Liu, G., Zuo, C., ... Jin, W. (2020). Production of alcohol-free wine and grape spirit by pervaporation membrane technology. *Food and Bioprocess Processing*, 123, 262-273.

- Takallu, M., Hosseini, H., Mirsaeedghazi, H., Zarouk, S. (2022). Effect of Brine Type on the Performance of Red Grapefruit Juice Concentration by Osmotic Distillation. *Journal of Membrane Science and Research*, 8(4).
- Tian, M., Ma, T., Goh, K., Pei, Z., Chong, J. Y., Wang, Y. N. (2022). Forward Osmosis Membranes: The significant roles of selective layer. *Membranes*, 12(10), 955.
- Tofighy, M. A., Mohammadi, T. (2020). Carbon nanotubes-polymer nanocomposite membranes for pervaporation. In *Polymer nanocomposite membranes for pervaporation* (pp. 105-133). Elsevier.
- Tomczak, W., Gryta, M. (2021). Application of ultrafiltration ceramic membrane for separation of oily wastewater generated by maritime transportation. *Separation and Purification Technology*, 261, 118259.
- Tseng, H. H., Lau, W. J., Al-Ghouthi, M. A., An, L. (Eds.). (2022). *60 Years of the Loeb-Sourirajan Membrane: Principles, New Materials, Modelling, Characterization, and Applications*. Elsevier.
- Urošević, T., Trivunac, K. (2020). Achievements in low-pressure membrane processes microfiltration (MF) and ultrafiltration (UF) for wastewater and water treatment. In *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 67-107). Elsevier.
- Verified Market Reports. (2024). Membrane technology for food and beverage processing market: Size and forecast. Retrieved November 19, 2024, from <https://www.verifiedmarketreports.com/product/membrane-technology-for-food-and-beverage-processing-market-size-and-forecast/>
- Vilar, J., Monteiro, F., Corrêa-Filho, L., Gomes, F., Tonon, R., Freitas-Sá, D., ... Cabral, L. (2025). Chemical and Sensory Evaluation of Blackberry (*Rubus* sp.) Juice Concentrated by Reverse Osmosis and Osmotic Evaporation. *Membranes*, 15(1), 10.
- Wang, X., Cui, W., Guo, W., Sun, B., Huang, M., Li, J., ... Meng, N. (2024). Separation techniques for manufacturing fruit spirits: From traditional distillation to advanced pervaporation process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(1), e13278.
- Wang, L., Li, Z., Fan, J., Lu, G., Liu, D., Han, Z. (2023). Prediction of membrane purification by membrane fouling based on mathematic and machine learning models combined with image processing technology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 111154.
- Warsinger, D. M., Tow, E. W., Maswadeh, L. A., Connors, G. B., Swaminathan, J. (2018). Inorganic fouling mitigation by salinity cycling in batch reverse osmosis. *Water research*, 137, 384-394.
- Wei, D. S., Hossain, M., Saleh, Z. S. (2008). Separation of polyphenolics and sugar by ultrafiltration: Effects of operating conditions on fouling and diafiltration. *International Journal of Chemical and Biomolecular Engineering*, 1(1), 14-23.
- Wenten, I. G., Khoiruddin, K., Reynard, R., Lugito, G., Julian, H. (2021). Advancement of forward osmosis (FO) membrane for fruit juice concentration. *Journal of Food Engineering*, 290, 110216.
- Yılmaz, E. (2019). Brokolideki biyoaktif bileşenlerin membran prosesleri ile kazanılması. Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Yılmaz, E., Bağcı, P. O. (2019). Ultrafiltration of broccoli juice using polyethersulfone membrane: fouling analysis and evaluation of the juice quality. *Food and Bioprocess Technology*, 12(8), 1273-1283.
- Yılmaz, E., Bağcı, P. O. (2018). Production of phytotherapeutics from broccoli juice by integrated membrane processes. *Food chemistry*, 242, 264-271.
- Zapata-Sierra, A., Cascajares, M., Alcayde, A., Manzano-Agugliaro, F. (2021). Worldwide research trends on desalination. *Desalination*, 519, 115305.
- Zhao, F., Han, X., Shao, Z., Li, Z., Li, Z., Chen, D. (2022). Effects of different pore sizes on membrane fouling and their performance in algae harvesting. *Journal of membrane science*, 641, 119916.

Zhu, Z., Luo, X., Yin, F., Li, S., He, J. (2018). Clarification of Jerusalem artichoke extract using ultra-filtration: Effect of membrane pore size and operation conditions. *Food and bioprocess technology*, 11, 864-873.

Zhu, J., Geng, Y., Huang, Y., Ma, C., Dong, L., Chen, F., ... Ji, J. (2024). Emerging Novel

Processing Technologies Towards the Stabilization of Anthocyanins. *Food Reviews International*, 1-30.