

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SUSAM SÜTÜ PROSES KOŞULLARININ OPTİMİZASYONU
VE FARKLI KURUTMA YÖNTEMLERİYLE SÜT TOZU
ÜRETİM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE
KARAKTERİZASYONU**

Lina MİÇOOĞULLARI

**Danışman
Prof.Dr. Gülcan ÖZKAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2026**



© 2026 [Lina MIÇOOĞULLARI]

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Lina MİÇOOĞULLARI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Susam	4
2.2. Bitkisel Kaynaklı Sütler	8
2.3. Bitkisel Kaynaklı Süt Üretimi Çalışmaları.....	11
2.3.1. Bitkisel kaynaklı sütlerin üretimi.....	11
2.4. Bitkisel Kaynaklı Sütlerin Üretiminde Optimizasyon Çalışmaları	13
2.5. Bitkisel Kaynaklı Sütlerin Üretiminde Ultrasonik Su Banyosu Destekli Ekstraksiyon Uygulamaları	14
2.6. Bitkisel Kaynaklı Süt Tozu Üretimi Çalışmaları	19
2.7. Kurutma Yöntemleri.....	19
2.7.1. Vakumlu kurutma yöntemi	21
2.7.2. Püskürtmeli kurutma (sprey kurutma) yöntemi.....	23
2.7.3. Dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yöntemi	28
2.8. Gıda Tozları ve Karakterizasyonu.....	31
2.8.1. Partikül boyutu	33
2.8.2. Partikül şekli	34
2.8.3. Su tutma kapasitesi	35
2.8.4. Şişme gücü.....	36
2.8.5. Suda çözünürlük indeksi.....	37
2.8.6. Higroskopiklik	38
2.8.7. Yığın yoğunluğu	39
2.8.8. Sıkıştırılmış yoğunluk.....	40
3. MATERYAL VE METOT	41
3.1. Materyal.....	41
3.2. Metot	41
3.2.1. Susam tohumlarının fiziko-kimyasal analizleri	41
3.2.1.1. Su aktivitesi.....	41
3.2.1.2. Nem içeriği.....	41
3.2.1.3. Kül içeriği	42
3.2.1.4. Yağ içeriği.....	42
3.2.1.5. Renk parametreleri.....	42
3.3. Susam Tohumundan Süt Üretimi	42
3.4. Deneysel Tasarım: Ultrason Uygulaması İle Ekstraksiyon Koşullarının Optimizasyonu	43
3.4.1. Ekstrakt verimi.....	46
3.5. Optimum koşullarda üretilen edilen sütün kurutulması	47
3.5.1. Süt örneklerinin kurutma işlemi için hazırlanması.....	47
3.5.2. Sprey kurutma.....	48
3.5.3. Dondurarak kurutma	49
3.5.4. Vakum kurutma işlemi	50

3.6. Süt Tozu Analizleri	52
3.6.1. Su aktivitesi (aw) tayini	52
3.6.2. % Nem ve toplam kuru madde tayini	52
3.6.3. Kül tayini	52
3.6.4. Protein tayini.....	53
3.6.5. Yağ tayini.....	53
3.6.6. pH tayini	53
3.6.7. Renk parametresinin belirlenmesi	53
3.7. Susam Süt Tozlarının Tekno-Fonksiyonel Özelliklerinin Belirlenmesi	54
3.7.1. Su tutma kapasitesinin belirlenmesi	54
3.7.2. Şişme gücü ve suda çözünürlük indeksi belirlenmesi	54
3.7.3. Yığın yoğunluk, sıkıştırılmış yoğunluk, carr indeksi ve hausner oranının belirlenmesi	55
3.7.4. Higroskopite hesaplama.....	56
3.8. Yapısal ve Spektral Analizler	56
3.8.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (ftır) analizi.....	56
3.8.2. Taramalı elektron mikroskobu (sem)	57
3.8.3. X-Işını difraksiyon (xrd) analizi	57
3.9. İstatistiksel Analiz	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	58
4.1. Susam Tohumunun Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi	58
4.2. Susam Sütü Üretiminde Ultrasonik Su Banyosu Destekli Üretim Şartlarına ait Deneme Deseni	59
4.3. Optimum koşulların Belirlenmesi ve Model Doğrulama	68
4.4. Susam Sütü Örneklerinin Fizikokimyasal Karakterizasyonu.....	69
4.5. Susam Sütünün Farklı Kurutma Yöntemleriyle Tozlaştırılması	71
4.4. Reolojik ve Tekno-Fonksiyonel Özellikler	73
4.5. Yapısal, Spektral ve Mikroyapısal Analiz Bulguları.....	76
4.5.1. XRD analizi ile kristalin ve amorf yapıların karakterizasyonu	77
4.5.2. FTIR spektroskopisi ile moleküler yapı ve fonksiyonel grup değişimlerinin incelenmesi	79
4.5.3. SEM analizi ile kurutulmuş süt tozlarının mikroyapısal karakterizasyonu	81
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	113

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİTKİ BAZLI SÜT ALTERNATİFLERİ: ÜRETİMİ, BAZI FİZİKOKİMYASAL VE FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ

Lina MİÇOOĞULLARI

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gülcan ÖZKAN

Bu çalışmada, fonksiyonel ve besleyici özelliklere sahip bitkisel esaslı bir süt alternatifi geliştirmek amacıyla susam (*Sesamum indicum* L.) bazlı süt üretimi yapılmış ve ekstraksiyon süreci optimize edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında hammadde olarak kullanılan susam tohumlarının fizikokimyasal özellikleri belirlenmiş; su aktivitesi 0.33, nem içeriği %1.96, yağ oranı %49.05 ve protein oranı %21.30 olarak tespit edilmiştir. Susam sütü üretiminde ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon yönteminden yararlanılmış ve üretim proses parametreleri (bekletme süresi, parçalama süresi ve ultrasonik su banyosu uygulama süresi) Yanıt Yüzey yöntemi-Merkezi Kompozit Tasarım (RSM-CCD) kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen veriler, bağımsız değişkenlere bağlı olarak yanıt yüzey metodu ile analiz edilmiştir. Model performansı açısından bakıldığında elde edilen tüm eşitlikler, bağımlı değişken olan KM değerindeki değişimin % 95’den fazlasını işlem koşullarına bağlı olarak açıklamaktadır. Yanıt yüzey metodu kullanılarak susam sütlerinin KM değerleri maksimize edilerek deneme deseni için optimum üretim formülasyonları belirlenmiştir. Optimize edilen susam sütünde enerji değeri 78 kcal/100 g, yağ oranı %6.96, protein oranı %2.17 ve karbonhidrat oranı %1.76 olarak belirlenmiştir. Kurutma öncesinde ürün stabilitesini artırmak amacıyla %12 oranında maltodekstrin ilave edilmiş ve homojenize edilmiştir. Enkapsüle edilen susam sütü; spreya kurutma, vakum kurutma ve liyofilizasyon yöntemleri ile toz forma dönüştürülmüş ve elde edilen susam süt tozları fizikokimyasal, reolojik, tekno-fonksiyonel ve yapısal özellikler bakımından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Liyofilizasyon yöntemi en düşük nem içeriğini (%1.90) ve en yüksek çözünürlük (%87.03) değerini sağlamış; spreya kurutma yöntemi iyi akış özelliği ve düşük higroskopiklik değeri ile endüstriyel uygulanabilirlik açısından avantajlı bulunmuştur. Vakum kurutma yöntemi ise yüksek su tutma kapasitesi göstermiş ancak akışkanlık özellikleri bakımından sınırlı kalmıştır. Sonuç olarak, kurutma yöntemi susam sütü tozunun nihai kalite özelliklerini önemli ölçüde etkilemekte olup, spreya kurutma yöntemi endüstriyel üretim açısından dengeli ve uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Susam sütü, Ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon, optimizasyon, kurutma yöntemleri, Yanıt yüzey yöntemi, bitkisel süt tozu

2026, 111 Sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

OPTIMIZATION OF PROCESSING CONDITIONS FOR SESAME MILK AND COMPARATIVE CHARACTERIZATION OF POWDER PRODUCTION USING DIFFERENT DRYING METHODS

Lina MİÇOOĞULLARI

Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Food Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Gülcan ÖZKAN

In this study, sesame (*Sesamum indicum* L.)-based milk was produced and the extraction process was optimized in order to develop a plant-based milk alternative with functional and nutritional properties. In the first stage of the study, the physicochemical properties of sesame seeds used as raw material were determined; water activity was 0.33, moisture content was 1.96%, fat content was 49.05%, and protein content was 21.30%. In the production of sesame milk, an ultrasonic water bath-assisted extraction method was employed, and the process parameters (soaking time, grinding time, and ultrasonic treatment time) were modeled using Response Surface Methodology–Central Composite Design (RSM-CCD). Among the obtained responses, the process conditions that yielded the highest dry matter were optimized. The effects of soaking time, grinding time, and ultrasonic treatment time on dry matter yield were modeled, and the highest dry matter yield (11.694%) was obtained at 240 minutes of soaking, 6 minutes of grinding, and 17.5 minutes of ultrasonic treatment. The model showed an R^2 value of 95.54%, while the predicted value was 11.7284%. The experimental value was determined as 11.664%, and the fact that this value fell within the 95% confidence interval demonstrated the reliability of the model. In the optimized sesame milk, the energy value was determined as 78 kcal/100 g, with a fat content of 6.96%, protein content of 2.17%, and carbohydrate content of 1.76%. Prior to drying, 12% maltodextrin was added and the mixture was homogenized to enhance product stability. The encapsulated sesame milk was converted into powder form using spray drying, vacuum drying, and freeze-drying methods, and the resulting sesame milk powders were comparatively evaluated in terms of physicochemical, rheological, techno-functional, and structural properties. The freeze-drying method provided the lowest moisture content (1.90%) and the highest solubility (87.03%), while spray drying exhibited advantages in terms of good flowability and low hygroscopicity, making it favorable for industrial applications. Vacuum drying showed high water-holding capacity; however, it was limited in terms of flow properties. In conclusion, the drying method significantly affects the final quality characteristics of sesame milk powder, and spray drying stands out as a balanced and industrially applicable alternative.

Keywords: Sesame milk, Ultrasonic water bath-assisted extraction, optimization, drying, Response Surface Methodology (RSM), plant-based milk powder

2026, 111 pages

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında sunduğu desteği ve yönlendirmeleri, bu çalışmanın başarıyla tamamlanmasında en büyük destekçim olan ve akademik bilgi birikimi, engin tecrübesi, yol göstericiliği ve sabrıyla bana rehberlik eden değerli danışman hocam Prof. Dr. Gülcan ÖZKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Hocamın bilimsel yaklaşımı, araştırmacı kimliği, titizliği ve çözüm odaklı bakış açısı, yalnızca bu tez çalışmasına değil, akademik gelişimime de büyük katkı sağlamıştır. Sahip olduğu vizyon ve akademik birikim ile bana yalnızca bilimsel düşünmeyi değil; aynı zamanda araştırma disiplini, sorumluluk bilinci, sabır ve azim gibi mesleki hayatım boyunca yol gösterici olacak değerler de kazandırmıştır. Tez sürecimde karşılaştığım her zorlukta yapıcı önerileri ve cesaret verici yaklaşımıyla yanımda olmuş, beni sürekli olarak daha iyiyi hedeflemeye teşvik etmiştir.

Tez çalışmam süresince özellikle laboratuvar aşamalarında bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen Dr. Sedef AYDIN'a ayrıca çalışma sürecinde tecrübesi, yönlendirmeleriyle ve bilgi birikimiyle katkı sağlayan Doç. Dr. Ebru AYDIN'a teşekkür ederim.

Bugüne kadar her daim yanımda olan, sevgileri, sabırları ve maddi manevi destekleriyle en büyük motivasyon kaynağım olan sevgili annem ve babama da en derin şükranlarımı sunarım.

Lina MİÇOOĞULLARI
ISPARTA,2026

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Susam bitkisi ve tohumu	4
Şekil 2.2. Ultrasonikasyon cihazı	15
Şekil 2.3. Püskürmeli kurutucunun şematik gösterimi	24
Şekil 2.4. Dondurarak kurutma cihazına ait şematik gösterim	29
Şekil 3.1. Susam sütü üretim sürecinin akış şeması	43
Şekil 3.2. Homojenizasyon işlemi (ultra- turrax ıka t18 basic).....	48
Şekil 3.3. BUCHI B-290 mini sprej kurutucu	49
Şekil 3.4. Dondurarak kurutma işlemi	50
Şekil 3.5. Vakumlu kurutucu	51
Şekil 3.6. Farklı yöntemlerle kurutulmuş süt tozları.....	51
Şekil 4.1. Susam sütü ekstraksiyonunda verim (%) üzerine etki eden parametrelerin pareto diyagramı	62
Şekil 4.2. Ekstraksiyon koşullarından parçalama süresi ve suda bekletme süresinin kuru madde (%) üzerindeki etkisi.....	64
Şekil 4.3. Ekstraksiyon koşullarından ultrasonik su banyosu uygulama süresi ve suda bekletmenin kuru madde (%) üzerindeki etkisi	65
Şekil 4.4. Ekstraksiyon koşullarından ultrason süresi ile parçalama süresinin kuru madde (%) üzerindeki etkisi	67
Şekil 4.5. Sprej kurutma (SK), vakum kurutma (VK) ve dondurarak kurutma (LK) yöntemleriyle elde edilen susam sütü tozlarına ait XRD desenleri	77
Şekil 4.6. Susam sütü tozlarının Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizine ait spektrumları.....	80
Şekil 4.7. Sprej kurutma yöntemiyle elde edilen susam sütü tozunun 3000x büyütmede çekilmiş SEM (Scanning Electron Microscopy) görüntüsü ...	82
Şekil 4.8. Vakum kurutma yöntemiyle elde edilen susam sütü tozunun 3000x büyütmede elde edilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü..	83
Şekil 4.9. Dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yöntemiyle elde edilen susam sütü tozuna ait 5000x büyütmeye çekilmiş SEM görüntüsü	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. 2010 ve 2020 yıllarındaki dünya ve bazı ülkelerde susam üretim miktarları	5
Çizelge 2.2. Susam tohumlarının bazı fiziko-kimyasal özellikleri	6
Çizelge 2.3. Bitkisel süt alternatiflerinin besin değerleri	10
Çizelge 2.4. Carr indeksi ve hausner oranına göre toz ürünlerin akışkanlık sınıflandırması	40
Çizelge 3.1. Susam sütü ekstraksiyonunda uygulanan merkezi karma tasarım	44
Çizelge 3.2. Susam sütü üretimi için faktörlerin kodlanmış ve kodlanmamış seviyeleri	45
Çizelge 4.1. Susam tohumunun fizikokimyasal analiz sonuçları.....	58
Çizelge 4.2. Susam sütü ekstraksiyonunda proses parametreleri ve KM (%) değerleri	59
Çizelge 4.3. Susam sütü üretiminde KM değerlerinin üretim koşullarına bağlı olarak gerçekleşen değişimine ait modellerin model katsayıları ve model performans parametreleri	61
Çizelge 4.4. Teorik ve deneysel veriler.....	68
Çizelge 4.5. Susam sütü örneklerinin fizikokimyasal analiz sonuçları.....	70
Çizelge 4.6. Süt tozlarının fizikokimyasal analizleri	71
Çizelge 4.7. Süt tozlarının reolojik ve tekno-fonksiyonel özellikleri	74

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

aw	Su aktivitesi
BI	Esmerleşme indeksi
BS	Bekletme süresi
CCD	Central composite design (Merkezi birleşik tasarım)
CI	Confidence interval (Güven Aralığı)
Dk	Dakika
DN	Diastaz numarası
DW	Dry weight (kuru ağırlık)
HMF	Hidroksi metil furfural
KM	Kuru madde
LK	Liyofilize kurutulmuş toz ürün
PS	Parçalama süresi
PI	Prediction interval (tahmin aralığı)
RSM	Response surface methodology (Yanıt yüzey yöntemi)
SK	Sprey kurutma ile kurutulmuş toz ürün
US	Ultrasonikasyon uygulama süresi
VK	Vakum fırında kurutulmuş elde edilmiş toz ürün

1. GİRİŞ

Susam (*Sesamum indicum* L.), Pedaliaceae familyasına ait olup, farklı dillerde çeşitli isimlerle bilinmektedir (Mostashari & Mousavi Khaneghah, 2024). Çiçekleri pembe, mor veya beyaz renkte olup, tohumları beyaz, siyah, sarı veya kahverengi olabilir (Cosmas, 2019; Yüzer & Genççelep, 2023). Besin bileşimi yetiştirildiği bölgeye göre değişmekte olup, yağ oranı %44.69–55.37, protein oranı %20.80–26.01 ve lif oranı %17.30–28.78 arasında değişmektedir (Ahmed vd., 2020).

Susam tohumları, zengin mineral içeriğe sahip bir besin kaynağıdır. İçeriğinde özellikle sodyum, magnezyum, potasyum ve kalsiyum gibi makro mineraller bulunurken, çinko, demir, bakır ve manganez gibi eser elementler de mevcuttur (Jimoh vd., 2011). Tenyang ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan çalışmada da susamın kalsiyum ve magnezyum açısından zengin olduğu ve bunun yanı sıra çinko, bakır, demir ve manganez gibi çeşitli mineraller içerdiği belirtilmiştir (Tenyang vd., 2017). Majdalawieh (2019) ise susam bileşiminde bulunan sesamolün güçlü bir antioksidan olduğunu ve inflamasyonu azaltıcı, kanser hücrelerini öldürücü etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, vücutta iyi emildiği ve beyne ulaşabildiği belirlenmiş, bu durumun kanser tedavisinde kullanım potansiyeli açısından önemli olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, susam lignanlarının sağlık açısından değerli bileşikler olduğunu göstermektedir (Majdalawieh vd., 2019).

Geleneksel süt endüstrisi, çevresel sürdürülebilirlik, değişen beslenme alışkanlıkları gibi faktörler nedeniyle köklü bir dönüşüm sürecine girmiştir. Özellikle 21. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, etik ve sağlıklı yaşam tercihleriyle birlikte çevresel duyarlılık da artmış, bu durum bitkisel süt alternatiflerine olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır (Sethi vd., 2016; Vanga vd., 2018). Laktoz intoleransı ve süt proteinlerine karşı gelişen alerjik reaksiyonlar da bu eğilimi güçlendiren etkenler arasındadır. Tachie ve arkadaşlarının (2023) yaptığı bir araştırmada bitkisel süt pazarı küresel verilerine göre, 2023 yılında 27 milyar ABD doları değerine ulaşmış, 2028 yılına kadar ise 43,6 milyar dolara yükseleceği öngörülmektedir (Tachie vd., 2023). Bu büyüme yalnızca tüketici eğilimlerini değil, aynı zamanda gıda işleme teknolojilerini de dönüştürmektedir.

Günümüzde ticari olarak yaygın şekilde kullanılan bitkisel sütler arasında soya, badem ve pirinç bazlı ürünler öne çıkmaktadır; ancak bu hammaddeler sınırlı ve ekolojik sürdürülebilirlik gibi dezavantajlara sahiptir (Poore vd., 2018). Bu bağlamda, susam (*Sesamum indicum* L.), düşük su ihtiyacı, zengin besin profili ve iklim dostu üretim potansiyeli ile dikkat çeken alternatif bir bitkisel süt hammaddesi olarak öne çıkmaktadır. Susam tohumları; doymamış yağ asitleri, kaliteli protein, kalsiyum, demir, magnezyum gibi mineraller ve sesamin, sesamolin gibi lignan bileşikleri yönünden oldukça zengindir ve bu sayede kardiyoprotektif, antioksidan ve antiinflamatuvar etkilere sahip olduğu gösterilmiştir (Moazzami vd., 2006).

Ancak susam bazlı sütler üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Mevcut literatür genellikle temel ısıtma işlem koşulları ile sınırlı olup, ekstraksiyon optimizasyonu ya da kurutma teknolojileri gibi ileri düzey uygulamalar kapsamlı şekilde ele alınmamıştır. Örneğin, Ahmadian-Kouchaksaraei ve ark. (2014.), susam sütü üretiminde sıcaklık ve sürenin duyu ve besinsel özelliklere etkisini araştırmış, ancak yenilikçi ekstraksiyon veya kurutma yöntemlerini değerlendirmemiştir (Ahmadian-Kouchaksaraei vd., 2014).

Fonksiyonel bileşenlerin süte maksimum geçişini sağlamak açısından, uygulanan ekstraksiyon yöntemi kritik öneme sahiptir. Geleneksel haşlama, öğütme ve süzme işlemleri sırasında yüksek sıcaklık nedeniyle protein denatürasyonu, fenolik madde kayıpları ve renk değişimleri yaşanabilmektedir (Chemat vd., 2017). Bu gibi kalite kayıplarını önlemek amacıyla, termal olmayan ekstraksiyon teknolojilerinin kullanımına yönelik eğilim artmaktadır. Özellikle ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon, düşük enerji tüketimi, kısa işlem süresi ve hücre duvarlarını parçalayarak çözünür bileşen geçişini artırmasıyla ön plana çıkmaktadır (Mohdaly vd., 2011; Wen vd., 2018). Bu yöntem; badem, yer fıstığı, yulaf ve fındık sütü üretiminde verimi artırmak ve biyoaktifleri korumak amacıyla başarıyla uygulanmıştır (Atalar vd., 2019; Salve vd., 2019). Ancak, susam sütü üretiminde ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon uygulanmasına ait sınırlı araştırmalar mevcuttur. Ayrıca, üretim sürecinde işlem parametrelerinin modellendiği ve üretim şartlarının optimize edildiği çalışmalara rastlanılmamıştır. Bu noktada, Yanıt Yüzey yöntemi (RSM) ve Merkezi Karma Tasarım (CCD) gibi çok değişkenli modelleme teknikleri, optimum koşulların belirlenmesi açısından etkili araçlar sunmaktadır (Lavrentev vd., 2024).

Bitkisel stler, yksek su aktivitesine sahip yapıları nedeniyle kısa raf mrne sahiptir. Bu nedenle sıvı formun toz hale getirilmesi; raf mrn uzatma, tařınabilirlik, mikrobiyolojik gvenlik ve fonksiyonel stabilite aısından nemli avantajlar saėlamaktadır (Nisoa vd., 2021). Ancak uygulanan kurutma yntemi, elde edilen toz rnn fiziksel ve teknolojik zelliklerini doėrudan etkilemektedir. Sprey kurutma, znrlk ve akıřkanlık gibi zellikleri iyileřtirirken; liyofilizasyon, termolabil bileřenlerin korunmasında daha bir yntem olmasına raėmen yksek maliyete sahiptir (Zielinska vd., 2016). Vakum kurutma ise orta dzey sıcaklıklarla hem enerji verimliliėi hem de besin ėesi korunumu aısından dengeli bir seenek sunmaktadır.

Mevcut literatrde, bu kurutma yntemlerinin baėımsız olarak deėerlendirildiėi alıřmalar bulunmakla birlikte, ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon ile retilen susam stlerinin farklı kurutma teknikleriyle birlikte ele alındıėı, karřılařtırmalı ve ok ynl bir alıřmaya rastlanılmamıřtır. Bu baėlamda, farklı kurutma teknikleriyle tozlařtırılan susam stlerinin fizikokimyasal, fonksiyonel ve yapısal zellikleri aısından kapsamlı olarak karřılařtırılması, literatrde nemli bir bořluėu doldurmaktadır.

Bu alıřma, ařaėıdaki temel amalar doėrultusunda yrtlmřtır: (1) Ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon yntemi ile retim kořullarının optimize edilmesi ve bu kořullarda susam st retmek, (2) Elde edilen susam stn  farklı kurutma yntemi (sprey kurutma, vakum kurutma, liyofilizasyon) ile toz forma dnřtrmek, (3) Kurutulan st tozlarını fiziksel, kimyasal, reolojik ve tekno-fonksiyonel zellikler aısından karřılařtırmalı olarak deėerlendirilmiřtir. Bu btncl yaklařım, yalnızca yntemsel yenilik sunmakla kalmayıp, aynı zamanda susamın srdrlebilir, fonksiyonel ve inovatif bir bitkisel st bileřeni olarak kullanım potansiyelini bilimsel temele oturtmayı amalamaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Susam

Susam (*Sesamum indicum* L.), Pedaliacea familyasına ait olup farklı kültürlerde ajonjoli, hu ma, gergelim, goma, sesame, til ve konjed gibi çeşitli isimlerle anılmaktadır (Mostashari vd., 2024). Antik çağlardan beri, 4300 yıldan uzun süredir tarımı yapılan bir üründür (Hwang, 2005). Morfolojik olarak 50–200 cm boylanabilen, dik gelişen bir yıllık otsu bitkidir. Yaprakları düz kenarlı ve mızrak biçiminde olup yaklaşık 15 cm uzunluğa ulaşabilmektedir. Çiçekleri pembe, mor veya beyaz renkte çan formunda, yaprak koltuklarında gelişmektedir (COSMAS, 2019). Meyveleri olgunlaştığında kapsüller açılarak tohumların dağılmasına yol açmaktadır. Tohumlar beyaz, siyah, sarı veya kahverengi gibi farklı renklerde bulunur. Ekimden sonra yaklaşık 90–120 gün içinde olgunlaşarak hasada hazır hale gelmektedir.



Şekil 2.1. Susam bitkisi ve tohumu (Wacal vd., 2024)

Susamın tam olarak nerede yetiştirildiği kesin olmamakla birlikte, Afrika kökenli olduğu ve daha sonra Batı Asya, Çin, Hindistan ve Japonya'ya yayıldığı düşünülmektedir (Sharma vd., 2021) . Günümüzde bu bitkinin yetiştiriciliği, Asya,

Afrika, Avrupa, Karayipler ve Amerika'nın tropikal ve subtropikal bölgelerine yayılmış durumdadır (Zhou vd., 2016). 1961 yılında 5 milyon hektar olan ekim alanı, 2022'de 13.97 milyon hektara ulaşmış; 1961'de 1.4 milyon ton olan üretim, 2022'de 7.4 milyon tona çıkmıştır (FAO,2024). Dünya genelinde susam üretimi yapan 71 ülke bulunmaktadır. Bu üretimin %50'si Asya, %44'ü Afrika ve %4'ü Amerika kıtasında gerçekleşmektedir. Susam üretiminde öne çıkan ülkeler arasında Sudan, Myanmar, Tanzanya, Hindistan, Nijerya, Çin, Burkina Faso, Etiyopya, Çad, Güney Sudan, Uganda, Mozambik, Brezilya ve Pakistan yer almaktadır (Sırrı, 2023).

Çizelge 2.1. 2010 ve 2020 yıllarındaki dünya ve bazı ülkelerde susam üretim miktarları (FAO,2024)

Ülke/ Bölge	2010 Üretim (ton)	2020 Üretim (ton)
Dünya	4,800,000	6,800,000
Sudan	561,000	1,253,000
Myanmar	849,000	744,498
Tanzanya	561,000	680,000
Hindistan	613,000	620,000
Nijerya	594,000	588,334
Çin	602,000	460,000
Türkiye	27,000	18,648

Çizelge 2.1'deki verilere göre, 2010–2020 yılları arasında küresel susam üretimi 4.8 milyon tondan 6.8 milyon tona yükselmiş, bu artış özellikle Sudan'da belirginleşirken (561.000 tondan 1.25 milyon tona), Myanmar'da üretimde azalma görülmüştür (849.000 tondan 744.498 tona). Tanzanya ve Hindistan'da üretim artışı kaydedilirken, Çin, Nijerya ve Türkiye'de düşüş yaşanmış; Türkiye'de üretim 2010'da 27.000 ton iken 2020'de 18.648 tona gerilemiştir. Genel eğilim küresel ölçekte üretimin arttığını göstermektedir (FAO,2024). Türkiye'de susam tarımı özellikle Akdeniz ve Ege bölgelerinde yoğunlaşmakta olup üretimin yaklaşık %90'ı bu bölgelerde gerçekleşmektedir. Muğla'nın Ula ilçesinde yetişen Gökova susamı, tescilli bir ürün olarak Çin ve Japonya'ya ihraç edilmekte ve üstün kalite özellikleriyle öne çıkmaktadır (Picus Food, 2020). Dünya genelinde en kaliteli susam çeşitleri ise Etiyopya'nın Humera ve Sudan'ın Gedarif bölgelerinde yetişmekte olup, iklim

koşulları lezzet ve yağ içeriğini doğrudan etkilemektedir. Türkiye’de en fazla üretim yapılan iller Manisa, Antalya ve Adana iken, ithalatın büyük kısmı Nijerya’dan sağlanmaktadır (Picus Food, 2020).

Çizelge 2.2. Susam tohumlarının bazı fiziko-kimyasal özellikleri (%)

Ham Protein	Ham Yağ	Kül	Karbonhidrat	Lif	Kaynaklar
21 - 26	45 - 59	3 - 5	4 - 19	3 – 7	(Yüzer vd., 2023)
21 - 26	45 - 55	-	-	17 - 29	(Ahmed vd. 2020)
19 -35	45–65	-	14–20	-	(Mostasharivd.,2024)
17–18	49	4.–4.5	9	12 - 18	(Wei vd.,2022)
18 - 23.5	44 - 52.5	-	13	-	(Naqvi vd. 2024)
23 - 20	47.5 –45.5	7.2-5.4	-	5.5-1.5	(Jimoh vd., 2011)
24 - 20	56 - 50	5.5-3.5	13 - 6	5- 4	(Tenyang vd.,2017)

Çizelge 2.2’de susam tohumlarının fiziko kimyasal özelliklerinden protein, yağ, kül, karbonhidrat ve lif içerikleri sunulmaktadır. Bulgulara göre susam tohumları genellikle %21–26 protein, %45–59 yağ, %3–5 kül, %4–19 karbonhidrat ve %3–7 lif içermektedir (Yüzer vd., 2023). Farklı bölgelerden toplanan örneklerde ise protein %20.80–26.01, yağ %44.69–55.37 ve lif %17.30–28.78 aralığında değişmektedir. Diğer çalışmalarda da benzer şekilde geniş varyasyonlar bildirilmiş olup, protein oranı %17–35, yağ oranı %45–65 arasında rapor edilmiştir. Nem değerleri ise çalışmalara göre değişmekte olup %6.25–8.5 aralığında ve mineral içeriği incelendiğinde kalsiyum ve magnezyumun baskın, sodyum ve potasyumun ise önemli düzeylerde bulunduğu; çinko, bakır, demir ve manganezin daha düşük oranlarda yer aldığı, bu özellikleriyle susamın kemik sağlığı ve metabolik işlevler açısından değerli bir mineral kaynağı olduğu bildirilmiştir. Ayrıca 100 g susam tohumunun ortalama bileşimi %4.69 nem, %95.31 kuru madde, 17.73 g protein, 49.67 g yağ, 4.45 g kül, 23.45 g karbonhidrat, 11.8 g lif ve 573 kcal enerji olarak belirlenmiştir (İşler, 2009).

Susam tohumlarının yağ asidi profili incelendiğinde Agidew ve ark. (2021) susam tohumlarının yağ asidi kompozisyonunu incelemiş ve toplam yağ asitlerinin yaklaşık %82’sinin doymamış yağ asitlerinden oluştuğunu, bunlar arasında linoleik asidin (%42.5–44.3) en baskın, oleik asidin ise %37.2–38.9 aralığında bulunduğunu belirtmiştir (Agidew vd.,2021). Mohamed Ahmed vd. (2020) farklı coğrafi bölgelerde

yetiştirilen susamların yağ asidi bileşimlerinde belirgin farklılıklar olduğunu, palmitik asidin %7.93–9.55, stearik asidin %5.08–6.20, oleik asidin %35.88–44.54 ve linoleik asidin %37.41–47.44 arasında değiştiğini rapor etmiştir. Mohamed Ahmed vd. (2020) ise yedi farklı susam çeşidinde linolenik (%0.25–0.50) ve palmitoleik (%0.10–0.13) gibi minör yağ asitlerinin de bulunduğunu ve bunların insan tüketimi açısından önemli katkılar sunduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, susam yağının besinsel ve endüstriyel açıdan değerli bir kaynak olduğunu ve Türk Gıda Kodeksi'nde belirtilen sınırlarla (%7.9–12.0 palmitik, %4.5–6.7 stearik, %34.4–45.5 oleik, %36.9–47.9 linoleik) içerisinde olduğunu göstermektedir (Çiçek vd., 2024).

Yağ asidi bileşimlerinin yanında susam lignanları da önemli fonksiyonel bileşenler arasında yer almaktadır. Lin vd. (2017) altı farklı beyaz susam çeşidinde sesamol, sesamin ve sesamolin miktarlarını incelemiş, sesaminin 2,36–10,89 mg/100 g, sesamolün ise serbest fraksiyonda 7.04–24.96 mg/100 g arasında bulunduğunu ve toplam lignan içeriğine esas katkıyı sesamin ve sesamolün sağladığını rapor etmiştir. Kim vd. (2024) ise sekiz Kore susam çeşidinde en yüksek konsantrasyonda sesamolinin bulunduğunu (4.427–10.258 mg/g) ve özellikle Ansan çeşidinin yüksek polifenol içeriğiyle güçlü antioksidan aktivite sergilediğini belirtmiştir. Ayrıca Majdalawieh ve ark. (2019) sesamolün antioksidan özelliğinin yanı sıra antiinflamatuvar ve antikanserojen etkiler gösterdiğini, akciğer, meme, kolon, karaciğer ve cilt kanserine karşı etkinlik sağladığını ve biyoyararlanımının yüksek olduğunu bildirmişlerdir (Majdalawieh & Mansour, 2019). Bu bulgular, susam lignanlarının güçlü antioksidan ve terapötik potansiyele sahip fonksiyonel bileşenler olduğunu ortaya koymaktadır.

Susamın fonksiyonel özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, bu bitkinin zengin fitokimyasal bileşimi sayesinde önemli sağlık yararları sunduğunu ortaya koymaktadır. Siyah ve beyaz susam çeşitlerinin fitokimyasal içeriği ve biyolojik aktiviteleri incelendiğinde, lignanlar (sesamin, sesamolin) başta olmak üzere fitosteroller ve tokoferoller gibi biyoaktif bileşiklerin antioksidan, antiinflamatuvar, antihipertansif ve antikanserojen etkiler gösterdiği bildirilmiştir (Kurt, 2024; Yamashita vd., 1992; Zhou vd., 2016); Pathak vd., 2014). Özellikle lignanların antitümör ve antiviral aktiviteleri, susamın fonksiyonel gıdalar arasında öne çıkmasını sağlamaktadır.

Bitkisel kaynaklı st alternatifleri, farklı bitki trlerinden elde edilebilmekte olup, her bir hammadde sahip olduėu besinsel ve fonksiyonel özellikler doėrultusunda kendine özg avantajlar sunmaktadır. Bu kapsamda, soya, badem ve pirinç gibi yaygın olarak kullanılan kaynakların yanı sıra, alternatif bitkisel hammaddelere yönelik arařtırmalar son yıllarda giderek artış göstermektedir. Ancak mevcut çalıřmaların büyük ölçde belirli hammaddeler zerinde yoğunlařtıėı, daha az çalıřılmış ancak yüksek potansiyele sahip kaynakların ise sınırlı düzeyde ele alındıėı dikkat çekmektedir. Bu noktada, susam (*Sesamum indicum* L.), sahip olduėu yüksek besinsel deėer, güçlü antioksidan özellik gösteren lignan bileřikleri (sesamin, sesamol ve sesamin), zengin mineral içeriėi ve düşük alerjen potansiyeli ile öne çıkan önemli bir alternatif hammaddedir. Ayrıca, kuraklıėa dayanıklı yapısı ve farklı iklim kořullarında yetiřtirilebilmesi, susamın sürdürlebilir retim açasından da avantaj saėlamasına katkıda bulunmaktadır. Tm bu özellikleriyle susam, hem besinsel kaliteyi artırma hem de fonksiyonel özellikleri geliřtirme potansiyeli nedeniyle bitkisel st retiminde tercih edilen ve arařtırılması gereken önemli bir kaynak olarak deėerlendirilmektedir.

2.2. Bitkisel Kaynaklı Stler

Son yıllarda saėlıklı gıda seeneklerine olan ilgi, inek st alerjisi, laktoz intoleransı, kalori endiřeleri ve vejetaryen ile vegan yařam tarzlarının benimsenmesi gibi faktrlerle birleřerek bitkisel st alternatiflerine olan talebi arttırmaktadır. Bitkisel kaynaklı st alternatifleri baklagiller, yaėlı tohumlar, tahıllar ve kuruyemiřlerden elde edilen suda çzünebilen zlerdir ve bu zler, inek stne benzer emlsiyon yapıları oluřturur. Bu tr bitkisel sıvı rnler iin st yerine bařka terimler de kullanılmaktadır genellikle iecekler veya st alternatifleri olarak tanımlanmaktadır (Reyes-Jurado vd., 2023).

Kresel st rnleri alternatifleri pazarı, saėlık, evre ve etik konularındaki deėiřen tketiciler tercihleri nedeniyle hızla geniřlemektedir. Markets and Markets'in Ekim 2023 tarihli raporuna gre %10.1'lik bileřik yıllık bymeyle, kresel st alternatifleri pazarının 2023'te 27.0 milyar ABD dolarından 2028'de 43.6 milyar ABD dolarına ulařması beklenmektedir. Pazar byklė, 2022 yılında 24.6 milyar ABD doları olarak kaydedilmiřtir. Bitkisel stlerin artan popleritesi, vegan ve vejetaryen diyetlerdeki artışla paralellik göstermektedir. Vegan Society verilerine gre, 2021

yılında Vegan Ticari Markası'nı taşıyan ürün sayısı 16.439'a ulaşmış ve bu ürünlerin %82'si son beş yılda kaydedilmiştir. Asya Pasifik bölgesi, kentleşme, artan gelir seviyesi ve bitkisel sültere artan ilgisiyle pazar liderliğini sürdürmektedir. Japonya, Avustralya, Çin ve Hindistan'da sül alternatifleri pazarının hızlı bir artış göstermesi beklenmektedir (MarketsandMarkets, 2023).

Bitkisel sülterin artan talebi, yalnızca tüketici tercihlerindeki değişikliklerle değil, aynı zamanda bu ürünlerin besinsel ve çevresel avantajlarını ortaya koyan araştırmalarla da desteklenmektedir. Örneğin, yapılan bir çalışmada, bitkisel sülterin düşük karbon ayak izi ve su tüketimi ile çevresel sürdürülebilirlik açısından inek sülüne kıyasla çok daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır (Sethi vd., 2016; Tachie vd., 2023).

ABD'de soya sülü inek sülünün en popüler alternatifi olarak tercih edilmekteydi. Ancak son yıllarda diğer bitkisel sül türlerine duyulan ilgi arttıkça, soya sülünün satışları azalmış, buna karşın tahıl, pirinç ve tohumlardan yapılan sülterin tüketimi %28 oranında artmıştır. Bu değişim, bitkisel sülterin satışlarının son on yılda özellikle soya dışındaki alternatiflerin yükselmesiyle iki katına çıkmasına yol açmıştır. Böylece bitkisel sül kategorisinin pazar payı %17'den %40'a yükselmiştir (Haas vd., 2019; Vatandost vd., 2024).

Bitkisel sül alternatiflerine yönelik artan talep, yalnızca çevresel avantajlarıyla değil, aynı zamanda besin profilleriyle de ilişkilendirilmektedir. Araştırmalar, bu sülterin daha düşük doymuş yağ içeriğine ve daha yüksek vitamin ile mineral seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir (Vanga vd., 2018). Örneğin, bitkisel sülterin genellikle daha düşük kalori ve doymuş yağ içerikleri nedeniyle kardiyovasküler sağlık için olumlu etkiler sunduğu bildirilmiştir (Bocker vd., 2022). Ayrıca, yapılan bir çalışmada, bitkisel sülterin özellikle laktoz intoleransı, sül alerjisi ve vejetaryen/vegan yaşam tarzlarını benimseyen bireyler için daha uygun seçenekler sunduğu vurgulanmıştır (Sethi vd., 2016). Özellikle Batı ülkelerinde, soya, yulaf, hindistancevizi, kakao, badem, susam, kinoa ve pirinç sülü gibi alternatifler yaygın bir şekilde tüketilmektedir (Vatandost vd., 2024).

Çizelge 2.3. Bitkisel süt alternatiflerinin besin değerleri

Süt Kaynağı	Nem (%)	Protein (%)	Karbonhidrat (%)	Şeker (%)	Yağ (%)	Lif (%)	Enerji (kcal)	Kaynak
Soya	89.6	3.63	2.08	1.4	1.81	0.4	95	1
Yulaf	89.3	1.1	7.8	3.2	2.12	0.9	132	1
Badem	96.9	0.7	0.55	0.12	1.13	0.3	36.4	1
Hindistan cevizi	67.6	2.90	5.5	3.3	23.8	2.2	230	2
Susam	-	0.6	6.7	-	2.4	0.2	51	3
Kinoa	82.0	1.5	3.7	-	1.8	1.5	-	4,5
Pirinç	85.8-93.9	0.6	10.6	4.0	1.0	0.1-0.4	-	6,7,8
Kenevir	10.8	1-3.9	2.5-20.2	1.3-3.5	1.3-3.5	0.4	33.3	4,9,10
Nohut	87.3-93.9	2.1-3.3	3.9-9.0	-	0.4-0.5	18-22	-	11,12,13
Bezelye	75.5	8	12	-	4.5	1	120	4,14

1: (Vashisht vd., 2024), 2: (Tulashie vd., 2022), 3: (Mäkinen vd., 2016), 4: (Daryani vd., 2024) 5: (Jemaa vd., 2021), 6: (Ismail, 2016), 7: (Issara vd., 2014), 8: (Shori & Al Zahrani, 2021) 9: (Naylor, 2021), 10: (Thakur vd., 2024), 11: (Duarte vd., 2022), 12: (Hamioud vd., 2025), 13: (Kishor, 2017), 14: (Craig vd., 2021))

Bitkisel kaynaklı sütlerin içerdiği temel besin öğeleri, farklı bitki kaynaklarına göre değişkenlik göstermektedir. Bu bağlamda çizelge 2.6.1’de bitkisel süt alternatiflerinin besin değerleri yer almaktadır. Örneğin, bazı bitkisel sütler daha yüksek protein içeriği sunarken, diğerleri daha fazla kalsiyum ve vitamin içerebilmektedir (Tachie vd., 2023). Bu çeşitlilik, tüketicilerin beslenme ihtiyaçlarına uygun alternatifler arayışını artırmaktadır. Bu noktada susam sütü, diğer bitkisel süt alternatiflerinden farklılaşan bir bileşim profiline sahip olup, besin değerleri açısından bazı avantajlar sunar. Doymamış yağ asitleri bakımından zengin olan susam, özellikle oleik (%35-50) ve linoleik asit (%46.26) oranlarıyla dikkat çeker (Yada vd., 2011).

Susam sütünün yağ asidi profili kalp sağlığını destekleyen ve antioksidan özelliklere sahip yağ asitleri açısından değerli kılabilir. Badem ve soya sütlerinde de oleik ve linoleik asitler bulunsa da susam sütü bu asitlerin oranı açısından öne çıkar; özellikle badem sütünün yağ içeriği daha yüksek olsa da susam sütü kadar doymamış yağ asitleri bakımından zengin değildir (Sethi vd., 2016).

Mineral içeriği açısından da susam sütü, özellikle yüksek kalsiyum ve bakır içeriğiyle öne çıkar, bu da kemik sağlığını desteklemeye ve vücutta birçok metabolik süreci iyileştirmeye yardımcı olur (Sethi vd., 2016). Kenevir sütü gibi bazı bitkisel sütlerde

de benzer şekilde yüksek kalsiyum ve magnezyum içerikleri bulunurken, susam sütü bu minerallerin bir arada bulunmasıyla kendine özgü bir avantaj sunar (Andre vd., 2016; Orio vd., 2017). Aynı zamanda susam sütü, içerdiği metiyonin ve sistein gibi kükürtlü amino asitler sayesinde farklı protein profiline sahiptir (Fukuda vd., 2017). Bezelye sütü ve soya sütü yüksek kaliteli protein içerirken, susam sütü metiyonin gibi esansiyel amino asitlerle zenginleşmiş bir protein kaynağıdır. Soya sütü protein açısından susam sütünden daha zengin olsa da metiyonin içeriği daha düşüktür, bu da susamı protein kalitesi açısından farklı kılar (Patil vd., 2017).

Susam sütü, diğer bitkisel süt alternatiflerinden daha az stakiyoz ve rafinoz içerdiği için sindirim üzerinde daha az olumsuz etki yapar ve şişkinlik, gaz ve hazımsızlık gibi sorunlara neden olma olasılığı daha düşüktür (Fitrotin vd., 2015). Bunun yanında, daha hipoalerjenik ve aromatik olan susam sütü, soya proteinlerinin yüksek alerjenitesi ve istenmeyen fasulye aromasından dolayı soya sütü tüketimindeki kısıtlamalara karşı etkili bir alternatif sunar (Ahmadian-Kouchaksaraei vd., 2014). Bu özellikleri, susam sütünü sağlık odaklı ürünlerde kullanımı artırılabilir ve alternatif gıda seçenekleri arayan bireyler için cazip kılar. Bu bağlamda susam sütü, mineraller, sağlıklı yağ asitleri ve antioksidan bileşenleri açısından, öne çıkan bir bitkisel süt alternatifi olup sindirim dostu özellikleri ile de diğer bitkisel süt alternatiflerinden ayrılmaktadır.

2.3. Bitkisel Kaynaklı Süt Üretimi Çalışmaları

2.3.1. Bitkisel kaynaklı sütlerin üretimi

Bitkisel sütlerin üretim süreci son ürünün bileşimi için oldukça önemlidir. Üretim süreci genellikle birden fazla adımdan oluşur ve bu adımlar hammaddenin özelliklerine göre farklılık gösterebilir. Süreç genellikle ıslatma, haşlama, parçalama, ekstraksiyon, filtrasyon, formülasyon, homojenizasyon, ısıl işlem ve paketlenme gibi aşamaları içerir. Bu tez çalışmasında ilk olarak, susam tohumundan süt üretiminde suda bekletme süresinin verim üzerindeki etkisi optimize edilecektir. İlk adım olan ıslatma, tahıl, baklagil ve kuruyemiş kaynaklı sütlerde yaygın bir şekilde uygulanır. Bu işlem, hammaddenin dış tabakasını yumuşatarak soyulmayı ve öğütmeyi kolaylaştırır, aynı zamanda amiloz içeriğini azaltarak ekstraksiyon verimini artırır (Kizzie-Hayford vd., 2016; Romulo, 2022). Yapılan bir çalışmada, Gana'da yetiştirilen kaplan fıstığından süt üretimi sürecinde, suda bekletme işleminin üretim verimini

artırdığı belirtilmiştir (Kizzie-Hayford vd., 2016). Islatmayı takiben genellikle haşlama işlemi yapılır. Haşlama, hammaddenin dış kabuğunun (örneğin, bademlerde) soyulmasını, kötü tatların (örneğin, soya fasulyesi, yer fıstığı, susam) giderilmesini, mikrobiyal yükün azaltılmasını ve tripsin inhibitörleri ile lipoksigenazların inaktive edilmesi yoluyla besin değerlerinin iyileştirilmesini sağlar (Yuan vd., 2008).

Ekstraksiyon, bitkisel süt üretiminde en kritik aşamalardan biridir ve genellikle ıslak öğütme yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu aşamada, hammaddenin boyutları küçültülürken su eklenir. Ekstraksiyon sırasında sıcaklık ve su miktarı gibi çeşitli faktörler, nihai ürünün konsantrasyonu üzerinde belirleyici bir rol oynar (Romulo, 2022). Bitkisel sütlerin ekstraksiyonu sırasında, uygulanan yüksek sıcaklık ve işlem koşulları, ürünün besin içeriğinde ve duyu özelliklerinde değişikliklere neden olabilir. Özellikle proteinlerin denatürasyonu, vitaminlerin kaybı ve bazı biyoaktif bileşenlerin azalması gibi istenmeyen etkiler ortaya çıkabilir. Ayrıca, ısı işlemleri sırasında Maillard reaksiyonları gibi kimyasal reaksiyonlar gerçekleşerek ürünün renginde ve tadında değişikliklere yol açabilir (Yazıcı vd., 2023).

Yüksek sıcaklık ve basıncın, bitkisel proteinlerin yapısına etkisi özellikle denatürasyon ve agregasyon gibi süreçlerle ilgilidir. Bu süreçler, proteinlerin yapısal bütünlüğünü değiştirebilir ve sonuç olarak besin değerini, çözünürlüklerini ve fonksiyonel özelliklerini etkileyebilir. Isıl işlem uygulandığında, proteinlerin üç boyutlu yapıları bozulur, bu da onların fonksiyonel özelliklerini değiştirebilir. Bu değişiklikler, özellikle bitkisel sütlerdeki proteinlerin çözünürlüklerini ve viskozite gibi fiziksel özelliklerini etkiler. Örneğin, soyadan elde edilen sütler üzerinde yapılan çalışmalarda, yüksek basınçlı homojenizasyon işleminden sonra proteinlerin denatüre olduğu tespit edilmiştir (Cruz vd., 2009; Munekata vd., 2020). Yüksek sıcaklık ve basınç altında yapılan işlemler, bazı bitkisel proteinlerin alerjenik özelliklerini de değiştirebilir. Örneğin, badem sütünde yapılan bir çalışmada, yüksek basınçlı işleme uygulandıktan sonra amandin adlı alerjenik proteinin agregasyonu sonucu alerjenik etkisi azalmıştır. Ancak, bu alerjen inaktivasyonunun tek başına ısı ile işlemle yeterli olmayabileceği ve diğer stratejilerle birleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır (Dhakal vd., 2014). Ayrıca, yüksek sıcaklıklar ve basınç uygulamaları, bitkisel proteinlerin agregasyonuna yol açabilir, bu da bazı proteinlerin çözünürlüklerini artırabilir.

Soyadan elde edilen stler zerinde yapılan bir alıřmada, ısııl iřlemle protein agregatları oluřmuř ve bu da proteinin znrlk oranını artırmıřtır. Bu tip yapısal deęiřiklikler, bitkisel stlerin lezzet ve duyuusal zelliklerini de etkileyebilir, nk bazı proteinler denatre olduęunda daha az znebiilen yapılar oluřturur ve bu da tatları deęiřtirebilir (Poliseli-Scopel vd., 2012). Sonu olarak, ısııl iřlemin bitkisel proteinlerin yapısal zelliklerine etkisi karmařık olup, genellikle protein denatrasyonu, agregasyonu ve znebilirlikteki deęiřiklikler yoluyla kendini gsterir. Bu srelerin etkisi, kullanılan ısııl iřlem kořullarına, iřlem sresine ve kullanılan bitkisel proteinin trne gre deęiřkenlik gsterir. Bu nedenle, bitkisel st retim srecinin iyileřtirilmesi ve optimize edilmesi son rnn kalitesi aısından byk nem tařımaktadır. Bu amala, farklı iřlem kořullarının bitkisel st retimi zerindeki etkilerini deęerlendirmek ve en uygun retim parametrelerini belirlemek iin optimizasyon alıřmaları yapılmaktadır.

2.4. Bitkisel Kaynaklı Stlerin retiminde Optimizasyon alıřmaları

Optimizasyon alıřmaları retim parametrelerinin doęru řekilde belirlenmesi, besin deęerlerinin korunmasını, istenilen duyuusal zelliklerin elde edilmesini ve verimlilięin artırılmasını saęlar. Yapılan bir alıřmada kenevir tohumu st retiminde besin kalitesini artırmak ve antinutrient seviyelerini (fitik asit, tanen ve saponin) azaltmak amaıyla yanıt yzey yntemi (RSM) kullanarak retim kořullarını optimizasyonu hedeflenmiřtir. Islatma sresi, ısııl iřlem sresi ve sıcaklıęın aę ve protein gibi besin bileřenleri, antinutrient seviyeleri (fitik asit, tanen, saponin) ve fizikokimyasal zellikler (pH, viskozite, toplam katı madde) deęerlendirilmiřtir. Optimum retim kořulları olan 9 saat ısılatma, 48°C’de 60 dakika ısııl iřlem ile ekstrakte edilen stde en yksek besin ierięinin yanında en dřk antinutrient seviyesi tespit edilmiřtir (Thakur vd., 2024).

Yapılan bir alıřmada fındık st retiminde yksek basınlı homojenizasyon kořullarının (basın, sıcaklık, fındık konsantrasyonu) fizikokimyasal zellikler zerindeki etkilerini incelemek amaıyla RSM kullanılarak optimizasyon yapılmıřtır. Optimum homojenizasyon kořulları; 1.140 bar basın, 38.1°C sıcaklık ve %12.97 fındık keki konsantrasyonu olarak belirlenmiřtir. Bu kořullarda retilen fındık st, yksek kalite ve dřk hata oranı (%11.11’e kadar) gstermiřtir. Isıl iřlemler,

optimum koşullarda üretilen fındık sütünün fizikokimyasal özelliklerinde belirgin bir değişikliğe neden olmamıştır (Gul vd., 2018). Bu doğrultuda Asante ve ark. (2014) yaptıkları bir çalışmada siyah ve kahverengi kaplan fındığı (*Cyperus esculentus* L.) yumrularından bitkisel süt ve su kullanılarak ekstraksiyonu gerçekleştirilmiş ve en yüksek verim için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bağımsız Değişkenler: Kaynatma süresi (10-240 dakika), öğütme süresi (5-30 dakika) ve fındık:su oranı (1:2, 1:5, 1:8) olarak belirlenmiş, kaynatma süresi, öğütme süresi ve fındık:su oranı, kaplan fındığı süt katılarının verimi üzerinde etkili olmuştur. RSM ile yapılan optimizasyona göre; 10 dakika kaynatma, 17-22 dakika öğütme ve 1:7 fındık:su oranı en iyi verimi sağlamıştır (Asante vd., 2014).

Ekstraksiyon sırasında besin içeriğinde önemli kayıplar görülebileceği için, besin değerini koruyacak yenilikçi yöntemlere olan ihtiyaç artmaktadır. Özellikle termal olmayan teknolojiler, bitkisel süt alternatiflerinin işlenmesinde besin kayıplarını en aza indirmek için umut vadeden yöntemler arasında yer almaktadır. Bu noktada, ultrases uygulamaları gibi modern ekstraksiyon teknikleri devreye girmektedir. Bitkisel süt ekstraksiyonlarında ultrases uygulaması yanında herhangi bir ekstraksiyon proses koşullarının optimize edilmesi ve bu amaçla modelleme tekniği kullanılması büyük avantajlar sağlamaktadır. Yanıt Yüzey Metodu (RSM), farklı faktörlerin ve bu faktörlerin etkileşimlerinin bir veya daha fazla yanıt değişkeni üzerindeki etkilerini değerlendirmede kullanılan güçlü bir optimizasyon tekniği olarak öne çıkmaktadır.

2.5. Bitkisel Kaynaklı Sütlerin Üretiminde Ultrasonik Su Banyosu Destekli Ekstraksiyon Uygulamaları

Ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon teknolojisi, biyoaktif bileşiklerin bitkilerden izole edilmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik, 20 kHz ile 10 MHz arasında değişen frekansta mekanik ses dalgaları kullanarak çalışır. Genellikle, ultrasonik ekstraksiyon, 16 kHz ile 100 kHz arasında bir frekans aralığı tercih edilerek daha yüksek frekansların yol açabileceği potansiyel hasarlardan kaçınılır. Bu yöntem, geleneksel termal ekstraksiyon tekniklerine kıyasla daha kısa sürede yüksek verimli ekstraksiyon sağlayarak çözünür bileşiklerin çıkartılmasını sağlar.



Şekil 2.2. Ultrasonikasyon cihazı

Ultrasonik ekstraksiyonun temel prensibi, ultrasonik kavitasyon prensibine dayanmaktadır. Kavitasyon, ses dalgalarının sıvı içinde yüksek ve düşük basınç döngüleri oluşturması sonucu ortaya çıkar. Bu süreçte, sonikasyon sırasında meydana gelen şok dalgaları ve mikrojetler, hücre duvarlarını parçalayarak hücre içeriğinin çözünür bileşiklerini çözücüye geçirmesini kolaylaştırır. Bu mekanizma, hücre duvarlarının zarar görmesine, hücrelerin geçirgenliğinin artmasına ve böylece çözünür bileşiklerin çözünürlüklerinin iyileşmesine yol açar (Bucur vd., 2023). Sonuç olarak, ultrasonik ekstraksiyon daha kısa sürede daha yüksek verim sağlar. Ultrasonik ekstraksiyonun pek çok avantajı bulunmaktadır. Bu yöntem, düşük enerji tüketimi ve kısa işlem süreleriyle geleneksel ekstraksiyon yöntemlerine göre daha ekonomik bir alternatif sunar. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesi, termal olarak hassas bileşiklerin bozulmasını engeller ve biyoaktif bileşiklerin moleküler yapılarını korur (Wei vd., 2024). Bunun yanı sıra, ultrasonik dalgaların hücre duvarlarını bozma etkisi sayesinde kullanılan çözücü miktarı azalır, bu da çevresel etkilerin azaltılması anlamına gelir. Ultrasonik ekstraksiyon, yüksek verim ve düşük maliyet sağlamakla birlikte, endüstriyel uygulamalarda da büyük bir potansiyel taşımaktadır. Sonuç olarak, ultrasonik ekstraksiyon, geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli, çevre dostu ve zaman açısından tasarruflu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Özellikle gıda, ilaç ve takviye sektörlerinde yüksek kaliteli ekstraktlar elde etmek için ideal bir tekniktir (Demesa vd., 2024).

Ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon işlemi, bitkisel kaynaklı sütlerin ekstraksiyonunda da tercih edilmektedir. Bitkisel sütlerde ultrasonik ön işlem materyallerin kuru madde, protein, yağ, karbonhidrat, lif ve mineral bileşimlerini optimize etmek amacıyla da etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, soya, pirinç, yulaf, buğday, bezelye, karabuğday, kabak çekirdeği ve mercimek gibi farklı bitkisel sütlerde ultrasonik işleme uygulamasının, mercimek sütü hariç, polifenol içeriğini ortalama %15–20 oranında artırdığını ortaya koymuştur. 3 dakikalık ultrases uyulaması, özellikle mercimek, kabak, pirinç ve bezelye sütlerinin genel kabul edilebilirliği üzerinde önemli bir iyileşme sağlamakta ve bu sütlerin tercih edilebilirliğini artırmaktadır (Lavrentev vd., 2024). Yenilikçi yöntemlere yönelik artan talebi karşılayabilecek bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon enerji ve su tasarrufu sağlaması da çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek sunar. Bu tekniğin avantajları arasında kısa işlem süresi, daha düşük çözücü kullanımı, enerji ve maliyet tasarrufu sağlanması yer almaktadır. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda yapılan bu işlem, ekstraktların termal zarar görmesini engelleyerek biyoaktif bileşiklerin moleküler yapılarını korur (Madhu vd., 2019; Dedebaş vd.,2021).

Yapılan çalışmalarda bitkisel sütlerin ekstraksiyonu için de ultrases kullanılmıştır. Örneğin, yapılan bir çalışmada ise, ultrasonik su banyosu uygulanan yerfıstığı sütünde toplam çözünür katı madde miktarının %9.1den %11'e yükseldiği görülmüştür. Bu artış, ultrasonikasyon sırasında yüksek sıcaklıkta su emilimi ve proteinlerin hücre dışına daha kolay taşınmasına bağlı olduğu ve akustik kavitasyonun fiziksel etkileri, protein ve çözünür katı madde miktarını arttırdığı ifade edilmiştir. Aynı zamanda yerfıstığı özütünü ultrasesle (200, 300 ve 400 W güçte, 3 dakika) işleyerek faz ayrışmasını engellemiş ve sütü stabilize etmiştir. Ultrases işlemiyle partikül boyutunun küçülmesi, moleküller arası reaksiyonları kolaylaştırmış ve inter-partiküler etkileşimleri artırmıştır. Ayrıca, proteinlerin denatürasyonu ve yüzey hidrofobikliğinin artışı da stabilizeyi güçlendirmiştir (Salve vd., 2019).

Soya sütü üretiminde izoflavonlar, sağlık açısından önemli bileşiklerdir bu bağlamda, soya sütü üretiminde izoflavon içeriğini artırmak amacıyla soya fasulyesi sütüne ultrasonik su banyosu işlemi uygulanmıştır. Ultrases genliğininin (%50, %75 ve %100), sıcaklığının (30 °C, 45 °C ve 60 °C) ve sürenin (20, 40, 60 dakika) izoflavon

içeriği üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yanıt Yüzeyi Yöntemi (RSM) kullanılarak bir model oluşturulmuş ve en uygun işlem koşulları %100 genlik, 30°C sıcaklık, 20 dakika süre olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak ultrasonik su banyosu uygulanmamış soya sütüne kıyasla toplam izoflavon içeriğinde %3 ile %62 arasında bir artış sağlandığı belirtilmiştir. Bu çalışma, ultrasonikasyon teknolojisinin, soya sütü üretiminde etkili bir ön işlem olarak kullanılabileceğini ve bu teknolojinin yüksek izoflavon içeriği sağlayarak daha fonksiyonel bir soya sütü elde edilmesine olanak tanıyabileceğini göstermektedir. Bu da, bitkisel süt üretiminde ultrases teknolojisinin potansiyel faydalarını ortaya koymaktadır. Özetle, ultrasonik su banyosu işlemi soya sütü üretiminde verimliliği ve besin içeriğini artırmak için uygulanabilir bir yöntem olmuştur, özellikle izoflavon içeriğinin yükseltilmesinde etkili olduğu ortaya konulmuştur (Morales-de la Peña vd., 2018).

Bitkisel sütlerin stabilizasyonu, formülasyonlarındaki temel zorluklardan biridir. Bir grup araştırmacı badem sütü hazırlığında badem özütünü stabilize etmek için ultrasonik su banyosu işlemini kullanmıştır. 20 kHz frekans ve 300 W güçte yapılan 4.9 dakikalık işlem, fiziksel olarak stabil bir badem özütü elde edilmesini sağlamıştır. Sedimentasyon özellikleri ölçülerek badem sütünün fiziksel stabilitesi değerlendirilmiştir. İşlem süresinin artmasıyla partikül boyutu küçülmüş ve sedimentasyon oranı azalmıştır. Bu, kolloidal sistemin stabilizasyonunu artırmış ve stabilite oranını %20'den %90'a çıkarmıştır (Maghsoudlou vd., 2016; Sarangapany vd., 2022).

Yapılan bir çalışmada, ultrasonik su banyosu kullanarak nohut sütü ve keten tohumu yağı içeren fonksiyonel bir bitkisel içecek geliştirmeyi amaçlamışlardır. 20 kHz frekansta, 130-195 W güçte ve 2-8 dakika süresince ultrason uygulanmıştır. Optimum koşullarda elde edilen emülsiyonlar yüksek krema stabilitesi, küçük partikül boyutları (0.78-1.12 μm) ve uygun zeta potansiyel değerleri göstermiştir. Ultrasonikasyonun, proteinleri kısmen denatüre ederek daha stabil emülsiyonlar oluşturduğu ve sedimentasyonu azalttığı belirlenmiştir. Çalışma, bitkisel süt üretiminde ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyonun etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur (Vallath vd., 2022).

Ultrasonik su banyosu işleminin mikroorganizma aktivitesine de etkisi olduğu yapılan çalışmalardan ifade edilmiştir. Örneğin herrera-ponce ve ark. yaptıkları çalışmada yulaf sütüne 3 dakika ultrasonik işlem uygulanmış, probiyotik olan *L. casei* 431 büyümesi, yüksek antioksidan aktivite ve iyi tüketici kabulü sağlamıştır (Herrera-Ponce vd., 2022; Sarangapany vd., 2022).

Fındık sütü üretiminde, ultrasonik su banyosu işlemine tabi tutulan örnekler, fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikler açısından değerlendirilmiş ve ultrases uygulamasının toplam fenolik bileşenler ve antioksidan aktiviteyi artırdığını, sedimentasyon, viskozite gibi yapısal özellikleri iyileştirdiğini ve mikroorganizmaların tamamen inaktivasyonunu sağladığı ifade edilmiştir (Atalar vd., 2019). Başka bir çalışmada ise ultrasonikasyon işleminin, *E. coli* ve *L. monocytogenes* bakterilerinin miktarını önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir (Iorio vd., 2019).

Literatürde susam tohumundan ultrasonik su banyosu destekli süt ekstraksiyonu ve bu sürecin optimize edilmesi ilgili yapılan bazı çalışmalar mevcuttur. Örneğin Chemat ve ark. (2017) gıda işleme teknikleri üzerine yaptıkları incelemede, ultrasonik destekli ekstraksiyon yönteminin, susam tohumu gibi bitkisel süt üretiminde kullanılan hammaddelerin verimliliğini artırmada etkili bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, yapılan bir çalışmada ultrasonikasyon kullanımının susam da dahil olmak üzere çeşitli tohumlardan yağ ekstraksiyonunu hızlandığını ve termal bozulmayı minimize ettiğini göstermiştir (Wen vd., 2018). Başka bir çalışmada ise susam tohumlarından elde edilen yan ürünlerin antioksidan potansiyelini incelemiş ve ultrasesin ekstraksiyonun verimi artırırken, antioksidanların korunmasına yardımcı olduğunu ortaya koymuştur. Bu da susam sütü üretiminde kaliteyi artıran önemli bir faktördür. Bitkisel kaynaklı sütlerin üretiminde ekstraksiyon işlem koşullarının optimize edilmesi, elde edilecek nihai üründe besin ve fonksiyonel bileşenlerin en yüksek düzeyde korunmasını sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır (Mohdaly vd., 2011).

Susam tohumlarından süt üretimi için ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyonun optimize edilmesi üzerine yapılan çalışmaların sınırlı sayıda olması, bu konunun özgünlüğünü artıran önemli bir faktördür. Çoğu araştırma, ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyonun genel olarak bitkisel süt üretiminde kullanılabilirliğini

incelemiş olsa da susam tohumu özelinde bu yöntemlerin detaylı bir şekilde incelenmesi ve optimize edilmesi oldukça kısıtlıdır. Bu nedenle, susam sütü üretiminde ultrases ekstraksiyonun verimliliğini artırmak için işlem parametrelerinin optimize edilmesi, literatürdeki boşluğu dolduracak ve bu alanda yeni bir katkı sağlayacaktır. Susam sütü, sıvı formda uzun süre saklanması zordur çünkü raf ömrü genellikle kısadır. Taze sütlerin mikrobiyal büyüme ve oksidasyon gibi faktörler nedeniyle bozulma riski yüksektir. Kurutma, sıvı ürünün su içeriğini azaltarak mikroorganizmaların gelişmesini engeller ve besin değerlerinin korunmasını sağlar. Ayrıca, toz formunda sunulan ürünler, uzun süreli depolama ve taşıma açısından daha pratik bir seçenek sunar. Bu bağlamda, farklı kurutma yöntemleri ile süt tozunun üretimi hem raf ömrünü uzatacak hem de ürünün besin değerlerinin korunmasını sağlayacaktır.

2.6. Bitkisel Kaynaklı Süt Tozu Üretimi Çalışmaları

Bitkisel kaynaklı sütlerin besin içeriğinin yanı sıra raf ömrü büyük önem taşımaktadır. Çeşitli sütlerin toz formuna dönüştürülmesi bu sorunun çözümünde büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu alanda yapılan bazı çalışmalarda susam sütü üretilmiş, ancak bu sütün diğer bitkisel pastörize sütlerde olduğu gibi sınırlı bir raf ömrüne sahip olduğu belirlenmiştir (Ahmadian-Kouchaksaraei vd.,2014). Artan sağlık bilinci ve vegan beslenme trendleri, bitkisel kaynaklı süt tozu pazarının hızlı bir şekilde büyümesine katkıda bulunmuştur. Persistence Market Research'ün Mart 2023'te yayımladığı rapora göre, 2022 yılında 373.4 milyon ABD doları olan küresel pazarın, 2023-2033 yılları arasında %7.6'lık bir bileşik yıllık büyüme oranı ile 2033 yılına kadar 833.9 milyon ABD dolarına ulaşması beklenmektedir (Persistence Market Research,2025). Bu büyüme, bitkisel süt tozu üretiminde kullanılan kurutma yöntemlerinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

2.7. Kurutma Yöntemleri

Kurutma işlemi, gıdanın raf ömrünü uzatmak ve mikrobiyal ile enzimatik bozulmayı azaltmak amacıyla nemin uzaklaştırılmasına dayanan, gıda muhafazasında yaygın bir yöntemdir (Nisoa vd., 2021). Ancak, bu süreç endüstride en fazla enerji tüketen işlemlerden biri olduğundan, enerji tüketimini azaltmaya yönelik alternatif kurutma

yöntemleri üzerine çalışmalar önem kazanmıştır. Bu bağlamda, bu çalışmada çeşitli kurutma yöntemlerini karşılaştırarak, besin içeriğini en iyi koruyan yöntemi belirlemeyi amaçlamakta ve bu alanda yeni bir perspektif sunarak gıda endüstrisine yenilikçi ve sürdürülebilir çözümler kazandırmayı hedeflenmiştir. Özellikle sıcak hava konveksiyonlu kurutma yöntemi, yüksek sıcaklık ve uzun süreli işlemler nedeniyle ürün kalitesinde bozulmalara yol açabilmekte; bu durum renk, tat, yüzey özellikleri ve besin içeriğinde olumsuz değişikliklere neden olabilmektedir. Bu nedenle, sprey kurutma gibi yenilikçi ve çevre dostu alternatif yöntemler geliştirilmiş ve literatürde bu yönde yapılmış çalışmalar yer almaktadır.

Keten tohumu yağı gibi omega-3 yağ asitleri ve lignanlar açısından zengin bileşenlerin stabilitesini artırmak için püskürtmeli kurutma yöntemi kullanılmıştır. Örneğin, keten tohumu yağının enkapsülasyonu için yağsız süt tozu kullanılmış ve daha düşük sıcaklıklar ile optimal besleme hızlarının, besin değerlerini daha iyi koruyarak daha stabil bir toz elde edilmesini sağladığı belirlenmiştir (Çevik vd., 2021). Benzer şekilde, fındık sütü tozu üretiminde püskürtmeli kurutma ve dondurarak kurutma yöntemleri karşılaştırılmış; püskürtmeli kurutmanın hızlı su uzaklaştırması ile toz stabilitesini artırdığı, ancak bazı besin kayıplarına neden olduğu; dondurarak kurutmanın ise daha yüksek besin koruması sağladığı, ancak maliyetinin yüksek olduğu saptanmıştır (Özkan Güner, 2017). Bu çalışmalar, bitkisel süt tozlarının endüstriyel üretiminde kurutma parametrelerinin dikkatle belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Hindistan cevizi süt tozu üretiminde püskürtmeli kurutma yönteminin uygulanabilirliği, belirli sıcaklık ve katkı maddeleri ile başarılı bir şekilde ortaya konmuş; elde edilen tozun inek sütüne benzer özellikler gösterdiği ve uzun süreli saklama koşullarında bile homojen bir çözelti sunduğu belirtilmiştir (Ali Hassan, 1985). Ayrıca, kavun tohumu süt tozunun üretiminde kullanılan püskürtmeli kurutma parametreleri, toz verimliliğini ve stabilitesini önemli ölçüde artırmıştır (Zungur-Bastioğlu vd., 2016). Mango sütü tozu üretiminde ise püskürtmeli kurutma ile elde edilen tozun daha uzun süreli saklanabilir olduğu ve uygun ambalajlama yöntemleri ile kalitesinin korunduğu belirlenmiştir (Chauhan vd., 2013). Tüm bu çalışmalar, bitkisel süt tozu üretiminde kurutma yöntemlerinin kritik rolünü ve üretim sürecinin optimizasyonunun gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2.7.1. Vakumlu kurutma yöntemi

Vakum kurutma, nem içeriği yüksek gıdaların düşük basınç koşullarında su kaybederek kurutulmasını sağlayan verimli bir yöntemdir. Geleneksel atmosferik kurutma yöntemlerine göre daha hızlı su uzaklaştırma, oksijensiz bir işlem ortamı sağlaması gibi avantajlara sahiptir. Aynı zamanda daha düşük enerji kullanımı sağlar. Bu yöntem özellikle meyveler gibi uzun sürede kuruyan gıda ürünleri için önemli bir alternatif yöntemdir. Bununla birlikte, vakumlu kurutma, mango, patates ve patlıcan gibi çeşitli tarımsal ürünlerin kurutulmasında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Alibaş, 2011; Jaya vd., 2004; Methakhup vd., 2005). Yapılan çalışmalar, bu yöntem ile kurutma süresinin diğer geleneksel metotlara göre belirgin şekilde kısaldığını ortaya koymuştur (Erbay vd., 2008; Yongsawatdigul & Gunasekaran, 1996). Ancak bu yöntemin ilk yatırım maliyetleri, sıcak hava ile kurutmaya göre daha yüksek olabilmektedir (Tsami vd.,1998). Vakum altında gıda maddelerinde bulunan suyun, düşük sıcaklıklarda buharlaşması sağlanırken, aynı zamanda oksidasyon reaksiyonları da azalır, çünkü kurutma işlemi oksijensiz ortamda gerçekleşir. Bu, ürünlerin renk, tekstür ve aroma gibi kalite özelliklerinin daha iyi korunmasına olanak tanır. Özellikle ısıya duyarlı ürünlerde, vakumlu kurutma daha düşük sıcaklıklarla hızlı kuruma sağlar ve bu sayede besin içeriği kayıpları minimize edilir (Arévalo-Pinedo vd .,2007.; Ziraat Dergisi, 2012). Literatürde, vakumlu kurutma yöntemiyle üretilen toz ürünler üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur.

2012 yılında gerçekleştirilen bir araştırmada, vakumlu kurutmanın bal tozu üretiminde önemli avantajları bulunduğu ortaya konmuştur. Çalışmada, vakumlu kurutmanın sprey kurutmaya kıyasla daha yüksek verim (%72.985 – %73.745) sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, ısının etkisinin azaltılmasıyla bal tozundaki besin değerlerinin ve aroma gibi sensörük özelliklerin daha iyi korunduğu tespit edilmiştir. Panelistlerin değerlendirmelerine göre, vakumlu kurutma ile üretilen bal tozunun aroma ve tadı daha fazla beğenilmiş, bu da ürünün sensörük kabulünün daha yüksek olduğunu göstermektedir. Son olarak, vakumlu kurutma yönteminin, daha düşük DN (diastaz numarası) değeri ve daha yüksek HMF değeri ile daha az ısıya maruz kalmayı sağladığı, bunun da ürün kalitesini artırdığı bulunmuştur (Nurhad vd., 2012). Yapılan başka bir çalışmada vakumlu kurutmanın, meyan kökü özütü tozunun antioksidan kapasitesini korumada etkili olduğunu ayrıca, higroskopikliğini azaltarak daha düşük

nem alma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Vakumlu kurutma, gallik asit ve flavonoid bileşiklerinin içeriğini de başarılı bir şekilde korumuş. Bunun yanı sıra, su çözünürlüğü ve disintegrasyon süresi gibi fizikokimyasal özellikler üzerinde olumsuz bir etki yapmaz, böylece ürünün genel kalitesini iyileştirdiği ifade edilmiştir.

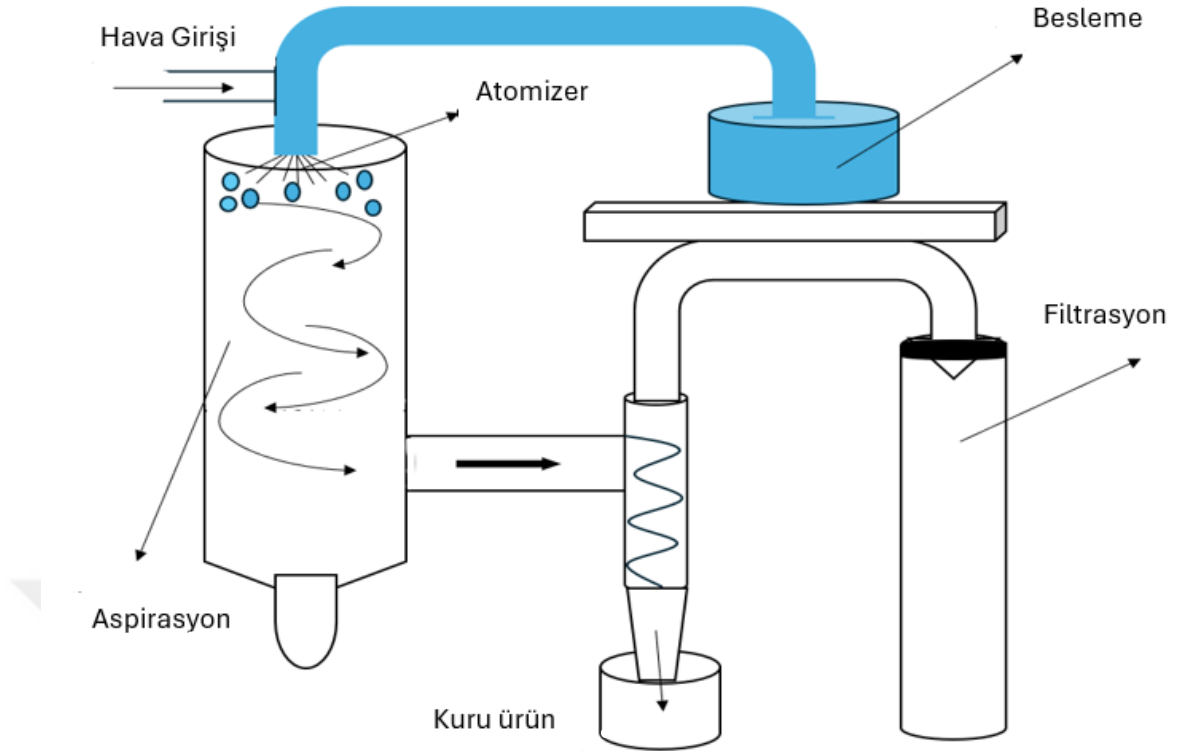
Bu bağlamda vakumlu kurutma yönteminin gıda ürünlerindeki kaliteyi koruma ve enerji verimliliği sağlama avantajları, süt tozu üretiminde de benzer şekilde dikkat çekici sonuçlar doğurabilmektedir. Benzer şekilde yapılan bir çalışmada vakumlu kurutma, süt tozunun fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olduğunu, suyun transfer mekanizmalarını kontrol ederek tozun kalitesini artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, vakumlu kurutma ile daha düşük sıcaklıklarda işlem yapılarak proteinlerin yapısal ve fonksiyonel değişiklikleri minimize edildiği ifade edilmiştir (Schuck vd., 2013). Bu özelliklerin yanı sıra literatürde vakum kurutma işleminin yüksek ısıya dayanıklı probiyotiklerin korunmasını sağladığı da ifade edilmiştir (Halder vd., 2020). Susam sütünün vakum kurutma yöntemiyle toz hale getirilmesi üzerine literatürde bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Vakum kurutma, düşük sıcaklıklarda suyun uzaklaştırılmasına olanak tanıyan ve bu sayede besin değerlerinin korunmasını sağlayan bir tekniktir. Ancak, bu yöntem genellikle süt ürünleri üzerinde test edilmiştir ve bitkisel sütler üzerinde yapılan uygulamalara dair sınırlı çalışma mevcuttur. Bu nedenle, susam sütü gibi bir bitkisel süt üzerinde vakum kurutma yönteminin uygulanması, sadece bu yöntemin etkinliğini ve verimliliğini incelemekle kalmayacak, aynı zamanda susamın besin profili ve fonksiyonel özellikleri üzerinde de daha fazla bilgi edinilmesine yardımcı olacaktır. Bu alandaki eksiklik, çalışmanın yeni ve özgün bir katkı sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır. Vakum kurutma gibi tekniklerin, bitkisel sütler üzerine etkileri henüz yeterince araştırılmamışken, bu konudaki bir çalışma, literatüre değerli bir yenilik getirebilmektedir. Susam sütü gibi daha az incelenmiş bir malzeme ile yapılan araştırmalar, gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturabilmekte ve bu sayede alanın daha derinlemesine keşfedilmesine olanak sağlayabileceği düşünülmektedir.

2.7.2. Püskürtmeli kurutma (sprey kurutma) yöntemi

Sprey kurutma, sıvı formdaki maddeleri hızlı ve verimli bir şekilde toz haline getirmek için kullanılan bir kurutma yöntemidir. Bu teknik, özellikle gıda, ilaç ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Süreç, sıvı bir karışımın (çözelti, süspansiyon, emülsiyon veya jel) çok küçük damlacıklar halinde püskürtülerek sıcak hava ile temas ettirilmesi ve içeriğindeki sıvının hızla buharlaştırılması prensibine dayanır (Mardani vd., 2024; Snyder, 2012). Böylece başlangıçta sıvı halde olan madde, serbest akışlı ve kuru bir toz haline dönüşür (Yan vd., 2024).

Sprey kurutma süreci üç temel aşamadan oluşur. İlk olarak, sıvı besleme çözeltisi özel bir atomizör yardımıyla küçük damlacıklar halinde püskürtülür. Bu atomizasyon işlemi, sıvının yüzey alanını artırarak kurutma verimliliğini yükseltir. Ardından, püskürtülen damlacıklar sıcak hava ile temas ettiğinde içerdikleri su hızla buharlaşır. Kurutma işlemi, sıcak hava akışının hızına ve sıcaklığına bağlı olarak değişebilir. Örneğin, astaksantin mikroenkapsülasyonu için yapılan bir çalışmada, en iyi kurutma sıcaklıkları giriş havası için 160 °C, çıkış havası için ise 70 °C olarak belirlenmiştir (Shen vd., 2014). Son aşamada, kurutulan partiküller siklon ayırıcı veya filtre sistemleri kullanılarak hava akımından ayrıştırılır ve toz formunda kolektör haznesinde biriktirilir (Ozkan vd., 2019).



Şekil 2.3. Püskürtmeli kurutucunun şematik gösterimi

Şekil 2.3`de temel bir püskürtmeli kurutucu görülmektedir. Püskürtmeli kurutucuların ana parçaları atomizer, kurutma odası, siklonlar, hava dağıtıcısı, blower fanları ve akışkan yatak gibi bileşenlerden oluşan karmaşık bir sistemdir. Her bir bileşen, sıvıların hızlı bir şekilde kuru toza dönüştürülmesi sürecinde belirli bir işlevi yerine getirerek, kurutma işleminin etkinliğini artırır (Yetişen vd., 2021).

Püskürtmeli kurutucunun en önemli bileşeni atomizerdir. Atomizer, sıvı beslemeyi küçük damlacıklara dönüştürerek, sıvının kurutma odasına düzgün bir şekilde püskürtülmesini sağlar. Atomizerin seçiminde, elde edilmesi istenen kuru ürünün partikül boyutu ve beslemenin viskozitesi gibi faktörler göz önünde bulundurulur. İki ana atomizer tipi mevcuttur: Rotary atomizer, döner bir başlık aracılığıyla sıvıyı püskürten bir sistemdir. Bu tip atomizerler, genellikle daha küçük partiküller elde edilmek istendiğinde tercih edilir. Nozul atomizer ise, basınçlı bir pompa yardımıyla sıvıyı nozuldan püskürterek atomizasyon işlemini gerçekleştirir. Bu atomizerler, daha büyük ve kaba partiküllerin üretilmesi gereken durumlarda kullanılır. Atomizerin doğru seçimi, ürün kalitesi ve verimlilik açısından büyük bir öneme sahiptir.

Atomizasyon işlemi, sıvıdan nemin hızlı bir şekilde buharlaşmasını sağlayarak kurutma sürecinin temelini oluşturur (Campbell vd., 2020).

Kurutma odası, sıvı damlacıklarının sıcak hava ile etkileşime girerek kuruma işleminin gerçekleştiği alandır. Bu oda genellikle yalıtımlıdır ve sıvının püskürtülerek havayla temas ettiği alandır. Kurutma odasında, atomize edilmiş sıvı damlacıkları sıcak hava ile hızlıca buharlaşarak kurur. Bu aşama, sıcak havanın damlacıklarla verimli bir şekilde temas etmesini sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır, çünkü bu durum kurutma sürecinin hızını ve etkinliğini doğrudan etkiler (Kinemak, 2010).

Siklonlar, kurutma odasından çıkan havada bulunan katı partiküllerin ayrılmasını sağlamak için kullanılan önemli bileşenlerdir. Siklonlar, döner bir hava akışı yaratır ve böylece tozların merkezde birikmesini sağlar. Bu işlem, havada bulunan tozların çevreye salınmadan önce ayrılmasını ve temizlenmiş havanın dışarıya atılmasını mümkün kılar. Siklonlar, çevre dostu bir işlem süreci sağlamak ve kurutma sisteminin verimliliğini artırmak açısından kritik bir rol oynar (Yohana vd., 2018).

Hava dağıtıcısı, kurutma odasına giren sıcak havayı yönlendiren bir bileşendir. Bu parça, sıcak havanın kurutma odasında homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlayarak kurutma sürecinin verimliliğini artırır. Hava dağıtıcısının etkin çalışması, hava akış hızının ve buharlaşma sürecinin optimize edilmesinde büyük öneme sahiptir. Ayrıca, hava dağıtıcısı, sıcak havanın damlacıklarla etkili bir şekilde temas etmesini sağlayarak kurutmanın daha verimli olmasına yardımcı olur (Kinemak, 2010).

Blower fanları ise, kurutma odasına giren ve çıkan havayı üfleyen mekanizmalardır. Bu fanlar, kurutma odasında hava akışının düzgün bir şekilde sağlanmasında ve sıcak havanın odada kalış süresinin kontrol edilmesinde kritik bir rol oynar. Hava akış hızının doğru şekilde ayarlanması, ürün kalitesini doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Fanlar ayrıca, kurutma odasından çıkan havayı dışarıya atarak, cihazın genel verimliliğini artırır (Sadıkoğlu & Özdemir, 2003).

Akışkan yatak, iç fluidbed, kurutulmuş malzemenin son bir kez kurutulmasını sağlamak amacıyla kullanılan bir sistemdir. Akışkan yatak, malzemenin nemini çıkarmak için sıcak hava akışını kullanır ve kurutulmuş partikülleri sabit tutarak,

içlerindeki nemin daha fazla buharlaşmasını sağlar. Bu sistem, genellikle kurutma işleminin son aşamalarında devreye girer ve daha kuru, homojen bir ürün elde edilmesine olanak tanır (Kinemak,2010).

Sprey kurutma, hızlı kurutma süresi ve homojen partikül üretimi gibi önemli avantajlar sunar. Üretilen tozlar belirli bir partikül büyüklüğüne sahip olup serbest akışlıdır, bu da endüstriyel uygulamalarda büyük kolaylık sağlar. Ayrıca, özellikle uçucu, hassas ve biyolojik olarak aktif bileşenleri koruyarak stabil hale getirdiği için gıda ve ilaç sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Mardani vd ., 2024; Thu vd., 2021). Bunun yanı sıra, mikroenkapsülasyon yoluyla bileşenlerin kontrollü salımını sağlayarak raf ömrünü uzatır. Örneğin, sprej kurutma ile elde edilen mikroenkapsüle astaksantin tozlarının oksidasyona karşı daha dayanıklı olduğu gösterilmiştir (Shen vd., 2014).

Bu yöntemin kullanım alanları oldukça geniştir. Gıda endüstrisinde süt ve meyve tozlarının üretiminde, aroma ve esansiyel yağların enkapsülasyonunda, vitamin ve biyolojik aktif bileşenlerin stabil hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılır (Fernandes vd., 2014). Eczacılık alanında ilaç taşıyıcı sistemlerinde ve enzim ile protein bazlı ilaçların kurutulmasında büyük bir rol oynar (Tang vd.,2023). Kimya sektöründe ise pigment, seramik ve polimer bazlı malzemelerin kurutulmasında önemli bir tekniktir.

Sonuç olarak, sprej kurutma, fonksiyonel bileşenleri koruma, yüksek kaliteli ve stabil toz üretimi sağlama açısından oldukça avantajlı bir yöntemdir. Yöntemin başarısı, kullanılan taşıyıcı maddelere, sıcaklık ayarlarına ve püskürtme tekniğine bağlı olarak değişmektedir. Gıda, ilaç ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılması, bu tekniğin sağladığı verimlilik ve kalite standartlarının bir göstergesidir.

Literatürde sprej kurutma kullanılarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Güner (2017) yaptığı bir çalışmada ülkemizde önemli miktarlarda üretilen fındık hammaddesini kullanarak katma değeri yüksek bitkisel kaynaklı süt tozu üretmeyi ve bu ürünün karakterizasyonunu yapmayı amaçlamıştır. Fındık sütü, ultrason teknolojisi ile homojenize edilerek, sprej kurutma ve liyofilizasyon yöntemleriyle toz haline getirilmiştir. Çalışma sonucunda, sprej kurutma yöntemi ile elde edilen fındık sütü tozlarının nem içeriği, liyofilizasyon yöntemine göre daha düşük bulunmuş, bu da

ürünlerin daha uzun süre dayanmasını ve depolama ömrünün artmasını sağlamıştır. Ayrıca, sprey kurutma yöntemiyle elde edilen fındık sütü tozlarının akışkanlık özellikleri daha yüksek çıkmış ve bu da tozların işlenmesi ve taşınması açısından avantaj oluşturmuştur. Sprey kurutma, daha düşük sıcaklıklarda erime fazına geçiş gösterdiği için ürünün termal hasar görmeden kurutulmasını ve besin değerlerinin korunmasını sağlamaktadır. Ayrıca, sprey kurutma ile elde edilen fındık sütü tozlarının su aktivitesi değeri mikroorganizmaların üremesine elverişli olmayan seviyelerde bulunmuş, bu da ürünün raf ömrünü uzatarak mikrobiyal stabiliteyi artırmak için maltodekstrin eklenmesi önemlidir (Güner, 2017).

Başka bir çalışmada, kefir tozu üretimi için sprey kurutma yöntemi uygulanmış ve kurutma, depolama ve test edilmiş gastrointestinal koşullarda mikroorganizmaların hayatta kalma oranları araştırılmıştır. sprey kurutmanın kefir tozu üretimi için uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Özellikle, sprey kurutma kefirin depolanması ve taşınması açısından büyük kolaylıklar sağlamıştır ayrıca taşıyıcılar (yağsız süt, peynir altı suyu permeatı, maltodekstrin) kullanıldığında mikroorganizmaların hayatta kalma oranı önemli ölçüde artmıştır, böylece kefir tozu daha stabil hale gelmektedir. Bu yöntem, kefirde elde edilen ürünlerin daha uzun süre saklanabilirliğini artırırken, mikroorganizmaların canlılığını korumaktadır. Ayrıca, sprey kurutma, kefir tozunun üretiminde hızlı ve verimli bir yaklaşım sunmaktadır (Teijeiro vd., 2018).

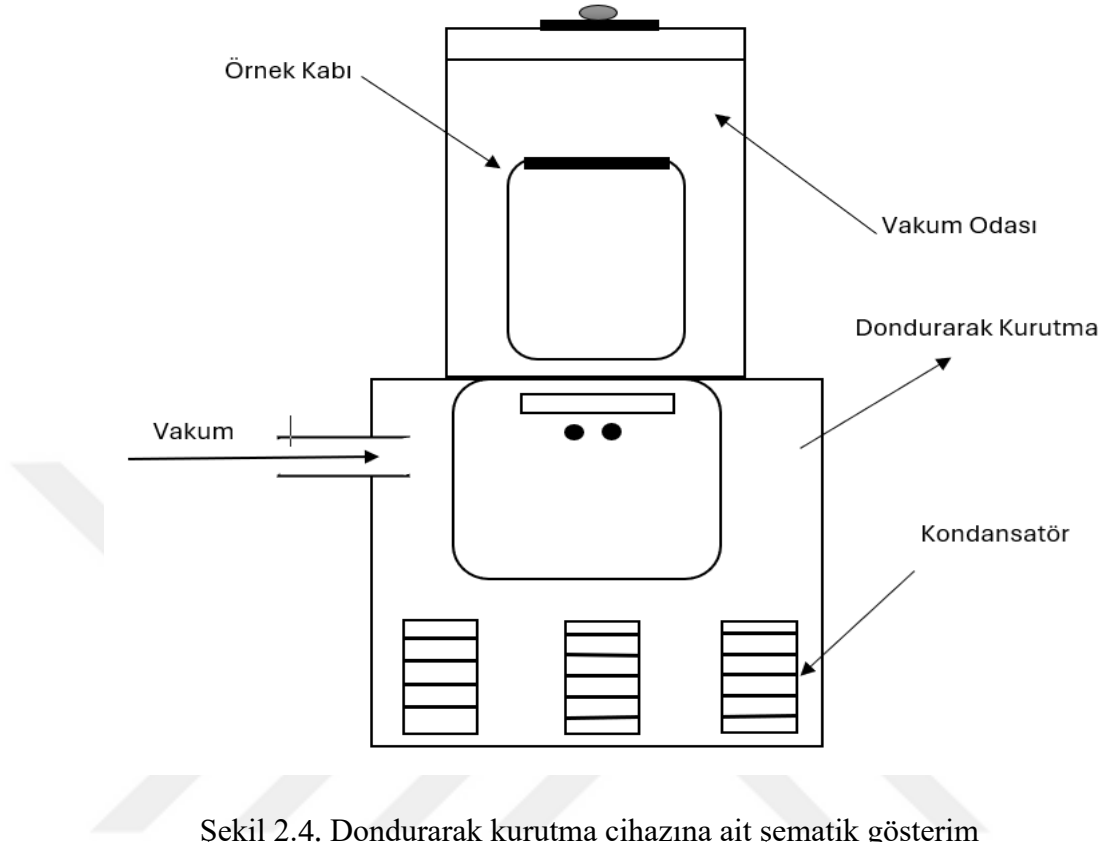
Araştırmalar sonucu bitkisel içeceklerin taşıyıcı madde eklenmeden toz haline getirilebileceği ve bu yöntemle doğal bir ürün elde edilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, FTIR analizi, sprey kurutma yönteminin bitkisel içeceklerin kimyasal bileşenlerini korumada etkili olduğunu göstermektedir. Bu yöntemle elde edilen tozların besin değerlerinin ve kimyasal yapıların bozulmadan korunması sağlanmıştır (Samborska vd., 2024). Bunun yanı sıra Süt tozu üretiminde sprey kurutma yönteminin etkilerini inceleyen birkaç önemli çalışma bulunmaktadır. Rodríguez ve ark. (2022) süt proteinlerinin sprey kurutma sürecinde parametrelerin optimizasyonunu ve ürün kalitesini araştırmıştır. Çalışmada, işlem sıcaklığı ve akışkanlık gibi faktörlerin toz partikül boyutu üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Rodríguez vd., 2022). Fang ve ark. (2012), sprey kurutma koşullarının süt tozlarının fiziksel özellikleri ve çözünürlük üzerindeki etkilerini ele almış, farklı kurutma sıcaklıklarının ve konsantrasyonlarının bu özellikler üzerindeki rolünü incelemiştir (Fang vd., 2012). Yaakub ve arkadaşları

(2019) st rnlerinin sprey kurutma srecinin besin kalitesi zerindeki etkilerini ve bu rnlerin gıda iřleme uygulamalarındaki roln deęerlendirmiřtir (Yaakub vd., 2019). Bu alıřmada, besin deęerlerinin korunması ve iřlem sonrası kalite deęerlendirilmiřtir. Nayak ve ark. (2022) eřek st tozlarının sprey kurutma kořullarını optimize ederek znrlk, ıslanabilirlik ve daęılrılık gibi rehidrasyon zellikleri zerindeki etkilerini deęerlendirmiřlerdir (Nayak vd., 2022). Bu arařtırmalar, sprey kurutma ynteminin st tozu retimindeki roln ve eřitli parametrelerin rn kalitesi zerindeki etkilerini anlamada nemli bir temel saęlamaktadır. hava uzaklařtırıldıęı iin, aktif bileřiklerin oksidasyonu da byk lde azaltılmakta ve bylece rn kalitesi korunmaktadır (Zielinska vd., 2016). Bunların yanı sıra sprey kurutma yntemiyle retilmiř pek ok bitki bazlı st tozu bulunmaktadır. rnek olarak yaę palmyesi st (Samsu vd., 2020), fındık st tozu (Gner, 2017), soya st tozu (Singh vd.,2022), yulaf st tozu (Angel vd., 2024) ve yer fıstıęı st tozu (Hardy vd., 2016) bu alanda yapılmıř alıřmalara rnek teřkil etmektedir. Ancak, literatrde susam st ile yapılmıř bir sprey kurutma tozu alıřmasına rastlanılmamıřtır. Bu eksiklik, yapılan arařtırmanın zgnlęn artırmakta ve bitki bazlı st alternatifleri ile ilgili literatre nemli bir katkı saęlamaktadır. Susam st, besin deęeri ve saęlıęa olan potansiyel faydalarıyla dikkat ekici bir seenek olup, bu alıřmanın, sprey kurutma yntemiyle elde edilen susam st tozunun zelliklerini incelemesi, yeni bir gıda rnnn geliřtirilmesine olanak tanımaya ve literatrdeki bořluęu doldurmaya yardımcı olacaktır.

2.7.3. Dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yntemi

Dondurarak kurutma, donmuř gıdalardan veya zeltilerden zcnn (genellikle su) sblimasyon yoluyla, baęlı suyun ise desorpsiyon yoluyla uzaklařtırıldıęı bir iřlemdir. Dondurarak kurutma, suyu, saklanan buz kristallerinin sblimleřtirilmesiyle uzaklařtıran bir yntemdir. Bu srec, geleneksel kurutma yntemlerine gre daha kaliteli rnlerin elde edilmesini saęlar. Farmastik alanda nemli bir geliřme gstermekte olan bu yntem, srdrlebilmesine raęmen, kurutma sresini (zellikle birincil kurutma ařamasını) en aza indirmek, maliyetleri en aza indirmek iin kritik gidiřata sahiptir. Ancak, tm buzun uzaklařtırılmadan sıcaklıkların, rn miktarına gre yolu aılabilir. Bu nedenle, birincil kurutma ařamasının sona erdięinin doęru bir řekilde tespit edilmesi nemlidir. Son yıllarda dondurarak kurutmak, rn daęılımı

için optimize edilmekte ve gelecekte bu alanda önemli ilerlemeler sağlamaktadır. (Gaidhani vd., 2015).



Bu işlem üç ana aşamadan oluşur; dondurma, birincil kurutma (süblimasyon) ve ikincil kurutma (desorpsiyon) olarak tanımlanır. Dondurma aşaması, malzemenin ötektik noktaya kadar soğutulmasıyla başlar. Bu noktada, buz kristalleri oluşur ve bu kristaller kurutma sırasında suyun süblimasyon yoluyla taşınmasını sağlar (Sadıkoğlu vd., 2003). Buz kristallerinin büyüklüğü ve dağılımı, kurutulmuş ürünün gözenek yapısını belirler ve dolayısıyla kurutma hızını etkiler. Ayrıca, büyük kristallerin dondurulması daha kolaydır, bu nedenle yavaş dondurma veya sıcaklık döngüleri kullanılarak kristallerin boyutu artırılabilir (Esfandiary vd., 2016; Uwineza & Zhang, 2026). Ancak, gıda veya hücre içeren materyallerde büyük buz kristalleri hücre duvarlarını parçalayabileceğinden dikkatli olunmalıdır. Genellikle, dondurma sıcaklıkları -50°C ile -80°C arasında tutulur (Bulut vd., 2016; Shukla, 2011).

Birincil kurutma, düşük basınç altında donmuş haldeki suyun süblimasyonla uzaklaştırılması aşamasıdır. Bu süreçte, malzemede bulunan suyun yaklaşık %95'i süblimleşir. Bu işlem, sıcaklık dikkatlice kontrol edilmediği takdirde malzemenin

yapısını bozabilir (Liapis vd., 2020; Sadıkoğlu vd., 2003). Vakum, süblimleşmeyi hızlandırır ve buharlaşan suyun yeniden donmasını sağlamak için -50°C 'nin altında çalışan bir yoğuşturucu (kondansör) kullanılır (Shukla, 2011).

İkincil kurutma aşamasında, birincil kurutma sırasında giderilemeyen bağlı suyun desorpsiyon yoluyla uzaklaştırılması sağlanır. Bu aşama, malzeme ile su arasındaki fizikokimyasal bağların kırılması için sıcaklığın 0°C 'nin üzerine çıkmasını gerektirir. Bu aşamada basınç daha da düşürülür (mikrobar seviyelerine) ve desorpsiyon teşvik edilir. Ancak, bazı ürünler için basıncın artırılması faydalı olabilir. İşlem tamamlandığında, sistem inert bir gaz (örneğin azot) ile doldurulur ve malzeme mühürlenir. Nihai ürünlerdeki su miktarı genellikle %1 ile %4 arasında olur (Silva-Espinoza vd., 2019).

Dondurarak kurutma işlemi, özellikle ısıya duyarlı bileşiklerin korunmasına olanak tanır, bu da yüksek kaliteli ve uzun raf ömrüne sahip ürünlerin elde edilmesini sağlar. Bu yöntem, dondurma hızı, kurutma sıcaklığı ve sistemdeki basınç gibi parametrelerle doğrudan ilişkilidir (Zhang vd., 2023). Ayrıca, gıda ve biyolojik materyallerin dondurarak kurutulması, aroma ve tat kaybının çok az olması avantajına da sahiptir (Sadıkoğlu vd., 2003).

Yapılan bir çalışmada, inek, keçi ve at sütlerinden elde edilen spre ve dondurularak kurutulmuş süt tozlarının fiziko-kimyasal özelliklerini, mikroyapısını ve proteomunu karşılaştırarak, farklı kurutma yöntemlerinin süt tozları üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışma, spre kurutulmuş süt tozunun daha küçük partikül boyutuna, daha düşük hava içeriğine ve yeniden çözünürlük özelliklerine sahip olduğunu, dondurulmuş süt tozunun ise bağışıklıkla ilişkili proteinler ve antimikrobiyal enzimler açısından daha yüksek seviyelere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Dondurarak kurutma, özellikle bağışıklıkla ilişkili proteinler ve antimikrobiyal enzimler açısından daha zengin süt tozları sunarak, biyolojik fonksiyonları destekleme potansiyeline sahiptir (Zhou vd., 2025).

Yapılan bir çalışmada hindistancevizi sütü tozu üretimi sırasında spre kurutma ve dondurularak kurutma yöntemlerinin fiziksel, kimyasal, termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Dondurularak kurutma, hindistancevizi sütü

tozunun daha stabil bir form kazanmasını sağlamıştır. Dondurularak kurutulmuş tozlar, düşük nem içeriği ile daha stabil hale gelmiş, bu da tozun depolama ve taşıma sırasında topaklanmaya karşı daha dayanıklı olmasına yol açmıştır. Ayrıca, dondurulmuş kurutma yönteminin, tozların daha gözenekli yapıya sahip olmasını sağladığı ve bu sayede daha serbest akışlı olduğunu gösteren Carr İndeksi değerleri ile desteklenmiştir. Dondurularak kurutulmuş tozlar, sprey kurutulmuş tozlara göre daha büyük parçacık boyutlarına ve daha iyi akış özelliklerine sahip olmuştur. Bunun yanı sıra, dondurularak kurutulmuş tozlar, daha düşük nem içeriği ve büyük interparçacık boşlukları sayesinde daha uzun raf ömrü ve daha stabil depolama koşulları sunduğu ifade edilmiştir (Zafisah vd., 2018).

Dondurularak kurutma yöntemi, özellikle ısıya duyarlı gıda bileşenlerinin korunmasında büyük bir avantaja sahiptir. Bu yöntem, besin değerini ve fonksiyonel bileşenleri daha iyi muhafaza etmek için tercih edilmektedir çünkü düşük sıcaklıklarda yapılan kurutma işlemi, bu bileşenlerin bozulmasını engeller. Literatürde bu yöntemle yapılan birçok çalışma mevcuttur. Dondurularak kurutulmuş susam sütü üzerine yapılan çalışmalara rastlanılmamıştır. Susam sütü, bitkisel süt alternatifleri arasında önemli bir yer tutmakla birlikte, içeriğinde bulunan besin öğeleri ve fonksiyonel bileşenlerin korunması, ürünün kalitesi ve raf ömrü açısından oldukça kritik bir faktördür. Bu tez çalışması, susam sütü tozu üretimi için dondurularak kurutma yöntemini kullanarak, susam sütündeki besin bileşenlerinin korunmasını, sütün fonksiyonel özelliklerinin korunmasını ve tozun uzun süreli stabilitesinin sağlanmasını inceleyecektir.

2.8. Gıda Tozları ve Karakterizasyonu

Gıdaların toz formuna dönüştürülmesi, çeşitli avantajları nedeniyle gıda endüstrisinde önemli bir uygulamadır. Öncelikle, toz halindeki gıdalar, taze ürünlere kıyasla daha uzun raf ömrüne sahiptir ve besin değerlerini büyük oranda korurlar. Bu sayede, mevsimsel meyve, sebzeler ve süt gibi ürünler yıl boyunca tüketilebilir hale gelir. Dünyada süt ve süt ürünlerinin üretimi ve tüketimi hızla arttıkça, bu ürünlerden üretilen tozlar en dikkat çeken ürün gruplarından biri haline gelmiştir (Gıda vd., 2019). Ayrıca, toz formundaki gıdalar, yemeklere, içeceklere ve atıştırmalıklara kolayca eklenebilir, bu da pratiklik sağlar. Depolama ve taşıma açısından da avantajlı olan toz

gıdalar, daha az yer kaplar ve nakliye maliyetlerini düşürür. Bu özellikleriyle, gıdaların toz formuna dönüştürülmesi, hem tüketicilere hem de üreticilere önemli faydalar sunar. Gıda tozlarının fiziksel, kimyasal ve davranışsal özelliklerinin detaylı şekilde karakterize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Gıda bileşenlerinden elde edilen toz ürünler, karmaşık yapıları nedeniyle belirli kalite standartlarını sağlamak adına dikkatle kontrol edilmelidir. Tozlar, farklı bileşenlerin kompleks bir karışımı olup, bileşimi ve işlevselliği oldukça karmaşık hale getiren çeşitli etkileşimlere sahiptir. Gıda ürünlerinde bulunan makro bileşenler (su, karbonhidrat, protein ve yağlar), fiziksel durumlarında meydana gelen herhangi bir değişiklik sonucunda, gıda tozlarındaki minör bileşenlerin (vitaminler, fenolik bileşikler vb.) kimyasal özelliklerini de doğrudan etkileyebilmektedir. Örneğin, yüksek su içeriği, toz ürünlerde yapışkanlık ve sertleşme gibi istenmeyen fiziksel değişimlere neden olarak depolama stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Aynı şekilde, lipid ve protein oksidasyonu ile enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyonları, ürünün renk stabilitesinin bozulmasına, istenmeyen tatların oluşmasına ve besin değerinin azalmasına yol açmaktadır (Burgain vd., 2017; Özdemir vd., 2021).

Bu doğrultuda, partiküllerin şekli, boyutu, fizikokimyasal yapısı, çözünme kapasitesi ve parçacıklar arasındaki yapışma kuvveti gibi faktörlerin test edilmesi gerekmektedir. Son yıllarda pek çok gıda hammadde, toz formuna getirilerek ticari ürünlere dönüştürülmüştür (Ermiş, 2015). Gıdaların toz formuna dönüştürülmesi, hem tüketicilere hem de üreticilere önemli faydalar sunar. Gıda tozları, özellikle süt bazlı tozlar, farklı fiziksel ve işlevsel özelliklere sahip olup, bu özellikler ürünün kalitesi, stabilitesi ve kullanım alanları açısından büyük önem taşımaktadır. Tozların akışkanlık, yapışkanlık ve kekleşme eğilimi gibi özellikleri işlenebilirliğini etkilerken, higroskopiklik ve su aktivitesi gibi parametreler raf ömrü üzerinde belirleyici rol oynar. Ayrıca, rehidrasyon kapasitesi (çözünürlük, dağılılabilirlik, batırılabilirlik, ıslanabilirlik), parçacık boyutu dağılımı, yığın yoğunluğu ve parçacık yoğunluğu gibi faktörler, tozun çözünme performansını ve kullanım kolaylığını belirler. Bu bağlamda, aşağıda belirtilen özellikler, gıda tozlarının kalite ve fonksiyonelliğini belirlemede önemli faktörler arasında yer almaktadır.

2.8.1. Partikül boyutu

Gıda ürünlerinin toz akışını etkileyen en önemli faktörlerden biri partikül boyutudur (O'Donoghue vd., 2019). Partikül boyutu aynı zamanda bir çok özellik (akışkanlığı, kütle yoğunluğu, duruş açısı ve sıkıştırılabilirliği) üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Partikül boyutunun küçülmesi, yüzey alanını ve partiküller arası kohezyonu artırarak akışkanlığı olumsuz yönde etkilerken, partikül boyutundaki artış kütle yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Tozların fiziko-kimyasal özelliklerinin ürünün genel karakteristiği üzerindeki kritik (Ermiş, 2015). Ayrıca, partikül boyutu depolama stabilitesini de etkileyerek, tozların nem almasını ve kalite kaybını önlemeye yardımcı olur. Parçacıklı malzemelerde boyut kavramı göreceli bir anlam taşımaktadır. Yapılan araştırmalar, toz ürünlerdeki kekleşmenin de temel nedeninin partikül boyutuyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, büyük ve küçük partikül boyutlarına sahip tozların farklı oranlarda karıştırılmasıyla yapılan çalışmalar, kekleşmenin toplam yüzey alanı ve partikül boyutu dağılımı ile bağlantılı olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, partikül boyutunun rolünü vurgulamaktadır (Saraç vd., 2021; Provent vd., 1993). Bazı tozlar kimyasal olarak aynı bileşime sahip olsalar da parçacık boyutundaki farklılıklar, bu formların fiziksel özelliklerini değiştirmektedir. Örneğin, çikolatanın optimum ağız hissi sağlayabilmesi için yaklaşık 12 µm parçacık boyutuna sahip olması gerektiği belirtilmiştir. Daha büyük parçacıklar çikolataya pütürlü bir his verirken, çok küçük parçacıklar çikolatayı yapışkan hale getirmektedir (Dunkley Dr, 2013).

Süt tozunun partikül boyutu ise görünümü, sulandırma kapasitesi ve akış özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Kümülatif dağılımın medyan değeri olarak ifade edilen ortalama partikül boyutu, normal yağsız süt tozlarında yaklaşık 85 µm olarak belirlenirken, yağ içeriği yüksek süt tozlarında bu değer 230-250 µm arasında değişmektedir (Sharma vd., 2012). Bu özellikler, hammaddenin başlangıçtaki bileşimi, uygulanan işleme parametreleri ve kullanılan kurutma ekipmanının türüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (Nugroho vd., 2021). Örneğin, Schuck ve ark. (2008) yaptıkları bir çalışmada sprey kurutma ile elde edilen toz parçacıkları genellikle 10–250 mikron çapında olup, küresel bir morfolojiye sahip olduğunu ve parçacıkların boyutunun büyük ölçüde kullanılan nozül tipine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık, silindir kurutma yöntemiyle üretilen tozlar daha kompakt bir yapıya sahip

olup, düzensiz şekilli ve tıkalı hava içermeyen bir formda bulunmuştur. Son parçacık boyutları ise ağırlıklı olarak öğütme işlemlerinin etkisiyle belirlendiğini ifade etmişlerdir (Schuck vd., 2008).

2.8.2. Partikül şekli

Parçacık şekli, tozların akışkanlığını belirleyen temel faktördür. Düzensiz veya uzun parçacıklar, küresel parçacıklara göre daha zor akar. Öte yandan, küresel parçacıkların karışıma eklenmesi, çubuk benzeri parçacıklar içeren karışımların akışkanlığını iyileştirebilir (Suhag vd., 2024). Parçacıkların şekli, tozların mekanik özelliklerini de etkiler.

Genel olarak, yuvarlak parçacıklar daha iyi akışkanlık gösterirken, lif veya pul şeklindeki parçacıklar farklı yığın özellikleri sergilemektedir. Parçacık şekli doğrudan mikroskop ve görüntü analizi teknikleri ile incelenebilmekte, ayrıca küresel eşdeğer çapların oranları kullanılarak sayısal olarak da karakterize edilebilmektedir. Örneğin, lifler uzunluk/çap oranı ile, pul şeklindeki parçacıklar ise kalınlık/yüzey alanı oranı ile tanımlanmaktadır (Dodds, 2013; Goh vd., 2018). Bunun yanı sıra, parçacık şeklinin tozların akışkanlık ve paketlenme özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Gıda tozlarındaki parçacık şekli, akışkanlık, karışım kalitesi ve mekanik davranış gibi çeşitli özellikleri etkileyen kritik bir faktördür. Bu etkileri anlamak, gıda işleme ve ürün kalitesini optimize etmek için önemlidir.

Parçacık şekli, boyut ve yoğunluk, gıda tozu karışımlarının homojenliğini önemli ölçüde etkileyen faktörlerdendir. Özellikle kekik ve mercanköşk gibi düzensiz şekilli parçacıklar, büyük hacim yoğunluğu farkları olan karışımlarda ayrılmaya neden olabilir. Bu ayrışma, özellikle yüksek hacim yoğunluğu oranlarında daha belirgin hale gelir ve karışımın genel kalitesini olumsuz etkiler (Shenoy vd., 2015). Buğday tozları gibi parçacıkların şekillerini değerlendirmek için, dairesellik, uzama, dışbükeylik ve kompaktlık gibi şekil faktörleri kullanılarak nicel yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, öğütme sırasında aşınma nedeniyle daha küçük parçacıkların daha düzenli şekiller alacağını ve bunun karışımlardaki davranışları etkileyebileceğini ortaya koymaktadır (Saad vd., 2011).

2.8.3. Su tutma kapasitesi

Gıda tozlarında, özellikle de süt veya bitki bazlı süt tozlarında, su tutma kapasitesi kalite, stabilite ve işlevsellik açısından kritik bir faktördür. Su tutulma mekanizmalarını anlamak, bu tozların gıda uygulamalarındaki performansını optimize etmeye yardımcı olabilmektedir (Bhandari vd., 2024; Schuck vd., 2012).

Süt tozlarındaki su tutulması, esas olarak proteinler (kazein) ve laktoz gibi bileşenler ile su arasındaki etkileşimlere de bağlıdır. Berlin ve arkadaşlarına (1968) göre, düşük bağıl nem koşullarında suyun büyük kısmı kazein tarafından tutulurken, artan bağıl nemde laktozun su tutma kapasitesi ön plana çıkmaktadır (Berlin vd., 1968). Ayrıca süt tozlarındaki protein içeriği, su tutma kapasitesini belirleyen temel faktörlerden biridir. Bir grup araştırmacının yaptığı çalışmaya göre, yüksek protein içeren süt tozları daha fazla su emme kapasitesine sahipken, düşük proteinli tozlar daha hızlı su difüzyonu sergilemektedir. Bu fark, tozun yapısal özellikleri ve toplu difüzyon katsayılarından kaynaklanmaktadır (Power vd., 2020).

Süt tozlarının su tutma kapasitesi, çevresel faktörlerden de etkilenebilmektedir. Literatürde, süt tozlarının depolama sırasındaki stabilitesi, su aktivitesi, ve nem seviyeleri ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir (Peláez vd., 2023). Başka bir çalışmada optimum su aktivitesi seviyeleri lipid oksidasyonu ve protein bozunmasını önleyerek süt tozunun kalitesinin korunmasında kritik bir rol oynadığı ifade edilmiştir.(Cheng vd., 2019).

Süt tozlarının su tutma özellikleri, uygulanan üretim yöntemleri ve işlemlerle de yakından ilişkilidir. Literatürde, sodyum karbonat eklenmesinin süt proteini izolatlarının su tutma kapasitesini artırdığını belirtmiştir. Bu etki, pH yükselmesiyle kazein miselleri arasındaki elektrostatik itici kuvvetlerin artmasına ve proteinlerin su ile daha fazla etkileşime girmesine bağlanmıştır. pH değişimi, misellerin daha iyi dağılmasını sağlayarak su molekülleriyle bağ kurma yeteneğini güçlendirmiş, böylece su tutma kapasitesini olumlu yönde etkilemiştir. Gıda tozlarının bileşimi, su tutma kapasitesini önemli ölçüde etkiler (Wu vd., 2020). Yapılan bir araştırmaya göre, diyet lifleri açısından zengin olan meyve posası tozları, yapıları gereği daha yüksek su tutma kapasitesine sahiptir. Bağıl nem seviyeleri, gıda tozlarında su tutulmasının önemli bir

belirleyicisidir (Jurevičiūtė vd., 2022). 2017 yılında yapılan bir çalışmada , düşük bağıl nemde su buhar şeklinde emilirken, yüksek bağıl nemde partiküller arasında sıvı köprülerinin oluşmasıyla su tutulma kapasitesi arttığı ifade edilmiştir. Kurutma yöntemi ve taşıyıcı madde kullanımı da su tutma özelliklerini belirleyen faktörler arasındadır (Juarez-Enriquez vd., 2017). Tkacz ve arkadaşlarının (2020) yaptığı bir araştırmada, vakumlu kurutma yöntemi, daha yüksek hacim yoğunluğuna sahip ve su tutma kapasitesi daha iyi olan tozların elde edilmesini sağladığını belirtmişlerdir. Antioksidan kapasitenin korunması ve fonksiyonel özelliklerin devamı için uygun paketlenme ve depolama koşulları kritik öneme sahiptir (Tkacz vd., 2020). Sonuç olarak, gıda tozlarında su tutma mekanizmalarının anlaşılması, gıda sistemlerinde kullanımlarının optimize edilmesi açısından önemlidir. Gelecekteki çalışmalar, işleme tekniklerinin iyileştirilmesi ve yeni formülasyonlar geliştirilmesi üzerine odaklanmalıdır.

2.8.4. Şişme gücü

Bitki bazlı süt tozlarının şişme gücü, bileşim, işleme yöntemleri ve çevresel faktörlerden etkilenir. Bu tozların su emme kapasitesi, ürünün rehidrasyon yeteneği, doku stabilitesi ve son kıvamı açısından kritik bir özelliktir. Şişme kapasitesi yüksek olan tozlar, fonksiyonel gıdalarda kıvam artırıcı ve yapı geliştirici olarak avantaj sağlayabilmektedir. Tozların şişme gücü birçok faktörden etkilenir. Kurutma işlemi, gıda tozlarının şişme kapasitesini önemli ölçüde etkiler. Dondurarak kurutma ve düşük sıcaklıklarda akışkan yataklı kurutma gibi teknikler, karbonhidrat bazlı tozların şişme gücü de dahil olmak üzere işlevsel niteliklerini artırabileceği ifade edilmiştir (Dehnad vd., 2016). Şişme gücünün etkilendiği diğer parametreler ise şunlardır; tuz konsantrasyonu, artan tuz konsantrasyonu mısır nişastalarının şişme gücünü azaltır, mumsu nişasta farklı tuz seviyelerinde en yüksek şişme gücünü gösterir (Zhang vd., 2017). pH seviyeleri, kitosan kaplı konjak glukomannan tozlarının şişme kabiliyeti asidik koşullarda daha yüksektir ve bu durum belirli gıda uygulamaları için kullanılabilir (Zhao vd., 2015). Sıcaklık, daha yüksek sıvı sıcaklıkları, yüksek molekül ağırlıklı karbonhidrat tozlarının dağılmasını ve şişmesini azaltarak rehidrasyon performanslarını etkileyebildiği ifade edilmiştir.

Gıda tozlarının şişme gücünden faydalanılarak fonksiyonel gıda geliştirilebilmektedir. Örneğin; Baklagiller ve meyvelerden elde edilenler gibi yüksek şişme gücüne sahip tozlar, glisemik indeksi iyileştirme ve artırılmış diyet lifi alımı gibi sağlık yararları olan fonksiyonel gıdaların geliştirilmesi için umut verici olduğu belirtilmiştir (Jurevičiūtė vd., 2022). Gıda tozlarının şişme kapasitesi, gıda ürünlerinin dokusunu ve stabilitesini iyileştirmek ve bunları tüketiciler için daha çekici hale getirmek için de çok önemlidir. Bu özellik, özellikle glütensiz gıdaların formülasyonunda önemlidir (Hu vd., 2020).

Özetle, gıda tozlarının şişme gücü, bileşimlerinden, işleme yöntemlerinden ve çevre koşullarından etkilenir. Bu faktörleri anlamak, istenen dokusal ve besinsel özelliklere sahip fonksiyonel gıdaların geliştirilmesine yardımcı olabilmek için önemlidir. Bitki bazlı süt tozları, geleneksel süt ürünlerine alternatif olarak popülerlik kazanmakta ve şişme güçlerini anlamak, çeşitli uygulamalardaki işlevsel özelliklerini belirlemek için çok önemli olabilmektedir.

2.8.5. Suda çözünürlük indeksi

Suda çözünürlük indeksi, gıda tozlarının kalitesini ve işlevselliğini değerlendirmede kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Çözünürlük bir tozun suda ne kadar çözünebileceğini ölçerek, endüstriyel uygulamalar ve ürün formülasyonları açısından önemli bilgiler sunmaktadır (Oikonomou & Krokida, 2012). Bu özellik, bileşim, işleme koşulları ve fiziksel özelliklerden etkilenmektedir.

Kurutma Koşulları: Kurutma, gıda tozlarının çözünürlüğünü etkileyen önemli bir işleme yöntemidir. Özellikle enkapsüle edilerek yapılmış kurutma işlemlerinde maltodekstrin kullanılmaktadır. Maltodekstrin seviyeleri tozun çözünürlüğünü doğrudan etkilemektedir bunun yanı sıra kurutma sıcaklığı da önemli parametredir. Bu bağlamda yüksek maltodekstrin seviyesi ve sıcaklık, genellikle daha yüksek çözünürlük değeri sağladığı ifade edilmiştir (Jafari vd., 2017).

Bileşim ve Parçacık Boyutu: Parçacık boyutu çözünürlük üzerinde belirleyici bir faktör olup, daha küçük parçacıklar genellikle daha iyi çözünürlüğü desteklemekte olduğu beşirtilmiştir (Lee vd., 2019). Gıda tozlarının çözünürlüğü, bileşenlerin

kimyasal yapısına ve moleküller arası etkileşimlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Literatürde, hidrofilik bileşenlerin çözünürlüğü artırdığı, buna karşın güçlü moleküler etkileşimlerin çözünürlüğü azalttığı belirtilmektedir vd(Dincturk vd., 2025; Haque vd., 2010). Jafari ve arkadaşlarının (2017) yaptığı bir çalışmada, mikroalga kaynaklı protein fraksiyonları, içerdikleri hidrofilik amino asitler ve glikozilasyon süreçleri nedeniyle suyla daha iyi etkileşime girerek yüksek çözünürlük sergilemektedir. Bu bileşenlerin varlığı, toz formdaki gıda ürünlerinin su ile daha hızlı ve homojen bir şekilde çözünmesini sağlamaktadır (Jafari vd., 2017).

Hızlı çözünmenin gerekli olduğu endüstriyel uygulamalar için de yüksek çözünürlük değerlerine sahip tozlar tercih edilmektedir. Örneğin, yüksek çözünürlüğe sahip nar suyu tozları, fonksiyonel gıda ürünlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Jafari vd., 2017).

Özetle, gıda tozlarının çözünürlüğü, kurutma, bileşim ve parçacık boyutu gibi faktörlerden etkilenmektedir. Endüstriyel uygulamalarda optimize edilmesi, fonksiyonel ve duyu özelliklerinin iyileştirilmesini sağlayarak, gıda endüstrisinde geniş bir kullanım alanı sunmaktadır.

2.8.6. Higroskopiklik

Higroskopiklik, bir maddede çevresindeki havadan nem çekme eğilimidir ve bu durum, su buharının maddenin yapısıyla etkileşmesiyle nem içeriğinin artmasına yol açar. Higroskopik maddeler, çevresel nem değişikliklerine duyarlıdır ve bu özellikleri sayesinde nemi alma, bağlama ya da serbest bırakma yetenekleriyle tanınırlar. Gıda endüstrisinde, bir ürünün higroskopik özellikleri, onun raf ömrünü, kalitesini ve işlenebilirliğini doğrudan etkileyebilir. Higroskopikliği etkileyen faktörler aşağıda özetlenmiştir:

Bazı katkı maddeleri, gıda tozlarının higroskopik özelliklerini değiştirebilir. Örneğin, maltodekstrin ve Arap zıncısı gibi maddeler, pancar suyu ve biberiye tozu gibi tozlarda higroskopikliği azaltmak amacıyla kullanılır. Bu, daha kararlı ve daha az higroskopik tozlar elde edilmesini sağlar (Janiszewska, 2014; Pimentel vd., 2024).

Kurutma tekniđi, tozların higroskopikliđini önemli ölçüde etkileyebilir. Özellikle, sprey kurutma veya köpük mat kurutma gibi yöntemler kullanılarak elde edilen tozların higroskopik davranışları farklılık gösterebilir. Örneđin, sprey kurutma, taşıyıcı maddelerle birlikte kullanıldığında kazein hidrolizat tozlarının higroskopikliđini azaltabilir (Favaro-Trindade vd., 2010).

Tozların higroskopik özellikleri, depolama ortamına göre deđişebilir. Özellikle nem, tozların davranışında önemli bir rol oynar. Kapalı alanlarda depolama, artan nem içeriđi ile birlikte peynir altı suyu tozlarında enzimatik olmayan esmerleşme gibi reaksiyonları hızlandırabilir, bu da dođru depolama koşullarının seçilmesi gerektiđini gösterir (Juarez-Enriquez vd., 2017).

Tozların şekli ve boyutu da higroskopikliđi etkileyebilir. Örneđin, düzensiz şekle sahip parçacıklar, kümelenmeye ve dolayısıyla daha yüksek higroskopikliđe neden olabilir. Bacuri tozlarında bu tür şekil özellikleri gözlemlenmiştir (Pimentel vd., 2024).

Gıda tozlarının higroskopik özelliklerinin anlaşılması, gıda endüstrisindeki uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Özellikle kurutma yöntemlerinin, katkı maddelerinin ve depolama koşullarının seçimi, ürünün stabilitesi ve kalitesini etkileyebilir. Mikrokapsülleme gibi teknikler, kullanılan proteinler ve polisakkaritler sayesinde uçucu yağların stabilitesini artırarak, tozların higroskopikliđini azaltabilir, bu da onları çeşitli gıda uygulamaları için uygun hale getirir (Leite vd., 2024).

Sonuç olarak, gıda tozlarında higroskopikliđin yönetilmesi, bunların bileşimi, işleme yöntemleri ve çevresel etkileşimleri hakkında derin bir bilgi gerektirir. Bu tür bilgiler, gıda ürünlerinin uzun vadeli stabilitelerini ve kalitelerini optimize etmek için önemlidir.

2.8.7. Yığın yoğunluğu

Yığın yoğunluğu, bir gıda ürününün birim hacminin ağırlığı olarak tanımlanır. Kurutulmuş gıda ürünlerinde yığın yoğunluğu, ürünün büzülme durumuna bađlı olarak deđişir. Eğer ürün kurutulurken boyutlarını kaybetmemişse, yalnızca kaybettiđi su miktarı kadar bir azalma gerçekleşir. Ancak, kurutma işlemi sırasında kullanılan yöntem ve koşullara bađlı olarak büzülme meydana gelir ve bu da yığın yoğunluğunun

miktarını etkiler. Sonuç olarak, kurutulmuş gıda ürünlerinin yığın yoğunluğu, kaybedilen su miktarına göre hacim ve ağırlık kayıplarına yol açarak değişir (Ratti, 1994). Yığın yoğunluğu, belirli bir hacmi işgal eden toz kütlesinin ölçüsüdür ve parçacık yoğunluğuna, parçacık iç gözenekliliğine ve tozların kabın içindeki düzenlenmesine bağlıdır. Bu özellik, ekonomik, ticari ve fonksiyonel açıdan önemli bir rol oynar. Özellikle tozlar uzun mesafelere taşındığında, hacmin küçülmesi için yüksek yığın yoğunluğuna sahip olmaları gereklidir. Bu, ambalaj malzemesinden tasarruf sağlamanın yanı sıra taşıma ve makine seçiminde de etkilidir. Ayrıca, tozların düşük yığın yoğunluğu, genellikle aglomerasyon (topaklanma) gibi durumlarla ilişkilidir (Food Powders, 2005).

2.8.8. Sıkıştırılmış yoğunluk

Sıkıştırılmış yoğunluk ise, tozun belirli koşullar altında titreşmesi veya vurulması sonucu ölçülen yoğunluktur (Sharma vd., 2012). Bu yoğunluk, sıkıştırma sırasında tozun davranışını tanımlamak için en önemli parametrelerden biridir. Yığın yoğunluğu ile sıkıştırılmış yoğunluk arasındaki oran, Hausner oranı = Yığın yoğunluk/ sıkıştırılmış yoğunluk olarak bilinir ve bu oran, tozların akışkanlığını ölçmede yaygın bir yöntem olarak kullanılır (Shah vd., 2008) .

Carr indeksi, toz yoğunluğunun hacimsel akışkanlığını ölçmek için kullanılan bir diğer yöntemdir. Tozların sıkıştırılabilirlik yüzdesi, tozlar arasındaki etkileşimi ve kararlılığı değerlendiren bir ölçümdür (Shah vd., 2008). Carr index (%Sıkıştırılabilirlik) = $100 * (1 - \text{yığın yoğunluk} / \text{Sıkıştırılmış yoğunluk})$ şeklinde formülize edilir. Aşağıdaki çizelgede Carr indeksi ve Hausner oranı sınıflandırılmaktadır (Shah vd., 2023).

Çizelge 2.4. Carr indeksi ve hausner oranına göre toz ürünlerin akışkanlık sınıflandırması

Carr indeksi (CI) %	Hausner oranı	Akışkanlık
0 - 10	1.00 - 1.11	Mükemmel
11 - 15	1.12 - 1.18	İyi
16 - 20	1.19 - 1.25	Uygun
21 - 25	1.26 - 1.34	Orta
26 - 31	1.35 - 1.45	Zayıf
32 - 37	1.46 - 1.59	Çok Zayıf

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışmada kullanılan beyaz susam tohumları, Türkiye’deki yerel marketlerden Destan markalı ürün temin edilmiştir. Fizikokimyasal analizler için tohumlar öncelikle temizlenmiştir. Elde edilen numuneler, nem, yağ, kül ve su aktivitesi analizlerinde kullanılmak üzere uygun koşullarda hazırlanmıştır. Susam sütü üretim aşamasına kadar tüm tohumlar, bozulmayı önlemek amacıyla buzdolabında +4 °C’de muhafaza edilmiştir.

3.2. Metot

3.2.1. Susam tohumlarının fiziko-kimyasal analizleri

3.2.1.1. Su aktivitesi

Oda sıcaklığında Thermoconstanter TH 200 (Novasina, İsviçre) cihazı ile ölçülmüş olup, her ölçüm üç paralel olarak gerçekleştirilmiştir (Bardakçi vd., 2023).

3.2.1.2. Nem içeriği

Gravimetrik yöntemle belirlenmiş; örnekler hassas terazi ile tartıldıktan sonra, kurutma fırınında 105°C’de sabit ağırlığa ulaşana kadar kurutulmuş ve nem yüzdesi hesaplanmıştır (Quirino vd., 2023).

$$\text{Nem (\%)} = ((m_1 - m_2)/m_1) \times 100 \quad (\text{Eşitlik 3.1.})$$

Burada;

m₁: Kurutma öncesi örnek ağırlığı (g),

m₂: Kurutma sonrası örnek ağırlığı (g) olarak hesaplanmıştır.

3.2.1.3. Kül içeriđi

Yaklaşık 3-4 g susam örneğinin 105°C’de kurutulmasının ardından, kül fırınına yerleştirilip 550°C’de yakılmasıyla belirlenmiş ve bu işlem sonucu elde edilen tartım farkı kullanılarak kül içeriđi % olarak hesaplanmıştır (Mortensen vd., 1989).

3.2.1.4. Yağ içeriđi

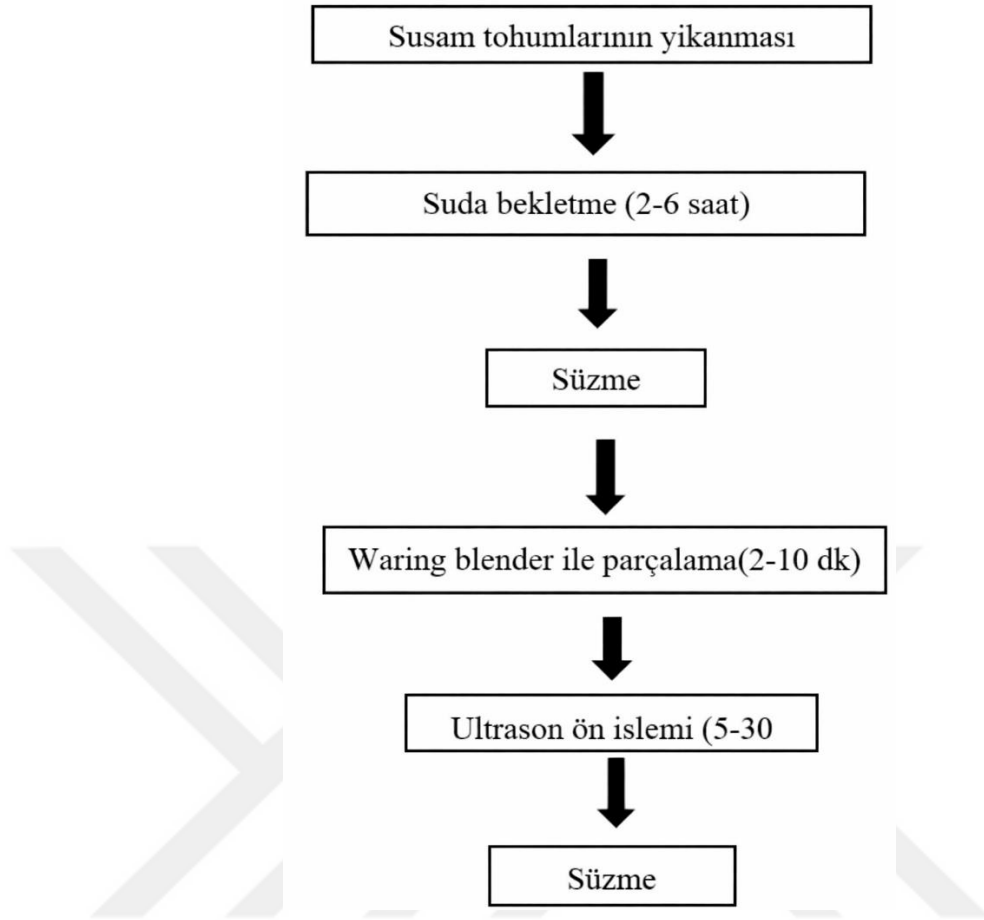
Soxhlet ekstraksiyon yöntemiyle hekzan kullanılarak ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon sonucu elde edilen yağ miktarı, petrol eterinin uçurulmasının ardından gravimetrik olarak belirlenmiştir (Mutlu vd., 2023).

3.2.1.5. Renk parametreleri

NH-310 Kolorimetre (3nh Technology Co. LTD, Çin) cihazı ile CIE Lab renk sistemi kullanılarak ölçülmüş ve susam tohumlarının renk değeri (L*, a* ve b*) belirlenmiştir. (Pathare vd., 2013).

3.3. Susam Tohumundan Süt Üretimi

Kavrulmamış taze susam tohumları, yıkanmış ve ardından yumuşamalarını sağlamak için 2-6 saat arasında suda bekletilmiştir. Susam sütü üretiminde kullanılan susam: su oranı (1:5 (w/w)) literatürde bildirilen ekstraksiyon oranları incelenerek belirlenmiştir. Farklı araştırmalarda susam bazlı içeceklerin hazırlanmasında 1:5, 1:10 veya %10–14 (w/w) aralığında değışen tohum-su oranlarının kullanıldığı ve bu oranın ürünün viskozitesi, ekstraksiyon verimi, besin madde yoğunluğu ve duysal özellikleri üzerinde belirleyici olduğu bildirilmiştir (Afaneh vd., 2011; El-Bialy vd., 2020). Bu nedenle çalışmada, hem yüksek ekstraksiyon verimi elde etmek hem de akışkanlık ve homojenlik açısından analizlere uygun bir süt yapısı oluşturmak amacıyla 10g susam 50 gr su oranı tercih edilmiştir. Daha sonra yumuşayan susam tohumları, Waring blender ile öğütülmüş ve 1-30 dakika süreyle ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon ön işlemi olarak uygulanmıştır. İşlem sonrası, su fazının susam çöktelinden ayrılması amacıyla numuneler önce tülbent yardımıyla, ardından cendere bezi kullanılarak süzölmüştür. Şekil 3.1’de susam sütü üretim aşamalarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1. Susam sütü üretim sürecinin akış şeması

Ultrasonik su banyosu süresi , parçalama süresi ve suda bekletme süresi değişkenleri için Çizelge 3.1 'de belirtilen yanıt yüzey yöntemi ve merkezi karma tasarım kullanılarak oluşturulan deneme planına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir.

3.4. Deneysel Tasarım: Ultrason Uygulaması İle Ekstraksiyon Koşullarının Optimizasyonu

Susam sütü üretiminde ekstraksiyon koşullarının optimize edilmesi amacıyla; susam suda bekletme süresi (dk), parçalama süresi (dk) ve ultrasonik banyo uygulama süresi (dk) işlem parametresi olarak seçilmiş ve bu faktörler esas alınarak deneysel çalışma yürütülmüştür. Suda bekletme süresi, parçalama süresi ve ultrasonik su banyosu uygulama süresi bağımsız değişkenler (faktörler) olarak tanımlanmış, bu değişkenlerin susam sütüne ait yanıt değişkenleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, her

bir faktör için 6 seviye ve üç faktörlü merkezi karma tasarım kullanılarak deneysel tasarım oluşturulmuştur. Merkezi karma tasarım kapsamında toplam 20 deney koşulu planlanmış ve deneyler Çizelge 3.1’de verilen deneme desenine göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. Susam sütü ekstraksiyonunda uygulanan merkezi karma tasarım

Deneme Numarası ^a	Suda bekletme süresi (dk)	Parçalama süresi (dk)	Ultrasonik su banyosu süresi (dk)
1	240	2	17.5
2	360	6	17.5
3	240	6	17.5
4	240	6	5
5	240	6	17.5
6	240	6	30
7	311	4	25
8	169	4	10
9	240	6	17.5
10	240	6	17.5
11	240	6	17.5
12	311	4	10
13	169	4	25
14	311	8	25
15	169	8	10
16	240	6	17.5
17	169	8	25
18	240	10	17.5
19	120	6	17.5
20	311	8	10

(^a, rastgele sıralanmış)

Deneysel tasarım olarak Merkezi Karma Tasarım (Central Composite Design) seçilmiştir. Merkezi Karma Tasarım deneme desenine göre susam sütü ekstraksiyonunda susam ıslatma süresi, parçalama süresi ve ultrasonik banyo uygulama süresine göre üretim şartları modellenmiştir. Deneme için örneklerim kuru madde verimleri yanıt yüzey metodu (Response Surface Method, RSM) kullanılarak istatistiksel olarak değerlendirilip, en yüksek kuru madde verimi için optimum şartlar belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin elde edilen yanıtlara etkilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesi amacıyla faktörler kodlanmış seviyeler kullanılarak tanımlanmıştır. Bu bağlamda kodlanmış faktör seviyeleri; $-\alpha$ faktörün en düşük seviyesini, -1 düşük seviyesini, 0 merkez noktasını, $+1$ yüksek seviyesini ve $+\alpha$ faktörün en yüksek seviyesini temsil etmektedir.

Susam sütü üretimine yönelik deneysel tasarımda suda bekletme süresi (dk), parçalama süresi (dk) ve ultrasonik su banyosu uygulama süresi (dk) bağımsız değişkenler olarak belirlenmiş; bu faktörlere ait kodlanmış seviyeler ile karşılık gelen gerçek değerler Çizelge 3.4.2’de sunulmuştur. CCD yaklaşımı doğrultusunda her bir faktör için 6 seviye ($-\alpha$, -1 , 0 , $+1$, $+\alpha$) tanımlanmış ve deney alanı bu seviyeler doğrultusunda oluşturulmuştur.

Çizelge 3.2. Susam sütü üretimi için faktörlerin kodlanmış ve kodlanmamış seviyeleri

Bağımsız Değişken	En Düşük ($-\alpha$)	Düşük (-1)	Merkez (0)	Yüksek ($+1$)	En Yüksek ($+\alpha$)
Suda bekletme süresi (dk)	120	169	240	311	360
Parçalama süresi (dk)	2	4	6	8	10
Ultrasonik su banyosu uygulama süresi (dk)	5	10	17.5	25	30

Yanıt Yüzey yöntemi kapsamında, bağımsız değişkenler ile yanıt değişkenleri arasındaki ilişkileri tanımlamak amacıyla ikinci dereceden polinom model kullanılmıştır. CCD deney tasarımından elde edilen deneysel veriler doğrultusunda, yanıt değişkenleri aşağıda verilen genel modele göre ifade edilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (\text{Eşitlik 3.2.})$$

Burada;

Y, yanıt değişkenini,

β_0 , sabit terimi,

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$, doğrusal katsayıları,

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$, ikinci dereceden (kuadratik) katsayıları,

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$, etkileşim katsayılarını temsil etmektedir.

Modelde yer alan X_1, X_2 ve X_3 , sırasıyla suda bekletme süresi (dk), parçalama süresi (dk) ve ultrasonik su banyosu uygulama süresi (dk) için kodlanmış bağımsız değişkenleri ifade etmektedir. Geliştirilen polinom modellerin istatistiksel anlamlılığı ve uygunluğu varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiş; model katsayılarının anlamlılık düzeyleri belirlenmiştir.

3.4.1. Ekstrakt verimi

Merkezi karma deney tasarımı kullanılarak susam tohumlarından ultrasonik ön işleme tabi tutularak çeşitli örnekler elde edilmiştir. Bu süreçte, her bir örnekten 5 mL alınıp, etüvde 105 °C’de sabit ağırlığa ulaşana kadar kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında, örnekler tartılmış ve bu tartım değeri kullanarak ekstraksiyon verim miktarı, kuru madde içeriği göz önünde bulundurularak, % (g kuru madde/100 g) olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar üçer tekerrür halinde yapılmıştır. Bu analiz, ultrasonik ön işleminin ve diğer parametrelerin susam tohumlarından yapılan ekstraksiyon verimliliği üzerine olan etkisini değerlendiren bir analiz olarak, deneysel düzenin ve kullanılan parametrelerin önemini vurgulamaktadır. (Arslan Tontul vd., 2018).

$$\text{Ekstraksiyon Verimi (\%)} = (W_s/W_d) \times 100 \quad (\text{Eşitlik 3.3})$$

Burada;

W_d: Kurutma sonrası elde edilen kuru madde miktarı (g)

W_s: Analiz için alınan örnek miktarı (g) olarak hesaplanmıştır.

3.5. Optimum kořullarda üretilen edilen sütün kurutulması

3.5.1. Süt örneklerinin kurutma işleml için hazırlanması

Sütlerinin kurutma işleml sırasında, daha stabil bir yapı elde edebilmek amacıyla maltodekstrin kullanılmıştır. Maltodekstrin, kurutma işlemlerinde taşıyıcı madde olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu madde, besin bileşenlerinin korunmasına yardımcı olur, toz haline getirilmesini sağlar ve ürünün raf ömrünü uzatır. Çeşitli çalışmalar, maltodekstrin kullanımının optimal konsantrasyonlarının ürün özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Özellikle, maltodekstrin oranının %6 ile %20 arasında değişen konsantrasyonlarda kullanıldığına dair literatürde örnekler bulunmaktadır (Ali vd., 2020). Örneğin; nar suyu tozu üretiminde maltodekstrin kullanımını incelendiği çalışmada, maltodekstrin konsantrasyonunun %17, %19 ve %20 arasında değiştiğini belirtmişlerdir (Watson vd., 2017). Bir başka çalışmada hindistancevizi sütü tozu üretiminde maltodekstrin kullanımını incelenmiş ve maltodekstrin konsantrasyonunun %9 ile %13 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Özellikle, %13 maltodekstrin kullanımı, en iyi özelliklere sahip toz ürün üretimine olanak sağlamıştır (Yulistiani vd.,2024). Bu tez çalışmasında ise susam sütü tozu üretiminde hem süt özellikleri hem de önceki çalışmaların önerdiği aralık göz önünde bulundurularak maltodekstrin oranı %12 olarak belirlenmiştir. Maltodekstrin ilavesinin ardından Ultra-Turrax IKA T18 Basic cihazı 3000- 2500 rpm ile 10 dakika süreyle homojenize edilmiştir. Süt tozu üretimi için sprey kurutma, liyofilizasyon ve vakum kurutma gibi farklı kurutma yöntemleri uygulanarak süt tozu üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Homojenizasyon işlemi (ultra- turrax ıka t18 basic)

3.5.2. Sprey kurutma

Sprey kurutma işlemi, BUCHI B-290 mini sprej kurutucu (Flawil, İsviçre) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi sırasında 1.5 mm nozül başlığı ve 0.7 mm iç çapına sahip iki akışkanlı bir nozül, yüksek verimli siklon ve küçük bir toplama kabı kullanılmıştır. İşlem sırasında giriş sıcaklığı 150°C, çıkış sıcaklığı ise 60-65°C olacak şekilde ve aspirasyon sıcaklığı %61 olarak ayarlanmıştır. Besleme hızı 20 mL/dakika olarak sabitlenmiştir. Sprey kurutma işlemi sırasında, sütün homojen olarak sisteme girişini sağlamak amacıyla 100 rpm hızında karıştırılan bir manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.5.2’de BUCHI B-290 mini sprej kurutucu (Flawil, İsviçre) ile gerçekleştirilen sprej kurutma işlemi sırasında kullanılan cihazı gösterilmektedir (Ben-Othman vd.,2024).



Şekil 3.3. BUCHI B-290 mini sprey kurutucu

3.5.3. Dondurarak kurutma

Bu amaçla 500 ml süt karışımı 3 adet behere koyularak -80 °C'de kurutuldu. Şekil 3.5.3.1' de dondurarak kurutma için kullanılan FreeZone 6 plus, Labconco, ABD modeli verilmiştir. Dondurarak kurutma işlemi, 0.055 - 0.060 mBar basınçta 4 gün boyunca -80 °C'de gerçekleştirilmiştir (Deshwal vd., 2020).



Şekil 3.4. Dondurarak kurutma işlemi

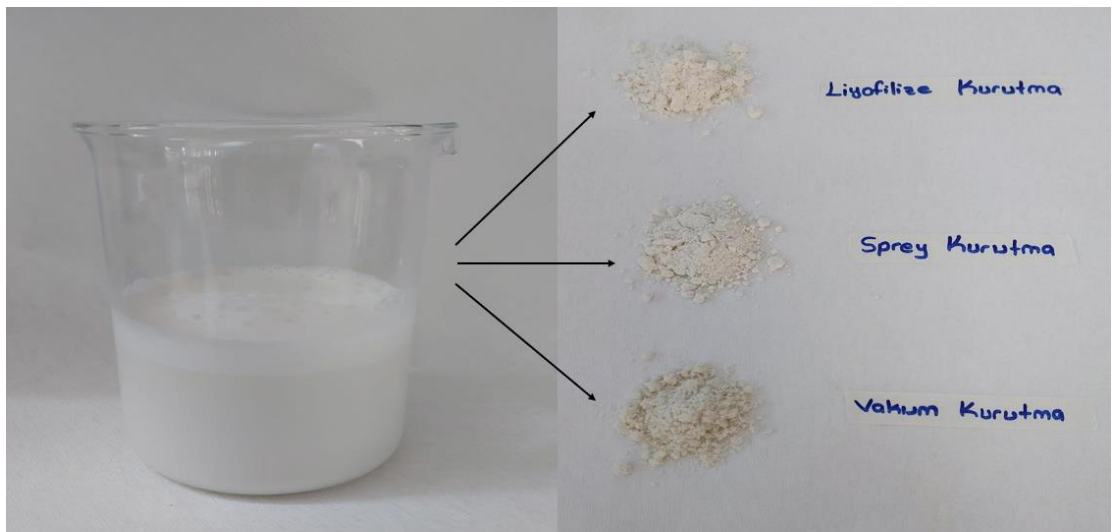
3.5.4. Vakum kurutma işlemi

Laboratuvar ölçekli bir vakumlu kurutucu (wisd, woy 30, tam vakumlu fırın, Güney Kore) kurutma deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3.5.4.1 ‘de vakumlu kurutma cihazını göstermektedir. Kurutma işlemi kapsamında, örnekler vakumlu kurutucunun kurutma haznesine yerleştirilmiş ve sıcaklık 60°C olarak ayarlanmıştır. Vakum pompası, kurutma fırınına bağlanarak sistem içerisinde vakum oluşturulmuş ve ortam basıncı -0.9 atm seviyesine düşürülmüştür. Basınç düşüşü, suyun kaynama noktasının azalmasına neden olarak, 60°C’de suyun uzaklaştırılmasını sağlamış ve böylece kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir (Tekin, 2015; Pasten vd., 2024).



Şekil 3.5. Vakumlu kurutucu

Özetle bu çalışmada, süt örneklerine maltodekstrin ilave edilerek üç farklı kurutma yöntemi uygulanmıştır: Sprey kurutma, liyofilizasyon (dondurarak kurutma) ve vakum kurutma. Şekil 3.5.4.2’ de sıvı süt örneğinin görseli ve her bir kurutma yöntemiyle elde edilen süt tozlarının görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Farklı yöntemlerle kurutulmuş süt tozları

3.6. Süt Tozu Analizleri

3.6.1. Su aktivitesi (a_w) tayini

Örneklerin a_w değerleri, su aktivitesi tayin cihazı (Thermoconstanter TH 200, Novasina, Axair Ltd., İsviçre) kullanılarak oda sıcaklığında belirlenmiştir (Bardakçı vd., 2023)

3.6.2. % Nem ve toplam kuru madde tayini

Örneklerin nem tayini için standart gravimetrik yöntem kullanılmıştır. Bu amaçla örnekler hassas terazi ile 0.001 hassasiyette tartılmış ve kaplar kurutma fırınına yerleştirilerek, sabit tartıma gelene kadar 105 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Örneklerin nem miktarları kuru madde üzerinden verilmiştir (Quirino vd., 2023).

$$\text{Nem (\%)} = ((m_1 - m_2)/m_1) \times 100 \quad (\text{Eşitlik 3.4.})$$

Burada;

m₁: Kurutma öncesi örnek ağırlığı (g),

m₂: Kurutma sonrası örnek ağırlığı (g) olarak hesaplanmıştır.

3.6.3. Kül tayini

Yaklaşık olarak 3-4 g örnek, krozelere tarılmış ve kül fırını yardımıyla kademeli olarak 550°C’de yakılmıştır. Kül kaplarının tartımları arasındaki fark kullanılarak kül miktarı % olarak hesaplanmıştır (Mortensen vd., 1989).

$$\text{Kül (\%)} = ((m_1 - m_0)/(m_2 - m_0)) \times 100 \quad \text{Eşitlik (3.5.)}$$

Burada;

m₀: Boş kroze ağırlığı (g),

m₁: Örnek + kroze (yakma öncesi) ağırlığı (g) ,

m₂: Kül + kroze (yakma sonrası) ağırlığı (g) olarak hesaplanmıştır.

3.6.4. Protein tayini

Örneklerin suda çözünür protein miktarı Bradford yöntemiyle belirlenmiştir (Bradford, 1976). Toplam protein miktarı ise Kjeldahl metoduna göre ölçülmüştür. Kjeldahl yöntemi, gıda örneklerindeki toplam azot miktarını belirleyerek protein içeriğini saptamak için kullanılmaktadır. Bu yöntemde örnek, sülfürik asit ile asidik ortamda ısıtılarak organik bileşenlerden azot serbest bırakılmaktadır. Ardından alkali çözelti ile nötralize edilen amonyak, distilasyon ile bir çözeltiye aktarılır ve titrasyon yöntemiyle ölçülerek toplam azot miktarı hesaplanır. Elde edilen değer, protein içeriğine dönüştürülerek örneklerin toplam protein miktarı belirlenmiştir (Gul vd., 2023).

3.6.5. Yağ tayini

Örneklerin yağ içeriği, Soxhlet ekstraksiyon yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntemde yağ, hekzan ile ekstrakte edilmiş ve ardından hekzanın uçurulması ile tespit edilmiştir (Mutlu vd., 2023).

3.6.6. pH tayini

Örneklerin pH değerleri, pH metre (Mettler-Toledo, Seven Compact S210, İsviçre) kullanılarak ölçülmüştür (Afanah vd., 2011)

3.6.7. Renk parametresinin belirlenmesi

Çalışmada kullanılan süt tozlarının yüzey rengi, renk ölçüm cihazı (NH-310 Kolorimetre, 3nh Technology Co. LTD, Çin) ile belirlenmişti. L* açıklık değeri 0 (ideal siyah) ile 100 (ideal beyaz) arasında değişmekteydi. CIE Lab sisteminde a* ve b* renk koordinatlarını temsil etmekteydi; pozitif a* kırmızı yönü, negatif a* yeşil yönü, pozitif b* sarı yönü ve negatif b* mavi yönü göstermekteydi (Minolta, 1998). Üç türetilmiş renk parametresi olan hue açısı (h°), kroma değeri (C^*) ve esmerleşme indeksi (BI), eşitlikler (2, 3 ve 4) kullanılarak hesaplanmıştır (Pathare vd., 2013).

$$h^{\circ} = \arctan(b^{*}/a^{*}) \quad (\text{Eşitlik 3.6.})$$

$$C^{*} = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (\text{Eşitlik 3.7.})$$

$$BI = [100(x - 0.32)] / 0.17$$

$$x = ((a^{*} + 1.75 L^{*})) / (5.645 L^{*} + a^{*} - 3.012 b^{*}) \quad (\text{Eşitlik 3.8.})$$

Burada;

h° = Renk tonu (hue),

C^{*} = Doygunluk (Chroma),

BI =Beyazlık İndeksini temsil etmektedir.

3.7. Susam Süt Tozlarının Tekno-Fonksiyonel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.7.1. Su tutma kapasitesinin belirlenmesi

Su tutma kapasitesi (WHC), örneklerin suyu absorbe etme kapasitesini belirlemek amacıyla aşağıdaki yöntemle analiz edilmiştir. 1 g süt tozu, hassas terazi ile tartılarak 10 mL distile su ile karıştırılmıştır. Karışım, manyetik karıştırıcıda 30 dakika boyunca karıştırılmış ve ardından $3000 \times g$ 'de santrifüjlenmiştir. Santrifüjleme sonrası üst faz dikkatlice uzaklaştırılmış ve çökelti tartılmıştır (López-Calabozo vd., 2025). Su tutma kapasitesi (WHC), aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$WHC (g/g) = (m_1 - \frac{m_0}{m_1}) \quad \text{Eşitlik (3.9.)}$$

Burada;

$m_0(g)$ = Kuru süt tozu ağırlığı,

$m_1(g)$ = Su tutmuş örneğin ağırlığını temsil etmektedir.

3.7.2. Şişme gücü ve suda çözünürlük indeksi belirlenmesi

Şişme gücü (SP) ve suda çözünürlük indeksi (WSI) belirleme işlemi, Senanayake ve ark. tarafından belirtilen yöntemle gerçekleştirilmiştir. Analiz için 100 mg (kuru bazda) örnek, vidalı kapaklı bir test tüpüne tartılmış ve üzerine 10 mL saf su eklenmiştir. Tüpler, homojen karışım sağlamak amacıyla 10 saniye boyunca

vortekslenmiş ve ardından 85°C sıcaklıktaki su banyosunda 30 dakika boyunca belirli aralıklarla karıştırılarak inkübe edilmiştir. İnkübasyon süresinin sonunda, tüpler buzlu su banyosunda soğutulmuş ve 2000 ×g’de 30 dakika boyunca santrifüjlenmiştir. Üst faz süzülerek ayrılmış, tüpte kalan çökelti tartılmış (W_s) ve üst fazdaki çözünmüş katı madde miktarını belirlemek için süpernatant 100°C’de kurutularak sabit ağırlığa getirilmiştir (W_1). Şişme gücü ve suda çözünürlük indeksi aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır (Morsy vd., 2015; Senanayake vd., 2013):

$$WSI (\%) = (W_1/0.1) * 100 \quad (\text{Eşitlik 3.10})$$

$$SP = W_s / (0.1 * (100 - WSI)) \quad (\text{Eşitlik 3.11})$$

eşitlik aynı değil

Burada;

WSI (%) : Suda çözünürlük indeksi,

W_1 (g) : Santrifüj sonrası üst fazdan alınarak kurutulan çözünmüş katı maddenin ağırlığı (g),

W_s (g) : Santrifüj sonrası çökelti (jel) fazının ağırlığı (g),

SP : Şişme gücü (g su / g çözünmeyen madde) temsil etmektedir.

3.7.3. Yığın yoğunluk, sıkıştırılmış yoğunluk, carr indeks ve hausner oranının belirlenmesi

Süt tozlarının yığın yoğunluğunun belirlenebilmesi için 10 ml hacme sahip cam mezür içerisine herhangi bir baskı uygulamadan toz üründen aktarılmıştır. Yığın yoğunluk değeri (d_x), kapsülün kütlesinin kapladığı hacme oranlanmasıyla belirlenmiştir. Sıkıştırılmış yoğunluk (d_y) ise kapsülün bulunduğu cam mezürün sert bir zemin üzerine saniyede 1 vuruş olacak şekilde 180 kez vurulmasıyla analiz edilmiştir. Sıkıştırılmış yoğunluk değeri, kapsülün m kütlesinin vurma işlemi sonrasında okunan hacme oranlanmasıyla hesaplanacaktır (Çevik vd., 2023).

Carr indeks ve Hausner oranı değerleri yığın yoğunluk ve sıkıştırılmış yoğunluk değerleri kullanılarak Eşitlik 3.7.3.1’ e göre belirlenecektir . Hesaplanan veriler toz ürünlerin akış özellikleri hakkında bilgi verilmiştir (Mariano, 2024).

$$\text{Carr indeks} = 100(1 - (dx/dy)) \quad (\text{Eşitlik 3.12})$$

$$\text{Hausner oranı} = dx/dy \quad (\text{Eşitlik 3.13})$$

Burada;

dx= Yığın yoğunluk değerini,

dy= Sıkıştırılmış yoğunluk değerini temsil etmektedir.

3.7.4. Higroskopite hesaplama

Higroskopite analizi, yaklaşık 1 g tozunun petri kaplarına eşit şekilde yayılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, toz ile nemli hava arasındaki temas yüzeyini maksimize etmek amacıyla yapılmıştır. Daha sonra %40-60 bağıl nem de 25 °C de bekletilmiştir. Higroskopite, kuru madde başına gram cinsinden su miktarı (nem) olarak ifade edilmiştir. Alınan nem miktarının kuru madde miktarına oranı olarak hesaplanmıştır (Zungur Bastıoğlu vd., 2016 koç vd.,2014). Higroskopiklik, kilogram kuru katı başına nem (su) gramı olarak ifade edilmiştir.

$$\text{Higroskopisite (g/kg)} = ((m_t - m_0)/m_0) * 1000 \quad (\text{Eşitlik 3.14})$$

Burada;

m₀= Başlangıçtaki kuru madde ağırlığı (g),

m_t = Ölçülen numune ağırlığını (g) temsil etmektedir.

3.8. Yapısal ve Spektral Analizler

3.8.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (ftır) analizi

Örneklerin yapısal karakterizasyonunun belirlenmesi amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, merkez laboratuvarında bulunan FT/IR 4700 (Jasco, Japonya) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Spektrum ölçümleri orta infrared bölgede (7800–350 cm⁻¹) gerçekleştirilmiş olup sonuçlar % geçirgenlik (%T) veya absorbans değerlerine karşı kaydedilmiştir.

3.8.2. Taramalı elektron mikroskobu (sem)

Örneklerin yüzey morfolojisi, topoğrafik özellikleri ve elementel kompozisyonlarının belirlenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Quanta FEG 250 (Thermo Fisher Scientific, ABD) cihazı kullanılmıştır. Yüzey morfolojisinin incelenmesinde ikincil elektron (SE) dedektörü kullanılmış, faz kontrastı ve kompozisyon farklılıklarının belirlenmesinde ise geri saçılmış elektron (BSE/DBS) dedektöründen yararlanılmıştır. Bu analizler ile farklı kurutma yöntemleri sonucunda elde edilen susam sütü tozlarının yüzey morfolojisi, partikül yapısı ve elementel dağılımları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.8.3. X-Işını difraksiyon (xrd) analizi

Örneklerin kristal yapılarının belirlenmesi amacıyla X-ışını difraksiyon (XRD) analizleri Empyrean (Malvern Panalytical, Hollanda) çok amaçlı X-Ray difraktometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem; toz, ince film ve bulk malzemelerin analizine olanak sağlamakta olup, Grazing Incidence X-Ray Difraksiyon (GIXRD) modu ile ince film ve katmanlı yapıların karakterizasyonu yapılabilmektedir. Yansıma ölçümleri ile ince film kalınlığı belirlenebilmekte; tekstür ve gerilme analizlerinin yanı sıra Rietveld yöntemi ile yapı çözümleme gerçekleştirilebilmektedir. Cihaz 10^{-2} – 10^{-3} Torr vakum seviyelerinde ve 30–1300 °C sıcaklık aralığında sıcaklığa bağlı ölçüm yapabilmekte olup; toz kırınım tablası, sıcaklık bağımlı ölçüm tablası ve üç eksenli eğilim (Chi, Phi, Z) tablası ile donatılmıştır.

3.9. İstatistiksel Analiz

İlk ekstraksiyon denemeleri üç paralel olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ortalama $\pm$ standart sapma (SS) şeklinde ifade edilmiştir. Elde edilen verilerin istatistiksel analizi, Minitab istatistik paket programı (Minitab® 18.0, Minitab Inc., State College, PA, ABD) kullanılarak yapılmıştır. Uygulamalar arasındaki farklılıkların belirlenmesinde varyans analizi (ANOVA) uygulanmış ve gruplar arasındaki farklılıklar Tukey çoklu karşılaştırma testi ile değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Susam Tohumunun Fizikokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada materyal olarak kullanılan susam tohumunun fizikokimyasal özellikleri, mevcut bilimsel yayınlarla karşılaştırıldığında, ürünün genel kalitesinin iyi durumda olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 4.1.1’ de susam tohumunun fizikokimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.1. Susam tohumunun fizikokimyasal analiz sonuçları

Su aktivitesi (%)	Nem (%)	Kül (%)	Yağ (%)
0.325± 0.003	%1.96±0.04	%2.73 ±0.03	49.05±2.00

Örneklerin su aktivitesi, 0.322 ile 0.328 arasında olduğu belirlenmiştir. Bu değer, Rababah ve arkadaşlarının işlenmemiş susam tohumları için bildirdiği 0.51 değerinden düşük, 6 aylık depolama sürecinde tespit ettiği 0.34–0.96 aralığına ise daha yakın tespit edilmiştir. Su aktivitesindeki bu farklılıkların, tohumların depolandığı ortamın sıcaklığı ve bağıl nem düzeyi gibi çevresel koşullardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Rababah vd., 2017). Elde edilen değer, genel olarak literatürde bildirilen aralıklarla uyumlu bulunmuş ve susam tohumlarının düşük su aktivitesi göstermesi, mikrobiyal stabilite açısından olumlu bir özellik göstermektedir.

Nem oranı %1.92 ile %2.00 aralığında tespit edilmiştir. Bu oran Sandal (2022), çiğ susam tohumları için raporladığı %6.02 nem değerinden düşük bulunmuştur. Bu durum, numunelerin işlenmiş olması, düşük nemli ortamda depolanması veya kurutma işlemlerine tabi tutulmuş olmasından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Düşük nem içeriği, ürünün raf ömrünü olumlu yönde etkileyen önemli bir parametredir.

Örneklerin kül içeriği %2.70 – %2.76 aralığında olarak belirlenmiştir. Bu değer, Rababah ve arkadaşlarını (2011) ham susam tohumları için bildirdiği %5.2 kül değeri, Regn ve arkadaşlarının Nijerya susamı için belirttiği %4.53 kül değerlerinden düşük bulunmuştur. Bu farklılıklar; susam tohumunun çeşidi, yetiştiği bölgenin toprak

özellikleri ve uygulanan ön işlemler gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Elde edilen sonuç, susamın mineral madde içeriği açısından zengin olduğunu göstermektedir; ancak diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında daha düşük bir düzeyde olduğu görülmektedir (Rababah vd., 2011).

Soxhlet ekstraksiyon yöntemiyle belirlenen yağ oranı 47.05 – 51.05 arasında olup, susam tohumlarının yağ açısından zengin bir kaynak olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Chakraborty ve arkadaşları (2017) nin bildirdiği %49.5 ve Farida (2021) nın Malili ve Cezayir susam çeşitleri için sırasıyla raporladığı %51.59 ve %49.91 değerleri ile büyük ölçüde örtüşmektedir. Yüksek yağ içeriği, susamın fonksiyonel gıda bileşeni olarak kullanım potansiyelini artırmaktadır (Farida, 2021;Chakraborty vd.,2017) .

4.2. Susam Sütü Üretiminde Ultrasonik Su Banyosu Destekli Üretim Şartlarına ait Deneme Deseni

Çizelge 4.2’de deneysel tasarım koşulları ve yanıt olarak ise KM değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Susam sütü ekstraksiyonunda proses parametreleri ve KM (%) değerleri

Deney No ^a	BS (dk)	PS (dk)	US (dk)	KM (%)
1	240	10.0	17.5	11.48±0.02
2	311	8.4	10.1	11.26±0.01
3	240	6.0	5.0	10.88±0.03
4	240	6.0	17.5	11.44±0.01
5	240	6.0	17.5	11.56±0.01
6	240	6.0	17.5	11.38±0.09
7	360	6.0	17.5	11.28±0.16
8	120	6.0	17.5	11.14±0.04
9	169	8.4	10.1	11.15±0.05
10	169	3.6	10.1	10.50±0.05
11	311	3.6	10.1	10.40±0.06
12	240	6.0	17.5	11.49±0.05
13	240	6.0	17.5	11.70±0.01
14	240	6.0	30.0	11.62±0.07
15	169	3.6	24.9	10.64±0.05
16	240	6.0	17.5	11.41±0.00
17	169	8.4	24.9	11.52±0.05
18	311	8.4	24.9	11.52±0.05
19	311	3.6	24.9	10.99±0.09
20	240	2.0	17.5	10.18±0.02

^a, rastgele sıralanmış, BS:Bekletme süresi (dk, dakika); PS: Parçalama süresi (dk, dakika); US: Ultrasonik su banyosu uygulama süresi (dk, dakika); Km; Kuru madde (%)

Deneyisel bulgulara göre kuru madde oranı %10.38 ile %11.694 arasında değişim göstermiştir. En yüksek KM değeri ise 13 numaralı uygulamada elde edilmiş ve %11.694 olarak tespit edilmiştir. 13 numaralı uygulamanın proses şartları BS = 240 dk, PS = 6 dk ve US = 17.5 dk koşullarından oluşmaktadır. . Bu sonuç, orta düzey bekletme süresi ve optimum parçalama-ultrasonik su banyosu kombinasyonunun, hücre duvarı yapısının en etkili şekilde parçalanarak daha fazla çözünür katı madde ekstraksiyonu sağladığını göstermektedir.

Aynı ultrasonik su banyosu süresi (17.5 dk) ve parçalama süresine (6 dk) sahip uygulamalarda susamın suda bekletme sürelerinin değişiminin verim üzerine anlamlı etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Örneğin, US ve PS sabitken BS'nin 120 dakikaya düşürülmesiyle KM oranı %11.14'e gerilemiş; 360 dakikaya çıkarılmasıyla ise %11.27 seviyesine yükselmiştir. Bu bulgu, bekletme süresinin çözünürlük ve özütleme verimi üzerinde belirli bir optimum noktası olduğunu düşündürmektedir.

Ayrıca, US süresinin artırılması (%17.5 → 30 dk), KM oranını hafif bir şekilde arttırmış (%11.49 → %11.62) ancak bu artışın sınırdaki kalması, daha uzun ultrasonikasyonun çözünür madde veriminde sınırlı fayda sağlayabileceğini, hatta olası bileşik bozunumları nedeniyle sınıra ulaşabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, literatürde bildirilen ultrasonik kaviteasyonun optimum sürede bırakılması gerektiğine dair bulgularla da örtüşmektedir (Chemat vd., 2017; Madhu vd., 2019). Düşük PS ve BS seviyelerinde (örn. BS:169 dk, PS:3.6 dk), US süresi arttıkça KM oranında artış gözlenmiş (%10.53 → %10.99), fakat bu artış yüksek PS veya BS seviyelerinde gözlenenden düşüktür. Bu durum, parçalama süresinin ultrason etkisini destekleyici bir parametre olduğunu, düşük parçalama süresinin ise hücre içi bileşiklerin ekstraksiyonunu sınırladığını göstermektedir. Genel olarak, RSM verileri susam sütü ekstraksiyonunda en yüksek verimin 240 dakika bekletme, 6 dakika parçalama ve 17.5 dakika ultrasonikasyon süresiyle elde edilebileceğini göstermektedir. Bu parametre kombinasyonu ile KM oranı istatistiksel olarak anlamlı seviyede optimize edilmiş ve %11.6 üzerinde değerler elde edilmiştir.

Susam sütü üretiminde KM değerlerinin üretim koşullarına bağlı değişimlerine ait modelin model katsayıları ve model performans değerleri çizelge 4.2.1.2'de verilmiştir. Kuru madde içeriği veriminin bağımsız değişkenler ile olan ilişkisini nicel

olarak ortaya koymak amacıyla, Yanıt Yüzey yöntemi (RSM) kapsamında Merkezi karma tasarımından (CCD) elde edilen deneysel veriler kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, suda bekletme süresi (BS), parçalama süresi (PS) ve ultrasonik su banyosu uygulama süresi (US) değişkenlerinin doğrusal, kuadratik ve etkileşim etkilerini içeren ikinci dereceden polinom model oluşturulmuştur. Model katsayıları en küçük kareler yöntemiyle tahmin edilmiş, geliştirilen modelin istatistiksel anlamlılığı ve uygunluğu varyans analizi ile değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.3. Susam sütü üretiminde KM değerlerinin üretim koşullarına bağlı olarak gerçekleşen değişimine ait modellerin model katsayıları ve model performans parametreleri

Model katsayıları	KM Verim
β_0 (Sabit katsayı)	6.493
β_1 (Bekletme süresi, BS)	0.01153 ns
β_2 (Parçalama süresi, PS)	0.6888 ***
β_3 (Ultrasonikasyon süresi, US)	0.0904 ***
β_{11} (BS ²)	0.000023 **
β_{22} (PS ²)	0.04431 ***
β_{33} (US ²)	0.001854 **
β_{12} (BS $\times$ PS)	ns
β_{13} (BS $\times$ US)	ns
β_{23} (PS $\times$ US)	ns
Model	***
Regresyon katsayısı (R ²)	95.54
Düzeltilmiş R ² (Adj-R ²)	93.49
Tahmin edilen R ² (Pred-R ²)	90.13
Uyum eksikliği (Lack of fit)	0.591

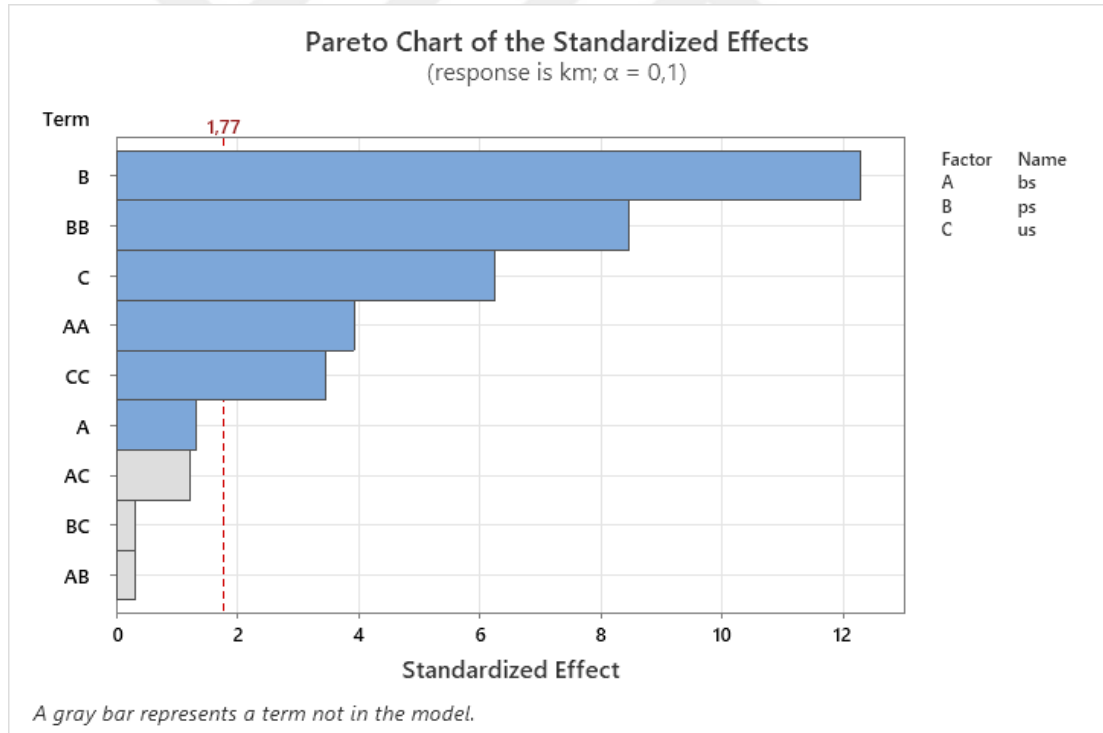
(^a β_0 sabit katsayı, β_i Birinci dereceden (Doğrusal) denklem katsayısı, β_{ii} ikinci dereceden denklem katsayısı ve β_{ij} iki faktörlü çapraz etkileşim katsayısıdır. ns İstatistiksel olarak önemsiz ($p \geq 0.05$); * İstatistiksel olarak % 95 seviyesinde önemli ($p \leq 0.05$); ** İstatistiksel olarak % 99 seviyesinde önemli ($p \leq 0.01$); *** İstatistiksel olarak % 99.9 seviyesinde önemli ($p \leq 0.001$)).

Çalışmada susam sütü örneklerinin KM değerleri proses koşullarına (bekletme süresi, parçalama süresi ve Ultrasonikasyon süresi) göre modellenmiştir. Model performansı açısından bakıldığında elde edilen tüm eşitlikler, bağımlı değişken olan KM değerindeki değişimin % 95’den fazlasını işlem koşullarına bağlı olarak açıklamaktadır. Yanıt yüzey yöntemine göre bağımsız değişkenlerden bekletme süresi, parçalama süresi ve ultrasonikasyon süresinin 1. ve 2. dereceden terimleri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p \leq 0.05$). Susam sütü üretimindeki işlem koşullarının

(bekletme süresi, parçalama süresi ve ultrasonikasyon süresi) interaksiyon terimleri, KM değerinin değişimine ait modelde önemsiz olarak tespit edilmiştir ($p > 0.05$).

Regresyon analizine göre, susam sütü ekstraksiyonunda parçalama süresi en etkili faktör olarak öne çıkarken, ultrasonikasyon süresi de önemli bir katkı sağlamaktadır. Bekletme süresi ise doğrusal olarak anlamlı bulunmasa da kuadratik etkisiyle modelde belirgin bir rol oynamaktadır.

Şekil 4.1 de verilen Pareto diyagramı, susam sütü ekstraksiyonunda kuru madde verimini etkileyen parametrelerin standartlaştırılmış etkilerini göstermektedir. Grafik, hangi faktörlerin yanıt değişkeni (kuru madde oranı) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve etki büyüklüklerini ortaya koymaktadır. Kırmızı çizgi %95 güven düzeyini ($t \approx 0.695$) temsil etmektedir; bu sınırı aşan etkiler istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir.



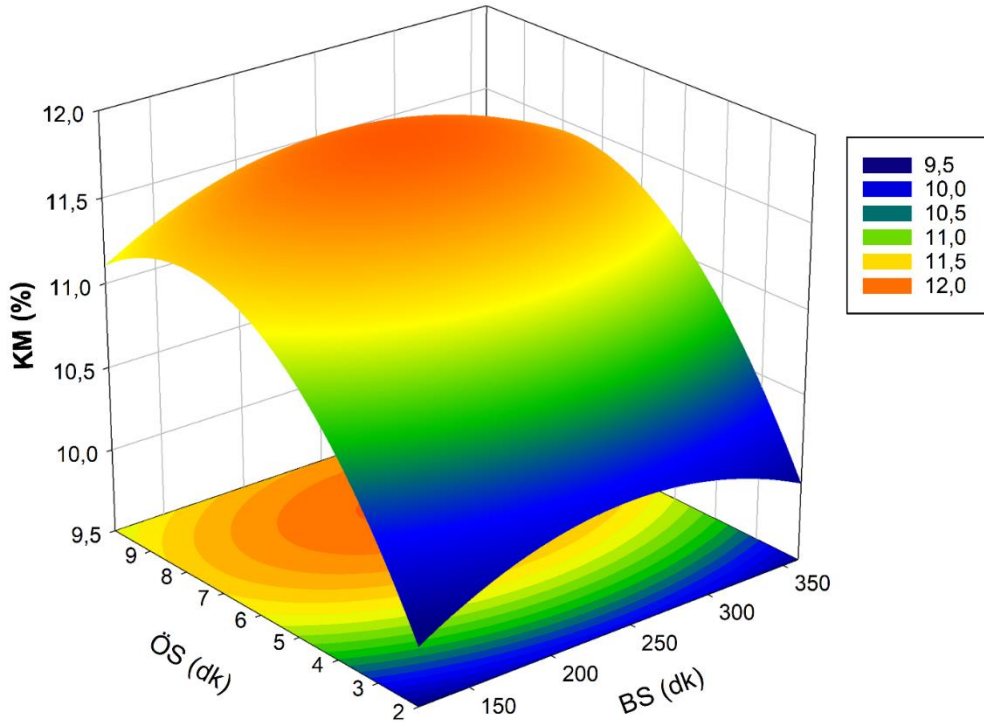
Şekil 4.1. Susam sütü ekstraksiyonunda verim (%) üzerine etki eden parametrelerin pareto diyagramı

(A: Bekletme süresi, B: Parçalama süresi, C: Ultrasonik banyo uygulama süresi; A, B ve C ana faktörleri, AB, AC ve BC etkileşim terimlerini, AA, BB ve CC ise ilgili faktörlerin ikinci dereceden (kuadratik) terimlerini temsil etmektedir.)

En etkili faktör parçalama süresi (B) olup standartlaştırılmış etkisi ~5.9 düzeyindedir. Bu bulgu, regresyon analizinde de yüksek düzeyde anlamlı bulunan β_2 katsayısı ile uyumludur. Parçalama süresi, hücre yapılarını parçalayıp çözünür içeriklerin serbest kalmasını sağladığı için verimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. İkinci en önemli faktör BB ($PS \times PS$) terimi, yani parçalama süresinin ikinci dereceden etkisidir. Bu durum, PS'nin yalnızca doğrusal değil, aynı zamanda kuadratik olarak da kuru madde oranı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. C faktörü (Ultrasonikasyon süresi) üçüncü sırada yer almakta olup bu da ses dalgalarının fiziksel etkisiyle hücre duvarlarını parçalayıp özütlemeyi artırdığını desteklemektedir. AC, AA ve CC gibi etkileşim ve kuadratik terimler de istatistiksel olarak anlamlı sınırın üzerinde yer almakta, fakat etkileri daha sınırlıdır. Özellikle AC ($BS \times US$) etkileşimi, bekletme süresi ve ultrasonun birlikte kullanıldığında daha fazla çözünür madde kazancı sağladığını düşündürmektedir. AB, BC ve A terimlerinin etkileri istatistiksel anlamlılık çizgisinin altında kalmıştır. Bu da bekletme süresinin (A) tek başına ya da diğer faktörlerle etkileşim halinde kuru madde verimi üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Pareto diyagramı, parçalama süresinin (PS) susam sütü ekstraksiyonundaki kuru madde verimi üzerinde en güçlü etkiye sahip parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ultrasonikasyon süresi ve bu faktörlerin ikinci dereceden etkileri de önemli katkılar sağlamaktadır. Bekletme süresinin doğrudan etkisinin düşük olması, ancak bazı etkileşimlerde destekleyici rol oynaması, bu parametrenin optimize edilmesi gereken tamamlayıcı bir unsur olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, optimizasyon çalışmalarında parçalama ve ultrason sürelerinin titizlikle ayarlanması gerektiğini, bekletme süresinin ise yalnızca belirli kombinasyonlarda verimi artırabileceğini ortaya koymuştur.

Ultrasonik su banyosu uygulama süresi, öğütme ve bekletme süreleri arasındaki etkileşimler dikkate alınarak, proses parametrelerinin hedef yanıt üzerindeki bireysel ve interaksiyon etkileri değerlendirilmiştir.



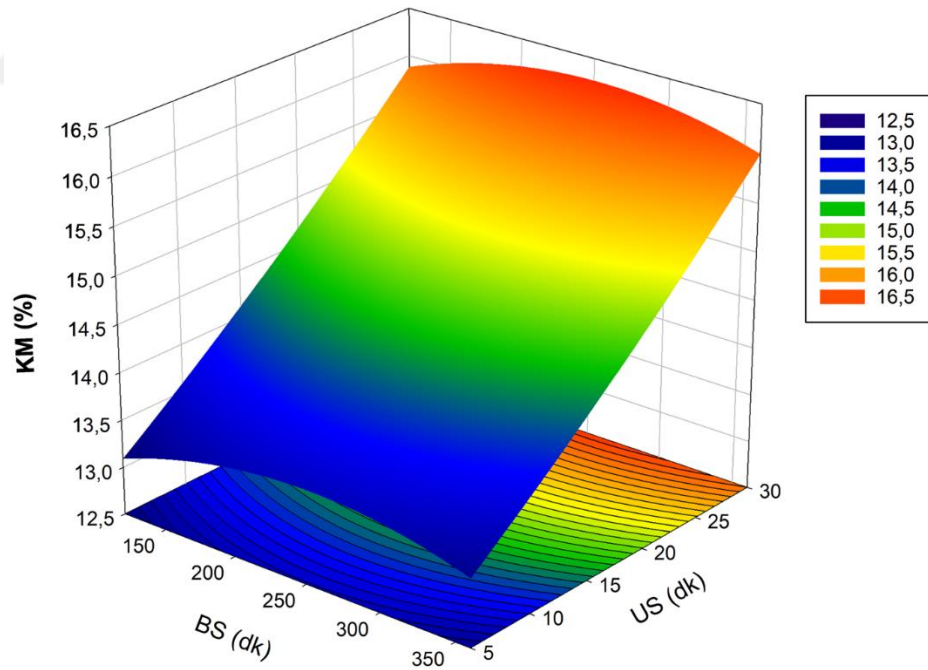
Şekil 4.2. Ekstraksiyon koşullarından parçalama süresi ve suda bekletme süresinin kuru madde (%) üzerindeki etkisi

İlk olarak, Şekil 4.3.1 incelendiğinde susam sütü örneklerinin KM değerleri üzerine işlem parameterlerinden parçalama süresi ve bekletme süresinin etkisi görülmektedir. Susam sütü KM değeri parçalama süresinin artışı ile artış göstermiştir. Ancak ilerleyen parçalama sürelerinde bu etki tersine dönmekte ve KM değerinde azalma gözlenmektedir. Susam sütünün suda bekletme süresi KM değerinde belirli bir noktaya kadar (yaklaşık 250-300 dk aralığına kadar) artış görülmekte ancak sonrasında ise azalma trendine girmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, hem parçalama süresi hem de bekletme süresi arttıkça kuru madde içeriğinde belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu durum, uzun süre suda bekletilen tohumların su absorpsiyon kapasitesinin artması ve ardından gelen mekanik parçalama işlemiyle hücre duvarlarının daha etkin kırılmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu mekanik etki, protein, yağ ve çözünür fenolik bileşenlerin su fazına geçişini kolaylaştırarak süt içerisindeki toplam katı madde oranını artırmıştır. Özellikle 6–9 dakika arası öğütme süresi ve 250–320 dakika arası bekletme süresi kombinasyonlarında kuru madde içeriğinin %11.5–12.0 aralığında maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu

durum, ekstraksiyon verimliliğinin hem difüzyon hem de hücre duvarlarının mekanik parçalanması açısından optimize edildiğini göstermektedir. Benzer şekilde, düşük parçalama ve kısa bekletme sürelerinde KM içeriği %9.5'e kadar düşmüş; bu durum, yetersiz hücresel çözünme ve bileşen geçişinin sınırlılığına işaret etmektedir(Wen vd., 2018). Ultrason destekli ekstraksiyonun, hücre duvarlarını parçalayarak yağ ve protein çözünürlüğünü artırdığını; Mohdaly ve ark. ise difüzyon katsayısını artırarak verimliliği %20'ye kadar yükselttiğini belirtmiştir (Mohdaly vd., 2011). Bu çalışmada elde edilen bulgular da söz konusu literatürle örtüşmektedir. Bununla birlikte, susam sütü üretiminde parçalama süresi ve ön ısılatma süresi gibi mekanik ve hidrasyon temelli faktörlerin kombine etkisinin daha önce sistematik olarak araştırılmamış olması, bu çalışmanın özgün yönlerinden biridir.

Optimum koşullarda hem yüksek verim hem de istenilen kimyasal bileşimi sağlayan kuru madde düzeyine ulaşmak, ürün kalitesi ve sonraki kurutma işlemlerinin verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

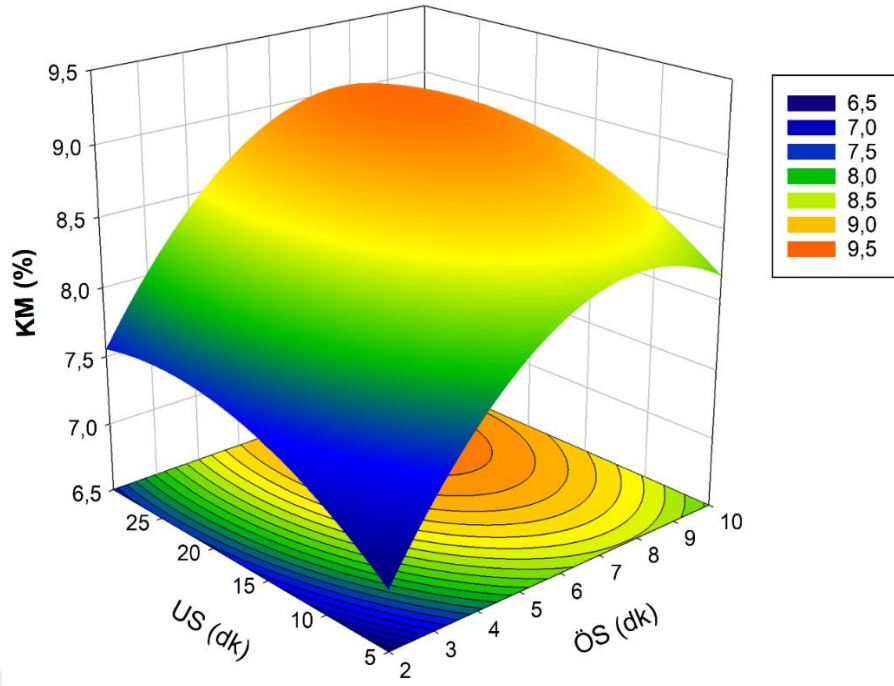


Şekil 4.3. Ekstraksiyon koşullarından ultrasonik su banyosu uygulama süresi ve suda bekletmenin kuru madde (%) üzerindeki etkisi

Şekil 4.3.2 incelendiğinde susam sütü örneklerinin KM verimi üzerine ultrason süresi ve bekletme süresinin etkisi açıkça görülmektedir. Ultrason süresinin artışı ile KM

veriminde genel olarak bir artış eğilimi gözlenmiştir. Bu durum, ultrason uygulamasının hücre yapısını parçalayarak çözünür madde geçişini artırması ile açıklanabilir. Benzer şekilde bekletme süresinin artışı da KM verimini artırıcı yönde etki göstermiştir. Düşük bekletme sürelerinde KM verimi daha düşük seviyelerde kalırken, süre arttıkça verimde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte her iki parametrenin yüksek seviyelerinde artış hızının azaldığı ve yüzeyin daha yatay bir eğilim gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu durum, belirli bir noktadan sonra sistemin doygunluğa ulaştığını ve KM verimindeki artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Grafikten de görüleceği üzere, her iki değişkenin artmasıyla birlikte kuru madde oranında belirgin bir yükselme gözlenmiştir. Özellikle 25–30 dakika arası ultrasonikasyon uygulaması ve 300–350 dakika arası bekletme sürelerinde kuru madde içeriği %16,5'e kadar çıkmıştır. Bu bulgu, ultrasonun mekanik kavitasyon etkisiyle hücre duvarlarının yıkımını artırdığını, ön ıslatma işleminin ise tohumların su tutma ve şişme kapasitesini artırarak ekstrakte edilebilir bileşenlerin çözünmesini kolaylaştırdığını göstermektedir. Düşük ultrason süresi (<10 dk) ve kısa bekletme sürelerinde (<200 dk) ise KM içeriği %12.5–13.5 seviyelerinde kalmış, bu da hem hidrasyonun hem de kavitasyonun yetersiz olduğu koşullarda verim düşüklüğüne işaret etmiştir. Lavrentev ve ark.. (2024) ultrasonik işlem süresinin kritik bir optimizasyon parametresi olduğunu vurgulamaktadır (Lavrentev vd., 2024). Bu çalışmada elde edilen bulgular, söz konusu literatür ile uyumlu olup, özellikle susam gibi küçük taneli ve yoğun lignan içeren tohumlarda, uzun süreli ultrason ve ön ıslatma kombinasyonunun verim üzerindeki sinerjik etkisini ortaya koymaktadır.

Bu bulgular, yüksek kuru madde oranının yalnızca verim açısından değil, aynı zamanda kurutma işlemi öncesi ürün kalitesi ve enerji verimliliği açısından da kritik olduğunu göstermektedir. Kuru madde oranı yüksek olan sütlerde, kurutma sırasında daha az su uzaklaştırılması gerektiğinden enerji tasarrufu sağlanmakta, ayrıca nihai toz ürünün yapısal kararlılığı ve fonksiyonel özellikleri daha iyi korunabilmektedir.



Şekil 4.4. Ekstraksiyon koşullarından ultrason süresi ile parçalama süresinin kuru madde (%) üzerindeki etkisi

Şekil 4.3.3'te incelendiğinde susam sütü örneklerinin KM verimi üzerine ultrasonik su banyosu uygulama süresi ve ön ısılatma süresinin etkisi görülmektedir. Ultrasonik su banyo uygulaması süresinin artışı ile KM verimi artış göstermiştir. Düşük sürelerde ise KM verimi daha düşük seviyelerde kalırken, sürenin artmasıyla birlikte belirgin bir artış gözlenmiştir. Ancak ilerleyen ultrasonik su banyosu uygulama sürelerinde bu artışın azaldığı ve belirli bir noktadan sonra daha sabit bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Ön ısılatma süresi incelendiğinde ise KM veriminin artan süre ile birlikte yükseldiği ve özellikle orta seviyelere kadar bu artışın daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte yüksek ön ısılatma sürelerinde artış hızının azaldığı ve yüzeyin daha yatay bir hal aldığı dikkat çekmektedir. Bu durum, her iki parametrede de belirli bir noktadan sonra sistemin doygunluğa ulaştığını ve KM verimindeki artışın sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu durum, parçalama işleminin mekanik olarak hücre duvarlarını zayıflattığını, ultrasonikasyonun ise kavitasyon etkisiyle hücre içeriğinin sıvı faza geçişini hızlandırdığını göstermektedir.

Grafikteki kontur dağılımı incelendiğinde, %KM değerinin her iki faktörün de düşük düzeylerde tutulduğu bölgelerde (%6.5–7.5) minimum seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bu da, ne tek başına kısa süreli ultrasonik işlem ne de yetersiz mekanik

parçalama ile hedeflenen verimin elde edilemediğini göstermektedir. Diğer bir deyişle, ultrason ve parçalama süresi arasında sinerjik bir ilişki söz konusudur.

Wen ve arkadaşları (2018), ultrasonik ekstraksiyonun çözünür katı madde geçişini artırmada etkili olduğunu belirtirken, Senanayake ve arkadaşları (2013) gibi çalışmalar, mekanik parçalama düzeyinin bitkisel hücre yapılarını kırarak ekstraksiyon verimini önemli ölçüde etkilediğini bildirmiştir (Senanayake vd., 2013; Wen vd., 2018) Bu bağlamda, elde edilen bulgular hem literatürle tutarlıdır hem de UAE tabanlı susam sütü üretimi üzerine yapılmış sınırlı sayıda çalışmayı genişletici niteliktedir.

Bu veriler, özellikle süt üretiminde hedeflenen yüksek kuru madde içeriği ve sonraki kurutma aşamasında enerji verimliliği açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Ayrıca işlem parametrelerinin dikkatli optimizasyonu sayesinde hem fonksiyonel bileşen kayıpları en aza indirilebilir hem de ürün kalitesi artırılabilir.

4.3. Optimum Koşulların Belirlenmesi ve Model Doğrulama

Yanıt yüzey yöntemi (Response Surface Method, RSM) kullanılarak susam sütü üretiminde kuru madde (KM) değerleri maksimize edilmiş ve buna bağlı olarak optimum üretim koşulları belirlenmiştir. Elde edilen bu optimum koşulların doğrulanması amacıyla, model tarafından tahmin edilen yanıt değerleri ile aynı koşullarda deneysel olarak elde edilen veriler istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Modelin tahmin performansı ise güven aralığı (CI) ve tahmin aralığı (PI) değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir (Çizelge 4.3.3.1).

Çizelge 4.4. Teorik ve deneysel veriler

Sonuç Türü	Optimum işlem parametreleri (dk)	Tahmini Değer (km)	Standart Hata (SE Fit)	%95 Güven Aralığı (CI)	%95 Tahmin Aralığı (PI)	Deneysel Değer (Ortalama)	Uygunluk indeksi
Teorik (Model)	BS:253,33 PS:7,37 US:24,4	11.728 4	0.0487	11.623 2 11,833 7	11.4638 — 11.9930	11.682± 0.078	1

(km, % kuru madde içeriğini ifade etmektedir. Deneysel değer üç tekerrürün ortalaması olarak hesaplanmıştır.)

Model analizine göre optimum koşullar; bekletme süresi (BS) 253.33 dakika, parçalama süresi (PS) 7.37 dakika ve ultrasonikasyon süresi (US) 24.4 dakika olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında kuru madde oranı (KM) için tahmin edilen değer %11.7284 olup, modele ait standart hata (SE Fit) 0.0487 olarak hesaplanmıştır. Modelin %95 güven aralığı 11.6232–11.8337, tahmin aralığı ise 11.4638–11.9930 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda elde edilen istenilebilirlik (desirability) değeri 1.00 olup, bu değer belirlenen hedefler doğrultusunda yanıt değişkeninin maksimum düzeyde optimize edildiğini ve seçilen parametre kombinasyonunun model açısından ideal olduğunu göstermektedir. Gerçekleştirilen deneysel uygulamalarda ise üç tekerrür ortalamasına göre elde edilen kuru madde oranı %11.664 olup, deneysel sonuçların model tarafından öngörülen değerle ve güven aralıkları içerisinde yüksek uyum gösterdiği belirlenmiştir.

Model ile deneysel sonuçlar arasındaki fark oldukça düşük olup (%0.06), deneysel değer modelin hem güven hem de tahmin aralığı içinde kalmaktadır. Bu durum, modelin geçerliliğini ve tahmin gücünü teyit etmektedir. Ayrıca, optimize edilen parametrelerin uygulanabilirliği ve tekrarlanabilirliği, bu yöntemin susam sütü üretiminde kullanılabilir bir proses haline getirilebileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, model doğrulama çalışması, ultrason destekli ekstraksiyon sürecinin yüksek güvenilirlikte optimize edildiğini ortaya koymuş ve prosesin kontrollü koşullarda uygulanabilirliğini kanıtlamıştır. Bu da sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek olan susam sütü tozuna dönüştürme işlemleri için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

4.4. Susam Sütü Örneklerinin Fizikokimyasal Karakterizasyonu

Ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon yöntemiyle optimum koşullarda (BS: 253.33 dk, PS: 7.37 dk, US: 24.4 dk) elde edilen susam sütü örneklerinin fizikokimyasal özellikleri Çizelge 4.4.1’de sunulmuştur. Ürün, hem besinsel açıdan dengeli bileşimi hem de bitkisel bazlı süt alternatifleri içerisinde yerini güçlendiren karakteristikleri ile ön plana çıkmıştır.

Çizelge 4.5. Susam sütü örneklerinin fizikokimyasal analiz sonuçları

Enerji(kcal/100g)	Nem(g/100g)	Kül (g/100g)	Protein(g/100g)	Karbonhidrat (g/100g)	Yağ (g/100g)
77.56 ± 1.79	89.90 ± 4.99	0.15 ± 0.00	2.15 ± 0.10	1.66 ± 0.09	6.78 ± 0.24

Susam sütünün yüksek nem içeriği, sıvı bitkisel sütlerde beklenen yapıyı desteklemektedir. Bu değer, soya (%89.55), badem (%96.9) ve yulaf (%89.27) sütleri ile benzerlik göstermektedir (Tulashie vd., 2022; Vashisht vd., 2024) Bununla birlikte yüksek su içeriği, mikrobiyal büyümeye açık bir ortam yaratabileceği için pastörizasyon, stabilizasyon ve kurutma gibi işlemlerin önemini ortaya koymaktadır (Teijeiro vd., 2018).

Susam sütü, yağ ve protein içeriği sayesinde enerji yönünden besleyici bir içecektir. Örneğin badem sütü 36.4 kcal, soya sütü ise yaklaşık 95 kcal düzeyindedir (Mäkinen vd., 2016). Bu bağlamda susam sütü, bitkisel sütler arasında orta düzeyde enerji sağlayan ve doyuruculuğu yüksek bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Kül oranı ortalama %0.14 , mineral madde içeriğini yansıtan önemli bir parametredir. Çalışmada düşük kül içeriği elde edilmesi, susam tohumunun kabuksuz formda kullanılmasından veya süzülen fraksiyona sınırlı mineral geçişinden kaynaklanabilir. Literatürde susamın tam tohum halinde kül içeriği %4.45–5.2 arasında bildirilmiştir (Aglave, 2018; Rababah vd., 2011). Bu fark, ekstrakte edilen sıvı fazın kompozisyonuyla ilişkilendirilebilir.

Protein İçeriği (%2.17): Susam sütünde elde edilen protein oranı, badem (%0.7) ve pirinç (%0.6) sütlerine göre oldukça yüksektir (Jemaa vd., 2021; Mäkinen vd., 2016). Soya sütü (yaklaşık %3.6) ile karşılaştırıldığında ise daha düşük, ancak besinsel olarak anlamlıdır. Özellikle metiyonin gibi kükürtlü amino asitlerin varlığı sayesinde susam proteini, esansiyel amino asit profili açısından kaliteli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir (Patil vd., 2017).

Karbonhidrat İçeriği (%1.76): Bu düşük karbonhidrat düzeyi, susam sütünü düşük glisemik indeksli bitkisel süt alternatifleri arasında konumlandırır. Soya sütü (%2.08),

badem sütü (%0.55) ve yulaf sütü (%7.8) gibi bitkisel sütlerle karşılaştırıldığında dengeli bir yapı sunduğu görülmektedir (Tulashie vd., 2022; Vashisht vd., 2024).

Yağ İçeriği (%6.96): Susam sütü, zengin doymamış yağ asidi profili (özellikle oleik ve linoleik asit) ile kardiyovasküler sağlık açısından avantajlıdır (Agidew vd., 2021). Badem (%1.13) ve soya (%1.81) sütlerine kıyasla daha yüksek yağ içeriğine sahip olan susam sütü, fonksiyonel bir enerji kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bu yönüyle özellikle sporcu beslenmesi, yaşlı bireyler veya vegan diyetlerde destekleyici rol oynayabilir.

Elde edilen sonuçlar, susam sütünün besin içeriği açısından hem zengin hem de dengeli bir profile sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle protein ve sağlıklı yağ oranları, bu sütü bitkisel bazlı içecekler arasında değerli bir alternatif haline getirmektedir. Karbonhidrat içeriğinin düşük olması ve yüksek oranda doymamış yağ asidi içermesi, fonksiyonel gıda potansiyelini artırmaktadır. Ancak yüksek su içeriği nedeniyle mikrobiyolojik stabilite açısından dikkatli işlem ve koruma stratejileri gereklidir. Elde edilen bu veriler, susam sütü bazlı fonksiyonel toz ürünlerin geliştirilmesi ve sürdürülebilir bitkisel süt alternatiflerinin yaygınlaştırılması açısından bilimsel temel sunmaktadır.

4.5. Susam Sütünün Farklı Kurutma Yöntemleriyle Tozlaştırılması

Optimum koşullarda elde edilen susam sütü, üç farklı kurutma yöntemi (sprey kurutma [SK], vakum kurutma [VK], liyofilize kurutma [LK]) ile toz haline getirilmiş ve elde edilen süt tozlarının fizikokimyasal özellikleri Çizelge 4.5.1’de değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.6. Süt tozlarının fizikokimyasal analizleri (SK: Sprey kurutma; LK: Liyofilize kurutma; VK: Vakum kurutma)

Analiz	VK	SK	LK
Enerji(kcal/100g)	526.61±17.30 ^a	561.90±12.12 ^a	550.16±30.91 ^a
Nem(g/100g)	4.39±0.09 ^a	2.48±0.08 ^b	1.86±0.09 ^c
Kül (g/100g)	1.04±0.05 ^b	1.36±0.10 ^a	1.22±0.06 ^{ab}
Protein(g/100g)	10.27±0.13 ^a	10.62±0.52 ^a	10.30±0.43 ^a
Karbonhidrat (g/100g)	51.60±2.82 ^a	51.41±3.18 ^a	53.97±2.01 ^a
Yağ (g/100g)	31.58±0.45 ^a	32.40±1.46 ^a	33.65±3.09 ^a

Aynı satırda verilen ortalama deęerlerin üzerindeki farklı üst simge harfleri (a–c), örnekler arasındaki farkın Tukey çoklu karşılaştırma testi sonucunda istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir ($p < 0.05$). Aynı harfi taşıyan deęerler arasında ise istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır. Çalışmada farklı kurutma yöntemleriyle üretilen susam sütü tozlarının besinsel ve fonksiyonel özellikleri karşılaştırılmış ve istatistiksel varyans analizleri ile gruplar arasındaki farklılıklar incelenmiştir. Tek yönlü varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre, enerji, protein, karbonhidrat ve yağ içerięi açısından gruplar arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p > 0.05$), ancak nem içerięi açısından VK'nın en yüksek, LK'nın ise en düşük deęerlere sahip olduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$). Bu durum, vakum kurutmanın su uzaklaştırma verimlilięinin düşük, liyofilizasyonun ise oldukça yüksek olduğunu göstermektedir (Yetişen vd., 2021). Kül içerięi açısından SK en yüksek deęeri gösterirken, VK en düşük kül oranına sahiptir ($p < 0.05$). Protein yapılarının stabilitesi açısından bakıldığında, sprey kurutma yönteminin protein denatürasyonunu minimize ettięi ve fonksiyonel özellikleri daha iyi koruduęu belirlenmiştir (Ben-Othman vd., 2024).

En yüksek enerji içerięi liyofilize kurutma yöntemiyle elde edilen örnekte gözlemlenmiştir. Bu durum, liyofilizasyonun düşük sıcaklıkta gerekleşmesi sayesinde besin öęelerinin maksimum oranda korunmasıyla ilişkilendirilebilir (Zafisah vd., 2018). Sprey kurutma ile vakum kurutma arasında enerji farkları olmuştur. Enerji farklarının başlıca nedeni, farklı yöntemlerin protein ve yağ gibi makro bileşenler üzerindeki etkileridir.

En düşük nem oranı liyofilize kurutma ile elde edilmiş bunu sprey kurutma ve vakum kurutma takip etmiştir. Bu bulgu, dondurarak kurutmanın ürün stabilitesi ve raf ömrü açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Vakum kurutma ise dięer iki yönteme göre daha yüksek nem bırakmıştır ve bu durum, ürünün mikrobiyal stabilitesini olumsuz etkileyebilir (Nurhad vd., 2012).

SK yöntemiyle elde edilen süt tozunda en yüksek kül içerięi (%1.35) gözlemlenirken, VK ile en düşük deęer (%1.02) elde edilmiştir. Bu farklılık, kurutma işlemleri sırasında mineral geçişlerinin kuruma ortamına baęlı olarak deęişmesiyle açıklanabilir.

En yüksek protein oranı sprej kurutmada (%10.97) bulunmuş, bunu LK (%10.55) ve VK (%10.23) izlemiştir. Bu sonuç, sprej kurutmanın daha hızlı gerçekleşmesi ve proteinlerin denatürasyonunun minimize edilmesiyle açıklanabilir (Méndez vd., 2021). Liyofilizasyonda düşük sıcaklık avantajı görülsede, bazı protein fraksiyonlarının çözücüyle birlikte ayrılması protein oranında hafif kayıplara neden olabilir.

Karbonhidrat oranı yöntemler arasında oldukça benzer çıkmış ve %52.34–52.82 aralığında değişmiştir. Kurutma yöntemi karbonhidrat fraksiyonları üzerinde sınırlı etkiye sahiptir, çünkü bu bileşenler ısı işleminden daha az etkilenmektedir.

En yüksek yağ oranı liyofilize kurutmada (%33.48), en düşük ise vakum kurutmada (%32.04) belirlenmiştir. Bu bulgu, yüksek sıcaklık uygulamalarında (özellikle vakumda) uçucu lipid fraksiyonla (Zielinska & Michalska, 2016) düşündürmektedir (Zielinska & Michalska, 2016). Sprej kurutmada ise %32.57 ile orta düzeyde yağ korunumu sağlanmıştır.

Sonuçlar, her bir kurutma yönteminin farklı avantaj ve sınırlılıkları olduğunu göstermektedir. Liyofilize kurutma, besin bileşenlerinin maksimum korunmasını sağlarken; sprej kurutma, endüstriyel uygulanabilirlik ve işlem süresi açısından daha pratiktir. Vakum kurutma ise bazı parametrelerde (özellikle nem ve kül) daha düşük performans göstermiştir. Bu bağlamda, ürün hedefi ve kullanım alanına göre uygun kurutma yöntemi seçimi büyük önem taşımaktadır.

4.4. Reolojik ve Tekno-Fonksiyonel Özellikler

Farklı kurutma yöntemleriyle elde edilen susam sütü tozlarının reolojik ve tekno-fonksiyonel özellikleri Çizelge 4.4.1’de sunulmuştur. Bu özellikler, tozların fonksiyonel uygulamalar açısından işlenebilirliğini, karışım davranışını ve tüketici kabulünü etkileyen önemli kalite parametreleridir.

Çizelge 4.7. Süt tozlarının reolojik ve tekno-fonksiyonel özellikleri

Analiz	SK	LK	VK
Su tutma kapasitesi(100g/g)	26.22±0.60 ^b	26.64±0.17 ^b	31.00±0.49 ^a
Şişme gücü (100g/g)	4.87±0.19 ^a	4.26±0.12 ^b	3.40±0.12 ^c
Suda çözünürlük (%)	85.19±0.22 ^b	87.03±0.11 ^a	83.27±0.32 ^c
Yığın yoğunluk (100g/ml)	38.85±0.35 ^a	28.14±0.19 ^b	34.38±0.26 ^c
Sıkıştırılmış yoğunluk (100g/ml)	62.14±3.32 ^b	51.89±0.63 ^c	70.80±1.13 ^a
Carr indeks (%)	38.59±2.8 ^c	45.76±0.56 ^b	51.43±0.41 ^a
Hausner oranı	1.60±0.09 ^c	1.84±0.02 ^b	2.06±0.02 ^a
Higroskopiklik (g/100g)	1.71±0.10 ^b	1.83±0.04 ^b	2.550±0.04 ^a

Fonksiyonel özellikler açısından yapılan değerlendirmede, su tutma kapasitesi açısından VK en yüksek değeri gösterirken, LK en düşük su tutma kapasitesine sahiptir ($p < 0.05$). Şişme gücü açısından ise SK en yüksek değeri vermiş olup, VK en düşük şişme gücüne sahiptir ($p < 0.05$). Suda çözünürlük açısından LK en yüksek, VK ise en düşük çözünürlüğe sahip bulunmuştur ($p < 0.05$). Vakum kurutma ile elde edilen tozun su tutma kapasitesi en yüksek (%31.00) iken, spreyci (%26.00) ve liyofilize (%26.64) kurutma arasında anlamlı fark gözlenmemiştir. Yüksek su tutma kapasitesi, reolojik olarak koyu kıvamlı ürün geliştirmeye olanak tanır. Bu durum, partikül boyutu ve poröz yapı ile ilişkilidir (Goula vd., 2010). Spreyci kurutma yöntemiyle elde edilen toz en yüksek şişme gücüne (%4.87) sahipken, vakum kurutma ile elde edilen ürün en düşük değeri göstermiştir. Şişme gücü (swelling power), ürünün su ile etkileşme kapasitesini yansıtan bir özelliktir ve özellikle tekstür gelişimi ve ürün stabilitesi açısından kritik bir fonksiyondur (Kaur vd., 2010).

Liyofilizasyon yöntemiyle elde edilen partiküllerin daha gözenekli yapıda olması, çözünürlüğün artmasına katkı sağlamaktadır (Ahmadian-Kouchaksaraei vd.,2014). Yığın yoğunluğu ve sıkıştırılmış yoğunluk bakımından VK en yüksek değerlere sahipken, LK en düşük yoğunluğu göstermiştir ($p < 0.05$). Bu durum, VK'nın daha kompakt ve yoğun bir toz yapısına sahip olduğunu göstermektedir (Collard vd., 2021). Carr indeksi ve Hausner oranı açısından yapılan analizlerde, VK en yüksek akış direncine sahipken, SK'nın en düşük akış direncine sahip olduğu belirlenmiştir ($p <$

0.05). Bu, SK ile elde edilen susam sütü tozlarının endüstriyel ölçekte işlenmesi ve paketlenmesi açısından daha avantajlı olduğunu göstermektedir (Yetişen vd., 2021).

Elde edilen sonuçlar, susam sütü tozlarının endüstriyel kullanım alanlarına göre değerlendirilebileceğini göstermektedir. VK ile üretilen susam sütü tozu, yüksek su tutma kapasitesi ve yoğun yapısı nedeniyle bağlayıcı özellik gerektiren gıda uygulamalarında, özellikle fırıncılık ve et ürünlerinde katkı maddesi olarak kullanılabilir (Dharini vd., 2023). SK yöntemiyle üretilen susam sütü tozu, en iyi akışkanlığa ve çözünürlüğe sahip olduğu için instant içecek karışımları, sporcu içecekleri ve fonksiyonel süt tozu üretiminde avantaj sağlayabilir (Ben-Othman vd., 2024). LK yöntemiyle elde edilen susam sütü tozu ise yüksek çözünürlüğü ve düşük yoğunluğu sayesinde bebek mamaları, tıbbi beslenme ürünleri ve diyet ürünleri için ideal bir seçenek olabilir. Düşük nem içeriğiyle uzun raf ömrü sunan bu tozlar, ilaç ve fonksiyonel gıda sektörlerinde de değerlendirilebilir (Ramsing vd., 2023).

Tüm örneklerde yüksek çözünürlük oranları elde edilmiştir. En yüksek çözünürlük liyofilize üründe (%87.03), en düşük vakum kurutulmuş tozda (%83.27) saptanmıştır. Liyofilizasyon, düşük sıcaklıkta gerçekleştirildiği için protein ve diğer çözünür bileşiklerin yapısını koruyarak çözünürlüğü artırabilir (Zielinska vd., 2016).

SK yöntemiyle elde edilen ürün, yüksek yığın (38.85 g/100 ml) ve düşük sıkıştırılmış yoğunluk göstermiştir. VK yöntemi ise en yüksek sıkıştırılmış yoğunluk değerine sahiptir (70.80 g/100mL). Bu değerler, taşıma ve depolama koşullarını doğrudan etkilemektedir.

Ayrışma ve akışkanlık karakteri üzerine etkili olan bu iki parametreye göre en iyi akışkanlık SK ile elde edilen üründe (Carr: 37.29%, Hausner: 1.60) gözlenmiştir. VK ile elde edilen ürün en düşük akışkanlığa sahiptir. Carr indeksi ≥ 25 ve Hausner oranı ≥ 1.5 değerleri, zayıf akış karakteri olarak değerlendirilmektedir. Carr indeksi ve Hausner oranı değerleri dikkate alındığında, tüm örneklerin zayıf akış özellikleri gösterdiği, ancak SK örneğinin diğer yöntemlere kıyasla daha iyi akış davranışı sergilediği belirlenmiştir.

En düşük higroskopiklik SK ile elde edilen üründe (%1.71), en yüksek ise LK örneğinde (%1.83) bulunmuştur. Liyofilize ürünlerin açık gözenekli yapısı, ortamdaki nemi kolay absorbe etmesine neden olur. Bu nedenle ambalajlama ve depolama koşulları bu tür ürünlerde daha kritik hale gelmektedir (Jaya vd., 2004).

Sprey kurutma yöntemi, reolojik ve tekno-fonksiyonel özellikler açısından en dengeli sonucu sunmuştur. Yüksek çözünürlük, düşük higroskopiklik ve uygun akışkanlık gibi özellikleriyle endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği en yüksek yöntemdir. Liyofilizasyon, yüksek çözünürlük avantajı sunsa da düşük yoğunluk ve yüksek higroskopiklik gibi sınırlayıcı faktörler taşımaktadır. Vakum kurutma ise yüksek STK gibi bazı avantajlara sahip olmasına karşın, zayıf akış özellikleri nedeniyle formülasyon ve işleme açısından sınırlı olabilir.

Bu bulgular, SEM analizleriyle uyumlu olup, vakum kurutma ile elde edilen kompakt yapıların daha yüksek su tutma kapasitesi gösterdiği, liyofilizasyon ile elde edilen gözenekli yapıların ise çözünürlüğü artırdığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, hangi kurutma yönteminin tercih edileceği, hedeflenen kullanım alanına bağlıdır. Eğer daha iyi çözünürlük ve akışkanlık isteniyorsa SK ve LK yöntemleri daha uygun seçeneklerdir. Ancak bağlayıcı özelliklerin ön planda olduğu uygulamalarda VK yöntemi avantaj sağlayabilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, kurutma parametrelerinin optimize edilerek susam sütü tozlarının fonksiyonel ve besinsel özelliklerinin daha da iyileştirilmesi önerilmektedir. Bu bilimsel değerlendirme, susam sütü tozlarının endüstriyel ve besinsel açıdan nasıl değerlendirilebileceğine dair kapsamlı bir bakış açısı sunmaktadır.

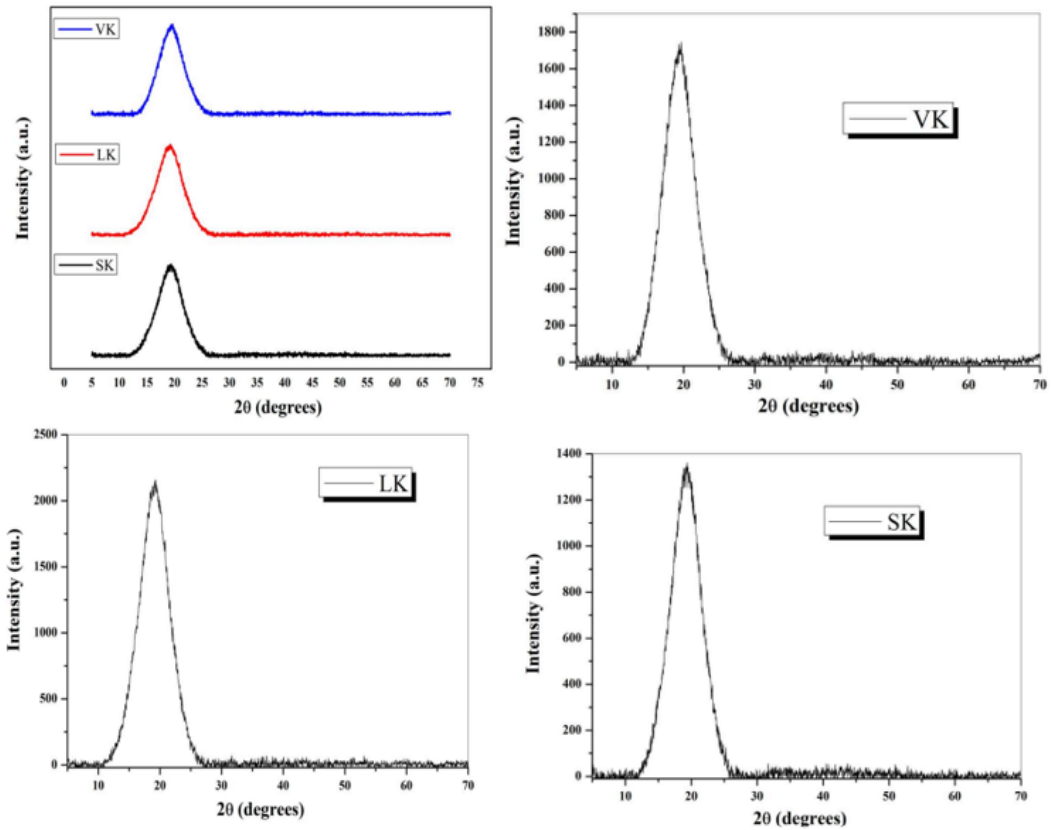
4.5. Yapısal, Spektral ve Mikroyapısal Analiz Bulguları

Bu bölümde, farklı kurutma yöntemleriyle kurutulan susam sütü tozu örneklerinin moleküler yapısı, kristalin düzeni ve morfolojik özellikleri; FTIR, XRD ve SEM analizleri kullanılarak değerlendirilmiş ve uygulanan işlem koşullarının yapısal ve spektral özellikler üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

4.5.1. XRD analizi ile kristalin ve amorf yapıların karakterizasyonu

X-ışını kırınımı (XRD) analizi, gıda ve biyopolimer sistemlerinde kristalin ve amorf fazların ayırt edilmesi, kristal yapıdaki düzenin incelenmesi ve proses koşullarının neden olduğu yapısal değişimlerin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kristalin fazlara ait keskin kırınım pikleri ile amorf yapılara özgü geniş saçılma bantları sayesinde örneklerin kristal karakteri değerlendirilebilmektedir (Roos & Drusch, 2016).

Şekil 4.5.3.1.'de, sprey kurutma (SK), vakum kurutma (VK) ve dondurarak kurutma (LK) yöntemleriyle elde edilen susam sütü tozlarına ait XRD desenleri sunulmuştur. Difraktogramlar, örneklerin kristalin ve amorf bileşen içeriklerini belirlemek amacıyla $2\theta = 10\text{--}70^\circ$ aralığında değerlendirilmiştir.



Şekil 4.5. Sprey kurutma (SK), vakum kurutma (VK) ve dondurarak kurutma (LK) yöntemleriyle elde edilen susam sütü tozlarına ait XRD desenleri

Tüm örneklerde belirgin şekilde yaklaşık $2\theta \approx 20^\circ$ civarında tek bir genişmiş pik gözlenmiştir. Bu pik, amorf yapıların karakteristik özelliği olan geniş ve düşük şiddetli bir tepe olup, maltodekstrin varlığına ve süt tozunun genel olarak amorf bir yapıda kurutulduğuna işaret etmektedir. Bununla birlikte, kurutma yöntemleri arasında tepe yüksekliği ve genişliği bakımından önemli farklar dikkat çekmektedir:

LK, bu bölgede daha dar ve yüksek yoğunluklu bir bant sergilemiştir. Ancak bu bant hâlâ geniş karakterde olup, sistemin genel olarak amorf yapıda olduğunu göstermektedir. Gözlenen bu farklılık, kristalin yapı oluşumundan ziyade amorf fazın daha düzenli bir yapıya sahip olduğunu düşündürmektedir.

Vakum kurutulmuş örnek (VK), orta derecede bir pik yoğunluğu ve genişliği göstermiştir. Bu durum, sınırlı düzeyde kristalin yapı korunumu ile birlikte belirgin bir amorf faz varlığına işaret etmektedir. Bu sonuç, düşük sıcaklıkta ancak atmosferden yalıtılmış bir ortamda kurutmanın yapısal bozulmayı kısmen azalttığını göstermektedir.

Sprey kurutulmuş örnek (SK), en geniş ve düşük yoğunluklu pikle karakterize edilmiş olup, daha düzensiz bir amorf yapı hakimiyetini göstermektedir. Yüksek sıcaklıkta hızlı kuruma süreci sırasında kristalin yapıların bozulduğu ve amorf fazın baskın hale geldiği anlaşılmaktadır.

Bu bulgular literatürdeki benzer kurutma çalışmalarıyla uyumludur. Özellikle maltodekstrin gibi taşıyıcı maddelerin sprey kurutma ile işlem görmesi sonucunda amorf yapıların artması yaygın olarak bildirilmektedir (Tonon vd., 2011; Zhang vd., 2017). Liyofilize ürünlerde ise düşük sıcaklık ve süblimasyon yoluyla suyun uzaklaştırılması, kristalin yapıların daha iyi korunmasına imkân tanır (Zielinska vd., 2016). Sonuç olarak, XRD analizleri, kurutma yönteminin ürünün fiziksel yapısında önemli yapısal farklılıklar oluşturduğunu göstermektedir.

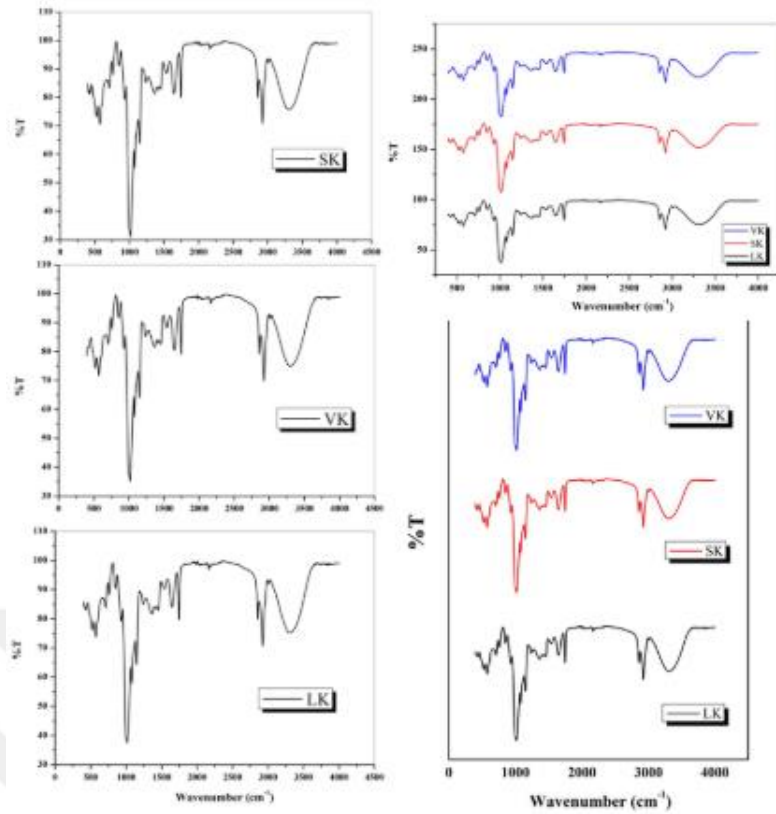
LK örneği daha düzenli bir amorf yapı karakteri ortaya koyarken, SK örneği daha düzensiz ve dağınık bir amorf yapı profili sergilemiştir. VK örneği ise bu iki yapı arasında geçiş özelliği göstermektedir. Bu durum, kurutma yöntemine bağlı olarak oluşan yapısal organizasyonun farklılaştığını göstermekte olup, elde edilen amorf

yapının düzenlilik derecesi ürünün fonksiyonel özellikleri (örneğin çözünürlük, higroskopisite) ve depolama stabilitesi üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, hedeflenen nihai ürün özelliklerine bağlı olarak uygun kurutma yönteminin seçimi önem arz etmektedir. Bu sonuçlar, sistemin genel olarak amorf karakterde olduğunu, ancak kurutma yöntemine bağlı olarak amorf yapıdaki düzenlilik derecesinin değiştiğini göstermektedir.

4.5.2. FTIR spektroskopisi ile moleküler yapı ve fonksiyonel grup değişimlerinin incelenmesi

FTIR spektroskopisi, örneklerin moleküler yapısını ve fonksiyonel grup dağılımlarını belirlemek amacıyla kullanılmış; uygulanan ekstraksiyon ve/veya modifikasyon işlemlerinin kimyasal yapı üzerindeki etkileri karakteristik absorban bantları üzerinden değerlendirilmiştir (chemistry vd; 2000).

Şekil 4.5.1.'de, üç farklı kurutma yöntemiyle (Sprey Kurutma - SK, Vakum Kurutma - UK ve Dondurarak Kurutma - LK) elde edilen susam sütü tozlarının Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizine ait spektrumları sunulmuştur. Analiz, örneklerin fonksiyonel gruplarında meydana gelen yapısal değişimleri ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Susam sütü tozlarının Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizine ait spektrumları

Tüm örneklerde geniş bir absorpsiyon bandı olarak yaklaşık $3270\text{--}3300\text{ cm}^{-1}$ aralığında görülen pikler, --OH (hidroksil) gruplarına ait olup, proteinler ve karbonhidratlardaki hidrojen bağlarıyla ilişkilidir. Bu bandın şiddetinde liyofilize (LK) örnekte daha belirgin bir genlik gözlenmiştir. Spray ve vakum kurutma örneklerinde bu bandın daha zayıf gözlemlenmesi, Yapısal değişim ve muhtemel denatürasyona işaret etmektedir.

$2920\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ bandı, metilen (--CH_2) gruplarının gerilme titreşimlerine karşılık gelmekte olup, lipid bileşenlerinin varlığına işaret eder. Bu bölgede tüm örneklerde benzer absorpsiyonlar gözlenmiş, ancak vakum kurutma (VK) örneğinde bu piklerin daha dar ve simetrik olduğu dikkat çekmiştir. Bu durum, düşük sıcaklıkta ve kontrollü atmosferde gerçekleştirilen vakum kurutmanın yağ bileşenlerini daha az modifiye ettiğini göstermektedir.

Yaklaşık 1650 cm^{-1} civarındaki pik, proteinlerin amid-I bandı olarak bilinir ve esasen C=O gerilme titreşimi ile ilişkilidir. Benzer şekilde, 1540 cm^{-1} civarındaki amid-II

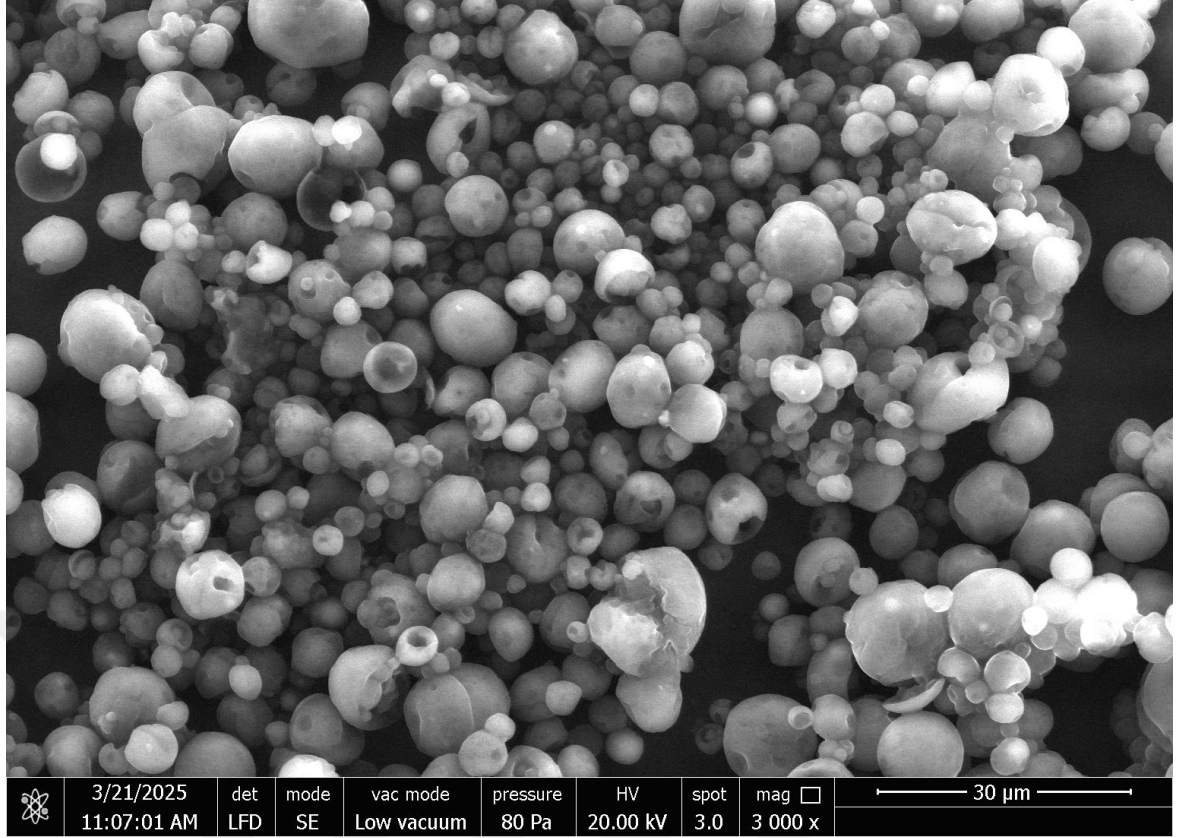
bandı, N–H bükülme ve C–N gerilme titreşimlerine işaret etmektedir. Bu bölgelerde SK örneğinde bandın yoğunluğu bir miktar azalmış olup, spray kurutmanın protein yapısında kısmi denatürasyona yol açabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıkta kısa süreli ısıl işlem sırasında amid bağlarının yapısal bütünlüğünün etkilenmesiyle açıklanabilir (Haque vd., 2015; Samborska vd., 2024).

1040–1150 cm⁻¹ aralığında gözlenen belirgin absorpsiyonlar, karbonhidratlara ait C–O–C gerilme titreşimleri ile ilişkilidir. Bu bölgedeki bant yoğunluğu tüm örneklerde yüksek olmakla birlikte, liyofilize tozda bu sinyal daha keskin ve belirgindir. Bu durum, düşük sıcaklıkta kurutmanın polisakkarit yapıların bozulmasını en aza indirerek doğal formunun korunmasına yardımcı olduğunu göstermektedir (Huang vd., 2014).

Sonuç olarak FTIR analizi, her üç kurutma yönteminin susam sütü tozlarının moleküler yapısı üzerinde farklı etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Liyofilizasyon, protein ve karbonhidrat yapılarının en iyi korunduğu yöntem olarak öne çıkmıştır. Vakum kurutma, yağ yapısının stabilitesini büyük oranda muhafaza etmiştir. Sprey kurutma, özellikle amid bölgelerinde gözlenen sinyal azalması nedeniyle, proteinlerde sınırlı denatürasyona neden olmuştur. Bu bulgular, kurutma yönteminin seçiminin sadece fiziksel değil aynı zamanda kimyasal ve fonksiyonel bütünlük açısından da kritik olduğunu göstermektedir.

4.5.3. SEM analizi ile kurutulmuş süt tozlarının mikroyapısal karakterizasyonu

Şekil 4.5.2.1’de sprey kurutma yöntemiyle elde edilen susam sütü tozunun 3000x büyütmede çekilmiş SEM (Scanning Electron Microscopy) görüntüsü sunulmuştur. Görselde, toz partiküllerinin yüzey morfolojisi, boyut dağılımı ve yüzey bütünlüğü detaylı biçimde değerlendirilmektedir.



Şekil 4.7. Sprey kurutma yöntemiyle elde edilen susam sütü tozunun 3000x büyütmede çekilmiş SEM (Scanning Electron Microscopy) görüntüsü

Görüntüde partiküller genel olarak küresel morfolojiye sahiptir. Bu durum, sprej kurutma işleminin, hızlı su buharlaşması sırasında oluşan damlacıkların yüzey gerilimi etkisiyle minimum yüzey enerjisine sahip simetrik şekiller oluşturduğunu göstermektedir. Bu özellik, sprej kurutmayla üretilen süt tozlarının iyi akışkanlık, kolay çözünürlük ve stabil rehidrasyon gibi teknolojiye yönelik avantajlar sunduğuna işaret etmektedir (Goula & Adamopoulos, 2010).

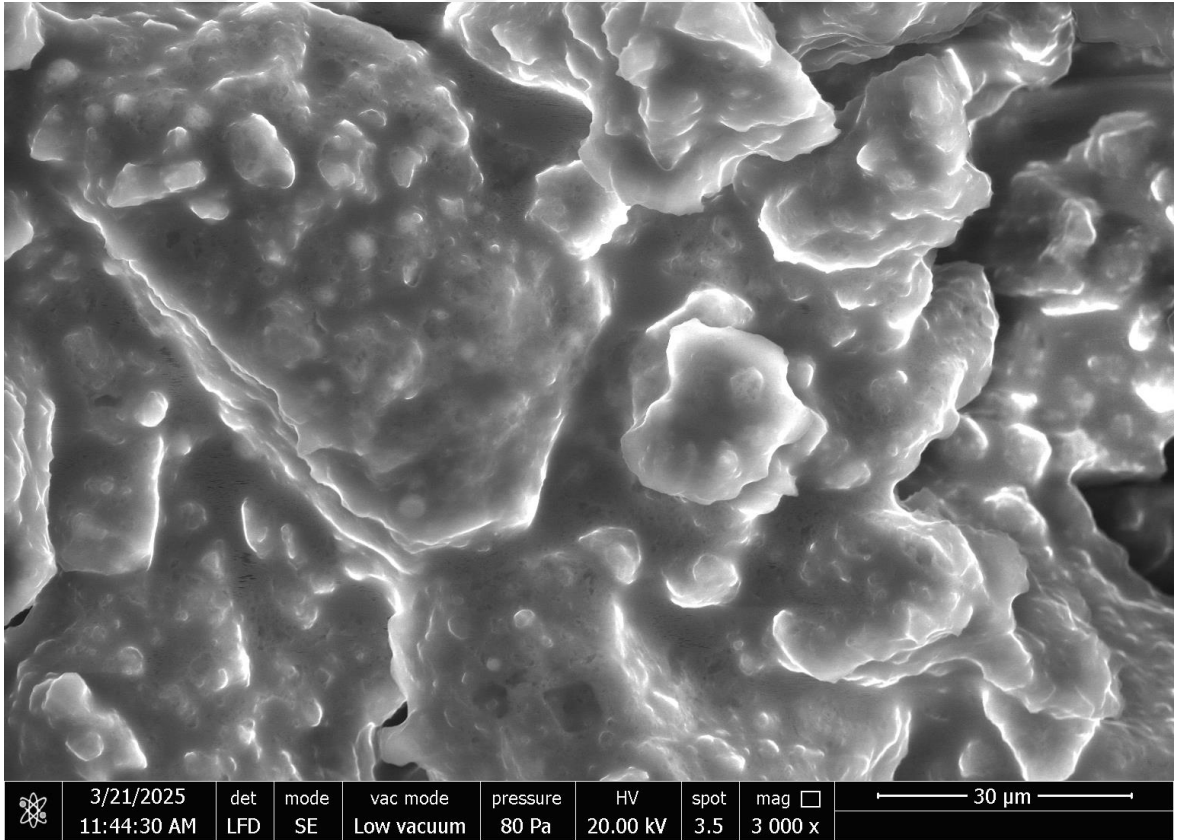
Ancak, bazı partiküllerde büzülme, çökme (collapse) ve yüzey kırıkları dikkat çekmektedir. Bu deformasyonlar, sprej kurutma esnasında iç suyun hızlı buharlaşmasıyla iç basınç farklarının oluşması sonucu kabuk çökmesiyle ilişkilendirilebilir. Ayrıca, bazı partiküllerde gözenekli yapı ve yüzey boşlukları gözlenmiştir; bu da maltodekstrinle yapılan enkapsülasyonun homojen dağılmadığını ve kısmen yüzey boşlukları oluştuğunu düşündürmektedir.

Boyut dağılımı incelendiğinde, partiküllerin çoğunun çapı 1–10 µm aralığında olup, bu dağılım hem ürün çözünürlüğü hem de yüzey alanı açısından avantaj sunmaktadır.

Mikron boyutlu küresel partiküller, süt tozlarının yeniden dağılılabirlik ve susuz stabilite gibi özelliklerini artırıcı yönde etki etmektedir.

Sprey kurutma yöntemiyle elde edilen susam sütü tozu genellikle mikroyapısal olarak istenen nitelikleri gösterse de, gözlemlenen yüzey deformasyonlarının, işlem parametrelerinin (giriş sıcaklığı, püskürtme basıncı, taşıyıcı oranları gibi) dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Literatürde, ısıya duyarlı bileşenler içeren sistemlerde partikül bütünlüğünün korunabilmesi için daha düşük giriş sıcaklıkları ve daha yüksek taşıyıcı (örneğin maltodekstrin) oranları önerilmektedir (Vidović vd., 2014).

Şekil 4.5.2.2’de, vakum kurutma yöntemiyle elde edilen susam sütü tozunun 3000x büyütmede elde edilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verilmiştir. Görselde, parçacıkların morfolojik yapısı, yüzey formu ve kurutma koşullarının mikrostrüktür üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

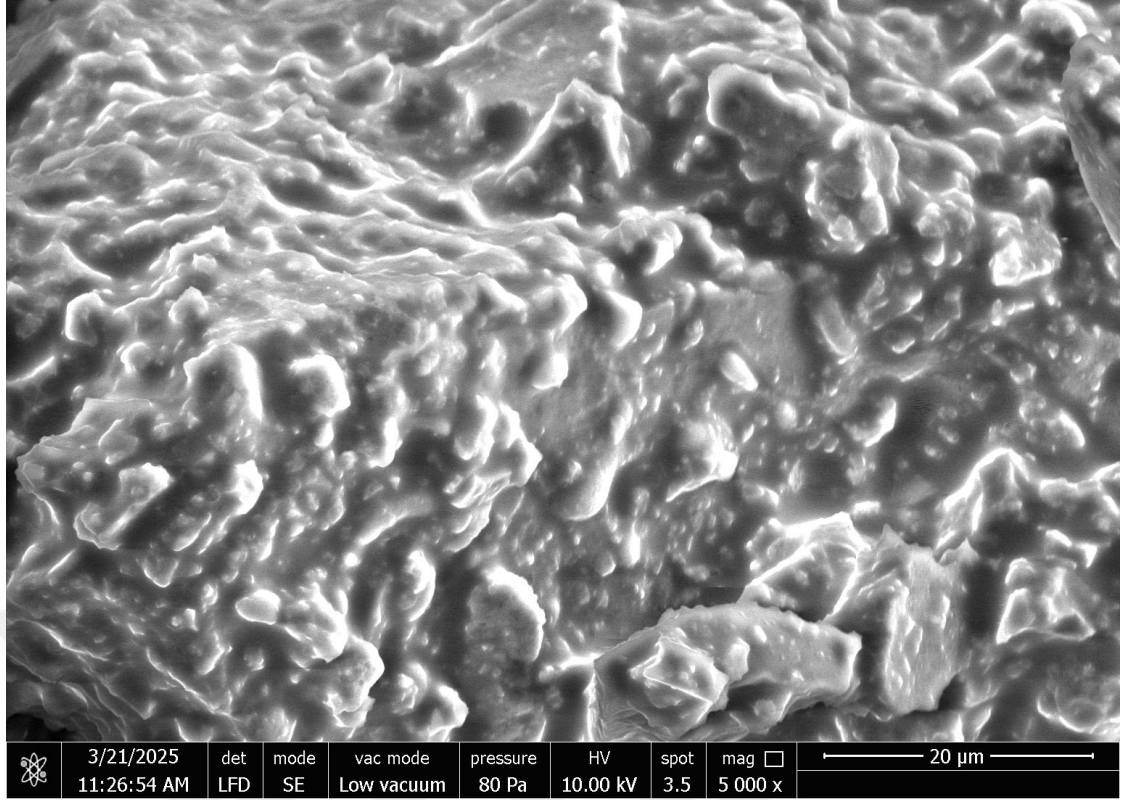


Şekil 4.8. Vakum kurutma yöntemiyle elde edilen susam sütü tozunun 3000x büyütmede elde edilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü

Vakumla kurutulan örnekte partiküller; düzensiz, düzensiz şekilli ve amorf kütleler hâlinde bir araya gelmiş daha kompakt yapılardan oluşmaktadır. Spray kurutma örneklerinde gözlenen belirgin küresellik yerine, daha katı, pürüzlü, yassı ve yoğunlaşmış parçacıklar dikkat çekmektedir. Bu yapı, düşük sıcaklık ve vakum altında suyun yavaşça uzaklaştırılması nedeniyle oluşan çökme ve sinterleme etkisinin sonucudur. Yüzey morfolojisi daha az gözenekli ve daha pürüzlü olup, bu durum partiküllerin arası boşlukların sınırlı olduğunu ve daha yoğun yapıların oluştuğunu göstermektedir. Bu yoğunluk artışı, ürünün akışkanlığını düşürebilir, ancak oksijen geçirgenliğini ve higroskopisiteyi azaltarak raf ömrünü olumlu yönde etkileyebilir (Zhang vd., 2023).

Bununla birlikte, bazı bölgelerde yüzeyden çıkıntı yapan agregatlar ve parçacık içi yoğunluk farkları gözlenmektedir. Bu da kurutma sırasında maltodekstrin matrisi içerisindeki çözünür katı maddelerin yeniden kristalleşmesi ya da yüzeyde yeniden dağılımı ile ilişkili olabilir. Bu oluşumlar, partikül bütünlüğünü artırmakla birlikte çözünürlük üzerinde negatif etki oluşturabilir. Vakum kurutma, düşük sıcaklık ve düşük basınç koşulları nedeniyle besin bileşenlerinin ısıl degradasyonunu azaltma açısından avantajlıdır. Ancak, SEM görüntüsünde gözlenen düzensiz ve aglomere yapı, bu yöntemin partikül mühendisliği açısından dezavantajlı olabileceğini göstermektedir. Buna karşılık gözeneksiz ve kompakt yapısı, özellikle oksijen duyarlılığı yüksek bileşenlerin korunması açısından pozitif etki yaratabilir.

Şekil 4.5.2.3' te, dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yöntemiyle elde edilen susam sütü tozuna ait 5000x büyütmede çekilmiş SEM görüntüsü sunulmuştur. Görüntüdeki detaylar, kurutma işleminin partikül morfolojisine etkisini ve yapısal bütünlüğü doğrudan yansıtmaktadır.



Şekil 4.9. Dondurarak kurutma (liyofilizasyon) yöntemiyle elde edilen susam sütü tozuna ait 5000x büyütmede çekilmiş SEM görüntüsü

Liyofilize örnekte partiküller, düzlemsel, katmanlı ve yoğun bir yapıda gözlemlenmiştir. Bu yapı, süblimasyon yoluyla suyun buz fazından doğrudan buhar fazına geçmesiyle karakterize edilen liyofilizasyon sürecinin tipik sonucudur. Kuruma sırasında buz kristallerinin yerini boşlukların alması, bu örnekte kırılğan, düzensiz kenarlı, kısmen kompakt ve mikro-poroz yapı oluşmasına neden olmuştur. Yüzey yapısı genel olarak pürüzsüz ve akıcı değildir; bunun yerine, granüler alt yapılar ve amorf parçacıklar barındıran bir topografya dikkat çekmektedir. Bu, düşük sıcaklıkta kurumanın protein, lipid ve karbonhidrat bileşenleri üzerinde yapısal stabiliteyi koruyarak termal denatürasyonu en aza indirdiğini, ancak partikül şekillendirme açısından sınırlı düzenlilik sunduğunu göstermektedir (Ratti, 1994).

Vakum kurutma ve spreyci kurutma örneklerine kıyasla, bu örnekte belirgin küresel partikül formasyonu gözlenmemekte, bunun yerine daha çok keskin kenarlı, amorf kütleli yapılar hâkimdir. Bu farklılık, partikül oluşum mekanizmalarının işlem parametrelerine duyarlılığını ortaya koymaktadır. Özellikle maltodekstrin varlığına

rağmen liyofilizasyon işleminde partikül yüzeyi yüksek oranda kristalize olmamış, bunun yerine içsel yoğunlaşmış bir matris yapısı oluşmuştur.

Liyofilizasyon yöntemi, özellikle biyoaktif bileşenlerin korunumu, oksidasyona karşı dayanıklılık ve protein stabilitesi açısından oldukça avantajlıdır. Ancak, SEM görüntüsünde de görüldüğü üzere, bu yöntem düzenli partikül morfolojisi sunmaz. Tozların akışkanlığı, çözünabilirliği gibi fonksiyonel parametreler, bu tip düzensiz yapılarda düşük olabilir. Bu durum, son ürün formülasyonlarında yeniden hidrasyon davranışı dikkate alınmalıdır (Zielinska & Michalska, 2016).

Uygulanan kurutma yöntemleri sonucunda elde edilen susam sütü tozlarının mikroyapısal özelliklerinde belirgin farklılıklar gözlenmiş olup, bu durum doğrudan kurutma tekniklerinin su uzaklaştırma mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Sprey kurutma yöntemi ile elde edilen örnekler, küresel ve daha düzenli partikül yapısı sergileyerek homojen bir morfoloji oluştururken, vakum ve liyofilizasyon yöntemleri sonucunda elde edilen örneklerde daha düzensiz, amorf ve heterojen yapılar oluşmuştur. Vakum kurutma daha kompakt ve yoğun yapılar oluştururken, liyofilizasyon ise daha kırılgan ve yapısal düzenliliği düşük bir morfoloji ortaya koymuştur. Bu mikroyapısal farklılıklar, toz ürünlerin akışkanlık, çözünürlük, higroskopisite ve yeniden hidrasyon özellikleri üzerinde doğrudan belirleyici olup, kurutma yöntemi seçiminin hedeflenen ürün özelliklerine göre yapılması gerektiğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde, fonksiyonel, besleyici ve bitkisel esaslı bir süt ürünü olarak susam sütü geliştirilmiş; üretim süreci, ekstraksiyondan kurutmaya kadar kapsamlı biçimde optimize edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında susam tohumlarının su aktivitesi (a_w), nem, kül, protein, yağ ve enerji içeriği gibi fizikokimyasal özellikleri belirlenmiş; düşük a_w (0.325) ve nem (%1.96) değerleri, susamın mikrobiyal açıdan güvenli ve stabil bir hammadde olduğunu göstermiştir. Yüksek yağ (%49.05) ve protein (%21.30) içerikleri, susamın fonksiyonel bir bileşen olarak potansiyelini vurgulamıştır. Ayrıca L^* (80.11) gibi yüksek renk değeri, tohumların açık renkli ve minimal işlem görmüş olduğunu ortaya koymuş, bu da özellikle süt ürünleri uygulamalarında tüketici kabulünü olumlu yönde etkilemektedir.

Susam sütü üretiminde ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon yöntemi kullanılmış RSM-CCD ile süreç optimize edilmiştir. Parçalama süresi (PS), ultrason süresi (US) ve bekletme süresi (BS) gibi parametrelerin kuru madde verimi (%KM) üzerindeki etkisi modellenmiş ve en yüksek verim (%11.694) 240 dk bekletme, 6 dk parçalama ve 17.5 dk ultrason uygulamasıyla elde edilmiştir. R^2 değeri %95.54 olan model yüksek uyum göstermiş; özellikle PS'nin hem doğrusal hem de kuadratik etkileriyle verim üzerinde en belirleyici parametre olduğu anlaşılmıştır. Model doğrulama aşamasında, teorik (%11.7284) ve deneysel (%11.664) KM değerleri birbiriyle oldukça uyumlu bulunmuş, bu da modelin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini doğrulamıştır.

Susam sütü, besleyici içerik bakımından da dikkat çekici sonuçlar vermiştir: enerji (78 kcal/100 g), yağ (%6.96), protein (%2.17) ve düşük karbonhidrat (%1.76) içeriği ile hem sağlıklı hem de fonksiyonel bir bitkisel süt alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Bu değerler, özellikle düşük karbonhidratlı diyetlere uygunluğu ve vegan beslenmede kullanımı açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Sütün kurutulmasında üç farklı yöntem (sprey kurutma [SK], vakum kurutma [VK], liyofilizasyon [LK]) karşılaştırılmış ve her bir yöntemin fizikokimyasal, reolojik ve tekno-fonksiyonel özellikleri değerlendirilmiştir. Liyofilizasyon yöntemi, en düşük nem (%1.90) ve en yüksek enerji (%555 kcal) değerleriyle ürün stabilitesi açısından

avantaj sağlamıştır. Sprey kurutma ise %10.97 protein, %85.19 çözünürlük ve düşük higroskopiklik (%0.075) gibi parametrelerde öne çıkmış hem fonksiyonellik hem de endüstriyel uygulanabilirlik açısından en dengeli sonuçları sunmuştur. Vakum kurutma ise yüksek su tutma kapasitesi (%31.00) ile bazı reolojik avantajlar sağlamış; ancak zayıf akışkanlık ve yüksek Carr indeksi (%51.43) gibi nedenlerle işleme açısından sınırlı bulunmuştur.

Bu çalışmada elde edilen bulgular bir bütün olarak değerlendirildiğinde, farklı kurutma yöntemlerinin susam sütü tozlarının kimyasal, morfolojik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde belirleyici etkiler yarattığı görülmüştür. FTIR sonuçları, liyofilizasyonun hidrojen bağlarını ve biyoaktif bileşenleri korumada daha etkili olduğunu, vakum kurutmanın lipid yapısının stabilitesini muhafaza ettiğini, sprej kurutmanın ise proteinlerde kısmi denatürasyona yol açarak fonksiyonel grup stabilitesini sınırladığını ortaya koymuştur. SEM bulguları, sprej kurutmanın küresel ve gözenekli yapıda partiküller üreterek çözünürlük ve akışkanlığı artırdığını, ancak protein denatürasyonu ve yüksek amorf yapı oranı nedeniyle raf ömrünü kısaltabilecek potansiyel riskler barındırdığını göstermiştir. Vakum kurutma, kompakt ve yoğun yapılar oluşturarak stabilite sağlamış, fakat çözünürlük ve akışkanlık açısından sınırlı kalmıştır. Liyofilizasyon ise kristalin yapıların korunmasında avantaj sağlarken, parçacıkların kırılğan ve düzensiz mikroyapısı çözünürlük performansını olumsuz etkileyebilmiştir. XRD bulguları, sprej kurutmanın amorf karakteri baskınlaştırdığını, vakum kurutmanın yarı amorf-yarı kristalin özellikler sunduğunu, liyofilizasyonun ise kristalin yapıyı en iyi şekilde koruduğunu kanıtlamıştır. Sonuç olarak, liyofilizasyon fonksiyonel bileşen stabilitesinin korunmasında öne çıkarken, sprej kurutma hızlı çözünürlük ve akışkanlık avantajı sağlamış, vakum kurutma ise ürün yoğunluğunu artırmıştır. Bu veriler, susam sütü tozlarının endüstriyel üretiminde kullanılacak kurutma yönteminin nihai ürünün fonksiyonel, besinsel ve teknolojik özelliklerini doğrudan şekillendirdiğini ve seçim sürecinde ürünün kullanım amacına göre stratejik kararlar alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması, susam bazlı bitkisel süt ve süt tozu üretimine yönelik kapsamlı, çok yönlü ve yenilikçi bir yaklaşım sunarak hem bilimsel literatüre hem de gıda endüstrisine özgün katkılar sağlamıştır. İlk kez susam sütü üretiminde ultrason destekli ekstraksiyon (UAE) yöntemi, çok değişkenli istatistiksel optimizasyon (RSM-CCD)

ile modellenmiş ve yüksek doğrulukla optimize edilmiştir. Sürecin her aşaması – hammadde analizinden, ekstraksiyon ve kurutma parametrelerine; süt ve toz ürün karakterizasyonundan reolojik ve fonksiyonel özelliklere kadar – bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Bu sayede, alerjen içermeyen, glutensiz ve tamamen bitkisel kaynaklı süt tozlarının geliştirilmesi için sürdürülebilir bir üretim modeli ortaya konmuştur.

Bu çalışmanın sonucunda geliştirilen susam sütü, hayvansal kaynaklı süte alternatif arayan bireyler için özellikle veganlar, laktoz intoleransı olanlar ve düşük karbonhidratlı beslenenler besleyici, fonksiyonel ve yenilikçi bir ürün sunmaktadır. Elde edilen ürün, badem, soya ve yulaf sütü gibi mevcut bitkisel süt alternatifleriyle hem besinsel hem teknolojik özellikler bakımından rekabet edebilecek düzeydedir.

Endüstriyel açıdan bakıldığında, çalışmada değerlendirilen üç farklı kurutma yöntemi (sprey, vakum, liyofilizasyon) detaylı karşılaştırılmış; sprey kurutma yöntemi, çözünürlük, protein korunumu ve düşük higroskopiklik gibi özellikleriyle hem kalite hem de proses verimliliği açısından en uygun yöntem olarak öne çıkmıştır. Bu sonuç, üretim maliyeti ve enerji kullanımı açısından avantaj sunmakta; endüstride enerji verimli ve uygulanabilir kurutma teknolojilerinin tercih edilmesi için yol göstermektedir.

Ayrıca çalışmada hiçbir sentetik katkı maddesi kullanılmadan, doğal ve işlenmiş bir ürün elde edilmiştir. Bu özellik, günümüzde yükselen “temiz etiketli” (clean-label) ürün trendine doğrudan hizmet etmekte ve tüketici güvenini artıracak sürdürülebilir ürün geliştirme stratejilerine katkı sunmaktadır.

Geliştirilen susam sütü tozları; hazır içecek karışımları, sporcu destek ürünleri, fonksiyonel barlar, bebek mamaları ve yaşlı beslenmesine yönelik ürün formülasyonlarında aktif bileşen olarak kullanılabilir. Bu yönüyle çalışma, gıda sanayiinde AR-GE ve ürün geliştirme faaliyetlerine doğrudan katkı sağlayabilecek güçlü bir bilimsel ve teknolojik altyapı oluşturmuştur.

Ayrıca ultrason destekli ekstraksiyonun, geleneksel yöntemlere kıyasla daha kısa sürede, daha düşük sıcaklıklarda ve daha az enerji tüketerek yüksek verim sağlaması,

karbon ayak izi düşük üretim hedefleyen sürdürülebilir sanayi modelleri için de önemli bir avantajdır.

Sonuç olarak, bu çalışma yalnızca bilimsel ve teknolojik açıdan değil, aynı zamanda Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile de uyumlu bir yaklaşım ortaya koymuştur. Geliştirilen susam sütü ve tozları; besleyici değerleriyle gıda güvenliğine katkı sağlamakta (SKA 2), toplumun farklı kesimleri için sağlıklı bir alternatif sunmakta (SKA 3), yenilikçi ve enerji verimli üretim süreçleriyle sanayiye uygulanabilirlik göstermekte (SKA 9), katkısız ve temiz etiketli ürün anlayışıyla sorumlu üretim ve tüketimi desteklemekte (SKA 12) ve düşük enerji kullanımı sayesinde iklim dostu üretim modellerine katkı sunmaktadır (SKA 13).

Öneriler:

- Elde edilen susam sütü ve toz ürünleri, hedef tüketici gruplarında (ör. vegan bireyler, çocuklar, yaşlılar, sporcular) duyu analizlerle değerlendirilerek pazar odaklı ürün geliştirme süreçleri başlatılabilir.
- Kurutulmuş ürünlerin raf ömrü, çözünürlük oranı ve fonksiyonel bileşik stabilitesi gibi kalite parametreleri uzun süreli depolama koşullarında izlenebilir; bu doğrultuda uygun ambalajlama sistemleri belirlenebilir.
- Bu çalışma, TÜBİTAK, Horizon Europe, EUREKA gibi ulusal ve uluslararası araştırma programlarına özgü, fonksiyonel toz ürün geliştirme ve ticarileştirme projeleri için güçlü bir başlangıç noktası olabilir.

Sonuç olarak bu çalışma, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak, ultrasonik su banyosu destekli ekstraksiyon ile elde edilen susam sütlerinin farklı kurutma yöntemleri ile birlikte ele alındığı, karşılaştırmalı ve çok yönlü bir değerlendirmeyi ortaya koyarak önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Özellikle, üretim sürecinin optimizasyonu ile kurutma tekniklerinin mikroyapısal, fizikokimyasal ve fonksiyonel özellikler üzerindeki etkilerinin bütüncül olarak incelenmesi, mevcut literatürde birlikte ele alınmamış bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca akademik bilgi birikimine katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda endüstriyel ölçekte katma değeri yüksek, sürdürülebilir ve inovatif bitkisel süt tozu ürünlerinin geliştirilmesine yönelik yol gösterici nitelik taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdiani, N., Kolahi, M., Javaheriyani, M., & Sabaeian, M. (2024). Effect of storage conditions on nutritional value, oil content, and oil composition of sesame seeds. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101117. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2024.101117>
- Afaneh, I., Abu-Alruz, K., Quasem, J. M., Sundookah, A., Abbadi, J., Alloussi, S., & Sawalha, S. (2011). Effect of Critical Processing Variables on Sesame Milk Quality. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 6(4), 517–520.
- Agidew, M. G., Dubale, A. A., Atlabachew, M., & Abebe, W. (2021). Fatty acid composition, total phenolic contents and antioxidant activity of white and black sesame seed varieties from different localities of Ethiopia. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/S40538-021-00215-W/TABLES/3>
- Aglave, H. (2018). Physiochemical characteristics of sesame seeds. ~ 64 ~ *Journal of Medicinal Plants Studies*, 6(1), 64–66. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.008>
- A Shah, N. C. (2016). *Sesamum indicum* (sesame or til): Seeds and oil—A historical and scientific evaluation from Indian perspective. *Asian Agri-History*, 20(1), 5–23.
- Ahmadian-Kouchaksaraei, Z., Varidi, M., ... M. V.-L.-F. science and, & 2014, undefined. (n.d.). Influence of processing conditions on the physicochemical and sensory properties of sesame milk: A novel nutritional beverage. ElsevierZ Ahmadian-Kouchaksaraei, M Varidi, MJ Varidi, H PourazarangLWT-Food Science and Technology, 2014•Elsevier. Retrieved January 5, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643813004994>
- Ahmadian-Kouchaksaraei, Z., Varidi, M., Varidi, M. J., & Pourazarang, H. (2014). Influence of processing conditions on the physicochemical and sensory properties of sesame milk: A novel nutritional beverage. *LWT - Food Science and Technology*, 57(1), 299–305. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2013.12.028>
- Ahmed, I. A. M., Aljuhaimi, F., Musa, M., 2 *, Ö., Ghafoor, K., Şimşek, Ş., Babiker, E. E., Osman, M. A., Gassem, M. A., & Salih, H. A. A. (2020). Evaluation of chemical properties, amino acid contents and fatty acid compositions of sesame seed provided from different locations. *Jstage.Jst.Go.Jp*, 69(8), 795–800. <https://doi.org/10.5650/jos.ess20041>
- Ahrens, S., Venkatachalam, M., Mistry, A. M., Lapsley, K., & Sathe, S. K. (2005). Almond (*Prunus dulcis* L.) Protein Quality. SpringerS Ahrens, M Venkatachalam, AM Mistry, K Lapsley, SK SathePlant Foods for Human Nutrition, 2005•Springer, 60(3), 123–128. <https://doi.org/10.1007/s11130-005-6840-2>
- Ali Hassan, M. (1985). Production of Spray-Dried Coconut Milk Powder. In *Pertanika* (Vol. 8, Number 1).

- Ali, M. A. M., Mahmoud, H. A., Aldoma, M., & Hamadnalla, H. M. Y. (2020). Proximate composition of Sudanese *Sesamum indicum* L. (white and brown) sesame seeds. *An Archive of Organic and Inorganic Chemical Sciences*, 4(4), 574–577. <https://doi.org/10.32474/AOICS.2020.04.000195>
- Alibaş, İ. (2011). Kırmızı Şili Biberinin Vakumla Kurutma Karakteristikleri. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 7(4), 429–435.
- Angel, S. P., & Gurumoorthi, P. (2024). Optimization of Spray Drying Process Parameters for the Production of Cranberry Flavoured Oat Milk Powder Using Response Surface Methodology. *Food Science and Technology*, 12(1), 48–61. <https://doi.org/10.13189/fst.2024.120104>
- Anilakumar, K., Pal, A., ... F. K.-A. C., & 2010, undefined. (n.d.). Nutritional, medicinal and industrial uses of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds-an overview. *Hrcak.Srce.HrKR* Anilakumar, A Pal, F Khanum, AS BawaAgriculturae Conspectus Scientificus, 2010•hrcak.Srce.Hr. Retrieved January 5, 2025, from <https://hrcak.srce.hr/hr/66001?fbclid=IwAR2Pvi>
- Antalya. (n.d.). “Susam” sektörel analiz toplantısı raporu 20.12.2022/antalya.
- Araştırma / Research, G. ; A., Tontul, S., Mutlu, C., Koç, A., Erbaş, M., & ; Arslan Tontul, S. (2018). Çiya tohumundan ultrason destekli yağ ekstraksiyonunun optimizasyonu. *The Journal of Food*, 43(3), 393–402. <https://doi.org/10.15237/GIDA.GD18013>
- Arévalo-Pinedo, A., engineering, F. M.-J. of food, & 2007, undefined. (n.d.). Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. ElsevierA Arévalo-Pinedo, FEX MurrJournal of Food Engineering, 2007•Elsevier. Retrieved March 7, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877406>
- Asante, F. A., Saalia, F. K., Oduro, I., & Ellis, W. O. (2014). Modelling of Milk Solids Extraction from Tigernut (*Cyperus Esculentus* L) Tubers Using Response Surface Methodology. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering*, 2014(3), 73–79. <https://doi.org/10.5923/j.food.20140403.03>
- Atalar, I., Gul, O., Saricaoglu, F. T., Besir, A., Gul, L. B., & Yazici, F. (2019). Influence of thermosonication (TS) process on the quality parameters of high pressure homogenized hazelnut milk from hazelnut oil by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1405–1415. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03619-7/TABLES/5>
- Bahanla Oboulbiga, E., Douamba, Z., Compaoré-Séréme, D., Semporé, J. N., Dabo, R., Semde, Z., Wend-Bénédo Tapsoba, F., Hama-Ba, F., Songré-Ouattara, L. T., Parkouda, C., & Dicko, M. H. (2023). Physicochemical, potential nutritional, antioxidant and health properties of sesame seed oil: a review. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1127926>
- Bardakçi, M. S., & Karacabey, E. (2023). Drying of Tarhana dough by Refractance Window™ technology under vacuum/atmospheric conditions: Characterization of physical and quality parameters. *Food Science & Nutrition*, 12(2), 971. <https://doi.org/10.1002/FSN3.3811>

- Ben-Othman, S., Bleive, U., Kaldmäe, H., Aluvee, A., Rätsep, R., Sats, A., Pap, N., Järvenpää, E., & Rinken, T. (n.d.). Characterization of Plant based spray dried powders using oil seed proteins and chokeberry extract from wine byproduct. Nature.ComS Ben-Othman, U Bleive, H Kaldmäe, A Aluvee, R Rätsep, A Sats, N Pap, E JärvenpääScientific Reports, 2024•nature.Com. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79223-3>
- Berlin, E., Anderson, B. A., & Pallansch, M. J. (1968). Comparison of Water Vapor Sorption by Milk Powder Components. *Journal of Dairy Science*, 51(12), 1912–1915. [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(68\)87311-4](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(68)87311-4)
- Bhandari, Bhesh., Bansal, Nidhi., Zhang, Min., & Schuck, Pierre. (2024). Handbook of food powders : chemistry and technology. https://books.google.com/books/about/Handbook_of_Food_Powders.html?hl=tr&id=fGileAAAQBAJ
- Biberlerin kurutulmasında kalite özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla ultrason destekli vakum kurutma yönteminin uygulanması. (n.d.). Retrieved November 25, 2025, from <https://9lib.net/document/ozlgx7ly-biberlerin-kurutulmasinda-oezelliklerinin-iyilestirilmesi-amaciyla-ultrason-yoenteminin-uygulanmasi.html>
- Bocker, R., Foods, E. S.-F., & 2022, undefined. (n.d.). Innovative technologies for manufacturing plant-based non-dairy alternative milk and their impact on nutritional, sensory and safety aspects. Elsevier. Retrieved January 6, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666833521000885>
- Bucur, M. P., Radulescu, M. C., Radu, G. L., & Bucur, B. (2023). Cavitation-Effect-Based Treatments and Extractions for Superior Fruit and Milk Valorisation. *Molecules*, 28(12), 4677. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28124677>
- Bulut, H., Eren, Ö., San, M., & Tic, A. Ş. (2016). The designing and experimental analysis of a freeze drying system assisted with heat pump. 13.
- Burgain, J., Petit, J., Scher, J., Rasch, R., Bhandari, B., & Gaiani, C. (2017). Surface chemistry and microscopy of food powders. *Progress in Surface Science*, 92(4), 409–429. <https://doi.org/10.1016/J.PROGSURF.2017.07.002>
- Campbell, H. R., Alsharif, F. M., Marsac, P. J., & Lodder, R. A. (2020). The Development of a Novel Pharmaceutical Formulation of D-Tagatose for Spray-Drying. *Journal of Pharmaceutical Innovation*, 17(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12247-020-09507-4>
- Castaño Peláez, H. I., Cortés-Rodríguez, M., & Ortega-Toro, R. (2023). Storage stability of a fluidized-bed agglomerated spray-dried strawberry powder mixture. *F1000Research*, 12. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.138509.1/DOI>
- Çevik, k., alaşalvar, h., çam, m., & yalçın, h. (2021). Keten tohumu yağı ve yağsız süt tozu içeren emülsiyonların püskürterek kurutma ile enkapsülasyonu: yağ oranı ve kurutma sıcaklığının etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(3), 735–742. <https://doi.org/10.21923/JESD.830668>
- Çevik, k., alaşalvar, h., çam, m., & yalçın, h. (2023). Keten Tohumu Yağı Ve Yağsız Süt Tozu İçeren Emülsiyonların Püskürterek Kurutma İle Enkapsülasyonu: Yağ Oranı Ve Kurutma Sıcaklığının Etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(3), 735–742. <https://doi.org/10.21923/JESD.830668>

- Chapter 4. Oilseeds and oilseed products. (n.d.). <https://doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>
- Chauhan, A. K., & Patil, V. (2013). Effect of packaging material on storage ability of mango milk powder and the quality of reconstituted mango milk drink. *Powder Technology*, 239, 86–93. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2013.01.055>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2016.06.035>
- chemistry, J. C.-E. of analytical, & 2000, undefined. (2000). Interpretation of infrared spectra, a practical approach. *Researchgate.NetJ CoatesEncyclopedia of Analytical Chemistry*, 2000•researchgate.Net, 10815–10837. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5606>
- Cheng, H., Erichsen, H., Soerensen, J., Petersen, M. A., & Skibsted, L. H. (2019). Optimising water activity for storage of high lipid and high protein infant formula milk powder using multivariate analysis. *International Dairy Journal*, 93, 92–98. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2019.02.008>
- Çiçek, Ö., Yücedağ, C., Sipahi, H., & Kuşvuran, Ş. (n.d.). *Tıbbi ve aromatik bitkilerin bir olgunlaşma süresi*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/profile/Mehmet-Yelsiz/publication/387961865_SUSAM_Sesamum_indicum_L_-_2024_-_tıbbi-ve-aromatik-bitkiler-e-bir-kesif-yolculugu/links/678516cff8b7bf1abcb7206c/susam-sesamum-indicum-l-2024-tıbbi-ve-aromatik-bitkilere-bir-kesif-yolculugu.pdf
- Collard, K. M., & McCormick, D. P. (2021). A Nutritional Comparison of Cow's Milk and Alternative Milk Products. *Academic Pediatrics*, 21(6), 1067–1069. <https://doi.org/10.1016/j.acap.2020.12.007>
- COSMAS, W. (2019). A Study of Continuous Monocropping Obstacles of Sesame (*Sesamum indicum* L.) for Sustainable Production on Upland Field Converted Paddy. <https://ci.nii.ac.jp/naid/500001361704/>
- Craig, W. J., Brothers, C. J., & Mangels, R. (2021). Nutritional Content and Health Profile of Single-Serve Non-Dairy Plant-Based Beverages. *Nutrients*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/NU14010162>
- Cruz, N., Capellas, M., Jaramillo, D., ... A. T.-F., & 2009, undefined. (n.d.). Soymilk treated by ultra high-pressure homogenization: Acid coagulation properties and characteristics of a soy-yogurt product. ElsevierNS Cruz, M Capellas, DP Jaramillo, AJ Trujillo, B Guamis, V FerragutFood Hydrocolloids, 2009•Elsevier. Retrieved January 8, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X08000593>
- Dairy Alternatives Market Growth, Size, Share, Trends. (n.d.). Retrieved August 19, 2025, from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/dairy-alternatives-market-677.html>

- Daryani, D., Pegua, K., & Aryaa, S. S. (2024). Review of plant-based milk analogue: its preparation, nutritional, physicochemical, and organoleptic properties. In *Food Science and Biotechnology* (Vol. 33, Number 5, pp. 1059–1073). The Korean Society of Food Science and Technology. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01482-z>
- Dehnad, D., Jafari, S. M., & Afrasiabi, M. (2016). Influence of drying on functional properties of food biopolymers: From traditional to novel dehydration techniques. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 116–131. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2016.09.002>
- Demesa, A. G., Saavala, S., Pöysä, M., & Koiranen, T. (2024). Overview and Toxicity Assessment of Ultrasound-Assisted Extraction of Natural Ingredients from Plants. *Foods*, 13(19), 3066. <https://doi.org/10.3390/FOODS13193066/S1>
- Deshwal, G. K., Singh, A. K., Kumar, D., & Sharma, H. (2020). Effect of spray and freeze drying on physico-chemical, functional, moisture sorption and morphological characteristics of camel milk powder. *LWT*, 134, 110117. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110117>
- Dhakal, S., Liu, C., Zhang, Y., Roux, K. H., Sathe, S. K., & Balasubramaniam, V. M. (2014). Effect of high pressure processing on the immunoreactivity of almond milk. *Food Research International*, 62, 215–222. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2014.02.021>
- Dharini, M., Anbarasan, R., Jaspın, S., & Mahendran, R. (2023). Cold plasma processing of sesame milk: Changes on physicochemical properties, nutrition, anti-nutritional factors, protein structure and allergenicity. *Applied Food Research*, 3(2), 100352. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2023.100352>
- Dincturk, H. C., Akkuzu, N., Günal-Köro, D., Glu, ~, Can Karaca, A., & Capanoglu, E. (2025). Molecular Insights into Bioactive Interactions Within Protein- and Polysaccharide-Based Colloids: Implications for Stability, Functionality, and Bioavailability. *Foods* 2026, Vol. 15, Page 112, 15(1), 112. <https://doi.org/10.3390/foods15010112>
- Dodds, J. (2013). Techniques to analyse particle size of food powders. *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*, 309–338. <https://doi.org/10.1533/9780857098672.2.309>
- Duarte, C. M., Mota, J., Assunção, R., Martins, C., Ribeiro, A. C., Lima, A., Raymundo, A., Nunes, M. C., Ferreira, R. B., & Sousa, I. (2022). New Alternatives to Milk From Pulses: Chickpea and Lupin Beverages With Improved Digestibility and Potential Bioactivities for Human Health. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.852907>
- Dunkley Dr, J. (2013). Advances in atomisation techniques for the formation of metal powders. *Advances in Powder Metallurgy: Properties, Processing and Applications*, 3–18. <https://doi.org/10.1533/9780857098900.1.3>
- Dünyanın seçili lezzetlerinden; gökova susamı... (n.d.). Retrieved November 28, 2025, from https://mugla.tarimorman.gov.tr/Haber/938/?utm_source=chatgpt.com
- Effect of processing and storage at different temperatures on the physicochemical and minerals content of sesame seeds and tehina | Request PDF. (n.d.). Retrieved

August 29, 2025, from
https://www.researchgate.net/publication/320864702_Effect_of_processing_and_storage_at_different_temperatures_on_the_physicochemical_and_minerals_content_of_sesame_seeds_and_tehina

- El-Bialy, E., Abd-Elkader, M., & Yousef, N. (2020). Non-Dairy Alternative Milk for People with Lactose and Casein Intolerance. *Journal of Food and Dairy Sciences*, 11(12), 347–353. <https://doi.org/10.21608/JFDS.2020.160395>
- Elleuch, M., Besbes, S., Roiseux, O., Blecker, C., & Attia, H. (2007a). Quality characteristics of sesame seeds and by-products. *Food Chemistry*, 103(2), 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.008>
- Elleuch, M., Besbes, S., Roiseux, O., Blecker, C., & Attia, H. (2007b). Quality characteristics of sesame seeds and by-products. *Food Chemistry*, 103(2), 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.09.008>
- Erbay, B., Küçüköner, E., & Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, S. (2008). Gıda Kongresi; 21-23 Mayıs.
- Ermiş, E. (2015). Gıda tozları: özellikleri ve karakterizasyonu. *The Journal of Food*, 40(5), 287–294. <https://doi.org/10.15237/gida.GD14072>
- Esfandiary, R., Gattu, S. K., Stewart, J. M., & Patel, S. M. (2016). Effect of Freezing on Lyophilization Process Performance and Drug Product Cake Appearance. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 105(4), 1427–1433. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2016.02.003>
- Fang, Y., Rogers, S., Selomulya, C., & Chen, X. D. (2012). Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature. *Biochemical Engineering Journal*, 62, 101–105. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2011.05.007>
- FAO. (2024). FAOSTAT; Crops and livestock products; Sesame seed - Sesame oil. Erişim adresi: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> - Yahoo Turkey Arama Sonuçları. (n.d.). Retrieved February 13, 2025, from [https://tr.search.yahoo.com/search?fr=mcafee&type=E210TR885G0&p=FAO.+\(2024\).+FAOSTAT%3B+Crops+and+livestock+products%3B+Sesame+seed+-+Sesame+oil.+Eri%C5%9Fim+adresini%3A+https%3A%2F%2Fwww.fao.org%2Ffaostat%2Fen%2F%23data%2FQCL](https://tr.search.yahoo.com/search?fr=mcafee&type=E210TR885G0&p=FAO.+(2024).+FAOSTAT%3B+Crops+and+livestock+products%3B+Sesame+seed+-+Sesame+oil.+Eri%C5%9Fim+adresini%3A+https%3A%2F%2Fwww.fao.org%2Ffaostat%2Fen%2F%23data%2FQCL)
- Farida, A. (2021). Oil Extraction from Two Species of Sesame (*Sesamum Indicum*) and the Chemical Composition of the Meal. *Modern Concepts & Developments in Agronomy*, 8(5). <https://doi.org/10.31031/MCDA.2021.08.000698>
- Favaro-Trindade, C. S., Santana, A. S., Monterrey-Quintero, E. S., Trindade, M. A., & Netto, F. M. (2010). The use of spray drying technology to reduce bitter taste of casein hydrolysate. *Food Hydrocolloids*, 24(4), 336–340. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2009.10.012>
- Fernandes, R. V. de B., Borges, S. V., Botrel, D. A., & Oliveira, C. R. de. (2014). Physical and chemical properties of encapsulated rosemary essential oil by spray drying using whey protein-inulin blends as carriers. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(6), 1522–1529. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12449>;website:website:ifst;page:string:article/chapter

- Fitrotin, U., Utami, T., Hastuti, P., of, U. S.-I. R. J., & 2015, undefined. (2015). Antioxidant properties of fermented sesame milk using *Lactobacillus plantarum* Dad 13. *Isca.MeU Fitrotin, T Utami, P Hastuti, U Santoso International Research Journal of Biological Sciences*, 2015•isca.Me, 4(6), 56–61. <https://www.isca.me/IJBS/Archive/v4/i6/11.ISCA-IRJBS-2015-068.pdf>
- Fluida. (n.d.). Retrieved August 29, 2025, from <https://jurnal.polban.ac.id/kimia>
- Food Powders. (2005). Food Powders. <https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0>
- Fukuda, M., Kobayashi, M., & Honda, Y. (2017). Functional Components and Health Benefits of Fermented Soymilk. *Soft Chemistry and Food Fermentation*, 145–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811412-4.00006-0>
- Gaidhani, K. A., Harwalkar, M., Bhambere, D., & Nirgude, P. S. (2015). LYOPHILIZATION / FREEZE DRYING-A REVIEW. Kunal et al. *World Journal of Pharmaceutical Research World Journal of Pharmaceutical Research SJIF Impact Factor 5, 4(8), 517. www.wjpr.net*
- Gıda, A., Burçin Himmetağaoğlu, A., Erbay, Z., Çam, M., Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, A., Bilimleri Enstitüsü, F., ve Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı, N., ve Doğa Bilimleri Fakültesi, M., Mühendisliği Bölümü, G., Üniversitesi, E., & Fakültesi, M. (2019). Süt Yağının Toza Dönüştürülmesi ve Krema Tozu. *Akademik Gıda*, 17(1), 72–80. <https://doi.org/10.24323/AKADEMIK-GIDA.544661>
- Gıda, A., Özpolat, M., Reis Akkaya, M., Bakaçhan Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Y., Fakültesi, M., & Mühendisliği Bölümü, G. (2021). Altın (Gökova) Susamın (*Sesamum indicum* L.) Bazı Tohum ve Yağ Özellikleri. *Akademik Gıda*, 19(3), 300–308. <https://doi.org/10.24323/AKADEMIK-GIDA.1011226>
- Goh, H. P., Heng, P. W. S., & Liew, C. V. (2018). Comparative evaluation of powder flow parameters with reference to particle size and shape. *International Journal of Pharmaceutics*, 547(1–2), 133–141. <https://doi.org/10.1016/J.IJPHARM.2018.05.059>
- Gör Emir Gamze VATANDOST, Ö., Okan Üniversitesi, İ., Bilimler Fakültesi, U., Üyesi Ecem İNCE KARAÇEPER, Ö., Kent Üniversitesi, İ., & ve Tasarım Fakültesi, S. (2024). Gastronomi Çalışmalarında Alternatif Reçete Geliştirme: Vegan, Vejetaryen ve Laktozsuz Panna Cotta. *Sobibder.OrgEG Vatandost, Eİ*
- Karaçepersosyal, Beşeri ve İdari Bilimler Dergisi, 2024•sobibder.Org, 7(1), 31–42. <https://doi.org/10.26677/TR1010.2024.1361>
- Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G. (2010). A new technique for spray drying orange juice concentrate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(2), 342–351. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2009.12.001>
- Gul, O., Atalar, I., Saricaoglu, F. T., & Yazici, F. (2018). Effect of multi-pass high pressure homogenization on physicochemical properties of hazelnut milk from hazelnut cake: An investigation by response surface methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(5). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13615>

- Gul, O., Saricaoglu, F. T., Atalar, I., Gul, L. B., Tornuk, F., & Simsek, S. (2023). Structural Characterization, Technofunctional and Rheological Properties of Sesame Proteins Treated by High-Intensity Ultrasound. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 1791, 12(9), 1791. <https://doi.org/10.3390/FOODS12091791>
- Güner, K. (2017). Fındık hammaddesinden püskürtmeli kurutma ve dondurarak kurutma yöntemleri ile fındık sütü tozu eldesi ve karakterizasyonu. <http://openaccess.izu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12436/459>
- Haas, R., Schnepps, A., Pichler, A., Sustainability, O. M.-, & 2019, undefined. (2019). Cow milk versus plant-based milk substitutes: A comparison of product image and motivational structure of consumption. *Mdpi.ComR Haas, A Schnepps, A Pichler, O MeixnerSustainability, 2019•mdpi.Com.* <https://doi.org/10.3390/su11185046>
- Haldar, L., & Gandhi, D. N. (2020). Development of vacuum-dried probiotic milk powder with *Bacillus coagulans*. *International Journal of Dairy Technology*, 73(1), 283–291. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12671>
- Hamioud, A., Benmeziane, F., & Djermoune-Arkoub, L. (2025). Chickpea milk: nutritional profile, functional characteristics, bioactive compounds, and quality enhancement: A comprehensive review. *Food and Feed Research*, (00), 66–66. <https://doi.org/10.5937/ffr0-53776>
- Haque, E., Bhandari, B. R., Gidley, M. J., Deeth, H. C., Møller, S. M., & Whittaker, A. K. (2010). Protein Conformational Modifications and Kinetics of Water–Protein Interactions in Milk Protein Concentrate Powder upon Aging: Effect on Solubility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(13), 7748–7755. <https://doi.org/10.1021/jf1007055>
- Hardy, Z., & Bellville, V. A. J. (2016). Functional and nutritional characteristics of bambara groundnut milk powder as an ingredient in yoghurt.
- Herrera-Ponce, A. L., Salmeron-Ochoa, I., Rodriguez-Figueroa, J. C., Santellano-Estrada, E., Garcia-Galicia, I. A., & Alarcon-Rojo, A. D. (2022). High-intensity ultrasound as pre-treatment in the development of fermented whey and oat beverages: effect on the fermentation, antioxidant activity and consumer acceptance. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 796–804. <https://doi.org/10.1007/S13197-021-05074-9/FIGURES/2>
- Hu, C., Xiong, Z., Xiong, H., Chen, L., Zhang, M., Wang, P., Nawaz, A., & Walayat, N. (2020). Effects of granule size on physicochemical and digestive properties of potato powder. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(10), 4005–4011. <https://doi.org/10.1002/JSFA.10445>
- Huang, F., Guo, Y., Zhang, R., Yi, Y., Deng, Y., Su, D., & Zhang, M. (2014). Effects of Drying Methods on Physicochemical and Immunomodulatory Properties of Polysaccharide-Protein Complexes from Litchi Pulp. *Molecules* 2014, Vol. 19, Pages 12760–12776, 19(8), 12760–12776. <https://doi.org/10.3390/molecules190812760>
- Hwang, I. S. (2005). Sesame oil. in F. Shahidi (ed.), *Bailey's industrial oil and fat products* (6th ed., pp. 538–577). John Wiley and Sons

- Iorio, M. C., Bevilacqua, A., Corbo, M. R., Campaniello, D., Sinigaglia, M., & Altieri, C. (2019). A case study on the use of ultrasound for the inhibition of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in almond milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 477–483. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.026>
- Ismail, M. M. (2016). Chemical Composition, Sensory Evaluation and Starter Activity in Cow, Soy, Peanut and Rice Milk. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 5(3). <https://doi.org/10.15406/JNHFE.2016.05.00175>
- Issara, U., & Rawdkuen, S. (n.d.). Organic rice bran milk: production and its natural quality attributes. Retrieved <https://www.researchgate.net/publication/303736231>
- Jafari, S. M., Ghalegi Ghalenoei, M., & Dehnad, D. (2017a). Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder Technology*, 311, 59–65. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2017.01.070>
- Jafari, S. M., Ghalegi Ghalenoei, M., & Dehnad, D. (2017b). Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder Technology*, 311, 59–65. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2017.01.070>
- Janiszewska, E. (2014). Microencapsulated beetroot juice as a potential source of betalain. *Powder Technology*, 264, 190–196. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2014.05.032>
- Jaya, S., & Das, H. (2004). Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. *Journal of Food Engineering*, 63(2), 125–134. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00135-3)
- Jaya, S., & Das, H. (2004). Effect of maltodextrin, glycerol monostearate and tricalcium phosphate on vacuum dried mango powder properties. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00135-3)
- Jemaa, M. Ben, Gamra, R., Falleh, H., Ksour, R., & Beji, R. S. (2021). Plant-Based Milk Alternative: Nutritional Profiling, Physical Characterization and Sensorial Assessment. *Current Perspectives on Medicinal and Aromatic Plants*, 4(2), 108–120. <https://doi.org/10.38093/CUPMAP.1037118>
- Jimoh, W., ... O. F.-E. J. of, & 2011, undefined. (n.d.). Effect of processing on some minerals, anti-nutrients and nutritional composition of sesame (*Sesamum indicum*) seed meals. Researchgate.NetWA Jimoh, OA Fagbenro, EO Adeparusi Electronic Journal of Environmental, Agricultural & Food Chemistry, 2011•researchgate.Net. Retrieved August 13, 2025, from
- Juarez-Enriquez, E., Olivas, G. I., Zamudio-Flores, P. B., Ortega-Rivas, E., Perez-Vega, S., & Sepulveda, D. R. (2017). Effect of water content on the flowability of hygroscopic powders. *Journal of Food Engineering*, 205, 12–17. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2017.02.024>
- Jurevičiūtė, I., Keršienė, M., Bašinskienė, L., Leskauskaitė, D., & Jasutienė, I. (2022). Characterization of Berry Pomace Powders as Dietary Fiber-Rich Food Ingredients with Functional Properties. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 716, 11(5), 716. <https://doi.org/10.3390/FOODS11050716>

- Kaur, M., Oberoi, D. P. S., Sogi, D. S., & Gill, B. S. (2010). Physicochemical, morphological and pasting properties of acid treated starches from different botanical sources. *Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 460. <https://doi.org/10.1007/S13197-010-0126-X>
- Kim, Y., Kim, J., Kim, S., Kim, M. Y., & Kim, Y. (2024). Lignan Content and Antioxidant Capacity of Eight Sesame Varieties Cultivated in Korea. *Preventive Nutrition and Food Science*, 29(4), 563. <https://doi.org/10.3746/PNF.2024.29.4.563>
- Kishor, K. (2017). Nutritional Composition of Chickpea (*Cicer arietinum*) Milk. <https://www.researchgate.net/publication/325809360>
- Kizzie-Hayford, N., Jaros, D., Zahn, S., LWT, H. R., & 2016, undefined. (n.d.). Effects of protein enrichment on the microbiological, physicochemical and sensory properties of fermented tiger nut milk. ElsevierN Kizzie-Hayford, D Jaros, S Zahn, H RohmLWT, 2016•Elsevier. Retrieved January 14, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643816304789>
- Kizzie-Hayford, N., Jaros, D., Zahn, S., & Rohm, H. (2016). Effects of protein enrichment on the microbiological, physicochemical and sensory properties of fermented tiger nut milk. *LWT*, 74, 319–324. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2016.07.067>
- Kurt, C. (2024). Susamın (*Sesamum indicum*) Sağlık Üzerine Bazı Etkileri. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 12(7), 1231–1237. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v12i7.1231-1237.6241>
- Lavrentev, F. V., Baranovskaia, D. A., Shiriaev, V. A., Fomicheva, D. A., Iatsenko, V. A., Ivanov, M. S., Ashikhmina, M. S., Morozova, O. V., & Iakovchenko, N. V. (2024). Influence of pre-treatment methods on quality indicators and mineral composition of plant milk from different sources of raw materials. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(2), 967–978. <https://doi.org/10.1002/JSFA.12992>
- Lee, J. H., Won, D. J., Kim, H. W., & Park, H. J. (2019). Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials. *Journal of Food Engineering*, 256, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2019.03.014>
- Leite, A. C. N., Cavalcante, J. de A., Costa, N. A., Pinheiro, W. S., & Silva, P. B. da. (2024). Characterization and Hygroscopic Behavior of *Mentha crispa* Powder Obtained by Foam-Mat Drying. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(10), e08951. <https://doi.org/10.24857/RGSA.V18N10-206>
- Liapis, A. I., & Bruttini, R. (2020). Freeze Drying. *Handbook of Industrial Drying*, 309–343. <https://doi.org/10.1201/9780429289774-10>
- Lin, X., Zhou, L., Li, T., Brennan, C., Fu, X., & Liu, R. H. (2017). Phenolic content, antioxidant and antiproliferative activities of six varieties of white sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). *RSC Advances*, 7(10), 5751–5758. <https://doi.org/10.1039/C6RA26596K>
- López-Calabozo, R., Martínez-Martín, I., Rodríguez-Fernández, M., Absi, Y., Vivar-Quintana, A. M., & Revilla, I. (2025). The Influence of the Nutritional and

- Mineral Composition of Vegetable Protein Concentrates on Their Functional Properties. *Foods* 2025, Vol. 14, Page 509, 14(3), 509. <https://doi.org/10.3390/FOODS14030509>
- Madhu, B., Srinivas, M., ... G. S.-C. J. of, & 2019, undefined. (2019). Ultrasonic technology and its applications in quality control, processing and preservation of food: A review. *Ebooks.Manu2sent.Com* B Madhu, MS Srinivas, G Srinivas, SK Jain *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2019•ebooks.Manu2sent.Com, 32(5), 1–11. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2019/46909>
- Maghsoudlou, Y., Alami, M., Mashkour, M., & Shahraki, M. H. (2016). Optimization of Ultrasound-Assisted Stabilization and Formulation of Almond Milk. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(5), 828–839. <https://doi.org/10.1111/JFPP.12661>
- Majdalawieh, A. F., & Mansour, Z. R. (2019). Sesamol, a major lignan in sesame seeds (*Sesamum indicum*): Anti-cancer properties and mechanisms of action. *European Journal of Pharmacology*, 855, 75–89. <https://doi.org/10.1016/J.EJPHAR.2019.05.008>
- Makalesi, D., Dedebaş, T., Dursun Çapar, T., Ekici, L., & Yalçın, H. (2021). Yağlı Tohumlarda Ultrasonik Destekli Ekstraksiyon Yöntemi ve Avantajları. *European Journal of Science and Technology*, (21), 313–322. <https://doi.org/10.31590/ejosat.759702>
- Mäkinen, O. E., Wanhalinna, V., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2016). Foods for Special Dietary Needs: Non-dairy Plant-based Milk Substitutes and Fermented Dairy-type Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 339–349. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.761950>
- Mardani, M., Siahtiri, S., Besati, M., Baghani, M., Baniassadi, M., & Nejad, A. M. (2024). Microencapsulation of natural products using spray drying: An overview. *Journal of Microencapsulation*, 41(7), 649–678. <https://doi.org/10.1080/02652048.2024.2389136>
- Mariano, M. (2024). General aspects of powder rheology applied to pharmaceutical formulations. *Drug Discovery Today*, 29(5), 103976. <https://doi.org/10.1016/J.DRUDIS.2024.103976>
- Market Study on Plant-based Milk Powder: Challenges in milk preservation for vegans to boost the demand. (n.d.). Retrieved February 16, 2025, from <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/plant-based-milk-powder-market.asp>
- Méndez, R., Balanzá-Martínez, V., Luperdi, S. C., Estrada, I., Latorre, A., González-Jiménez, P., Feced, L., Bouzas, L., Yépez, K., Ferrando, A., Hervás, D., Zaldívar, E., Reyes, S., Berk, M., & Menéndez, R. (2021). Short-term neuropsychiatric outcomes and quality of life in COVID-19 survivors. *Wiley Online Library* R Méndez, V Balanzá-Martínez, SC Luperdi, I Estrada, A Latorre, P González-Jiménez *Journal of Internal Medicine*, 2021•Wiley Online Library, 290(3), 621–631. <https://doi.org/10.1111/JOIM.13262>

- Methakhup, S., Chiewchan, N., and, S. D.-L.-F. S., & 2005, undefined. (n.d.). Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. ElsevierS Methakhup, N Chiewchan, S DevahastinLWT-Food Science and Technology, 2005•Elsevier. Retrieved March 7, 2025, from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364380400235X?casa_to ken=vODUFyECB50AAAAA:13WA3A1Kh1IpUmFqpuriI66vt2GP6hKyX_b0YMWH0qZUYfzMLBZFAlRpkAyjmq9VyNUXDGF_m9Y3
- Moazzami, A. A., & Kamal-Eldin, A. (2006). Sesame seed is a rich source of dietary lignans. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 83(8), 719–723. <https://doi.org/10.1007/S11746-006-5029-7>
- Mohamed Ahmed, I. A., Aljuhaimi, F., Özcan, M. M., Ghafoor, K., Şimşek, Ş., Babiker, E. E., Osman, M. A., Gasseem, M. A., & Salih, H. A. A. (2020). Evaluation of Chemical Properties, Amino Acid Contents and Fatty Acid Compositions of Sesame Seed Provided from Different Locations. *Journal of Oleo Science*, 69(8), 795–800. <https://doi.org/10.5650/JOS.ESS20041>
- Mohdaly, A. A. A., Smetanska, I., Ramadan, M. F., Sarhan, M. A., & Mahmoud, A. (2011). Antioxidant potential of sesame (*Sesamum indicum*) cake extract in stabilization of sunflower and soybean oils. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 952–959. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2011.02.018>
- Morales-de la Peña, M., Martín-Belloso, O., & Welti-Chanes, J. (2018). High-power ultrasound as pre-treatment in different stages of soymilk manufacturing process to increase the isoflavone content. *Ultrasonics Sonochemistry*, 49, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.044>
- Morsy, N. E., Rayan, A. M., & Youssef, K. M. (2015). Physico Chemical Properties, Antioxidant Activity, Phytochemicals and Sensory Evaluation of Rice-Based Extrudates Containing Dried *Corchorus olitorius* l. Leaves. *J Food Process Technol*, 6, 408. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000408>
- Mortensen, A. B., Wallin, H., Appelqvist, L. A., Everitt, G., Gref, C. G., Jacobsen, J., Jensen, K., Jepsen, O. M., Johansen, I. L., & Julshamn, K. (1989). Gravimetric Determination of Ash in Foods: NMKL Collaborative Study. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 72(3), 481–483. <https://doi.org/10.1093/JAOAC/72.3.481>
- Mostashari, P., Foods, A. M. K.-, & 2024, undefined. (2024). Sesame Seeds: A Nutrient-Rich Superfood. *Mdpi.Com*, 13, 1153. <https://doi.org/10.3390/foods13081153>
- Mostashari, P., & Mousavi Khaneghah, A. (2024). Sesame Seeds: A Nutrient-Rich Superfood. *Foods* 2024, Vol. 13, Page 1153, 13(8), 1153. <https://doi.org/10.3390/FOODS13081153>
- Munekata, P. E. S., Domínguez, R., Budaraju, S., Roselló-Soto, E., Barba, F. J., Mallikarjunan, K., Roohinejad, S., & Lorenzo, J. M. (n.d.). Effect of innovative food processing technologies on the physicochemical and nutritional properties and quality of non-dairy plant-based beverages. *Mdpi.ComPES* Munekata, R Domínguez, S Budaraju, E Roselló-Soto, FJ Barba, K MallikarjunanFoods, 2020•mdpi.Com. <https://doi.org/10.3390/foods9030288>

- Mutlu, C., Korkmaz, F., Üniversitesi, B., Fakültesi, M., Bölümü, G. M., & Geliş, T. (2023). Ultrasonikasyon ve soksalet yöntemleriyle ekstrakte edilen ketencik tohum yağlarının oksidatif özelliklerinin belirlenmesi. *Gıda*, 48(3), 627–640. <https://doi.org/10.15237/GIDA.GD23020>
- Naqvi, S. N., Liaquat, M., Kazmi, A., Sammi, S., Ali, A., Luna-Arias, J. P., & Sherzad, I. U. (2024). Sesame-enriched delights: A comparative exploration of physicochemical and sensory attributes in fine and whole wheat flour cookies. *Food Science & Nutrition*, 12(10), 7751–7765. <https://doi.org/10.1002/FSN3.4343>
- Nayak, C. M., Ramachandra, C. T., Nidoni, U., Hiregoudar, S., Ram, J., & Naik, N. M. (2022). Influence of processing conditions on quality of Indian small grey donkey milk powder by spray drying. SpringerCM Nayak, CT Ramachandra, U Nidoni, S Hiregoudar, J Ram, NM Naik *Journal of Food Science and Technology*, 2022•Springer, 59(8), 3266–3273. <https://doi.org/10.1007/S13197-021-05340-W>
- Naylor, B. M. (2021). Production and physicochemical characteristics of hemp-milk.
- Nisoa, M., Wattanasit, K., Tamman, A., Sirisathitkul, Y., & Sirisathitkul, C. (2021). Microwave drying for production of rehydrated foods: A case study of stink bean (*parkia speciosa*) seed. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/APP11072918>
- Nugroho, R. W. N., Outinen, M., Toikkanen, O., & Rojas, O. J. (2021). Particle size and fat encapsulation define the colloidal dispersibility and reconstitution of growing-up milk powder. *Powder Technology*, 391, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.008>
- Nurhad, B., Andoyo, R., Mahani, & Indarto, R. (2012). Study the properties of honey powder produced from spray drying and vacuum drying method. *International Food Research Journal*, 19(3), 907–912. <https://openurl.ebsco.com/contentitem/obo:154917989?sid=ebsco:plink:crawler&id=ebsco:obo:154917989&crl=c>
- O'Donoghue, L. T., Haque, M. K., Kennedy, D., Laffir, F. R., Hogan, S. A., O'Mahony, J. A., & Murphy, E. G. (2019). Influence of particle size on the physicochemical properties and stickiness of dairy powders. *International Dairy Journal*, 98, 54–63. <https://doi.org/10.1016/J.IDAIRYJ.2019.07.002>
- Oikonomou, N. A., & Krokida, M. K. (2012). Water Absorption Index and Water Solubility Index Prediction for Extruded Food Products. *International Journal of Food Properties*, 15(1), 157–168. <https://doi.org/10.1080/10942911003754718>
- Ozkan, G., Franco, P., Marco, I. De, Xiao, J., chemistry, E. C.-F., & 2019, undefined. (n.d.). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. ElsevierG Ozkan, P Franco, I De Marco, J Xiao, E Capanoglu *Food Chemistry*, 2019•Elsevier. Retrieved March 8, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814618313669>
- Özdemir, E., Görgüç, A., & Gençdağ, E. (2021). Püskürtmeli kurutma ve dondurarak kurutma yöntemlerinin temelleri ve bu yöntemler ile gıda atıklarından toz ürünlerin üretimi. *Gıda: The Journal of Food*, 46(3), 583–607. <https://doi.org/10.15237/gida.GD21009>

- Özkan Güner, K. (n.d.). Fen bilimleri enstitüsü gıda mühendisliği anabilim dalı gıda mühendisliği programı fındık hammaddesinden püskürtmeli kurutma ve dondurarak kurutma yöntemleri ile fındık sütü tozu eldesi ve karakterizasyonu yüksek lisans tezi.
- Pasten, A., Vega-Galvez, A., Uribe, E., Carvajal, M., Mejías, N., Araya, M., & Goñi, M. G. (2024). A Comparison of the Effects of Low-Temperature Vacuum Drying and Other Methods on Cauliflower's Nutritional–Functional Properties. *Processes* 2024, Vol. 12, Page 1629, 12(8), 1629. <https://doi.org/10.3390/PR12081629>
- Pathak, N., Rai, A., Kumari, R., reviews, K. B.-P., & 2014, undefined. (n.d.). Value addition in sesame: A perspective on bioactive components for enhancing utility and profitability. *Ncbi.Nlm.Nih.GovN Pathak, AK Rai, R Kumari, KV BhatPharmacognosy Reviews*, 2014•*ncbi.Nlm.Nih.Gov*. Retrieved January 5, 2025, from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4127822/>
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36–60. <https://doi.org/10.1007/S11947-012-0867-9>
- Patil, G., Mian, R., Vuong, · Tri, Pantalone, V., Song, Q., Chen, · Pengyin, Grover, ·, Shannon, J., Carter, T. C., Henry, ·, & Nguyen, T. (2017). Molecular mapping and genomics of soybean seed protein: a review and perspective for the future. *SpringerG Patil, R Mian, T Vuong, V Pantalone, Q Song, P Chen, GJ Shannon, TC CarterTheoretical and Applied Genetics*, 2017•*Springer*, 130(10), 1975–1991. <https://doi.org/10.1007/s00122-017-2955-8>
- (PDF) Drying and Denaturation of Proteins in Spray Drying Process. (n.d.). Retrieved November 28, 2025, from https://www.researchgate.net/publication/275100415_Drying_and_Denaturation_of_Proteins_in_Spray_Drying_Process
- (PDF) Effect of processing on some minerals, anti-nutrients and nutritional composition of sesame (*Sesamum indicum*) seed meals. (n.d.). Retrieved February 11, 2025, from https://www.researchgate.net/publication/287635439_Effect_of_processing_on_some_minerals_anti-nutrients_and_nutritional_composition_of_sesame_Sesamum_indicum_seed_meals
- (PDF) Evaluation of the parameters affecting the extraction of sesame oil from sesame (*Sesamum indicum* L.) seed using soxhlet apparatus. (n.d.). Retrieved November 22, 2025, from https://www.researchgate.net/publication/317932905_Evaluation_of_the_parameters_affecting_the_extraction_of_sesame_oil_from_sesame_Sesamum_indicum_L_seed_using_soxhlet_apparatus
- Pimentel, T., Moura, A., Cardoso De Aquino, A., Rodrigues, S., Rodrigues, M., & Afonso, A. (2024). Brasília, v.59, e03503, 2024 Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.59, e03503. *Pesq. Agropec. Bras.* <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2024.v59.03503>

- Poliseli-Scopel, F. H., Hernández-Herrero, M., Guamis, B., & Ferragut, V. (2012). Comparison of ultra high pressure homogenization and conventional thermal treatments on the microbiological, physical and chemical quality of soymilk. *LWT - Food Science and Technology*, 46(1), 42–48. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2011.11.004>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science.Org*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.AAQ0216>
- Power, O. M., Maidannyk, V., McSweeney, D. J., Fenelon, M. A., O'Mahony, J. A., & McCarthy, N. A. (2020). Water sorption and hydration properties of high protein milk powders are influenced by enzymatic crosslinking and calcium chelation. *Powder Technology*, 364, 680–688. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2020.01.075>
- Provent, B., Chulia, D., of, J. C.-E. J., & 1993, undefined. (n.d.). Particle size and the caking tendency of a powder. *Pascal-Francis.Inist.Fr*. Retrieved March 10, 2025, from <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=4023770>
- Püskürtmeli Kurutucu. (n.d.). Retrieved March 8, 2025, from https://www.kinemak.com.tr/urunlerimiz/sut-tozu-pas-ve-gida-end%C3%BCstrisi-makinalari/puskurtmeli-kurutucu.html?utm_source
- Quirino, D. F., Lima, N. S. A., Palma, M. N. N., Franco, M. O., & Detmann, E. (2023). Evaluation of Heating Times for Loss on Drying at 105°C for Estimation of Laboratory Dry Matter in Animal Feeds. *Journal of AOAC international*, 106(2), 261–266. <https://doi.org/10.1093/jaoacint/QSAD004>
- Rababah, T. M., Al-Mahasneh, M. A., Kilani, I., Yang, W., Alhamad, M. N., Ereifej, K., & Al-u'datt, M. (2011). Effect of jam processing and storage on total phenolics, antioxidant activity, and anthocyanins of different fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), 1096–1102. <https://doi.org/10.1002/JSFA.4289>
- Ramsing, R., Santo, R., Kim, B. F., Altema-Johnson, D., Wooden, A., Chang, K. B., Semba, R. D., & Love, D. C. (2023). Dairy and Plant-Based Milks: Implications for Nutrition and Planetary Health. *Current Environmental Health Reports*, 10(3), 291–302. <https://doi.org/10.1007/S40572-023-00400-Z>
- Ransom, T. (2024). Are Vegetable Seed Oils Fueling the Obesity Epidemic? www.iza.org
- Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23(1), 91–105. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90125-2)
- Reyes-Jurado, F., Soto-Reyes, N., Dávila-Rodríguez, M., Lorenzo-Leal, A. C., Jiménez-Munguía, M. T., Mani-López, E., & López-Malo, A. (2023). Plant-Based Milk Alternatives: Types, Processes, Benefits, and Characteristics. *Food Reviews International*, 39(4), 2320–2351. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1952421>
- Rodríguez Arzuaga, M., Abraham, A. G., Ahrné, L., Pérez Montes, M. G., & Añón, M. C. (2022). Spray-Dried Infant Formula Emulsion Stability as Affected by Pre-

- Heat Treatment and Total Solids Content of the Feed. *Foods*, 11(23), 3752. <https://doi.org/10.3390/foods11233752>
- Romulo, A. (2022). Food Processing Technologies Aspects on Plant-Based Milk Manufacturing: Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1059(1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1059/1/012064>
- Roos, Y. H., & Drusch, S. (2016). *Phase transitions in foods*. Academic Press.
- Saad, M., Sadoudi, A., Rondet, E., & Cuq, B. (2011). Morphological characterization of wheat powders, how to characterize the shape of particles? *Journal of Food Engineering*, 102(4), 293–301. <https://doi.org/10.1016/J.jfoodeng.2010.08.020>
- Sadıkoğlu, H., & Özdemir, M. (2003). Dondurarak Kurutma Teknolojisi ve Evreleri. *The Journal of Food*, 28(6). <https://dergipark.org.tr/en/pub/gida/issue/6980/93044>
- Salve, A. R., Pegu, K., & Arya, S. S. (2019). Comparative assessment of high-intensity ultrasound and hydrodynamic cavitation processing on physico-chemical properties and microbial inactivation of peanut milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59, 104728. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2019.104728>
- Samborska, K., Budziak-Wieczorek, I., Matwijczuk, A., Witrowa-Rajchert, D., Gagoś, M., Gładyszewska, B., Karcz, D., Rybak, K., Jaskulski, M., Barańska, A., & Jedlińska, A. (2024a). Powdered plant beverages obtained by spray-drying without carrier addition: Physicochemical and chemometric studies. *Scientific Reports*, 14, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54978-x>
- Samborska, K., Budziak-Wieczorek, I., Matwijczuk, A., Witrowa-Rajchert, D., Gagoś, M., Gładyszewska, B., Karcz, D., Rybak, K., Jaskulski, M., Barańska, A., & Jedlińska, A. (2024b). Powdered plant beverages obtained by spray-drying without carrier addition: Physicochemical and chemometric studies. *Scientific Reports*, 14, 4488. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54978-x>
- Samsu, Z. A., & Zahir, A. Z. M. (2020). Production of oil palm milk powder by spray drying technique. *Materials Today: Proceedings*, 31, 306–312. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.06.015>
- Sandal, A. (2022). Impact of roasting and soaked roasting on sesame seed for nutritional traits Mamta and Anupama Sandal. ~ 508 ~ *The Pharma Innovation Journal*, (8), 508–512. www.thepharmajournal.com
- Saraç, M. G., Aslan Türker, D., & Doğan, M. (2021). Ticari öneme sahip toz süt ürünlerinin morfolojik yapısı ve toz akış özelliklerinin belirlenmesi. *Gıda / The Journal of Food*, 46(1), 119–133. <https://doi.org/10.15237/gida.GD20108>
- Sarangapany, A. K., Murugesan, A., Annamalai, A. S., Balasubramanian, A., & Shanmugam, A. (2022). An overview on ultrasonically treated plant-based milk and its properties – A Review. *Applied Food Research*, 2(2), 100130. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2022.100130>
- Schuck, P., Dolivet, A., ... S. M.-D. S. and, & 2008, undefined. (2008). Relative humidity of outlet air: the key parameter to optimize moisture content and water activity of dairy powders. *Dairy-Journal.Org* P Schuck, A Dolivet, S Méjean, R

- Jeantet Dairy Science and Technology, 2008•dairy-Journal.Org, 88(1), 45–52.
<https://doi.org/10.1051/dst:2007007>
- Schuck, P., le Floch-Fouere, C., & Jeantet, R. (2013). Changes in Functional Properties of Milk Protein Powders: Effects of Vacuum Concentration and Drying. *Drying Technology*, 31(13–14), 1578–1591.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2013.816316>
- Schuck, Pierre., Dolivet, Anne., & Jeantet, Romain. (2012). Analytical methods for food and dairy powders. 228.
https://books.google.com/books/about/Analytical_Methods_for_Food_and_Dairy_Po.html?hl=tr&id=MQrtZsWs5_AC
- Senanayake, S., Gunaratne, A., Ranaweera, K., & Bamunuarachchi, A. (2013). Effect of heat moisture treatment conditions on swelling power and water soluble index of different cultivars of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) starch. *ISRN Agronomy*, 2013, 1–4. <https://doi.org/10.1155/2013/502457>
- Sethi, S., Tyagi, S. K., & Anurag, R. K. (2016). Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 53(9), 3408–3423. <https://doi.org/10.1007/S13197-016-2328-3>
- Shah, D. S., Moravkar, K. K., Jha, D. K., Lonkar, V., Amin, P. D., & Chalikwar, S. S. (2023). A concise summary of powder processing methodologies for flow enhancement. *Heliyon*, 9(6), e16498.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.E16498>
- Shah, R. B., Tawakkul, M. A., & Khan, M. A. (2008). Comparative evaluation of flow for pharmaceutical powders and granules. *AAPS PharmSciTech*, 9(1), 250–258.
<https://doi.org/10.1208/S12249-008-9046-8/FIGURES/9>
- Sharma, A., Jana, A. H., & Chavan, R. S. (2012). Functionality of Milk Powders and Milk-Based Powders for End Use Applications—A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 11(5), 518–528.
<https://doi.org/10.1111/J.1541-4337.2012.00199.X>
- Sharma, L., Saini, C. S., Punia, S., Nain, V., & Sandhu, K. S. (2021). Sesame (*Sesamum indicum*) Seed. *Oilseeds: Health Attributes and Food Applications*, 305–330. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4194-0_12
- Shen, Q., & Quek, S. Y. (2014). Microencapsulation of astaxanthin with blends of milk protein and fiber by spray drying. *Journal of Food Engineering*, 123, 165–171. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2013.09.002>
- Shenoy, P., Viau, M., Tammel, K., Innings, F., Fitzpatrick, J., & Ahrné, L. (2015). Effect of powder densities, particle size and shape on mixture quality of binary food powder mixtures. *Powder Technology*, 272, 165–172.
<https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2014.11.023>
- Shori, A. B., & Al Zahrani, A. J. (2021). Non-dairy plant-based milk products as alternatives to conventional dairy products for delivering probiotics. *Food Science and Technology*, 42, e101321. <https://doi.org/10.1590/FST.101321>
- Shukla, S. (2011). Freeze drying process: a review. 2(12), 3061–3068. www.ijpsr.com

- Silva-Espinoza, M. A., Ayed, C., Foster, T., Camacho, M. M., & Martínez-Navarrete, N. (2019). The impact of freeze-drying conditions on the physico-chemical properties and bioactive compounds of a freeze-dried orange puree. *Foods*, 9(1), 32. <https://doi.org/10.3390/foods9010032>
- Singh, P., Bilyeu, L., & Krishnaswamy, K. (2022). Spray drying process optimization: Drought resistant variety (W82) soymilk powder using response surface methodology (RSM). *LWT*, 166, 113760. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113760>
- Snyder, H. E. (2012). Pharmaceutical spray drying: Solid-dose process technology platform for the 21st century. *Therapeutic Delivery*, 3(7), 901–912. <https://doi.org/10.4155/tde.12.64>
- Suhag, R., Kellil, A., & Razem, M. (2024). Factors Influencing Food Powder Flowability. *Powders*, 3(1), 65–76. <https://doi.org/10.3390/POWDERS3010006>
- İşler, N. (n.d.). *Susam yetiştiriciliği*. M.K.Ü. Ziraat Fakültesi, Tarla Bitkileri Bölümü. <https://ziraat.mku.edu.tr/susam-yetistirciligi>
- Tachie, C., Nwachukwu, I., production, A. A.-F., and, processing, & 2023, undefined. (2023). Trends and innovations in the formulation of plant-based foods. SpringerC Tachie, ID Nwachukwu, ANA AryeeFood Production, Processing and Nutrition, 2023•Springer, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00129-0>
- Tang, Y., Arbaugh, B., Park, H., Scher, H., ... L. B.-J. of drug delivery, & 2023, undefined. (n.d.). Targeting enteric release of therapeutic peptides by encapsulation in complex coacervated matrix microparticles by spray drying. Elsevier. Retrieved March 8, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1773224722009741>
- Teijeiro, M., Pérez, P. F., De Antoni, G. L., & Golowczyc, M. A. (2018). Suitability of kefir powder production using spray drying. *Food Research International*, 112, 169–174. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.06.023>
- Tenyang, N., Ponka, R., Tiencheu, B., Djikeng, F. T., Azmeera, T., Karuna, M. S. L., Prasad, R. B. N., & Womeni, H. M. (2017). Effects of boiling and roasting on proximate composition, lipid oxidation, fatty acid profile and mineral content of two sesame varieties commercialized and consumed in Far-North Region of Cameroon. *Food Chemistry*, 221, 1308–1316. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.025>
- Thakur, A., Morya, S., Alsulami, T., Brennan, C., & Nayik, G. A. (2024a). Optimization of Hemp Seed Milk Production Using Response Surface Methodology: Enhancing Nutritional Quality and Reducing Antinutrients. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/JFPP/6015666>
- Thakur, A., Morya, S., Alsulami, T., Brennan, C., & Nayik, G. A. (2024b). Optimization of Hemp Seed Milk Production Using Response Surface Methodology: Enhancing Nutritional Quality and Reducing Antinutrients. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/jfpp/6015666>

- Thu, T. T., Nguyen, T. A. V., Le, A. T., Dang, N. N., Nguyen, D. C., Nguyen, P. T., Tran, T. T., Nguyen, Q. V., Bach, L. G., Thuy, D. T. B., & Pham, N. T. (2021). Microencapsulation of essential oils by spray-drying and influencing factors. *Journal of Food Quality*, 2021, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2021/5525879>
- Tkacz, K., Wojdyło, A., Michalska-Ciechanowska, A., Turkiewicz, I. P., Lech, K., & Nowicka, P. (2020). Influence Carrier Agents, Drying Methods, Storage Time on Physico-Chemical Properties and Bioactive Potential of Encapsulated Sea Buckthorn Juice Powders. *Molecules* (Basel, Switzerland), 25(17). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES25173801>
- Tonon, R. V., Grosso, C. R. F., & Hubinger, M. D. (2011). Influence of emulsion composition and inlet air temperature on the microencapsulation of flaxseed oil by spray drying. *Food Research International*, 44(1), 282–289. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2010.10.018>
- Tsami, E., Krokida, M., engineering, A. D.-J. of food, & 1998, undefined. (n.d.). Effect of drying method on the sorption characteristics of model fruit powders. ElsevierE Tsami, MK Krokida, AE DrouzasJournal of Food Engineering, 1998•Elsevier. Retrieved March 7, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877498001307>
- Tulashie, S. K., Amenakpor, J., Atisey, S., Odai, R., & Akpari, E. E. A. (2022). Production of coconut milk: A sustainable alternative plant-based milk. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100206. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2022.100206>
- Türkiye’den ve Dünyadan En İyi Susam Çeşitleri. (n.d.). Retrieved February 10, 2025, from https://www.picusfood.com/blog/icerik/turkiyeden-ve-dunyadan-en-iyi-susam-cesitleri?srsitid=AfmBOooOFiIxlSOHDdtFs_oRz7ldV90EKXQbZhMB6KCIYhfjMp6rvTpy&utm_source
- Uwineza, A., & Zhang, X. (2026). Application of Freeze-Drying Technology in the Food Industry: A Review. *Foods* 2026, Vol. 15, Page 790, 15(4), 790. <https://doi.org/10.3390/foods15040790>
- Vallath, A., & Shanmugam, A. (2022). Study on model plant based functional beverage emulsion (non-dairy) using ultrasound – A physicochemical and functional characterization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 88, 106070. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2022.106070>
- Vanga, S. K., & Raghavan, V. (2018). How well do plant based alternatives fare nutritionally compared to cow’s milk? *Journal of Food Science and Technology*, 55(1), 10–20. <https://doi.org/10.1007/S13197-017-2915-Y>
- Vashisht, P., Sharma, A., Awasti, N., Wason, S., Singh, L., Sharma, S., Charles, A. P. R., Sharma, S., Gill, A., & Khattri, A. K. (2024). Comparative review of nutri-functional and sensorial properties, health benefits and environmental impact of dairy (bovine milk) and plant-based milk (soy, almond, and oat milk). *Food and Humanity*, 2, 100301. <https://doi.org/10.1016/J.FOOHUM.2024.100301>
- Vidović, S. S., Vladić, J. Z., Vaštag, Ž. G., Zeković, Z. P., & Popović, L. M. (2014). Maltodextrin as a carrier of health benefit compounds in *Satureja montana* dry

- powder extract obtained by spray drying technique. *Powder Technology*, 258, 209–215. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2014.03.038>
- Wacal, C., Musinguzi, S. P., Ewaju, E., Atibo, C., Alowo, D., Alipa, J., & Basalirwa, D. (2024). Unravelling the potential benefits of sesame (*Sesamum indicum* L.) in cropping systems, nutritional, health, and industrial uses of its seeds – a review. *Cogent Food & Agriculture*, 10(1), 2360766. <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2360766>
- Watson, M. A., Lea, J. M., & Bett-Garber, K. L. (2017). Spray drying of pomegranate juice using maltodextrin/cyclodextrin blends as the wall material. *Food Science and Nutrition*, 5(3), 820–826. <https://doi.org/10.1002/FSN3.467>,
- Wei, L., Wang, B., Bai, J., Zhang, Y., Liu, C., Suo, H., & Wang, C. (2024). Postbiotics are a candidate for new functional foods. *Food Chemistry: X*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101650>
- Wei, P., Zhao, F., Wang, Z., Wang, Q., Chai, X., Hou, G., & Meng, Q. (2022). Sesame (*Sesamum indicum* L.): A Comprehensive Review of Nutritional Value, Phytochemical Composition, Health Benefits, Development of Food, and Industrial Applications. *Nutrients* 2022, Vol. 14, Page 4079, 14(19), 4079. <https://doi.org/10.3390/NU14194079>
- Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Dzah, C. S., Zandile, M., Duan, Y., Ma, H., & Luo, X. (2018a). Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 538–549. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2018.07.018>
- Wen, C., Zhang, J., Zhang, H., Dzah, C. S., Zandile, M., Duan, Y., Ma, H., & Luo, X. (2018b). Advances in ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from cash crops – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.018>
- Wu, S., Fitzpatrick, J., Cronin, K., & Miao, S. (2020). Effect of sodium carbonate on the rehydration of milk protein isolate powder. *Food Hydrocolloids*, 99, 105305. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2019.105305>
- Yaakub, N. Mohd., Zainil, H. Mohd., & Xiang, L. J. (2019). Effect of spray drying temperature differences on the gross nutritional composition and solubility and sinkability of goat milk powder. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 17(2), 206–210. <https://doi.org/10.3329/JBAU.V17I2.41969>
- Yada, S., Lapsley, K., & Huang, G. (2011). A review of composition studies of cultivated almonds: Macronutrients and micronutrients. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(4–5), 469–480. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2011.01.007>
- Yamashita, K., Nohara, Y., Katayama, K., & Namiki, M. (1992). Sesame Seed Lignans and γ -Tocopherol Act Synergistically to Produce Vitamin E Activity in Rats,. *The Journal of Nutrition*, 122(12), 2440–2446. <https://doi.org/10.1093/JN/122.12.2440>
- Yan, C., materials, S. K.-A. applied bio, & 2024, undefined. (2024). Microencapsulation for pharmaceutical applications: a review. *ACS*

- PublicationsC Yan, SR KimACS Applied Bio Materials, 2024•ACS Publications, 7(2), 692–710. <https://doi.org/10.1021/acsabm.3c00776>
- Yazıcı, G. N., Taşpınar, T., Güven, M., & Özer, M. S. (2023). Bitkisel Esaslı Süt Alternatiflerine Genel Bir Bakış. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 11(3), 587–602. <https://doi.org/10.24925/TURJAF.V11I3.587-602.5462>
- Yetişen, M., Baltacıoğlu, C., Boz, D., Ömer, N., Üniversitesi, H., Fakültesi, M., & Bölümü, G. M. (2021). Spray Drying Technique and Its Use in Food Industry. *Journal of Agriculture, Food, Environment and Animal Sciences*, 2(2), 163–189. <https://jafeas.com/index.php/j1/article/view/22>
- Yetişen, M., Baltacıoğlu, C., & Boz, D. (2021). Püskürtmeli kurutma tekniği ve gıda endüstrisinde kullanımı: Gıda işleme teknolojisi. *J. Agric. Food, Environ. Anim. Sci*, 2(2), 163-189. <https://www.researchgate.net/publication/364360440> -
- Yohana, E., Tauviqirrahman, M., Putra, A. R., Diana, A. E., & Choi, K. H. (2018). Numerical analysis on the effect of the vortex finder diameter and the length of vortex limiter on the flow field and particle collection in a new cyclone separator. *Cogent Engineering*, 5(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1562319>
- Yongsawatdigul, J., & Gunasekaran, S. (1996). Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 20(2), 145–156. <https://doi.org/10.1111/J.1745-4549.1996.TB00851.X>
- Yuan, S., Chang, S. K. C., Liu, Z., & Xu, B. (2008). Elimination of Trypsin Inhibitor Activity and Beany Flavor in Soy Milk by Consecutive Blanching and Ultrahigh-Temperature (UHT) Processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(17), 7957–7963. <https://doi.org/10.1021/jf801039h>
- Yüzer, M. O., & Gençcelep, H. (2023a). Sesame seed protein: Amino acid, functional, and physicochemical profiles. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 72–83. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-555>
- Yüzer, M. O., & Gençcelep, H. (2023b). Sesame seed protein: Amino acid, functional, and physicochemical profiles. *Foods and Raw Materials*, 11(1), 72–83. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-555>
- Zafisah, N. S., Yusof, Y. A., Ali, M. A., Roslan, N. S., Tahir, A., Aziz, M. G., & Chin, N. L. (2018). Processing of raw coconut milk for its value addition using spray and freeze drying techniques. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1), e12602. <https://doi.org/10.1111/JFPE.12602>
- Zhang, F., Li, Y., Xu, Q., Liu, R., Wang, Z., & Ma, C. (2023a). Nondestructive monitoring of freeze drying and spray freeze drying endpoint by temperature-pressure method. *Drying Technology*, 41(16), 2679–2687. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2240407>
- Zhang, F., Li, Y., Xu, Q., Liu, R., Wang, Z., & Ma, C. (2023b). Nondestructive monitoring of freeze drying and spray freeze drying endpoint by temperature-pressure method. *Drying Technology*, 41(16), 2679–2687. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2240407>

- Zhang, X., Guo, D., Xue, J., Yanniotis, S., & Mandala, I. (2017a). The effect of salt concentration on swelling power, rheological properties and saltiness perception of waxy, normal and high amylose maize starch. *Food and Function*, 8(10), 3792–3802. <https://doi.org/10.1039/C7FO01041A>
- Zhang, X., Guo, D., Xue, J., Yanniotis, S., & Mandala, I. (2017b). The effect of salt concentration on swelling power, rheological properties and saltiness perception of waxy, normal and high amylose maize starch. *Food & Function*, 8(10), 3792–3802. <https://doi.org/10.1039/C7FO01041A>
- Zhao, X., Li, J., Jin, W., Geng, X., Xu, W., Ye, T., Lei, J., Li, B., & Wang, L. (2015). Preparation and characterization of a novel pH-response dietary fiber: Chitosan-coated konjac glucomannan. *Carbohydrate Polymers*, 117, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2014.09.038>
- Zhou, L., Lin, X., ... A. A.-B. research, & 2016, undefined. (2016). Phytochemical contents and antioxidant and antiproliferative activities of selected black and white sesame seeds. *Wiley Online Library* L Zhou, X Lin, AM Abbasi, B ZhengBioMed Research International, 2016•Wiley Online Library, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8495630>
- Zhou, S., Zhang, X., Zhang, J., Zang, C., Fan, R., Wang, J., Guo, T., Han, R., & Yang, Y. (2025). Differences in physicochemical properties and proteomics analysis of spray- and freeze-dried milk powders from bovine, goat, and horse sources. *Journal of Dairy Science*, 108(2), 1367–1379. <https://doi.org/10.3168/JDS.2024-25146>
- Zielinska, M., & Michalska, A. (2016). Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chemistry*, 212, 671–680. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.003>
- Ziraat, T., & Dergisi, F. (n.d.). Namık Kemal Üniversitesi. Retrieved March 7, 2025, from <http://jotaf.nku.edu.tr>
- Zungur Bastioğlu, A., Tomruk, D., Koç, M., & Ertekin, F. K. (2016). Spray dried melon seed milk powder: physical, rheological and sensory properties. *Journal of Food Science and Technology*, 53(5), 2396. <https://doi.org/10.1007/S13197-016-2214-Z>